

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2024



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electromécanique

**Spécialité:** Electromécanique

**Par:** BENMARS Alaeddine et KLAIAIA Chouaib

### Thème

**Mise en place d'outils de surveillance et de diagnostic vibratoire des machines tournantes fonctionnant en régime variable**

Soutenu publiquement, le 22/06/2024 devant le jury composé de:

Mr DJEBALA Abderrazek	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur/Président
Mme CHAABI Lilia	MCB	Univ. Guelma	Examineur Principal
Mme BENMOHAMED Hanane	MCB	Univ. Guelma	Examineur
Mme FRIOUI Nadia	MCB	Univ. Guelma	Examineur

**Année Universitaire: 2023/2024**

# *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions le bon Dieu qui nous a donné la force et la patience pour terminer nos études. Nous adressons nos reconnaissances particulières à nos chers parents pour leur soutien moral et leur aide sans faille qu'ils nous ont apportés durant tout le cycle de notre scolarité.*

*Nous tenons à remercier Pr. DJEBALA Abderrazek notre encadreur qui a ménagé un grand effort afin de nous permettre de mener à bien ce modeste travail et à qui nous exprimons notre gratitude et nos respects.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et que nous n'avons pas pu citer.*

# *Dédicaces*

*Chaleureusement nous dédions ce modeste travail :*

*A la lumière de notre vie, nos chers parents en  
témoignage pour leur amour et leur sacrifice sans  
limites et à qui nous souhaitons la bonne santé et que  
Dieu nous les garde.*

*A nos frères*

*A nos sœurs*

*A toute la famille*

*A tous nos amis sans exception*

## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire entre dans le cadre du développement des outils de surveillance des machines tournantes fonctionnant en régime variable. L'objectif principal est de proposer un outil fiable de détection des défauts de roulements en régime variable. Le travail a été réalisé sur des signaux mesurés sur un banc d'essais de laboratoire ainsi que sur des signaux réels mesurés en milieu industriel sur une éolienne.

Deux approches différentes ont été appliquées ; la première est basée sur l'utilisation des indicateurs scalaires statistiques. La deuxième consiste à l'application de l'analyse d'ordre jumelée à l'analyse d'enveloppe. Les résultats montrent la grande efficacité du kurtosis et du facteur de crête comme outils de surveillance de l'état des machines en régime variable. Ils sont les indicateurs les plus sensibles aux défauts de type choc, notamment les roulements et les engrenages, même en régime variable.

L'analyse d'ordre jumelée à l'analyse d'enveloppe a permis une détection claire, efficace et surtout précoce des différents défauts de roulements testés dans ce mémoire, et ceci dans différentes plages de vitesse. Cette approche a permis, pour les signaux de l'éolienne par exemple, la détection du défaut de roulement plusieurs jours avant que les indicateurs scalaires le permettent.

Faire un compromis entre analyse statistique et analyse d'ordre jumelée à l'analyse d'enveloppe semble être la démarche idéale pour permettre, à la fois, une surveillance efficace et un diagnostic fiable en cas d'un éventuel défaut.

**Mots-clés :** Détection, Analyse vibratoire, Défauts de roulements, Régime variable, Analyse statistique, Analyse d'ordre, Analyse d'enveloppe, Eolienne

## **Abstract**

The work presented in this dissertation is part of the development of tools for monitoring rotating machinery operating under variable conditions. The main objective is to propose a reliable tool for detecting bearing faults under variable conditions. The work was carried out on signals measured on a laboratory test bench as well as on real signals measured in an industrial environment on a wind turbine.

Two different approaches were applied; the first is based on the use of statistical scalar indicators. The second involves the application of both time-frequency and envelope analyses. The results show the high efficiency of the kurtosis and the crest factor as reliable tools for monitoring the state of machinery under variable conditions. They are the most sensitive indicators to shock-type faults, particularly bearings and gears, even under variable conditions.

The combination of order tracking and envelope analysis allowed a clear, effective, and early detection of various bearing faults tested in this study, across different speed ranges. This approach, for wind turbine signals for example, enabled the detection of bearing faults several days before scalar indicators would allow.

Making a compromise between statistical analysis and the paired order analysis combined with envelope analysis seems to be the ideal approach to allow both effective monitoring and reliable diagnosis in the case of a potential fault.

**Keywords:** Detection, Vibration analysis, Bearing faults, Variable speed, Statistical analysis, Order analysis, Envelope analysis, Wind turbine

## ملخص الأطروحة

العمل المقدم في هذه الأطروحة يندرج في إطار تطوير أدوات مراقبة الآلات الدوارة التي تعمل في نظام متغير. الهدف الرئيسي هو تقديم أداة موثوقة لكشف عيوب المدحرجات في نظام متغير. تم إجراء العمل على إشارات ملتقطة على منصة اختبار في المختبر وكذلك على إشارات حقيقية ملتقطة في بيئة صناعية على طاحونة هوائية.

تم تطبيق نهجين مختلفين؛ الأول يعتمد على استخدام المؤشرات الإحصائية. الثاني يتمثل في تطبيق تحليل النظام المقرون مع تحليل الغلاف. تظهر النتائج فعالية كبيرة  $kurtosis$  and  $the\ crest\ factor$  كأدوات لمراقبة حالة الآلات في الانظمة المتغيرة. إنهما العلامات الأكثر حساسية للعيوب من نوع الصدمة، خاصة في المدحرجات والتروس، حتى في الانظمة المتغيرة.

تمكن تحليل النظام المقترن بتحليل الغلاف من اكتشاف واضح وفعال وبالأخص مبكر لمختلف عيوب المدحرجات التي تم اختبارها في هذا البحث، وذلك في مجموعات سرعة مختلفة. هذا النهج سمح، على سبيل المثال لإشارات الطاحونة الهوائية، بالكشف عن عيب في المدحرجات قبل عدة أيام من المؤشرات الإحصائية.

التوفيق بين التحليل الإحصائي وتحليل النظام المقرون مع تحليل الغلاف يبدو أنه الخطوة المثلى للسماح في نفس الوقت بمراقبة فعالة وتشخيص موثوق في حالة حدوث عيب محتمل.

**الكلمات الرئيسية:** الكشف، التحليل الاهتزازي، عيوب المدحرجات، النظام المتغير، التحليل الإحصائي، تحليل النظام، تحليل الغلاف، طاحونة الرياح

# Liste des tableaux

## Chapitre 1

Tableau 1.1 : Les niveaux de maintenance .....	6
--	---

## Chapitre 2

Tableau 2.1 : Fréquences caractéristiques des défauts de roulements à billes .....	19
--	----

Tableau 2.2 : Fréquences caractéristiques des défauts de roulements à billes après simplification.....	22
--	----

## Chapitre 3

Tableau 3.1 : Caractéristiques géométriques et ordres des défauts pour les roulements utilisés. ....	28
--	----

Tableau 3.2 : Détails des sous-signaux obtenus en cas d'accélération et leurs plages de vitesse .....	30
---	----

Tableau 3.3 : Détails des sous-signaux obtenus en cas de décélération et leurs plages de vitesse .....	30
--	----

## Chapitre 4

Tableau 4.1 : Les 15 signaux choisis pour l'étude .....	46
---	----

# Liste des figures

## Chapitre 1

Figure 1.1 : Les différentes formes de maintenance .....	6
Figure 1.2 : Pourcentage d'utilisation des différentes techniques de la maintenance conditionnelle .....	7
Figure 1.3 : Exemple d'une analyse vibratoire d'une machine tournante.....	9
Figure 1.4 : Spectre d'une machine tournante.....	10
Figure 1.5 : Cepstre montrant un défaut d'engrenage dans une boîte de vitesse .....	11
Figure 1.6 : Exemple d'une analyse d'enveloppe d'une machine.....	12

## Chapitre 2

Figure 2.1 : Balourd statique .....	14
Figure 2.2 : Balourd dynamique.....	14
Figure 2.3 : Spectre typologique d'un balourd.....	15
Figure 2.4 : Désalignements d'arbre .....	15
Figure 2.5 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial .....	16
Figure 2.6 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement axial.....	16
Figure 2.7 : Spectre théorique d'un engrenage sain .....	17
Figure 2.8 : Mise en évidence d'un défaut de denture d'engrenage.....	17
Figure 2.9 : Paramètres géométriques des roulements .....	20
Figure 2.10 : Spectre théorique d'un écaillage affectant la bille.....	20
Figure 2.11 : Mise en évidence d'un défaut de roulement .....	21
Figure 2.12 : Simulation des chocs de défaut dans le cas d'une accélération.....	22
Figure 2.13 : Simulation des chocs de défaut dans le cas d'une décélération.....	23

## Chapitre 3

Figure 3.1 : Photo du banc d'essais MFS .....	26
Figure 3.2 : Organes constitutifs du simulateur (vue de face).....	27
Figure 3.3 : Montage du roulement testé dans son logement.....	28
Figure 3.4 : Signal vibratoire mesuré dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure du roulement en mode accélération.....	29
Figure 3.5 : Signal vibratoire mesuré dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure du roulement en mode décélération .....	29

Figure 3.6 : Les neuf sous-signaux obtenus en cas d'accélération.....	31
Figure 3.7 : Les neuf sous-signaux obtenus en cas de décélération.....	32
Figure 3.8 : RMS pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération.....	33
Figure 3.9 : Valeur crête pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération.....	33
Figure 3.10 : Valeur crête-à-crête pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération.....	34
Figure 3.11 : Kurtosis pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération.....	34
Figure 3.12 : Facteur de crête pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération.....	34
Figure 3.13 : RMS pour les neuf sous-signaux en cas de décélération.....	35
Figure 3.14 : Valeur crête pour les neuf sous-signaux en cas de décélération.....	35
Figure 3.15 : Valeur crête-à-crête pour les neuf sous-signaux en cas de décélération.....	36
Figure 3.16 : Kurtosis pour les neuf sous-signaux en cas de décélération.....	36
Figure 3.17 : Facteur de crête pour les neuf sous-signaux en cas de décélération.....	36
Figure 3.18 : Spectre d'ordre des neufs sous-signaux en cas d'accélération.....	39
Figure 3.19 : Spectre d'ordre des neufs sous-signaux en cas de décélération.....	41

#### **Chapitre 4**

Figure 4.1 : différents types d'éoliennes.....	44
Figure 4.2 : (a) schéma cinématique et (b) photo d'une éolienne.....	45
Figure 4.3 : dimensions du roulement à rouleaux coniques (skf 32222 j2).....	45
Figure 4.4 : signaux choisis couvrant la durée de vie du roulement.....	51
Figure 4.5 : kurtosis pour les 15 jours.....	51
Figure 4.6 : facteur de crête pour les 15 jours.....	52
Figure 4.7 : rms pour les 15 jours.....	52
Figure 4.8 : valeur crête pour les 15 jours.....	52
Figure 4.9 : valeur de crête à crête pour les 15 jours.....	53
Figure 4.10 : spectres d'ordre des 15.....	56

# Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **Chapitre I : Approche globale du diagnostic vibratoire**

<b>1. Notions fondamentales sur la maintenance.....</b>	<b>3</b>
1.1. Introduction .....	3
1.2. Définition de la maintenance .....	3
1.3. Objectifs de la maintenance.....	3
1.4. Les différentes formes de maintenance .....	4
1.4.1. La maintenance corrective .....	4
1.4.2. Maintenance préventive .....	4
1.5. Niveaux de maintenance .....	6
<b>2. Approche sur la maintenance conditionnelle.....</b>	<b>7</b>
2.1. Généralités .....	7
2.2. Aperçu des technologies .....	7
2.2.1 Analyse vibratoire .....	7
2.2.2. L'analyse d'huile .....	8
2.2.3. Thermographie .....	8
2.2.4. Analyse par ultrason.....	8
<b>3. L'analyse vibratoire.....</b>	<b>8</b>
3.1. Indicateurs scalaires.....	9
3.2. Analyse spectrale .....	10
3.3. Analyse cepstrale .....	11
3.4. Analyse d'enveloppe.....	11
3.5. Analyse Temps-Fréquence.....	12
<b>4. Conclusion du chapitre .....</b>	<b>13</b>

## **Chapitre II : Principaux défauts des machines tournantes**

<b>1. Principaux défauts des machines tournantes.....</b>	<b>14</b>
---	-----------

1.1. Balourd .....	14
1.2. Désalignement .....	15
1.3. Défaut de denture d'engrenage.....	16
1.3.1. Spectre d'un engrenage.....	17
1.4. Défaut de roulement .....	17
1.4.1. Durée de vie nominale des roulements .....	17
1.4.2. Les aspects de détériorations des roulements .....	18
1.4.3. Processus de dégradation d'un roulement : .....	18
1.4.4. Fréquences caractéristiques des défauts de roulements .....	19
1.4.5. Signature vibratoires des défaut d'écaillage .....	20
1.4.6. Rupture de cage.....	20
1.4.7. Défaut de billes .....	21
1.4.8. Exemple : (mise en évidence d'un défaut de roulement).....	21
<b>2. Régime variable .....</b>	<b>22</b>
<b>3. Conclusion du chapitre .....</b>	<b>24</b>

## **Chapitre III : Développement d'une démarche pour le diagnostic des défauts de roulements en régime variable**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>2. Plan expérimental et matériel de mesure .....</b>	<b>25</b>
2.1. Banc d'essais Machinery Fault Simulator (MFS) .....	25
2.1.1. Utilisations possibles du MFS .....	25
2.1.2. Description du MFS .....	26
2.2. Acquisition des signaux mesurés .....	26
<b>3. Analyse des signaux mesuré .....</b>	<b>28</b>
3.1. Signaux globaux .....	28
3.2. Décomposition des signaux .....	29
<b>4. Analyse statistique des signaux mesurés .....</b>	<b>33</b>
4.1. Cas de l'accélération.....	33
4.2. Cas de décélération .....	35
<b>5. Analyse d'ordre des signaux.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Conclusion du chapitre .....</b>	<b>42</b>

## Chapitre IV : Application au diagnostic vibratoire d'une éolienne

<b>1. Introduction .....</b>	<b>43</b>
<b>2. Généralités sur les éoliennes .....</b>	<b>43</b>
2.1. Définition de l'énergie éolienne .....	43
2.2. Définition d'une éolienne .....	43
2.3. Différents types des aérogénérateurs .....	43
2.4. Base de données et acquisition des signaux .....	44
<b>3. Diagnostic vibratoire d'une éolienne .....</b>	<b>45</b>
3.1. Description des données .....	45
3.2. Signaux choisis pour l'étude.....	46
3.3. Analyse statistique des signaux mesurés .....	51
3.4. Analyse d'ordre.....	53
<b>4. Conclusion du chapitre .....</b>	<b>57</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>58</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>60</b>
<b>Annexes</b>	

## Introduction générale

Un service maintenance s'intéresse toujours à l'augmentation de la disponibilité d'un bien avec le moindre coût possible, en minimisant le nombre des interventions non nécessaires et en exécutant les actions qui peuvent allonger le cycle de vie de ce bien. Pour achever ce but, plusieurs formes de maintenance ont été développées, la maintenance dite conditionnelle peut être considérée comme l'une des formes les plus optimisées, car elle s'appuie sur un principe qui n'implique pas l'attente d'occurrence de la défaillance pour lancer les interventions comme dans la maintenance corrective, ainsi que les interventions exécutées à des intervalles prédéterminés et fixes avec un risque de gaspillage financier comme l'implique la maintenance systématique. Pour la maintenance conditionnelle, l'action ne se déclenche que lorsqu'un paramètre de contrôle dépasse un seuil prédéterminé, fixé par le constructeur ou par les normes de sécurité. Ce qui participe à la minimisation des coûts.

Les machines tournantes font partie intégrante et indissociable de l'industrie moderne. Un défaut surtout les roulements peut compromettre la production et conduire à la baisse technicoéconomique d'une entreprise. L'installation d'un contrôle efficace et constant de ces machines est donc un aspect important à prendre en considération dans les différentes politiques de gestion de tout système de production. La surveillance de ces machines s'appuie essentiellement sur l'extraction d'informations révélatrices des conditions de dégradation rencontrées. Dans ce contexte, plusieurs sources d'information ont été explorées et expérimentées dans le passé, avec plus ou moins d'efficacité. Parmi lesquelles nous pouvons citer, l'analyse d'huile, l'analyse de température, l'émission acoustique et l'analyse vibratoire avec une plus grande intensité. L'efficacité de l'analyse vibratoire repose en grande partie sur la compétence des hommes qui s'appuient sur l'expérience technique et le retour d'expérience. L'approche conditionnelle qui se base sur l'inspection avant une décision de réparation, peut être abordée en deux étapes : la détection et le diagnostic. Lorsque l'objectif est limité à la détection, un groupe d'indicateurs scalaires de dégradation peut être suffisant. Ces indicateurs, qui en cas de dépassement de seuils, juste informent sur la présence d'un défaut qu'il faudra être analysé avec plus de précision. Alors que le diagnostic est l'outil permettant la détermination de la nature précise du défaut, de sa gravité, de l'urgence de l'intervention, ainsi que son association avec un composant ou une pièce spécifique. Pour faire cela, le diagnostic fait appel à des techniques d'investigations plus poussées que les indicateurs scalaires utilisés durant la surveillance : l'analyse spectrale sur des plages de fréquences plus ou moins étroites, l'amélioration de la résolution par un zoom, la détection d'enveloppe pour la démodulation, le cepstre, le filtrage par ondelettes, la décomposition du signal, le re-échantillonnage, la cyclostationnarité ... ect

De centaines de travaux ont été réalisés, dans lesquels les chercheurs ont utilisé ces outils avec succès pour la détection des défauts. Le problème est que la plupart de ces outils ont été développés pour être utilisés dans le cas où la vitesse est constante, les chercheurs et les ingénieurs ont été confrontés par des difficultés lors de l'utilisation de ces méthodes dans le cas où la vitesse est variable, dès que l'évolution continue de l'industrie a créé des machines

## Introduction générale

tournantes qui fonctionnent dans des conditions stationnaires. Ceci implique l'évolution de la surveillance elle-même soit en modifiant les méthodes classiques pour les rendre applicables dans le régime variable, ou en développant des nouvelles techniques spécifiques pour ce type de machines.

Le but de ce mémoire est d'utiliser, voire d'adapter, des connaissances et des techniques afin de pouvoir d'une part comprendre et connaître l'effet de la variation de la vitesse sur le processus de diagnostic des défauts surtout les roulements par l'analyse vibratoire, et d'autre part proposer une méthode de détection fiable et robuste et qui permet, elle-même, la détection et le diagnostic des défauts au régime variable.

Le mémoire comporte donc quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une revue de la littérature relative aux différents types de maintenance utilisés par les installations de machines industrielles ainsi que la méthode de diagnostic des défauts en régime variable par l'analyse d'ordre.

Le deuxième chapitre dévoile les principaux défauts des machines tournantes et leurs spectres typologiques. Une attention particulière est réservée aux défauts de roulements, objet de notre travail, notamment en régime variable.

Le troisième chapitre est destiné à la proposition d'une démarche pour la détection des défauts de roulements en régime variable. Cette démarche englobe d'une part l'utilisation d'une analyse statistique basée sur les indicateurs scalaires, et d'une autre part l'application de l'analyse d'ordre jumelée au spectre d'enveloppe. Le travail est purement expérimental, réalisé sur des signaux mesurés sur un banc d'essais de laboratoire.

Enfin le quatrième chapitre vise à appliquer la démarche développée dans le chapitre 3 pour le diagnostic vibratoire d'une éolienne. Nous avons exploité des signaux d'une base de données Américaine : Green Power Monitoring System pour réaliser ce travail. Les signaux ont été mesurés chaque jour durant une période de cinquante jours. Pour détecter les défauts, nous avons utilisé une analyse statistique et l'analyse d'ordre comme il s'agit d'un régime variable.

# CHAPITRE I

## Approche globale du diagnostic vibratoire

### 1. Notions fondamentales sur la maintenance

#### 1.1. Introduction

La fonction maintenance a pour but d'assurer la disponibilité optimale des installations de production et de leurs annexes, impliquant un minimum économique de temps d'arrêt. Jugée pendant longtemps comme une fonction secondaire entraînant une perte d'argent inévitable, la fonction maintenance est en général, assimilée à la fonction dépannage et réparation d'équipements soumis à usage et vieillissement.

La véritable portée de la fonction maintenance mène beaucoup plus loin : elle doit être une recherche incessante de compromis entre la technique et l'économique. Il reste alors beaucoup à faire pour que sa fonction productive soit pleinement comprise. Une organisation, une planification et des mesures méthodiques sont nécessaires pour gérer les activités de maintenance.

#### 1.2. Définition de la maintenance

Elle est définie selon L'AFNOR X 60-010 comme : « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». [1]

Le rôle principal de la maintenance se résume à :

- La réduction des coûts de maintenance ;
- L'accroissement de la durée rentable de vie des équipements ;
- Réduction des accidents et des risques concernant la sécurité des hommes et de l'environnement.

#### 1.3. Objectifs de la maintenance

##### 1) Objectifs de coût

- Minimiser les dépenses de maintenance ;
- Assurer la maintenance dans les limites d'un budget. ;
- Avoir des dépenses de maintenance portant sur le service exigé par l'installation en fonction de leur âge et de leur taux d'utilisation ;
- Tolérer à la discrétion du responsable de la maintenance une certaine qua dépense imprévue. [2]

##### 2) Objectifs opérationnels

- Maintenir le bien durable :
  1. Dans un état acceptable
  2. Dans des meilleures conditions
- Assure la disponibilité maximale à un coût raisonnable ;

- Eliminer les pannes à tout moment et au meilleur cout ;
- Maximiser la durée de vie de bien ;
- Remplacer le bien à des périodes prédéterminées ;
- Assurer au bien des performances de haute qualité ;
- Assurer au bien un fonctionnement sûr et efficace ;
- Obtenir de l'investissement un rendement maximum ;
- Garder au bien une présentation suffisamment satisfaisante ;
- Maintenir le bien dans un état de propreté absolue. [2]

#### **1.4. Les différentes formes de maintenance**

Il y a deux types de maintenance ; celle que l'on fait après la panne, pour réparer et celle que l'on fait pour éviter la panne. L'arbre de la maintenance comprend deux grands embranchements principaux : la « Maintenance Corrective ou Curative » et la « Maintenance Préventive qui se subdivise en Maintenance Systématique et en Maintenance Conditionnel ou Prédictive ». [4]

##### **1.4.1. La maintenance corrective**

C'est une maintenance destinée à rendre la santé aux machines qui l'on perdu. C'est une maintenance peu efficace pour les machines vitales de production mais qui trouve son application bien adaptée à certains matériels peu coûteuse, et hors production, comme les appareils domestique de confort, par exemple. Donc la maintenance corrective est l'ensemble des activités réalisées après la défaillance du bien ou la dégradation de sa fonction pour lui permettre d'accomplir une reuise au moins provisoirement. Les activités de la maintenance corrective sont : [4]

- La localisation de la défaillance ;
- Le diagnostic ;
- Le contrôle du bon fonctionnement.

##### **1.4.1.1. Maintenance palliative**

Activités de la maintenance corrective destinées à permettre à un bien d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Appelée couramment dépannage, cette maintenance palliative est principalement constituée d'action à caractère provisoire qui devront être suivies par des actions à caractère définitif. [4]

##### **1.4.1.2. Maintenance curative**

Activités de la maintenance corrective ayant pour objectif de rétablir un bien dans un état spécifié ou de lui permette d'accomplir une fonction requise. Les résultats des activités réalisées doit présenter un caractère permanent. Ces activités peuvent être des réparations, des modifications ou aménagement ayant pour objet de supprimer la ou les défaillance(s). [4]

##### **1.4.2. Maintenance préventive**

Selon la norme AFNOR X60-010 « maintenance ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage

(maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou service (maintenance conditionnelle) ». Les objectifs de la maintenance préventive sont les suivants :

- ✓ Augmenter la durée de vie des équipements ;
- ✓ Diminuer de la probabilité de défaillance ;
- ✓ La prévention de bonnes conditions à la maintenance corrective ;
- ✓ L'Amélioration des conditions de travail du personnel de production ;
- ✓ Diminuer les causes d'accidents graves ;
- ✓ L'Augmentation de la fiabilité et la disponibilité des systèmes. [4]

#### **1.4.2.1. La maintenance systématique**

Consiste à opérer des remplacements systématiques de composantes, à intervalles régulier, même si les pièces déposées sont encore en assez bon état. C'est un moyen sûr d'avoir des machines fiables, mais c'est un moyen coûteux qui ne se justifie que lorsque la machine est vitale dans l'entreprise, qu'elle est inaccessible en cours de fabrication, que la fabrication ne peut être arrêtée sans dégradations majeurs et que le coût des pièces remplacées est fiable au regard de ceux des investissements et de la production.

#### **1.4.2.2. La maintenance conditionnelle**

Consiste à n'intervenir pour remplacer les composants, ou faire des opérations de remise à l'état initial, qu'après avoir constaté des dégradations significatives et autant que possible fabrication en marche. L'idéal est que la machine puisse fonctionner le plus longtemps possible pour n'être arrêtée que juste avant que la panne ne survienne, ou que des pertes de fabrication n'apparaissent. Cela implique une surveillance constante et complète, avec des systèmes étalonnés pour déclencher l'alerte quand les limites sont atteintes. Ces systèmes d'alerte peuvent être manuels ou automatiques, extrêmement simples ou très sophistiqués. La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne pas changer l'élément que lorsqu'il y a des signes de vieillissement ou d'usure de ce dernier. La maintenance conditionnelle (appelée aussi parfois maintenance prédictive suivant l'état de fonctionnement) comporte trois phases :

- ✓ La détection du défaut qui se développe ;
- ✓ L'établissement d'un diagnostic ;
- ✓ L'analyse de tendance.

