

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de fin d'études
Présenté en vue de l'obtention
du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique

Option: Communication

Thème:

Traitement des signaux vibratoires :
Application au diagnostic des défaillances

Proposé et dirigé par :

M^r: S.HADDAB

Présenté par :

M^{elle}: BOUCHERK KAHINA

M^{elle}: HAMDIDI NAIMA

Année universitaire 2008/2009

Remerciements

A l'issue de ce travail nous tenons à exprimer toute notre gratitude et notre remerciement à notre promoteur M^r S.HADDAB pour nous avoir proposé ce sujet et nous avoir soutenu et dirigé tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier M^r Y. AIT BACHIR pour sa gentillesse et ses conseils judicieux.

Nos vifs remerciements aux membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

En terminant, nous assurons de notre plus profonde reconnaissance tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ Mes très chère parents qui mon soutenues pendant toute mon existence, qui sont ma fierté et mon exemple.
- ❖ Mes frères (HABIB, AZIZ, FOUAD).
- ❖ Mes sœurs (OUARDIA, OUIZA, NASSIMA, FADILA, OISSILA).
- ❖ Tous mes amis(es), particulièrement ZAHIA, SALIHA, MALIKA, SAMIRA, KAHINA et MOUNIA.
- ❖ Mon binôme KAHINA.
- ❖ A toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de prés pour la réalisation de ce travail.

NAIMA



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à:

- ❖ Mes très chers parents.
- ❖ Mes frères et leurs familles.
- ❖ Mes sœurs (Chabha, Razika, Nassima, Chafia, Aldjia et son mari Omar)
- ❖ Mes cousins et mes cousines ainsi que mes oncles et leurs familles.
- ❖ Mes neveux (Arezki et Amine) et mes nièces (Manel, Dyhia et Aya).
- ❖ Mon binôme NAIMA.
- ❖ Kahina, Mounia, Zahia, Tawous et tous mes amis(es).
- ❖ Toute la promotion 2009.

KAHINA

Actuellement, le monde de l'industrie dispose de machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes, dont le but est de produire en quantité et d'améliorer en qualité pour répondre à la demande dans un environnement très concurrentiel. Pour cela, il est nécessaire d'assurer le bon fonctionnement qui est un about majeur permettant d'atteindre une compétitivité optimale des outils de production.

La maintenance des outils de production est une préoccupation primordiale aussi bien pour les utilisateurs que pour les constructeurs. Son importance s'affirme de jour en jour, car elle reste un des rares moyens d'éviter les catastrophes et d'augmenter la disponibilité des machines.

Les méthodes de surveillances traditionnelles se contentent de laisser la machine jusqu'à sa défaillance totale pour enfin envisager la réparation, alors que l'approche moderne consiste à intervenir de façon permanente en fonction de l'état de certains paramètres caractéristiques de la machines: C'est ce qu'on appelle la maintenance conditionnelle. Elle comprend l'ensemble des activités exercées sur des matériels ou composants non défaillants pour éviter leurs défaillances en diagnostiquant de façon précoce les dégradations et en suivant leur évolution.

Un certain nombre de variables peuvent être utilisées comme étant des indicateurs de suivi d'évolution de l'état d'une machine: La température, la pression d'huile,...etc.

Dans le cas des machines tournantes, les expériences montrent que le paramètre le plus fiable qui donne le plus précocement et de la meilleure façon l'état de détérioration est la vibration.

L'analyse des signatures vibratoires et de leur évolution permet de dresser un diagnostic de l'état de fonctionnement de la machine et de déterminer la gravité et l'urgence du défaut détecté, et ce grâce à la richesse en informations que véhiculent les signaux vibratoires.

A la lumière de ce qui précède, l'objectif de notre travail est de pouvoir remonter aux défauts affectant une machine tournante en faisant un traitement des signaux vibratoires reçus lors de son fonctionnement.

Ce présent mémoire est structuré comme suit:

Une étude bibliographique effectuée sur le diagnostic et le contrôle des systèmes industriels est présentée dans le 1^{er} chapitre.

Le 2^{ème} chapitre est consacré aux techniques de l'analyse vibratoire et aux défauts les plus fréquents dans les machines tournantes.

Dans le dernier chapitre, nous présentons les méthodes d'analyse vibratoire basées sur les techniques de traitement du signal qui sont utilisées pour la détection et la localisation de défauts dans les signaux vibratoires.

Une conclusion générale clôture notre étude en mettant en valeur les résultats trouvés ainsi que des perspectives et des recommandations relatives au développement futur du travail effectué.

I.1. Introduction :

Dans différents domaines, notamment dans le milieu industriel, il est nécessaire d'assurer un fonctionnement continu et correct des machines, ce qui exige des opérations de maintenance qui permettent d'augmenter leur disponibilité et leur durée d'utilisation et d'éviter, parfois, d'éventuelles catastrophes dues à certaines défaillances.

Notre objectif est de contrôler le fonctionnement des machines pour détecter et identifier un éventuel défaut, puis agir en conséquence pour remédier à ce dernier.

Le diagnostic basé sur le comportement vibratoire fait partie des programmes de maintenance et caractérise les états normaux et anormaux des machines.

Avant de nous intéresser au cas des vibrations mécaniques, objet du chapitre suivant, nous allons définir les bases de la maintenance et du contrôle industriel.

I. 2. Les différents états d'une machine industrielle :

Lorsqu'on effectue le contrôle d'une machine, nous pouvons aboutir à quatre résultats différents traduisant l'état de fonctionnement de cette dernière.

Ainsi, la machine peut :

- Etre en état de bon fonctionnement.
- Présenter des défauts de fonctionnement.
- Présenter des défaillances de fonctionnement.
- Etre en panne.

I.2.1. Notion de défaut :

La notion du défaut intervient souvent dans les techniques de surveillance des processus industriels. C'est un écart entre les caractéristiques observées sur le dispositif et sa caractéristique de référence, cet écart étant idéalement nul en absence de défaut.

Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du processus lui-même.

Il arrive souvent que le dispositif puisse très bien conserver son aptitude à assurer sa mission principale si les défauts affectant ses composants n'ont pas d'impacts significatifs sur la fonction qu'il est appelé à assurer.

Dans ce cas là, aucune intervention de l'opérateur de contrôle n'est effectuée, mais un suivi accru et régulier est nécessaire pour éviter une aggravation de l'état de la machine, et notamment l'apparition d'une défaillance, voire même d'une panne.

I.2.2. Notion de Défaillance :

Une défaillance est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques.

On peut rencontrer des défaillances matérielles (fuites), et des défaillances fonctionnelles (ne démarre pas), et de plus en plus, la maintenance basée sur la fiabilité des AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité) fonctionnelles ne fait appel qu'aux défaillances fonctionnelles.

I. 2.2.1. Classification des défaillances :

Les défaillances peuvent se classer selon plusieurs critères :

I. 2.2.1.1. En fonction des causes :

Selon ce critère, on distingue quatre types de défaillances:

- *Défaillance due à un mauvais emploi :*

C'est une défaillance attribuable à l'application de contraintes au-delà des possibilités données du dispositif.

- *Défaillance due à une faiblesse inhérente :*

Elle est attribuable à une faiblesse inhérente au dispositif lui-même lorsque les contraintes ne sont pas au-delà des possibilités données du dispositif.

- *Défaillance première :*

C'est la défaillance d'un dispositif dont la cause directe ou indirecte n'est pas la défaillance d'un autre dispositif.

- *Défaillance seconde :*

C'est la défaillance d'un dispositif due à la défaillance d'un autre dispositif.

I. 2.2.1.2. En fonction du degré :

Le niveau de dégradation peut faire l'objet d'une classification des défaillances de la manière suivante :

- *Défaillance partielle :*

Défaillance résultant de la déviation d'une ou de plusieurs caractéristiques au-delà des limites spécifiées, mais telle qu'elle n'entraîne pas une disparition complète de la fonction requise.

- *Défaillance complète :*

Défaillance résultant de la déviation d'une ou des caractéristiques au-delà des limites spécifiées, telle qu'elle entraîne une disparition complète de la fonction requise.

- *Défaillance intermittente :*

Défaillance d'un dispositif subsistant pendant une durée limitée, à la fin de laquelle le dispositif retrouve son aptitude à accomplir sa fonction requise, sans avoir été soumis à une action corrective externe quelconque.

I.2.2.1.3. Selon la vitesse d'apparition :

L'apparition d'une défaillance peut être observée à des vitesses différentes d'où la classification suivante :

- *Défaillance soudaine :*

Défaillance qui n'aurait pas pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.

- *Défaillance progressive :*

Défaillance qui aurait pu être prévue par un examen ou une surveillance antérieure.

I.2.2.1.4. En fonction de la vitesse d'apparition et du degré:

La combinaison du niveau de dégradation et de la vitesse d'apparition d'une défaillance donne lieu à une nouvelle classification:

- *Défaillance catalectique :*

Défaillance qui est à la fois soudaine et complète. En pratique le diagnostic d'une telle défaillance est souvent impossible.

- *Défaillance par dégradation :*

Défaillance qui est à la fois progressive et partielle.

I.2.2.1.5. En fonction des conséquences :

Plusieurs conséquences peuvent être entraînées par la défaillance d'un dispositif, ce qui permet de déduire la classification suivante :

- *Défaillance mineure:*

Défaillance qui ne réduit pas l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir sa fonction requise.

- *Défaillance majeure:*

Défaillance qui risque de réduire l'aptitude d'un dispositif plus complexe à accomplir sa fonction requise.

- *Défaillance critique :*

Défaillance qui risque de causer des blessures à des personnes ou des dégâts importants aux matériels.

- *Défaillance catastrophique :*

Défaillance qui entraîne la perte d'une ou de plusieurs fonctions essentielles d'un dispositif en causant des dommages importants au système, ou à l'environnement et peut entraîner la mort d'homme.

I.2.3. Notion de panne :

La panne est une inaptitude d'un dispositif à accomplir sa fonction vitale ; dès l'apparition d'une défaillance, on déclarera le dispositif en panne. Donc, une panne résulte toujours d'une défaillance.

I.2.3.1. Classification des pannes :

Elle est similaire à celle définie pour les défaillances (mineures, majeures, critiques, catastrophiques, partielles, totales...).

Cependant, il existe une classification particulière qui est fonction de l'aptitude aux pannes à être constatées.

- *Pannes intermittentes :*

Pannes d'un dispositif subsistant sur une durée déterminée et limitée. Après cette durée, le dispositif assure sa fonction sans avoir fait l'objet d'une action corrective. Elles sont les plus faibles à diagnostiquer.

- *Pannes fugitives :*

Difficilement observables et intermittentes, elles sont difficiles à diagnostiquer, car leur apparition est aléatoire.

- *Pannes permanentes :*

Subsistent tant qu'une maintenance corrective n'est pas effectuée.

- *Pannes latentes ou cachées :*

Pannes existantes mais non détectées.

I.2.4. Classification des anomalies suivant leur criticité:

La figure suivante représente les différents états possibles d'une machine, donc anomalies classées suivant leur criticité.

Lors du bon fonctionnement de la machine, aucune anomalie n'est observée, cela est bien représenté par la zone "normal". Après une limite dite « limite de comportement normal », on observe des symptômes qui démontrent l'apparition d'un défaut qui n'influe pas sur le fonctionnement de la machine, mais lorsqu'on arrive à un point dit « limite du fonctionnement normal », il y a aggravation du défaut, et la machine se retrouve dans un état de défaillance qui sera observé par des signes spécifiques. Si la défaillance n'a pas été réparée, elle peut être cause d'un état de panne, et dans ce cas, on n'a plus aucune fonction assurée de la machine.

Donc une grande criticité existe entre défaillance et panne.

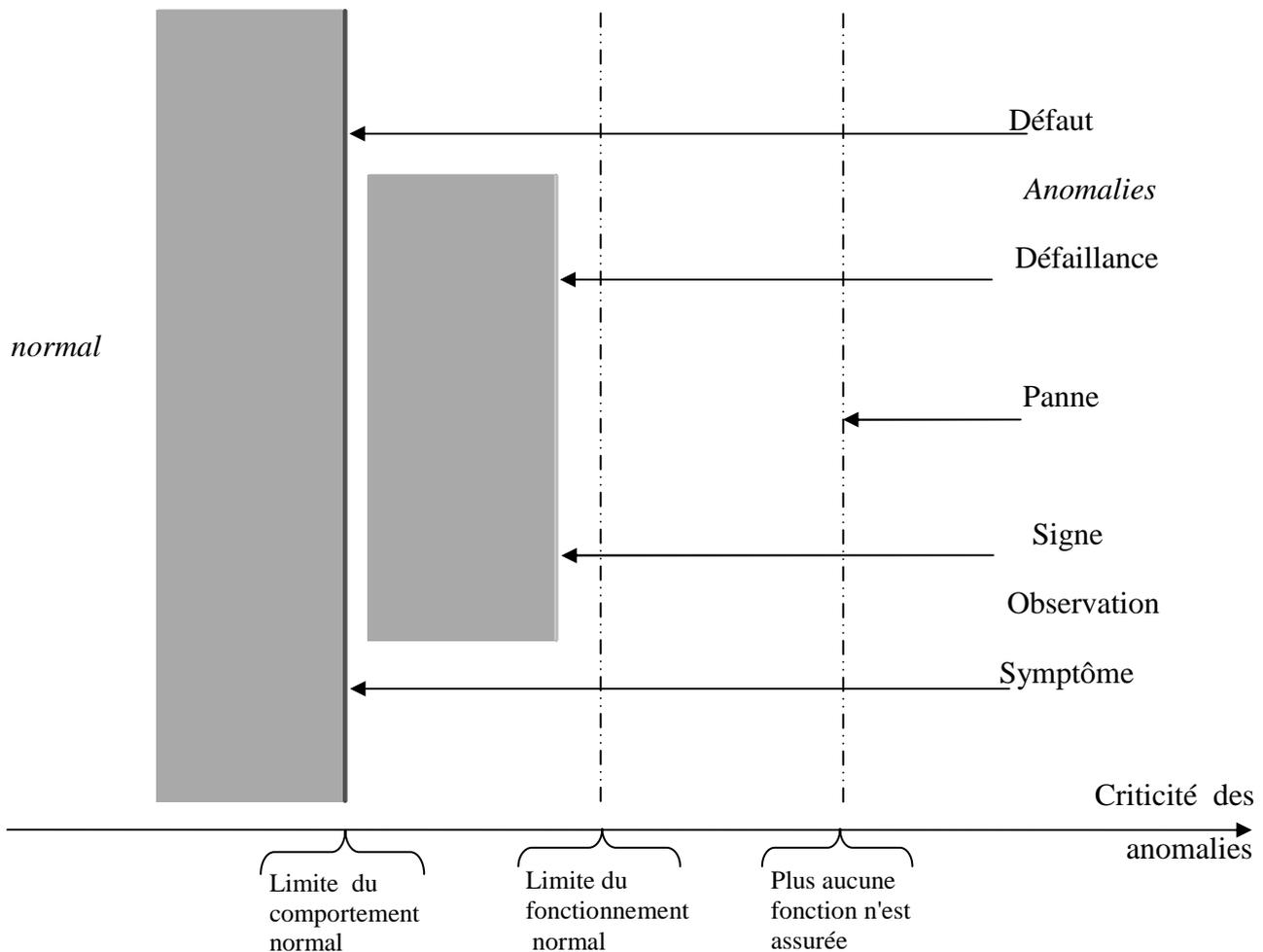


Figure I.1: Les états possibles d'une machine.

