

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE: TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE
ELECTRIQUE



FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

N° :

Mémoire présenté pour l'obtention du

Diplôme de Master Académique

Par :

SALMI Oussama

BOUHAFS Mounir

Intitulé

**Surveillance et diagnostic des systèmes
électromécaniques par l'analyse fonctionnelle et le
réseau de neurone Artificiel**

Soutenu devant le jury composé de:

KHODJA Djalaleddine	Prof-Université de M'sila	Président
CHEBABHI Ali	MCA-Université de M'sila	Rapporteur
DEFDAF Mabrouk	MCA-Université de M'sila	Co-Rapporteur
LAAMARI Yahia	MCA-Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2020/2021



Remerciements

En premier lieu nous tenons à remercier Le Bon Dieu Tout Puissant et Miséricordieux de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous a accordé tout au long de notre

"El hmdulli'Allah"

Nous ne saurions, réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite nos encadreur Dr. [Defdaf mabrouk](#), afin de le remercier pour son sympathie, ses encouragements, son aide, son dévouement pour le travail et son présence totale, sans ses conseils, ses aides et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitude à tous nos Enseignants qui ont contribués à notre formation durant notre parcours études.

Nos remerciements vont également à tous les membres du staff de notre département de Génie électrique, pour leur disponibilité et leur gentillesse.

Un remerciement spécial aux Étudiants du département de Génie électrique et à tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Oussama, Mounir

DEDICACE

*Nous dédions ce fruit de nos années d'études aux
plus chers au monde :*

*À L'âme qui été pour nos corps mieux qu'un cœur :
Nos parents.*

À nos frères et sœurs.

À nos Familles.

*À ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'aboutissement de ce travail.*

À Tous nos proches, nos amies et nos collègues.

*À tous nos amis de la résidence. Sans oublier les
étudiants (es) de la promotion 2021*

Oussama, Mounir

Résumé

Résumé

Dans ce travail, nous allons étudier la surveillance et le diagnostic des défauts d'une machine électrique tournante par l'analyse vibratoire. Cette analyse est un outil pour mesurer le niveau vibratoire de la machine électrique en fonctionnement. Pour faire cette analyse, il est nécessaire d'une chaîne de mesure dont leurs éléments constitutifs sont le capteur de vibration, l'amplificateur et l'analyse FFT. Et de suivre correctement les défauts de roulement, nous avons appliqué la méthode de l'analyse vibratoire en plus les réseaux de neurone (RNA), et cela se reflète dans le programme Matlab.

Enfin, les résultats ont montré que cette méthode de suivi et de surveillance des défaillances des machines rotatives a été efficace de manière simple et rapide sans perte.

Mots clés : surveillance, diagnostic, vibration, l'analyse vibratoire, défaut, réseaux de neurone, FFT.

ملخص

سوف ندرس في هذا العمل رصد وتشخيص عيوب الآلة الكهربائية الدوارة عن طريق التحليل الاهتزازي. وهذا التحليل أداة لقياس المستوى الهزاز للآلة الكهربائية العاملة. ولإجراء هذا التحليل، من الضروري أن تكون هناك سلسلة قياس تكون مكوناتها هي جهاز استشعار الاهتزاز والتحليل المضخم وتحويل فوري السريع. ولكي نتتبع العيوب المتداولة على نحو سليم، فقد طبقنا طريقة التحليل الاهتزازي بالإضافة إلى الشبكات العصبية، وهذا ما ينعكس في برنامج matlab. وأخيرا، أظهرت النتائج أن هذه الطريقة لرصد ورصد إخفاقات الآلات الدوارة كانت فعالة بطريقة بسيطة وسريعة دون خسارة.

الكلمات الرئيسية: المراقبة، التشخيص، الاهتزاز، تحليل الاهتزاز، العيب، الشبكات العصبية، تحويل فوري السريع.

Table de matières

Table des matières	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux.....	
Glossaire	
Introduction général	2
1 CHAPITR01 : Généralité de l'analyse fonctionnelle.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Etat de l'art.....	3
1.2.1 Citation des travaux antérieurs.....	3
1.3 Réisme de la généralité.....	4
1.3.1 Analyse vibratoire	4
1.3.2 La méthode FAST (Function Analysis System Technique)	5
1.3.3 La Méthode de SADT (Structured Analysis for Design and Technic)	6
1.3.4 Déférents défaut de machines tournantes	7
1.4 Conclusion	30
2 Chapitre 02 : Présentation de l'analyse vibratoire.....	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Notions fondamentales	32
2.2.1 Introduction à la vibration	32
2.2.2 Signaux vibratoires.....	33
2.3 Les correspondances: déplacement, vitesse, Accélération amplitude et fréquence ...	37
2.3.1 Déplacement	37
2.3.2 Vitesse	37
2.3.3 Accélération	38
2.3.4 Amplitude :	39
2.3.5 Fréquence :	39
2.4 Les méthodes d'analyse des vibrations	40
2.4.1 Les méthodes temporelles.....	40
2.4.2 Les méthodes fréquentielles.....	42
2.5 La chaine de mesure des vibrations.....	44
2.5.1 Capteur de vibration	44

2.5.2	Amplificateur	45
2.5.3	L'analyseur FFT	45
2.6	Détermination des seuils	46
2.6.1	Méthode du relevé global	46
2.6.2	Méthode de l'analyse spectrale.....	46
2.6.3	Seuils de jugement	47
2.7	Domages causés par des vibrations excessives.....	48
2.8	Conclusion	49
3	Chapitre 03 :Réseaux de neurones artificiels	49
3.1	Introduction.....	49
3.2	Definitions de quelques termes liés au diagnostic	49
3.3	Les réseaux de neurones biologiques	51
3.4	Fonctionnement des neurones	53
3.5	Les neurones artificiels	53
3.6	Réseaux de neurones artificiels	58
3.6.1	Perceptron monocouche	58
3.6.2	Réseaux neuronaux multicouches de type Feed- Forward	60
3.6.3	Réseaux récurrents	61
3.6.4	Réseaux cellulaires	62
3.6.5	Les mécanismes de mémorisation.....	62
3.6.6	Les mécanismes d'apprentissage	63
3.6.7	Les mécanismes de classification.....	65
3.7	Diagnostic des défauts des roulements et de cassure de barre par réseaux de neurones	66
3.7.1	Défaut de roulement	66
3.7.2	Résultat de simulation	67
3.7.3	Défaut de cassure de barre	70
3.7.4	Résultat de simulation	72
3.7.5	Défauts de roulements et de cassures de barres	75
3.7.6	Résultat de simulation	76
3.8	Conclusion	77
	Conclusion générale.....	78
	Références bibliographiques.....	79

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1-1 : Méthode de lecteur de FAST.....	5
Figure 1-2 : FAST de la fonction de service FSi.....	6
Figure 1-3 : Méthode de lecteur de SADT.....	7
Figure 1-4 : Actigrammes.....	7
Figure 1-5 : Datagrammes.....	7
Figure 1-6 : Défaut de balourd dans un rotor.....	8
Figure 1-7 : Force centrifuge exercée par la masse.....	9
Figure 1-8 : Quelques causes de balourd.....	9
Figure 1-9 : Image de balourd statique.....	10
Figure 1-10 : Image de balourd de couple.....	11
Figure 1-11 : Balourd quasi-statique.....	11
Figure 1-12 : Désalignement parallèle.....	12
Figure 1-13 : Comportement des paliers pour un désalignement parallèle.....	12
Figure 1-14 : Désalignement angulaire.....	13
Figure 1-15 : Flexion pure des paliers.....	13
Figure 1-16 : Désalignement combiné.....	14
Figure 1-17 : Phénomène de tourbillonnement.....	15
Figure 1-18 : défaut de fixation.....	16
Figure 1-19 : Constitution des roulements.....	17
Figure 1-20 : Roulement à billes.....	17

Figure 1-21 : Paramètres géométriques des roulements.....	18
Figure 1-22 : Paramètres cinématiques du roulement.....	19
Figure 1-23 : Paramètres caractéristiques des roulements.....	21
Figure 1-24 : Rotation des éléments roulants.....	22
Figure 1-25 : Dégradation des dents d'une roue dentée.....	24
Figure 1-26 : Différents types d'engrenages.....	25
Figure 1-27 : Ligne d'action de deux roues.....	26
Figure 1-28 : Dents en prise lors de l'engrènement.....	26
Figure 1-29 : Train épicycloïdal.....	28
Figure 1-30 : Transmission par courroie.....	29
Figure 1-31 : Défaut de courroie.....	29

Chapitre 02

Figure 2-1 : Mesure d'une vibration.....	31
Figure 2-2 : Systèmes oscillants.....	32
Figure 2-3 : La représentation d'un signal harmonique (vibration sinusoïdale.....	33
Figure 2-4 :La représentation d'un signal périodique non harmonique.....	33
Figure 2-5 : Exemples d'un signal transitoire et d'un signal aléatoire.....	34
Figure 2-6 : Grandeurs associés à un signal vibratoire. a) déplacement; b) vitesse; c) accélération.....	37
Figure 2-7 : La représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale).....	38
Figure 2-8 : La représentation spectrale d'un signal sinusoïdal.....	42
Figure 2-9 :Les différentes direction des mesures.....	44
Figure 2-10 :Détermination des seuils par la méthode du relevé global.....	45

Chapitre 03

Figure 3-1: Architecture générale d'un système de supervision en ligne.....	50
Figure 3-2: schéma simplifié d'un neurone du cerveau humain.....	52
Figure 3-3: modèle du neurone de Mc CULLOCH et PITTS.....	53
Figure 3-4 : fonction de seuillage avec un sommateur.....	54
Figure 3-5: modélisation générale d'un neurone.....	55
Figure 3-6: Perceptron monocouche	59
Figure 3-7 : Réseau PMC à connections directes.....	60
Figure 3-8: Structure d'un réseau de neurone récurrent.....	61
Figure 3-9 : Réseau cellulaire.....	61
Figure 3-10: modèle d'apprentissage de la connexion w_{ij} entre deux neurones.....	63
Figure 3-11: séparation de deux classes avec adaptateur linéaire.....	65
Figure 3-12 : Structure de réseau neurone proposé dans ce cas	
Figure 3-13 : Résultats de simulation de l'état sain	
Figure 3-14 : Résultats de simulation de défaut bague interne	
Figure 3-15 : Résultats de simulation de défaut de bille	
Figure 3-16 : Résultats de simulation de défaut bague extérieur	
Figure 3-17 : Structure de réseau neurone proposé dans ce cas	
Figure 3-18 : Résultats de simulation de l'état sain.	
Figure 3-19 : Résultats de simulation de défaut cassure d'une seule barre.	
Figure 3-20 : Résultats de simulation de défauts cassures des quatre barres.	
Figure 3-21 : Structure de réseau neurone proposé pour la détection des deux défauts dans le même temps	

Figure 3-22 : Résultats de simulation des deux défauts cassures des barres et défauts du roulement

Liste des tableaux

Chapitre 01

Tableau 1-1: désignation des différents paramètres géométriques des roulements....18

Chapitre 02

Tableau 2-1 : Nature des vibrations et facteur de crête.....40

Tableau 2-2 : Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372.....46

Tableau 2-3: Défauts et fréquences correspondants.....47

Chapitre 03

Tableau 3.1 : Fonction de transfert.....56

Tableau 3-2 : Table de vérité (ET, OU).....59

Tableau 3.3: Classification des types des défauts de roulement

Tableau 3.4: Classification des types des défauts de défauts cassure de barre

Glossaire

FFT : Fast Fourier Transform (transformée de Fourier discrète rapide).

FAST: Function Analysis System Technique.

SADT: Structured Analysis for Design and Technic.

FTF: Fundamentals Train Fréquence.

BSF: Ball Spin Fréquence.

BPFO: Ball Pass Frequency Outre Race.

BPFI: Ball Pass Frequency Inner Race.

RMS: Root Mean Square.

RNA: Réseau de Neurone Artificiel.

X: déplacement (m).

t: temps (s).

A: amplitude.

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

γ : Accélération (m/s²).

V: vitesse (m/s).

F: fréquence (Hz).

A_c: Amplitude crête.

Acc: Amplitude crête à crête.

A_{eff}: Amplitude efficace.

dB: Décibel.

Hz: Hertz.

Introduction **générale**

Introduction général

Les mutations techniques et économiques, amplifiées par la mondialisation ont généré d'importants changements dans les entreprises. La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Le service de diagnostic et de maintenance dans la logique qualité est confronté à des problèmes de plus en plus complexes (concurrence rude, échange de grandes quantités de données hétérogènes, matériels sophistiqués, etc.). Or, les défaillances qui apparaissent dans les machines tournantes sont rarement décelables visuellement, ou alors il est déjà trop tard pour agir. De ce fait, la résolution nécessite des méthodes spécifiques d'aide à la décision et de nouvelles structures à intégrer dans la stratégie de l'entreprise. C'est pourquoi, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace [5]. L'interruption inattendue entraîne des problèmes dans le processus de production et une augmentation des factures de réparation. De plus, un mauvais entretien peut aussi entraîner un état critique, ce qui pose un risque pour le personnel, l'équipement ou l'environnement. Le suivi et le diagnostic des défauts sont donc devenus cruciaux dans le processus de production.

L'efficacité de la maintenance est devenue un enjeu économique majeur et ses difficultés résident dans le choix des procédures de maintenance à prendre en temps opportun, surtout lorsque la machine joue un rôle vital dans le processus de production, ce qui peut avoir de graves conséquences. Afin d'éviter une fin de production attendue, ces lacunes doivent faire l'objet d'une surveillance continue et tous les panneaux d'avertissement doivent être suivis avant qu'il ne soit trop tard.

Pour relever ces défis, la maintenance doit utiliser des techniques modernes, loin de l'ancienne culture de la maintenance. Le but de la surveillance était de protéger la machine en l'arrêtant automatiquement avant que de graves dommages ne se produisent. L'expérience antérieure a montré que l'analyse vibratoire est le plus souvent utilisée dans la maintenance conditionnelle, et l'une des méthodes les plus efficaces pour déterminer les défaillances ou la détérioration des machines rotatives.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans le cadre d'une simulation de fonctionnement d'algorithmes de la transformée de Fourier pour la détection des défauts des roulements et des cassures des barres. On utilise à cet effet des programmes en Matlab permettant la mise en œuvre des programmes d'algorithme transformée de Fourier (FFT) et réseaux de neurones (RNA) effectué à partir d'une étude en simulation sur plusieurs signaux différents.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres:

Le premier chapitre présente quelques généralisations et définitions sur l'analyse fonctionnelle, se réfère à certaines des études antérieures de notre sujet, et à la fin est présenté les différents défauts qui se produisent sur les machines tournantes.

Le deuxième chapitre présente l'analyse vibratoire, Où elle a été définie initialement la diagnostic et la surveillance et présente les différents types des Signaux vibratoires, et les méthodes d'analyse des vibrations. Enfin, ont été présente La chaine de mesure des vibrations.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties:

La première partie présente les éléments permettant de comprendre la théorie des réseaux neuronaux, en vue de développer le système automatique de diagnostic des défaillances des systèmes électromagnétiques. Lorsque ce chapitre comprend la description des fondements biologiques des réseaux de neurones leur modélisation et la présentation des modèles les plus importants permettant l'apprentissage des RNA.

La deuxième partie nous avons appliqué la méthode du réseau de neurone artificiel (RNA) pour le diagnostic des défauts des roulements et des cassures des barres. C'est là que nous avons mis en place la structure de réseau neurone et extraction les résultats de simulation et son commentaire.

CHAPITR01 :
Généralité de
l'analyse
fonctionnelle

1 CHAPITR01 : Généralité de l'analyse fonctionnelle

1.1 Introduction

Ces dernières années, la surveillance et le diagnostic des défauts dans les machines et systèmes électromagnétiques ont reçu une attention considérable. Le diagnostic et la détection précoce de ces défauts et l'identification de leurs causes permettent d'éviter des dommages à ces systèmes et de réduire le temps d'entretien pour réduire les pertes financières. Ce diagnostic nécessite certaines méthodes analytiques qui permettent de bien détecter l'état de ces machines et ce notamment l'analyse vibratoire. Dans ce chapitre, nous allons trier les divers défauts, définir certaines façons de les diagnostiquer et fournir un résumé de certains des travaux précédents sur ce sujet.

1.2 Etat de l'art

1.2.1 Citation des travaux antérieurs.

La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir un appareil dans l'état spécifié ou en mesure d'assurer un service bien déterminé[1].

Actuellement, les machines électriques représentent un élément clé de nombreux systèmes électromécaniques omniprésents dans une grande variété d'applications industrielles. En effet, Le recours aux moteurs asynchrones est surtout lié à leur robustesse, leur puissance massique et à leur coût de fabrication. Néanmoins, ce moteur peut être affecté par une diversité de défaillances qui se répercutent sur la sécurité des personnes, des équipements et la rentabilité des installations. Par conséquent, il est très intéressant de développer des méthodes de diagnostic permettant de détecter ces défaillances de manière anticipée afin d'améliorer la fiabilité et la disponibilité des systèmes électromécaniques[2].

Chercheur YAHIA LAAMARI : Dans notre présent travail, après avoir développé deux modèles analytiques dédiées à l'étude du comportement dynamique de la machine asynchrone à l'état sain (modèle de Park) et défaillant (modèle multi-enroulements : cas de cassure de barres ou d'anneaux de court-circuit). Le travail initié dans cette thèse nous a permis de développer une méthodologie générale de détection des défaillances dans les machines électromécaniques en particulier le moteur asynchrone. Pour cela, nous avons adopté deux approches différentes : celle basée sur l'estimation des états et paramètres de la machine et celle basée sur l'utilisation des techniques du traitement du signal. Le but est de réaliser une maintenance préventive du moteur par le suivi permanent de son état de fonctionnement réel[2].

Chercheur TALEB MOUNIA : L'expérience a montré que l'analyse vibratoire est l'outil plus fiable qui donne précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration d'une machine tournante. Elle permet d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé des dommages irréversibles, elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance .Dans ce sens j'ai fait une étude à la cimenterie d'Elmalabiod, qui a adopté une surveillance continue en collaboration avec une société de maintenance (SME)chargée de la maintenance des équipements pour les cimenteries de l'est en espérant aboutir à une politique optimale de la maintenance conditionnelle. des mesures réelles ont été analysées par l'indicateur vibratoire en aboutissant à des résultats satisfaisants[3].

Chercheur BOUZOUANE BELAID : Différentes méthodes sont mises en œuvre pour identifier la nature d'un défaut sur une machine tournante, en utilisant des mesures vibratoires; elles diffèrent entre elles par leur précision, leur simplicité de mise en œuvre et leur sensibilité aux erreurs de mesure. L'identification d'une combinaison de plusieurs défauts est toujours difficile à mettre en œuvre par les méthodes classiques du traitement du signal, sachant que le signal vibratoire qui en découle est bruité, rendant ainsi toute identification fastidieuse .Une méthode basée sur les réseaux de neurones est proposée pour identifier un défaut ou plusieurs combinaisons de défauts mécaniques[4].

1.3 Réisme de la généralité

1.3.1 Analyse vibratoire

Une vibration est une oscillation ou la quantité est un paramètre définissant le mouvement d'un système mécanique[5].

Actuellement, les techniques à base d'analyse vibratoire sont largement les techniques les plus célèbres dans le domaine de détection des défauts des machines tournantes[3].

L'analyse vibratoire est l'un des plus importants moyens de tests pour comprendre l'état de la machine. Le niveau et le comportement du signal vibratoire dépend des conditions internes de la machine tournante. L'analyse se fait par la comparaison avec une valeur d'référence [3].

L'analyse vibratoire fait partie d'un ensemble de méthodes sur lesquelles on essaye de baser des systèmes de maintenance prédictive des machines tournantes [6].

1.3.2 La méthode FAST (Function Analysis System Technique)

1.3.2.1 Définition

Un diagramme FAST présente une traduction rigoureuse de chacune des fonctions de service en fonctions techniques, puis matériellement en solutions constructives[6].

Le diagramme FAST se construit de gauche à droite, dans une logique du pourquoi au comment[6].

1.3.2.2 Utilisation du FAST

1.3.2.2.1 Construction du FAST

Les fonctions, représentées par des blocs rectangulaires, sont liées entre elles par des traits droits (sans flèches), qui les ordonnent. Les fonctions techniques sont nommées FTijk ... où i est le numéro de la FS développée (FSi). j et k indiquent la position de la fonction technique dans l'arborescence de FSi [7].

1.3.2.2.2 Lecteur du FAST

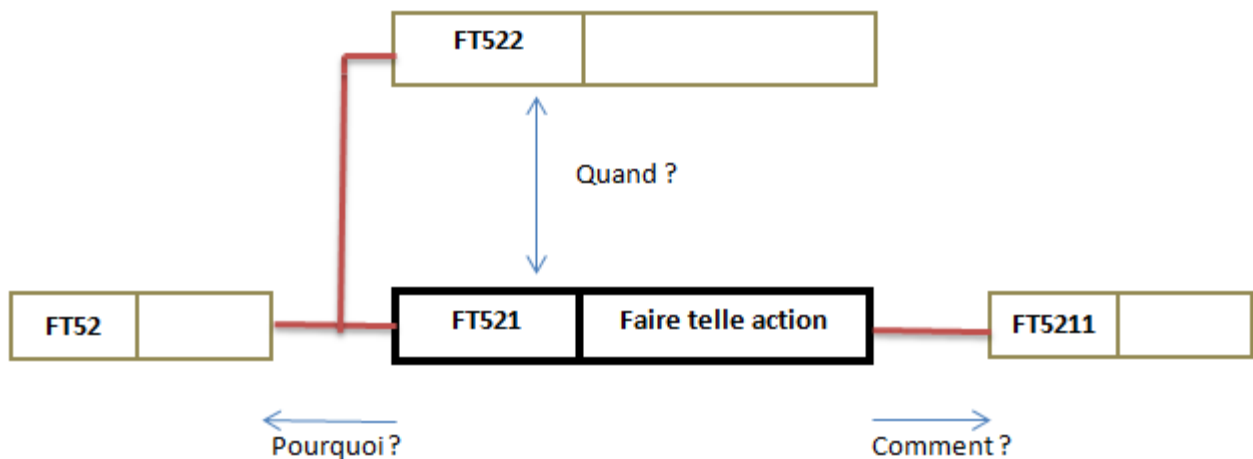


Figure 1-1 : Méthode de lecteur de FAST[7].

- **Pourquoi** FT521 existe-t-elle? → **Pour** réaliser FT52 (et seulement FT52).
- **Comment** FT521 est-elle réalisée? → **Grâce à** FT5211 (il peut y en avoir d'autres).
- «**Quand**» FT521 intervient-elle? → «**En même temps que**» FT522 [7].

1.3.2.3 Organisation du FAST descriptif.

Sur le FAST descriptif, on doit retrouver l'arborescence qui mène du tronc « Fonctions de Service » aux feuilles « Solutions Technologiques », en passant par les branches « Fonctions Techniques » [7].

Le FAST d'un produit donné doit représenter les arbres de chaque fonction de service pertinente (celles qui sont susceptibles d'être développées, pour toutes les phases de vie du produit) [7].

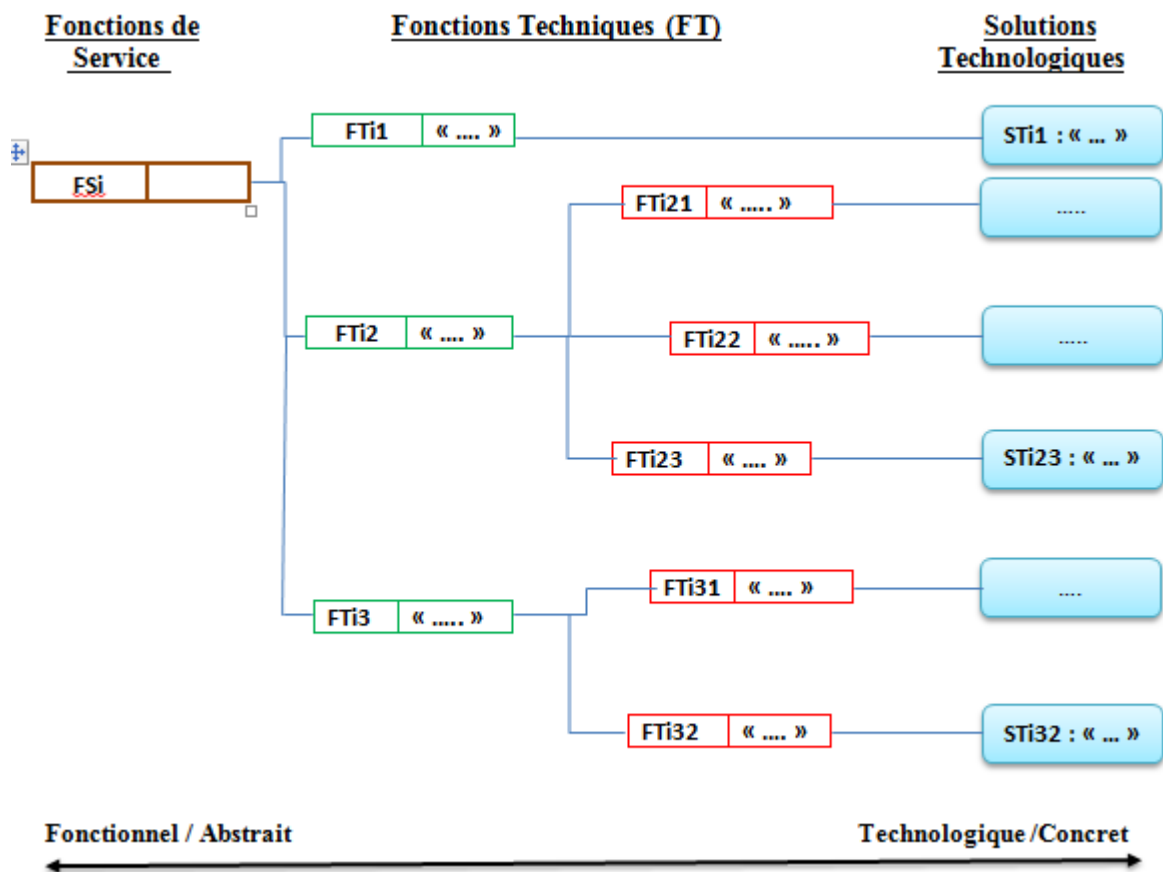


Figure 1-2 : FAST de la fonction de service FSi [7].