Le matériel géré en maintenance préventive conditionnelle est fiable. Les pannes tendent à disparaître, les coûts directs d'intervention sont raisonnables et bien maîtrisés, les imprévus sont rares. C'est un bon mode de gestion applicable à toutes industries et à tous les types de machines de production. [4]

#### **1.4.2.3. La maintenance prévisionnelle**

Ce mode préventif s'appuie sur la connaissance exacte et rigoureuse des processus de dégradation. En suivant leur évolution on se situe en permanence par rapport à l'échéance fatale. Cela permet de prévoir avec certitude et confiance la date exacte de la défaillance. La fabrication en étant avertie assez tôt, et la maintenance ayant le recul suffisant pour préparer son intervention, l'urgence disparaît et chacune des parties, en accord avec l'autre, peut réaliser son programme sans perturbation. Ce mode de préventif doit s'appliquer chaque fois que c'est

possible. Une large panoplie de moyen aide au diagnostic : mesure de vibration, analyse des huiles, bilans de rendement, mais leur interprétation exacte nécessite toujours des compétences de spécialiste. [4]

La figure (1.1) illustre les différentes formes de maintenance.

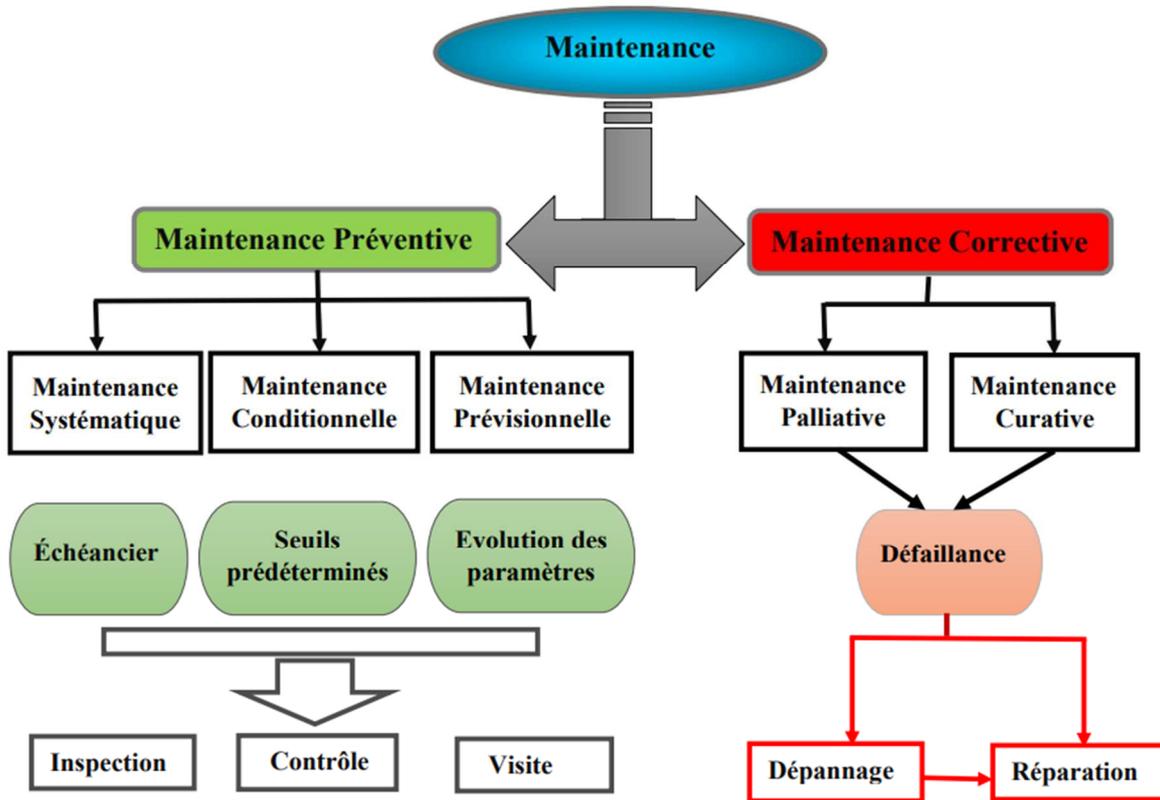


Figure 1.1 : Les différentes formes de maintenance [3]

**1.5. Niveaux de maintenance**

Le degré du développement de la maintenance est classifié en 5 niveaux. Ces niveaux sont donnés par la norme à titre indicatif pour servir de guide.

Niveau	Activités
Niveau 1	Ronde, petit entretien, graissage
Niveau 2	Echange standard, contrôles du bon fonctionnement
Niveau 3	Diagnostic, petites réparations, opérations mineures préventives
Niveau 4	Travaux de maintenance préventive et corrective, réglage des moyens de mesure
Niveau 5	Rénovation, reconstruction et réparations importes

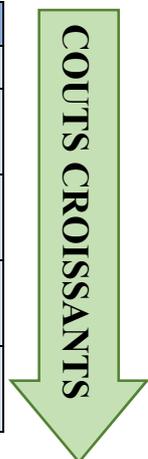


Tableau 1.1 : Les niveaux de maintenance

## 2. Approche sur la maintenance conditionnelle

### 2.1. Généralités

La maintenance conditionnelle permet de déterminer la nature de l'action courante à effectuer sur le système et éventuellement la date de la prochaine intervention de maintenance en fonction du niveau de vieillissement du système.

La maintenance conditionnelle est un outil efficace pour le contrôle du compromis entre maintenance préventive et maintenance corrective. Cependant, sa mise en place dans un contexte industriel est souvent empirique et ne conduit pas à l'obtention des meilleurs gains. [5]

### 2.2. Aperçu des technologies

Selon la norme AFNOR X 60-010, la maintenance conditionnelle est définie comme une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur de mesure d'une usure révélateur de l'état de dégradation du bien). Le choix des indicateurs dépend essentiellement de leur capacité à décrire l'installation surveillée. Ils sont de deux ordres ; les critères de consommation d'énergie, qualité du produit fini.....et les critères de comportement.

Parmi ces dernières, on peut citer de manière non exhaustive, les contrôles de bruit, l'analyse de la température, l'analyse d'huile, la mesure de vibrations. Ce dernier critère est le plus souvent utilisé en raison de son efficacité, de sa réactivité, de sa facilité de mise en œuvre et de la richesse des résultats obtenus. Il est non seulement l'outil de base de maintenance mais aussi de contrôle qualité dans le cas d'une recette vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état. Mais la corrélation de plusieurs critères permet d'affiner les diagnostics. [\*\*]

La figure (1.2) montre le taux d'utilisation des techniques de maintenance conditionnelle dans le milieu industriel.

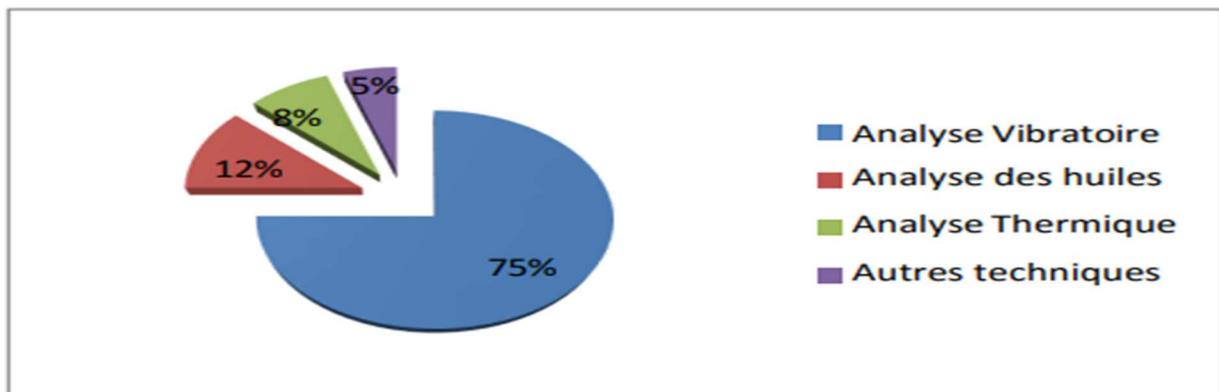


Figure 1.2 : Pourcentage d'utilisation des différentes techniques de la maintenance conditionnelle [5]

#### 2.2.1 Analyse vibratoire

Fiable et efficace, l'analyse vibratoire occupe une place considérable dans les stratégies de maintenance conditionnelle. Elle permet la détection d'une large gamme de défauts rencontrés sur les machines tournantes. Son principe consiste à mesurer un signal vibratoire sur la machine et ensuite traiter ce signal par des outils spécifiques pour en tirer des informations relatives à

l'occurrence d'un défaut. Profitant du développement des outils et techniques de traitement des signaux, l'analyse vibratoire permet désormais la prédiction. Dans ce contexte, le maintenicien peut, par le biais de techniques modernes de traitement de signal, détecter le défaut dès sa naissance, suivre son évolution dans le temps et choisir le moment opportun pour programmer son intervention. [6]

### **2.2.2. L'analyse d'huile**

Moins répandue que l'analyse vibratoire dans le domaine industriel, cette technique est plutôt réservée aux machines contenant des fluides de lubrification (Moteurs thermiques, motoréducteurs, ...etc.). Elle consiste à prélever un échantillon de l'huile de lubrification et de l'analyser pour en déterminer la teneur en polluants issus de l'usure des pièces mécaniques. Le coût de cette technique reste relativement élevé, la raison pour laquelle la plupart des entreprises ayant recours à l'analyse spectrométrique attribuent cette tâche à la sous-traitance. [6]

### **2.2.3. Thermographie**

L'analyse thermique ou thermographie consiste à mesurer la température des structures, systèmes, machines, ...etc. Contrairement à ce qu'on croit, elle n'est pas réservée aux équipements électriques uniquement. Toute anomalie dans la signature thermique de la machine peut être la cause d'un défaut potentiel. Le développement des caméras infrarouges a permis la télémessure de l'émission thermique des structures, d'où le nom de la thermographie infrarouge. [6]

### **2.2.4. Analyse par ultrason**

Cette technique a une similitude avec l'analyse vibratoire et/ou acoustique. La différence principale réside dans la plage de fréquence de l'analyse. La bande de fréquence de l'analyse vibratoire varie entre 1 Hz et 30 KHz, alors que celle de l'émission acoustique débute à partir de 30 KHz. Cette technique est très fiable pour la détection de fissures et des fuites par exemple. [6]

## **3. L'analyse vibratoire**

Les vibrations des machines sont considérées comme la réponse de la fonction de transfert de leurs structures aux différents efforts auxquels elles sont sollicitées. La surveillance des vibrations de ces structures peut permettre donc de déceler l'apparition d'efforts perturbateurs à un stade précoce, permettant par la même occasion, de détecter ou d'avorter l'apparition de défaillances. En plus de son efficacité, la facilité relative de son installation rend l'analyse des signaux vibratoires une des techniques les plus utilisées pour la surveillance et le diagnostic des défauts des machines tournantes dans l'industrie. La figure (1.3) montre l'exemple de l'analyse vibratoire d'une machine tournante. Il existe plusieurs techniques pour analyser les vibrations générées par la machine tournante : [7]

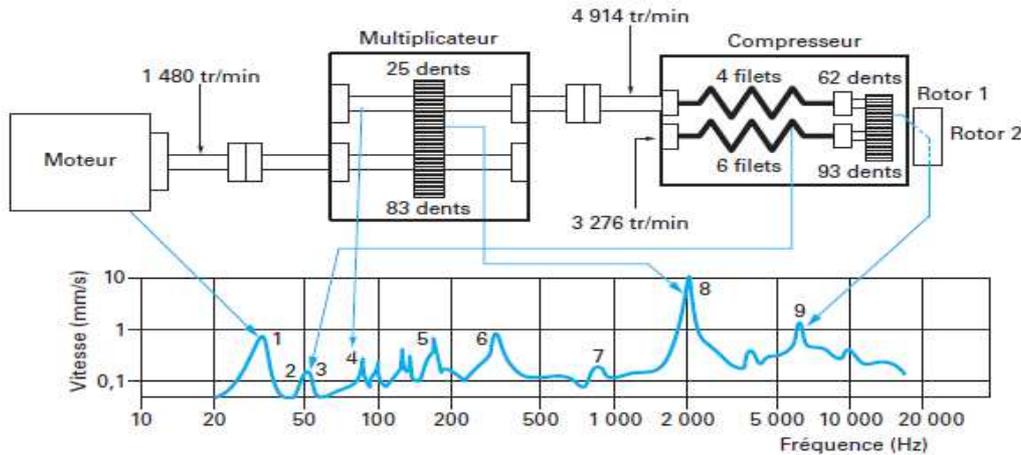


Figure 1.3 : Exemple d'une analyse vibratoire d'une machine tournante [10]

### 3.1. Indicateurs scalaires

Cette technique rapide extrait des indicateurs, pour la plupart statistiques, résumant l'information contenue dans le signal et permettant de générer un repère. Le suivi d'évolution du repère donne une information plus ou moins précise et complète sur son état de fonctionnement.

Une multitude d'indicateurs existent plus ou moins performants et adéquats pour le dépistage de certaines défaillances plus que d'autres. Les indicateurs les plus utilisés sont décrits comme suit :

- a) **RMS** : Le RMS, nommée aussi valeur efficace ou moyenne quadratique d'un signal, est un des premiers indicateurs utilisés en industrie, dû notamment à sa simplicité et à sa rapidité d'exécution. Une variation excessive du niveau RMS signifie en général un changement de l'état de fonctionnement et donc une défaillance. Son expression mathématique est de la forme :

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [S(t)]^2} \quad (1.1)$$

- b) **Facteur de crête** : c'est un indicateur de surveillance simple à calculer, car c'est le rapport entre la valeur crête du signal et sa valeur efficace (RMS), comme il peut se calculer par le rapport entre la valeur maximale du signal et son écart type. Cet indicateur est utilisé pour la détection spécifique d'impulsions ou de choc présents dans le signal vibratoire. Son expression mathématique est de la forme :

$$Fc = \frac{V_{crete}}{RMS} \quad (1.2)$$

- c) **Kurtosis** : Plus spécifique au dépistage des défauts de roulements, le kurtosis approche la valeur de 3 pour un fonctionnement sans défauts de roulement, et augmente de façon remarquable dès l'apparition d'impulsions dues à la naissance d'un défaut. Le kurtosis tend à revenir à 3 dès que la dégradation entre en phase terminale. Son expression mathématique est de la forme :

$$Kurtosis = \frac{\frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [S(t) - \bar{S}]^4}{\left[ \frac{1}{Ne} \sum_{n=1}^{Ne} [S(t) - \bar{S}]^2 \right]^2} \quad (1.3)$$

**d) Moment d'ordre 3 :** Couramment appelé « Skewness », il représente le taux de dissymétrie de la distribution d'amplitudes du signal par rapport à la valeur moyenne. Il peut se calculer par l'expression :

$$M_3 = S_k = \frac{1}{\sigma^3} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^3 P(x) dx \tag{1.4}$$

### 3.2. Analyse spectrale

Le signal vibratoire extrait d'une machine tournante est très complexe, originaire des différents organes la composant. La transformée de Fourier est un outil mathématique permettant de transformer ces signaux complexes, de les décomposer en une multitude de composantes élémentaires sinusoïdales et de les représenter sous forme d'un spectre « Amplitudes-fréquence ». La transformée de Fourier rapide FFT développée par James Cooley et John Tukey, ne requiert qu'un temps de calcul minime pour appliquer la transformée de Fourier Discrète. La FFT a été largement implémentée dans les systèmes de diagnostic des machines tournantes. Son expression mathématique est de la forme : [8]

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) e^{-j2\pi ft} dt \tag{1.5}$$

Où : X(f) est la transformée de Fourier, x(t) est le signal temporel, t est la variable temps, f est la variable fréquence. Dans des conditions de fonctionnement stationnaires « vitesses de rotations et chargements stationnaires », chaque organe de la machine émet des vibrations à un certain niveau d'amplitude, et à une cadence « fréquence » constante dans le temps. L'apparition de défauts dans les organes de la machine tournante génère des efforts supplémentaires qui se traduisent par des vibrations se répétant à une cadence « fréquence » constante relative à la fréquence de rotation. Suivre les amplitudes des vibrations à ces fréquences, permet de suivre les conditions de fonctionnement des différents organes de la machine tournante. [8]

La figure (1.4) montre l'exemple d'un spectre d'une machine tournante montrant plusieurs multiples de la vitesse de rotation.

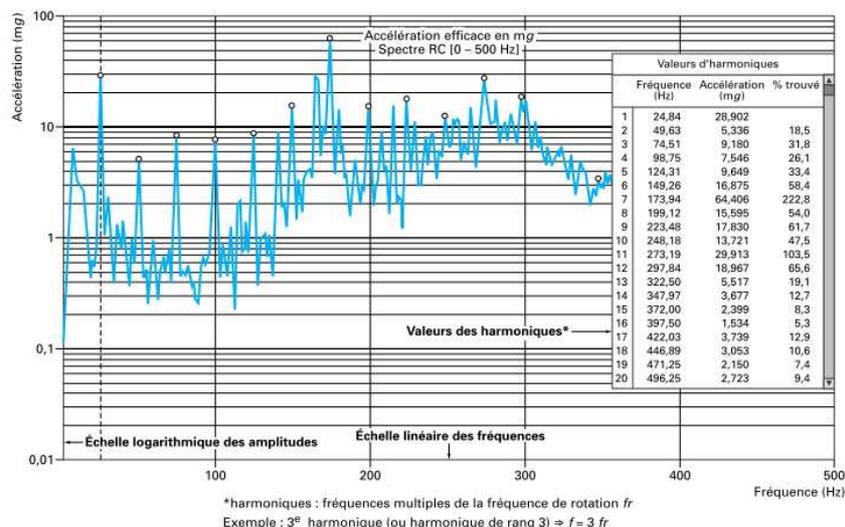


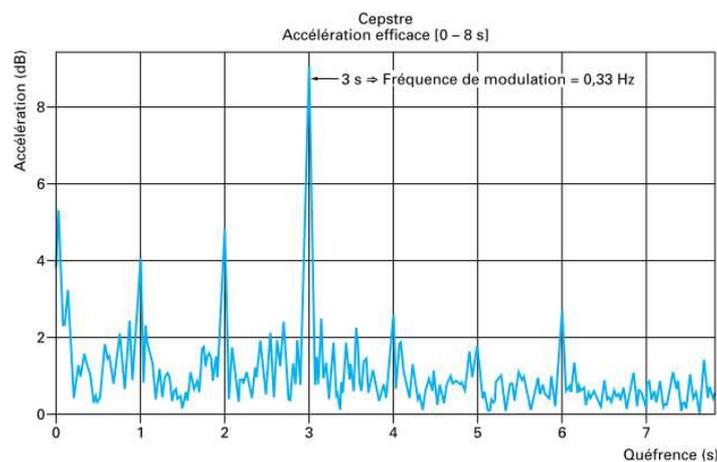
Figure 1.4 : Spectre d'une machine tournante [9]

### 3.3. Analyse cepstrale

L'analyse cepstrale est une technique complémentaire d'analyse, développée sur plusieurs variantes, dont les plus utilisées sont le cepstre complexe défini comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier, s'exprime selon une variable uniforme au temps, et est représentée par la formule : [8]

$$C = TF^{-1}[\text{Ln}|X(f)|] \quad (1.6)$$

De même que la transformée de Fourier permet de mettre en évidence les périodicités d'un signal temporel, le cepstre met en évidence les périodicités de sa transformée de Fourier. Opinant par la même occasion, de rechercher, d'identifier et de quantifier rapidement toutes les familles de composantes périodiques qui peuvent se manifester dans le spectre sous forme de peignes de raies ou bandes latérales de modulation autour d'une fréquence caractéristique ce qui n'est pas toujours évident dans le cadre de l'analyse spectrale. Les unités et grandeurs sont autres dans le cepstre que ceux utilisés dans l'analyse spectrale, ainsi on trouve entre autres ; les périodicités qui sont appelées « Quéfrenes » et sont exprimées en secondes ou millisecondes et les harmoniques qui deviennent des « Rahmoniques ». La figure (1.5) montre le cepstre d'une boîte de vitesse montrant un défaut d'engrenage.



**Figure 1.5 : Cepstre montrant un défaut d'engrenage dans une boîte de vitesse [9]**

### 3.4. Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une technique de détection précoce des défauts de type choc. Pour ce faire le signal vibratoire est relevé dans une bande fréquentielle large, et filtré autour d'une fréquence de résonance. Le signal est ensuite redressé « en mettant au positif toutes les valeurs négatives », et la transformée d'Hilbert est appliquée afin de relever son enveloppe et ainsi dissocier le signal modulé (fréquences de résonance) du signal modulant correspondant au défaut recherché. Le diagnostic final pourra par la suite être rendu après analyse spectrale de l'enveloppe. [8]

La figure (1.6) montre l'exemple d'une analyse d'enveloppe.

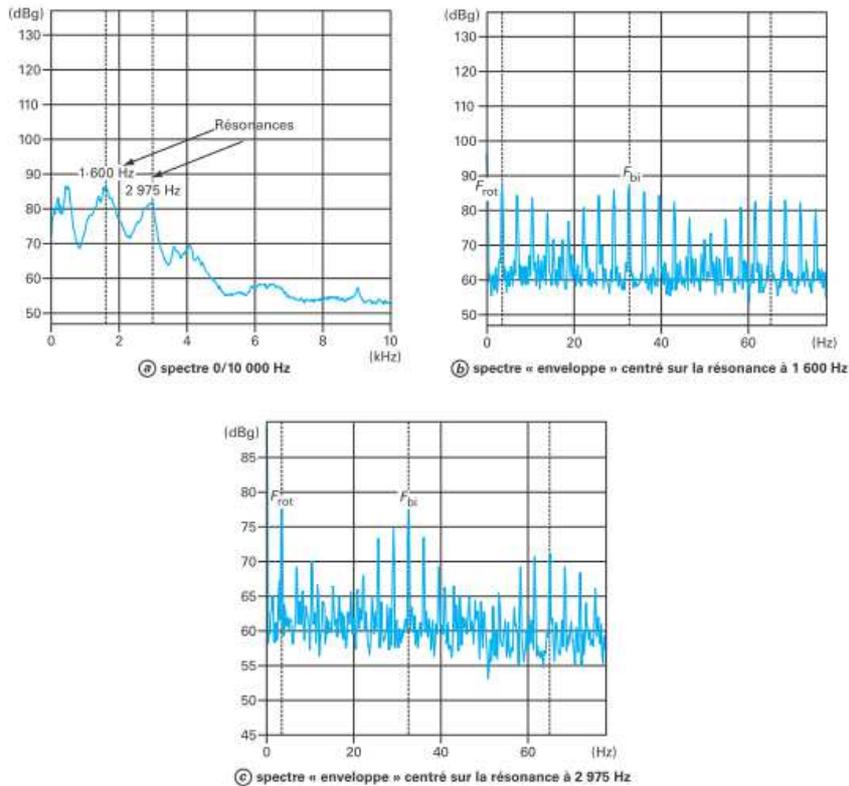


Figure 1.6 : Exemple d'une analyse d'enveloppe d'une machine [10]

### 3.5. Analyse Temps-Fréquence

L'analyse spectrale classique basée sur la transformée de Fourier présente un sérieux inconvénient, vu qu'elle suppose que la majorité des signaux sont infinis dans le temps ou périodiques, alors qu'en réalité ils peuvent être de courte durée et comporter des variations au cours du temps d'acquisition. Pour pallier cet inconvénient, des techniques ont été développées analysant les variations fréquentielles au cours du temps. Parmi ces techniques on trouve, la transformée de Fourier à Court Terme, la Distribution de Wigner-Ville, ou les techniques à base d'ondelettes.

#### **4. Conclusion du chapitre**

L'objectif de ce chapitre est de donner d'un aperçu sur l'approche globale adoptée dans le diagnostic vibratoire des machines tournantes. Tout d'abords des notions de base sur la maintenance ont été présentées. Ensuite la maintenance conditionnelle et les différentes techniques utilisées ont été discutées avec une attention particulière sur l'analyse vibratoire. Enfin nous avons présenté les principaux outils utilisés dans l'analyse vibratoire pour la détection des différents défauts dans les machines tournantes illustrés avec des exemples.

## CHAPITRE II

### Principaux défauts des machines tournantes

#### 1. Principaux défauts des machines tournantes

Une machine tournante n'est en fait qu'un jeu de mécanismes mobiles entre eux, et d'organes combinés dans le but d'effectuer une tâche précise, transformer une énergie, transmettre un mouvement...etc. Une panne dans une machine tournante n'est que la résultante d'une avarie ou d'une suite d'avarie sur l'un ou plusieurs de ses organes. Les défauts les plus courants pouvant se manifester dans les machines tournantes sont : le balourd, désalignement, fissuration et jeu, courroies, engrenages, roulements, cavitation, et les défauts électriques.

Dans ce qui suit on présente les fréquences caractéristiques de ces défauts et on mettra l'accent sur les défauts de roulements.

##### 1.1. Balourd

Le balourd est un défaut qui se rencontre en présence du déséquilibre de l'arbre d'une machine tournante causé par une mauvaise répartition spatiale des masses dans la structure, entraînant un déplacement du centre de gravité en dehors de l'axe géométrique du rotor de la machine tournante. Il existe plusieurs types de balourd : balourd statique, balourd de couple, balourd dynamique et balourd thermique. Les figures (2.1) et (2.2) montrent le schéma d'un balourd statique et d'un balourd dynamique.