I.3. Les étapes de la maintenance conditionnelle :

Dans la maintenance, on a deux étapes d'intervention :

- 1ère étape : **la surveillance**, qui utilise des indicateurs pour mettre en évidence l'apparition d'un ou de plusieurs défauts, ou défaillances.
- 2^{ème} étape : **le diagnostic**, qui sert à localiser plus précisément la nature et le lieu de ces défauts ou défaillances.

I.3.1. La surveillance :

La surveillance est une tâche continue, en temps réel, dont le but est de caractériser le mode de fonctionnement du système physique.

L'objectif consiste à détecter et classer d'éventuelles défaillances en observant l'évolution du système, à localiser les éléments défaillants et à identifier les causes.

Le principe général de la surveillance est basé sur la comparaison de certains indicateurs avec des niveaux de seuils qui représentent les limites entre les différents états possibles de la machine.

I.3.1.1. Les indicateurs d'une surveillance :

Un indicateur est un quantificateur issu d'une grandeur dont l'acquisition est le plus souvent possible en fonctionnement. Il caractérise un ou plusieurs aspects de l'état ou de la performance de l'équipement surveillé.

Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'une dégradation ou d'un dysfonctionnement.

La surveillance d'une installation doit reposer sur le suivi d'évolution d'un grand nombre d'indicateurs de sensibilité adaptée à la nature physique des phénomènes dynamiques induits par les défauts dont on veut détecter l'apparition.

Le choix d'un indicateur doit être guidé par une analyse approfondie de l'ensemble des modes de défaillance de l'installation, de leur probabilité d'apparition, de leur rapidité d'évolution et nécessite la connaissance des symptômes ou images vibratoires associées à chaque mode de défaillance.

I.3.1.2. Les types d'indicateurs :

On peut distinguer quatre types d'indicateurs:

- **Les indicateurs scalaires :**

Ils associent à un signal brut ou traité, une grandeur caractéristique de son amplitude (valeur efficace, amplitude crête...), de sa distribution d'amplitude (facteur de crête, kurtosis)

ou de sa composition spectrale (amplitude d'une composante spectrale, valeur efficace d'une famille de composantes ...). Ils sont très utilisés pour leur facilité de mise en œuvre.

- **Les indicateurs spectraux :**

Ils associent à un signal une représentation spectrale (spectre, fonction de transfert, ...).

La facilité de leur comparaison graphique avec un état de référence favorise l'interprétation visuelle et la détection automatique des évolutions.

- **Les indicateurs vectoriels :**

Ils assoient à des signaux captés ou issus des capteurs (de vibrations, dans notre cas) une représentation dans l'espace du mouvement vibratoire.

- **Les indicateurs temporels :**

Ils associent une forme particulière du signal temporel obtenu après le traitement. La facilité de comparaison graphique par rapport à un état de référence favorise l'interprétation visuelle.

I.3.1.3. Classification des indicateurs :

Ces indicateurs peuvent se classer de deux manières différentes :

- **En matière de surveillance :**

Il y a lieu de distinguer deux classes d'indicateurs :

- *Les indicateurs principaux ou précoces :*

Ils permettent d'identifier de manière précoce l'apparition d'anomalies, sources potentielles de pannes et d'en suivre l'évolution.

- *Les indicateurs secondaires ou tardifs :*

Une évolution significative traduit déjà des dégradations conséquentes et nécessite un arrêt à brève échéance, parfois même immédiat de l'installation.

La 1^{ère} classe est mieux adaptée à la maintenance préventive conditionnelle ou prévisionnelle. Les informations données par ces indicateurs permettent la détection d'un défaut à un stade précoce, et les informations déduites par leur association avec les indicateurs

tardifs constituent des éléments clés dans la prise de décision d'un arrêt pour inspection ou pour engager une intervention corrective.

➤ **Selon leur réalité physique:**

Ces indicateurs peuvent être regroupés en deux familles:

- *Les indicateurs énergétiques :*

Ils représentent l'énergie du signal de la grandeur physique considérée, mesurée dans une bande de fréquences.

Selon l'étendue de cette bande, on parle d'indicateurs scalaires « large bande » ou d'indicateurs scalaires « bande étroite ».

- *Les indicateurs typologiques :*

Ils sont en relation directe avec les forces dynamiques, donc avec les défauts qui les induisent ou les modifient.

C'est l'ensemble d'indicateurs différents des indicateurs scalaires « large bande ». Ils font appel à des techniques du traitement du signal plus complexes que celles utilisées pour l'élaboration des indicateurs énergétiques.

I.3.1.4. Notion de seuils :

Le concept de seuil associé à un indicateur est un des points clés de la surveillance et de la maintenance conditionnelle ou prévisionnelle.

Tant que la valeur d'un indicateur n'excède pas une valeur prédéfinie, ou seuil, l'installation est considérée en bon état :

- Une valeur trop basse, entraîne des alarmes non justifiées.

- Une valeur trop élevée rend la détection d'un défaut impossible et une panne peut se produire sans alarme préalable.

Les systèmes de surveillance offrent la possibilité de définir au moins deux seuils hiérarchisés :

- Le 1^{er} est dit : *seuil d'alarme*, son dépassement déclenche une procédure de diagnostic afin de localiser et déterminer l'origine exacte de l'anomalie. Et selon la nature et la gravité du défaut identifié, les modalités de surveillance seront modifiées pour mieux suivre son évolution ou un arrêt pour remise en état sera programmé.
- Le 2^{ème} est dit : *seuil de danger*, son dépassement nécessite de procéder à un diagnostic immédiat de l'état de l'installation pour une urgence d'arrêt et une action corrective.

Remarque :

L'apparition d'un défaut préalablement non envisagé et qui n'influe sur aucun des indicateurs de surveillance retenus, ne pourra pas être détectée.

I.5. Les différents modes de surveillance :

A partir de la nature des indicateurs et des familles dans les quelles on les regroupe, on peut définir trois modes de surveillance :

➤ ***Surveillance par indicateurs scalaires énergétiques globaux ou large bande :***

Il s'agit d'une comparaison à un seuil d'une valeur caractéristique de l'amplitude et de l'énergie du signal, mesurée dans le domaine temporel dans une bande de fréquence plus au moins étendue.

➤ ***Surveillance par indicateurs spectraux :***

Il s'agit d'une comparaison d'une image spectrale du signal à un gabarit défini à partir de la même image spectrale obtenue lors de la mise en service de l'installation ou après remise en état.

➤ ***Surveillance par indicateurs typologiques ou comportementaux :***

Ce mode s'attache à la détection de défauts particuliers à partir de leur manifestation vibratoire ou de leurs interactions avec d'autres grandeurs dynamiques.

I.6. Le diagnostic

Si un défaut est détecté lors de la surveillance, on fait appel à un programme de diagnostic pour pouvoir l'identifier et le localiser.

Un diagnostic est une identification de la cause probable des défaillances à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test.

C'est un état expliqué d'un système physique compatible avec les informations disponibles sur le comportement réel du système et avec le modèle de comportement de référence.

La fonction de diagnostic est de déterminer les composants ou organes défaillants d'un système physique.

I.6.1. Domaines d'intervention d'une procédure de diagnostic :

Il peut intervenir à plusieurs stades :

- Les contrôles « qualité ».
- La supervision : il s'agit de doter les systèmes de l'intelligence en les équipant de dispositifs étudiant en temps réel leur comportement pour produire automatiquement un diagnostic qui sera fournie et exploité par l'opérateur.
- La maintenance prédictive : il s'agit de déceler des dérives de comportement d'un système physique avant qu'une fonction ne soit altérée afin de remplacer les organes dégradés avant qu'ils se tombent en panne.

I.6.2. Les taches du traitement de diagnostic :

Un traitement diagnostique peut se résumer par les deux taches suivantes :

- Observer les symptômes de la défaillance :

Il s'agit d'extraire des symptômes (caractères distinctifs d'un état fonctionnel anormal) du système physique et de vérifier grâce à des tests, la consistance entre des informations sur le comportement réel d'un système tel qu'il peut être observé par l'intermédiaire des capteurs et son comportement attendu.

- Identification de la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique.

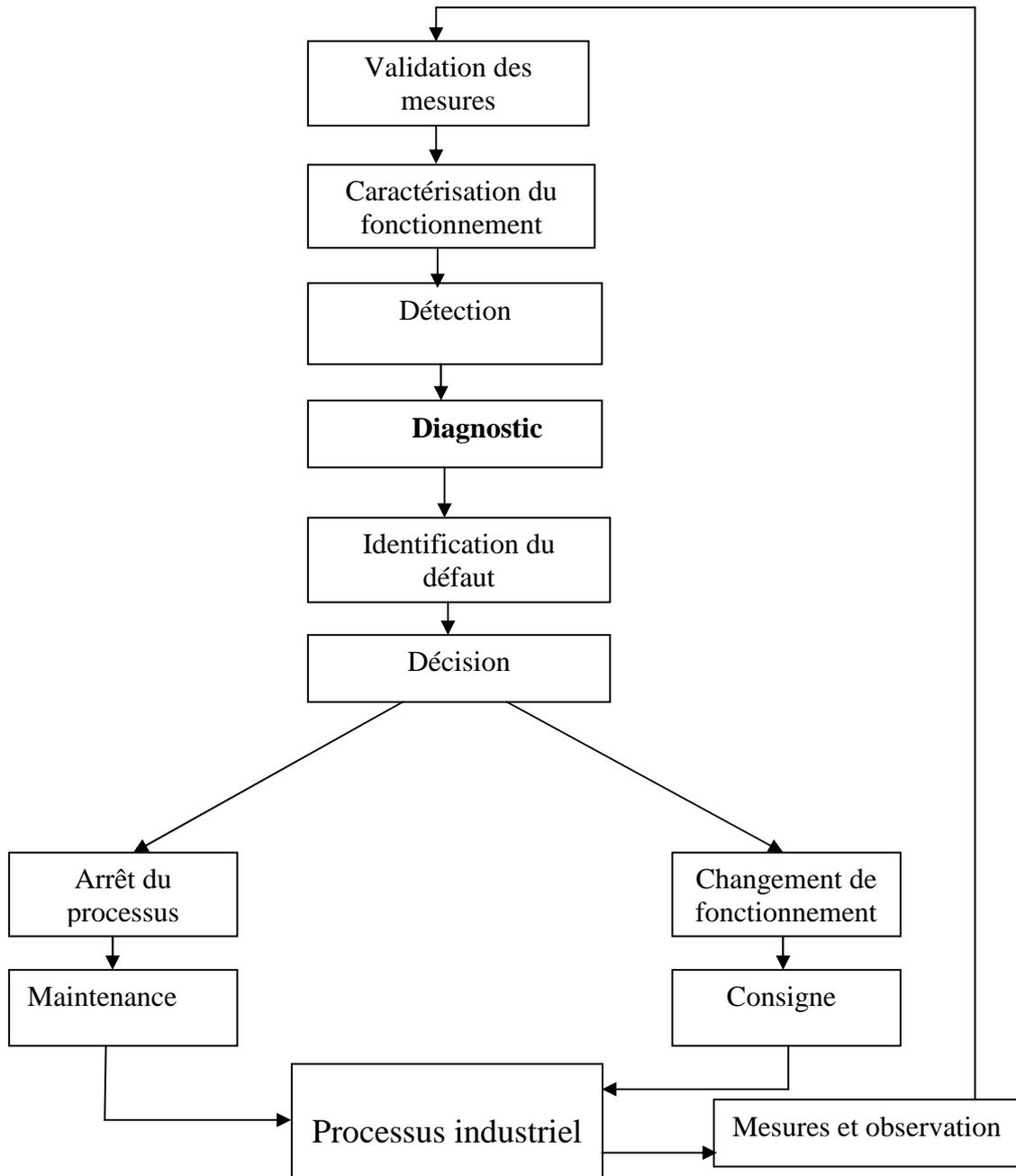
I.6.3. Organisation générale de la procédure de diagnostic :

Figure .I.2. Les différentes étapes du diagnostic industriel.

Cette figure représente l'ensemble des tâches à réaliser pour assurer un fonctionnement satisfaisant d'un processus industriel.

I.6.4. Classification des méthodes du diagnostic :

La déclaration d'un processus défaillant, oblige la sélection d'une méthode de diagnostic qui peut être choisie dans les deux classes suivantes:

I.6.4.1. Selon le mode du raisonnement:

Elle est basée sur le mode de raisonnement utilisé pour remonter à la cause de défaillance, on distingue les méthodes inductives et déductives.

- *Les méthodes inductives* de diagnostic correspondant à une approche montante ou l'on identifie toutes les combinaisons d'événement élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un événement unique indésirable.

Exemple :

La méthode de l'arbre de défaillance est une excellente représentation d'une démarche inductive.

- *Les méthodes déductives* de diagnostic, présentent une démarche inversée, on part de l'événement indésirable, et l'on recherche ensuite par une approche descendante toutes les causes possibles.

Exemple :

Analyse AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et leurs Effets).

Analyse AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et leur Criticité)

I.6.4.2. Selon l'existence d'un modèle de référence:

Cette classification se fait selon l'existence d'un modèle de référence, et on distingue les méthodes internes et les méthodes externes.

I.6.4.2.1. Méthodes internes :

Elles impliquent une reconnaissance approfondie du fonctionnement sous la forme de modèles mathématiques qui devront être obligatoirement validés expérimentalement avant toute utilisation industrielle. Elles se regroupent en trois familles :

➤ *La méthode du modèle:*

Elle consiste à comparer les grandeurs déduites d'un modèle représentatif du fonctionnement de différentes entités du processus avec les mesures directement observées sur le processus industriel.

➤ *La méthode par identification de paramètres:*

Elle s'applique au cas particulier où l'on veut suivre l'évolution de certains paramètres physiques pour le fonctionnement d'un processus et qui ne sont pas mesurables directement.

➤ *Méthode par modélisation des signatures:*

A partir de modèle physique élaboré, on détermine l'élément caractéristique des signatures qui permettent de réaliser directement le diagnostic de défaillance.

1.6.4.2.2.Méthodes externes :

Elles supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet, elles sont basées sur l'intelligence artificielle, elles incluent trois méthodes :

➤ *Reconnaissance de forme :*

Les performances des algorithmes de reconnaissance des formes dépendent fortement de la connaissance à priori des modes de fonctionnement (retour d'expérience).

➤ *Réseaux de neurone :*

Les réseaux de neurone artificiels et leur caractère associatif, leur confère la possibilité de reconnaître des données incomplètes et bruitées.

➤ *Systèmes experts :*

Un système expert est un système informatique destiné à résoudre un problème précis à partir d'une analyse et d'une représentation des connaissances et de raisonnement d'un spécialiste de ce processus.