1.3.3 La Méthode de SADT (Structured Analysis for Design and Technic)

Le modèle SADT est un diagramme à "boîtes descendantes", il part du général pour aller au particulier. La description du système s'effectue alors sous la forme d'une suite cohérente d'actigrammes. Permet de matérialiser les différents flux entrants et sortants ainsi que les sous-fonctions [6].



Figure 1-3 : Méthode de lecteur de SADT [6].

Dans une analyse SADT, on peut modéliser deux types d'analyse :

L'analyse par des actigrammes (boîtes d'action) et l'analyse par des datagrammes (boîtes de donnée).

- Sur des actigrammes, les actions sont reliées entre elles par des flux de données.
- Sur les datagrammes ses ont les données qui sont reliées entre-elles par des flux d'activité [6].

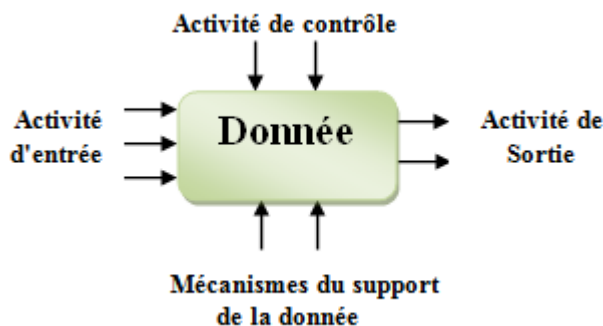


Figure 1-4 : Actigrammes [6].

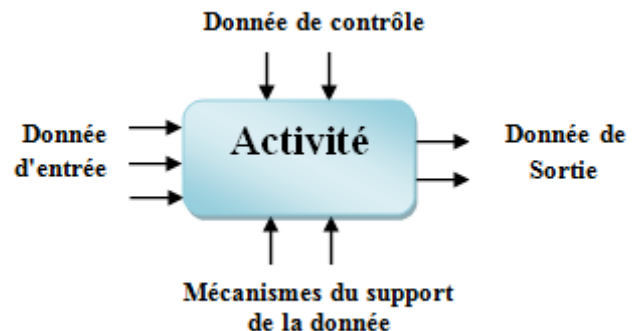


Figure 1-5 : Datagrammes [6].

L'analyse SADT va permettre d'organiser ces flux de données pour donner une vision globale du système[6].

1.3.4 Déférents défaut de machines tournantes

1.3.4.1 Défaut de balourd

C'est la cause de vibration la plus commune et la plus fréquente rencontrée. Ce phénomène se produit à la vitesse de rotation, et peut être 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 [8].

La force engendrée par le balourd est une 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 phénomène de balourd, se caractérise par une vibration radiale importante à la fréquence de rotation [9].

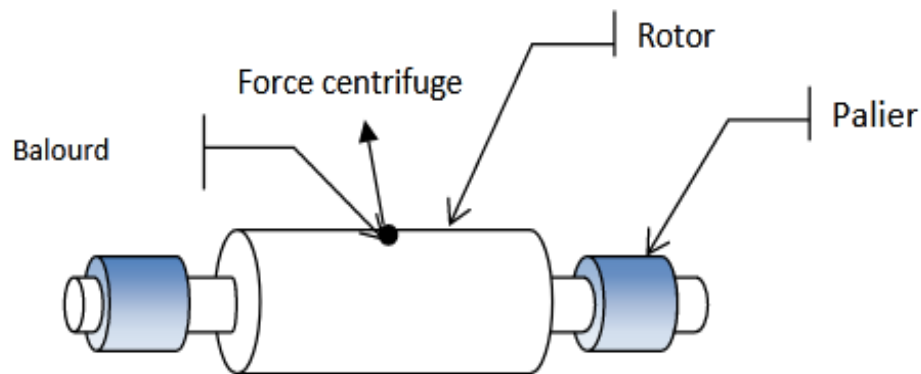


Figure 1-6 : Défaut de balourd dans un rotor [10].

R étant le rayon du rotor, Ω désigne la vitesse angulaire du rotor. La vitesse de la masse M (voir Figure 1-7), par rapport à un repère fixe R_0 est :

$$\vec{V}(M/R_0) = \frac{d\vec{OM}}{dt}/R_0 = R \times \Omega \vec{u}_\theta \quad (1-1)$$

L'accélération due à la rotation de la masse est exprimée par:

$$\vec{\gamma}(M/R_0) = \frac{d\vec{V}}{dt}/R_0 = -R \times \Omega^2 \cdot \vec{u}_r \quad (1-2)$$

La masse étant en équilibre d'où la somme des forces est nulle, ce qui donne:

$$\vec{F} + M\vec{\gamma} = \vec{0} \quad (1-3)$$

D'où :

$$\|\vec{F}\| = M \times R \times \Omega^2 \quad (1-4)$$

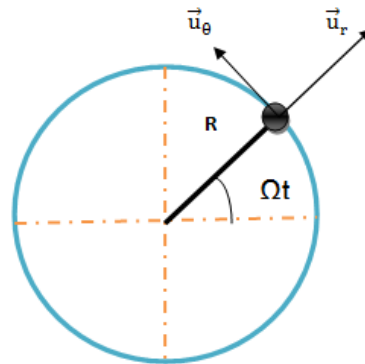


Figure 1-7 : Force centrifuge exercée par la masse [10].

Donc dès que le rotor sera en rotation, la masse M exercera une force radiale dont le module est proportionnel à la vitesse de rotation [10].

Un défaut de balourd est donc relevé par :

- Une composante d'amplitude élevée à la fréquence de rotation du rotor en direction radiale.
- Un déphasage voisin de 90° entre deux composantes correspondant à des points de mesure radiaux sur le même palier de rotor.
- Prépondérance de l'amplitude liée à la fréquence de rotation. Le déphasage entre les deux composantes d'ordre 1 de la fréquence de rotation sur le même palier, selon deux directions radiales orthogonales, est de 90° [11].

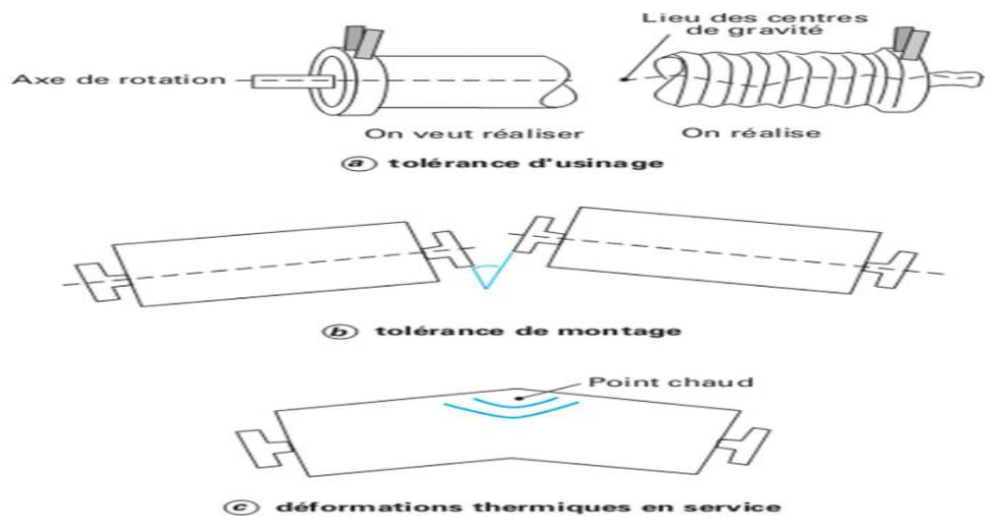


Figure 1-8 : Quelques causes de balourd[11].

1.3.4.1.1 Types de balourd

1.3.4.1.1.1 Balourd statique

Le balourd statique est la condition de déséquilibre où l'axe central principal est décalé parallèlement au centre de rotation.

Le balourd statique, peut être décelé en plaçant la pièce ouvrière sur des tranchants de couteaux parallèles. Le coté lourd du rotor se déplacera vers le bas.

Le balourd statique, peut souvent être décelé en comparant l'amplitude et la phase de vibration du palier ou de l'arbre aux bouts du rotor. On a trouvé des lectures d'amplitudes et de phase de vibration identiques mesurées aux paliers ou à chaque bout de l'arbre[9].

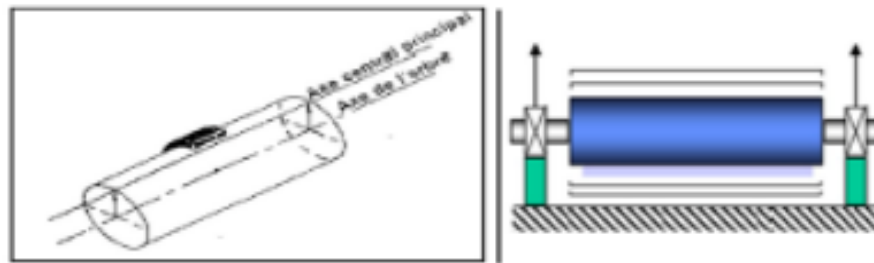


Figure 1-9 : Image de balourd statique[9].

Ce type de balourd peut être corrigé en ajoutant ou en enlevant du poids dans un seul plan de correction.

1.3.4.1.1.2 Balourd de couple

Le couple est toute simplement deux forces parallèles égales agissant en direction opposée, mais sur la même ligne droite.

Le balourd à chaque extrémité du rotor, mais sur des côtés opposés de la ligne du centre de rotation, crée un déséquilibre de couple.

Le balourd de couple devient apparent seulement lorsque la pièce est en rotation, et peut souvent être identifié en comparant les lectures d'amplitudes et de phase de vibration du palier au de l'arbre à chaque bout de rotor.

Les lectures d'amplitudes sont égales, mais les lectures de phase seront en désaccord de 180°. Contrairement au balourd statique, qui peut être corrigé sur un seul plan, le balourd de couple ne peut être corrigé qu'en faisant des corrections d'équilibre sur deux plans[9].

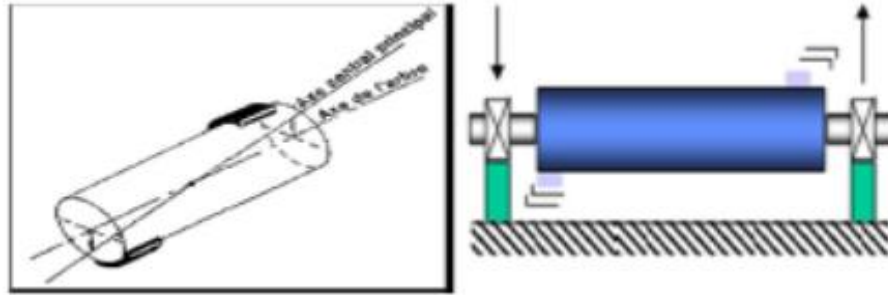


Figure 1-10 : Image de balourd de couple[9].

1.3.4.1.1.3 Balourd quasi-statique

C'est l'état où l'axe central d'inertie (Δ) coupe l'axe de l'arbre en un point G' autre que le centre de gravité.

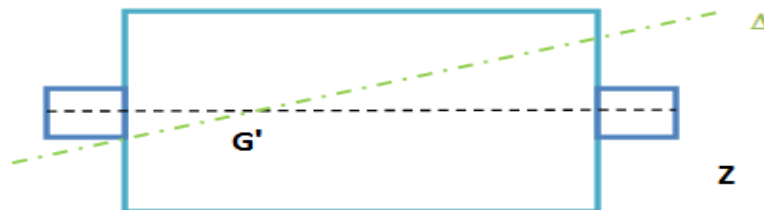


Figure 11-1: Balourd quasi-statique[10].

Ce cas cumule le déséquilibre statique et le déséquilibre de couple.

1.3.4.1.1.4 Balourd dynamique

C'est l'état tel que l'axe central d'inertie (Δ) et l'axe de rotation (Z) de l'arbre ne sont pas coplanaires.

Cette dernière configuration permet de schématiser le déséquilibre le plus général [10].

1.3.4.2 Désalignement

Le désalignement est un problème presque aussi commun que le balourd, et la raison en est bien simple. Malgré l'emploi de paliers auto-alignant, et d'accouplements flexibles, il est difficile d'aligner deux arbres, ainsi que leurs paliers afin d'assurer qu'il n'existe aucune force qui puisse causer de vibration.

Un désalignement provoque des vibrations aux fréquences de rotation, ainsi qu'axe harmoniques d'ordre 2, 3 et parfois 4 de la fréquence de rotation.

Un désalignement se produit par des niveaux [8]:

- Axiaux très élevés à deux fois la fréquence de rotation;
- Radiaux élevés à deux fois la fréquence de rotation.

On constate deux types de désalignement (parallèle et angulaire) :

1.3.4.2.1 Désalignement parallèle

Il se produit quand les axes de rotation des deux machines ont le même angle d'orientation, mais ils sont séparés verticalement, chacun de l'autre.

Le désalignement parallèle se caractérise par une vibration radiale élevée[9].

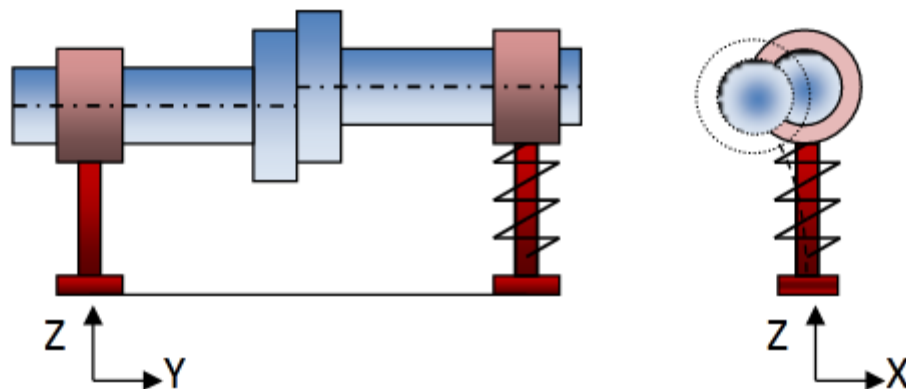


Figure 1-12 : Désalignement parallèle [10].

Les paliers précontraints présentent des raideurs dans la direction (Z) K_{zz} et dans le plan (ZX) K_{zx} qui varient en fonction de la rotation de l'arbre de la forme $K(t)$ tel que :

$$K(t) = K_0 + \Delta K \times \sin(2\Omega t) \tag{1-5}$$

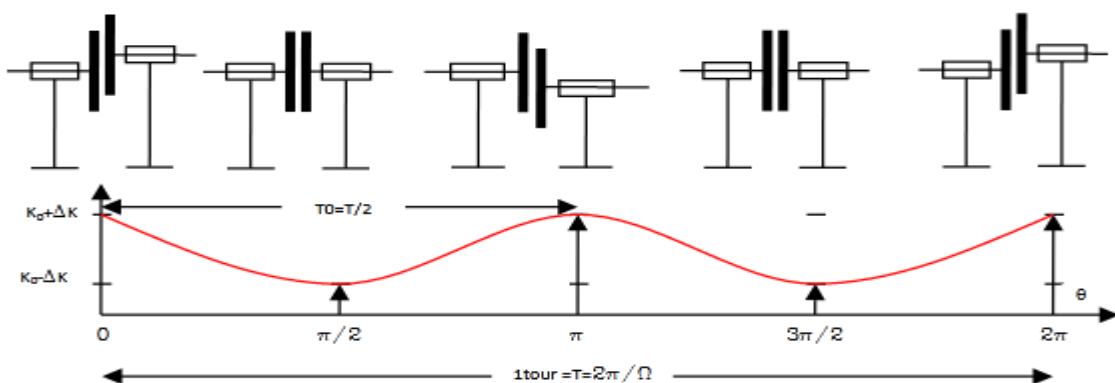


Figure 1-13 : Comportement des paliers pour un désalignement parallèle [10].

Figure 1-13 : Comportement des paliers pour un désalignement parallèle [10].

Dans ce cas la force exercée par le palier est périodique dans la direction radiale à la fréquence 2 fois la fréquence de rotation de l'arbre moteur 2Ω .

La réponse temporelle du signal vibratoire du défaut d'alignement parallèle excité par un faible balourd sera enregistrée par des capteurs de vibration placés sur les paliers. Ce signal est la somme de deux signaux sinusoïdaux simples, l'un est résultat du balourd, le deuxième est dû à la variation de la raideur des paliers [10].

$$F(t) = F_{01} \sin(\Omega t) + F_{02} \sin(2\Omega t) \tag{1-6}$$

1.3.4.2.2 Désalignement angulaire

Il se produit quand l'axe de rotation de deux machines a un angle différent. Le désalignement angulaire se caractérise par une vibration axiale élevée [9].

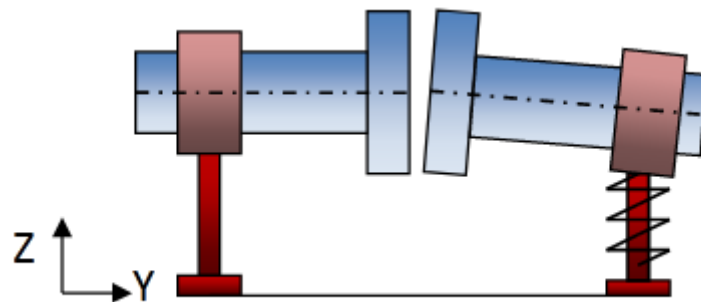
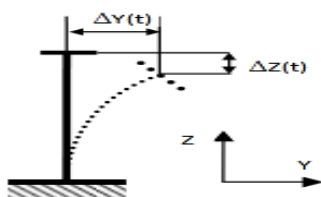
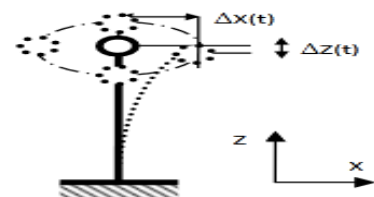


Figure 1-14 : Désalignement angulaire [10].

La présence d'un défaut d'alignement angulaire contraint le palier de l'arbre récepteur en flexion pure dans le plan (YZ) comme indiqué sur la Figure 4-18. Un déplacement suivant les deux directions radiales (Z) et axiales (Y) est mesuré. La théorie des poutres en flexion pure montre que le déplacement axial est plus important. $\Delta Y(t) > \Delta Z(t)$.



a-dans le plan (YZ)



b-dans le plan (ZX)

Figure 15-1: Flexion pure des paliers [10].

1.3.4.2.3 Désalignement combiné

Dans les applications industrielles, le désalignement sera combiné: à la fois parallèle et angulaire. Il en serait de même pour les deux critères de sévérité qui seront combinés.

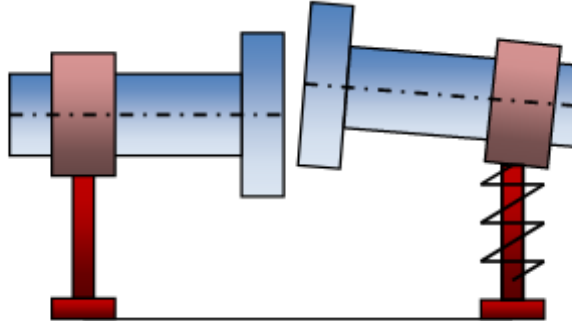


Figure 1-16 : Désalignement combiné [10].

Une mesure de vibration sur une machine présentant la combinaison d'un déalignage parallèle et un déalignage angulaire produira un spectre avec des composantes importantes à 1 et 2 x la vitesse de rotation [10].

1.3.4.3 Jeu de palier

Les vibrations des paliers lisses proviennent du jeu excessif dans le palier causé soit par:

- Le frottement et par suite une usure des paliers.
- L'érosion chimique.

Le phénomène de tourbillonnement se produit lorsque le rotor qui tourne autour de son axe à sa vitesse de rotation Ω_0 , se met à tourner dans le palier à une vitesse Ω_{tb} autour de l'axe du palier. Ce phénomène est facilement identifiable puisqu'il apparaît à la fréquence de tourbillonnement Ω_{tb} qui est théoriquement la moitié de la vitesse de rotation Ω_0 [10].

La vitesse de glissement du point M est exprimée par $\vec{V}(M \in S_1/S_0) = \vec{0}$
avec:

$$\vec{V}(M \in S_1/S_0) = \vec{V}(M \in S_1/R_0) - \vec{V}(M \in S_0/R_0) \tag{1-7}$$

Déterminant l'expression de chaque terme.

$$\vec{V}(M \in S_1/R_0) = \vec{V}(O_1 \in S_1/R_0) + \vec{\Omega}_{S_1/R_0} \wedge \overrightarrow{O_1M} \tag{1-8}$$

Avec:

$$\vec{V}(O_1 \in S_1/R_0) = \overline{OO_1} \times \Omega_{tb} \vec{Y}_1 \quad (1-9)$$

$$\vec{\Omega}_{S_1/R_0} = (\Omega_0 - \Omega_{tb}) \cdot \vec{Z}_1 \quad (1-10)$$

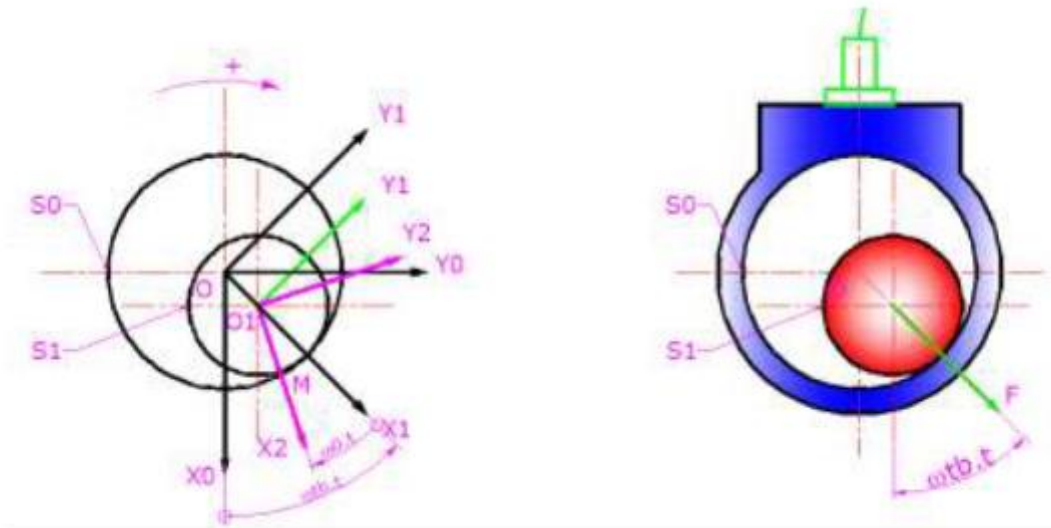


Figure 1-17 : Phénomène de tourbillonnement [10].

Donc:

$$\begin{cases} \vec{V}(M \in S_1/R_0) = \overline{OO_1} \Omega_{tb} \cdot \vec{Y}_1 + R_1 \cdot (\Omega_0 - \Omega_{tb}) \cdot \vec{Y}_1 \\ \vec{V}(M \in S_0/R_0) = R_0 \cdot \Omega_{tb} \cdot \vec{Y}_1 \end{cases} \quad (1-11)$$

L'égalité des deux équations du système donne:

$$\overline{OO_1} \Omega_{tb} + R_1 (\Omega_0 - \Omega_{tb}) = R_0 \Omega_{tb} \quad (1-12)$$

Comme $\overline{OO_1} \approx 0$ et $R_0 \cong R_1$, on obtient $\Omega_0 - \Omega_{tb} = \Omega_{tb}$ d'où

$$\Omega_{tb} = \frac{\Omega_0}{2} \text{ et par suite } f_{tb} = \frac{f_0}{2} .$$

Le rotor se comporte donc comme un balourd et exerce une force

centrifuge radiale. En plaçant un capteur de vibration sur le palier, le capteur enregistrera une vibration harmonique sinusoïdale dont la période est égale.

$$\text{à } T_{tb} = \frac{1}{f_{tb}} = 2T_0 \text{ avec } T_0 = \frac{60}{N} \text{ ou } N \text{ est la vitesse de rotation du rotor}$$

en RPM.

Dans la pratique f_{tb} varie entre $0.4f_0$ et $0.49f_0$ [10].

1.3.4.4 Défauts de fixation

Lorsqu'un palier est desserré ou présente une possibilité de mouvement partiel dans le plan radial, il apparaît une vibration radiale à une fréquence radiale égale à deux fois la vitesse de rotation. Cette vibration se traduit sous l'effet de balourd initial et elle peut prendre une amplitude élevée en fonction du degré de desserrage du palier.

Une analyse du déphasage entre deux mesures prises orthogonalement sur un même palier permet de différencier une anomalie due à un balourd (force tournante), d'un défaut de serrage ou d'une déformation du support (force directionnelle due à la contrainte) [9].