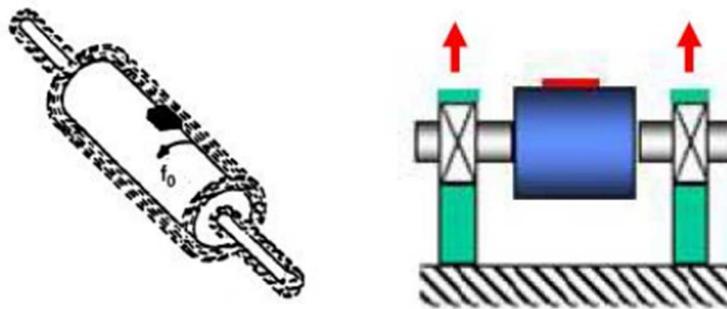


Figure 2.1 : Balourd statique [11]

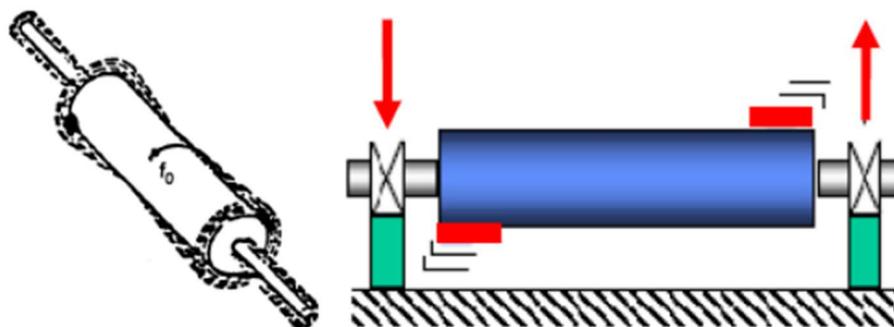


Figure 2.2 : Balourd dynamique [11]

La force engendrée par le balourd est fonction de la masse et du rayon du cercle sur lequel le rotor tourne. Elle est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation.

Le balourd se manifeste par une nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation,  $f_r$ ) [9] :

$$f_r = \frac{N}{60}$$

$N$  : vitesse de rotation (tr/min).

$f_r$  : La fréquence de rotation.

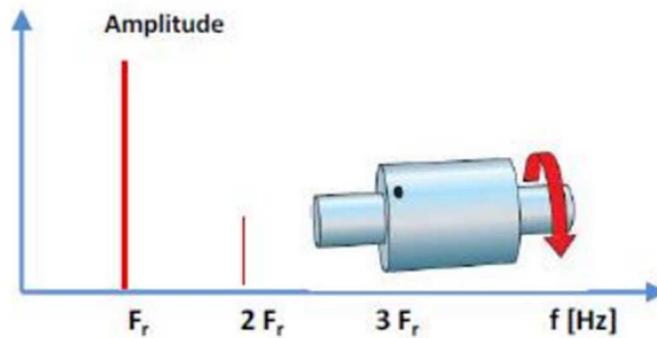


Figure 2.3 : Spectre typologique d'un balourd [11]

## 1.2. Désalignement

Dans ce cas l'arbre moteur et l'arbre récepteur ne sont pas parfaitement alignés. L'objectif de l'alignement de deux machines est de faire en sorte que les axes des deux lignes d'arbres soient parallèles est confondus. Le choix d'un type d'accouplement dépend d'abord des défauts d'alignement pouvant exister entre les deux arbres : désalignements radial, axial, angulaire et écart en torsion.

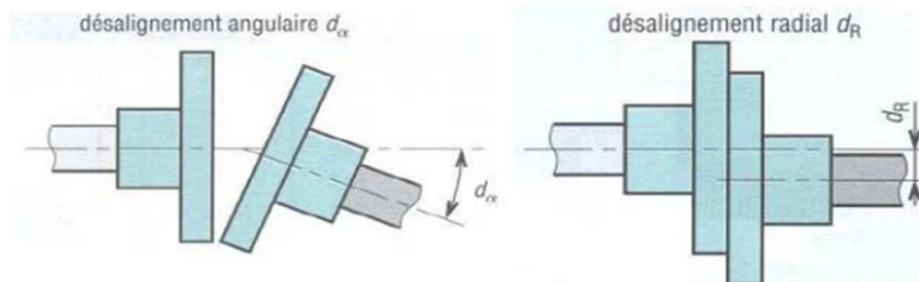


Figure 2.4 : Désalignements d'arbre [11]

Il se manifeste par une augmentation des proches harmoniques de la fréquence de rotation  $f_r$ . Le plus souvent l'harmonique de rang 2 tend à s'élever au-delà de la fréquence fondamentale. Parfois le phénomène se transmet aux 3ème et 4ème harmoniques. [9]

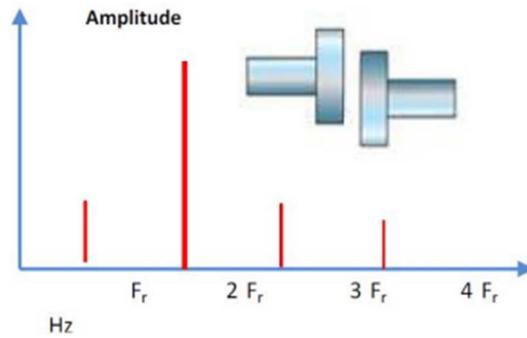


Figure 2.5 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement radial [11]

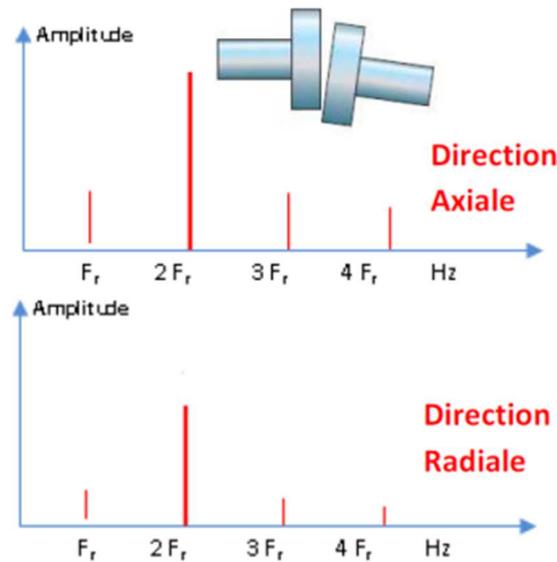


Figure 2.6 : Image vibratoire d'un défaut d'alignement axial [11]

### 1.3. Défaut de denture d'engrenage

Un engrenage est composé d'une roue et d'un pignon possédant un certain nombre de dents  $Z$ , tournant à des vitesses différentes. L'arbre sur lequel est monté un pignon ou une roue tourne à une fréquence  $f_r$ , donc la fréquence caractéristique de l'engrènement sera [9] :

$$f_e = Z \cdot f_r \tag{2.1}$$

Avec  $f_r$  : La fréquence de rotation.

Si l'arbre N°1 tourne à la fréquence de rotation  $f_1$ , alors :

$$f_{e1} = Z_1 \cdot f_1 \tag{2.2}$$

Si l'arbre N°2 tourne à la fréquence de rotation  $f_2$ , alors :

$$f_{e2} = Z_2 \cdot f_2 \tag{2.3}$$

Alors, on peut déduire la relation :

$$f_{e2} = Z_2 \cdot \frac{Z_1 \cdot f_1}{Z_2} = Z_1 \cdot f_1 = f_{e1} \tag{2.4}$$

Donc, il y a une seule fréquence d'engrènement pour un engrenage.

$$f_{e1} = f_{e2} = f_e \tag{2.5}$$

### 1.3.1. Spectre d'un engrenage

Si aucun défaut ne vient perturber le fonctionnement d'un engrenage, le spectre vibratoire est constitué de composantes dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement est ses harmoniques (Figure 2.7).

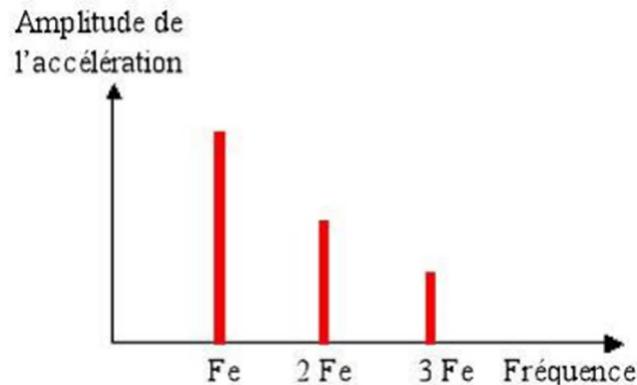


Figure 2.7 : Spectre théorique d'un engrenage sain [11]

Dans le cas d'un défaut, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence de rotation  $f_r$ . Cela se traduira, sur le spectre, par un peigne de raies centré sur la fréquence d'engrènement  $f_e$  et de pas  $f_r$ . Ce peigne n'est visible que sur un zoom centré lui aussi sur la fréquence d'engrènement  $f_e$  comme le montre la figure (2.8). [9]

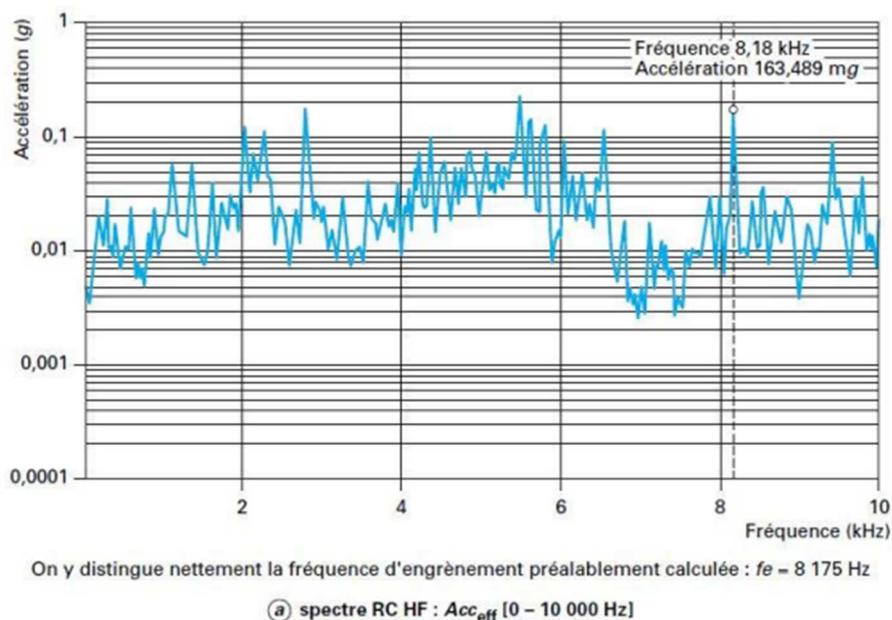


Figure 2.8 : Mise en évidence d'un défaut de denture d'engrenage [9]

## 1.4. Défaut de roulement

### 1.4.1. Durée de vie nominale des roulements

La durée de vie théorique des roulements est donnée par l'expression suivante :

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^n \text{ (Millions de tours)} \quad (2.6)$$

$n = 3$  : Pour les roulements à billes.

$n = \frac{10}{3}$  : Pour les roulements à rouleaux.

C : Charge dynamique de base.

P : Charge dynamique équivalente.

La durée de vie d'un roulement sera fortement réduite en fonction des efforts dynamiques auxquels il sera soumis. C'est pour cette raison qu'il est important de corriger les problèmes tels que le délignage, le balourd, le serrage, ... etc. qui conduisent à une augmentation très forte des efforts dynamiques. [9]

### 1.4.2. Les aspects de détériorations des roulements

Les aspects de ces détériorations se manifestant dans la plupart des cas par un arrachement de matière plus ou moins important, sont décrits comme suit : [9]

- **Usure généralisée** : Apparaissant sur des corps roulants, des pistes et des cages (teinte grise), due à l'intrusion d'une particule abrasive.
- **Détérioration des cages** : Se manifestant sous plusieurs formes : déformation, usure ou rupture des cages.
- **Corrosion de contact** : Se manifestant avec des taches d'oxydation sur l'alésage, le diamètre extérieur et les faces d'appui du roulement
- **Coloration** : Due à une oxydation localisée ou généralisée elle se manifeste avec une coloration des chemins de roulement et des corps roulants.
- **Écaillage** : Se caractérise par des traces de fissuration et d'arrachement de fragments de matière.
- **Coups, Fissures, Cassures** : Se manifestant avec des traces visibles d'outils, et des ruptures des bagues.
- **Grippage** : En plus de l'arrachement de matière, des traces brunes dues à l'échauffement, des déformations de corps roulants, et des micros fusions peuvent apparaître.
- **Cratères et cannelures** : Les premiers sont caractérisés par des piqûres à bords nets liées en chapelet et sont propres aux roulements à billes, quant aux cannelures propres aux roulements à rouleaux, sont caractérisées par une succession de plages étroites parallèles.

### 1.4.3. Processus de dégradation d'un roulement :

Lorsqu'un roulement tourne, les contacts métalliques entre les éléments roulants et les cages émettent des bruits de fond aléatoires. Ce bruit de fond créé un spectre plat. La plupart des usures de roulements débutent par une fêlure que se transforme en craquelure. La craquelure va produire des impacts énergétiques en haute fréquence.

Au fur et à mesure que l'usure progresse :

- Les défauts tendent à se lisser.
- Il y a moins d'impacts.
- Le bruit de fond de bonne piste devient modulé.
- Dès que le défaut est significatif, les billes vont éroder la cage interne en sautant.

#### 1.4.4. Fréquences caractéristiques des défauts de roulements

Pour un roulement, les quatre familles de défauts induisent des vibrations dont les fréquences sont toujours fonction de la vitesse de rotation du roulement et de ses caractéristiques géométriques. Si on prend l'exemple d'un roulement à billes à contact oblique, les équations représentées dans le tableau (2.1) montrent les fréquences caractéristiques des défauts de ce type de roulements, d'où on remarque la présence du terme « N » qui représente la vitesse de rotation.

Défaut	Fréquence d'apparition
Bague extérieure	$BPF_{O} = \frac{nN}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$
Bague intérieure	$BPF_{I} = \frac{nN}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$
Élément roulant	$BPF = \frac{DN}{2d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha\right)$
Cage	$CF = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)$

**Tableau 2.1 : Fréquences caractéristiques des défauts de roulements à billes**

Les autres termes sont fonction de la géométrie du roulement lui-même et peuvent donc être considérés comme une seule constante qui ne dépend pas des conditions de fonctionnement du roulement et que nous allons remplacer par « C », sachant que ces éléments sont :

**D** : le diamètre moyen du roulement en mm

**n** : le nombre d'éléments roulants

**d** : leur diamètre en mm

**$\alpha$**  : l'angle de contact en degré

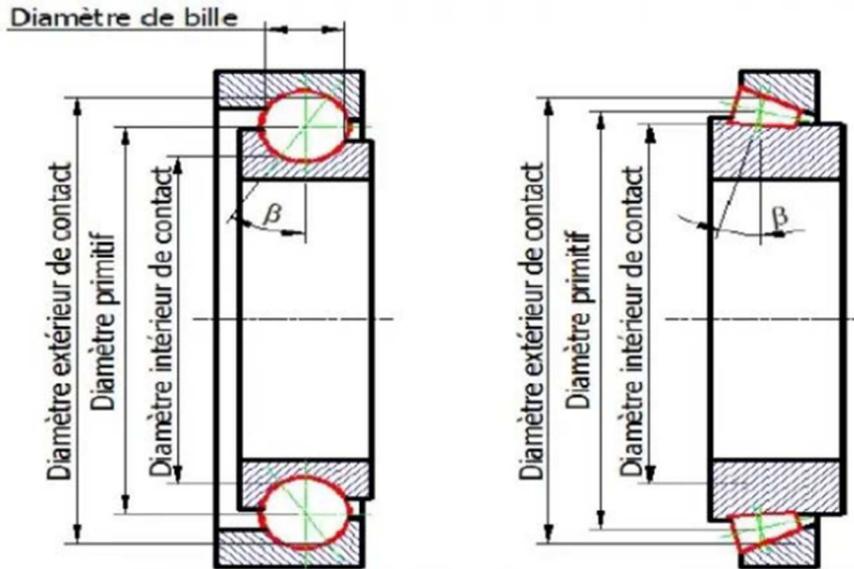


Figure 2.9 : Paramètres géométriques des roulements [12]

#### 1.4.5. Signature vibratoire des défauts d'écaillage

Les défauts de type écaillage vont être modulés en amplitude par la vitesse de rotation. Cela se traduira sur le spectre par un pic à la fréquence du défaut : ( $f_{d \text{ é f a u t}} = B P F I$  ou  $B P F O$  ou  $B S F$ ) et des bandes latérales à la fréquence de rotation de l'arbre. De plus, les défauts d'écaillage se traduisent par des chocs. Le spectre va donc faire apparaître un peigne de raie à la fréquence du défaut ( $f_{d \text{ é f a u t}} = B P F I$  ou  $B P F O$  ou  $B S F$ ).

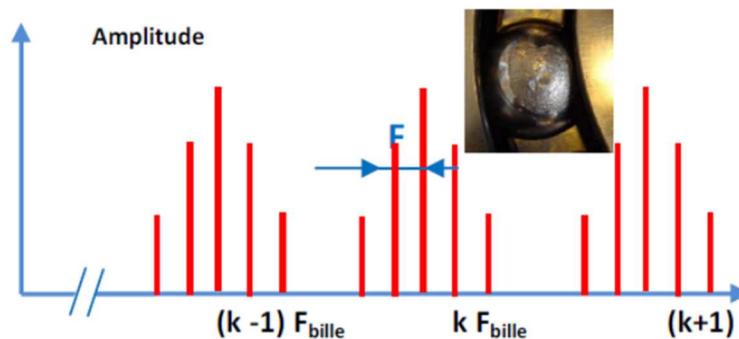


Figure 2.10 : Spectre théorique d'un écaillage affectant la bille [11]

#### 1.4.6. Rupture de cage

Lorsque la cage d'un roulement se casse, les billes ne sont plus maintenues à une distance égale les unes des autres et elles vont se regrouper. Cela entraîne une excentricité de l'arbre et un balourd tournant à la vitesse de rotation de la cage. Ce type de défaut apparaît donc sur le spectre par une raie unique à la fréquence de la cage FTF. En général, FTF est égale à  $0,4 \times$  la vitesse de rotation. En réalité, une rupture de cage est très difficilement détectable car un roulement dont la cage est rompue se détériore très rapidement.

1.4.7. Défaut de billes

Un défaut de billes génère une image typique dans le spectre. Il y aura plusieurs groupes de pics qui apparaissent composés d'un pic central et de modulations autour de ce pic central. Dans la grande majorité des cas, ce pic central correspond au défaut de billes et la modulation correspond au défaut de cage. La fréquence à laquelle les billes tournent autour de leur propre axe dans la cage est BSF.

1.4.8. Exemple : (mise en évidence d'un défaut de roulement) [9]

Le roulement surveillé présente toutes les caractéristiques d'un écaillage ou d'une fissuration sur la piste externe. Le défaut va rapidement contaminer les billes et, par suite, la piste interne.

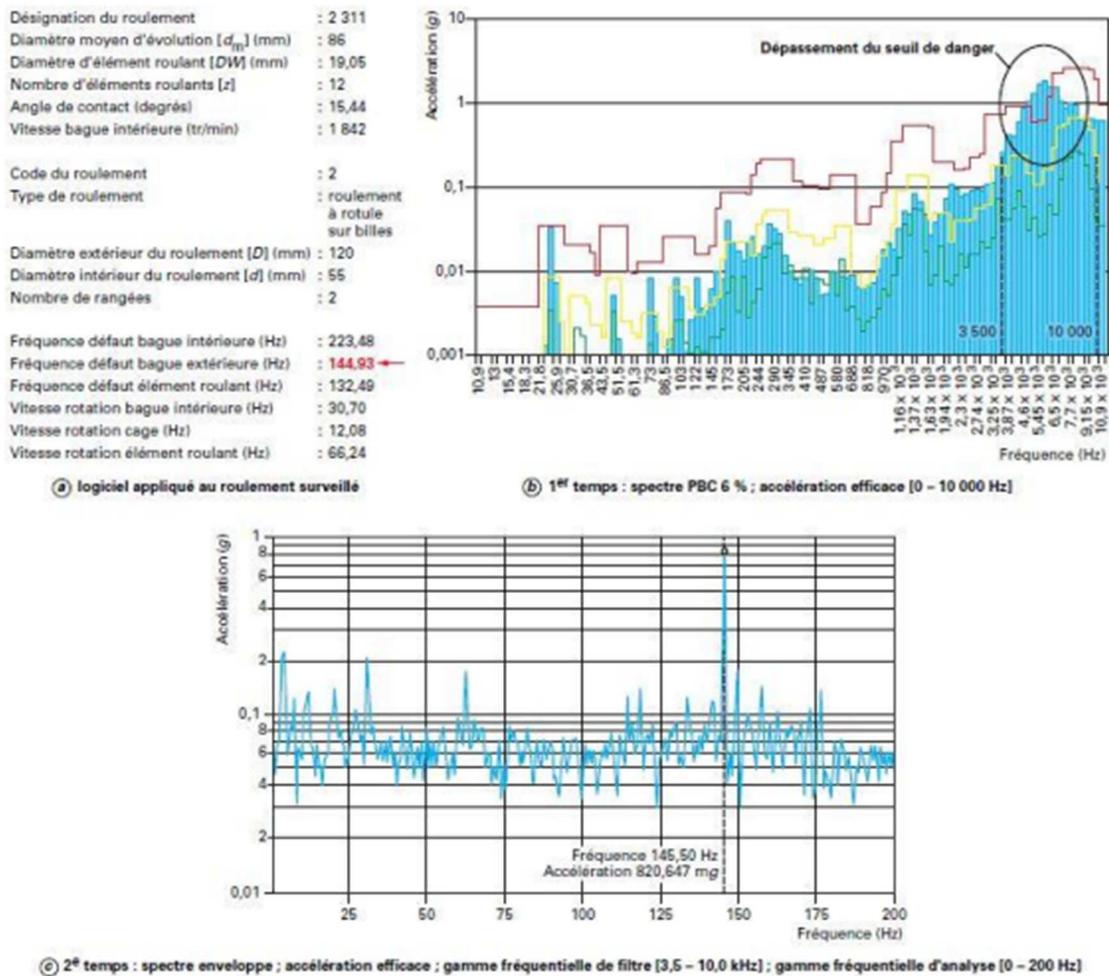


Figure 2.11 : Mise en évidence d'un défaut de roulement [9]

## 2. Régime variable

Au fil du développement de l'industrie, des machines qui fonctionnent avec des vitesses variables sont apparues, telles que les boîtes à vitesses et les éoliennes. La nécessité de la surveillance continue de ce type de machines a obligé les chercheurs de soit développer des nouvelles techniques de détection des défauts, convenables pour ce type de machine, soit de modifier les techniques classiques pour les rendre utilisables avec ce cas spécial. Dans tous les cas, une modélisation mathématique des différents défauts de machines est essentielle pour une étude correcte, de fait que toute technique doit être d'abord testée avec des cas simulés avant d'être utilisée avec des cas réels. [13]

Pour les défauts induisant des chocs tels que les défauts de roulements, un modèle mathématique décrivant la signature vibratoire de ce type de défauts en régime variable, a été proposé et utilisé dans plusieurs travaux [13][14][15]. En fait, ce modèle peut être considéré comme une modification du modèle précédent utilisé pour le régime constant, plutôt qu'une nouvelle création.

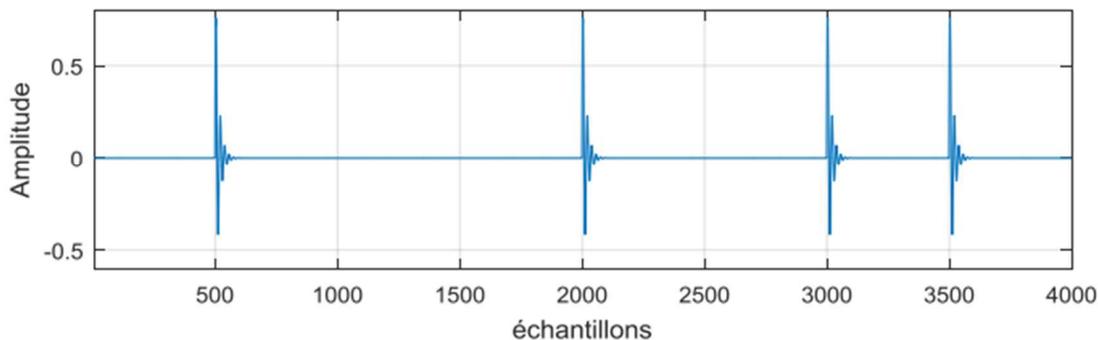
Les équations précédentes deviennent donc :

Défaut	Fréquence d'apparition
Bague extérieure	$BPFO = N \cdot C_1$
Bague intérieure	$BPFI = N \cdot C_2$
Élément roulant	$BPF = N \cdot C_3$
Cage	$CF = N \cdot C_4$

**Tableau 2.2 : Fréquences caractéristiques des défauts de roulements à billes après simplification**

Lorsque la vitesse de rotation est variable, donc infinité de fréquences caractéristiques à chercher, l'approche classique basée sur l'analyse fréquentielle est incapable de détecter le défaut. Dans ce cas il est plus commode de chercher l'ordre du défaut ( $C_1$   $C_2$   $C_3$  ou  $C_4$ ) et donc de calculer un spectre d'ordre au lieu du spectre de fréquence.