A partir de l'ensemble de symptômes, sa disposition, il déduit toutes les conclusions possibles, élabore de nouvelles hypothèses et approfondit son diagnostic en exploitant des informations supplémentaires sur le système à diagnostiquer.

Le schéma de la figure suivante résume toutes les classifications citées précédemment.

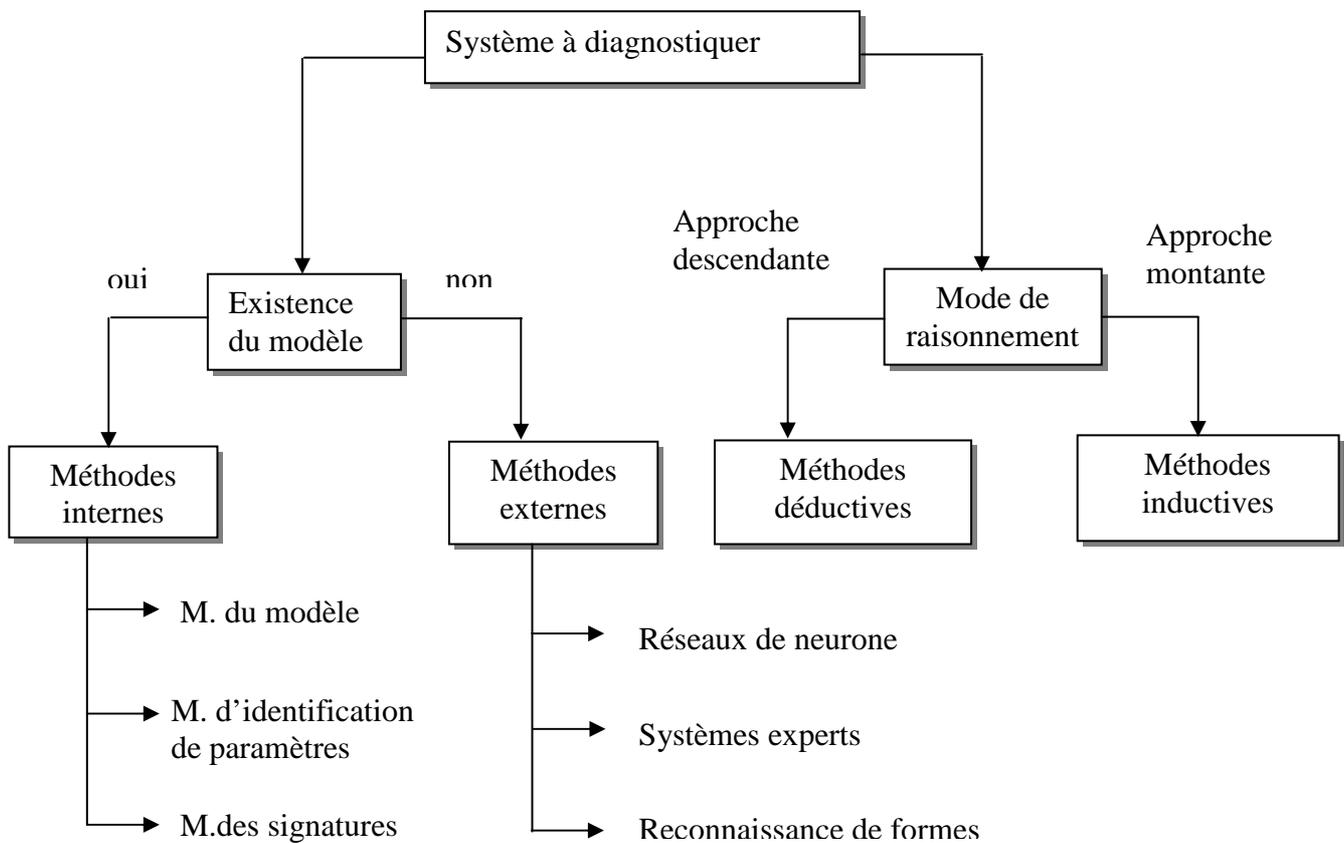


Figure I.3 : Classification des méthodes de diagnostic.

I.7.Conclusion :

Nous venons de voir dans ce chapitre quelques notions de base de la maintenance conditionnelle préventive, en s'appuyant sur la surveillance et le diagnostic des systèmes industriels, en général, pour détecter les défauts qui apparaissent au niveau de ces derniers, et d'éviter d'éventuelles défaillances, voir même des pannes.

Pour pouvoir atteindre cet objectif, on fait appel à l'analyse vibratoire, ce qui fait l'objet du 2^{ème} chapitre.

II.1. Introduction :

Pour une efficacité de la maintenance conditionnelle, il faut effectuer des mesures précises et fiables permettant de caractériser l'état de la machine.

Différentes variables peuvent être utilisées (la température, la pression d'huile...), mais la vibration est le paramètre le plus fiable qui donne, de façon significative, l'état de détérioration éventuel d'une machine, en particulier dans le cas des machines tournantes.

Un suivi est d'autant plus justifié que la modification de la signature vibratoire d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, pouvant se traduire ensuite par des dégradations importantes, des réparations conséquentes, donc plus coûteuses qu'une intervention planifiée.

Nous allons définir la notion de vibration et les informations que cette grandeur nous permet de déterminer.

II.2. Les vibrations :

Une vibration est le mouvement oscillatoire d'une particule ou d'un corps autour d'une position d'équilibre. En industrie, la vibration consiste en un mouvement de va et vient d'une machine ou de l'un de ses éléments depuis sa position d'équilibre.

II.2.1. Les type de vibrations :

Il existe plusieurs types dont les principaux sont les suivants :

II.2.1.1. Vibration périodique simple :

C'est un mouvement oscillatoire qui se répète identiquement à lui-même à un intervalle régulier et qui peut être décrit par trois paramètres : sa fréquence, son amplitude et sa phase.

$$X(t) = A_0 \cos (W t + \beta) \dots\dots\dots (II.1)$$

W: pulsation de mouvement.

β : Phase de la vibration.

A_0 : Amplitude maximale de vibration.

II.2.1.2. Vibration périodique complexe :

Deux ou plusieurs vibrations périodiques peuvent se superposer et donner comme résultante un mouvement qui est la composition de tous les mouvements élémentaires (voir la figure II.1).

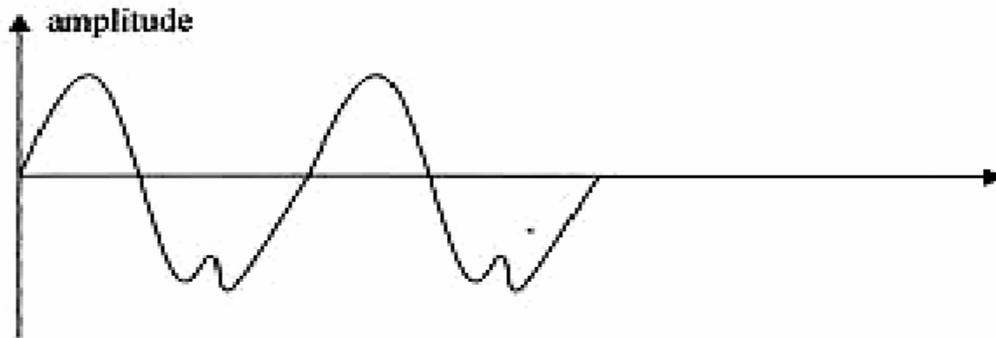


Figure II.1: Composition de tous les mouvements.

Il est décrit par l'équation suivante:

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + \dots + X_n(t) \dots\dots\dots (II.2)$$

$$X_n(t) = A_n \cos (W_n (t) + \beta_n) \dots\dots\dots (II.3)$$

II.2.1.3. Vibration aléatoire :

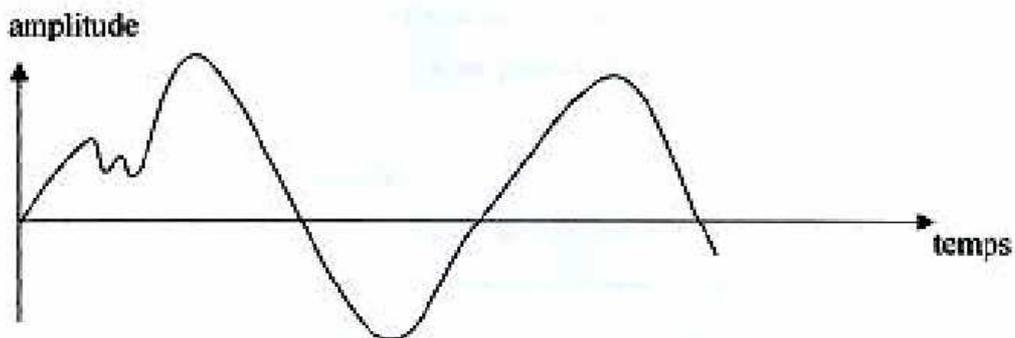


Figure II.2: Vibration aléatoire

C'est une vibration continue pour la quelle il n'est pas possible de déterminer une période de répétition. Elle ne peut donc pas être représentée par une fonction mathématique exacte, et nécessite l'utilisation de grandeurs statistiques pour sa caractérisation.

II.2.1.4. Vibration transitoire :

Elle est non continue et n'est observable que pendant un temps très bref (cas d'un choc ou impact).

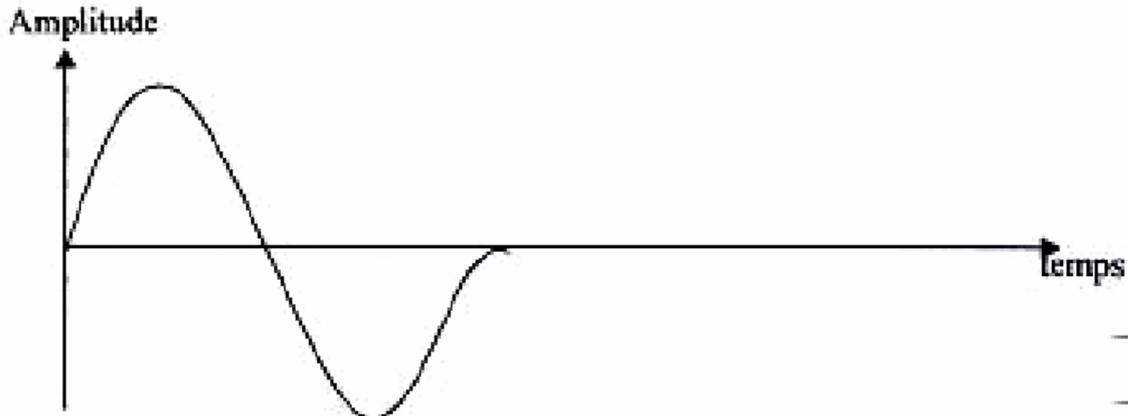


Figure II.3: Vibration transitoire.

II.2.2. Le niveau vibratoire :

Au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore, le niveau de vibration augmente. Ce dernier peut être un indicateur efficace sur l'état de la machine.

Le niveau vibratoire est le paramètre le plus significatif de l'état d'une machine tournante.

II.2.3. Méthode du suivi vibratoire :

Pour le suivi du phénomène vibratoire, on peut distinguer deux façons de procéder:

II.2.3.1. Méthode du suivi par niveau global :

Cela consiste à apprécier le niveau vibratoire de la machine en mesurant la valeur efficace de ses vibrations et en la comparant aux seuils de jugement donnés par les normes.

Cette méthode permet de suivre d'une manière fiable l'état d'une machine, et d'émettre un avis sur la situation du phénomène en fréquence (basses, ou hautes).

II.2.3.2. Méthode de suivi par l'analyse en fréquences :

La mesure du niveau vibratoire permet de savoir si le comportement de la machine dépasse les limites admissibles, sans émettre une hypothèse sur les causes et les excitateurs de vibration, ces informations peuvent être obtenues en réalisant une analyse en fréquence.

Il faut pour cela représenter la vibration dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier. Cette méthode est appliquée lorsque le niveau vibratoire est jugé supérieur au seuil admissible.

II.3. L'analyse vibratoire :

Le principe de l'analyse vibratoire est basé sur l'idée que les structures des machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués. La mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs. On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par la structure de la machine, et par leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise. De plus, si l'on possède de la signature vibratoire de la machine en état de bon fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement.

La mesure d'une vibration transmise par la structure d'une machine sera fonction de multiples paramètres que l'on peut séparer en trois groupes :

- ❖ 1er groupe : Masse, rigidité, coefficient d'amortissement de la structure qui véhicule les vibrations et caractéristiques de fixation de la machine.

L'ensemble de ces éléments est généralement appelé: Fonction de transfert, caractéristique de la structure.

- ❖ 2ème groupe : Position, fixation et caractéristiques du capteur, transmission du signal, performances de l'appareil analyseur.

Ces éléments concernent les caractéristiques de la chaîne de mesure, qui doivent être invariables d'une structure à l'autre.

- ❖ 3ème groupe: Vitesse de rotation, puissance absorbée, et l'état des liaisons de la chaîne cinématique (alignement, balourd, engrenage, roulement...).

II.4. La chaîne de mesure de vibrations:

La chaîne de mesure d'une grandeur physique (dans notre cas, il s'agit d'une vibration mécanique) montre l'importance d'une parfaite maîtrise des outils de traitement du signal dans la surveillance et le diagnostic d'un processus industriel.

La figure II.4. représente la structure de la chaîne de mesure et traitement implantée dans le contexte du diagnostic industriel.

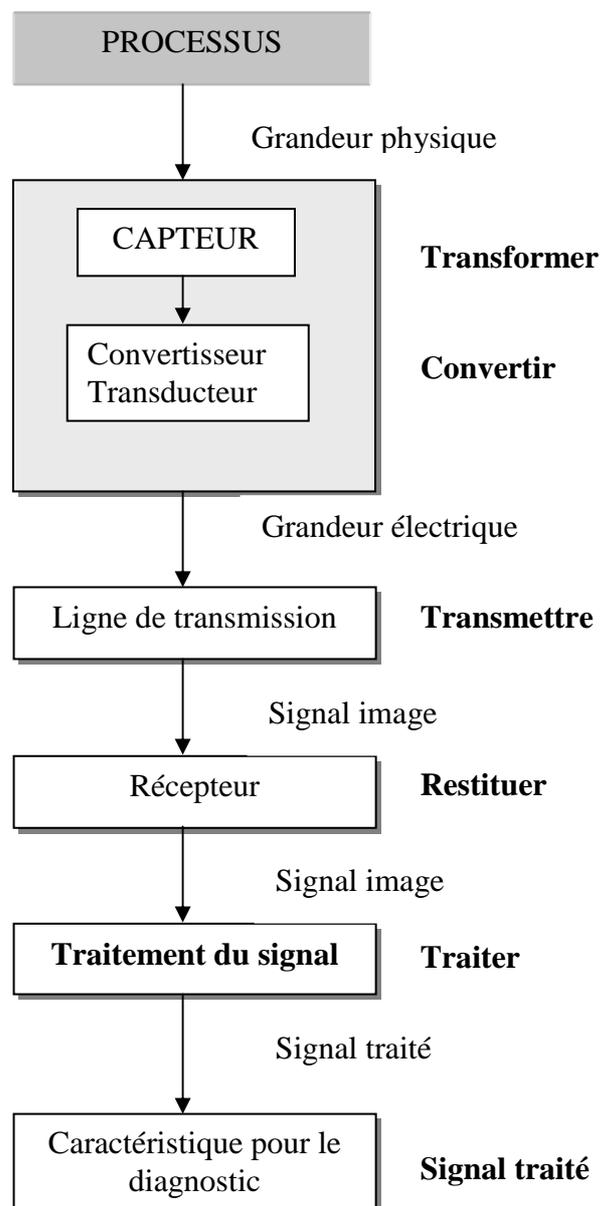


Figure II.4: Schéma de principe d'une chaîne de mesure.