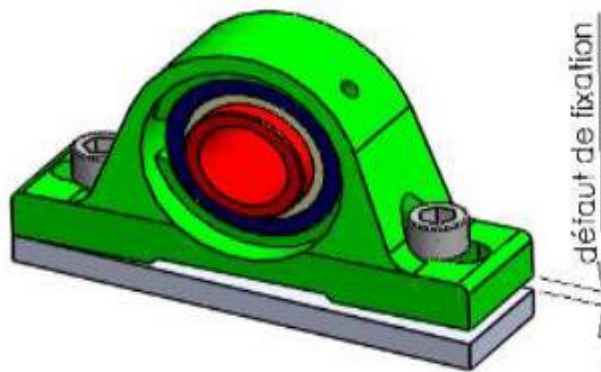


Figure 1-18 : défaut de fixation [10].

La réponse temporelle du signal est un signal sinusoïdal échantillonné dû à l'impact du système sur son support.

La transformée de Fourier de ce signal fait introduire plusieurs harmoniques de la fréquence du signal de base qui est en général la fréquence de rotation de l'arbre [10].

$$A(t) = \sum_i A_i(t) \text{ avec } A_i(t) = A_{i0} \sin(i \times \Omega t) \text{ ou } i = 1 \dots n$$

1.3.4.5 Défauts de roulement

Les éléments essentiels d'un roulement sont représentés dans la figure suivante et qui sont:

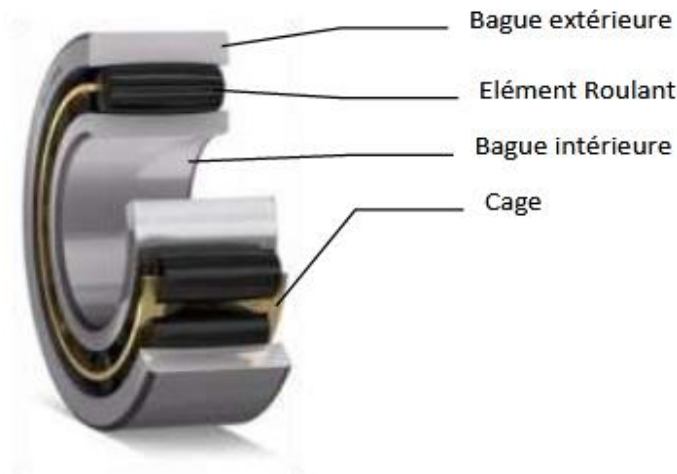


Figure 1-19 : Constitution des roulements [10].

- Bague intérieure: montée sur l'arbre et qui tourne avec en cas d'un montage arbre tournant.
- Bague extérieure: montée sur le moyeu et qui est fixe.
- Éléments roulants (bille, rouleau cylindrique, rotule): incorporés entre la bague intérieure et la bague extérieure.
- Cage: rassemble les éléments roulants et conserve le même espacement entre eux [10].

Les roulements sont parmi les composants les plus sollicités des machines et représentent une source de panne fréquente (figure 1-20).

Les défauts que l'on peut y rencontrer sont les suivants : écaillage, grippage, corrosion (qui entraîne l'écaillage), faux effet Brinell, etc...

Tous ces défauts se traduisent par une perte de métal et provoquent des chocs répétés des billes sur la cage de roulement [11]

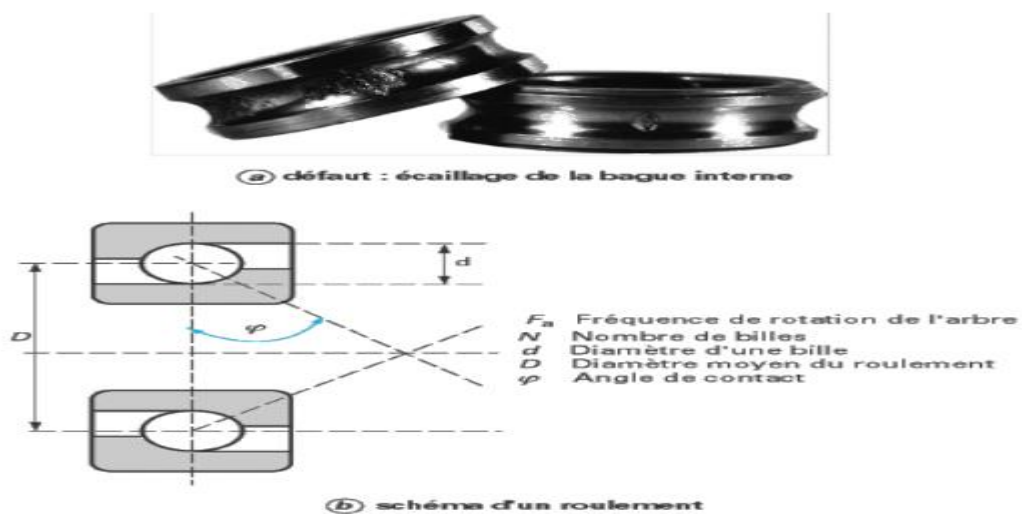


Figure 1-20 : Roulement à billes [9].

Les pistes des roulements et les billes sont chargées cycliquement, ce qui engendre à la surface une dégradation par fatigue qui se présente sous la forme de fissures qui conduisent à l'écaillage puis à la ruine du roulement. Ces fissures peuvent être d'origine superficielle ou provenir de la dégradation de la sous couche du matériau. Cette ruine peut être détectée sur un spectre à partir de l'identification des fréquences caractéristiques du roulement. Celles-ci correspondent aux fréquences des impacts lorsqu'un élément roulant rencontre un défaut. Elles sont données en écrivant que les vitesses aux points de contact entre billes et bagues sont nulles [9].

Dans le tableau suivant on présente la désignation des différents paramètres géométriques des roulements.

Parameter	β	D_i	D_o	D_m	D_B
Designations	Angle de contact	Diameter intérieur de contact	Diameter extarieur de contact	Diameter primitive de contact	Diameter de element roulant

Tableau 1.1 : la désignation des différents paramètres géométriques des roulements [10].

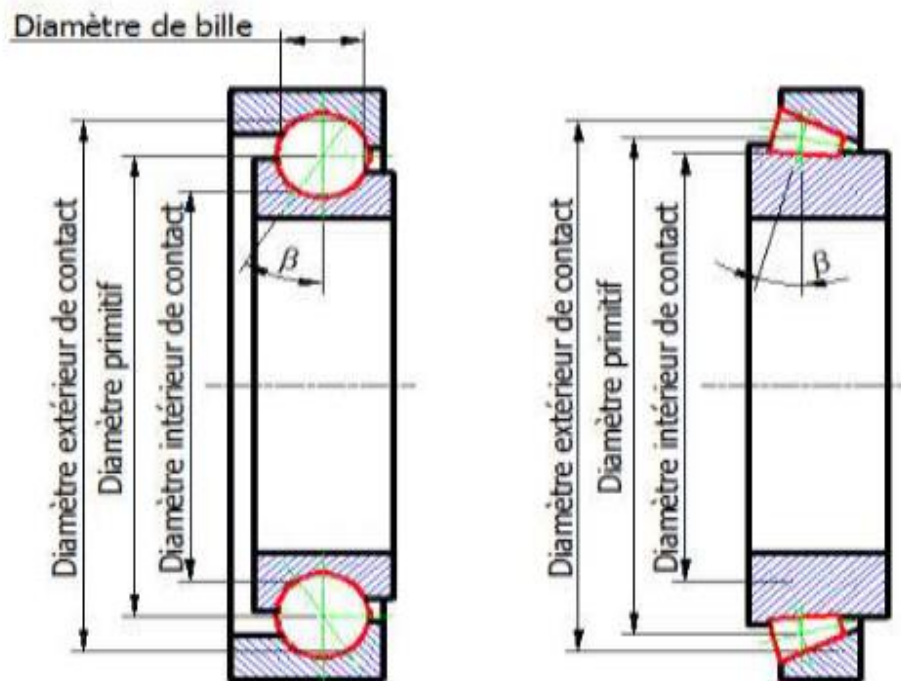


Figure 1-21 : Paramètres géométriques des roulements [10].

La vitesse linéaire de la bague extérieure au point de contact est donnée par la relation suivante:

$$v_o = \omega_o \frac{D_o}{2} = \frac{\pi N_o}{30} \left(\frac{D_o}{2} + \frac{D_B}{2} \cos \beta \right) = \frac{\pi}{60} N_o D_m \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-13)$$

La vitesse linéaire de la bague intérieure au point de contact est donnée par la relation suivante :

$$v_i = \omega_i \frac{D_i}{2} = \frac{\pi N_i}{30} \left(\frac{D_m}{2} - \frac{D_B}{2} \cos \beta \right) = \frac{\pi}{60} N_i D_m \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-14)$$

La vitesse linéaire au centre des éléments roulants est égale à la moyenne des vitesses de la bague intérieure et de la bague extérieure au point de contact.

$$v_m = \frac{v_i + v_o}{2} = \frac{\pi}{120} N_o D_m \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) + \frac{\pi}{120} N_i D_m \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-15)$$

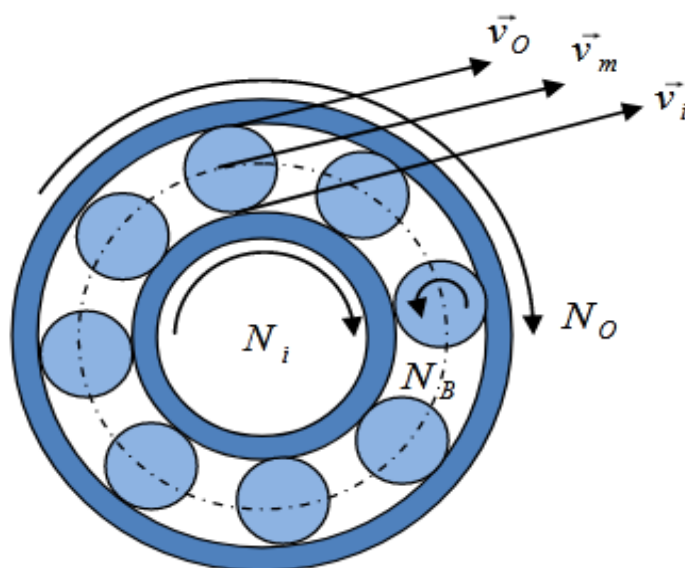


Figure 1-22 : Paramètres cinématiques du roulement [10].

1.3.4.5.1 Défaut de cage (rupture)

La fréquence à laquelle les billes ou les rouleaux tournent autour de l'axe de l'arbre correspond à la vitesse de rotation de la cage. Cette fréquence est désignée par FTF: Fundamentals Train Fréquence Une rupture de cage peut être provoquée pour deux raisons :

- une charge axiale trop élevée sur des roulement qui ne sont pas prévus à cet effet,
- un serrage trop faible du roulement sur l'arbre qui entraîne, sous l'effet de la charge dynamique, un jeu axial [10].

Comme la vitesse linéaire de la cage au diamètre primitif est:

$$v_m = \frac{\pi}{60} N_m D_m \quad (1-16)$$

L'expression de la vitesse de rotation de la cage est déduite des expressions précédentes:

$$N_m = \frac{1}{2} \left[N_o \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) + N_i \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \right] \quad (1-17)$$

En terme de fréquence on peut écrire l'expression de fréquence de rotation de la cage par:

$$f_m = \frac{1}{2} f_i \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-18)$$

Cas d'arbre tournant $f_o = 0$;

$$f_m = \frac{1}{2} f_o \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-19)$$

Cas de moyeu tournant $f_i = 0$

Dans ce cas si un défaut apparaît sur la cage la fréquence $FTF = f_m$ apparaît dans le spectre des vibrations du roulement [10].

$$\text{Arbre tournant} \quad FTF = \frac{1}{2} f_i \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-20)$$

$$\text{Moyeu tournant} \quad FTF = \frac{1}{2} f_o \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-21)$$

1.3.4.5.2 Défaut de billes ou de rouleaux

La fréquence à laquelle les billes tournent autour de leurs propres axes dans la cage est donnée par BSF: Ball Spin Fréquence.

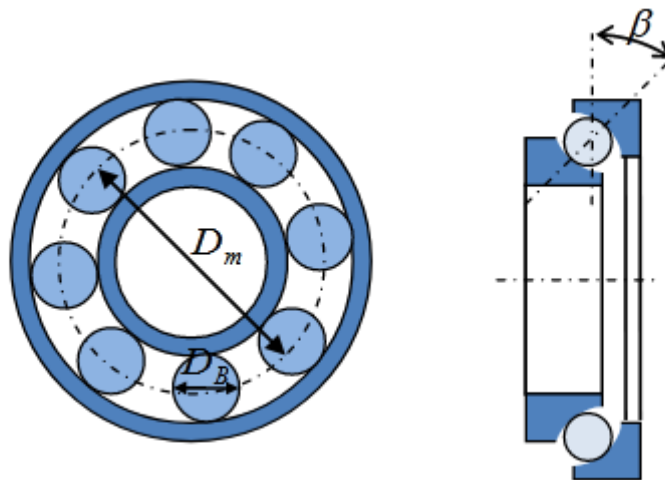


Figure 1-23 : Paramètres caractéristiques des roulements [10].

La vitesse de rotation relative de la cage par rapport à la bague intérieure est égale à la valeur absolue de la différence entre la vitesse de rotation de la cage et la vitesse de rotation de la bague intérieure:

$$N_{mi} = |N_m - N_i| = \frac{N_r}{2} \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-22)$$

Avec N_r est la vitesse de rotation relative entre la bague intérieure et la bague extérieure:

$$N_r = N_o - N_i$$

La vitesse de rotation de la bague extérieure par rapport à la cage est exprimée par la valeur absolue de la différence entre la vitesse de rotation de la cage et la vitesse de rotation de la bague extérieure [10].

$$N_{mo} = |N_m - N_o| = \frac{N_r}{2} \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-23)$$

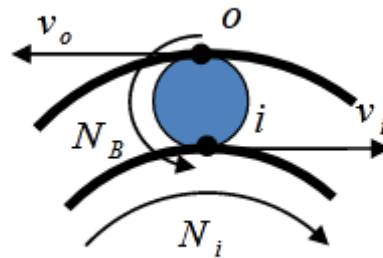


Figure 1-24 : Rotation des éléments roulants [10].

La vitesse de rotation des éléments roulants autour de leurs axes de rotation sont obtenues en bloquant la cage $N_m = 0$ ce qui donne

$$N_{mi} = -N_i \text{ et } N_{mo} = N_o$$

En faisant l'égalité des vitesses linéaires $v_i = v_o$ avec:

$$v_i = \frac{\pi}{60} N_i D_i \text{ et } v_B = -\frac{\pi}{60} N_B D_B \text{ au point (i)} \Rightarrow N_{mi} D_i = N_B D_B$$

$$v_o = -\frac{\pi}{60} N_o D_o \text{ et } v_B = -\frac{\pi}{60} N_B D_B \text{ au point (o)} \Rightarrow N_{mo} D_o = N_B D_D$$

En tenant en considération l'expression du diamètre primitif de la cage $D_m = \frac{D_o + D_i}{2}$ on obtient d'après les équations précédentes:

$$N_B = \frac{N_r}{2} \frac{D_m}{D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (1-24)$$

En termes de fréquence

$$f_B = \frac{f_r D_m}{2 D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (1-25)$$

La fréquence d'impact d'un défaut sur l'élément roulant est en fait $2Bf_{car}$ car ce défaut frappe deux surfaces (pistes des bagues intérieure et extérieures) pendant un tour. Dans ce cas si un défaut apparaît sur les éléments roulants des pics aux fréquences multiples de la fréquence $BSF=2f_B$ apparaissent dans le spectre des vibrations du roulement [10].

$$BSF = f_r \frac{D_m}{D_B} \left(1 - \left(\frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right)^2 \right) \quad (1-26)$$

1.3.4.5.3 Défauts des bagues internes et externes

Supposons que dans un roulement on a Z éléments roulants.

- Un défaut sur la piste interne du roulement aura un impact sur les éléments roulants tous les $Z \times N_{mi}$ rotation par minute.
- Un défaut sur la piste externe du roulement aura un impact sur les éléments roulants tous les $Z \times N_{mo}$ rotation par minute.

Donc la fréquence de passage des éléments roulants sur ces défauts est donnée par:

Sur la bague extérieure :

$$ZN_{mo} = \frac{Z}{2} N_r \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-27)$$

Sur la bague intérieure :

$$ZN_{mi} = \frac{Z}{2} N_r \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-28)$$

En termes de fréquence les défauts dans la bague intérieure et extérieure se manifestent par des multiples de [10]:

- BPFO: Ball Pass Frequency Outre Race
- BPFI: Ball Pass Frequency Inner Race

Avec:

$$\text{BPFO} = \frac{z}{2} f_r \left(1 - \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-29)$$

$$\text{BPFI} = \frac{z}{2} f_r \left(1 + \frac{D_B}{D_m} \cos \beta \right) \quad (1-30)$$

1.3.4.6 Défauts d'engrenages

Ces défauts sont liés aux dégradations de la denture (denture cassée ou abimée, usure uniforme ou non, putting localisé ou réparti, mauvais centrage) (figure 1-25). On peut observer aussi du fretin (corrosion, frottement) qui se traduit par un enlèvement de métal lorsque l'engrenage est mal lubrifié et que les efforts sont importants.

Les vibrations des engrenages sont dominées par un effort à chaque contact [12].



Figure 1-25 : Dégradation des dents d'une roue dentée [9].

1.3.4.6.1 Types d'engrenages

On trouve 4 types essentiels d'engrenages montrés sur la (Figure 1-26).

- Les engrenages droits (Figure 1-26(a)) sont utilisés pour transmettre un mouvement rotatif entre des arbres parallèles. Elles sont généralement de forme cylindrique, et les dents sont droites et parallèles à l'axe de rotation.
- Les engrenages hélicoïdaux, utilisés pour transmettre le mouvement entre arbres parallèles, sont présentés dans la (Figure 1-26(b)). La ligne de contact des dents d'engrenage hélicoïdal est diagonale à travers la face de la dent, de sorte qu'il existe un engagement progressif des dents et un transfert sans heurt de la charge d'une dent à l'autre.
- Pour un transfert de puissance entre les arbres qui se croisent, il y a des engrenages coniques à denture droite (Figure 1-26(c)) et à denture hélicoïdale (Figure 1-26(d)).
- Le train d'engrenages à vis sans fin (Figure 1-26(e)) est constitué d'une vis sans fin, qui ressemble à une vis, et une roue, qui est un engrenage hélicoïdal .Ils sont silencieux et exempt de vibrations [10].

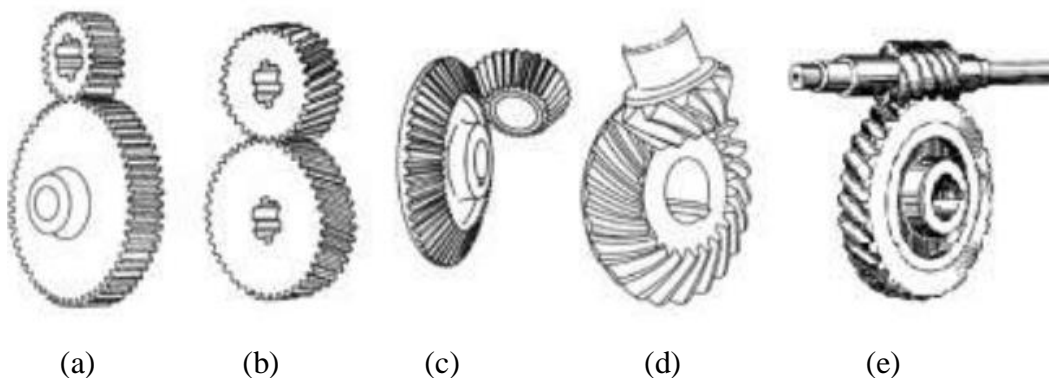


Figure 26 -1: Différents types d'engrenages [10].

Soient R_1 et R_2 les rayons respectifs des roues menant et menée; Ω_1 et Ω_2 leurs vitesses angulaires respectives.

Le pignon (1) tourne dans le sens horaire et entraîne un engrenage(2) dans le sens antihoraire. Le vecteur de force résultante entre une paire de pignons d'engrenage agit le long de la ligne de pression (également appelée ligne d'action ou génératrice).

Idéalement, lors que deux engrenages sont en prise, leurs cercles primitifs roulent l'une sur autre sans glissement. La vitesse tangentielle est donnée par:

$$v = |R_1\Omega_1| = R_2\Omega_2 \quad (1-31)$$

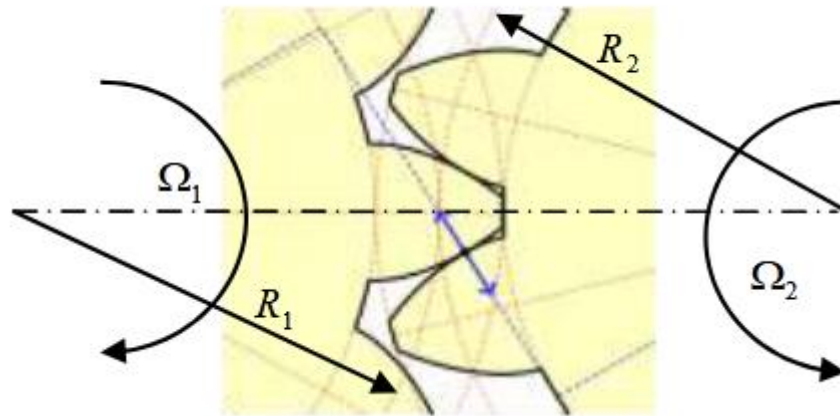


Figure 1-27 : Ligne d'action de deux roues [10].

1.3.4.6.2 Raideur d'engrènement

Pendant la période d'engrènement T_e et pour un rapport de conduite ε donné ($1 < \varepsilon \leq 2$), la roue et le pignon sont d'abord en contact par un seul couple de dents durant un laps de temps $(1 - \varepsilon)T_e$, puis par deux couples de dents durant $(2 - \varepsilon)T_e$. La (Figure 1-28) présente la schématisation du phénomène d'engrènement [10].

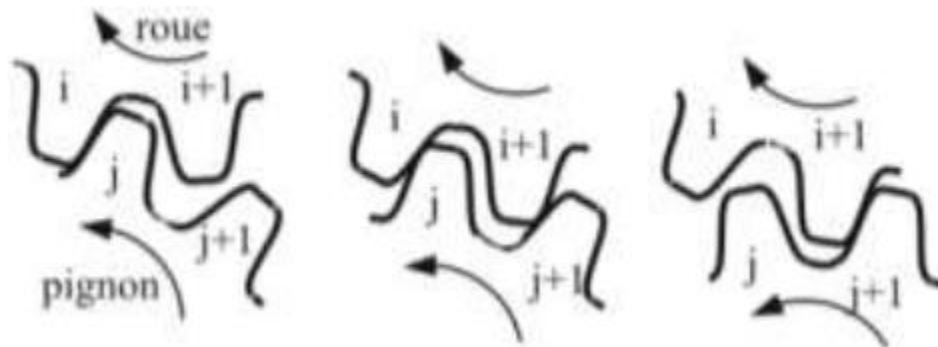


Figure 1-28 : Dents en prise lors de l'engrènement [10].

Ainsi, la raideur d'engrènement est dans ce cas périodique de période T_e et peut-être en première approximation estimée par [10] :

$$K(t) = \begin{cases} K_{\max} & \text{si } nT_e \leq t \leq (n + \varepsilon - 1)T_e \\ K_{\min} & \text{si } (n + \varepsilon - 1)T_e \leq t \leq (n + 1)T_e \end{cases} \quad (1-32)$$

1.3.4.6.3 Vibration des engrenages en bon état

Les engrenages rigides et de géométries parfaites ne produisent pas généralement des vibrations. La modification du profil idéale d'une dent ou de sa géométrie peut générer des vibrations, dont la mesure et l'analyse peut aider à diagnostiquer les pannes de boîte de vitesses.

Les principales sources de ces vibrations sont la déflexion sous charge des dents, la distorsion de roue lors du traitement thermique et les erreurs géométriques dans le profil lui-même, résultant du processus de taillage d'engrenage et à l'usure.

A- Train d'engrenage

Les vibrations sont liées aux chocs d'engrènement qui se produisent au moment de l'engrènement des dentures. Soit Z_1, Z_2 le nombre de dents respectif de la roue 1 et 2 ; f_1 et f_2 les fréquences de rotation en Hz.

En supposant que les dents sont parfaitement taillées, également espacées, parfaitement lisse, et tout à fait rigide, la fréquence d'engrènement est égale au nombre de dents de la roue Z , multiplié par la vitesse de l'arbre sur lequel la roue est montée f .

La fréquence fondamentale des chocs est appelée fréquence d'engrènement:

$$f_e = f_1 \times Z_1 = f_2 \times Z_2 \quad (1-33)$$

Une denture correcte montre les fréquences f_1 et f_2 des deux arbres ainsi que la fréquence d'engrènement f_e [10].

B- Engrenage Epicycloïdal

Un train épicycloïdal ou engrenage planétaire, désigne un système de transmission de puissance entre deux ou plusieurs arbres dont certains tournent non seulement autour de leur propre axe, mais aussi autour d'un autre axe. Les engrenages peuvent être cylindriques ou coniques. Ceux dont l'axe coïncide avec un axe fixe dans l'espace s'appellent "planètes" et ceux qui tournent avec leur axe autour d'un autre s'appellent "satellites".

Les trains épicycloïdaux ont besoin de deux lois d'entrée /sortie. Généralement un des éléments est bloqué ce qui donne une loi d'entrée /sortie.