Si on a une accélération, les périodes vont diminuer avec l'augmentation de la vitesse de rotation comme simulé dans la (Figure 2.12). De même, pour une décélération les périodes entre les chocs vont augmenter avec la diminution de la vitesse de rotation (Figure 2.13).



**Figure 2.12 : Simulation des chocs de défaut dans le cas d'une accélération [13]**

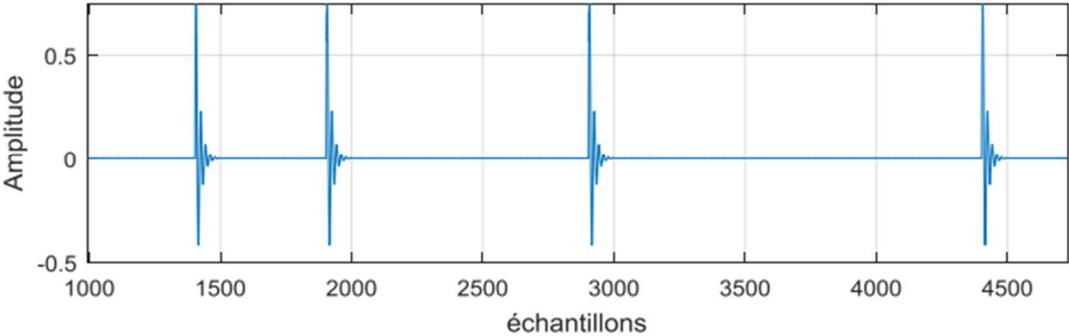


Figure 2.13 : Simulation des chocs de défaut dans le cas d'une décélération [13]

### 3. Conclusion du chapitre

L'augmentation des vibrations des machines tournantes permet de détecter la présence d'un ou de plusieurs défauts, chaque défaut présente un spectre des vibrations. Donc l'analyse de ces signaux vibratoires permet d'identifier la cause de ces défauts. On peut alors déduire le délai avant que l'état de la machine devienne critique, et on peut aussi suivre l'évolution de ces défauts.

A cet effet ce chapitre présente les aspects d'apparition des principaux défauts de machines tournantes, notamment les roulements objet de notre étude. La bonne connaissance de ces aspects permet un bon suivi et un bon diagnostic en cas d'avaries.

Comme notre travail concerne le régime variable, nous avons discuté à la fin du chapitre l'approche de détection des défauts de roulements dans le cas où le régime de fonctionnement est variable.

## CHAPITRE III

### Développement d'une démarche pour le diagnostic des défauts de roulements en régime variable

#### 1. Introduction

Ce chapitre est destiné à la proposition d'une démarche pour la détection des défauts de roulements en régime variable. Cette démarche englobe d'une part l'utilisation d'une analyse statistique basée sur les indicateurs scalaires, et d'une autre part l'application de l'analyse d'ordre jumelée au spectre d'enveloppe. Le travail est purement expérimental, réalisé sur des signaux mesurés sur un banc d'essais de laboratoire.

#### 2. Plan expérimental et matériel de mesure

##### 2.1. Banc d'essais Machinery Fault Simulator (MFS)

Le simulateur des défauts de machines (Machinery Fault Simulator) est un banc d'essais de simulation des défauts de machines tournantes fabriqué et commercialisé par l'entreprise Américaine « SpectraQuest ». C'est un outil efficace pour l'étude des différents défauts pouvant se manifester sur les machines tournantes en vue de la compréhension de leurs images vibratoires. Associé à son logiciel de traitement des données (VibraQuest<sup>®</sup> Pro), il permet, en plus de l'acquisition des signaux mesurés, plusieurs autres outils d'analyse. Outre son utilisation dans le domaine de recherche, il permet l'imprégnation des concepts et de la méthodologie de la pratique de la maintenance prédictive par analyse vibratoire aux étudiants sensés pratiquer la maintenance industrielle dans leur carrière professionnelle. Il est également tout à fait adéquat pour la formation du personnel de maintenance du secteur industriel dans le domaine de l'analyse vibratoire et donne l'opportunité, grâce à ses différents kits d'utilisation, de simuler tous les défauts qu'ils ont l'habitude de rencontrer en pratique. [6]

##### 2.1.1. Utilisations possibles du MFS

Comme mentionné auparavant, le MFS permet la simulation de plusieurs défauts de machines tournantes, en voici quelques-uns :

1. Etude du balourd ;
2. Etude du mésalignement ;
3. Etude des défauts de roulements ;
4. Etude des accouplements ;
5. Etude d'un rotor voilé et/ou excentré ;
6. Etude de la résonance ;
7. Dynamique des rotors ;
8. Etude des ventilateurs ;
9. Analyse du courant électrique, ...etc.

### 2.1.2. Description du MFS

Le MFS est une mini-machine ou une machine-école destinée à des fins pédagogiques et de recherche. Il est donc d'une conception très simple permettant de simuler plusieurs types de défauts dans un temps minime. La figure (3.1) montre une photo réelle du MFS, celui-ci est composé principalement d'un arbre tournant entraîné par un moteur électrique. L'arbre est guidé en rotation par deux roulements à billes et peut supporter des disques tournants pour simuler un défaut de balourd par exemple. Le MFS est muni d'un variateur de vitesse et d'un tachymètre à affichage digital permettant la mesure instantanée de la vitesse de rotation. La figure (3.2) montre les organes constitutifs du MFS.

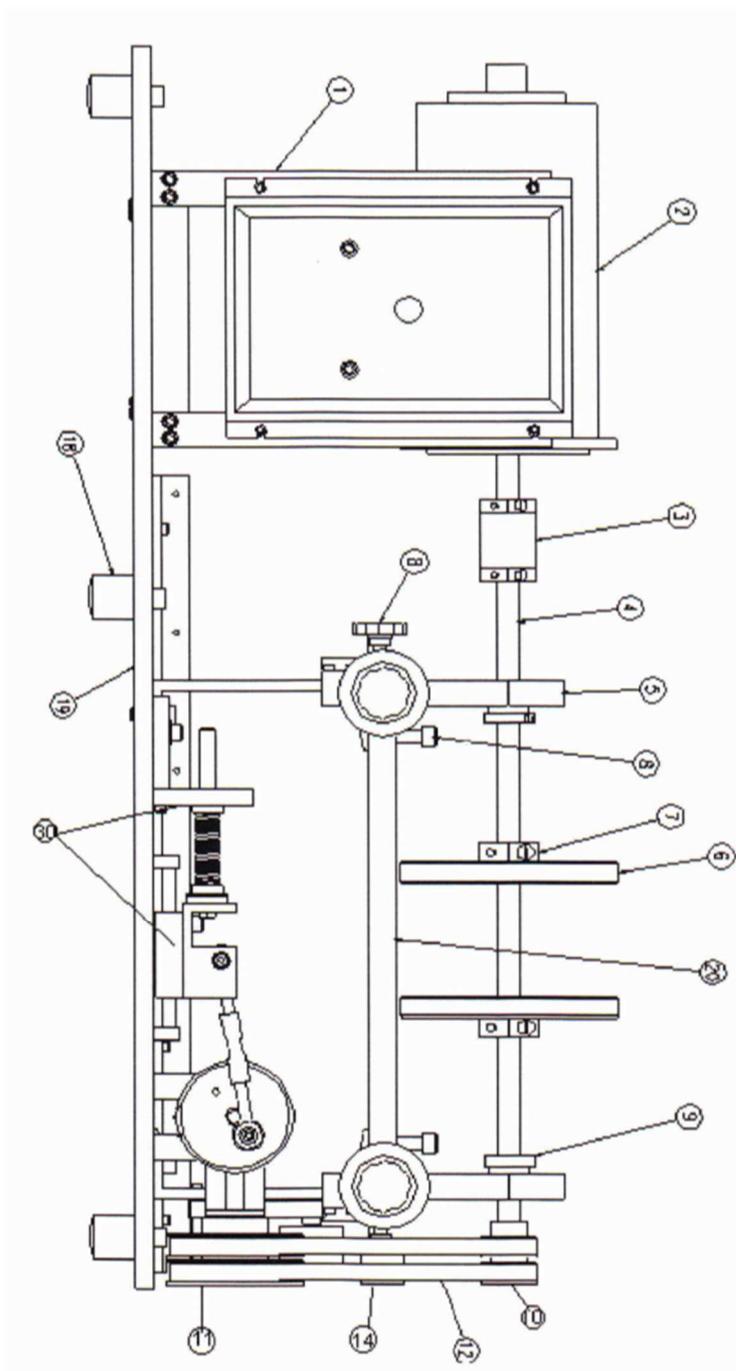


Figure 3.1 : Photo du banc d'essais MFS

### 2.2. Acquisition des signaux mesurés

L'acquisition des signaux mesurés est assurée par des accéléromètres fixés par filetage sur les logements des deux roulements dans les deux directions. Le MFS est muni de 16 ports de connexions permettant de réaliser 16 mesures à la fois (15 mesures vibratoires données par les accéléromètres plus la mesure de la vitesse de rotation via le tachymètre). Ces ports sont alors connectés à des ports extérieurs permettant l'acheminement des mesures à une carte d'acquisition installée sur un PC. Ce PC est muni du logiciel d'acquisition et de traitement « VibraQuest Pro » permettant l'utilisation de plusieurs outils d'analyse, tel que le spectre, l'analyse statistique, ...etc. Dans notre cas, juste le signal temporel est acquis à travers le logiciel, le post-traitement s'effectue sur environnement Matlab.

Le MFS est muni d'un kit de quatre roulements avec quatre types de défauts ponctuels livrés avec la machine ; sur la bague extérieure, sur la bague intérieure, sur la bille et un roulement avec défaut mixte. Les mesures sont effectuées sur le roulement coté courroie car le montage et le démontage est facile (figure 3.3). Les caractéristiques des roulements utilisés sont données par le tableau (3.1). [6]



1. Variateur de vitesse
2. Moteur électrique
3. Accouplement
4. Arbre
5. Logement de roulement
6. Disque tournant avec trous pour simulation du balourd
7. Introduction du mésalignement
8. Roulement
9. Petite poulie pour courroie
10. Grande poulie pour courroie
11. Double courroie
17. Frein magnétique
18. Appuis
19. Base

Figure 3.2 : Organes constitutifs du simulateur (vue de face)

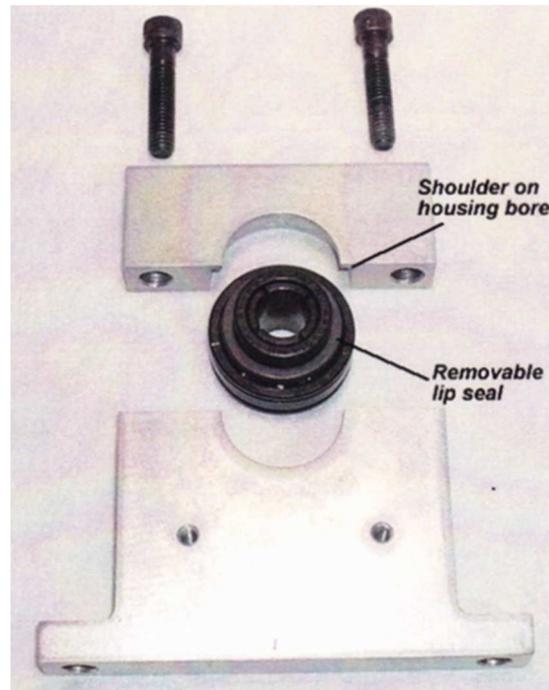


Figure 3.3 : Montage du roulement testé dans son logement

Nombre de billes	Diamètre moyen (inch)	Diamètre de la bille (inch)	Ordre DBE	Ordre DBI	Ordre DB	Ordre DC
8	1,318	0,378	3,05	4,95	1,99	0,38

DBE : Défaut sur la Bague Extérieure

DBI : Défaut sur la Bague Intérieure

DB : Défaut sur la Bille

DC : Défaut sur la Cage

Tableau 3.1. Caractéristiques géométriques et ordres des défauts pour les roulements utilisés.

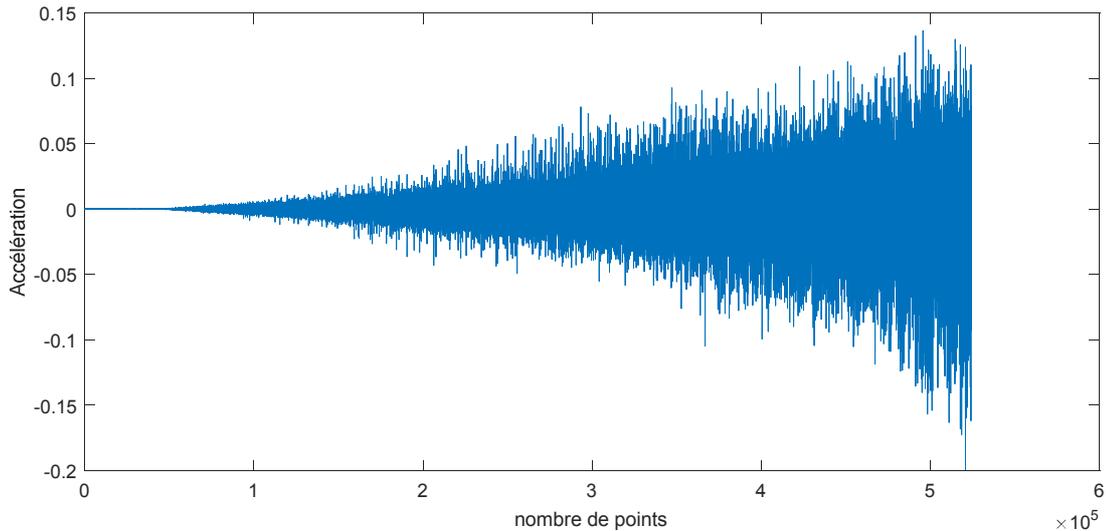
[6]

### 3. Analyse des signaux mesuré

#### 3.1. Signaux globaux

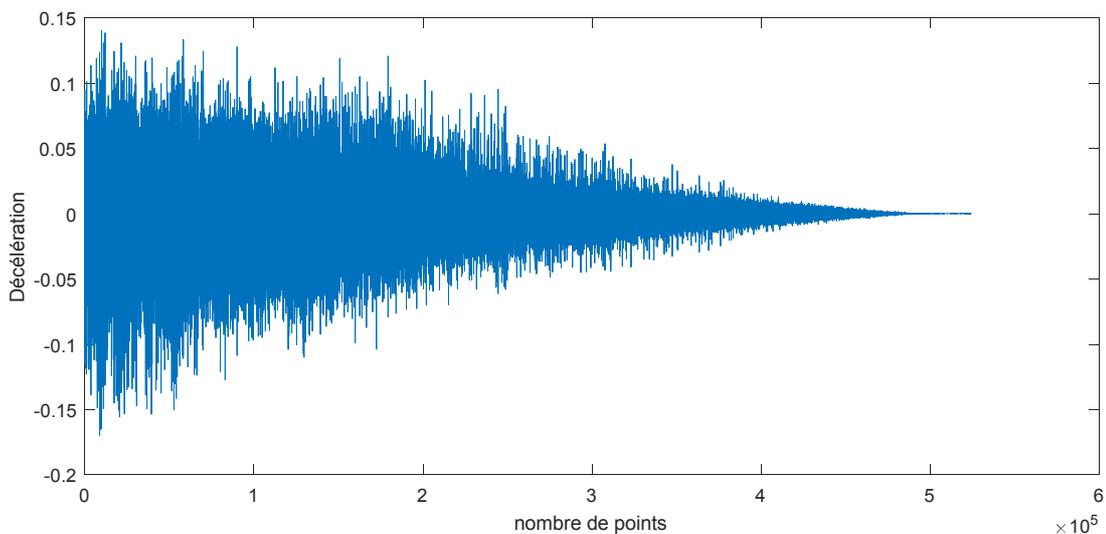
La figure (3.4) représente le signal vibratoire mesuré dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure du roulement. Dans ce cas le régime de vitesse est une accélération de 0 tr/min à 1800 tr/min soit de 0 Hz à 30 Hz dans 34 s. Le signal contient 524289 points et la fréquence d'échantillonnage est égale à 15360 HZ.

**Nb.** La grandeur mesurée dans tous les signaux est l'accélération en (g).



**Figure 3.4 : Signal vibratoire mesuré dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure du roulement en mode accélération.**

De même la figure (3.5) représente le signal du même défaut avec la même configuration qu'auparavant mais dans le cas d'une décélération de 30 Hz à 0 Hz dans 34 s.



**Figure 3.5 : Signal vibratoire mesuré dans le cas d'un défaut sur la bague extérieure du roulement en mode décélération**

### 3.2. Décomposition des signaux

Comme les signaux mesurés contiennent un nombre considérable de points, nous les avons décomposés en neuf sous-signaux de différentes plages de vitesses. Ceci va nous donner l'opportunité d'analyser plusieurs configurations. Le tableau (3.2) montre les détails des signaux et la figure (3.6) montre les signaux obtenus.

De même façon nous avons procédé pour le cas de la décélération. Le tableau (3.3) et la figure (3.7) montrent les résultats obtenus.

Signal	Plage de vitesse (Hz)	Plage de vitesse (RPM)
S1	3-6	180-360
S2	6-9	360-540
S3	9-12	540-720
S4	12-15	720-900
S5	15-18	900-1080
S6	18-21	1080-1260
S7	21-24	1260-1440
S8	24-27	1440-1620
S9	27-30	1620-1800

**Tableau 3.2 : Détails des sous-signaux obtenus en cas d'accélération et leurs plages de vitesse**

Signal	Plage de vitesse (HZ)	Plage de vitesse (RPM)
S1	30-27	1800-1620
S2	27-24	1620-1440
S3	24-21	1440-1260
S4	21-18	1260-1080
S5	18-15	1080-900
S6	15-12	900-720
S7	12-9	720-540
S8	9-6	540-360
S9	6-3	360-180

**Tableau 3.3 : Détails des sous-signaux obtenus en cas de décélération et leurs plages de vitesse**

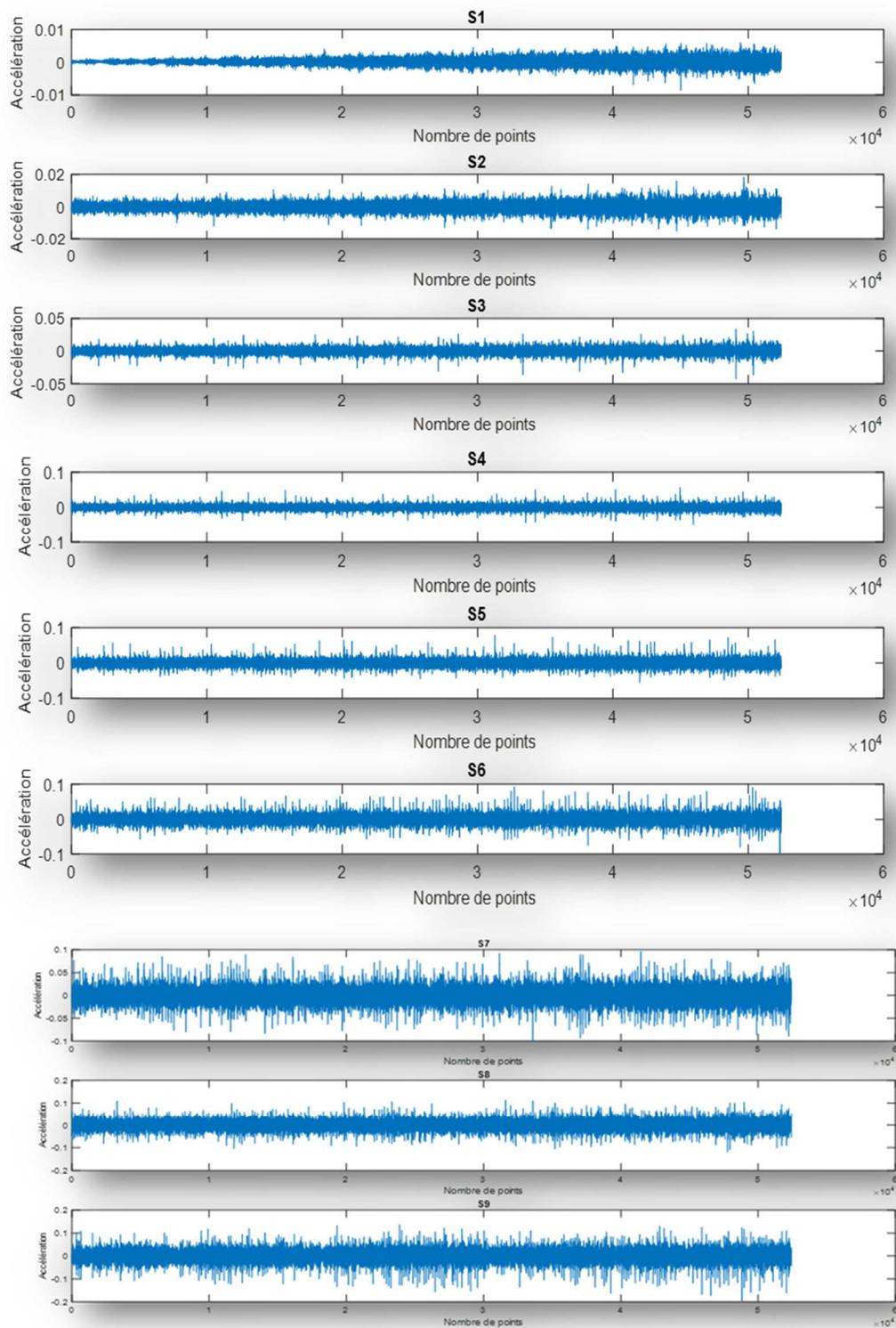


Figure 3.6 : Les neuf sous-signaux obtenus en cas d'accélération

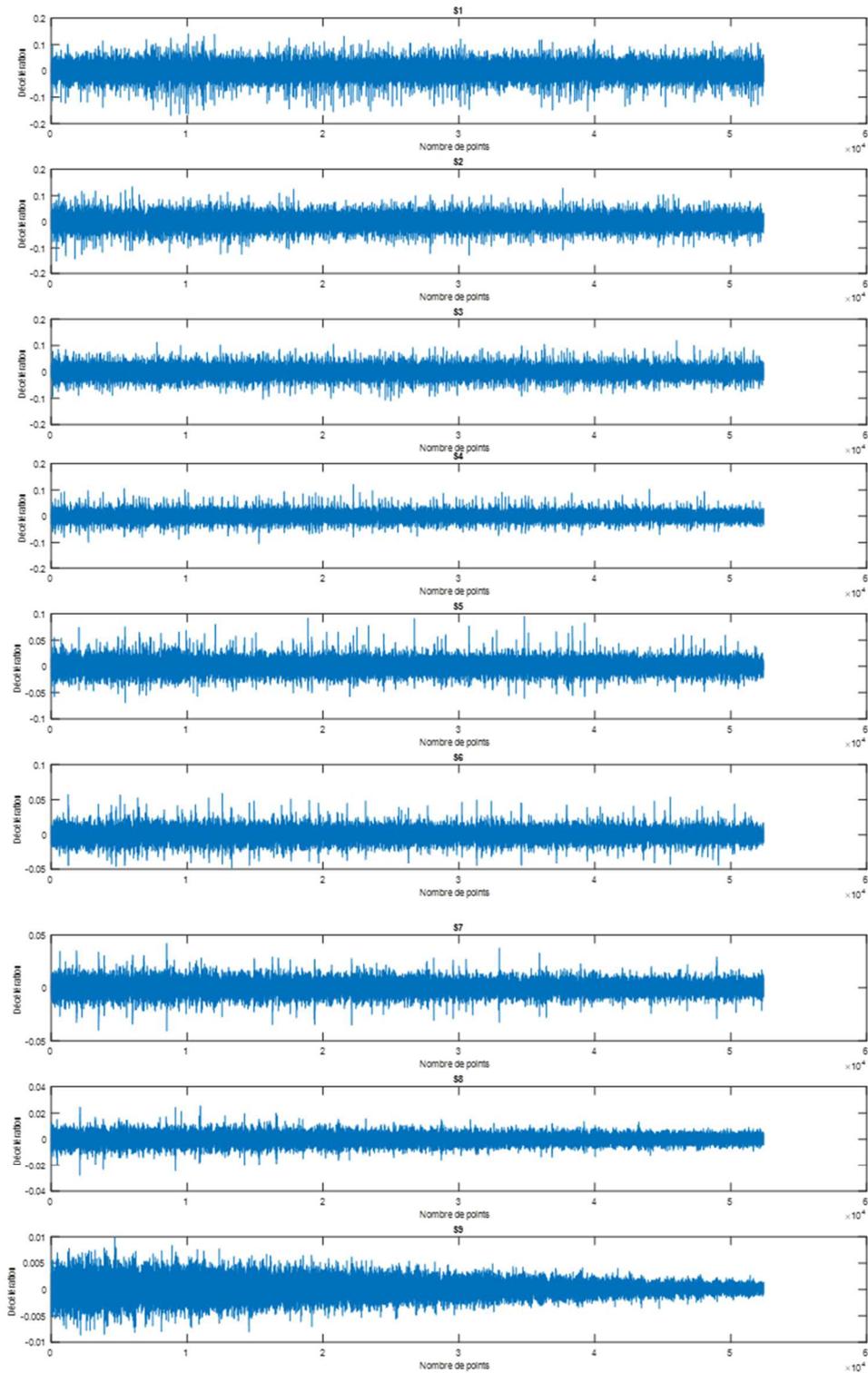


Figure 3.7 : Les neuf sous-signaux obtenus en cas de décélération

## 4. Analyse statistique des signaux mesurés

### 4.1. Cas de l'accélération

Pour l'analyse statistique nous avons utilisé cinq indicateurs scalaires : RMS, valeur crête, valeur crête-à-crête, kurtosis, facteur de crête.