Chaque élément de cette chaîne d'instrumentation et de traitement assure un rôle fonctionnel bien particulier et il est important de donner les définitions de leurs principales caractéristiques, notamment le capteur qui diffère d'une grandeur physique à une autre (dans notre étude, on se limite aux capteurs vibratoires).

II.4.1. Les capteurs de vibrations :

Un capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore, à partir d'une grandeur physique (information entrante), une autre grandeur physique de nature différente (la plupart du temps électrique) utilisable à des fins de mesures ou de commandes.

II.4.1.1. Paramètres des capteurs :

Il existe un certain nombre de paramètres électriques communs à tous les capteurs tels que :

- *La précision* qui est caractérisée par l'incertitude absolue obtenue sur la grandeur électrique en sortie du capteur.
- *L'étendue de mesure* qui définit la plage de fonctionnement du capteur pour la grandeur à mesurer.
- *La linéarité* qui permet de savoir si le capteur présente la même sensibilité sur toute l'étendue de sa plage d'emploi.
- *La fidélité* : Un capteur est dit fidèle si le signal qu'il délivre ne varie pas pour une série de mesure concernant la même valeur de la grandeur d'entrée.

II.4.1.2. Différents types de capteurs :

Les capteurs de vibrations utilisés actuellement en industrie pour la maintenance conditionnelle sont les capteurs de déplacement, les capteurs de vitesse et les capteurs d'accélération (les accéléromètres).

II.4.1.2.1. Capteurs de déplacement :

Il existe en effet trois types :

- *Capteurs de déplacement à courant de Foucault:*

Ces capteurs mesurent les déplacements vibratoires, ils ont une réponse aux déplacements quasi statiques, mais ont une gamme de fréquence limitée et ils nécessitent souvent un calibrage sur site.

De plus la surface vibrante doit être électriquement conductrice.

- *Capteurs de déplacement capacitifs :* Ces capteurs de petite dimension sont libres de tout contact. Ils sont sensibles aux déplacements vibratoires relatifs à une grande sensibilité sur une large gamme fréquentielle.

Ce type de capteur est difficile à calibrer, il faut appliquer une différence de potentiel entre le capteur et la pièce en mouvement.

- *Potentiomètre de position :*

Ce capteur est capable de mesurer les déplacements statiques. Cependant, la gamme fréquentielle est très limitée et le capteur a une courte durée de vie et une faible résolution.

II.4.1.2.2. Capteur de vitesse :

C'est un capteur vibratoire de faible impédance électrique, très limité dans sa gamme fréquentielle. Il est sensible au champ magnétique, et sa plage fréquentielle est limitée, elle va typiquement de 10Hz à 1000Hz.

II.4.1.2.3. Capteur d'accélération :

C'est un capteur vibratoire qui est capable de mesurer les accélérations quasi statiques. La gamme fréquentielle est très large, il possède une excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique. Etant lui-même, générateur, il est donc indépendant de toute alimentation externe. Le signal d'accélération peut être intégré électriquement pour donner le déplacement et la vitesse, c'est le meilleur capteur disponible pour la mesure de vibrations.

Ce capteur est disponible pour le montage axial et le montage radial, et les figures II.5 et II.6 illustrent bien ces deux montages.



Figure II.5: Montage axial



Figure II.6: Montage radial

Dans un capteur d'accélération, on utilise un cristal piézo-électrique, ce cristal a la propriété de produire une charge électrique lorsqu' il est soumis à une pression. Quand une masse est placée au-dessus de ce cristal mince, subit des accélérations, et une force est générée suivant la loi de newton:

$$F=Ma \dots\dots\dots(II.4)$$

Cette force crée une pression sur le cristal. Les accéléromètres actuels sont tous munis d'un amplificateur interne qui transforme la charge en une tension. Cet amplificateur est alimenté de manière externe au moyen d'une source de courant continu. Vu le caractère universel de ce capteur, la plupart des appareils de mesures modernes contient de telle source de courant.

Si l'amplificateur n'est pas construit à l'intérieure de capteur, il faut faire usage à une source d'amplification externe. Le désavantage de cette méthode est que les câbles de connexion utilisée doivent être spécifique pour acheminée sans perte d'information, le signal jusqu'à l'appareil de mesure.

L'effet piezo- électrique est régi par les équations suivantes:

$$\left. \begin{array}{l} Q=k.P \\ P=F/S \\ F=M.a \end{array} \right\} \quad Q=K.a \dots\dots\dots(II.5)$$

Avec:

Q: Charge électrique généré par l'effet piézo-électrique (pC)

P: Pression exercée sur la céramique (N/m^2)

F: Force exercée sur la céramique (N)

S: Surface de contact entre la masse sismique et la céramique (m^2)

M: Masse sismique (Kg)

a: Accélération de capteur (m/s^2)

k: Constante (pC/N/m^2)

K: Facteur de transmission (pC/m/s^2)

II.4.1.3. Mode de fixation du capteur :

Plusieurs modes de fixation existent : par goujon vissé ou embase collés, par embase magnétique ou par simple pression avec une pointe de touche. Le mode de fixation d'un capteur a une incidence considérable sur la bande passante de ce dernier et surtout sur la répétitivité de la mesure qui est le fondement même de la surveillance. Seuls les modes de fixation par goujon vissé ou par embase collée offrent une réelle garantie sur la répétitivité des prises des mesures et une bande passante maximale. Cependant, avec quelques précautions, la fixation par embase magnétique donne des résultats acceptables. Par contre, l'utilisation d'une pointe de touche offre une mauvaise répétitivité des mesures et une très mauvaise bande passante. Malgré sa facilité de mise en œuvre, cette technique de prise de mesure doit donc vivement être déconseillée.

II.4.1.4. Nombre de points de mesure par palier :

Il est extrêmement important de ne pas oublier qu'une force est une grandeur vectorielle et qu'un capteur de vibration est un capteur directionnel. Certains défauts induisent des forces d'excitations directionnelles selon des directions bien définies (radiale, verticale, horizontale, ...) et ne seront révélés que si le capteur est correctement positionné.

Et pour une bonne fiabilité de la surveillance, il faut effectuer les prises de mesures selon trois directions orthogonales : l'une parallèle à l'axe de rotation et les deux autres radiales.

II.4.2. L'échantillonnage:

L'échantillonnage du signal consiste à en prendre des valeurs représentatives à des intervalles de temps Δt donnés. Cependant pour des raisons de fiabilité de mesure, et à cause des variations possibles du signal d'entrée, cet échantillonnage doit être effectué dans un délai extrêmement court.

Le nombre d'échantillons doit être suffisamment grand pour décrire le signal complet sans perte d'informations, mais suffisamment faible pour en limiter le traitement et réduire ainsi les temps de calcul. Le théorème de Shannon nous indique que la fréquence d'échantillonnage f_e doit être supérieure à deux fois la fréquence maximale du signal analysé:

$$f_e > 2f_{\max} \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

Dans la pratique, les constructeurs de matériels définissent un facteur compris entre 2,5 et 5 mais le plus couramment 2,56.

La fréquence de Nyquist correspond à la moitié de la fréquence d'échantillonnage:

$$f_N = f_e / 2 \dots\dots\dots(\text{II.7})$$

II.4.3. Le filtrage :

Les opérations de filtrages sont utilisées pour extraire une partie des informations contenues dans un signal dans un domaine fréquentiel donné et sont le plus souvent réalisées à l'aide de systèmes linéaires invariant dans le temps dont on connaît à priori les réponses fréquentielles.

Les filtres analogiques sont généralement mis en œuvre, soit pour éviter les phénomènes de repliement de spectre associé à l'échantillonnage d'un signal analogique avant le traitement numérique sur ordinateur, soit pour traiter analogiquement un signal. Les filtres analogiques se réalisent matériellement avec des composants passifs (résistance, capacité,...), des composants actifs tels que des amplificateurs opérationnels ou des matériaux piézo-électriques.

Les filtres numériques sont réalisés dans la majorité des cas à l'aide d'algorithmes de traitement numériques sans réalité matérielle.

Dans ce qui suit on s'intéressera au filtre anti-repliement qui est un composant de la chaîne de mesure et au filtre passe bande qu'on va utiliser dans le 3^{ème} chapitre pour le traitement des données.

II.4.3.1. Le filtre passe bande :

Un filtre passe bande est un filtre qui ne laisse passer d'énergie que dans sa bande passante Δf

$$\Delta f = f_2 - f_1 \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

En pratique, ce filtre n'est pas réalisable, et on utilise un filtre dont les fréquences sont données par convention à -3dB.

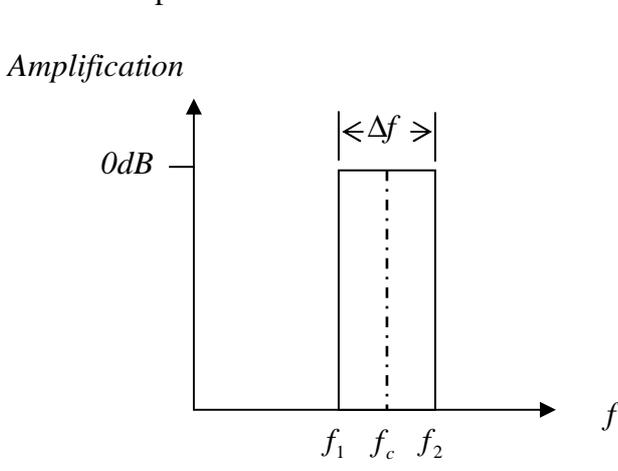


Figure II.7: Filtre théorique

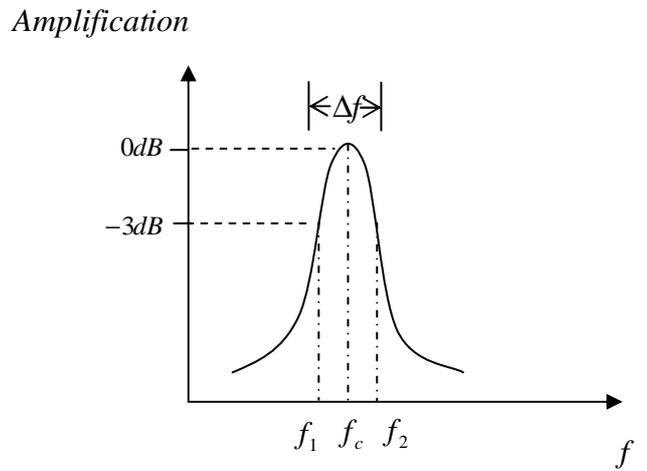


Figure II.8: Filtre pratique

On qualifie deux types de filtres différents pour une même fréquence centrale f_c :

- Les filtres à bande passante constante, dits *filtres absolus*.

$$\Delta f = BP_{abs} = \text{constante} \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

- Les filtres à pourcentage de bande constant, dits *filtres relatifs*.

$$BP_{rel} = \frac{\Delta f}{f_c} = \text{constante} \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

II.4.3.2. Le filtre anti-repliement:

Aucun signal physique ne possède un spectre limité en fréquence, et le non respect de certaines règles sur l'échantillonnage peut entraîner un effet indésirable sur la mesure, le repliement de spectre. Il se manifeste, lors de la reconstruction du signal, par l'apparition dans le spectre de composantes à basses fréquences non significatives.

Le repliement de spectre est le mélange des composantes (entre f_e et f_N) avec le spectre en fréquence désiré et rendait l'exploitation impossible.

Pour annuler cet effet indésirable, on utilise un filtre anti-repliement, jouant le rôle d'un filtre passe bas dont la fréquence de coupure correspond à la fréquence de Nyquist.

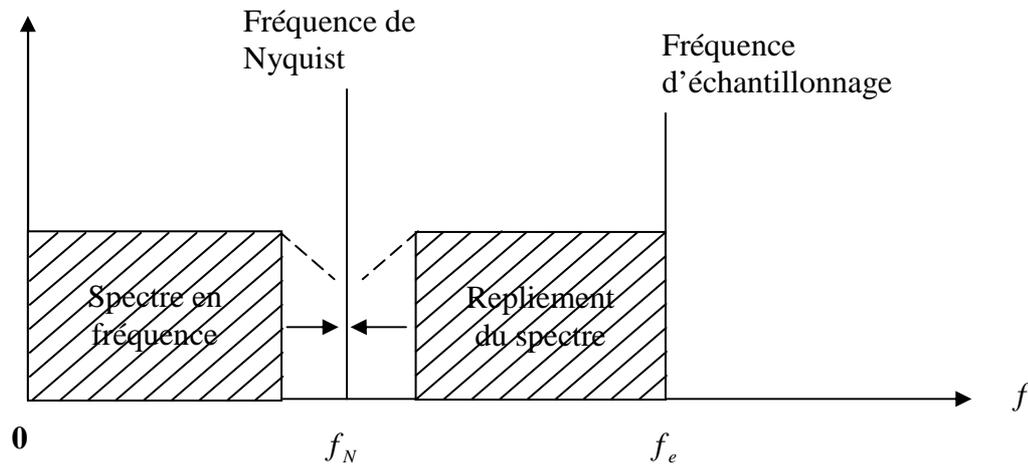


Figure II.9 : Repliement de spectre.

II.4.4. La numérisation:

La numérisation d'un signal se fait à l'aide d'un convertisseur analogique/numérique, ce dernier transforme le signal analogique issu du capteur en une suite de valeurs numériques permettant de reconstruire la courbe du signal sans perdre aucune information.

Un paramètre important de cette numérisation, pour la précision de mesure en amplitude, est le nombre de pas de quantification par rapport à la valeur maximale de l'échelle nécessaire à la définition de l'amplitude d'une raie discrète. Ce nombre est une caractéristique du convertisseur analogique/numérique. On parle de bits de résolution.

II.4.5. Les analyseurs de fréquence:

L'oscilloscope est l'outil adapté à l'observation du signal en fonction du temps. Les analyseurs de fréquence permettent la visualisation du signal en fonction de la fréquence.

Ils sont regroupés en deux grandes familles:

- Les appareils analogiques.
- Les appareils numériques.