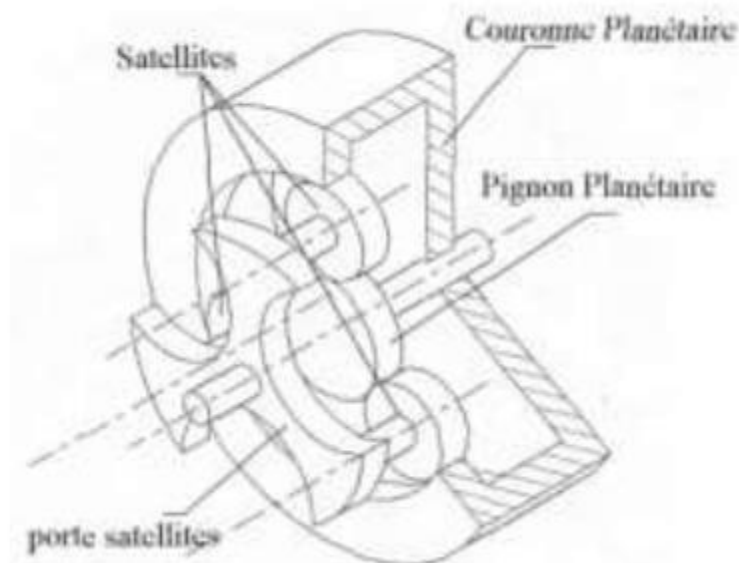


Figure 1-29: Train épicycloïdal [10].

Soit:

Z_p et f_p : nombre de dents et fréquence du pignon planétaire.

Z_c et f_c : nombre de dents et fréquence de rotation du couronne.

La fréquence d'engrènement est donnée par [10]:

$$f_e = Z_p(f_p - f_{ps}) = Z_c(f_{ps} - f_c) \quad (1-34)$$

Avec la fréquence du porte satellite:

$$f_{ps} = \frac{Z_s f_s + Z_a f_c}{Z_s + Z_c} \quad (1-35)$$

1.3.4.7 Défaut de courroie

Les défauts de courroies sont aussi des problèmes très courants néanmoins il faut distinguer entre problèmes liés à la courroie elle-même et les problèmes liés au désalignement des poulies ou la mauvaise tension de la courroie [10].



Figure 1-30 : Transmission par courroie [10].

1.3.4.7.1 Courroie en mauvais état

Le principal défaut rencontré sur ce type de transmission est une usure avec détérioration de la courroie, un choc se produit alors à la fréquence de passage du défaut. La fréquence à laquelle tournent les courroies s'appelle fréquence de passage des courroies et est donnée par :

$$f_{pc} = \frac{\pi \times D_i}{L} \times f_1 = \frac{\pi \times D_2}{L} \times f_2 \quad (1-36)$$

- D_i : Diamètre de la poulie i
- L : Longueur de la courroie
- f_i : Fréquence de rotation de la poulie de diamètre D_i

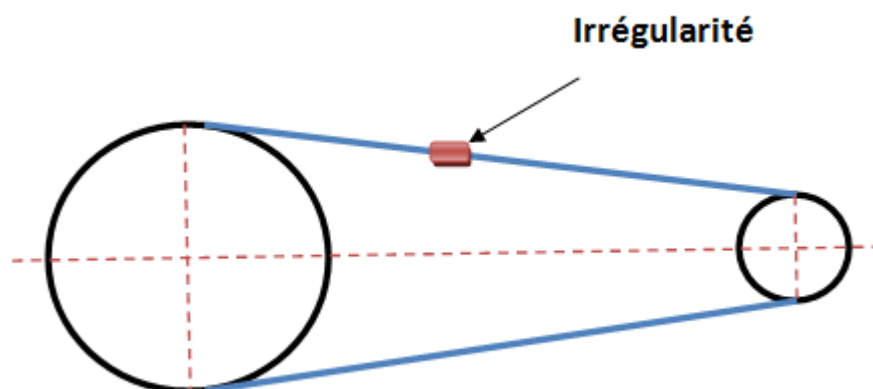


Figure 1-31: Défaut de courroie [10].

La longueur de la courroie est déterminée à partir de l'entraxe E et des diamètres des poulies menant et mené.

$$L = 2 \times E + \frac{1.57}{D_1 + D_2} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4E} \quad (1-37)$$

Le profil des gorges des poulies n'a aucune importance du moment que le diamètre et la vitesse correspondent à la même poulie.

Lorsqu'une irrégularité apparaît sur une courroie, à cause d'un défaut de fabrication ou d'une usure non homogène, elle passera sur chaque poulie à la fréquence de passage de la courroie.

Chacun des contacts générés sur une poulie provoquera un impact. Ce phénomène se produit donc à une fréquence égale ou double de la fréquence de passage [10].

1.3.4.8 Alignement ou tension

Un défaut d'alignement ou une tension trop élevée générera de hauts niveaux vibratoires à la vitesse du moteur et/ou de l'organe entraîné.

- Forte vibration du moteur sur l'organe entraîné et vice-versa : la vibration liée à la vitesse du moteur sera ressentie de manière plus importante sur les roulements de l'organe entraîné et vice-versa
- Haut niveau vibratoire du côté des courroies : les niveaux mesurés sur les roulements côtés poulies seront plus importants. Les niveaux vibratoires plus importants dans le sens des courroies. Niveaux axiaux relativement plus élevés [10].

1.4 Conclusion

De ce chapitre est que nous avons fourni des informations générales sur les défaillances qui ciblent les machines électromécaniques rotatives, et nous avons examiné différentes méthodes et modèles de diagnostic qui sont utilisés dans la maintenance pour déterminer la source de ces défauts ou défaillances, et nous avons également fourni quelques concepts et définitions de base qui sont utilisés dans le domaine du diagnostic.

Chapitre 02 :
présentation de
l'analyse
vibratoire

1.5 Introduction

La surveillance des machines a changé radicalement au cours des dernières années, avec l'apparition initiale des machines destinées à arrêter la machine avant qu'elle ne soit désactivée, avec une alarme ou un arrêt si le taux de vibration dépassait la limite opérationnelle acceptable. L'entretien préventif est désormais la clé du maintien de l'intégrité de la machine par la détection précoce des défauts et le suivi de leur évolution dans le temps. Dans ce chapitre, nous présenterons une des méthodes de maintenance préventive : l'analyse vibrationnelle et la présentation de divers aspects et définitions.

1.6 Notions fondamentales

L'une des questions les plus importantes ces derniers temps est de déterminer où et pourquoi les défaillances se produisent au niveau des machines tournants, et la meilleure façon de répondre à cette question est la méthode d'analyse vibratoire.

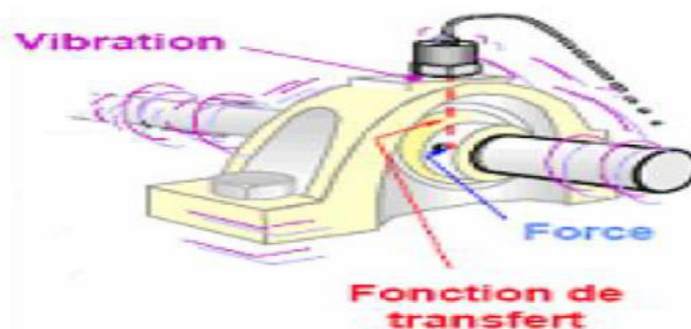


Figure 2-1 : Mesure d'une vibration [3].

1.6.1 Introduction à la vibration

1.6.1.1 Définition (norme AFNOR 90.001)

La vibration est une variation dans le temps de la valeur d'une grandeur donnée, propre au mouvement, voire de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur dont il est question est soit plus grande soit plus petite que la valeur moyenne connue comme valeur de référence [10].

Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement autour de la position d'équilibre stable (Figure 2-2).

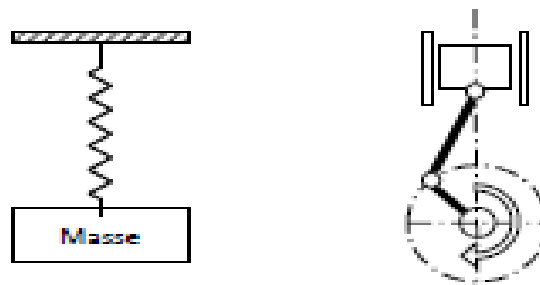


Figure 2-2 : Systèmes oscillants [10].

1.6.2 Signaux vibratoires

1.6.2.1 Structure des signaux vibratoires

Les signaux vibratoires relevés sur les systèmes mécaniques en fonctionnement contiennent l'information nécessaire relative à l'état des composants de la machines, tout le problème consiste à isoler l'information relative à chaque élément. En effet, les signaux ont une structure complexe et sont constitués de différentes composantes [13]:

- Une partie du signal provient des phénomènes cycliques se produisant dans le système, comme la rotation des arbres, les chocs des engrenages, les mouvements existants au sein d'un enroulement... etc.
- Une partie aléatoire, due aux phénomènes parasites générés lors du fonctionnement d'un système.

1.6.2.2 Signaux

On désigne, sous ce vocable très général, toute grandeur pouvant avoir un effet sur une structure pour modifier son équilibre ou son comportement : force, tension, accélération, vitesse, pression acoustique, ...etc. En simplifiant, on peut classer les différents signaux dans l'une des catégories suivantes :

1.6.2.2.1 Signaux harmoniques

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme amplitude-temps est représenté par une sinusoïde (Figure 2-3). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle générée par le balourd d'un rotor en mouvement.

Si l'on décrit mathématiquement un signal sinusoïdal, nous obtenons :

$$X(t) = X \cdot \sin (\omega \cdot t + \varphi) \quad (2-1)$$

Avec :

X : amplitude.

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

f : fréquence du mouvement.

φ : phase du mouvement par rapport à une référence dans le temps [14].

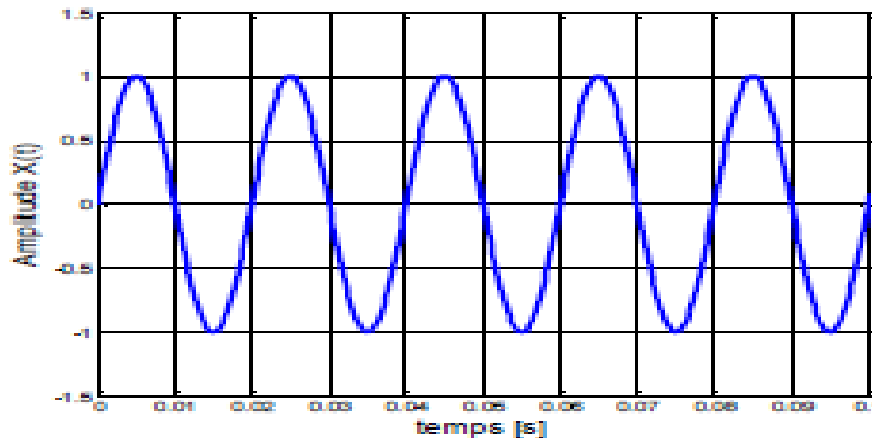


Figure 2-3 : La représentation d'un signal harmonique (vibration sinusoïdale) [10].

1.6.2.2 Signaux périodiques non harmoniques

Un signal périodique non harmonique est une somme de signaux harmoniques de différentes amplitudes maximales (constantes) mais dont les pulsations sont multiples d'une pulsation dite fondamentale, comme l'illustre la (Figure 2-4). Le signal est connu à l'instant "t" et se retrouve rigoureusement identique à l'instant " $t \pm nT$ " (n : étant un nombre entier) [14].

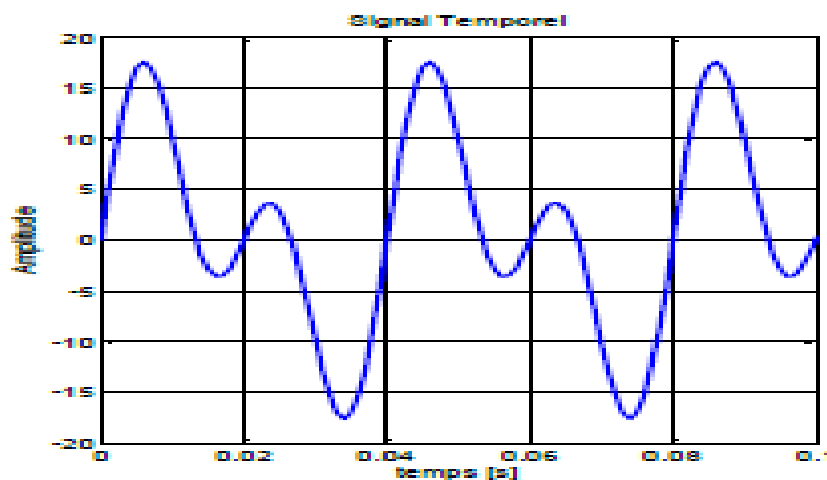


Figure 2-4 : La représentation d'un signal périodique non harmonique [1].

1.6.2.2.3 Signaux transitoires et aléatoires

La (Figure 2-5) montre deux exemples de signaux non périodiques.

Les signaux transitoires se produisent pendant un intervalle de temps limité.

Les signaux aléatoires ont leurs caractéristiques d'amplitude et de fréquences qui changent aléatoirement en fonction du temps [14].

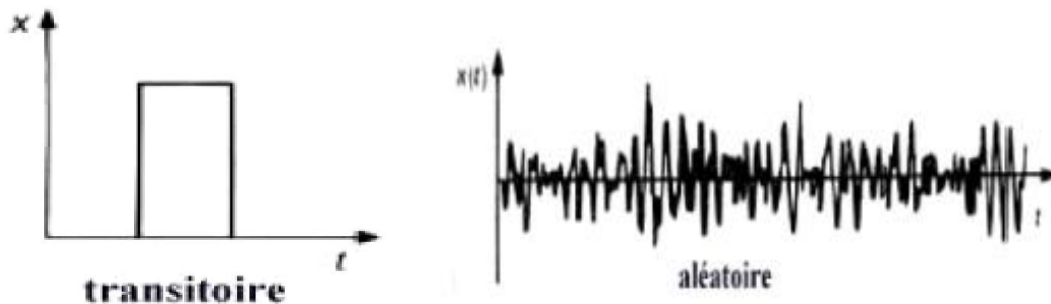


Figure 2-5: Exemples d'un signal transitoire et d'un signal aléatoire[14].

1.6.2.3 Définition et concept liés aux signaux

Le traitement des signaux est un élément essentiel qui ne peut être compromis de nos jours. Il a pour but d'interpréter les signaux qui transmettent de l'information. Son principal objectif est de tirer toutes les informations utiles des perturbations sonores en s'appuyant sur les ressources de l'électronique et de l'informatique.

1.6.2.3.1 Bruit

Un bruit correspond à tout phénomène perturbateur gênant la transmission ou l'interprétation d'un signal[15].

1.6.2.3.2 Rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit mesure la quantité de bruit contenue dans le signal. Il s'exprime par le rapport des puissances du signal (P_S) et du bruit (P_N). Il est souvent donné en décibels (dB).

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \log \frac{P_S}{P_N} \quad (2-2)$$

1.6.2.3.3 La série de Fourier

La décomposition en série de Fourier permet de décomposer un signal en somme de Sinusoïdes. On utilise principalement les séries de Fourier dans le cas des signaux périodiques.

Elles permettent ainsi de passer facilement du domaine temporel au domaine fréquentiel. Pour pouvoir être décomposable, un signal doit être à variations bornées

Pour tout signal $s(t)$ réel où $s(t) = s(t+T_0)$, on peut écrire

$$S(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (2-3)$$

$$\text{avec } \left(\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \right) \quad (2-4)$$

$$S_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0}^T S(t) dt \quad (2-5)$$

$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0}^T S(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2-6)$$

$$B_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0}^T S(t) \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2-7)$$

On appelle le signal de pulsation ω_0 le fondamental.

On appelle les signaux de pulsation $(n \cdot \omega_0)$ les harmoniques de rang n .

La valeur de S_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$ [15].

NB:

Si $S(t)$ est paire $B_n = 0$

Si $S(t)$ est impaire $A_n = 0$

1.6.2.3.4 Transformée de Fourier

C'est une généralisation de la décomposition de série de Fourier à tous les signaux Déterministes. Elle permet d'obtenir une représentation en fréquence (représentation spectrale) de ces signaux. Elle exprime la répartition fréquentielle de l'amplitude, de la phase et de l'énergie (ou de la puissance) des signaux considérés.

Soit $s(t)$ un signal déterministe. Sa transformée de Fourier est une fonction, généralement complexe, de la variable f et définie par :

$$S(f) = \text{TF}[S(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-8)$$

Si cette transformée existe, la transformée de Fourier inverse est donnée par :

$$S(t) = \text{TF}^{-1}[S(f)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(f) e^{-j2\pi ft} df \quad (2-9)$$

On appelle spectre de s le module de la transformée de Fourier de s [16].

1.7 Les correspondances: déplacement, vitesse, Accélération amplitude et fréquence

1.7.1 Déplacement

Un déplacement: La position de la masselotte varie de part et d'autre de la position d'équilibre, allant de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement (figure 2-6).

On peut écrire l'équation de la variation du déplacement en fonction du temps, de la manière suivante :

$$X(t) = A. \sin(\omega t) \quad (2-10)$$

Où X: déplacement ; t: temps ; A: amplitude; ω : pulsation ou vitesse angulaire (rad/s).

La période de ce mouvement (ici égale à un tour du rotor) est notée T, elle est exprimée en secondes (s). L'inverse de la période, c'est-à-dire la fréquence est notée f, et est exprimée en Hertz (Hz). Nous vous rappelons que ω , T et f sont liés par les relations [16]:

$$f = \frac{1}{T} \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2-11)$$

1.7.2 Vitesse

La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. Mathématiquement, la vitesse notée v est la dérivée du déplacement par rapport au temps. Elle s'écrit:

$$V = \frac{dx}{dt} = d \frac{A \sin \omega t}{dt} = A \omega \cos(\omega t) \quad (2-12)$$

Cette vitesse sera nulle au point haut et au point bas du mouvement de la masselotte et sera maximale autour du point d'équilibre (figure 2-6) [16].

1.7.3 Accélération

L'accélération est une variation de vitesse par unité de temps. Mathématiquement, L'accélération notée γ est la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Elle s'écrit :

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t)]}{dt} = -\omega A \omega \sin \omega t \quad (2-13)$$

Une accélération Celle-ci permet à la masselotte de passer de sa vitesse minimale en début de course à sa vitesse maximale au point d'équilibre avant de décélérer en fin de course (figure 2-6) [16].

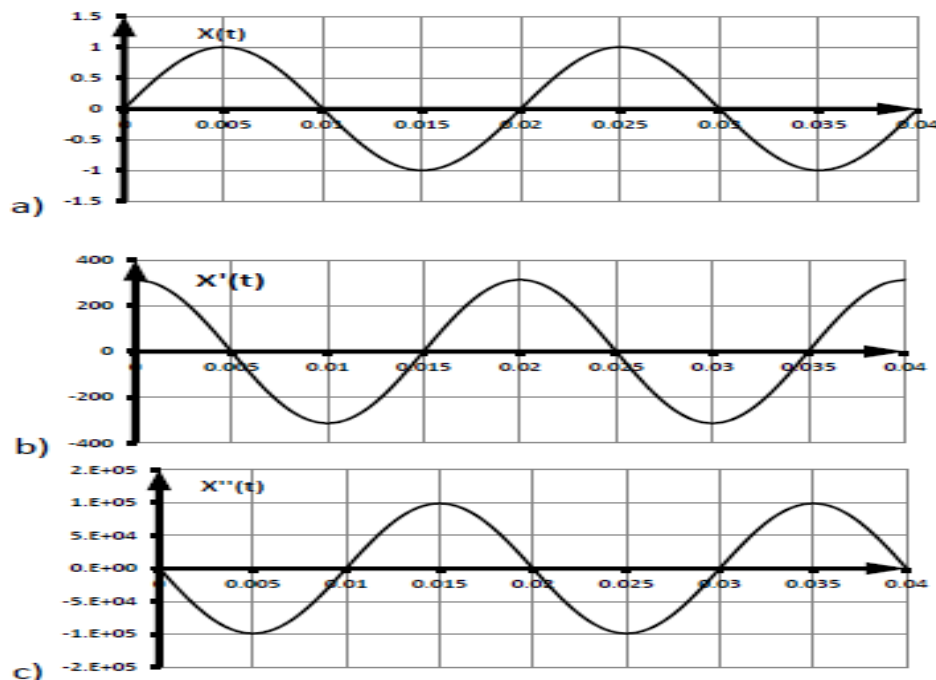


Figure 2-6: Grandeurs associés à un signal vibratoire
a) déplacement; b) vitesse; c) accélération [10].

1.7.4 Amplitude :

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre ($1\mu\text{m}$):

$$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}.$$

De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir Plusieurs grandeurs (figure 2-7) pour caractériser son amplitude.

1.7.4.1 L'amplitude crête (A_c): Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

1.7.4.2 L'amplitude crête à crête (A_{cc}): appelée « peak to peak » (A_{PP}) en anglais.

Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné. Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée « amplitude double » ($A_{PP} = 2A_c$).

1.7.4.3 L'amplitude efficace (A_{eff}) : ou RMS en anglais (Root Mean Square).

Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire [17].

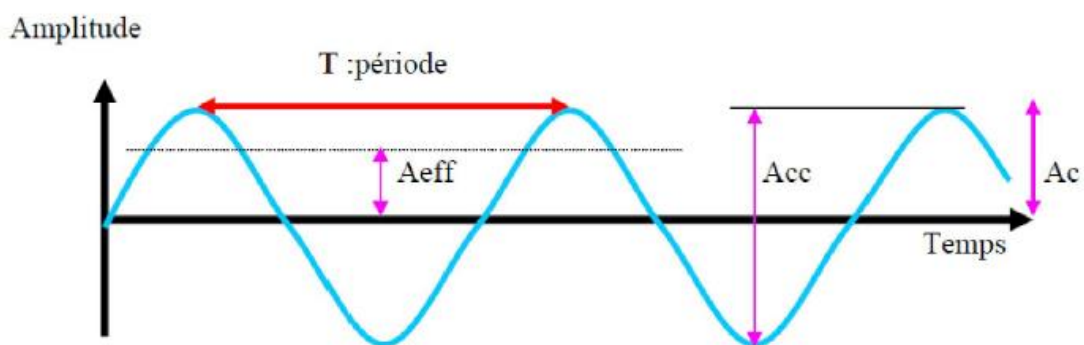


Figure 2-7 : La représentation des différentes amplitudes (vibration sinusoïdale) [15].

1.7.5 Fréquence :

La fréquence (f) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute (T/M), la fréquence des vibrations auxquelles celles-ci sont soumises

est communément exprimée en cycles par minute (C/M). Comme une minute compte 60 secondes, $1 \text{ Hz} = 60 \text{ C/M}$.

Décibel

Les niveaux de vibrations dus à différents phénomènes, sur une même machine, étant extrêmement différents, on représente généralement ces valeurs sur une échelle logarithmique.

C'est pourquoi on a introduit les valeurs en décibels [dB]. On définit :

Le niveau de vitesse vibratoire :

$$L_v = 10 \log \left(\frac{V^2}{V_0^2} \right) \text{ ou } (V_0 = 10^{-9} \text{ m/s}) \quad (2-14)$$

le niveau d'accélération vibratoire :

$$L_a = 10 \log \left(\frac{A^2}{A_0^2} \right) \text{ ou } (A_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2) \quad (2-15)$$

NB: Attention aux conversions d'unités.

Les unités usuelles sont le micromètre (μm) pour le déplacement, le mm/s pour la vitesse et le g ($9,81 \text{ m/s}^2$) ou le m/s^2 pour l'accélération [15].

1.8 Les méthodes d'analyse des vibrations

Il existe de nombreux instruments différents et des méthodes d'analyse vibrationnelle qui détectent et diagnostiquent divers défauts et leurs causes. En général, il peut être divisé en deux parties [16].

1.8.1 Les méthodes temporelles

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres.

Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut [16].

1.8.1.1 La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien et il s'écrit sous forme discrétisée:

$$V_{\text{efficace}} = V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (2-16)$$

Où $x(n)$ est le signal temporel mesuré, ne représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal. Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Son efficacité dépend de son bon paramétrage en termes de bandes de fréquences d'analyse liées à la structure même des machines.

Les indicateurs crêtes contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête ou le Kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsives telles que les écaillages de roulements.

Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré. Il est possible de distinguer principalement :

- le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace [16].

$$\text{Facteur crête} = \frac{\text{facteur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\sup |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (2-17)$$

Le tableau suivant illustre les natures de vibrations et leurs facteurs de crête.

Nature des vibrations	Facteur de crête	Causes possible
Périodique de type sinusoidal ou complexe ou de type "bruit de fond"	1.5 à 2.5	Balourd Désalignement
Aléatoire impulsif	3 à 4	Roulement en bon état
Périodique impulsif	>4	Roulement écaillé

Tableau 2-1 : Nature des vibrations et facteur de crête [16].

- **Le Kurtosis**

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut de roulement.

Dans le cas d'un roulement sans écaillage, la distribution des amplitudes contenues dans le signal recueilli est gaussienne ce qui entraîne une valeur de Kurtosis proche de 3 (moment d'ordre 4 d'un signal gaussien égale à 3). L'analyse des défauts de roulement par le Kurtosis peut également être réalisée dans différentes bandes de fréquences liées aux résonances de la structure.

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (2-18)$$

Où M_4 et M_2 sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2, $x(n)$ est le signal temporel, \bar{x} est la valeur moyenne des amplitudes, N est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Le principal avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état du roulement.

Le Kurtosis doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic [16].

1.8.2 Les méthodes fréquentielles

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques [16].