La (figure 3.8) montre le RMS pour les neuf sous-signaux. On constate que le RMS augmente en fonction de la plage de vitesse. Plus la plage de vitesse augmente, plus le RMS augmente aussi. La remarque est également valable pour la valeur crête (figure 3.9) et la valeur crête-à-crête (figure 3.10). Donc ces trois indicateurs sont sensibles à la vitesse de rotation.

Par ailleurs le kurtosis (figure 3.11) et le facteur de crête (figure 3.12) sont presque insensibles à la variation de la vitesse puisqu'ils montrent presque la même valeur ou, dans le pire des cas, varient dans des proportions faibles.

En conclusion, ces deux indicateurs sont les plus adaptés pour le suivi et la détection des défauts de roulements. Rappelons que les valeurs du kurtosis obtenues pour les neuf signaux sont supérieures à la valeur limite égale à 3. De même pour le facteur de crête dont les valeurs dépassent 6.

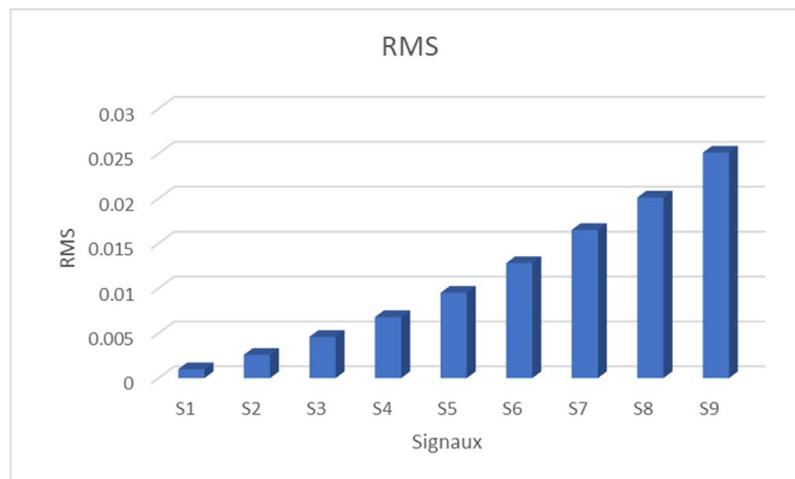


Figure 3.8 : RMS pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération

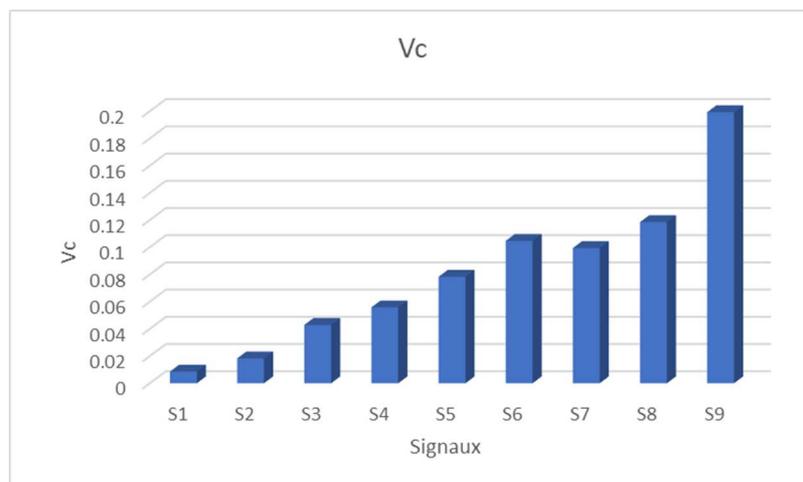


Figure 3.9 : Valeur crête pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération

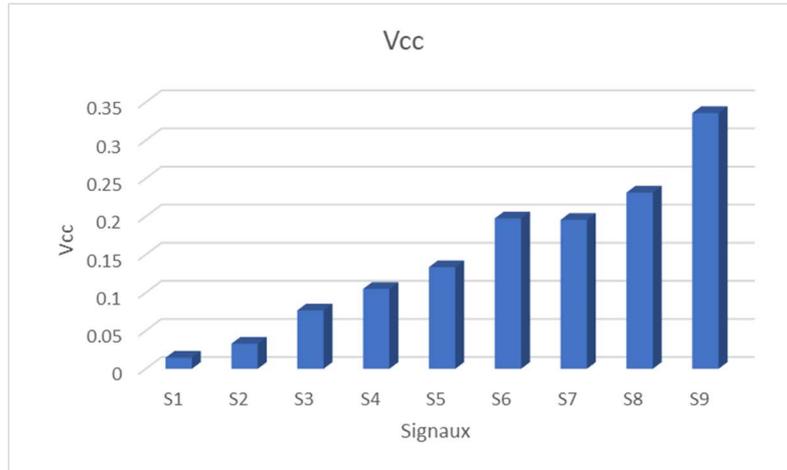


Figure 3.10 : Valeur crête-à-crête pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération

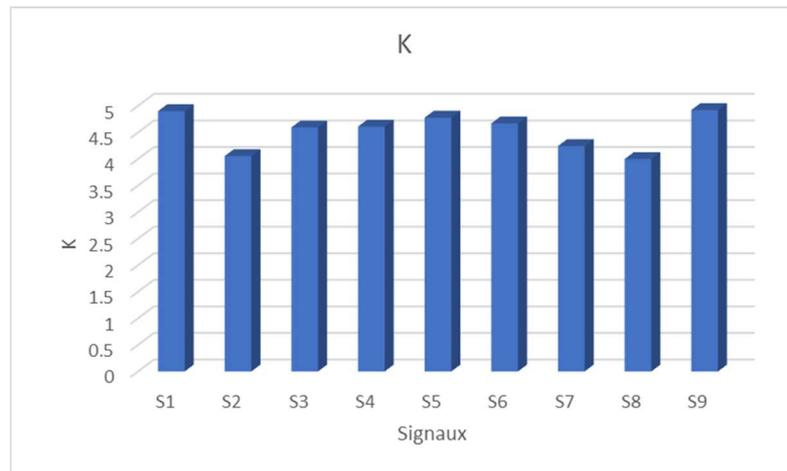


Figure 3.11 : Kurtosis pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération

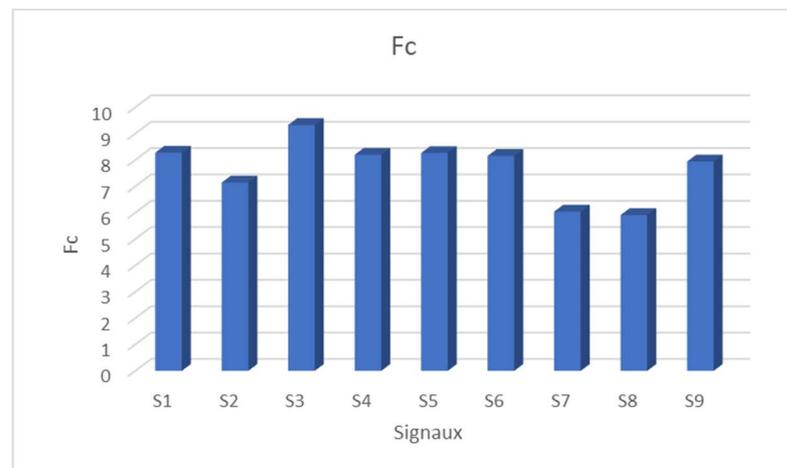


Figure 3.12 : Facteur de crête pour les neuf sous-signaux en cas d'accélération

#### 4.2. Cas de décélération

Dans ce cas le RMS, la valeur crête et la valeur crête-à-crête affichent une tendance contraire qu'auparavant à savoir une diminution (figures 3.13, 3.14, 3.15).

Le kurtosis et le facteur de crête sont peu variables, ils affichent une tendance presque constante dans certains sous-signaux ou varient dans des proportions faibles (figures 3.16, 3.17).

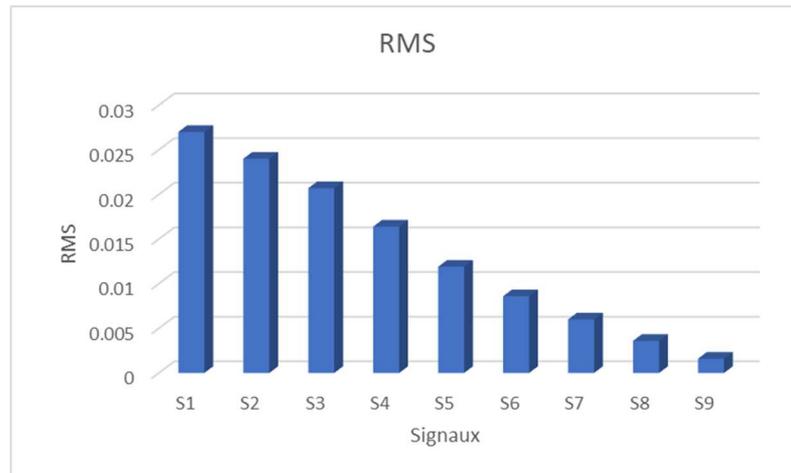


Figure 3.13 : RMS pour les neuf sous-signaux en cas de décélération

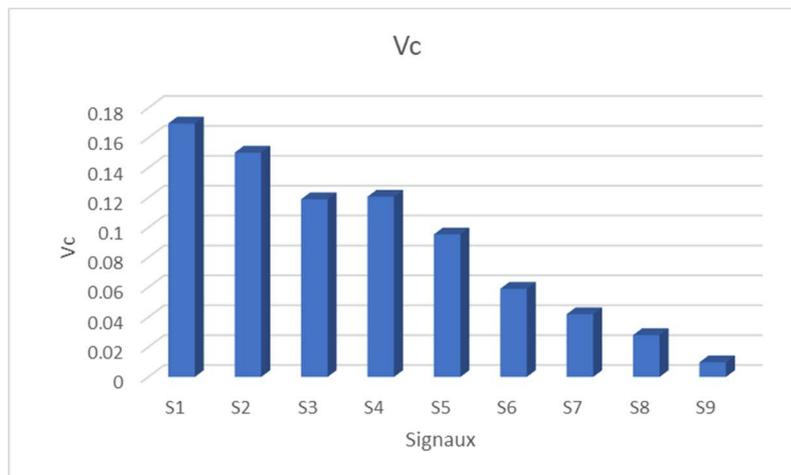


Figure3.14 : Valeur crête pour les neuf sous-signaux en cas de décélération

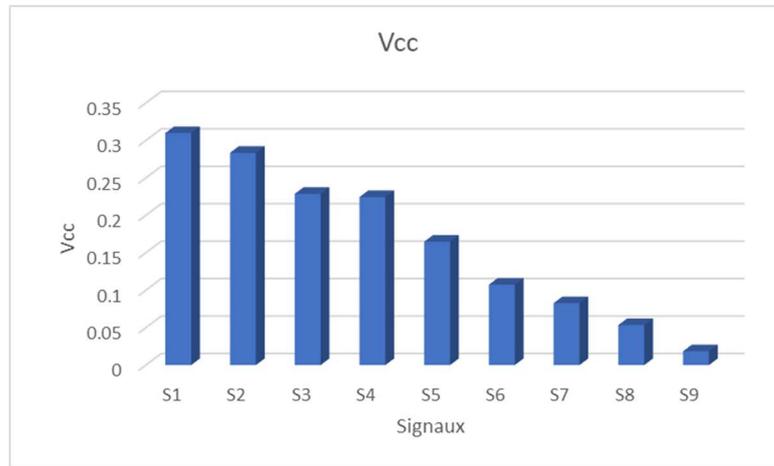


Figure 3.15 : Valeur crête-à-crête pour les neuf sous-signaux en cas de décélération

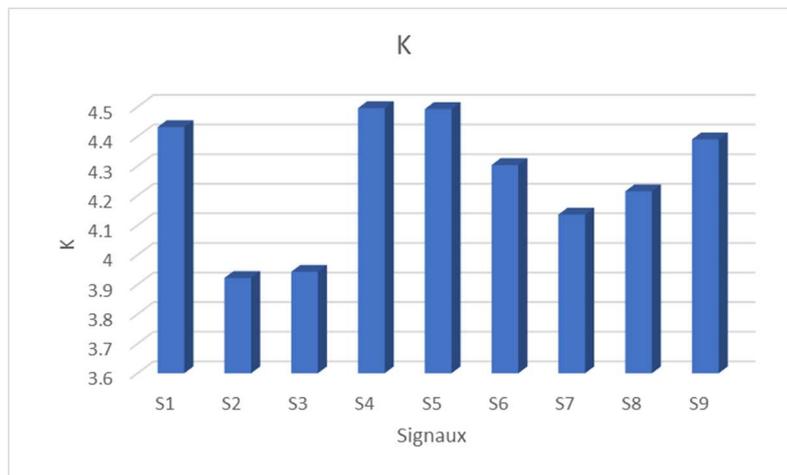


Figure 3.16 : Kurtosis pour les neuf sous-signaux en cas de décélération

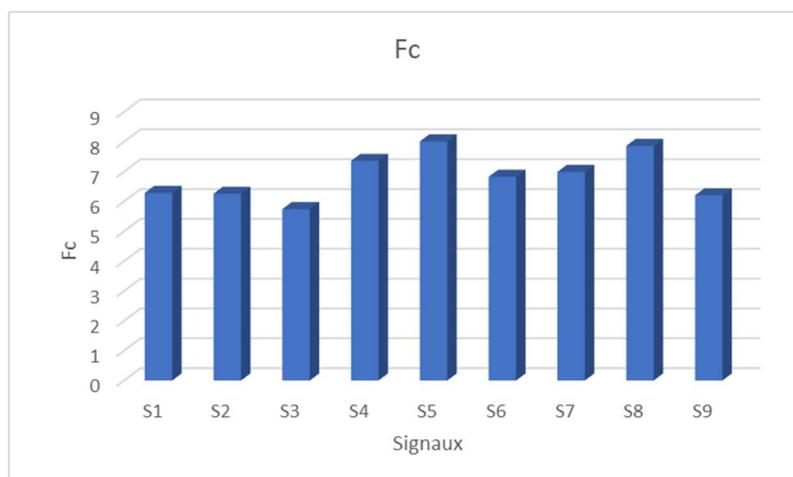
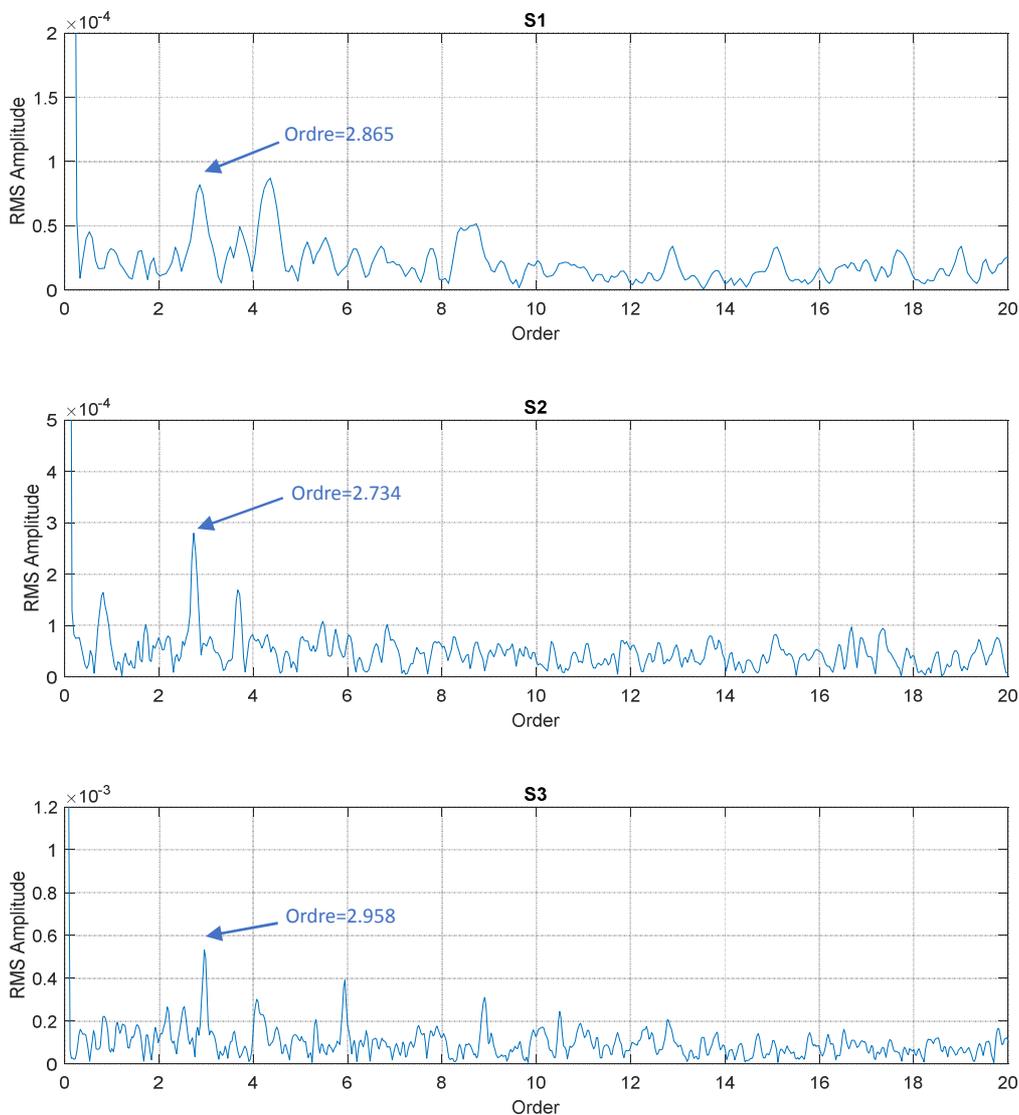


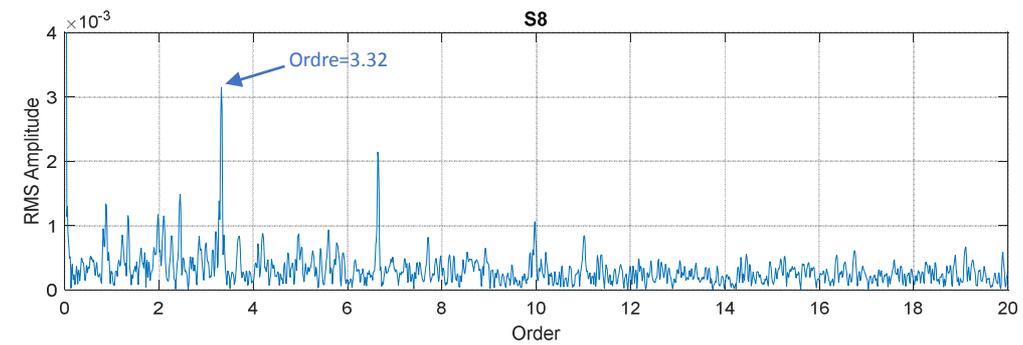
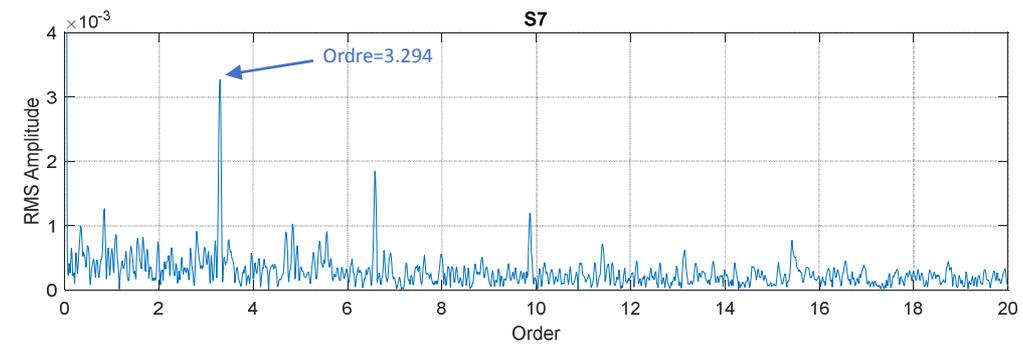
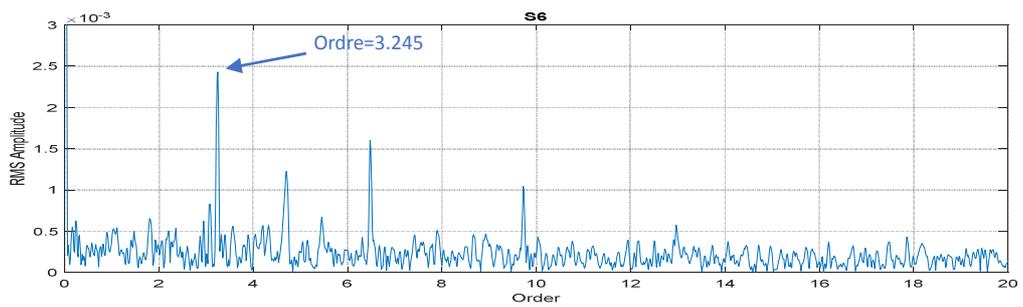
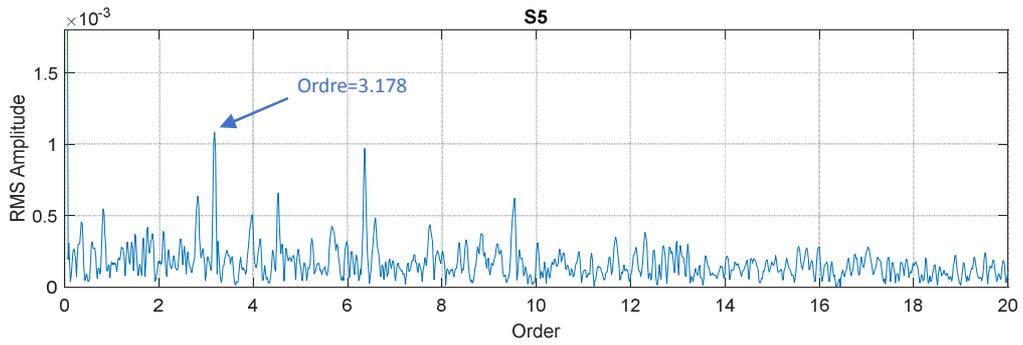
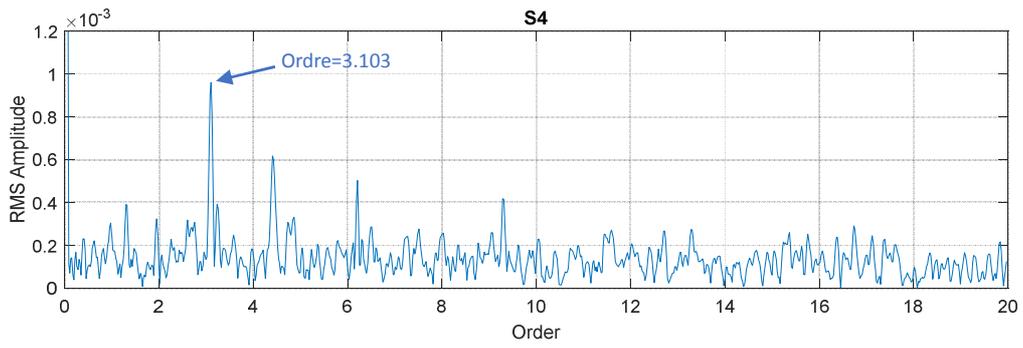
Figure 3.17 : Facteur de crête pour les neuf sous-signaux en cas de décélération

## 5. Analyse d'ordre des signaux

Dans ce cas et sachant la plage de vitesse de chaque sous-signal, nous avons procédé à une analyse d'ordre car l'analyse fréquentielle est impossible dans le cas où le régime est variable. Rappelons que dans le régime variable on cherche l'ordre du défaut plutôt que sa fréquence car celle-ci varie avec la variation de la vitesse de rotation. Pour le roulement utilisé dans le banc d'essais, l'ordre d'un défaut sur la bague extérieure est égal théoriquement à 3.05 (voir tableau 3.1).

Les différents spectres d'ordre (figures 3.18, 3.19) mettent en évidence clairement l'ordre d'un défaut sur la bague extérieure avec des valeurs allant de 2.73 à 3.38, donc très proches de la valeur théorique (3.05). Donc le résultat est satisfaisant même si la plage de vitesse de chaque signal n'est pas la même. Dans ce cas tout outil d'analyse basée sur une analyse fréquentielle ne va donner aucun résultat.