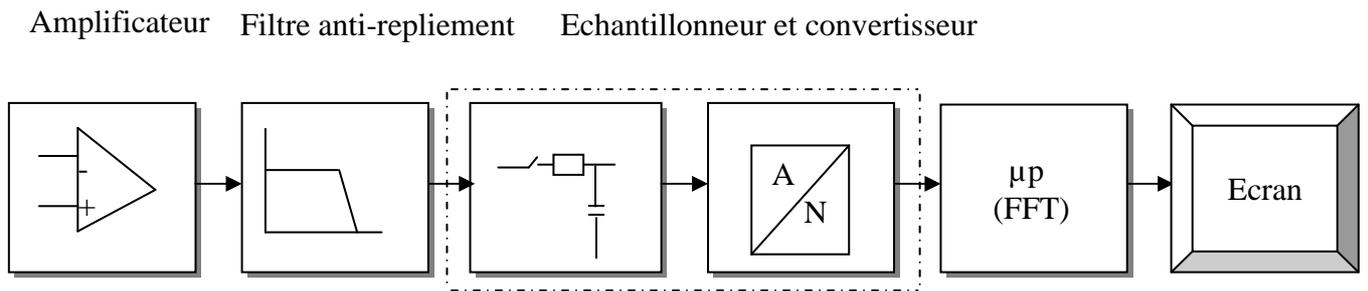


Figure II.10: Principe de Fonctionnement d'un analyseur numérique.

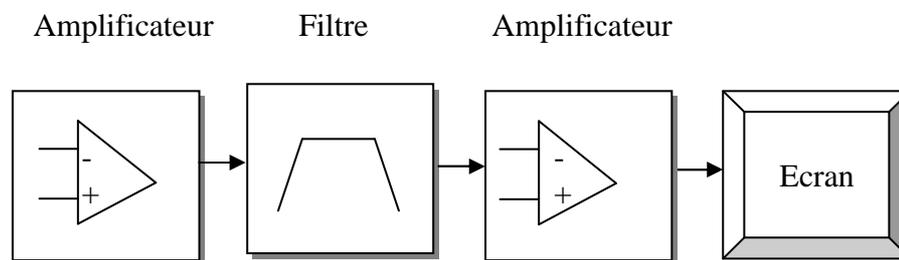


Figure II.11: Principe de Fonctionnement d'un analyseur analogique.

II.5. Le signal vibratoire:

A la sortie des capteurs, on dispose de signaux électriques traduisant les phénomènes de vibrations. Ces signaux peuvent être analysés et traités en vue de déterminer le diagnostic de la machine.

II.5.1. La représentation du signal vibratoire:

Comme tous les signaux électriques, différentes représentations sont possibles:

- *La représentation temporelle $x(t)$* : C'est une représentation de l'amplitude du signal en fonction du temps.
- *La représentation fréquentielle $X(f)$* : C'est une représentation de l'amplitude du signal en fonction de la fréquence.
- *La représentation utilisant des grandeurs indirectes*, telles que: l'autocorrélation $C_{xx}(\tau)$, $S_{xx}(v)$...ect.

Nous utiliserons l'une ou l'autre de ces représentations en fonction de l'application.

II.5.2. Méthodes d'étude des vibrations :

La vibration peut être étudiée par plusieurs méthodes qui correspondent à des niveaux différents de connaissance du phénomène telles que: la mesure de la valeur globale, la technique de résonance et l'analyse spectrale.

II.5.2.1. Etude des vibrations par la mesure de la valeur globale :

C'est une méthode approximative d'analyse du signal qui fait abstraction du paramètre fréquentiel pour ne mesurer que l'amplitude maximale évaluée :

➤ **En valeur crête à crête:**

En mesurant l'amplitude maximale de l'onde, mesure utile lorsque le déplacement vibratoire d'une machine est critique en regard des contraintes.

➤ **En valeur crête:**

Mesure intéressante pour indiquer par exemple le niveau d'un choc de courte durée.

➤ **En valeur efficace:**

Elle tient compte de l'évolution de la valeur des composantes harmoniques reliées au contenu énergétique de la vibration.

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt} \dots\dots\dots(II.11)$$

On notera que les valeurs d'amplitudes peuvent représenter un déplacement, une vitesse ou une accélération, car la vitesse et l'accélération sont de même nature que la fonction déplacement du moment où elles sont obtenues après dérivation de cette dernière.

II.5.2.2. Etude des vibrations par les techniques de résonance utilisées pour le dépistage des défauts de roulements :

Les fréquences engendrées au-delà de 20KHz sont des fréquences dues principalement, sur une machine tournante, à un défaut de roulement ou d'engrenage. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un filtre éliminant les fréquences inférieures à 20KHz.

La mesure de l'évolution de cette onde de choc permet de suivre avec précision l'état d'un roulement sans se préoccuper de la complexité de l'ensemble de la machine.

Cette technique est valable pour des machines relativement calmes telles que les moteurs électriques.

II.5.2.3. Etude des vibrations par analyse spectrale:

Dans la plupart des mesures de vibrations, il est beaucoup plus aisé de travailler dans le domaine fréquentiel que dans le domaine des temps, d'où l'idée de l'analyse en fréquence où le signal (amplitude/temps) est convertie en signal (amplitude/fréquence).

Le spectre montre l'amplitude de la vibration à chaque fréquence.

Chaque composante du signal vibratoire est représentée sous forme de pics, donc, on peut suivre individuellement une machine surveillée à partir de ses caractéristiques et de fréquences aux quelles apparaissent les anomalies.

II.6. Expérience:

Une expérience a été faite à l'aide d'un moteur électrique d'une machine tournante de puissance 2 hp (1hp=0,746KW) et de vitesse qui varie de 1720 à 1797 tr/min.

Elle consiste à faire plusieurs essais de roulements à billes pour les roulements normaux et défectueux où on a introduit des défauts s'étendant de 0,007 à 0,04 pouces de diamètre séparément dans la bague interne et dans la bague externe.

Les données vibratoires sont rassemblées à l'aide des accéléromètres, qui ont été fixés avec des bases magnétiques, en des endroits près et éloignés des roulements du moteur (Figure II.12).

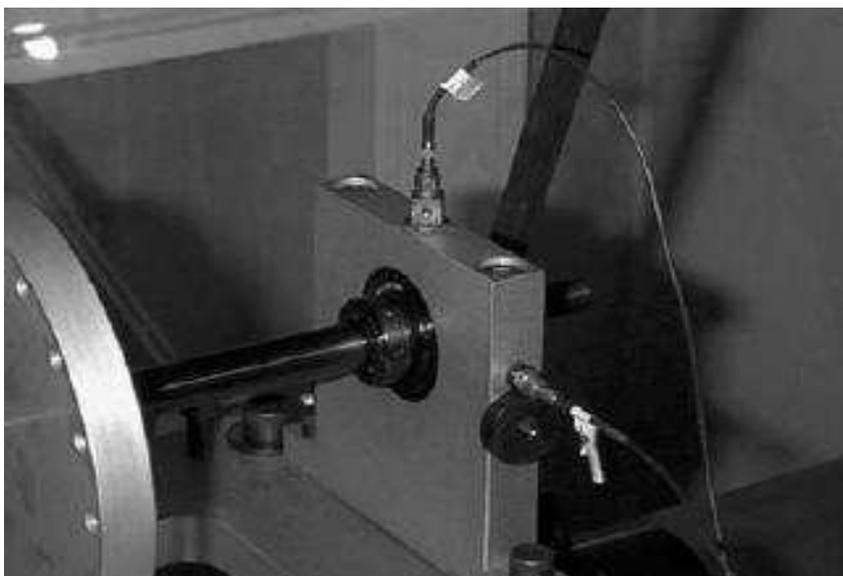


Figure II.12: fixation des capteurs.

Avant de passer au traitement des données reçues de cette expérience, on va d'abord donner quelques notions sur les roulements et les défauts qui peuvent apparaître dans leurs différents composants constituant.

II.7. Les roulements:

Un roulement mécanique permet le positionnement, la transmission des efforts et la rotation entre deux pièces par le remplacement du glissement en un roulement.

Les roulements à billes se présentent sous la forme de bagues coaxiales entre lesquelles sont placées des billes, légèrement lubrifiées et maintenues espacées par une cage, ce qui montre la figure II.13.

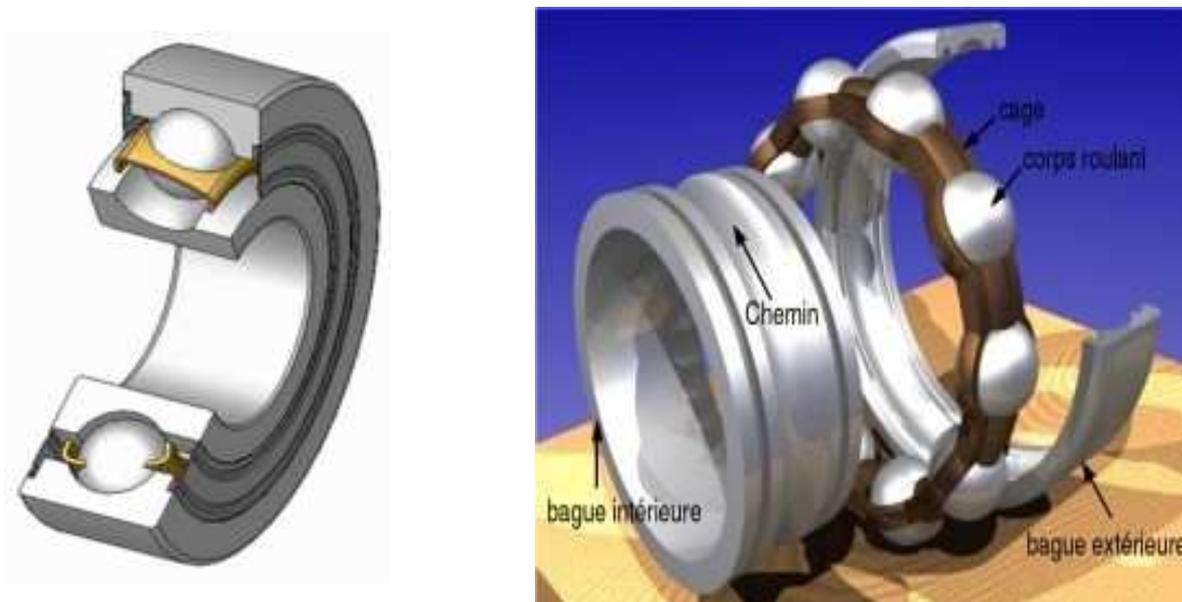


Figure II.13: géométrie des roulements à billes.

II.7.1. Types de roulement:

Par abus de langage, on utilise la même désignation, roulement à billes pour nommer toute sorte de roulements. On doit cependant les distinguer par la forme et la disposition des éléments roulants: roulements à billes, roulements à rouleaux cylindriques, roulements à rouleaux coniques, roulements à rouleaux à aiguilles et roulements rotule à rouleaux.

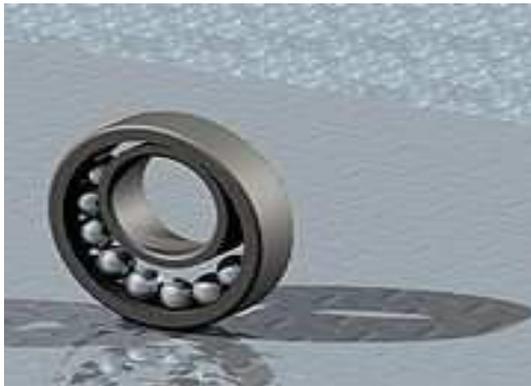


Figure II.14: Roulement à billes.



Figure II.15: Roulement à aiguilles.



Figure II.16: Roulement conique.



Figure II.17: Roulement à rotules

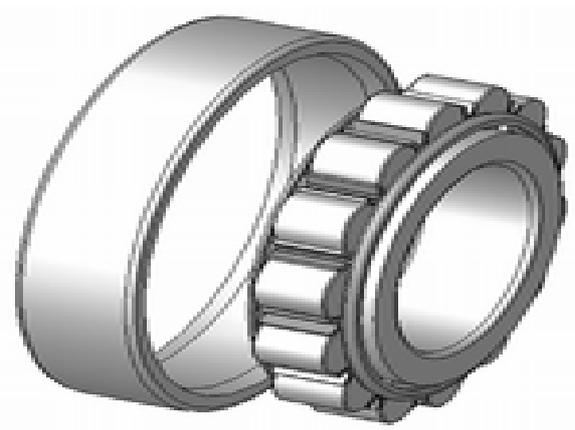


Figure II.18: Roulement cylindrique

L'emploi des roulements dans la réalisation nécessite le respect de règles garantissant un comportement sain de l'ensemble, qui dépendent des conditions de fonctionnement du mécanisme tel que : l'encombrement, efforts transmis, fréquence de rotation et durée de vie.

II.7.2. Durée de vie des roulements :

La variation des sollicitations aux contacts des éléments rouleaux, sur les bagues provoque une usure par fatigue. La durée de vie d'un roulement est le nombre de tours qui peut effectuer avant l'apparition des premiers signes d'écaillage, qui est l'altération de l'état de surface des chemins de roulements ou des éléments rouleaux

II.7.3. Défauts de roulements :

Les roulements sont les organes les plus sensibles dans une machine tournante, la rotation des billes ou le passage de celles-ci sur un chemin de roulement endommagé, produit des chocs qui engendrent une vibration de type impulsionnel.

Quant un roulement se casse, c'est la machine entière qui tombe en panne, c'est pourquoi il est important de pouvoir suivre l'évolution d'un défaut de roulement.

La bague interne, la bague externe, la cage et les billes sont les éléments constituant des roulements, qui peuvent être à l'origine d'un défaut.

L'apparition d'un défaut sur l'un des composants génère un modèle de vibration propre.

Le passage d'une bille dans une bague externe fissurée génère des signaux de hautes fréquences qui se répètent à chaque passage de la bille dans la fissuration qui s'élargie suite aux passages répétitif de la bille.

Les impacts provoqués par le passage de la bille dans le défaut de la bague se visualisent dans le spectre à une fréquence déterminée qui dépend de la vitesse de rotation et de la géométrie du roulement.

II.7.4. Les fréquences caractéristiques des impacts :

L'apparition d'un défaut dans les composants du roulement se fait aux fréquences suivantes qui sont calculées lors de la cinématique de la machine:

Défaut sur la bague externe :

$$f_e = \frac{n.N}{2.60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right) \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

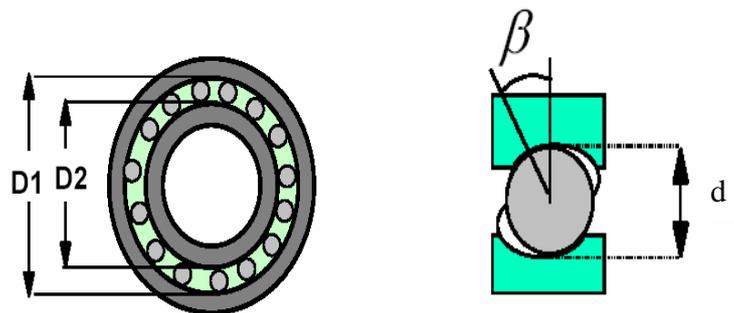
Défaut sur la bague interne : $f_i = \frac{n.N}{2.60} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right)$ (II.13)

Défaut sur une bille : $f_b = \frac{D.N}{d.60} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \beta \right)$ (II.14)

Défaut sur la cage : $f_c = \frac{N}{2.60} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right)$ (II.15)

Avec : $D = \frac{D_1 + D_2}{2}$ (II.16)

- D₁: diamètre de la bague interne.
- D₂: diamètre de la bague externe.
- D: diamètre moyen du roulement.
- d: diamètre des billes.
- β : angle de contact.
- n: nombre de billes (ou de rouleaux).
- N: vitesse de rotation de l'arbre.