1.8.2.1 Le spectre (L'analyse en fréquence)

L'analyse « en fréquence » est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier, qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence f , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut. La comparaison de cette fréquence avec celle des défauts théoriques potentiels (fréquences caractéristiques) sur le roulement par exemple

permet sa localisation dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) sur des signaux numérisés :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-19)$$

Où $X(f)$ est la transformée de Fourier t : est la variable temps, f : est la variable fréquence.

$$X(K\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{K}} \quad (2-$$

20)

Où $X(K\Delta f)$ est la transformée de Fourier discrète rapide, t_e est la période d'échantillonnage du signal temporel, n est le numéro de l'échantillon, k est le numéro de la ligne fréquentielle, Δf est l'intervalle entre deux raies fréquentielles, N est le nombre d'échantillons prélevés.



Figure 2-8 : La représentation spectrale d'un signal sinusoïdal [16].

1.8.2.2 L'analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure (carters, paliers...etc.) [18].

En effet, pour des défauts tels que les écaillages de roulement, les harmoniques peuvent exciter un mode de résonance de structure.

L'analyse d'enveloppe repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure [15].

En pratique, pour obtenir le spectre du signal enveloppe, il faut suivre les étapes suivantes:

- Déterminer les fréquences de résonance.
- Filtrer, avec un filtre passe bande, le signal temporel autour des fréquences de résonance.
- Calculer le signal d'enveloppe à l'aide de la transformée d'Hilbert.
- Calculer le spectre d'enveloppe à l'aide de la transformée de Fourier.

1.8.2.3 Le Cepstre

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier:

$$c[s(t)] = \text{TF}^{-1} \log |\text{TF}[s(t)]|^2 \quad (2-21)$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée. Il est largement utilisé pour la détection de défauts d'engrenage et dans une moindre mesure pour les défauts de roulements [15].

1.9 La chaîne de mesure des vibrations

L'analyse vibratoire est faite par une chaîne de mesure structurée par les éléments suivants:

1.9.1 Capteur de vibration

Le capteur de vibration est le premier élément de la chaîne de mesure considéré comme un dispositif électronique qui permet de convertir une charge mécanique (mouvements vibratoires) en un signal électrique temporel.

Le capteur doit être placé de façon à assurer un trajet direct (rotor-structure) aux vibrations.

Les mesures peuvent se faire :

- dans un plan radial (vertical: V, horizontal: H, oblique: O)
- et/ou dans un plan axial (axial: A)

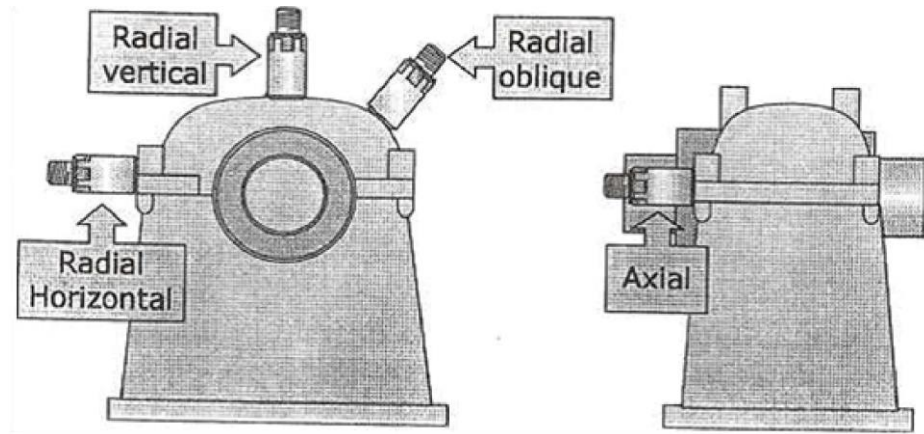


Figure 2-9 : Les différentes directions des mesures [16].

1.9.2 Amplificateur

Le rôle des amplificateurs est, une fois le filtrage effectué, d'amplifier le signal de façon automatique (auto range) ou manuelle, et d'adapter sa dynamique à celle de la chaîne d'acquisition dans le but de réduire le bruit et de transmettre l'information de façon exploitable. En effet, dans le cadre du diagnostic et de la surveillance des machines à partir d'un signal accélérométrique, les amplitudes crêtes susceptibles d'être mesurées sur un palier, qui dépendent de la nature de la machine, du défaut et de la vitesse de rotation de la ligne d'arbre affectée par ce dernier, peuvent s'étendre de quelques mg à plusieurs centaines de g et nécessitent souvent de ce fait :

- Soit d'effectuer la mesure avec un capteur d'une sensibilité beaucoup plus élevée, ce qui se traduit par une nette réduction du bruit analogique et du bruit de quantification par rapport à la situation précédente, rendant ainsi le signal tout à fait exploitable,
- Soit d'amplifier fortement le signal avant son échantillonnage[19].

1.9.3 L'analyseur FFT

Un analyseur FFT est un dispositif de mesure destiné à afficher les différentes fréquences contenues dans un signal ainsi que leurs amplitudes respectives. Les signaux peuvent être de natures diverses : électrique, optique, sonore, radioélectrique [16].

1.10 Détermination des seuils

Une mesure de vibrations doit être considérée comme relative [15]. En effet, elle n'a aucune signification lorsqu'elle est isolée.

Elle n'est que le résultat des forces émises par les différents éléments de la machine pondérées par la fonction de transfert des liaisons (roulements, film d'huile, film d'air, boulons, supports élastiques, ressorts, ...etc.).

Il faut donc définir des méthodes qui permettront de déterminer des seuils "d'avertissement" et "d'arrêt", avec une bonne probabilité de réussite.

Le seuil d'avertissement est également appelé niveau d'alarme.

1.10.1 Méthode du relevé global

Cette méthode consiste à relever les mesures globales sur une machine lorsqu'elle est réputée fonctionner de manière satisfaisante (rendement, consommations, disponibilité, ...). Cet état est dit "de référence". Dans la pratique, le seuil d'alarme est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau de référence. De même, le seuil d'arrêt est généralement fixé à 8 dB (rapport 2,5) au-dessus du niveau d'alarme.

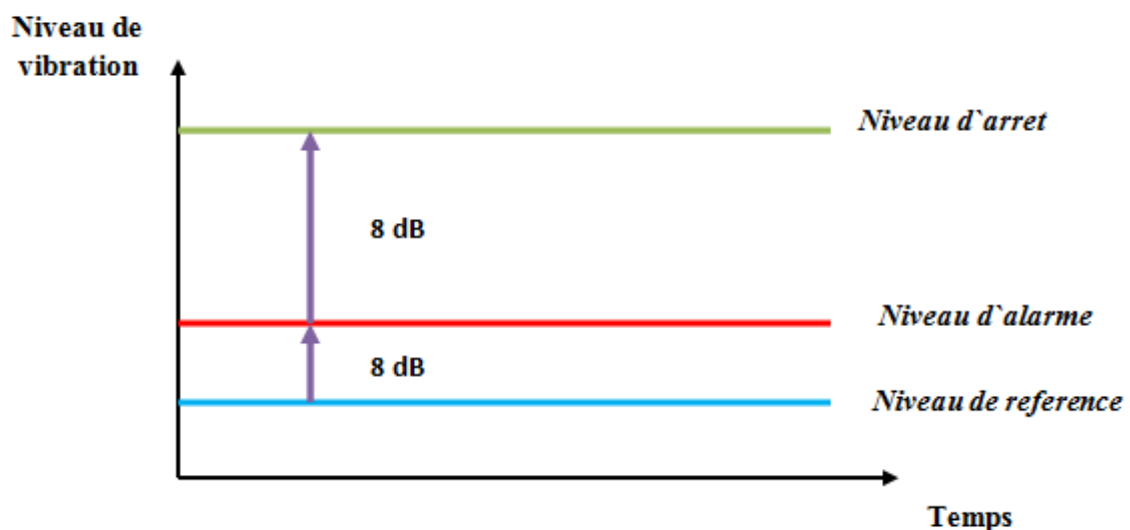


Figure 2-10 : Détermination des seuils par la méthode du relevé global [16].

Cette méthode pourra être utilisée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très importantes, comme le balourd ou les défauts de lignage [15].

1.10.2 Méthode de l'analyse spectrale

Cette méthode met en œuvre un analyseur en lieu et place d'un vibromètre.

Les seuils d'alarme et d'arrêt sont déterminés selon la même méthode que précédemment, sur le spectre au lieu de la mesure globale.

Cette méthode devra être préférée lorsque les défauts à surveiller émettent des vibrations très faibles, comme les défauts d'engrènement ou de roulement.

1.10.3 Seuils de jugement

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants:

- Bon
- Admissible
- Encore admissible
- Inadmissible

Ces seuils ne sont qu'une proposition basée sur une statistique regroupant de très nombreuses machines de types très différents. Il est de la responsabilité de l'utilisateur d'affiner ces seuils machine par machine, en fonction de leur historique. Ces seuils pourront ainsi être modifiés à la baisse ou à la hausse (Tableau 2-2).

28.0	<i>Inadmissible</i>	<i>Inadmissible</i>	<i>Inadmissible</i>	<i>Inadmissible</i>
18.0			<i>Encore admissible</i>	<i>Encore admissible</i>
11.2	<i>Encore admissible</i>	<i>Encore Admissible</i>	<i>Encore admissible</i>	<i>Admissible</i>
7.10			<i>Admissible</i>	
4.50	<i>Admissible</i>	<i>Admissible</i>	<i>Admissible</i>	<i>Bon</i>
2.80			<i>Bon</i>	
1.12	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	
0.71				
0.45	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	<i>Bon</i>	
0.28				
Intensité vibratoire V_{eff} [mm/s]	Group K Petites Machine	Group M Machine Moyenne	Group G Grosses Machine	Group T Turbo-générateurs

Tableau 2-2 : Normes AFNOR E90-300 ou ISO 2372[15].

La norme ne propose aucun seuil de jugement pour les machines des groupes V et VI, car ils comprennent les machines alternatives, présentant des comportements très variables en fonction du nombre de cylindres, de l'angle entre ces cylindres et du calage des manetons.

Ces groupes comprennent également des machines à balourd variable ou des machines construites spécialement pour vibrer.

Les seuils de jugement pour les machines des groupes V et VI ne pourront donc être déterminés que par le constructeur ou l'utilisateur [15].

1.11 Dommages causés par des vibrations excessives

Les vibrations excessives doivent être évitées et rapidement supprimées lorsqu'elles sont détectées parce qu'elles ont pour effet d'accélérer l'usure de l'équipement, qu'elles causent des dommages et qu'elles peuvent provoquer une défaillance et parfois même un accident catastrophique [15].

On peut citer les principaux défauts et leurs fréquences correspondent dans le tableau suivant :

Anomalies	Vibration		Remarque
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à 0.48 FR	Radiale	Uniquement sur palier lisse hydrodynamique à grande vitesse.
Balourd	1 * FR	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur deux Mesures orthogonales.
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 * FR	Radiale	Aucun déphasage sur deux Mesures orthogonales
Défaut D'alignement	2 * FR	Axiale et Radiale	Vibration axiale plus Importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire.
Vitesse critique de Rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime Transitoire Et s'atténue ensuite.

Excitation Hydrodynamique	Fréquence de Passage des Aubes	Axiale et Radiale	
Détérioration de Roulement	Haute fréquence	Axiale et Radiale	Ondes de chocs dues aux écaillages.

Tableau 2-3 : Défauts et fréquences correspondants [15].

1.12 Conclusion

L'entretien des équipements joue un rôle important dans l'industrie par son impact significatif et direct sur le processus de production en maintenant l'intégrité des machines de production et par la détection précoce des défauts ciblés par elles et leurs causes.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'une des techniques de maintenance conditionnelle, l'analyse vibratoire, qui est la méthode la plus efficace de notre temps par rapport à d'autres technologies et méthodes, où nous sommes entrés dans l'explication de cette technique et nous en avons défini certains aspects.

Chapitre 03 :
Réseaux de
neurones
artificiels

2 Chapitre 03 :Réseaux de neurones artificiels

2.1 Introduction

Le diagnostic et la détection automatiques des défaillances sont devenus importants dans l'industrie en raison de l'intégration de procédures intelligentes dans les systèmes de surveillance automatisés.

La surveillance, le diagnostic et la détection des défauts des machines sont des sujets critiques, car une meilleure surveillance des machines et l'utilisation de méthodes idéales de diagnostic des défauts améliorent la sécurité, augmentent la fiabilité des divers systèmes d'ingénierie et réduisent les coûts d'exploitation.

Ce chapitre présente les éléments permettant de comprendre la théorie des réseaux neuronaux, en vue de développer le système automatique de diagnostic des défaillances des systèmes électromécaniques. Lorsque ce chapitre comprend la description des fondements biologiques des réseaux de neurones leur modélisation et la présentation des modèles les plus importants permettant l'apprentissage des RNA.

Enfin, On va appliquer le réseaux de neurones pour la diagnostic des défauts des roulements et de cassure de une barre et extraire et commenter les résultats.

2.2 Définitions de quelques termes liés au diagnostic

➤ Dégradation

Une dégradation représente une perte de performances d'une des fonctions assurées par un équipement. Si les performances sont au-dessous du seuil d'arrêt défini dans les spécifications fonctionnelles de cet équipement, il n'y a plus dégradation mais défaillance.

➤ Défaillance

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques. On peut classer les défaillances selon leur degré de sévérité par :

- Défaillance critique : nécessite une intervention d'urgence,
- Défaillance significative : nécessite un processus de traitement,
- Défaillance absorbable : pouvant être ignorée dans un premier temps.

➤ Panne

Une Panne est l'inaptitude d'une entité (composant ou système) à assurer une fonction requise. Si nous écartons la possibilité d'erreurs de conception, la définition précédente implique que toute défaillance entraîne une panne. La défaillance correspond à un événement et la panne à un état. Sur le plan temporel, la défaillance correspond à une date et la panne à une durée comprise entre la date d'occurrence de la défaillance et la date de fin de réparation.

➤ Surveillance

La surveillance est un dispositif passif, informationnel qui analyse l'état du système et fournit des indicateurs. La surveillance consiste notamment à détecter et classer les défaillances en observant l'évolution du système puis à les diagnostiquer en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières.

La surveillance se compose donc de deux fonctions principales qui sont la détection et le diagnostic. La (Figure 3-1) montre une architecture générale d'un système de surveillance [20].

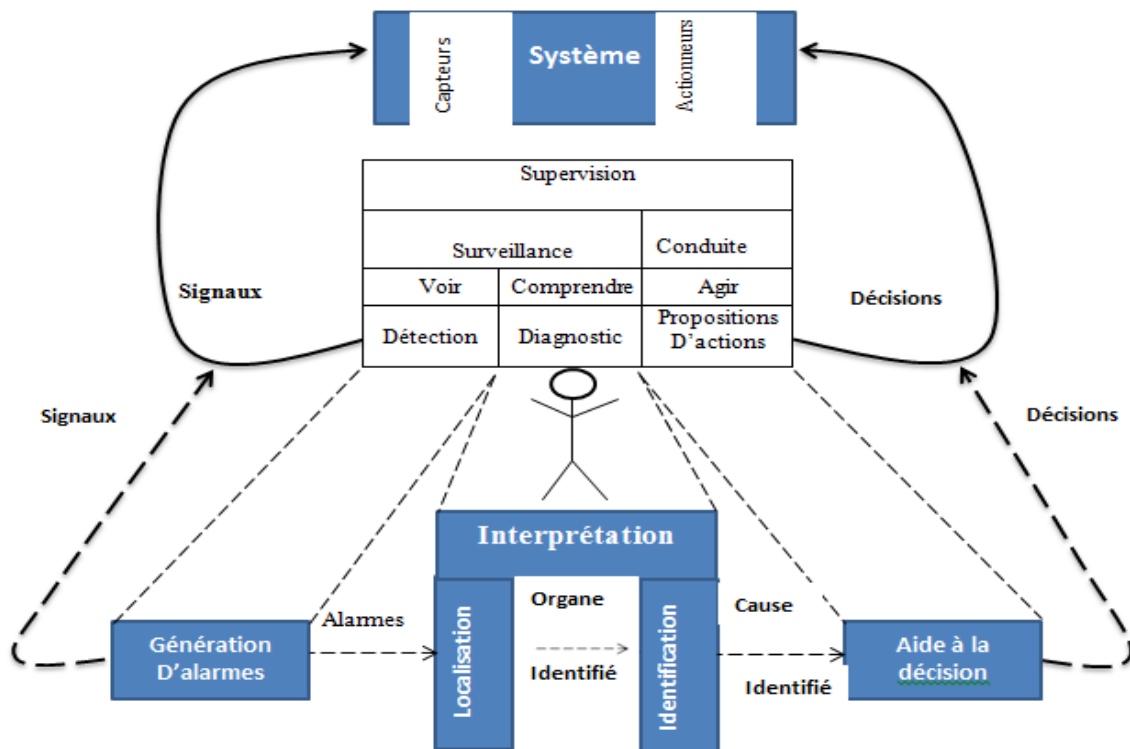


Figure 3-1: Architecture générale d'un système de supervision en ligne[20].

➤ Détection

Pour détecter les défaillances du système, il faut être capable de classer les situations observables comme étant normales ou anormales.

Cette classification n'est pas triviale, étant donné le manque d'information qui caractérise généralement les situations anormales. Une simplification communément adoptée consiste à considérer comme anormale toute situation qui n'est pas normale.

➤ **Diagnostic**

L'objectif de la fonction diagnostic est de rechercher les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une observation particulière.

Cette fonction se décompose en deux fonctions élémentaires : localisation et identification. à partir de l'observation d'un état de panne, la fonction diagnostic est chargée de retrouver la faute qui en est à l'origine. Ce problème est difficile à résoudre. En effet si, pour une faute donnée, il est facile de prédire la panne résultante, la démarche inverse qui consiste à identifier la faute à partir de ses effets, est beaucoup plus ardue. Une défaillance peut.

➤ **Localisation**

La localisation permet de déterminer le sous-ensemble fonctionnel défaillant.

Identification de la cause

Cette dernière étape consiste à déterminer les causes qui ont mené à une situation anormale.

Ces causes peuvent être internes (sous-ensembles défaillants faisant partie de l'équipement), ou bien externes à l'équipement [20].

2.3 Les réseaux de neurones biologiques

Les cellules nerveuses, appelées neurones, sont les éléments de base du système nerveux central, celui-ci en posséderait environ cent milliards. Par ailleurs, il existe de nombreuses variétés de neurones, les différences portant tant sur les aspects anatomiques que sur les aspects fonctionnels.

En général, chaque neurone biologique possède un axone qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres, un corps cellulaire où se situe le mécanisme du déclenchement du neurone, des dendrites qui reçoivent des informations des autres neurones et des terminaisons axonales qui émettent des informations vers les autres neurones (Figure 3-2). Les neurones sont interconnectés entre eux par des synapses dont le nombre est d'environ 10000 milliards. Ceci signifie qu'un neurone reçoit en moyenne des excitations en provenance de 1000 neurones, et qui émet également des informations à 1000 neurones différents [20].

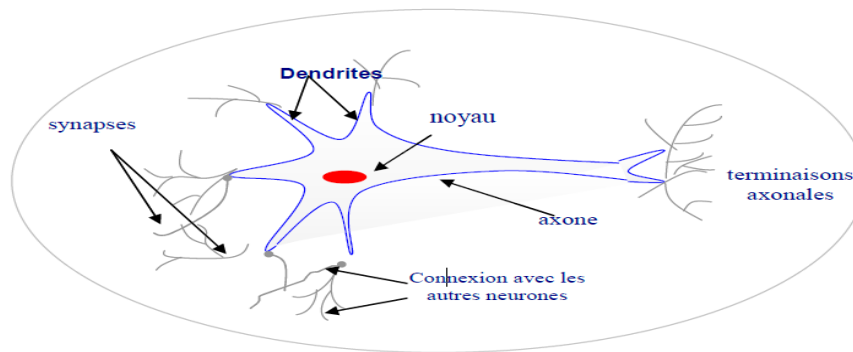


Figure 3-2: schéma simplifié d'un neurone du cerveau humain [20].

Il existe quatre modes de communications entre neurones :

- liaison terminaison axonale-dendritique.
- liaison terminaison axonale-corps cellulaire.
- liaison axone-axone.
- liaison dendrite-dendrite.

Le processus de communication entre les neurones se fait par voie électrochimique aux niveaux des synapses par des neurotransmetteurs, ces fonctions spécifiques dépendent essentiellement des propriétés de la membrane externe du neurone, cette dernière remplit cinq fonctions principales:

- elle sert à propager des impulsions électriques tout au long de l'axone et des dendrites.
- elle libère des médiateurs à l'extérieur de l'axone.
- elle réagit au niveau du corps cellulaire aux impulsions électriques que lui transmettent les dendrites pour générer ou non une nouvelle impulsion.
- enfin, elle permet au neurone de reconnaître les autres neurones afin qu'il puisse se situer dans l'architecture anatomique du cerveau et de trouver les cellules auxquelles il doit être connecté.

Généralement, les réseaux de neurones artificiels sont basés sur une théorie électrique selon laquelle la jonction synaptique, est l'endroit où le neurone perçoit un stimulus par voie électrochimique. La membrane synaptique, lorsqu'elle ne reçoit pas d'excitation, est polarisée à une tension supérieure à un seuil donné, le neurone étant alors activé et cela déclenche un processus de dépolarisation, le neurone émet sur l'axone une tension positive d'environ $+60 \div +70$ mv en se comportant comme un système non linéaire. C'est ce type de modèle qui est majoritairement retenu pour simuler artificiellement les neurones du cerveau humain [20].

2.4 Fonctionnement des neurones

Au point de vue fonctionnel, il faut considérer (pour simplifier) le neurone comme une entité polarisée, c'est-à-dire que l'information ne se transmet que dans un seul sens: des dendrites vers l'axone. Pour rentrer un peu dans le détail, le neurone va donc recevoir des informations, venant d'autres neurones, grâce à ses dendrites. Il va ensuite y avoir sommation, au niveau du corps cellulaire, de toutes ces informations et via un potentiel d'action (un signal électrique) le résultat de l'analyse va transiter le long de l'axone jusqu'aux terminaisons synaptiques. A cet endroit, lors de l'arrivée du signal, des véhicules synaptiques vont venir fusionner avec la membrane cellulaire, ce qui va permettre la libération des neurotransmetteurs (médiateurs chimiques) dans la fente synaptique. Le signal électrique ne pouvant pas passer la synapse (dans le cas d'une synapse chimique), les neurotransmetteurs permettent donc le passage des informations, d'un neurone à un autre.

Au niveau post-synaptique, sur la membrane dendritique, se trouvent des récepteurs pour les neurotransmetteurs. Suivant le type de neurotransmetteur et le type des récepteurs, l'excitabilité du neurone suivant va augmenter ou diminuer, ce qui fera propager ou non l'information.

Les synapses possèdent une sorte de "mémoire" qui leur permet d'ajuster leur fonctionnement. En fonction de leur "histoire", c'est-à-dire de leur activation répétée ou non entre deux neurones, les connexions synaptiques vont donc se modifier [21].

2.5 Les neurones artificiels

Le premier modèle d'un neurone artificiel a été présenté dans les années quarante par Mac Culloch et Pitts. Par analogie avec le modèle électrochimique décrit ci-dessus, ils ont proposé le modèle d'un neurone artificiel qui est établi conformément au modèle non linéaire représenté sur la (Figure 3-3).

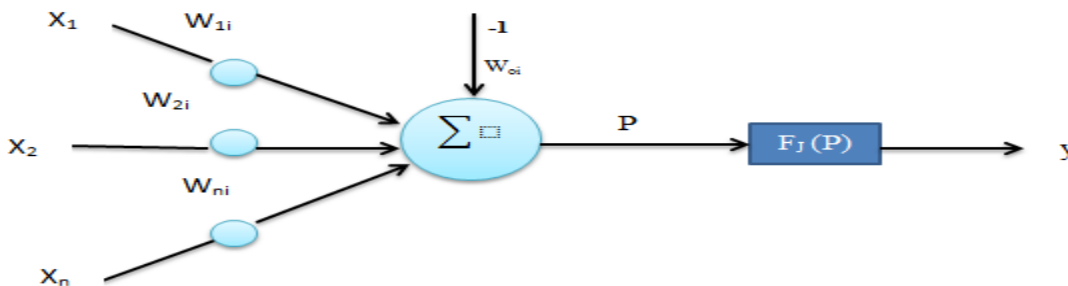


Figure 3-3 : modèle du neurone de Mc CULLOCH et PITTS [20].

Chapitre 03 :

Chaque neurone artificiel transforme l'ensemble des signaux qu'il reçoit en un signal de sortie qui est communiqué à d'autres neurones. Cette transformation s'effectue en deux étapes:

Le neurone effectue une sommation pondérée des potentiels (principe de superposition), la valeur numérique obtenue représente l'état du neurone qui l'a émis, afin d'obtenir une stimulation résultante globale :

$$P_i = \sum_{j=1}^{j=N} W_{ij} X_j - W_{oi} \quad (3-1)$$

A l'aide d'une fonction de transfert, on teste le neurone. Si cette stimulation dépasse un certain seuil, le neurone est activé et transmet une réponse.