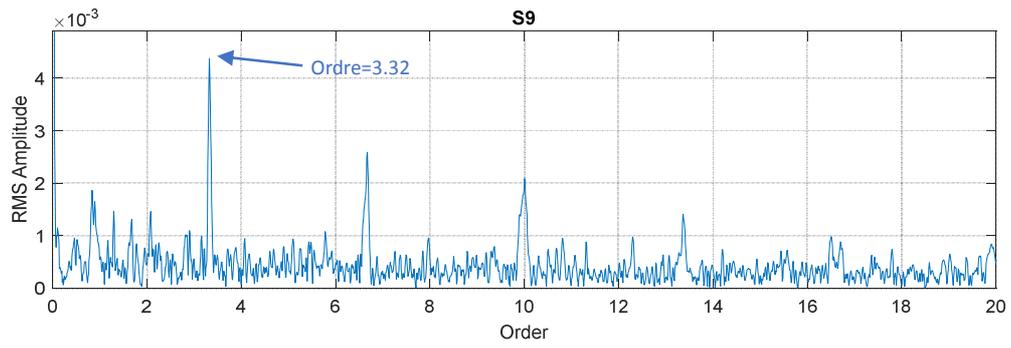
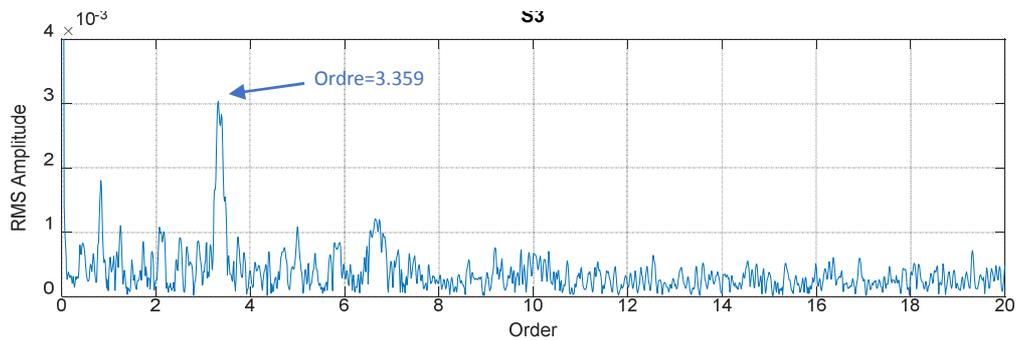
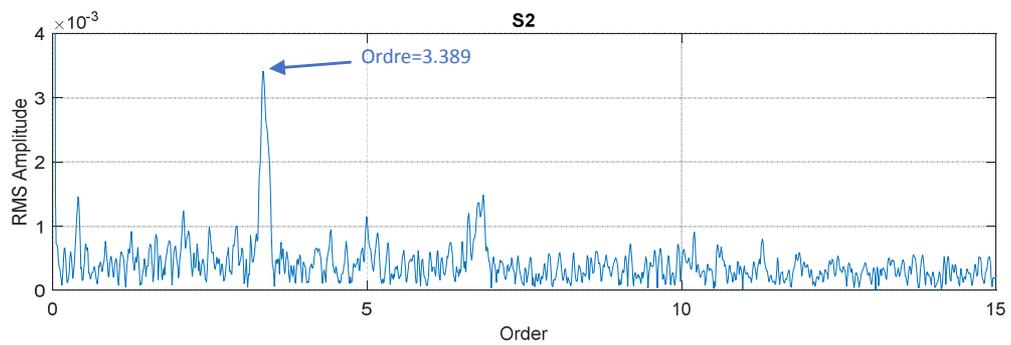
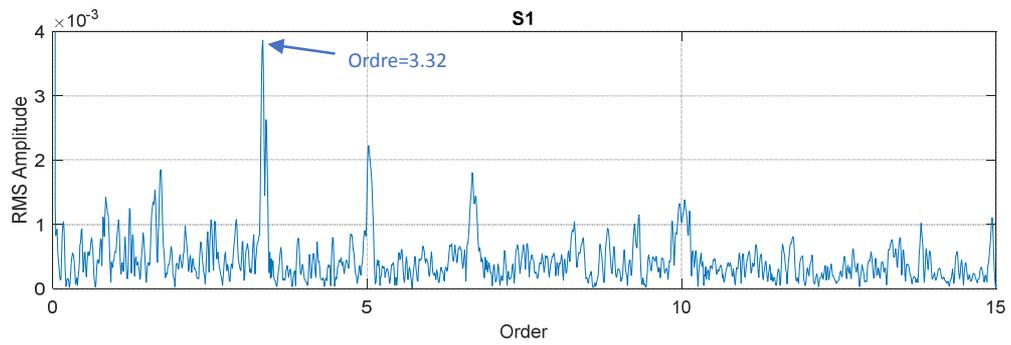
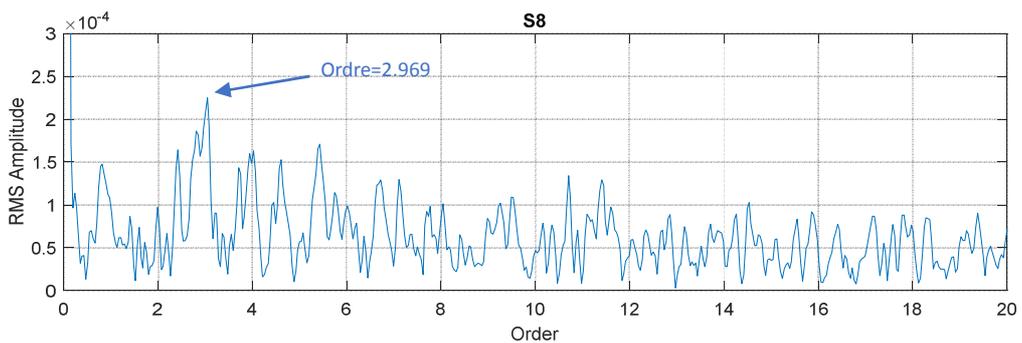
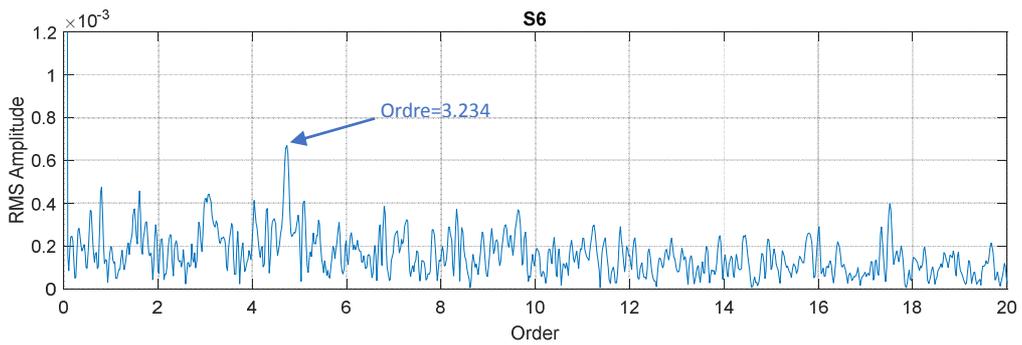
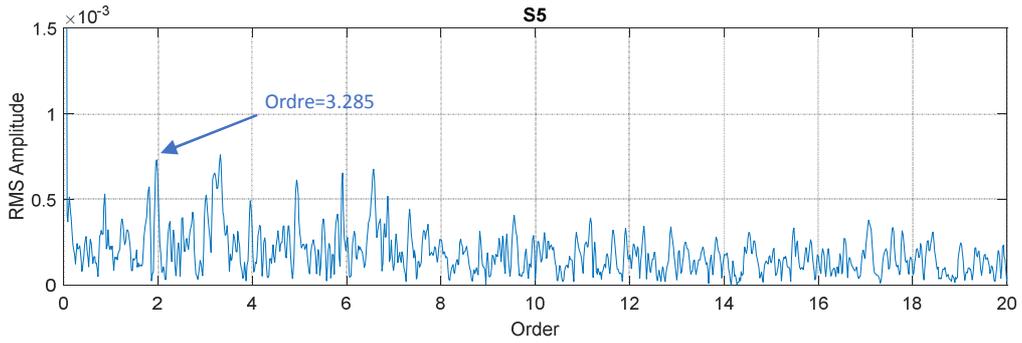
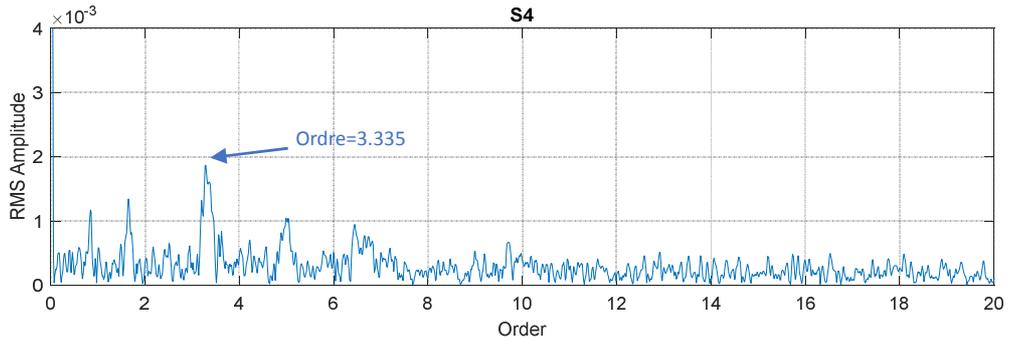


Figure 3.18 : Spectre d'ordre des neuf sous-signaux en cas d'accélération





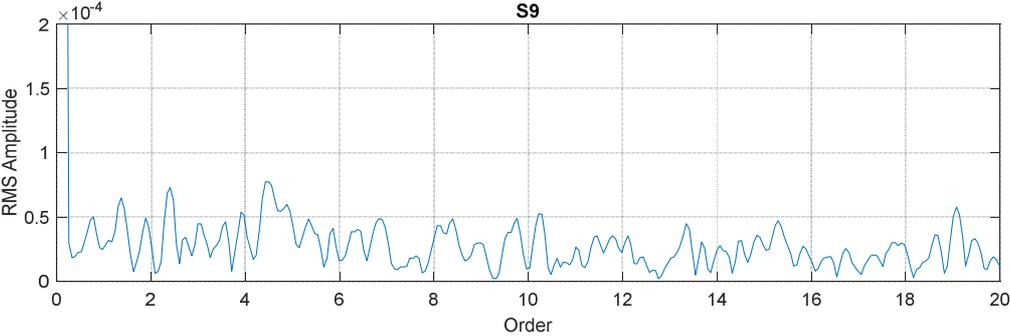


Figure 3.19 : Spectre d'ordre des neufs sous-signaux en cas de décélération

## 6. Conclusion du chapitre

Ce chapitre avait pour objectif le développement d'une démarche pour le diagnostic des défauts de roulements en régime variable. A cet effet nous avons pris deux signaux d'un roulement avec un défaut sur la bague extérieure mesurés en mode accélération et décélération. Ayant un nombre de points considérable, chaque signal est par la suite décomposé en neuf sous-signaux ayant chacun sa propre plage de vitesse. Ceci nous a permis d'étudier 18 signaux dans deux modes différents et dans 18 plages de vitesse différentes.

L'analyse statistique basée sur l'utilisation de cinq indicateurs scalaires a montré que le RMS, valeur crête et la valeur crête-à-crête sont très sensibles au changement de la vitesse de rotation et peuvent par ce fait conduire à un faux diagnostic. Le kurtosis et le facteur de crête sont par contre presque insensibles, et constituent par ce fait un moyen efficace pour la surveillance des machines tournantes fonctionnant en régime variable.

Enfin l'analyse d'ordre nous a permis d'aboutir aux spectres d'ordre des 18 sous-signaux. Malgré que les plages de vitesse sont différentes et pour les deux modes, les différents spectres d'ordre ont permis de mettre en évidence clairement l'ordre d'un défaut sur la bague extérieure, avec parfois un petit décalage avec la valeur théorique ce qui est parfaitement normal.

## CHAPITRE IV

### Application au diagnostic vibratoire d'une éolienne

#### 1. Introduction

Ce chapitre vise à appliquer la démarche développée dans le chapitre 3 pour le diagnostic vibratoire d'une éolienne. Nous avons exploité des signaux d'une base de données Américaine : Green Power Monitoring System pour réaliser ce travail. Les signaux ont été mesurés chaque jour durant une période de cinquante jours. Pour détecter les défauts, nous avons utilisé une analyse statistique et l'analyse d'ordre comme il s'agit d'un régime variable.

#### 2. Généralités sur les éoliennes

##### 2.1. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à moudre le grain ou à pomper l'eau. Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur qui transforme l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée les pales et de la densité de l'air. [16]

Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 Km /h et des vents de 50-60 Km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abimer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 Km/h. L'éolienne est donc un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur, et énergie mécanique dans le cas d'une éolienne de pompage. [16]

##### 2.2. Définition d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatiques. [17]

##### 2.3. Différents types des aérogénérateurs

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne, on classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celles à axe vertical (VAWT) et celles à axe horizontal (HAWT). [18]

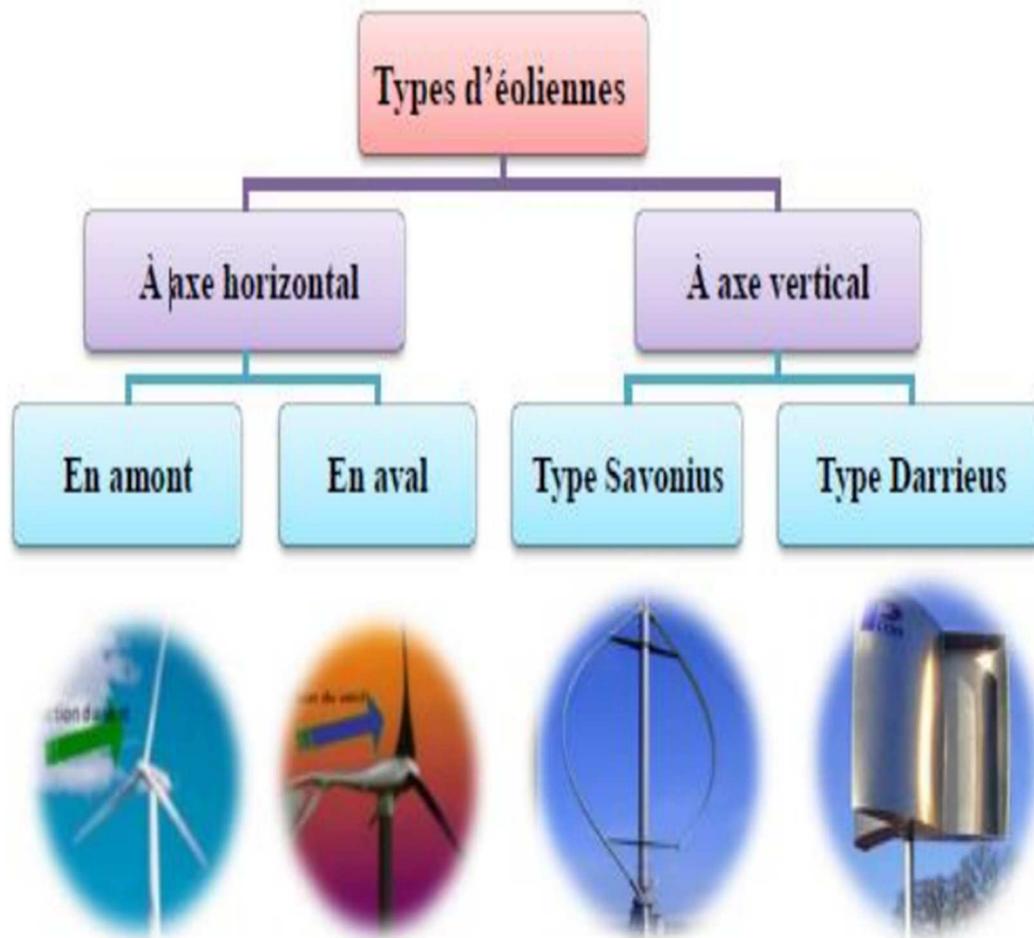


Figure 4.1 : Différents types d'éoliennes

#### 2.4. Base de données et acquisition des signaux

Les signaux vibratoires utilisés dans cette étude ont été obtenus à partir d'un système de surveillance en ligne de l'état de l'éolienne, qui a été fourni par Green Power Monitoring System (États-Unis). Ces signaux ont été mesurés sur une éolienne verticale avec une puissance nominale de 2,2 MW. L'arbre à grande vitesse est entraîné par une boîte de vitesses et la vitesse nominale est de l'ordre de 1800 tr/min pendant la production d'énergie (Figure 4.2). Le roulement testé est un roulement SKF 32222 type J2 supportant un arbre de vitesse nominale de 30 tr/s. Le diamètre extérieur, l'alésage et la largeur du roulement sont respectivement 200 mm, 110 mm et 56 mm. La figure (4.3) illustre les dimensions du roulement testé. La base de données contient 50 mesures de vibrations de 50 jours de surveillance consécutifs, c'est-à-dire toute la durée de vie du roulement testé jusqu'à l'apparition d'un défaut sur la bague intérieure. Les signaux de vibration sont mesurés par un accéléromètre placé en position radiale. La fréquence d'échantillonnage est égale à 97 656 Hz et le temps de mesure est 6 s. Un tachymètre est utilisé pour la mesure instantanée de la vitesse de rotation.

Comme la base de données contient plusieurs signaux, nous avons choisi 15 signaux parmi les 50 disponibles. L'objectif étant de prouver l'efficacité des méthodes utilisées pour permettre la détection la plus précoce possible.

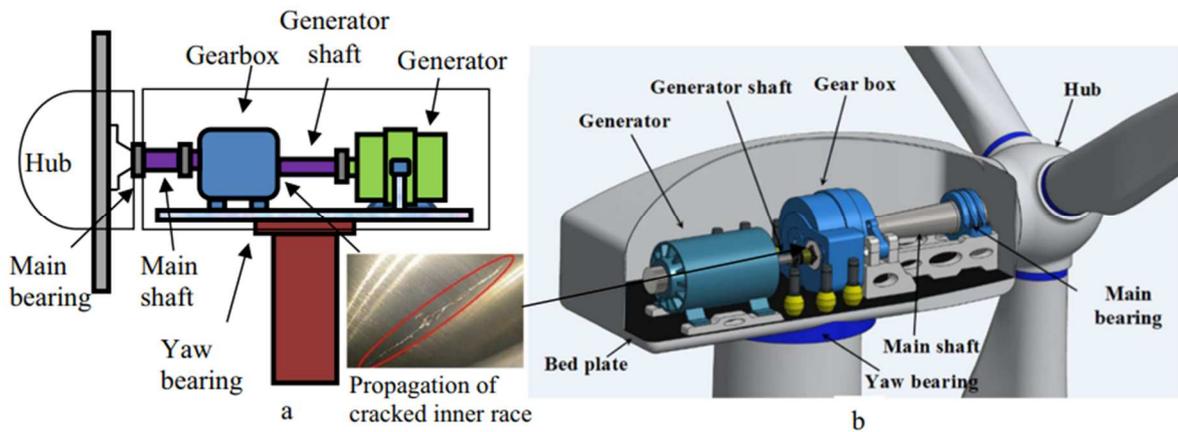


Figure 4.2 : (a) Schéma cinématique et (b) photo d'une éolienne

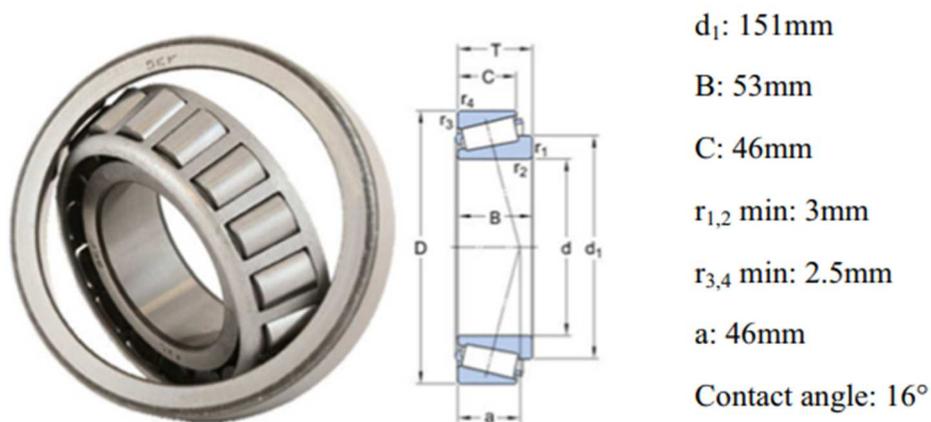


Figure 4.3 : Dimensions du roulement à rouleaux coniques (SKF 32222 J2)

### 3. Diagnostic vibratoire d'une éolienne

#### 3.1. Description des données

L'ensemble de données utilisées dans cette étude ont été collecté à partir d'un arbre de transmission d'éolienne de 2 MW aux États-Unis. Plus précisément, 50 signaux de vibration ont été enregistrés du 7 mars au 25 avril 2013, chacun ayant une durée de 6 secondes. Ces signaux ont été collectés par un système de surveillance après qu'un défaut de la bague intérieure ait provoqué la défaillance d'un roulement de l'arbre à grande vitesse entraîné par un pignon à 20 dents. [19]

- **Etat nominal de la machine** : augmentation de la défaillance de la bague intérieure du roulement
- **Puissance nominale** : 2 MW
- **Vitesse nominale** : 1800 tr/min
- **Informations sur les ordres des défauts du roulement testé** :  
**Cage** :  $0.42 \times$  (vitesse de l'arbre)  
**Bague extérieure** :  $6.72 \times$  (vitesse de l'arbre)

**Bague intérieure** :  $9.47 \times$  (vitesse de l'arbre)

**Bille** :  $1.435 \times$  (vitesse de l'arbre)

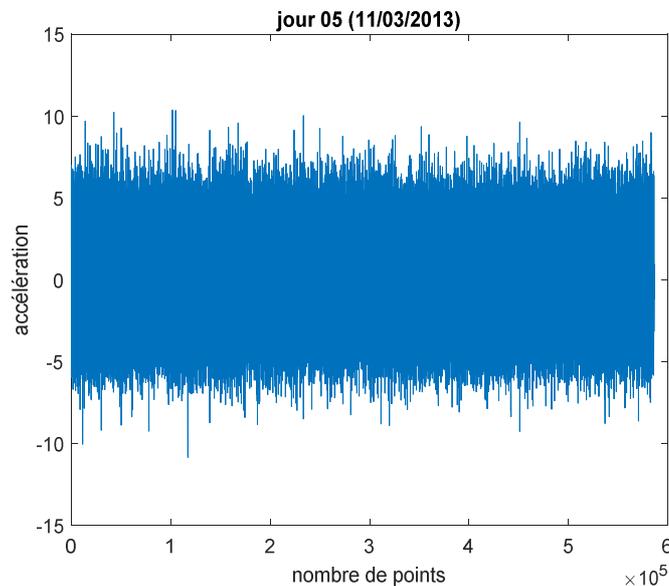
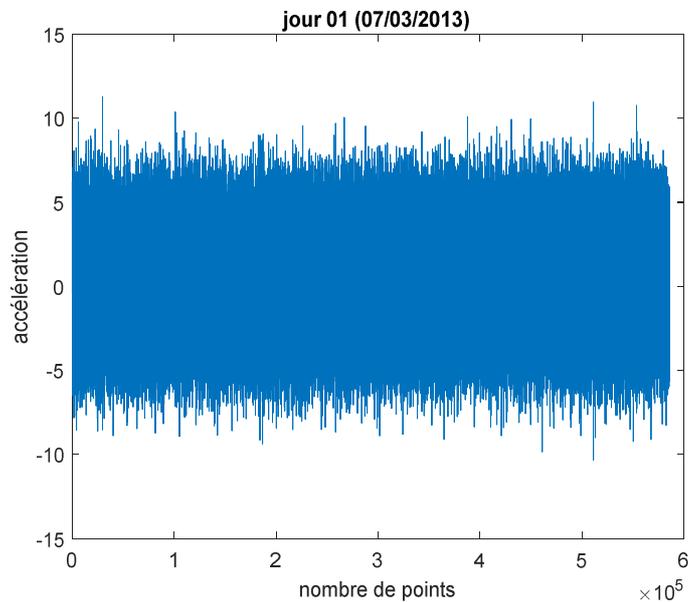
### 3.2. Signaux choisis pour l'étude

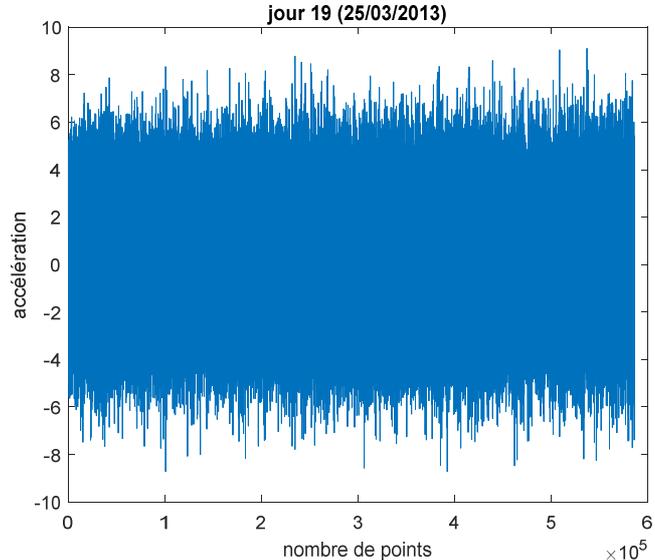
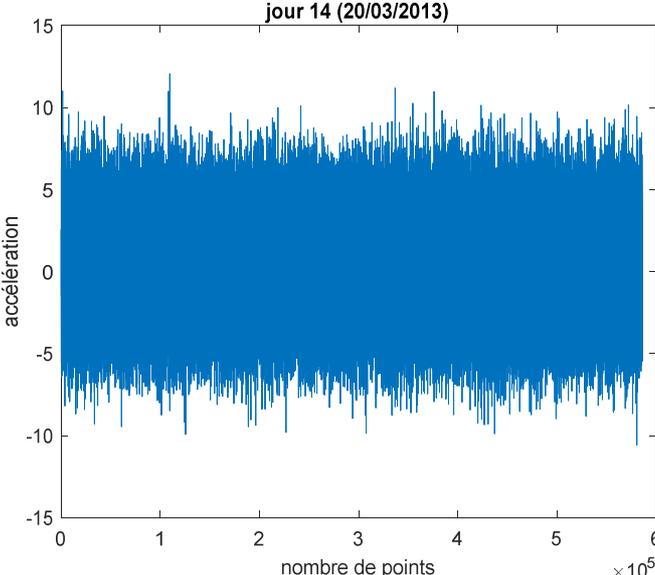
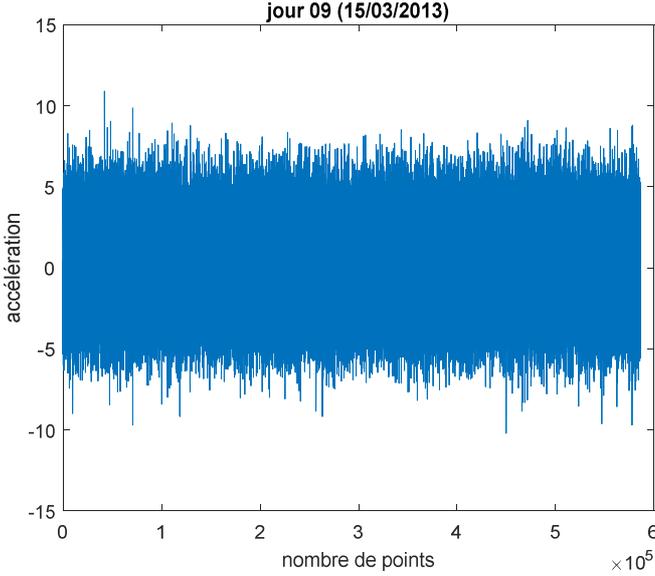
A partir des 50 signaux nous avons choisi 15 signaux couvrant toute la période des mesures, comme indiqué dans le tableau (4.1). La figure (4.4) représente les signaux mesurés. Nous avons choisi les signaux des six derniers jours consécutifs car c'est durant cette période que le défaut s'est probablement manifesté.