II.8. Conclusion:

L'analyse vibratoire est l'un des moyens utilisés pour suivre l'évolution d'une machine tournante au cours du fonctionnement.

A partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements, et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.

L'analyse vibratoire reste très pertinente pour diagnostiquer la plupart des défauts mécaniques, notamment les défauts de roulements, ce qui fait l'objet de 3^{ème} chapitre.

III.1.Introduction :

Les techniques de diagnostic se basent sur la détection d'une situation anormale, qui n'est qu'un écart qui s'obtient par la comparaison de la signature observée avec une signature de référence. Elles utilisent les caractéristiques des signaux dans les domaines temporels, fréquentiels et statistiques.

Le traitement du signal joue ainsi un rôle capital dans l'établissement des signatures associées aux fonctionnements normaux et anormaux.

Dans ce chapitre, on s'intéresse au traitement des signaux définis dans le chapitre précédent, qui représentent des états normaux et anormaux d'une machine tournante, pour détecter les défauts éventuels, puis les caractériser.

Pour cela nous allons utiliser différentes méthodes, nous rappellerons à chaque fois les propriétés mathématiques des opérateurs utilisés.

III.2.Analyse spectrale:

L'analyse spectrale permet de décomposer le signal complexe en ses constituants de base. La représentation conventionnelle d'un signal tel qu'il est délivré par un capteur se fait dans le domaine temporel (amplitude en fonction du temps), et l'analyse spectrale permet de représenter l'amplitude du signal en fonction de la fréquence.

Cette propriété de l'analyse spectrale peut mettre en évidence la présence d'un défaut ou d'une défaillance dans la machine ou dans l'un de ses organes, elle sera utilisée dans notre cas pour le traitement des données réelles qui sont des signaux vibratoires délivrés par un accéléromètre placé dans l'environnement des roulements d'un moteur d'essai.

L'analyse spectrale est basée sur la transformée de Fourier qu'on va définir ci-dessous.

III.3.Transformée de Fourier :

La représentation fréquentielle est souvent plus lisible que la représentation temporelle, d'où l'utilité de la transformée de Fourier, qui est donnée par la formule suivante :

$$x(t) \xrightarrow{TF} X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad \dots\dots\dots(III.1)$$

Les signaux physiques sont connus sur une durée finie T, si on veut considérer leurs TF, on doit faire l'une des hypothèses suivantes :

- Ils sont nuls en dehors de l'intervalle [0 T], c'est-à-dire ils ne sont pas périodiques, donc leurs TF sont continues en fréquence.
- Ils sont périodiques de période T, donc leurs TF sont composées de raies espacées les unes des autres de 1/T.

III.3.1. Propriétés de la TF:

La transformée de Fourier possède plusieurs propriétés telles que :

- La linéarité : la TF est une fonction linéaire qui peut être illustrée comme suit :

$$x(t) \xrightarrow{TF} X(f) \dots\dots\dots(III.2)$$

$$y(t) \xrightarrow{TF} Y(f) \dots\dots\dots(III.3)$$

$$ax(t) + by(t) \xrightarrow{TF} aX(f) + bY(f) \dots\dots\dots(III.4)$$

- La similitude : Cette propriété montre qu'un étalement d'une échelle des temps conduit à une contraction de l'échelle des fréquences et inversement, elle est donnée par :

$$x(at) \xrightarrow{TF} \frac{1}{|a|} X\left(\frac{f}{a}\right) \dots\dots\dots(III.5)$$

- La translation : Elle montre que deux signaux x(t) et x(t-a) ont le même module de TF, mais x(t-a) subit une rotation de phase supplémentaire de 2πaf, elle est donnée par la formule suivante :

$$x(t-a) \xrightarrow{TF} e^{-2\pi jaf} X(f) \dots\dots\dots(III.6)$$

- La dérivation : cette propriété donne la TF d'une dérivée nième d'un signal x(t).

$$x(t) \xrightarrow{TF} X(f) \dots\dots\dots(III.7)$$

$$\frac{d^n x(t)}{dt^n} \xrightarrow{TF} (2\pi jf)^n X(f) \dots\dots\dots(III.8)$$

III.3.2. La densité spectrale de puissance :

On définit la densité spectrale de puissance comme étant le carré du module de la TF, divisé par le temps d'intégration, elle représente la répartition de la puissance d'un signal en fonction de la fréquence.

Pour éviter la confusion entre les notions de la densité spectrale de puissance et la densité spectrale d'énergie, on résume les conditions d'obtention de densités spectrales de puissance ou d'énergie pour les signaux industriels dans la figure (III.1) suivante :

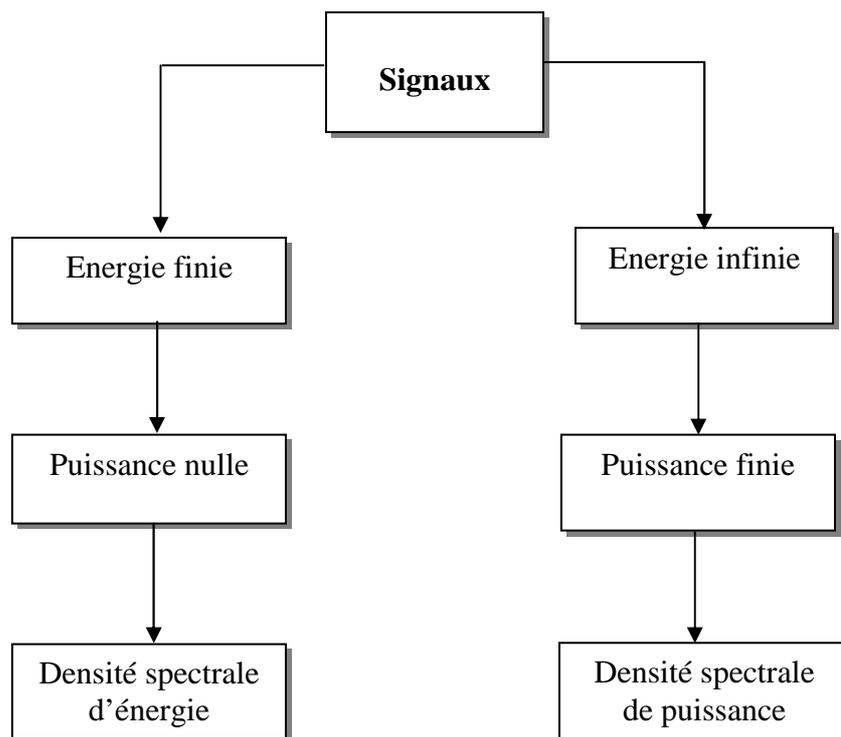


Figure III.1: Modes de calcul des densités spectrales de puissance et d'énergie.

III.3.3. Traitement des données:

Après avoir rappelé l'outil de base utilisé en analyse spectrale, on passe au traitement des données.

Notation :

Dans tout ce qui suit, on utilisera la notation $x(t)$, $x_1(t)$ et $x_2(t)$ pour désigner les signaux normaux, et la notation $y_1(t)$ et $y_2(t)$ pour désigner les signaux anormaux.

On prend deux signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ délivrés par l'accéléromètre lors du fonctionnement normal de la machine (aucun défaut n'est introduit dans la machine), échantillonnés à une fréquence de 12 kHz, qui sont captés à des vitesses de rotation égales à 1797tr/min correspondant à une fréquence fondamentale de 29,95Hz, et à 1772tr/min qui correspond à une fréquence de 29,53Hz respectivement.

La figure III.2 représente la densité spectrale de puissance du signal $x_1(t)$, dans la bande fréquentielle qui varie de 500 à 1000Hz.

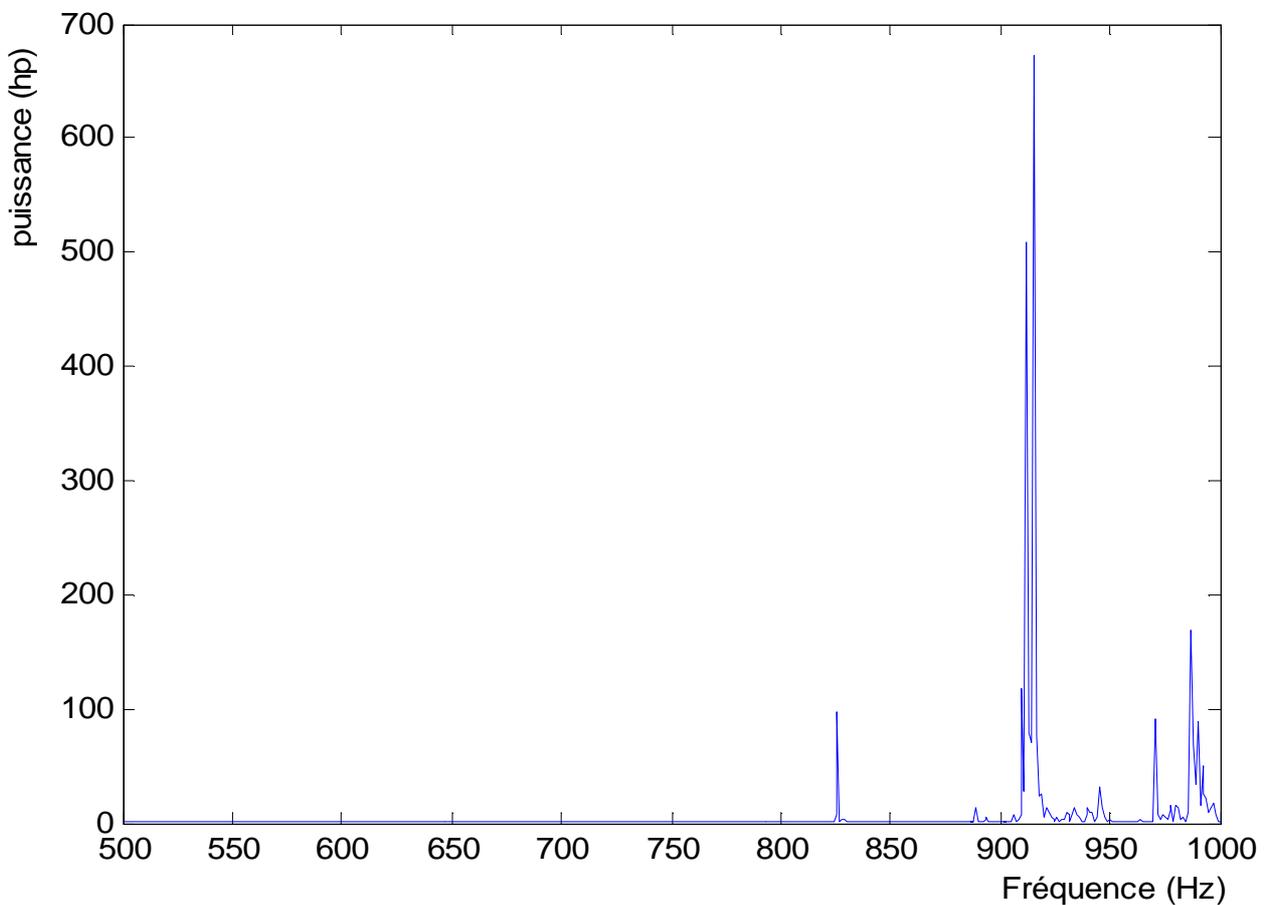


Figure III.2: Densité spectrale de puissance du signal $x_1(t)$

Cette figure montre que le signal $x_1(t)$ est composé de plusieurs harmoniques à des fréquences variant de 825 à 1000Hz sur la plage fréquentielle choisie, avec des amplitudes différentes.

La figure III.3 représente la densité spectrale de puissance du signal $x_2(t)$ défini précédemment.

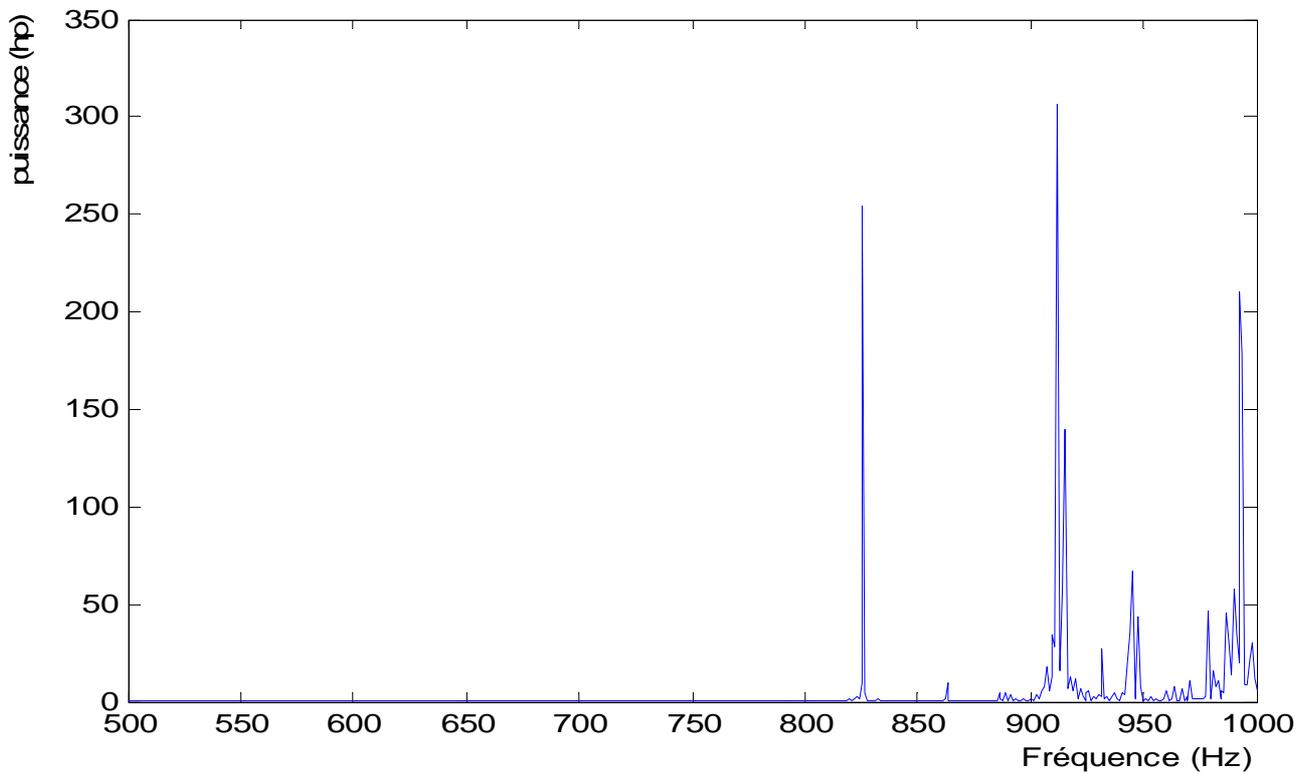


Figure III.3: Densité spectrale de puissance du signal $x_2(t)$

Cette figure montre que le signal $x_2(t)$ présente des harmoniques sur la bande fréquentielle [825 1000], à des amplitudes différentes.