Dans ce cas :

$$S_i = f_i(P) \quad (3-2)$$

$$f_i(P) = \begin{cases} 1 & \text{si } P > \beta \\ 0 & \text{si } P \leq \beta \end{cases} \quad (3-3)$$

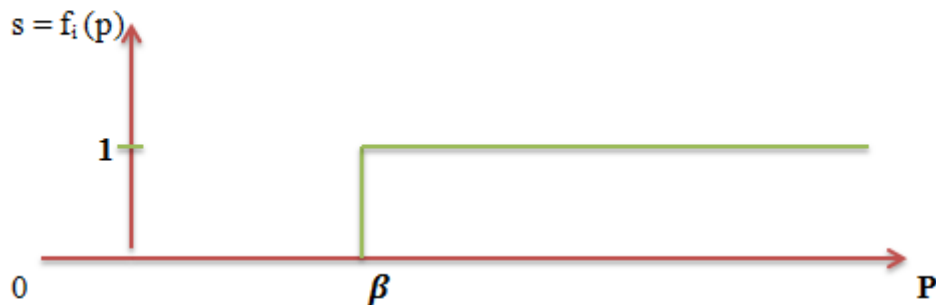


Figure 3-4 : fonction de seuillage avec un sommateur [20].

On peut représenter cette fonction par le graphe suivant:

D'une façon générale, on peut définir un neurone formel (artificiel) par les quatre éléments suivants :

- la nature de ses entrées.
- la fonction d'entrée totale qui définit le prétraitement effectué sur les entrées.

Chapitre 03 :

- la fonction d'activation (ou d'état) du neurone qui définit son état interne en fonction de son entrée globale.
- La fonction de sortie.

Nous adopterons par la suite les notations suivantes :

$(e_i)_{i=1:n}$ les entrées.

h : la fonction d'entrée totale.

f : la fonction d'activation.

g : la fonction de sortie.

D'autre part, nous utiliserons également les désignations suivantes :

$E = h(e_1 \dots e_n)$ comme entrée totale.

$A = f(E)$ comme état du neurone.

$S = g(A)$ comme sortie.

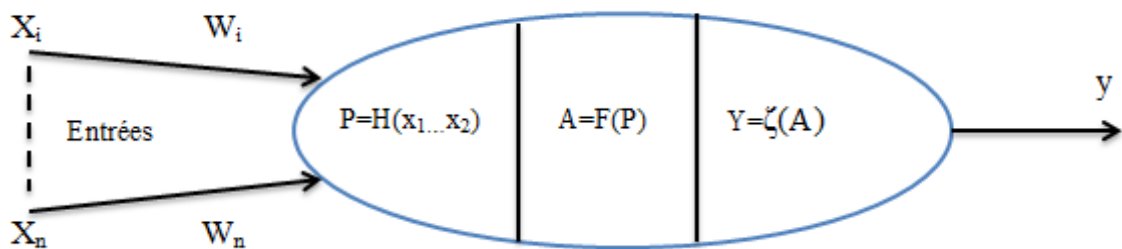


Figure 3-5 : modélisation générale d'un neurone [20].

Nature des entrées et des sorties

Elles peuvent être :

- binaires: $(-1, +1)$ ou $(0,1)$
- réelles.

La fonction d'entrée totale h

Elle peut être :

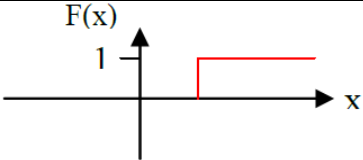
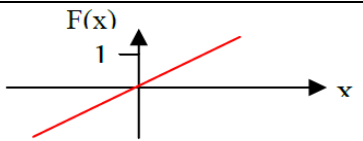
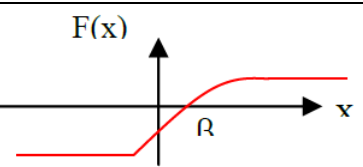
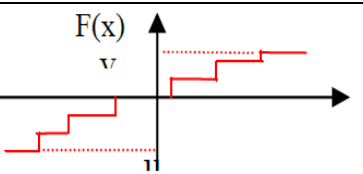
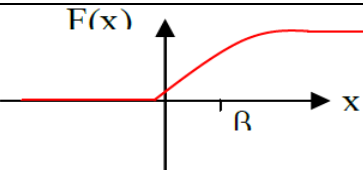
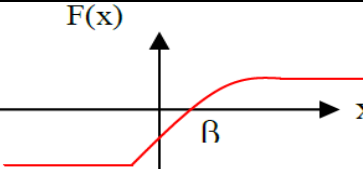
- booléenne.
- linéaire : $h(e_1 \dots e_n) = \sum_{j=1:n} w_j e_j$
- affine: $h(e_1 \dots e_n) = \sum_{j=1:n} w_j e_j - a$

Chapitre 03 :

Ces deux derniers cas sont les plus fréquents, On peut interpréter le (a) par l'utilisation d'un neurone qui fournirait toujours l'entrée -1 au neurone étudié. Cette notation sera utile lorsque nous aborderons les modèles d'apprentissage

La fonction de transfert (d'activation)

La fonction de transfert est en général une fonction non linéaire monotone croissante, par ailleurs les fonctions de transfert sont de qualités diverses : elles peuvent être déterministes, continues, discontinues ou aléatoires. Ces fonctions sont présentées dans le tableau suivant :

<p>(a)</p> <p>Fonction de Heaviside</p>	
<p>(b)</p> <p>Fonction linéaire sans saturation</p>	
<p>(c)</p> <p>Fonction linéaire avec seuil</p>	
<p>(d)</p> <p>fonction à seuils multiples</p>	
<p>(e)</p> <p>fonction sigmoïde</p> $F(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
<p>(f)</p> <p>fonction sigmoïde</p> $F(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$	

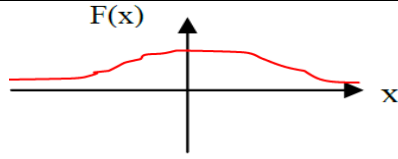
(g) fonction stochastique	
------------------------------	--

Tableau 3.1 : Fonction de transfert [20].

La fonction de sortie

En général, cette fonction $g(E)$ est considérée comme étant la fonction identité

$g(E) = F(E)$ Par la suite, nous confondrons activation et sortie du neurone.

Les fonctions d'entrée et d'activation sont choisies en fonction des types d'automates utilisés, dépendant de la nature des entrées et des sorties. En général, ils sont au nombre de six :

Les automates booléens

- Les entrées et les sorties sont booléennes.
- La sortie est une fonction booléenne des entrées.

Les automates à seuil

- La sortie est binaire alors, que les entrées peuvent être binaires ou réelles ;
- La fonction d'entrée totale est affine.
- La fonction d'activation est la fonction signe ou la fonction de Heaviside.

Les automates linéaires

- Les entrées et les sorties sont réelles.
- La fonction d'entrée totale est linéaire.
- La fonction de sortie est l'identité.

Les automates à saturation

- Les entrées et les sorties sont comprises dans un intervalle $[u, v]$.
- La fonction d'entrée totale est linéaire.

La fonction d'activation est la fonction SATUR.

Les automates continus

- Les entrées et les sorties sont réelles.

- La fonction d'entrée est linéaire ou affine.
- La fonction d'activation est une fonction sigmoïde.

Les automates probabilistes

- Les sorties sont binaires et les entrées sont quelconques.
- La fonction d'entrée est affine ou linéaire.
- La fonction d'activation est stochastique [20].

2.6 Réseaux de neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels est un ensemble de neurones formels associés en couches (ou sous-groupes) et fonctionnant en parallèle. Les réseaux de neurones artificiels ont la capacité de stocker de la connaissance empirique et de la rendre disponible à l'usage. Les habiletés de traitement (et donc la connaissance) du réseau vont être stockées dans les poids synaptiques, obtenus par des processus d'adaptation ou d'apprentissage. En ce sens, les réseaux de neurones artificiels ressemblent donc au cerveau car, non seulement, la connaissance est acquise à travers un apprentissage mais de plus, cette connaissance est stockée dans les connexions entre les entités, soit dans les poids synaptiques. La structure des connexions entre les différents neurones détermine la topologie du réseau [21].

Par ailleurs, il existe une grande variété des réseaux de neurones artificiels, ceux-ci peuvent être définis selon plusieurs critères, parmi lesquels, on peut citer [20]:

1. Réseau neuronal multicouche de type Feed- Forward (réseau non bouclé).
2. Réseau récurrent (réseau bouclé).
3. Réseaux récurrents.
4. Réseau cellulaire.
5. Les mécanismes de mémorisation.
6. Les mécanismes d'apprentissage.
7. Les mécanismes de classification

Notons qu'un réseau neuronal est dit bouclé si son graphe représente au moins un cycle. Pour bien comprendre le fonctionnement d'un perceptron multicouche, nous allons présenter tout d'abords le perceptron monocouche et son utilisation [21].

2.6.1 Perceptron monocouche

Historiquement le premier RNA, c'est le Perceptron de Rosenblatt. C'est un réseau

Simple, puisque il ne se compose que d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie [Djar06]. Les seules opérations permises pour ce type de neurone sont les opérations ET, OU, et NON, des opérations qui permettent de résoudre uniquement des problèmes linéairement séparables.

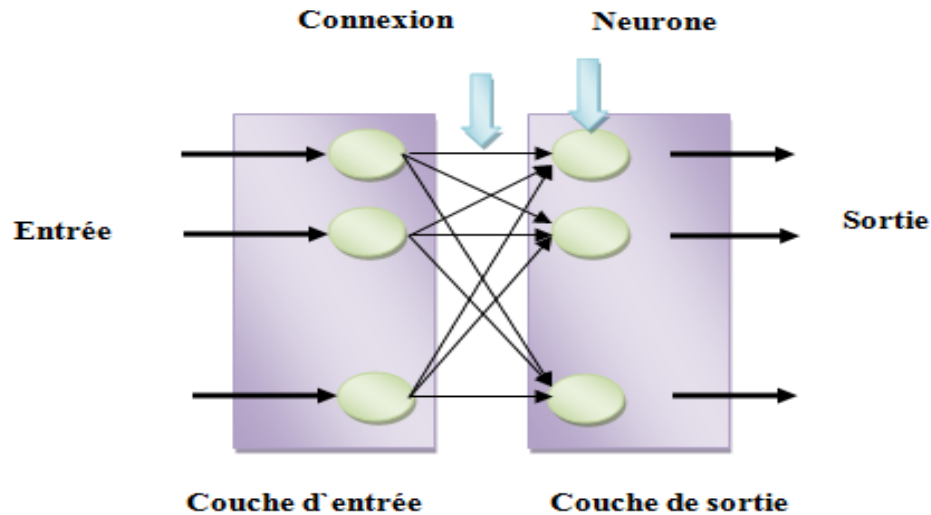


Figure 3-6: Perceptron monocouche [21].

Pour bien comprendre le fonctionnement d'un perceptron monocouche, nous allons présenter quelques exemples liés aux fonctions logiques. Nous utiliserons, pour ce faire, les fonctions *ET*, *OU* qui, comme nous le verrons, sont des fonctions linéairement séparables et la fonction logique *XOR* (ou exclusif) qui se trouve être une fonction qui n'est pas linéairement séparable par un neurone formel. Nous verrons comment l'ajout d'une seconde couche peut résoudre ce type de problème qui se rencontre fréquemment dans les applications quotidiennes.

Sa principale limite est qu'il ne peut résoudre que des problèmes linéairement séparables. Il suit généralement un apprentissage supervisé selon la règle correction de l'erreur.

Pour comprendre les portes logique ET, OU on présente celui-ci sous forme de table de vérité. On peut voir, sur le tableau (3.2), les valeurs des entrées et de la sortie pour chacun des états.

X_1	X_2	Sortie ET	Sortie OU
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	1

Tableau 3-2 : Table de vérité (ET, OU) [21].

2.6.2 Réseaux neuronaux multicouches de type Feed- Forward

Appelés aussi "réseaux de type Perceptron", ce sont des réseaux dans lesquels l'information se propage couche en couche sans que le retour en arrière soit possible. On trouve le perceptron monocouche et le perceptron multicouche. Le premier est un réseau simple, puisqu'il ne se compose que d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie, sa principale limite est qu'il ne peut résoudre que des problèmes linéairement séparables (Figure 3-7). Le perceptron multicouche MLP (Multi layer perceptron) (Figure 3-7) est une extension du précédent, avec une ou plusieurs couches cachées entre l'entrée et la sortie.

Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche précédente et de la couche suivante (à l'exception des couches d'entrée et de sortie) et il n'y a pas de connexions entre les neurones d'une même couche. Les fonctions d'activation utilisées dans ce type de réseaux sont principalement les fonctions à seuil ou sigmoïdes. Il peut résoudre des problèmes non linéairement séparables et des problèmes logiques plus compliqués, et notamment le fameux problème du XOR (problème de monocouche), et c'est le rôle de la couche cachée [21].

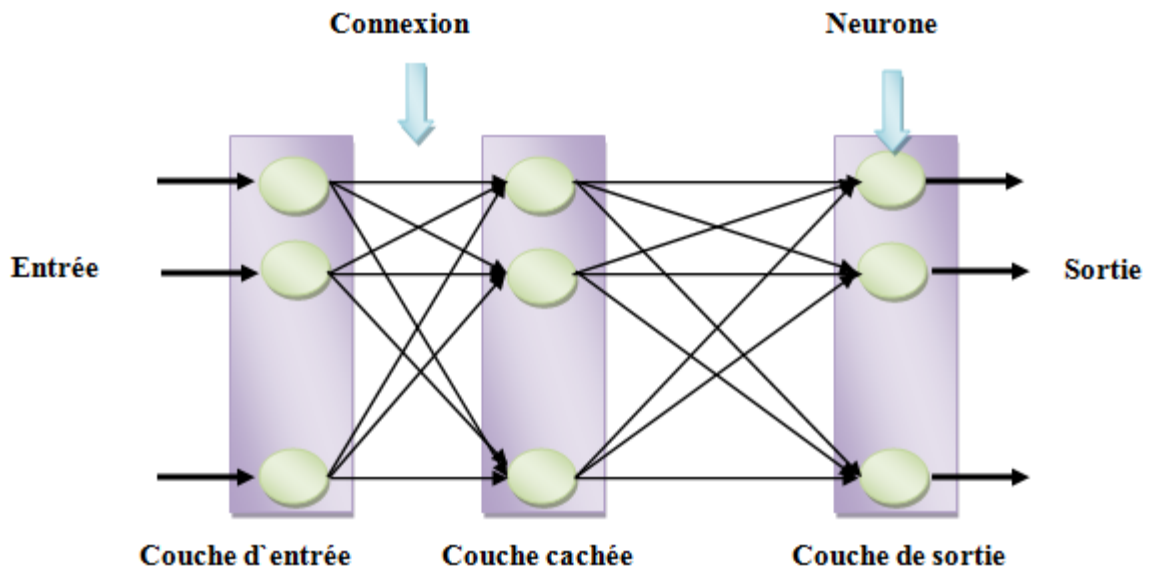


Figure 3-7 : Réseau PMC à connexions directes [21].

Ce réseau est considéré comme un système neuronal non linéaire statique. Il existe trois types de réseaux neuronaux multicouche de type Feed-forward qui sont : Le perceptron multicouche PMC, le réseau RBFNN (Radial- Basis- Function Neural Network) et le réseau d'ondelettes WNN (Wavelet Neural Network) [21].

2.6.3 Réseaux récurrents

Appelés aussi réseaux bouclés ou dynamiques (Figure 3-8), ce sont des réseaux dans lesquels il y a retour en arrière de l'information. Des connexions apparaissent entre la sortie du réseau et les neurones qui se trouvent dans des couches amont. Ces réseaux sont souvent utilisés pour identifier des systèmes dynamiques non linéaires.

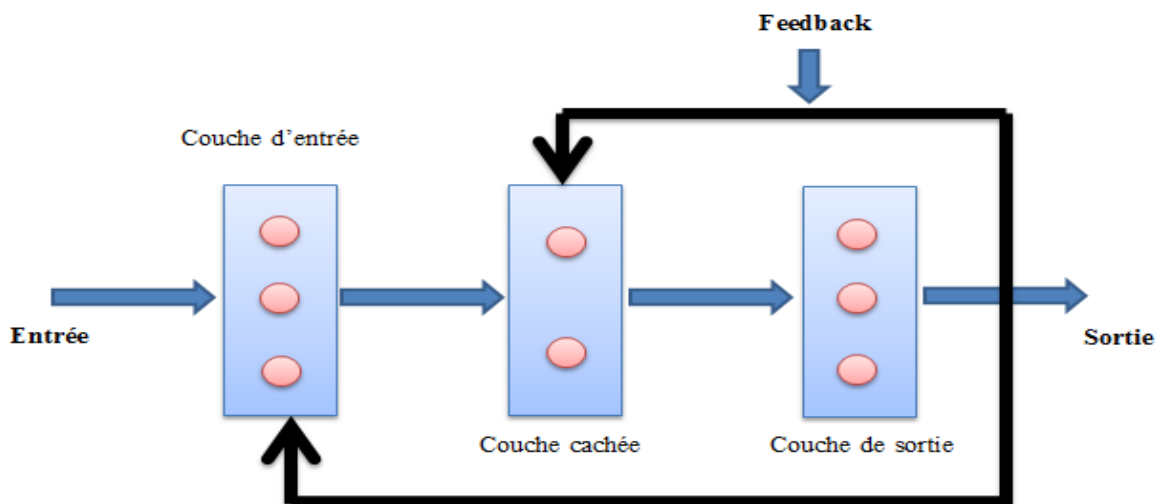


Figure 3-8: Structure d'un réseau de neurone récurrent [21].

2.6.4 Réseaux cellulaires

Dans un réseau cellulaire (Figure 3.8), les neurones sont entièrement connectés dans un plan où chaque neurone est relié à tous les neurones qui les entourent. Une connexion entre deux neurones peut être bidirectionnelle.

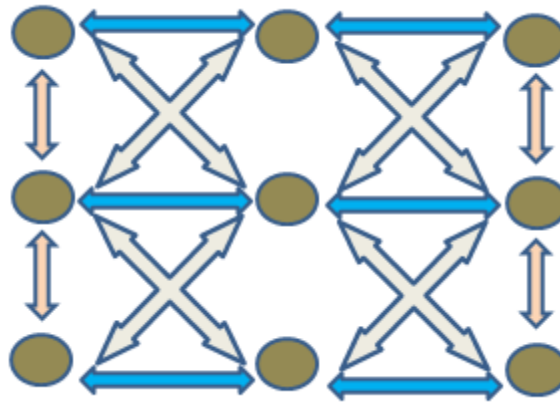


Figure 3-9 : Réseau cellulaire [21].

2.6.5 Les mécanismes de mémorisation

Une caractéristique importante des réseaux de neurones réside dans la manière avec laquelle sont stockées les informations et dans la façon de les associer. En règle générale, la mémoire des réseaux de neurones est distribuée et tout ou une partie des poids de connexion du réseau, constitue la mémoire de ce dernier. Ainsi un cas pris dans la base des exemples d'apprentissage sera mémorisé par un sous-ensemble particulier des cellules lequel contient également la mémoire d'autres exemples de la base d'apprentissage. Par ailleurs, les réseaux de neurones utilisés en diagnostic industriel pour la classification des défauts sont appelés des mémoires associatives ou classifieurs. On distingue deux familles de réseaux de neurones appelés souvent neurones "grand-mère" et les réseaux de neurones à mémoires autoassociatives et à mémoires hétéroassociatives. Dans la première les neurones répondent spécifiquement à un seul exemple de la base d'apprentissage, ces réseaux sont adaptés aux problèmes de classification.

Dans la deuxième catégorie, les informations ne sont pas localisées à des emplacements déterminés, mais la mémorisation de chaque exemple est distribuée sur l'ensemble de la structure du réseau qui constitue ainsi la mémoire. Les mémoires autoassociatives ont pour caractéristique essentielle de reproduire en sortie, l'image issue de l'entrée à partir d'un exemple incomplet ou bruité.

Les mémoires hétéroassociatives assimilent la relation entre un exemple donné et une sortie désirée de l'exemple. Un nouvel exemple présenté proche de l'exemple appris, restituera la sortie

désirée. Ces mémoires sont particulièrement performantes pour la reconnaissance de caractères des données incomplètes ou bruitées [20].

2.6.6 Les mécanismes d'apprentissage

2.6.6.1 Définition

Les mécanismes d'apprentissage sont la propriété la plus intéressante des réseaux de neurones. A cet effet, les paramètres internes (poids de connexion) d'un réseau de neurones sont modifiés en utilisant un algorithme d'adaptation appelé algorithme d'apprentissage.

Par ailleurs, une autre classification des réseaux de neurones peut être déduite en fonction du type d'apprentissage. En effet on distingue deux grandes familles d'apprentissage: l'apprentissage supervisé et l'apprentissage non supervisé [20].

2.6.6.2 Les algorithmes avec apprentissage supervisé

Dans ce type d'apprentissage, l'algorithme détermine les poids synaptiques à partir d'exemples étiquetés de formes auquel un professeur (teacher) a associé des réponses ou des cibles également étiquetées. Il existe plusieurs algorithmes, parmi lesquels on distingue l'algorithme de rétropropagation qui est destiné aux réseaux à couches (réseaux non bouclés).

2.6.6.3 Les algorithmes avec apprentissage non supervisé

Dans ce type d'algorithmes, on présente à l'entrée du réseau des exemples connus et le réseau s'organise lui-même autour d'attracteurs qui correspondent à des configurations stables du modèle dynamique non linéaire associé au réseau. L'apprentissage est accompli à l'aide de règles qui changent ou adaptent le poids des coefficients synaptiques en fonction des exemples présentés à l'entrée et dans certains cas en fonction des sorties désirées.

L'apprentissage a lieu souvent en temps réel avec des réseaux qui peuvent être éventuellement bouclés, parmi lesquels, on peut citer :

le réseau de HOPFIELD, et les cartes topologiques de KOHONEN [20].

2.6.6.4 Les principales règles d'apprentissage

Les stratégies de modification des poids synaptiques découlent des règles suivantes :

- la règle de Hebb où le poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé si ces derniers sont activés simultanément.

Chapitre 03 :

- la règle Widrow-Hoff ou règle delta : le poids synaptique est adapté pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processus élémentaire et la sortie désirée.
- l'apprentissage compétitif dans lequel tous les processeurs élémentaires sont en compétition. La sélection est réalisée à l'aide d'un processus de compétition, basé sur une mesure de similarité entre l'exemple de référence associé à chaque processeur et l'exemple d'entrée.

Les expressions précises des règles dépendent très étroitement de la nature des fonctions d'entrée totale, des fonctions d'activation et de la nature continue ou discrète des informations contenues dans les cellules de neurones.

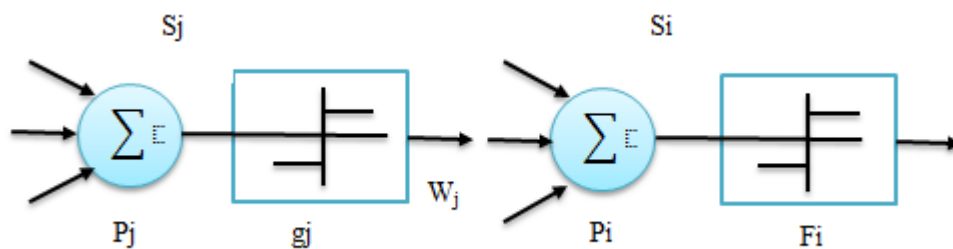


Figure 3-10 : modèle d'apprentissage de la connexion w_{ij} entre deux neurones [20].

Rumhart a proposé une règle générale de modification du poids synaptique Δw_{ij} valable dans de nombreux mécanismes d'apprentissage, cas d'une cellule p_i avec éventuellement une entrée " professeur » t_i

$$\Delta w_{ij} = \alpha f_i(s_i, t_i) g_j(s_j, w_{ij}) \quad (3-4)$$

Avec :

α : Le pas d'adaptation.

f_i et f_j : la fonction d'activation de p_i et p_j .

s_i et s_j : les valeurs d'activation de p_i et p_j .

t_i : L'entrée professeur de p_i

Dans la règle de Hebb, il n'y a pas de professeur et les fonctions f_i sont linéaires, le mécanisme d'adaptation se réduit à :

$$\Delta w_{ij} = \alpha s_i s_j \quad (3-5)$$

La règle de (Widrow – Hoff), connue également sous le nom de delta-règle (Δ règle) nécessite un professeur et elle peut être écrite en présence de fonctions d'activation linéaires sous la forme :

$$\Delta w_{ij} = \alpha(t_i - s_i)s_j \quad (3-6)$$

le modèle compétitif de type kohonen met en œuvre l'expression:

$$\Delta w_{ij} = \alpha(t_i - w_{ij}) \quad (3-7)$$

Après la phase d'apprentissage toute la mémorisation des connaissances est enregistrée dans le réseau. C'est la phase la plus longue en calcul connexionniste. Par contre, en phase de reconnaissance, si la forme à reconnaître a déjà été apprise, le réseau fournira instantanément la bonne sortie [20].

2.6.7 Les mécanismes de classification

La cellule de décision avec fonction de seuil se comporte comme un adaptateur linéaire qui réalise la séparation des exemples en deux classes w_1 et w_2 à l'aide de la fonction discriminante linéaire.

$$G(x) = w^T x \quad (3-8)$$

Où $w = (w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}, w_{0j})^T$, vecteur des poids synaptiques $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$

Cette fonction permet la séparation de l'ensemble des vecteurs x en deux classes w_1 et w_2

$$\begin{aligned} x \in w_1 & \text{ si } g(x) \geq 0 \\ x \in w_2 & \text{ si } g(x) < 0 \end{aligned} \quad (3-9)$$

La (Figure 3-11) montre l'interprétation géométrique du mécanisme de classification.