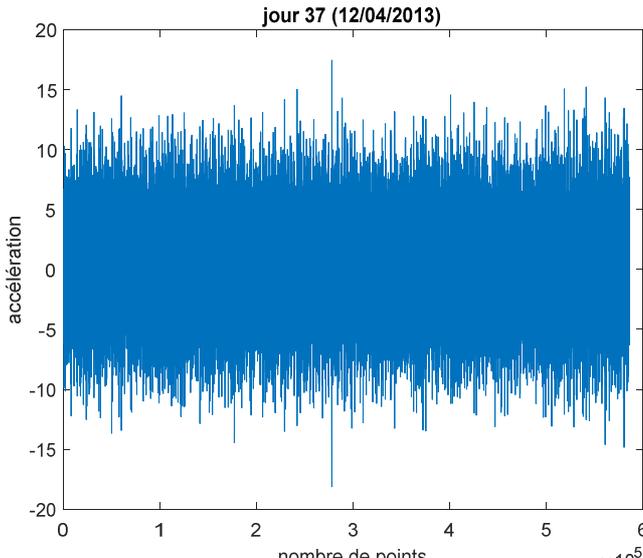
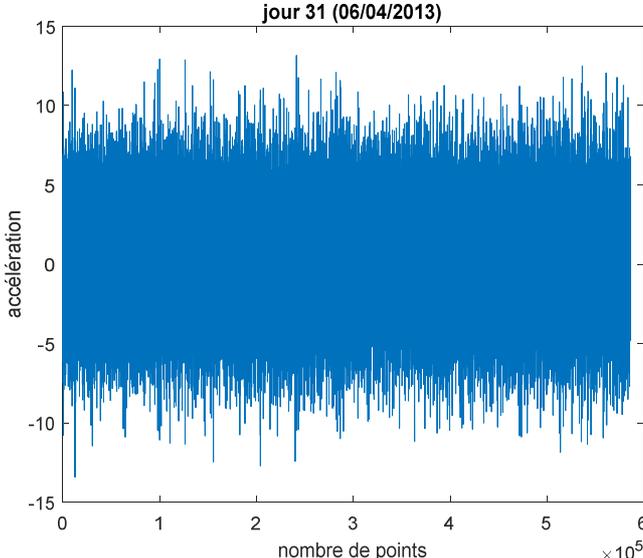
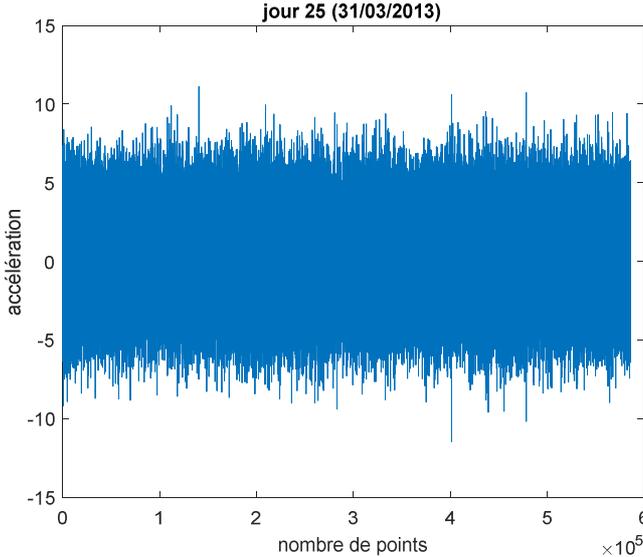
**Nb. La grandeur mesurée dans tous les signaux est l'accélération en (g)**

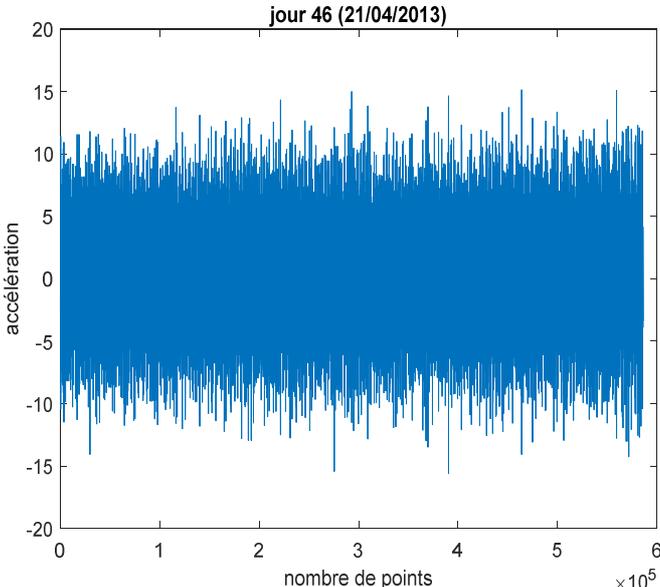
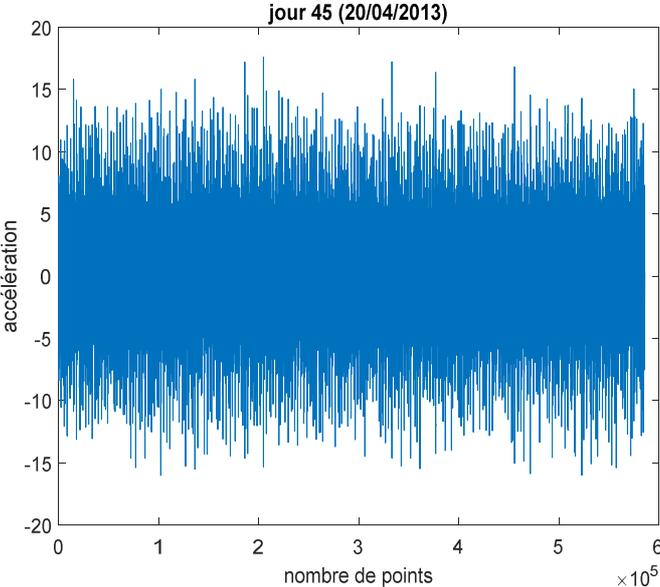
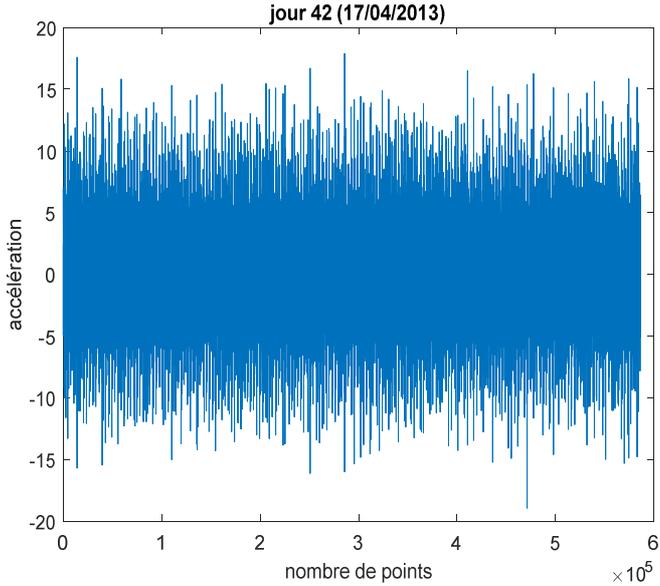
Les Signaux	S1 (j1)	S2 (j5)	S3 (j9)	S4 (j14)	S5 (j19)	S6 (j25)	S7 (j31)	S8 (j37)	S9 (j42)	S10 (j45)	S11 (j46)	S12 J(47)	S13 (j48)	S14 (j49)	S15 (j50)
-------------	---------	---------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

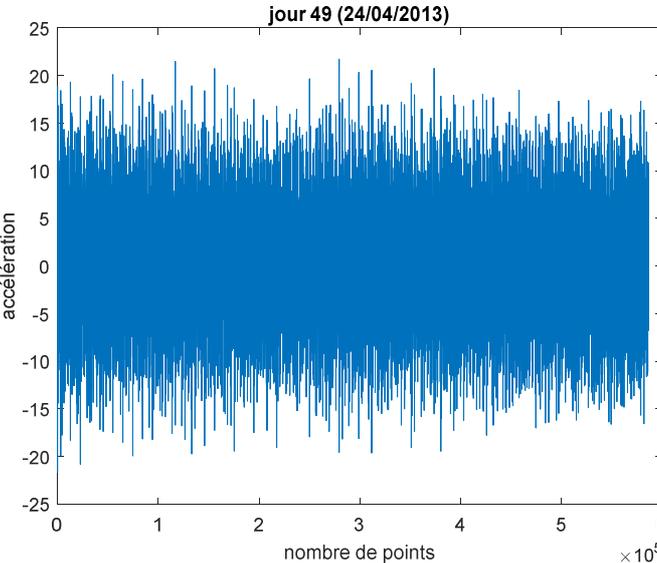
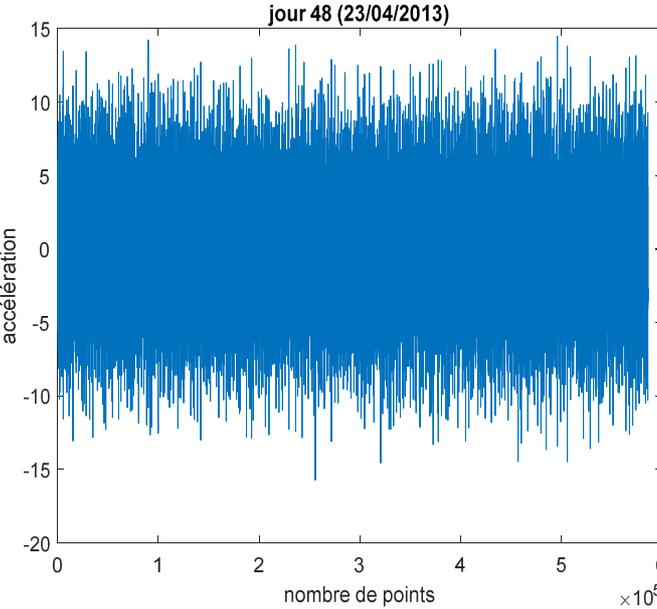
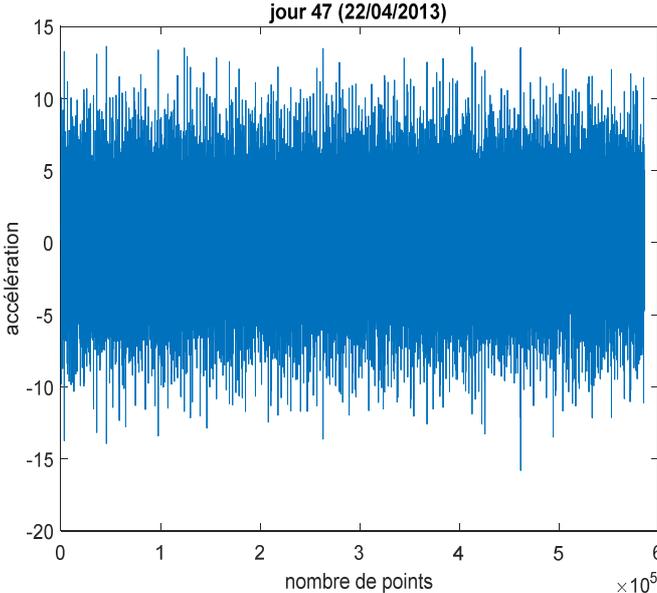
**Tableau 4.1 : Les 15 signaux choisis pour l'étude**

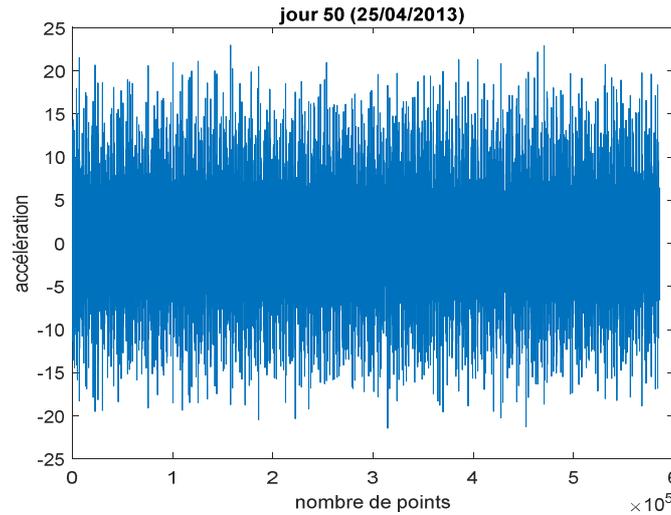










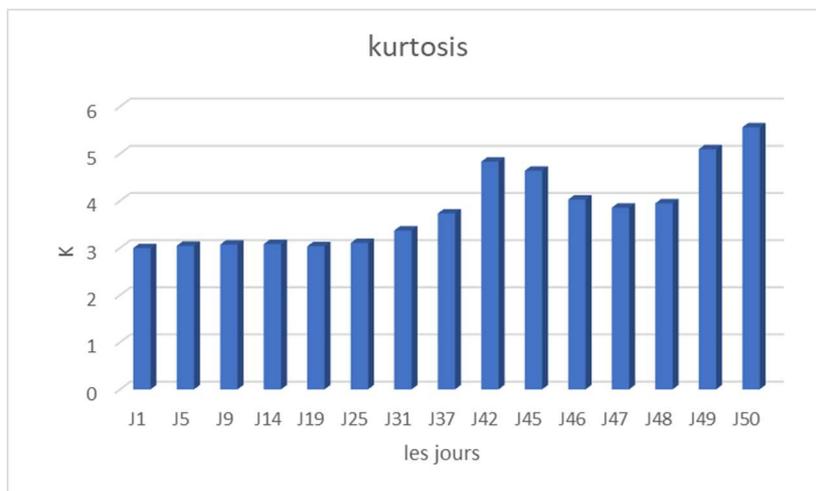


**Figure 4.4 : Signaux choisis couvrant la durée de vie du roulement**

**3.3. Analyse statistique des signaux mesurés**

Pour entamer une analyse statistique des signaux mesurés, nous avons calculé les cinq indicateurs scalaires étudiés au chapitre 3 (Kurtosis, Facteur de Crête, RMS, Valeur crête à crête, Valeur Crête).

Pour les indicateurs les plus sensibles (Kurtosis, Facteur de Crête) on constate un dépassement du seuil admissible (3 pour le Kurtosis et 6 pour Facteur de crête) à partir du 37ème jour pour atteindre des valeurs maximales dans les deux derniers jours (Figures 4.5 et 4.6). La même tendance est enregistrée pour le RMS, Vcc, Vc (Figures 4.7, 4.8 et 4.9). En effet, le niveau vibratoire augmente avec l'augmentation du défaut sur le roulement comme nous allons le discuter plus tard. Le RMS, valeur crête et valeur crête-à-crête sont sensibles à l'énergie du signal et augmentent donc avec l'augmentation du défaut de roulement.



**Figure 4.5 : Kurtosis pour les 15 jours**

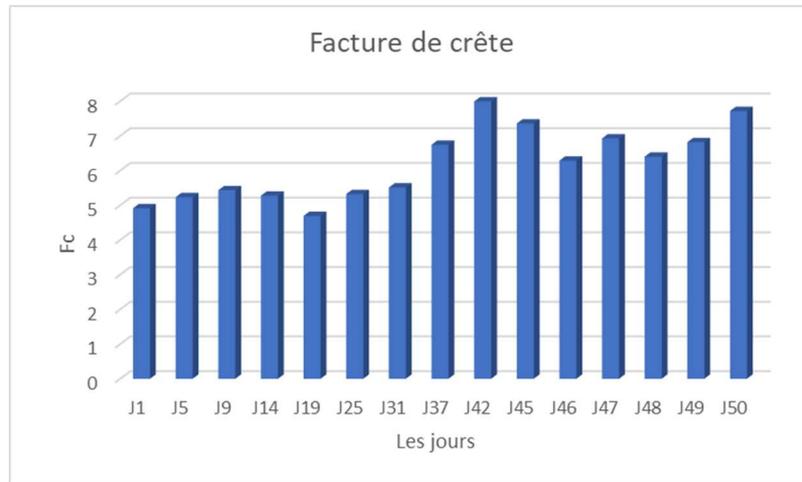


Figure 4.6 : Facteur de crête pour les 15 jours

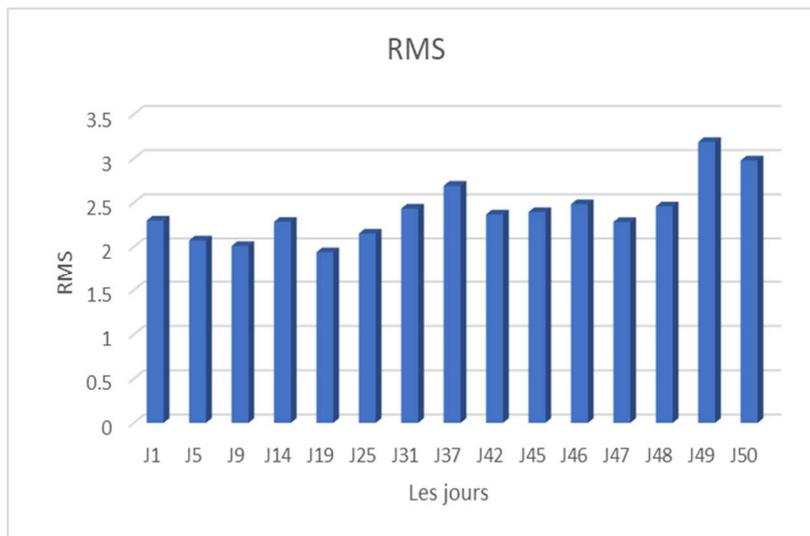


Figure 4.7 : RMS pour les 15 jours

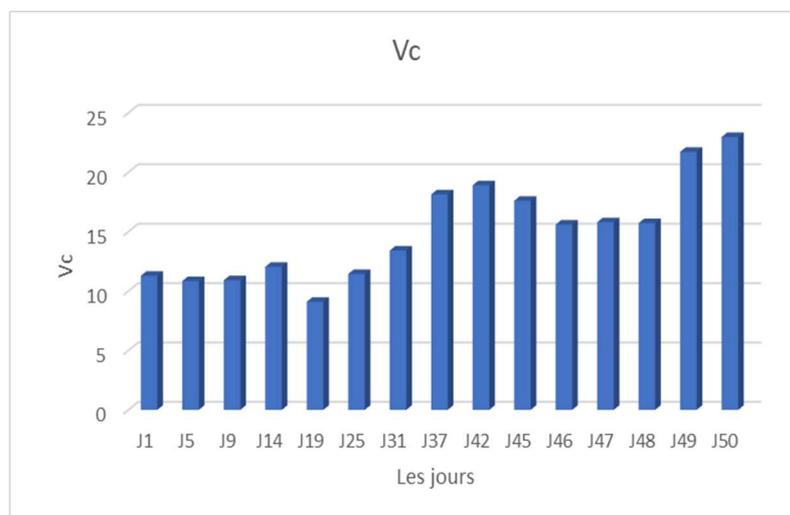


Figure 4.8 : Valeur crête pour les 15 jours

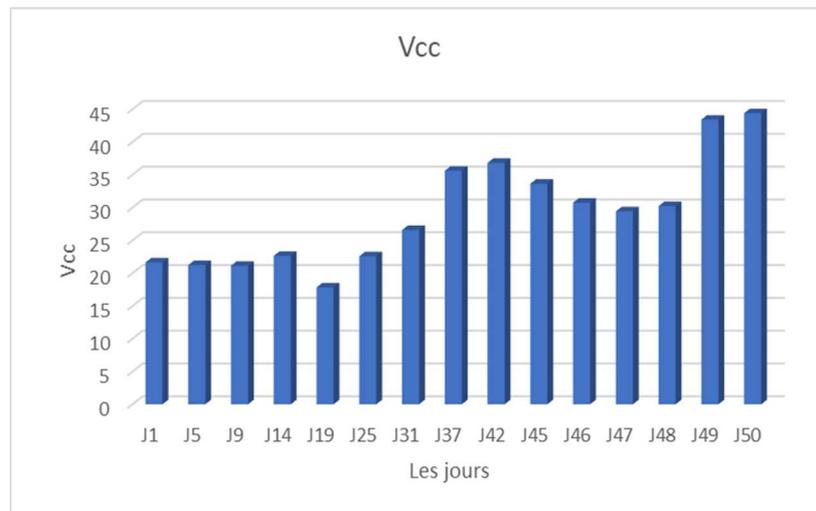


Figure 4.9 : Valeur de crête à crête pour les 15 jours

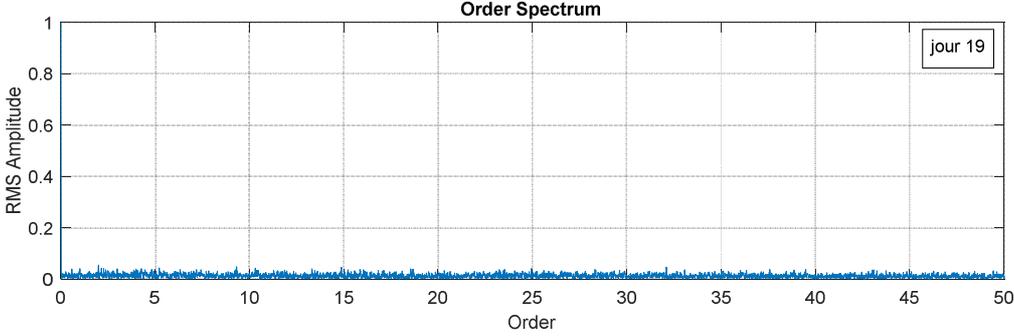
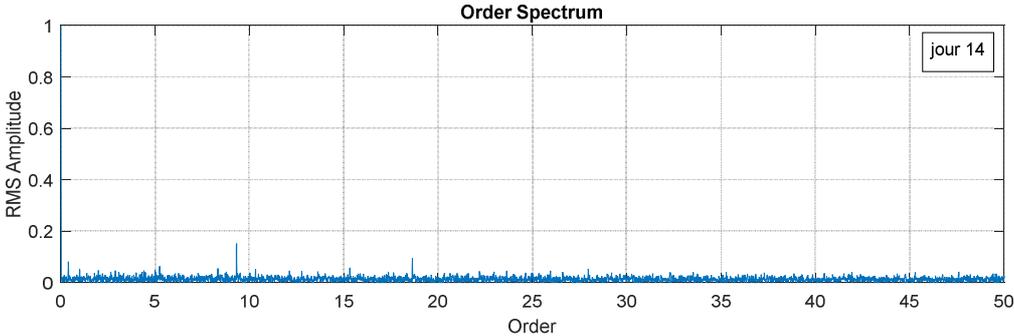
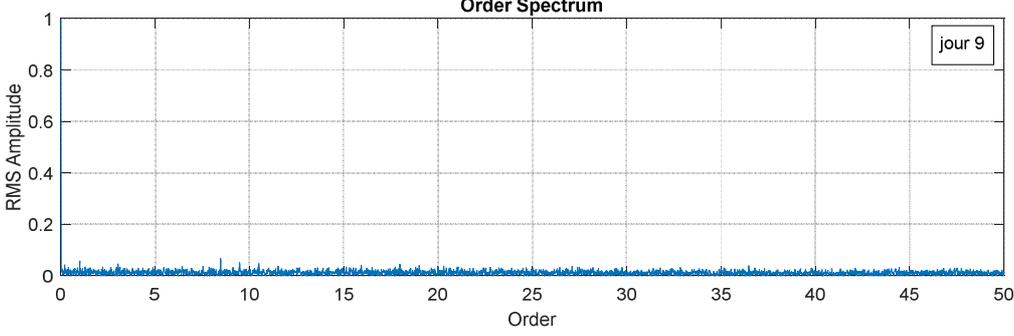
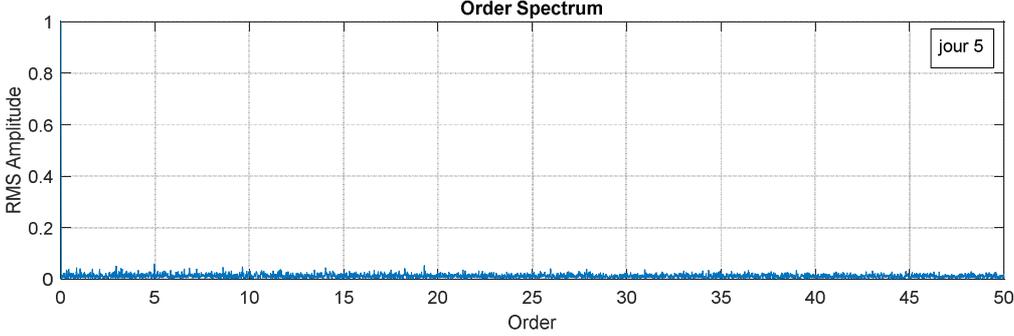
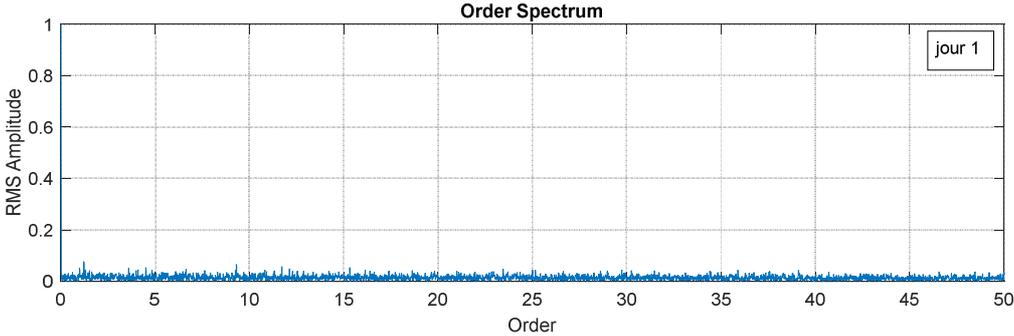
### 3.4. Analyse d'ordre