Si on fait la différence entre les deux courbes obtenues précédemment, on aura le spectre donné par la figure III.4.

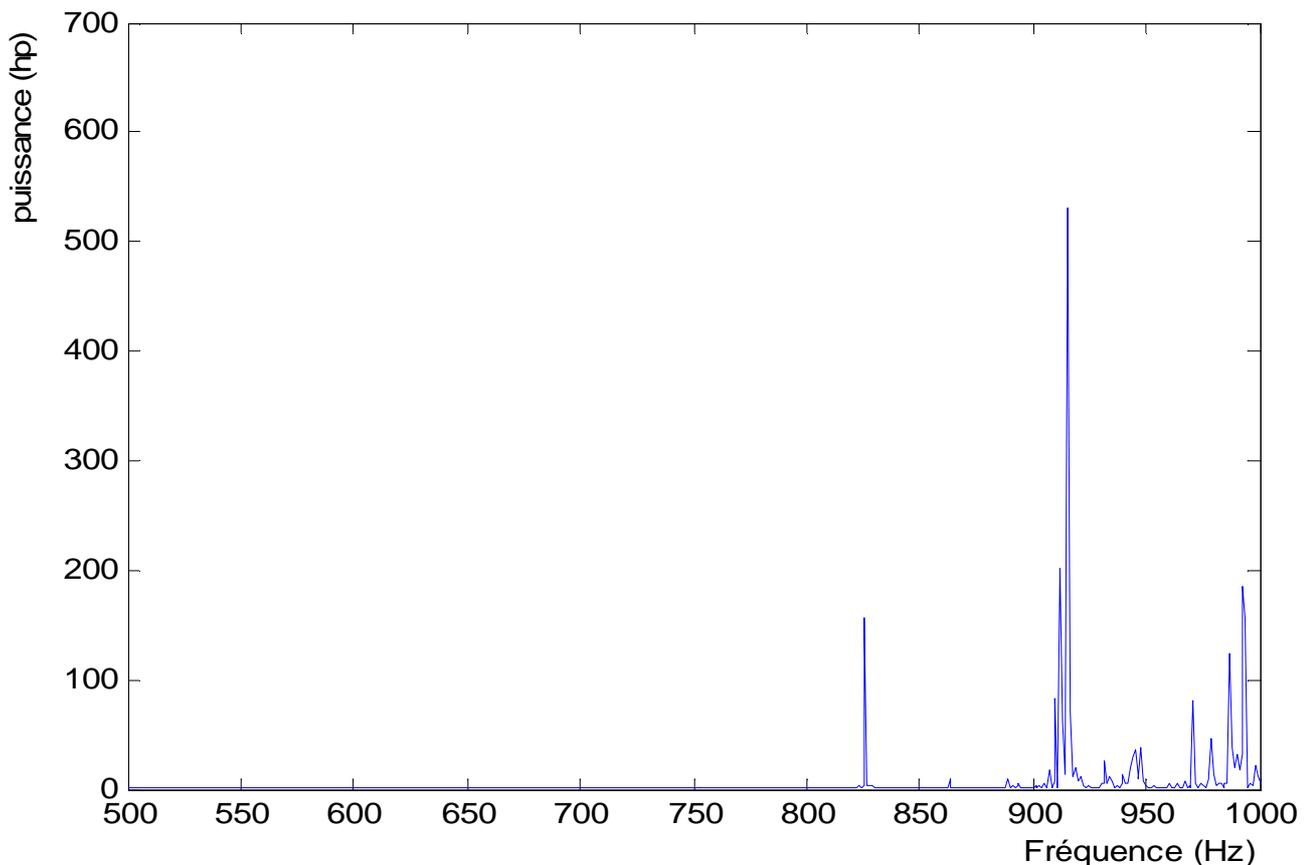


Figure III.4: Différence des densités spectrales de puissance des signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$.

La courbe représentée par la figure III.4 n'est qu'une affirmation que les deux signaux $x_1(t)$ et $x_2(t)$ ne représentent des harmoniques que dans la bande fréquentielle [825 1000], mais à des amplitudes différentes.

Cette différence au niveau des amplitudes, est due à la relation d'intégration qui existe entre la vitesse et l'accélération, ce qui montre que la vitesse de rotation de la machine influe uniquement sur les amplitudes des vibrations.

Lors du traitement des données, cette remarque nous impose de prendre deux signaux captés à la même vitesse de rotation pour éviter une mauvaise interprétation des spectres.

III.3.4.Effet d'un défaut sur la densité spectrale de puissance

On prend un signal $y_1(t)$ échantillonné à une fréquence de 12KHz capté lors du mauvais fonctionnement de la machine(cas où un défaut est introduit dans les roulements), qui tourne à

une vitesse égale à 1750tr/min (fréquence propre vaut 29,16 Hz), et comparant le spectre de la densité spectrale de puissance de ce signal avec celui du signal de référence que l'on notera $\mathbf{x}(t)$ (Signal normal avec la même vitesse de rotation et la même fréquence d'échantillonnage que $\mathbf{y}_1(t)$), on aura les résultats qui sont représentés par les figures III.5, III.6 et III.7 ci-dessous.

La figure III.5 représente la densité spectrale de puissance de signal $\mathbf{x}(t)$ lors du fonctionnement normal de la machine (aucun défaut n'est introduit dans la machine).

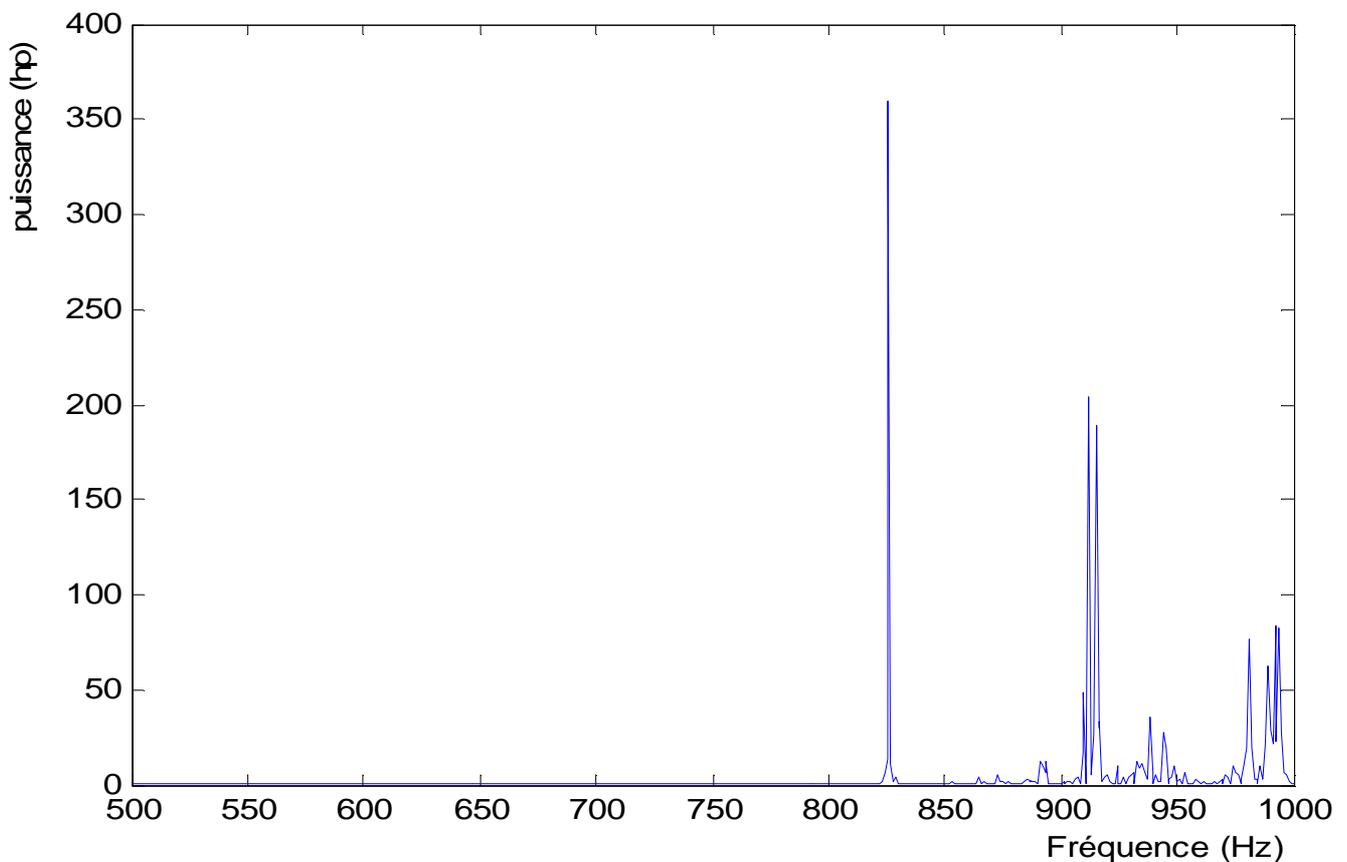


Figure III.5: Densité spectrale de puissance du signal $\mathbf{x}(t)$.

La figure III.5 montre que sur la bande de fréquences qui varie de 500 à 800Hz, l'accélération est nulle, et c'est à partir de 825Hz qu'une série de pics représentant des amplitudes importantes commencent à apparaître.

La figure III.6 représente la densité spectrale de puissance du signal $\mathbf{y}_1(t)$ (signal avec défaut 1) sur la même bande de fréquences.

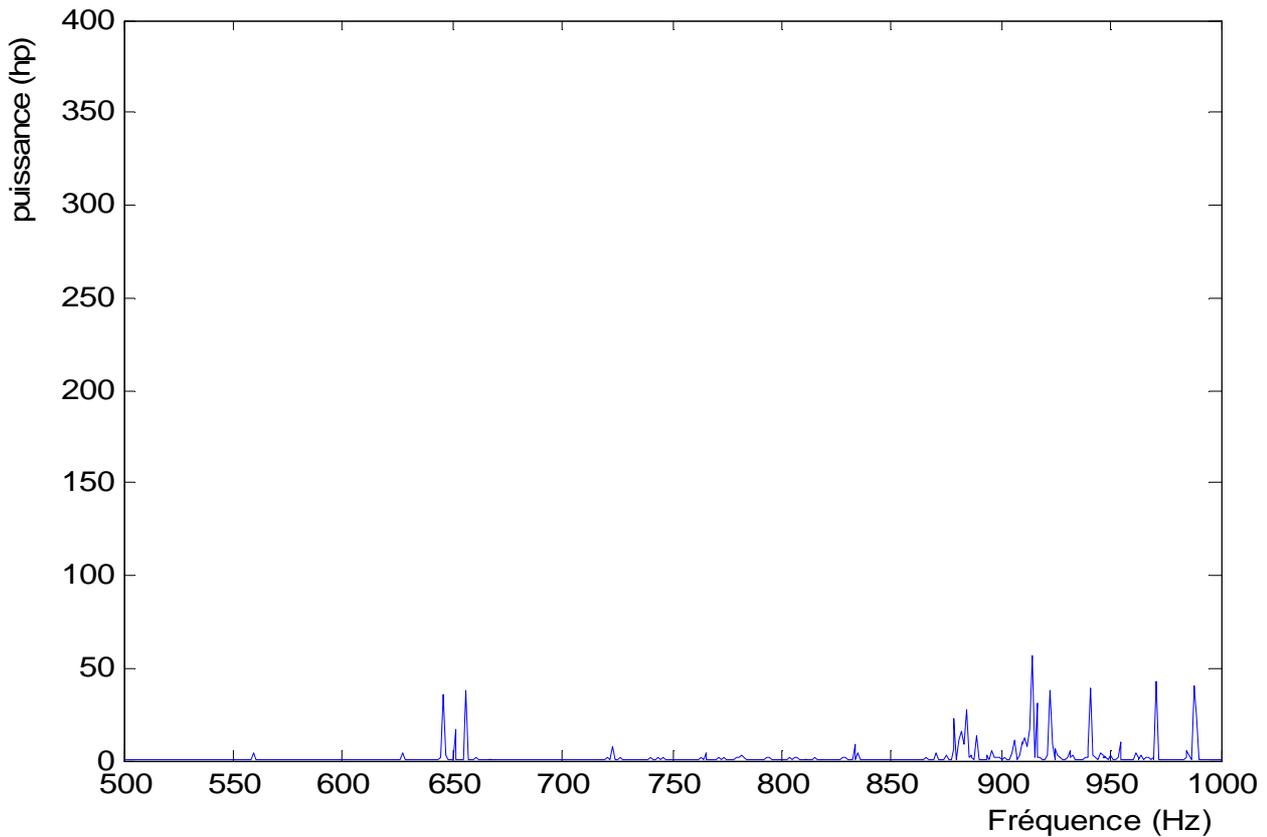


Figure III.6: Densité spectrale de puissance du signal $y_1(t)$.

Sur le spectre de la figure III.6, on remarque la présence de pics autour de la fréquence 650Hz avec des amplitudes significatives, et à partir de cette valeur, l'accélération de la machine est presque nulle jusqu'à 850Hz où plusieurs pics apparaissent mais avec des amplitudes très faibles par rapport à celles vues dans le spectre de la figure III.5.

Et pour confirmer cette interprétation, on passe au calcul de la différence des densités spectrales de puissance des deux signaux $x(t)$ et $y_1(t)$ qui sera représentée par la figure III.7.