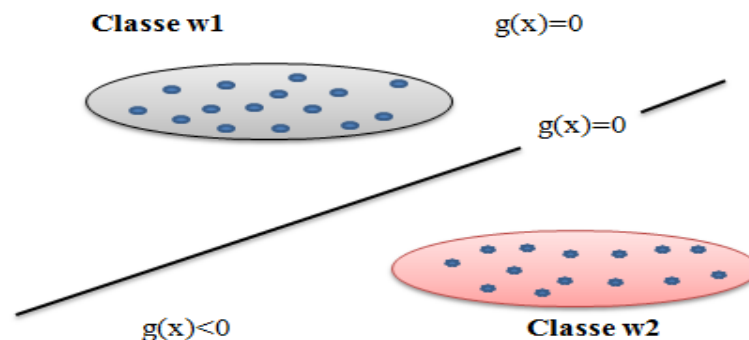


Figure 3-11 : séparation de deux classes avec adaptateur linéaire [20].

2.7 Diagnostic des défauts des roulements et de cassure de barre par réseaux de neurones

2.7.1 Défaut de roulement

Le réseau de neurone utilisé dans ce cas se compose de 03 couches, une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Les caractéristiques représentatifs de l'état sain et défectueux utilisées pour l'apprentissage et les tests correspondent à :

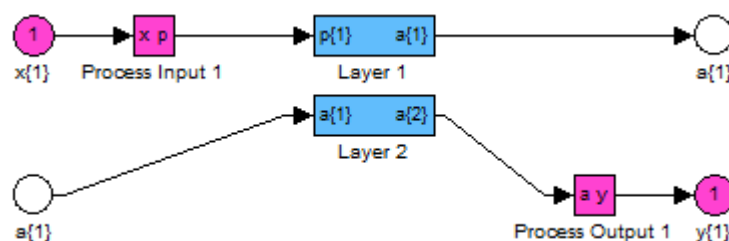
- Valeur *RMS* de reconstruction de détail 01 ;
- Valeurs de *Kurtosis* de reconstruction de détail 01 ;
- Valeur *RMS* de reconstruction de détail 02 ;
- Valeurs de *Kurtosis* de reconstruction de détail 02.

La base d'apprentissage du RNA est mise sous forme de fichier ou de tableau (matrice). Pour passer à l'étape de classification nous disposons pour chacun des paramètres, 4 types de défauts de roulement compris l'état sain (voir le tableau 3.3)

Catégorie	Type de défaut	Code					
1	Etat sain	0	0	0	0	0	0
2	défaut bague interne	1	0	0	0	0	0
3	défaut de bille	0	1	0	0	0	0
4	défaut bague extérieur	0	0	1	0	0	0

Tableau3.3: Classification des types des defaults de roulement

La structure finale doit être choisie selon la minimisation de l'erreur entre la valeur réelle et la valeur désiré. Le modèle de réseau neurone obtenu est composé du poids optimal et du vecteur de biais. La structure du réseau neurone retenus est présentée dans la (figure 3-12).



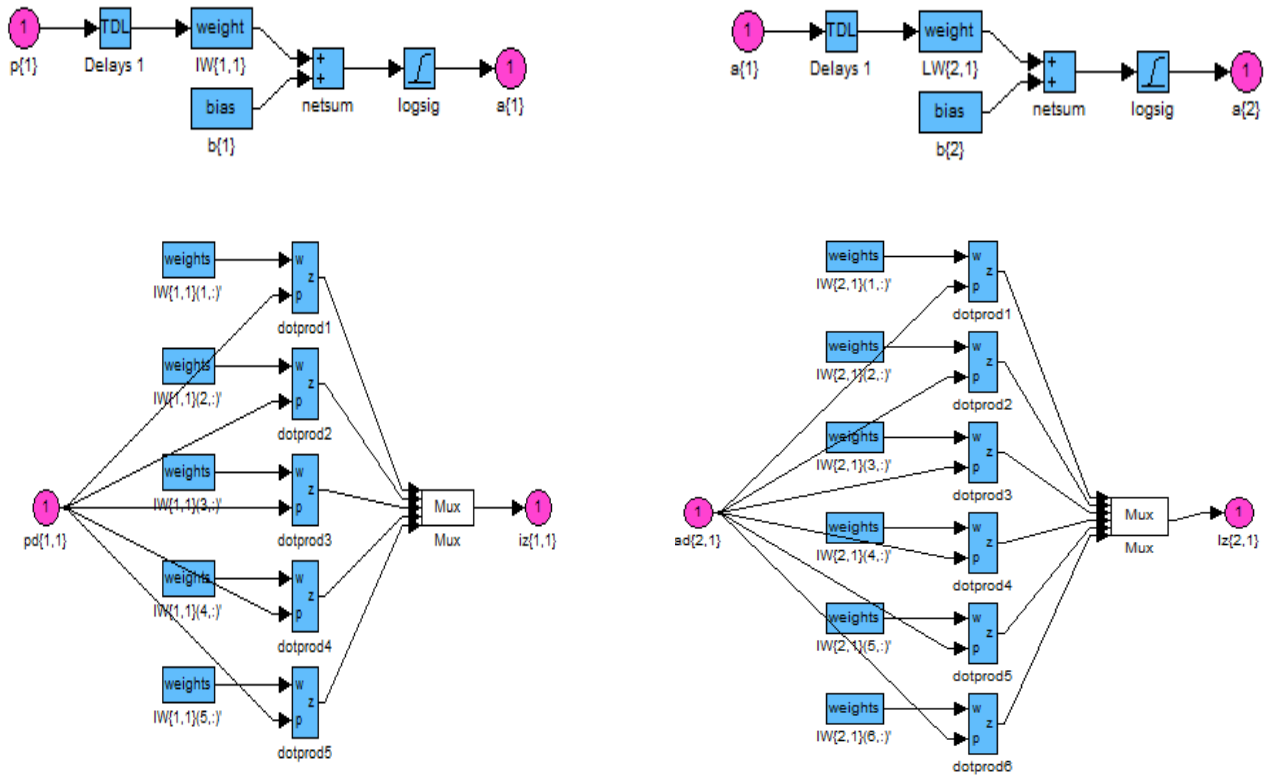
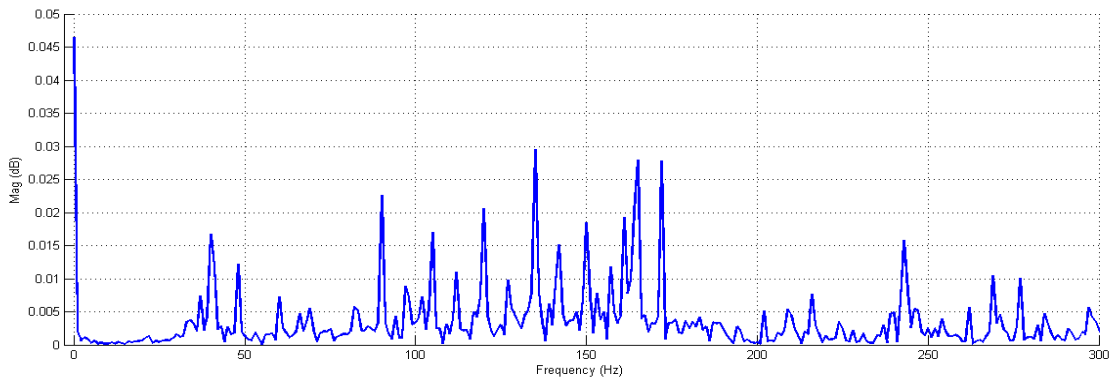


Figure 3-12 : Structure de réseau de neurone proposé dans ce cas

2.7.2 Résultat de simulation

Les figures 3-13, 14, 15 et 16, montrent les résultats de simulation de réseau **neurone proposé pour la détection des défauts de roulement de la MAS dans le cas sain et avec défauts bague interne, de bille et bague extérieur.**



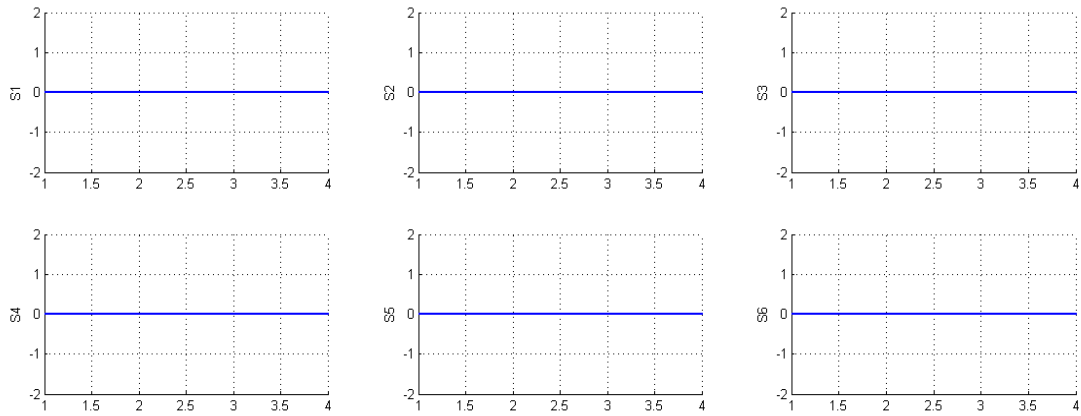


Figure 3-13 : Résultats de simulation de l'état sain

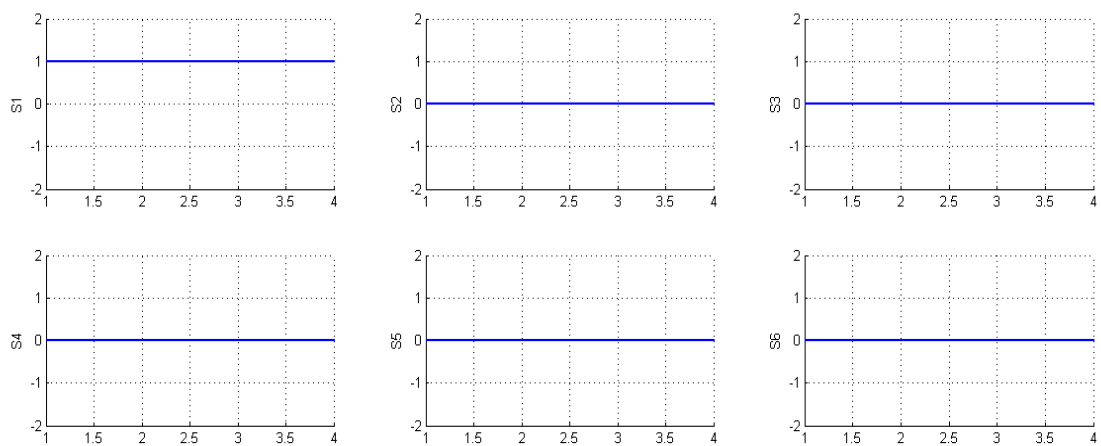
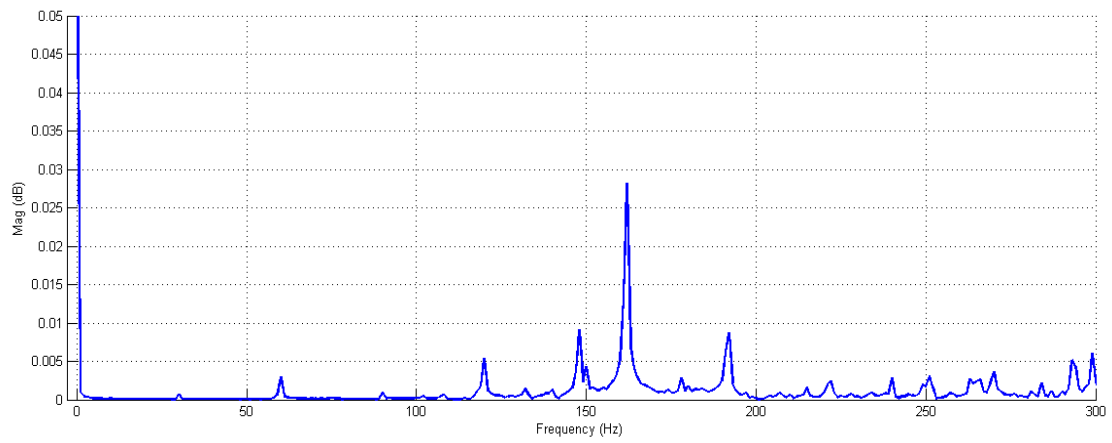


Figure 3-14 : Résultats de simulation de défaut de bague interne.

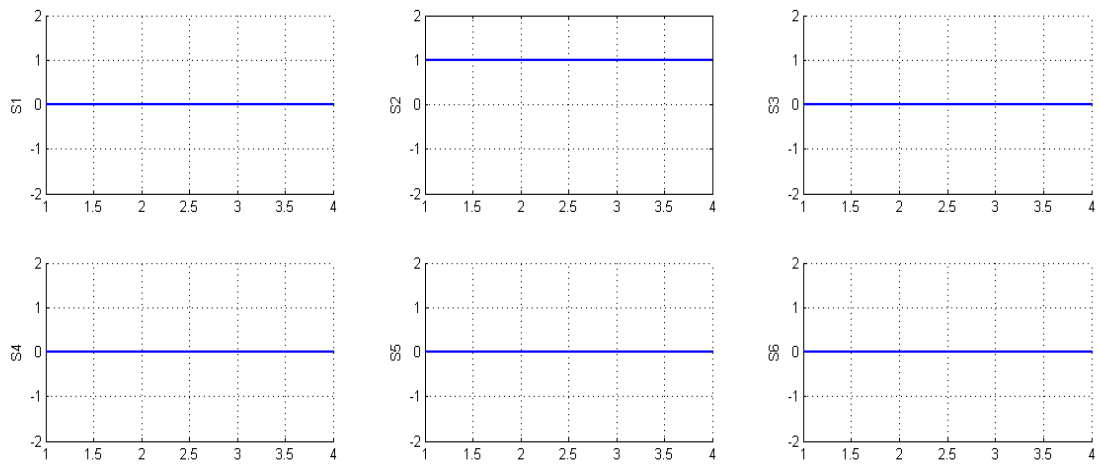
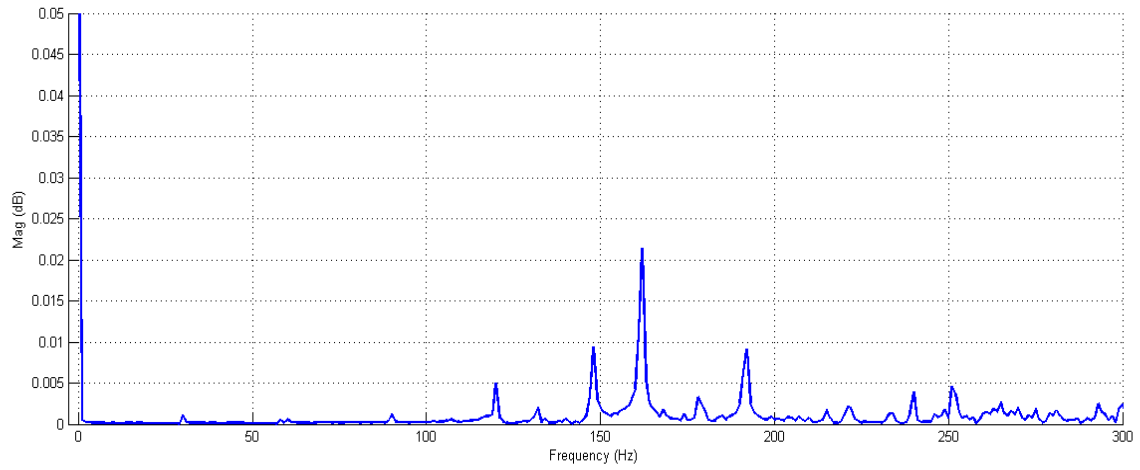
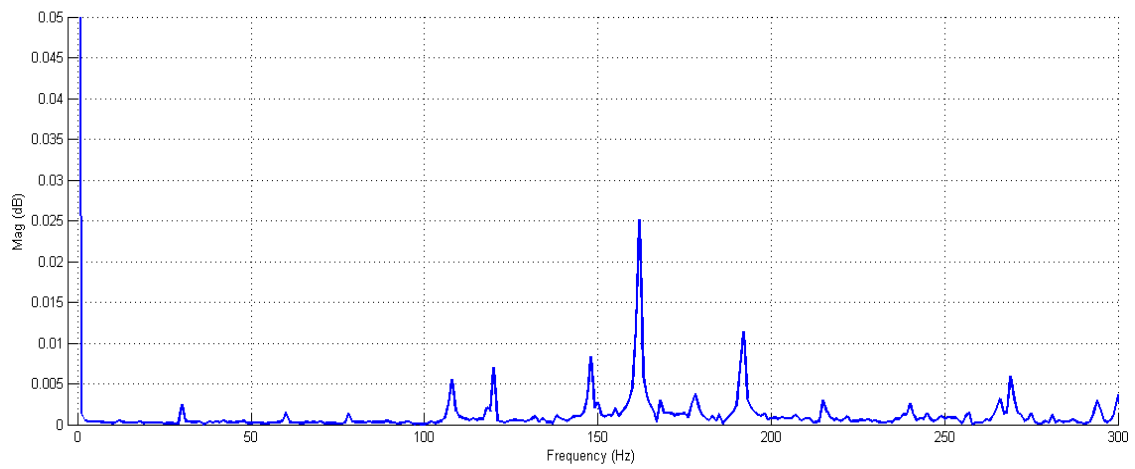


Figure 3-15 : Résultats de simulation de défaut de bille.



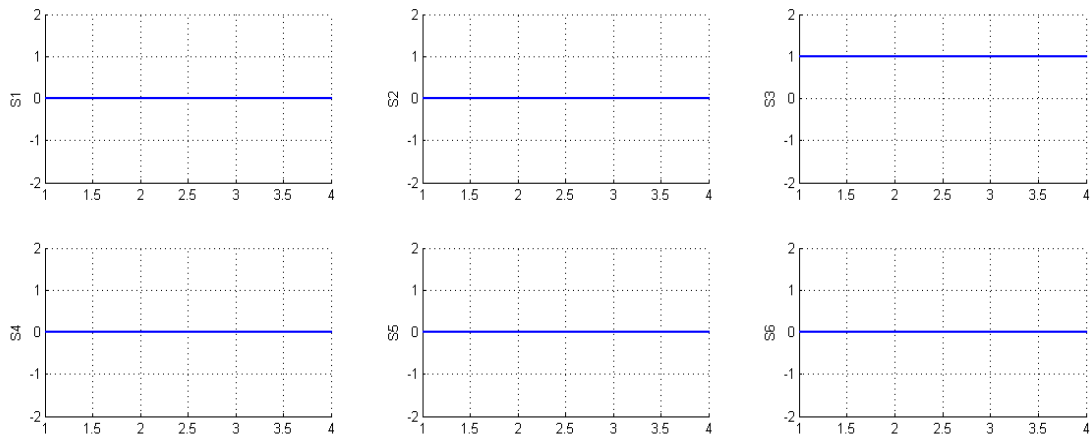


Figure 3-16 : Résultats de simulation de défaut de bague extérieure.

Interpretation des resultants

A partir de la présentation en ligne des sorties de RNA, on peut interpréter que les graphes changent leurs caractéristiques à l'instant de l'application du défaut. Dans notre cas le défaut est créé à l'instant $t=1s$.

A cet instant, par exemple, les sorties : $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ indiquent respectivement les valeurs: 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0 donc le défaut correspondant est: défaut de bille.

Les autres défauts appliqués, ont donnés les mêmes valeurs que les valeurs désirées (codes des défauts: état sain, défaut bague interne, défaut bague extérieure).

2.7.3 Défaut de cassure de barre

Le réseau de neurone utilisé dans ce cas est de la même que utilisé dans le cas de défaut de roulement qu'est composé de 03 couches, une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. Les caractéristiques représentatifs de l'état sain et **défectueux** utilisées pour l'apprentissage et les tests correspondent à :

- Valeur *RMS* de reconstruction de détail 01 ;
- Valeurs de *Kurtosis* de reconstruction de détail 01 ;
- Valeur *RMS* de reconstruction de détail 02 ;
- Valeurs de *Kurtosis* de reconstruction de détail 02.

La base d'apprentissage du RNA est mise sous forme de fichier ou de tableau (matrice). Ce dernier est représenté par des classes de vecteurs, ou chacune des classes représente un type de fonctionnement et chaque vecteur est représenté par les valeurs efficaces.

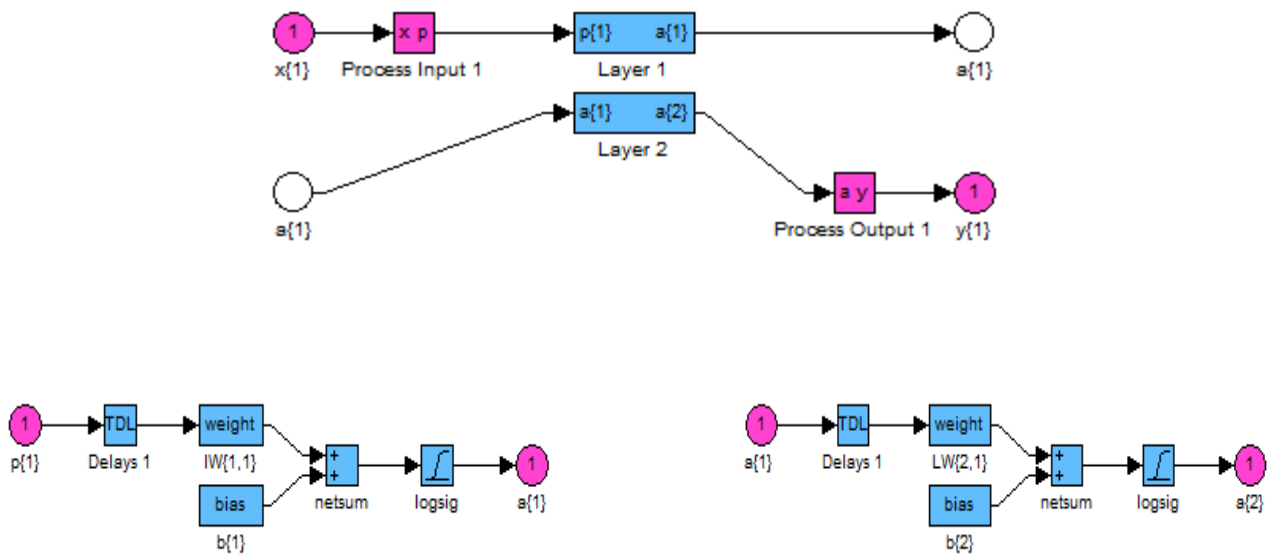
Chapitre 03 :

Pour passer à l'étape de classification nous disposons pour chacun des paramètres, 3 types de fonctionnement compris le fonctionnement normal (voir le tableau 3.4).

Catégorie	Type de défaut	Code					
		0	0	0	0	0	0
1	Etat sain	0	0	0	0	0	0
2	défaut cassure d'une seule barre	0	0	0	1	0	0
3	défauts cassures des quatre barres	0	0	0	0	1	0

Tableau 3.4: Classification des types des défauts de cassure de barre.

La structure finale doit être choisie selon la minimisation de l'erreur entre la valeur réelle et la valeur désirée. Le modèle de réseau neurone obtenu est composé du poids optimal et du vecteur de biais. La structure du réseau neurone retenus est présentée dans la (figure 3-17).



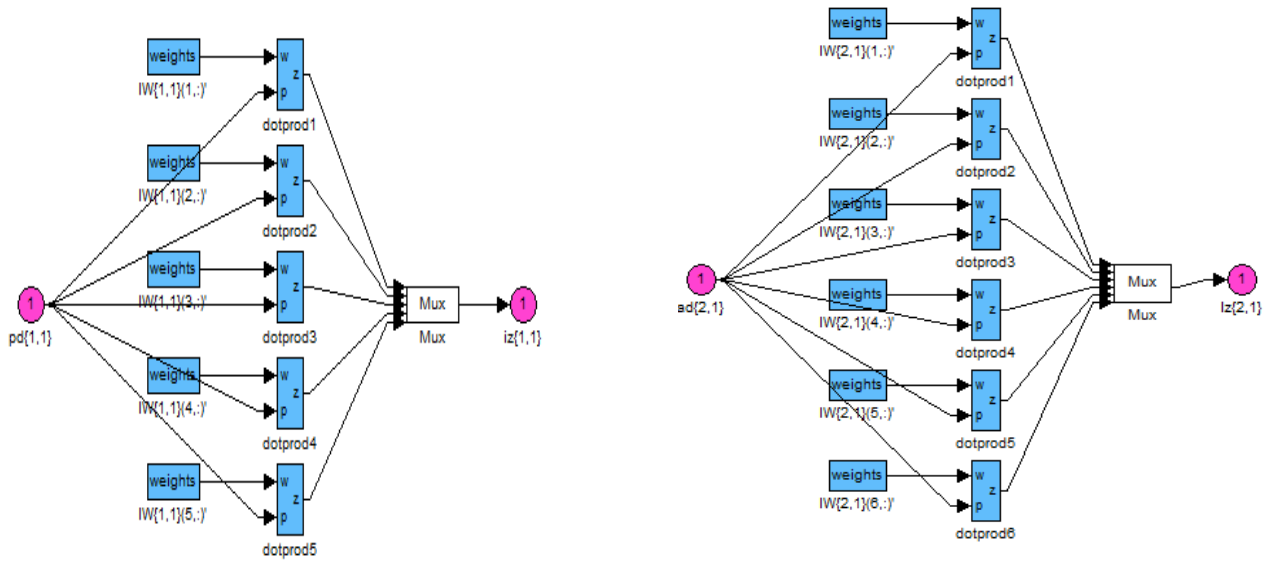
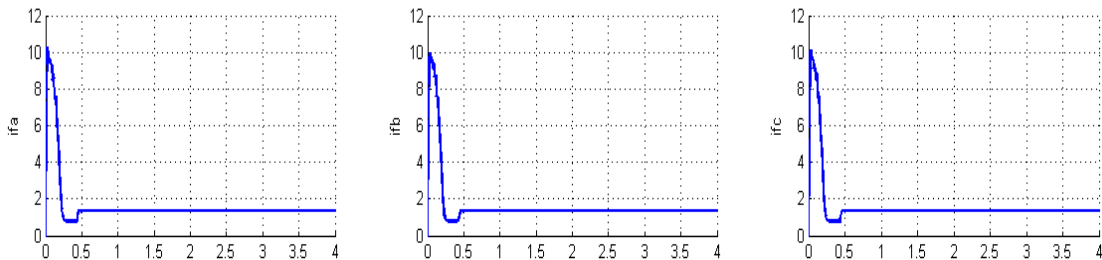


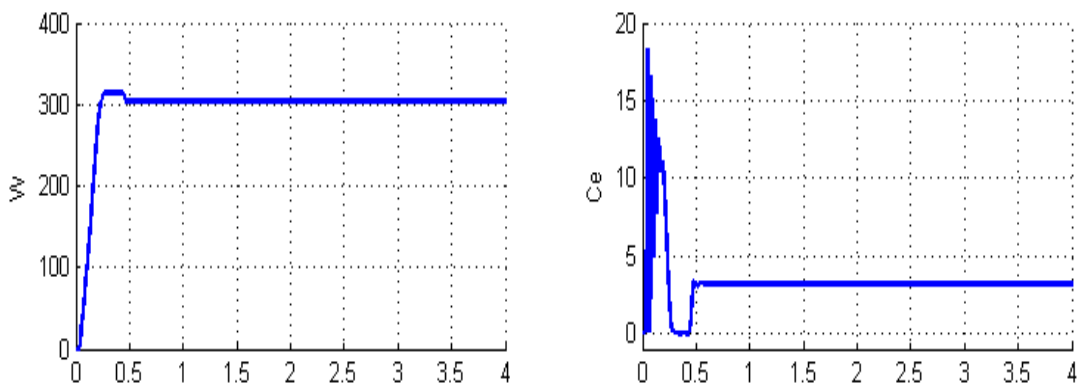
Figure 3-17 : Structure de réseau de neurone proposé dans ce cas.