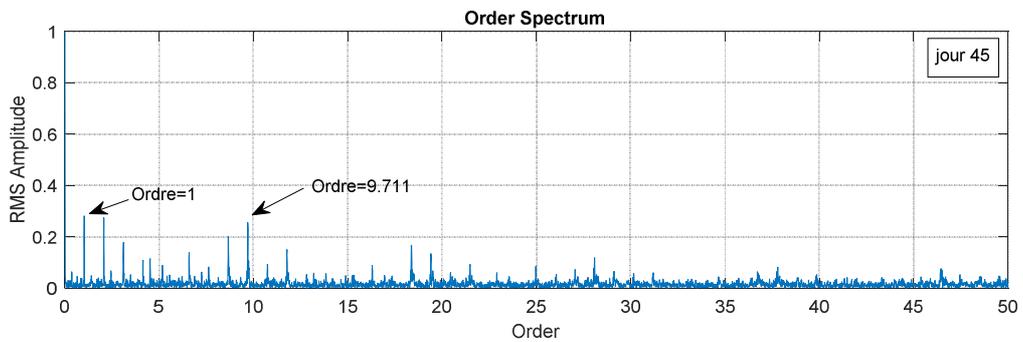
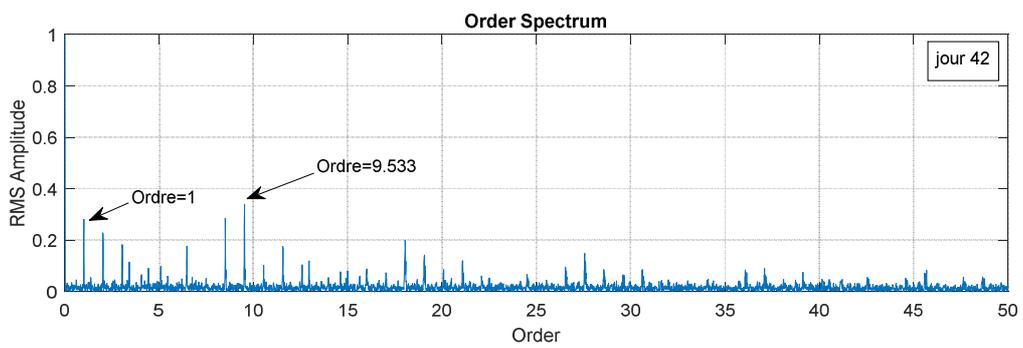
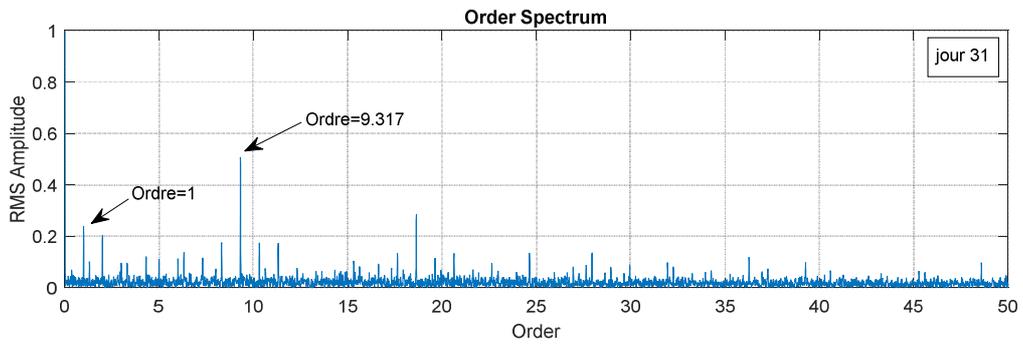
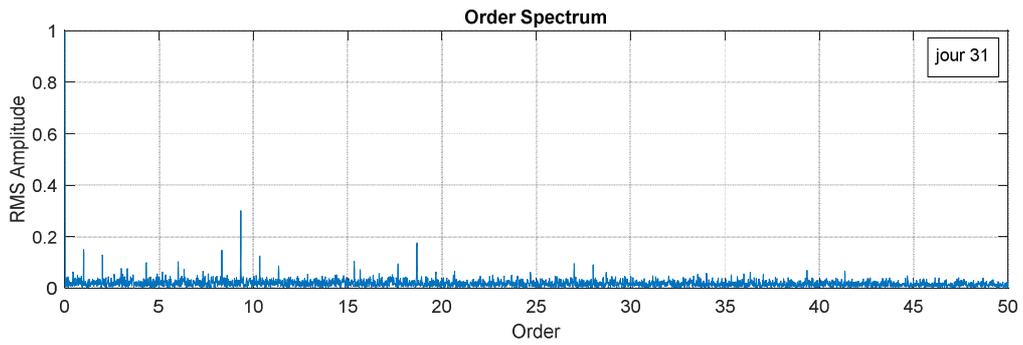
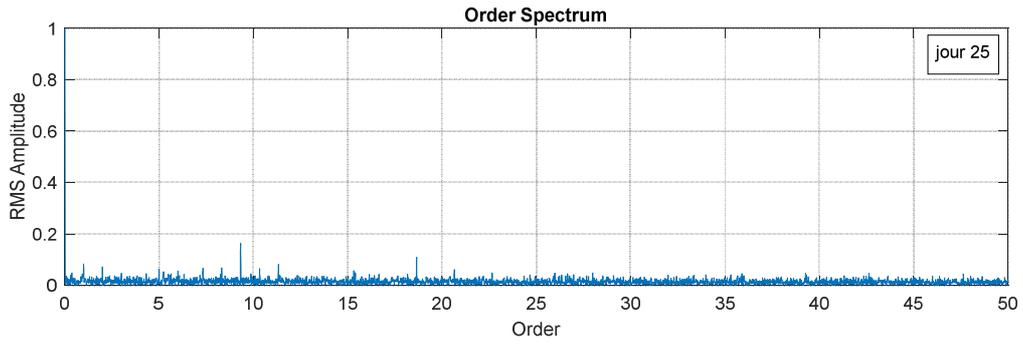
Pour confirmer le type de défaut qui fait augmenter le niveau vibratoire et les 5 indicateurs scalaires, nous avons passé à la phase diagnostic. Pour cela et puisque l'éolienne fonctionne en régime variable nous avons utilisé l'analyse d'ordre. Un spectre d'ordre est donc finalement calculé pour chaque signal à la place d'un spectre d'enveloppe fréquentiel qui aurait peut être donné de faux résultats.

La figure (4.10) représente les résultats obtenus avec la même échelle pour permettre une comparaison fiable entre les différents jours. La première remarque est le fait que le niveau vibratoire augmente considérablement avec le temps. Cette augmentation est très significative d'un défaut sur l'éolienne. Durant les premiers jours l'amplitude des spectres d'ordre est très faible vu le faible niveau vibratoire. Ce n'est qu'à partir du jour 25 que des composantes commencent à apparaître sur le spectre d'ordre. Ces composantes et d'autres seront très évidentes à apercevoir les derniers jours.

On constate également que durant les premières jours le spectre d'ordre ne montre aucune information particulière. Au 14ème jour on constate l'apparition d'un pic correspondant à l'ordre 9.32. En revenant aux informations du roulement de l'arbre principal de l'éolienne, on constate que cet ordre est très proche de l'ordre d'un défaut sur la bague intérieure (9.47). L'amplitude de cet ordre augmente progressivement et à partir du 37ème jour des pics correspondant à l'ordre de la vitesse de rotation apparaissent clairement. Donc on confirme la présence d'un défaut sur la bague intérieure dès le 14ème jour, alors que le kurtosis et le facteur de crête montrent des valeurs normales durant ce jour.

Ce résultat montre que l'utilisation des indicateurs scalaires à des fins de diagnostic n'est pas commode. Ces indicateurs sont limités et nécessitent l'association d'autres outils comme le filtrage par exemple. Leur utilisation comme moyen de suivi (monitoring) est la plus adéquate, car ils sont simples à interpréter et permettent un verdict rapide sur l'état de la machine.





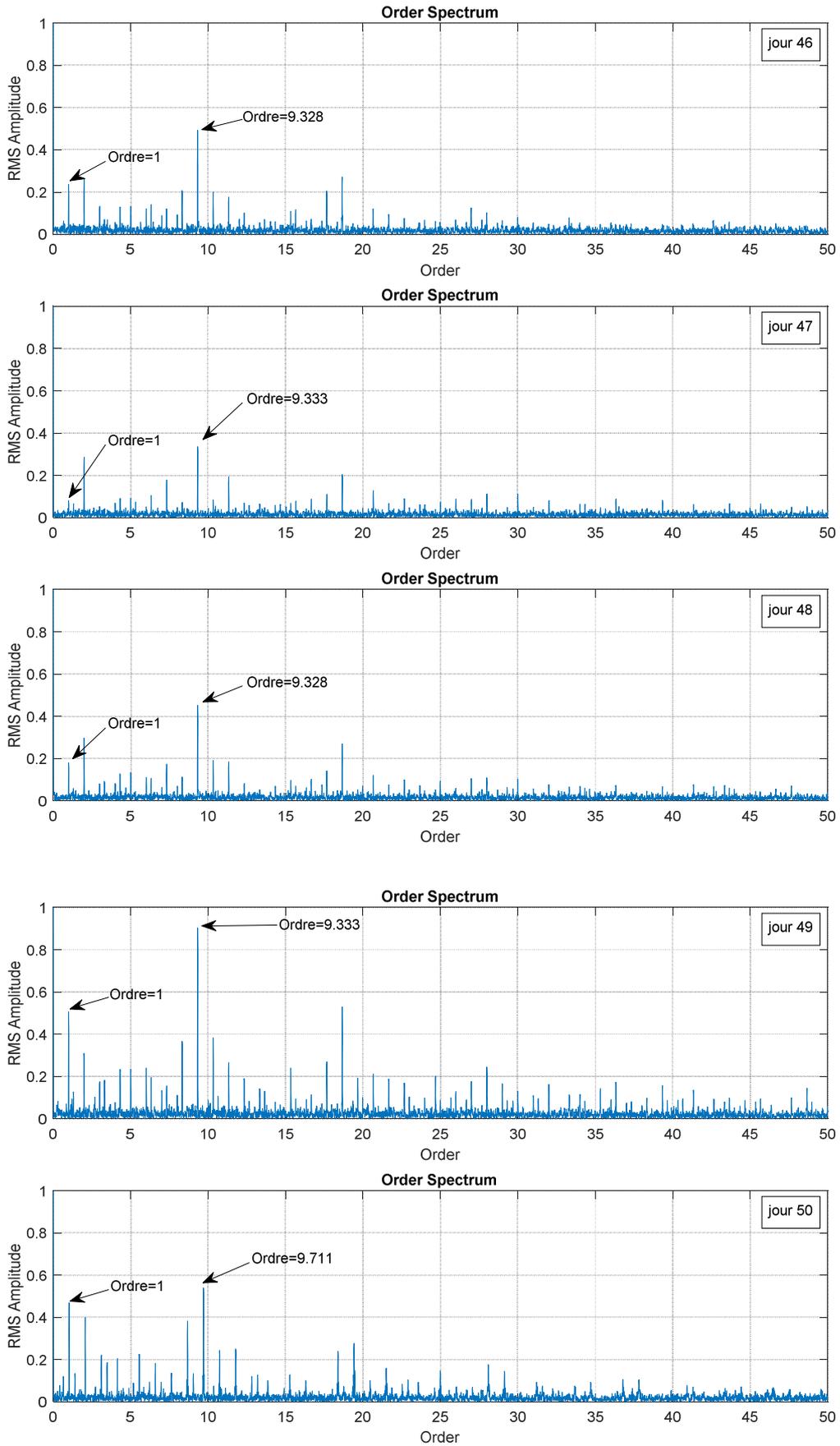


Figure 4.10 : Spectres d'ordre des 15

#### 4. Conclusion du chapitre

Ce chapitre nous a permis d'appliquer la démarche développée au chapitre 3 sur les signaux d'un banc d'essais, sur des signaux réels mesurés en milieu industriel. Pour cela nous avons pris 15 signaux parmi 50 d'une base de données Américaine. Ces signaux ont été mesurés sur une éolienne travaillant dans des conditions normales et couvrent toute la durée de vie du roulement de l'arbre principal de l'éolienne. A la fin des tests un défaut sur la bague intérieure du roulement a été découvert.

L'analyse statistique utilisant les cinq indicateurs scalaires déjà discutés, a permis de montrer encore une fois la fiabilité du kurtosis et du facteur de crête dont les valeurs sont très significatives de la présence d'un défaut de type choc. Les trois autres indicateurs augmentent et reflètent l'apparition d'un défaut mais en aucun cas sa nature.

L'application de l'analyse d'ordre nous a permis d'obtenir les spectres d'ordre des 15 jours. Les résultats montrent une première localisation de l'ordre d'un défaut sur la bague intérieure du roulement de l'arbre principal de l'éolienne dès le 14 jour. Les indicateurs scalaires, notamment le kurtosis et le facteur de crête, ont des valeurs quasi normales ce jour et même les quelques jours qui suivent.

Ce résultat montre l'efficacité de l'analyse d'ordre qui permet une détection bien précoce des défauts avant les indicateurs scalaires classiques. Bien évidemment cet outil reste applicable en deuxième intention pour le diagnostic, alors que pour une simple surveillance les indicateurs scalaires, notamment ceux spécifiques de défauts de roulements et d'engrenages comme le kurtosi et le facteur de crête, restent largement suffisants.

## Conclusion générale

Les machines tournantes font partie intégrante et indissociable de l'industrie moderne. Un défaut de roulement ou d'engrenage peut compromettre la production et conduire à la baisse technicoéconomique d'une entreprise. L'installation d'un contrôle efficace et constant de ces machines est donc un aspect important à prendre en considération dans les différentes politiques de gestion de tout système de production. Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherches ont été réalisés visant essentiellement le développement de méthodes fiables et pratiques pour la détection précoce des défauts de machines, de traitement et de diagnostic des défauts dans le cas d'un régime de fonctionnement variable.

Dans cet esprit, l'objectif de ce mémoire était de proposer une technique visant à détecter les défauts des roulements indépendamment des conditions de fonctionnement de la machine, à savoir le profil de la vitesse de rotation, et cela en se basant sur l'hybridation de quelques outils d'analyse vibratoire jugés efficaces en régime variable. Ces outils sont l'analyse statistique et l'analyse d'ordre jumelée à l'analyse d'enveloppe.

L'efficacité de la méthode d'analyse des signaux de vibration dans la détection des défauts de roulements s'est avérée très efficace car elle a confirmé les résultats tirés de signaux mesurés à des vitesses variables sur des roulements montés sur un banc d'essais de laboratoire. Pour cela nous avons considéré un roulement avec un défaut sur la bague extérieure dans différentes plages de vitesse en mode accélération et décélération. Nous avons dérivé une analyse statistique et utilisé cinq indicateurs, qui sont (RMS, valeur crête, valeur crête-à-crête, kurtosis, facteur de crête). Les résultats montrent que parmi ces indicateurs, le kurtosis et le facteur de crête restent les indicateurs les plus sensibles aux défauts de type chocs, notamment les défauts de roulements et d'engrenages, même en régime variable. Les autres indicateurs, étant sensibles à l'énergie du signal, sont affectés par la vitesse de rotation et leur utilisation peut se limiter au cadre du suivi vibratoire de la machine.

Pour permettre un diagnostic fiable nous avons proposé l'analyse d'ordre jumelée au spectre d'enveloppe. Cette méthode hybride nous a permis de mettre en évidence l'ordre du défaut du roulement peu importe le régime de vitesse considéré.

Pour une application pratique des méthodes testées sur des signaux de laboratoire, nous avons voulu les tester sur des signaux réels mesurés en milieu industriel, à savoir sur une éolienne. Pour ce faire nous avons exploité des signaux fournis par une base de données Américaine : Green Power Monitoring System. Dans cette base cinquante signaux sont disponibles, ils ont été mesurés chaque jour durant cinquante jours successifs. A la fin du test, un défaut sur la bague intérieure du roulement de l'arbre principal de l'éolienne a été découvert.

Parmi ces cinquante signaux nous avons choisi de prendre quinze. L'analyse statistique basée sur les indicateurs scalaires n'a fait que confirmer la fiabilité du kurtosis et du facteur de crête comme indicateurs de surveillance. L'application de l'analyse d'ordre jumelée à l'analyse d'enveloppe a permis de mettre en évidence clairement l'ordre d'un défaut sur la bague intérieure du roulement. Cette méthode a permis ce diagnostic plusieurs jours avant que les

## **Conclusion générale**

indicateurs scalaires, y compris le kurtosis et le facteur de crête, ne le permettent. Ce résultat montre la grande efficacité de cette approche comme outil de détection précoce des défauts de roulements.

En pratique, il est donc préférable d'utiliser les indicateurs scalaires comme indicateurs de surveillance des machines, même en régime variable. Pour permettre la détection d'un défaut, lors de l'augmentation d'un indicateur par exemple, il est impératif d'avoir recourt à l'analyse d'ordre et l'analyse d'enveloppe.

## Références bibliographiques

- [1] F. MONCHY et J-P VERNIER, Maintenance, Méthode et organisation. Dunod, 2010
- [2] B. MACHINE, Maintenance, concepts et définitions. Centre français d'exploitation, 2013/2014
- [3] A. SOUALEM, Etude de la performance par analyse d'huile Cas : compresseur à piston SULZER, Mémoire de Master, Université de Badji Mokhtar Annaba, 2016.
- [4] A. AMIR, Les moyens organisationnels et logistique d'un service de maintenance. Mémoire de Master, Université de Badji Mokhtar Annaba, 2015/2017.
- [5] I. BEKOUICHE, La maintenance basée sur la fiabilité d'une pelle hydraulique Mémoire de Master Université de Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [6] L. CHAABI, Conception d'un système expert pour le diagnostic des roulements dans les machines tournantes fonctionnant en régime variable. Th7se de Doctorat Université 8 Mai 1945 Guelma, 2021
- [7] T. BAALI, Application de l'ensemble de décomposition en mode empirique (EEMD) pour la détection des défauts de roulements en régime variable. Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2017.
- [8] I. KHELF, Diagnostic des machines tournantes par les techniques de l'intelligence artificielle. Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [9] D. AUGEIX, Analyse vibratoire des machines tournantes. Techniques de l'ingénieur traité Génie Mécanique, BM 5 145.
- [10] A. BOULENGER, Maintenance conditionnelle par analyse des vibrations. Techniques de l'ingénieur MT 9 285.
- [11] F. LANDOLSI, Techniques de surveillances. Institut supérieur des études technologique de Nabeul, 2011, 97p.
- [12] G. MEHDIA. Techniques de surveillance des machines tournantes : Analyse vibratoire. Edition 01dB-METRAVIB, Tunisie 2013.
- [13] J. ANTONI, R.B. RANDALL, Differential diagnosis of gear and bearing faults, ASME Journal of Vibration and Acoustics. 124 (2002)165–171.
- [14] J. ANTONI, R.B. RANDALL, The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals. Mechanical Systems and Signal Processing. 20 (2006) 282–307.
- [15] AIT SEGHIR et al., Vibratory monitoring of a spalling bearing defect in variable speed regime. Mechanics & Industry 14.2 (2013): 129-136.
- [16] S. BENCHARIF, Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.

## Références bibliographiques

- [17] F. CHAIB RASSOU, Etude de l'effet du profil de pale sur les forces aérodynamiques d'un rotor type h d'une éolienne à axe vertical. Mémoire de Master Université Djilali Bounaama - Mhemis Meliana, 2017.
- [18] Tahar. Tafticht, Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle du doctorat en génie électrique. Analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien, thèse de Université du Québec éolien en décembre 2006.
- [19] E. BECHHOEFER, B. VAN HECKE, D. HE, Processing for improved spectral analysis. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, New Orleans, LA; 2013.

## Annexes

### Annexe 1 : Valeurs des indicateurs scalaires des neuf signaux en mode accélération

Signaux	RMS (g)	Vc (g)	Vcc (g)	K	Fc
S1	0.0010	0.0086	0.0146	4.9004	8.2759
S2	0.0026	0.0183	0.0330	4.0546	7.1442
S3	0.0046	0.0429	0.0767	4.5928	9.3299
S4	0.0068	0.0558	0.1049	4.6092	8.1986
S5	0.0095	0.0783	0.1335	4.7786	8.2644
S6	0.0128	0.1047	0.1975	4.6702	8.1542
S7	0.0165	0.0994	0.1956	4.2432	6.0423
S8	0.0201	0.1185	0.2314	3.9985	5.9103
S9	0.0251	0.1993	0.3358	4.9206	7.9412

### Annexe 2 : Valeurs des indicateurs scalaires des neuf signaux en mode décélération

Signaux	RMS (g)	Vc (g)	Vcc (g)	K	Fc
S1	0.0270	0.1696	0.3098	4.4317	6.2858
S2	0.0240	0.1501	0.2835	3.9221	6.2582
S3	0.0207	0.1189	0.2287	3.9429	5.7414
S4	0.0164	0.1206	0.2244	4.4958	7.3595
S5	0.0119	0.0954	0.1648	4.4930	8.0111
S6	0.0086	0.0590	0.1074	4.3037	6.8250
S7	0.0060	0.0420	0.0827	4.1362	6.9893
S8	0.0036	0.0280	0.0535	4.2148	7.8604
S9	0.0016	0.0098	0.0185	4.3902	6.2038

**Annexe 3 : Valeurs des indicateurs scalaires des signaux mesurés sur l'éolienne**

<b>Les jours</b>	<b>Kurtosis</b>	<b>Facteur de crête</b>	<b>RMS (g)</b>	<b>Vc (g)</b>	<b>Vcc (g)</b>
J1	2.9956	4.9147	2.2967	11.2877	21.6211
J5	3.0445	5.2352	2.0718	10.8462	21.2170
J9	3.0711	5.4323	2.0083	10.9098	21.1204
J14	3.0817	5.2771	2.2819	12.0420	22.6331
J19	3.0347	4.6938	1.9377	9.0952	17.8183
J25	3.1059	5.3230	2.1488	11.4382	22.5560
J31	3.3697	5.5124	2.4325	13.4091	26.5639
J37	3.7307	6.7436	2.6902	18.1413	35.6012
J42	4.8300	7.9920	2.3663	18.9114	36.8135
J45	4.6366	7.3567	2.3929	17.6041	33.6220
J46	4.0259	6.2869	2.4810	15.5977	30.7346
J47	3.8543	6.9266	2.2807	15.7973	29.4124
J48	3.9453	6.4013	2.4567	15.7263	30.2134
J49	5.0936	6.8181	3.1865	21.7258	43.3847
J50	5.5566	7.7175	2.9762	22.9692	44.3808