2.7.4 Résultat de simulation

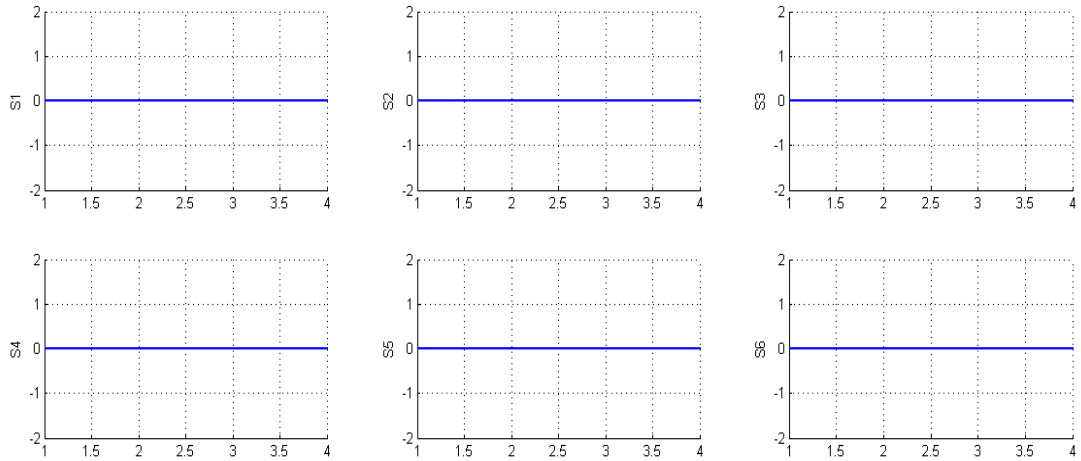
Les figures 3-18, 19, 20 et 21, montrent les résultats de simulation de réseau neurone proposé pour la détection des défauts de cassure de barre de la MAS dans le cas sain et avec défauts cassure d'une seule barre et quatre barres.



-a- les valeurs efficaces des trois courants statorique.

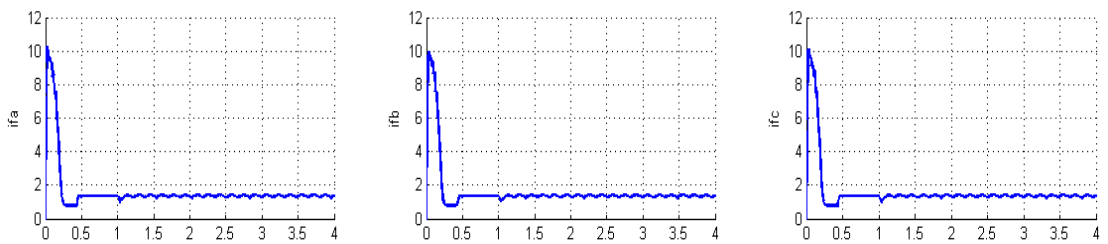


-b- la vitesse et le couple électromagnétique.

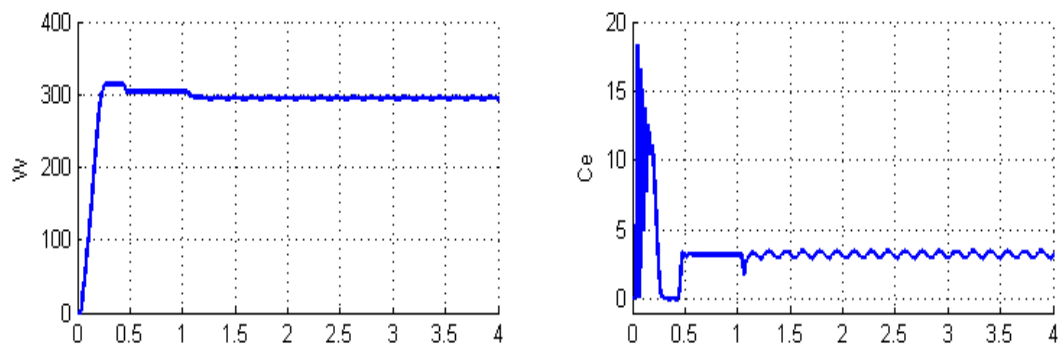


-b- la détection des défauts de cassures des barres.

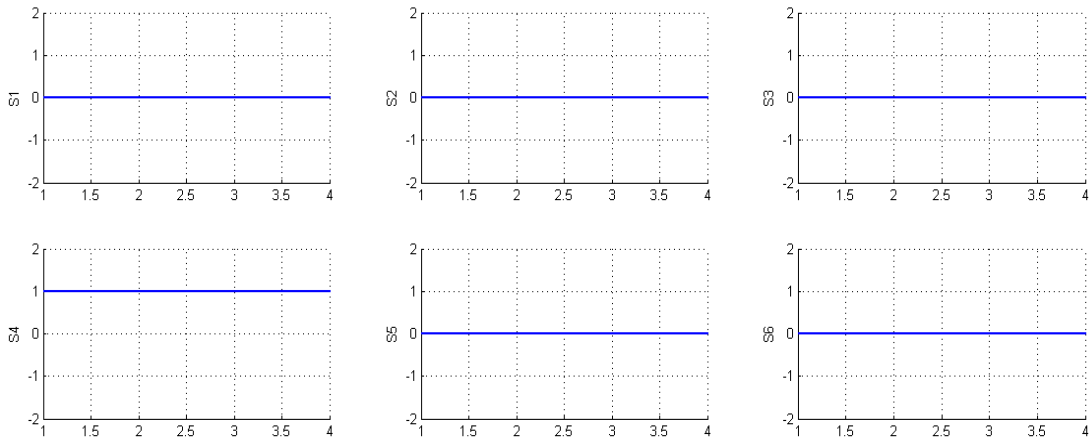
Figure 3-18 : Résultats de simulation de l'état sain.



-a- les valeurs efficaces des trois courants statorique

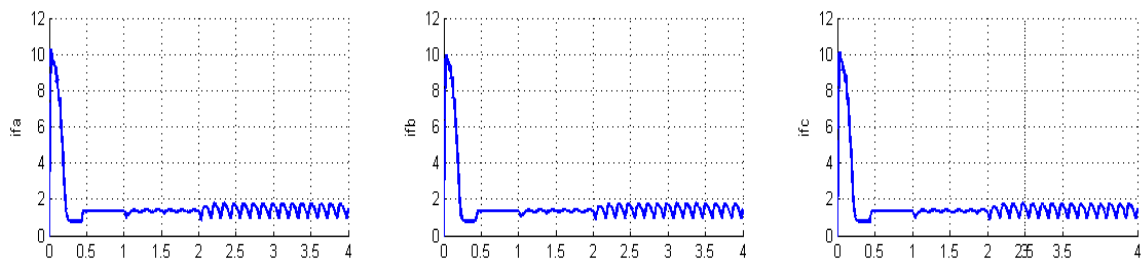


-b- la vitesse et le couple électromagnétique.

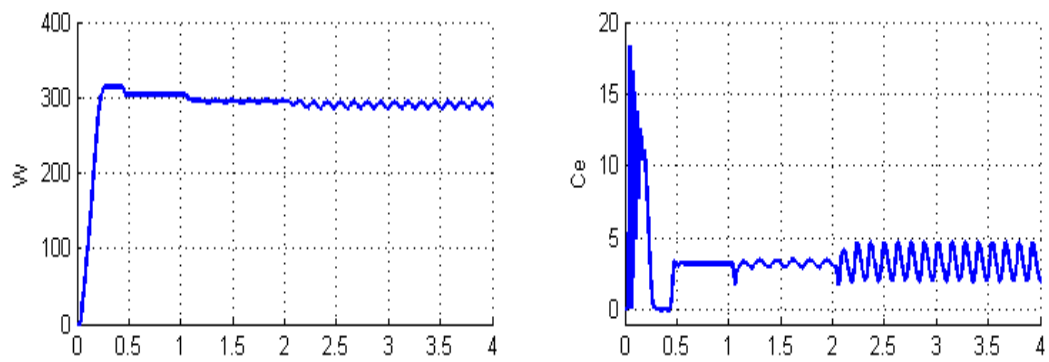


-b- la détection des défauts de cassures des barres.

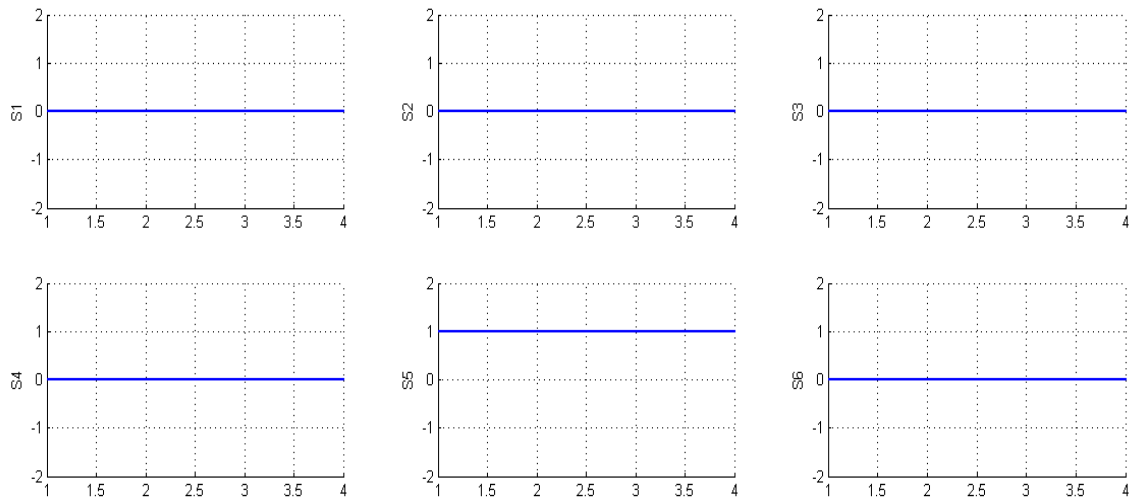
Figure 3-19 : Résultats de simulation de défaut cassure d'une seule barre.



-a- les valeurs efficaces des trois courants statorique



-b- la vitesse et le couple électromagnétique



-b- la détection des défauts de cassures des barres

Figure 3-20 : Résultats de simulation de défauts cassures des quatre barres

Interprétation des résultants

A partir de la présentation en ligne des sorties de RNA, on peut interpréter que les graphes changent leurs caractéristiques à l'instant de l'application du défaut. Dans notre cas le défaut est créé à l'instant $t=1s$.

A cet instant, par exemple, les sorties : $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ indiquent respectivement les valeurs: 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0 donc le défaut correspondant est: défaut cassure d'une seule barre.

Les autres défauts appliqués, ont donnés les mêmes valeurs que les valeurs désirées (codes des défauts: état sain, défauts cassures des quatre barres).

A partir de la présentation des graphes (les valeurs efficaces des trois courants statorique, la vitesse et le couple électromagnétique), nous remarquons l'apparition du défaut cassure d'une seule barre à l'instant $t=1s$ et l'apparition du défaut cassure des quatre barres à l'instant $t=2s$.

2.7.5 Défauts de roulements et de cassures de barres

Le réseau de neurone utilisé dans ce cas est composé de 03 couches, une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie.

La structure du réseau neurone retenus est présentée dans la (figure 3-21).

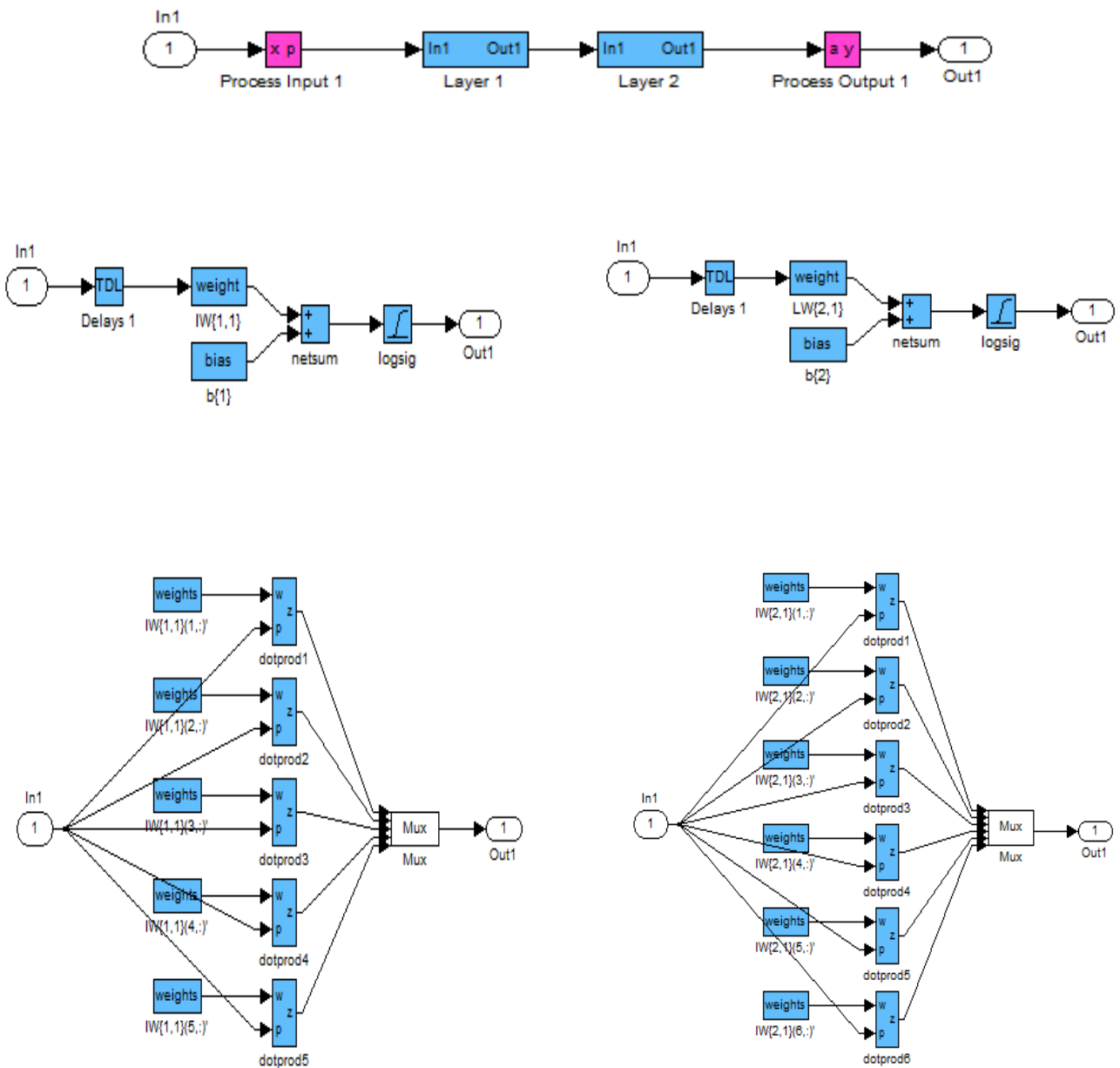


Figure 3-21 : Structure de réseau neurone proposé pour la détection des deux défauts dans le même temps

2.7.6 Résultat de simulation

Les figures 3-22 montrent les résultats de simulation de réseau neurone proposé pour la détection des deux défauts dans le même temps, défauts de cassure de barre et du roulement de la MAS dans le cas sain et avec défauts.

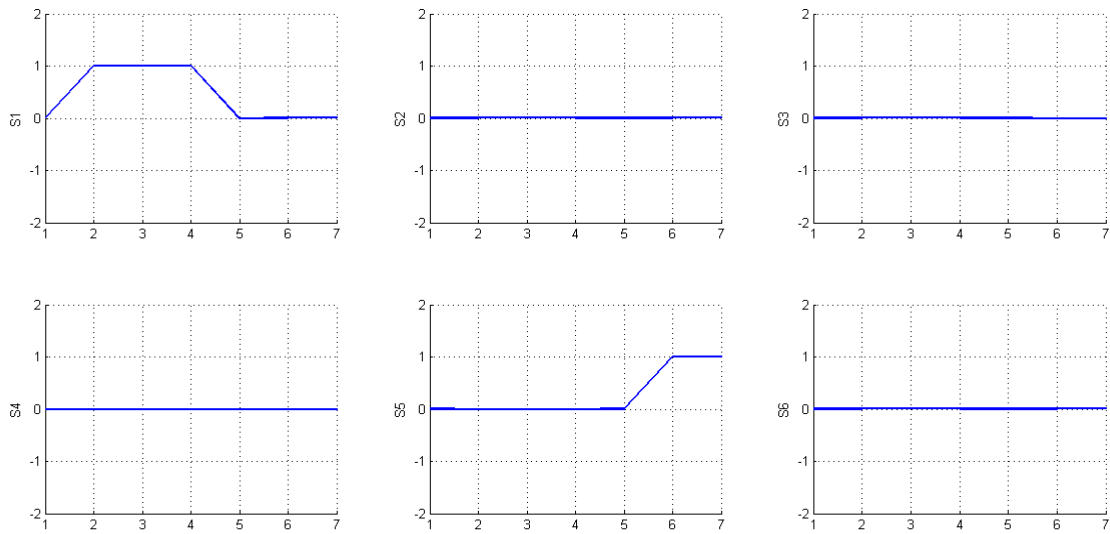


Figure 3-22 : Résultats de simulation des deux défauts cassures des barres et défauts du roulement.

Interprétation des résultants

A partir de la présentation en ligne des sorties de RNA, on peut interpréter que les graphes changent leurs caractéristiques à l'instant de l'application du défaut. Dans notre cas le défaut du roulement est créé à l'instant $t=1s$ et le défaut cassure de barre est créé à l'instant $t=5s$.

A ces instants, les sorties : $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$ indiquent respectivement les valeurs: 1, 0, 0, 0, 1, 0.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'un des moyens efficaces de diagnostiquer les échecs, à savoir la méthode du réseau neuronal.

Nous avons d'abord présenté certains des concepts et des étapes du processus de diagnostic, puis on a présente les éléments permettant de comprendre la théorie des réseaux neuronaux, en partant du neurone biologique, jusqu'à l'étude de mécanismes de classification.

Enfin, Nous avons extrait les résultats d'une application de réseaux de neurones pour le diagnostic des défauts des roulements et de cassure de barre et commentaires ces résultats. Les résultats obtenus dans la phase de test des Réseaux de Neurones nous ont permis d'observer la facilité et l'efficacité des RNA dans l'automatisation du diagnostic des défauts des roulements et de cassure de barre.

Conclusion générale

Ce travail a été consacré à l'élaboration de méthodes et de méthodes pour détecter et diagnostiquer les défauts en temps opportun, où nous avons d'abord identifié divers défauts visant à faire tourner les machines électromécaniques et abordé certaines des méthodes utilisées dans la surveillance et le diagnostic de ces yeux.

Nous avons étudié deux façons de détecter les défauts:

Le premier est l'analyse des vibreurs, qui fonctionne dans des conditions changeantes et qui est considérée comme la méthode la plus efficace par rapport aux autres méthodes. Ce travail préliminaire a mis l'approche d'analyse des signaux mesurés sur les bancs d'essais en cours de fonctionnement.

Les analyses sont réalisées, dans les domaines temporel et fréquentiel. Les informations issues de ces analyses permettent souvent une identification efficace des défaillances présentes sur les roulements et les cassures des barres.

Dans la deuxième partie, l'objectif de ce travail est d'appliquer les réseaux de neurones artificiels pour la détection des défauts des roulements et des cassures des barres, cela a été réalisé grâce à une implémentation logicielle utilisant MATLAB comme logiciel de simulation, et la règle de rétro propagation comme règle d'apprentissage des RNA. D'après l'étude effectuée, nous avons établi que l'augmentation de degré de confiance pour la prise de décision, est dépendante de l'utilisation des valeurs efficaces, les résultats obtenus dans la phase de test des Réseaux de Neurones nous ont permis d'observer la facilité et l'efficacité des RNA dans l'automatisation du diagnostic des défauts des défauts des roulements et des cassure des barres.

L'intérêt de ce travail, réside également dans le fait qu'il constitue une étape vers une application des réseaux de neurones pour la commande et la diagnostic des défauts des machines électromécaniques tournantes, une telle application permettra de profiter pleinement des avantages qu'offrent les réseaux de neurones en termes de vitesse, simplicité de calcul et de robustesse au perturbations.

Références bibliographiques

- [1] C. Capdessus, “Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal.” Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), 1992.
- [2] Y. LAAMARI, “Diagnostic des défaillances dans les systèmes électromécaniques.” Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2016.
- [3] taleb mounia, “Surveillance , détection et diagnostic des défaillances dans une cimenterie en utilisant L ’ analyse fonctionnelle.” Thèse de doctorat, Université du 20 Août 1955 Skikda, 2018.
- [4] B. Bouzouane, “Diagnostic des défauts de machines tournantes.” 2013.
- [5] C. RACHID, “Contribution a L Optimisation De La Maintenance Conditionnelle Par L Analyse Vibratoire,” 2006.
- [6] B. B. Ann, “Outils de conception,” 2019.
- [7] F. Audry, “La démarche d’analyse fonctionnelle,” *Management*, pp. 1–19, 2010.
- [8] M. T. Nabti, “Etude de l’évolution des indicateurs spectraux et cepstraux dans la détection des défauts mécaniques,” 2018.
- [9] K. Ibrahim and S. Youcef, “Détection des défauts d’une machine tournantes par l’analyse FFT.” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2019.
- [10] M. M. Ghozlane, “Techniques de Surveillance des machines tournantes,” 2015.
- [11] J. MOREL, *Surveillance vibratoire et maintenance prédictive*. Ed. Techniques Ingénieur, 1992.
- [12] R. Chevalier, “État de l’art de la surveillance et du diagnostic des machines tournantes à EDF,” *RFM Rev. française mécanique*, no. 1, pp. 5–11, 2001.
- [13] F. Bolaers, J. P. Dron, and L. Rasolofondraibe, “Prédiction et suivi de l ’évolution d ’un écaillage de fatigue de roulement par analyse vibratoire,” *XVIème Congrès Français de mécanique, Nice, référence*, vol. 649, 2003.
- [14] H. Benmohamed and Y. KHADRI, “Étude de l’usure des engrenages par analyse vibratoire,” 2010.

- [15] T. BENSANA, “Diagnostic des défaillances basé sur l’analyse vibratoire d’une turbine à vapeur.” Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2008.
- [16] D. Youcef, “Surveillance et diagnostic des défauts d’une machine électrique par l’analyse vibratoire.” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M’SILA, 2017.
- [17] S. Belhamdi, “Diagnostic Des Défauts De La Machine Asynchrone Controlée Par Différentes Techniques De Comande.” Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [18] R. Ziani, “Contribution à l’analyse et à la classification automatique des défauts mécaniques.” 2018.
- [19] Y. ELFAR, “DIAGNOSTIC DES DEFAUTS D’UNE MACHINE TOURNANTE PAR L’ANALYSE VIBRATOIRE.” Université Mohamed Boudiaf-M’Sila, 2012.
- [20] B. Ammar, “Détection des défauts par les réseaux de neurones Artificiels de la machine asynchrone contrôlée par la technique du flux oriente.” Université Mohamed Boudiaf-M’Sila, 2007.
- [21] M. Djouada, “Etude des performances de la classification par couplage réseaux de neurones artificiels (RNA)–algorithmes génétiques (AG): application au diagnostic vibratoire.” 2018.