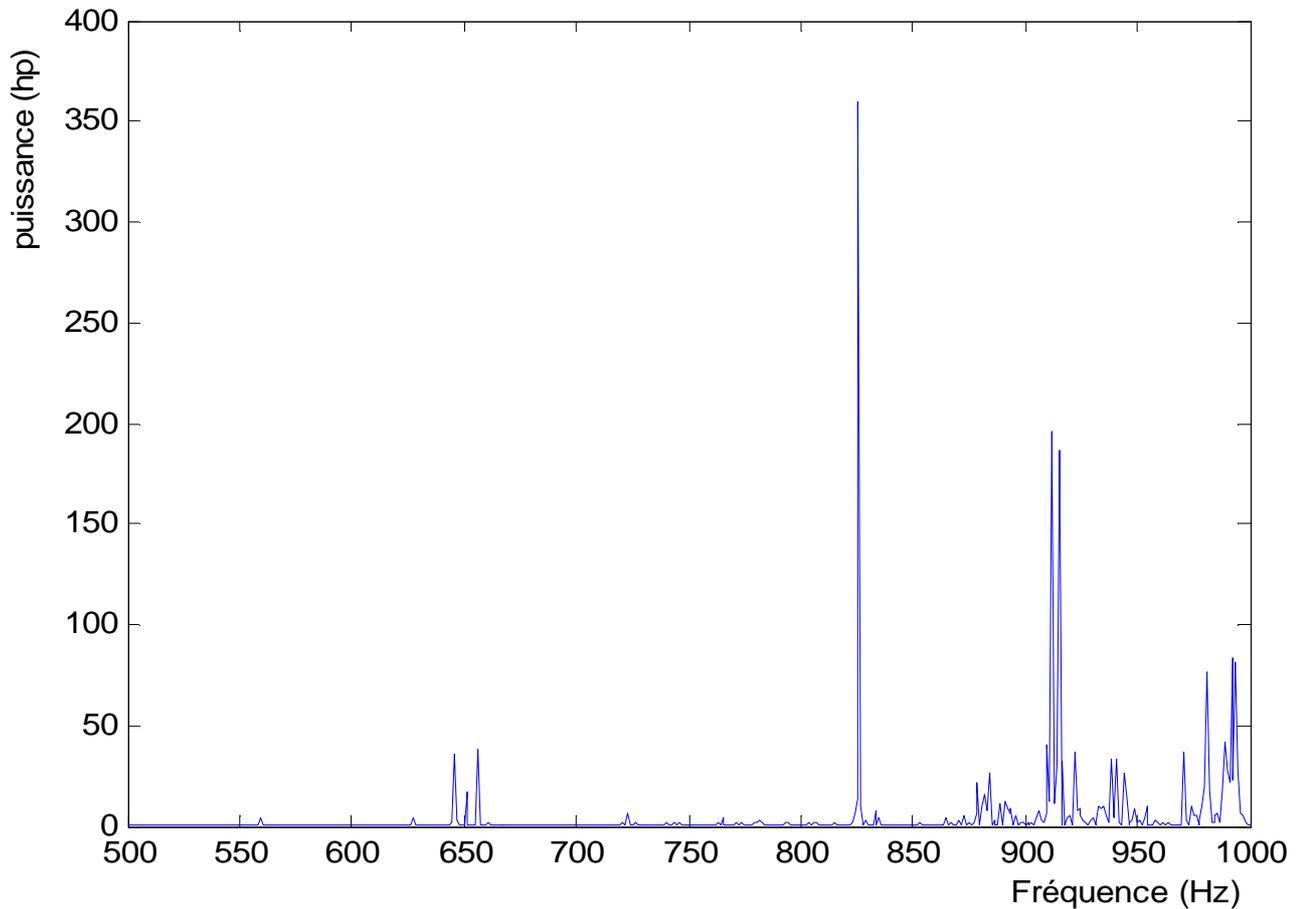


Figure III.7: Différence des densités spectrales de puissance des signaux $x(t)$ et $y_1(t)$.

Sur cette figure on remarque que sur la bande fréquentielle variant de 500Hz à 625Hz et de 675Hz jusqu'à la fréquence 800Hz aucune différence n'est estimée.

Par contre la différence est très claire au voisinage de 650Hz et sur la bande fréquentielle variant de 800Hz à 1000Hz, où un nombre de pics avec des amplitudes importantes apparaît, ce qui peut être expliqué par la présence d'un défaut dans la machine, car si la machine était dans un état de fonctionnement normal lors de la captation du signal $y_1(t)$, le spectre de la figure III.7 doit être idéalement nul.

III.3.5. Caractérisation du défaut:

On prend un autre signal $y_2(t)$ (avec un autre défaut) capté dans les mêmes conditions (vitesse de rotation et fréquence d'échantillonnage), et on le compare avec le signal de référence $x(t)$ en poursuivant les mêmes étapes que précédemment. On aura les résultats qui seront donnés par les figures III.8 et III.9.

La figure III.8 représente la densité spectrale de puissance du signal $y_2(t)$.

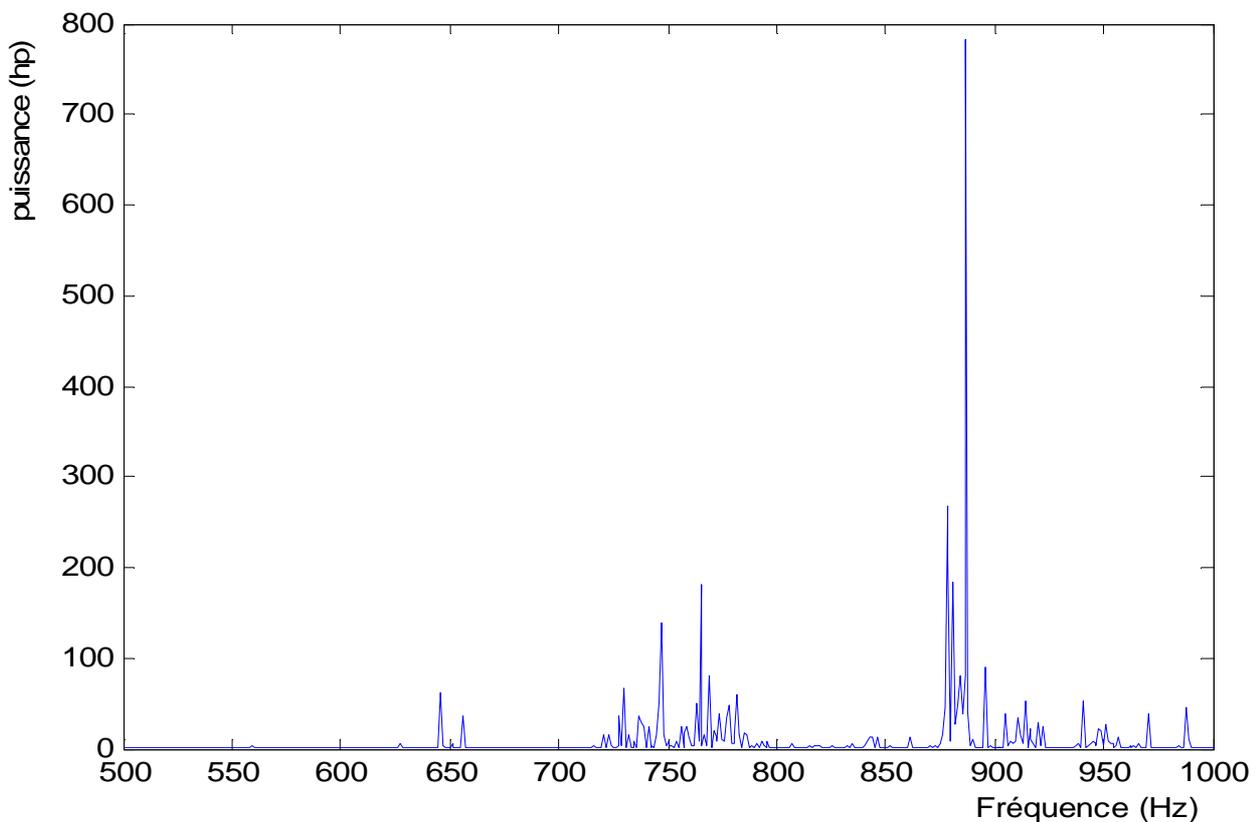


Figure III.8: Densité spectrale de puissance du signal $y_2(t)$.

Sur le spectre de cette figure, on constate l'existence de trois bandes fréquentielles réparties dans la plage variant de 500 à 1000 Hz.

Une série de pics autour de 650 Hz, une autre dans la bande [725 800] et une série étendue sur la bande [850 1000].

Si on compare les courbes représentant les densités spectrales de puissance des signaux $x(t)$ et $y_2(t)$, on constate une dissemblance qui sera illustrée par le spectre de la différence représenté par la figure III.9.

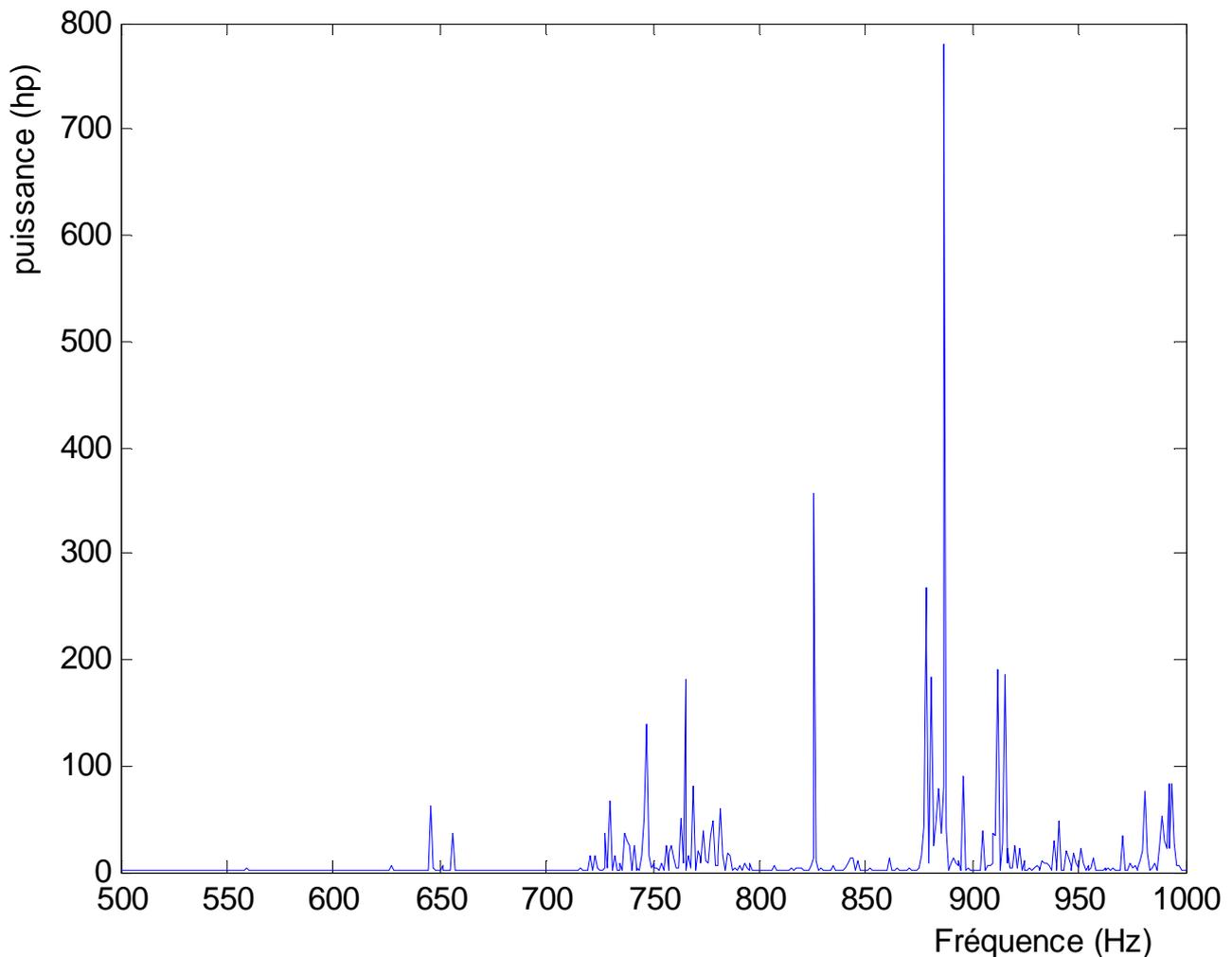


Figure III.9: Différence des densités spectrale de puissance des signaux $x(t)$ et $y_2(t)$.

La différence représentée par la figure III.9 est bien lisible sur la bande de fréquences variant de 700 jusqu'à 900Hz qui n'apparaît que dans le spectre de signal $y_2(t)$, et l'apparition de la bande [900 1000] commune aux deux spectres, revient à l'existence d'une différence entre les niveaux des amplitudes des composantes des signaux étudiés.

Comme c'est déjà mentionné précédemment, cette différence ne peut être expliquée que par la présence d'un défaut dans la machine, ou la défaillance de cette dernière.

Remarque :

Le spectre représenté sur la figure III.7 est différent de celui représenté par la figure III.9, ce qui montre qu'il s'agit de deux défauts distincts et pour le confirmer, on passe au calcul de quelques paramètres statistiques correspondants à chacun des deux.

Ce tableau récapitule les valeurs calculées des paramètres statistiques qui sont: Le maximum, le minimum, la moyenne et la variance. Et en comparant ces valeurs deux à deux, on constate bien qu'il s'agit de deux courbes différentes, c'est-à-dire deux défauts distincts.

Paramètre Spectre	Maximum (hp)	Minimum (hp)	Moyenne (hp)	Variance (hp)
Figure III.7	1084,4	$4,4008 \cdot 10^{-5}$	8,8416	2840,4
Figure III.9	2707,7	$1,1792 \cdot 10^{-5}$	21,609	14510

III.4.Traitement par la corrélation:

III.4.1.La notion de corrélation:

La corrélation est un autre outil de traitement du signal qui peut être utilisé pour mettre en évidence l'apparition d'un défaut, ou d'une défaillance de la structure à étudier, Elle représente un indicateur de la déformation du signal au cours du temps, car c'est une comparaison entre le signal et ses copies retardées.

Donc la corrélation est une grandeur qui permet de savoir si deux signaux aléatoires ont une relation entre eux, ou bien sont indépendants.

L'autocorrélation d'un signal x(t) est définie par :

$$C_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) x(t \pm \tau) dt \dots\dots\dots(III.9)$$

III.4.2.Propriétés de l'autocorrélation :

La fonction d'autocorrélation est :

- Paire: $C_{xx}(\tau) = C_{xx}(-\tau)$ (III.10)
- maximale pour $\tau = 0$.
- si $\tau \neq 0 : |C_{xx}(\tau)| \leq C_{xx}(0)$ (III.11)

$C_{xx}(0)$ représente la puissance moyenne du signal x(t)

III.4.3. La notion de l'intercorrélation:

Rien ne s'oppose à ce que l'on applique l'opérateur corrélation à deux fonctions aléatoires distinctes, c'est ce qu'on appelle l'intercorrélation. Elle est donnée par :

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t - \tau) dt \quad \dots\dots\dots(\text{III.12})$$

III.4.4. Propriétés de l'intercorrélation:

- On passe de $C_{xy}(\tau)$ à $C_{yx}(\tau)$ en changeant τ par $(-\tau)$.
- $C_{xy}(\tau) = C_{yx}(-\tau) \quad \dots\dots\dots(\text{III.13})$
- Elle n'a aucune propriété de parité ou d'imparité.
- En général, elle n'est pas maximale pour $\tau=0$.

- Et on a : $|C_{xy}(\tau)| \leq \frac{1}{2} [C_{xx}(0) + C_{yy}(0)] \quad \dots\dots\dots(\text{III.14})$

III.4.5. Caractérisation d'un défaut par la corrélation:

La valeur maximale de l'autocorrélation correspond à la puissance moyenne du signal, cette propriété nous a amené à utiliser l'autocorrélation comme étant un paramètre caractérisant le fonctionnement normal d'une machine ou l'apparition d'une anomalie dans cette dernière.

Si on calcule l'autocorrélation du signal normal $x(t)$, on obtient la courbe représentée sur la figure III.10.

La valeur de la puissance moyenne est obtenue au centre de la figure III.10, et elle vaut 1677 hp (1hp=0,746 kW) pour le signal $x(t)$ caractérisant le fonctionnement normal de la structure à étudier.

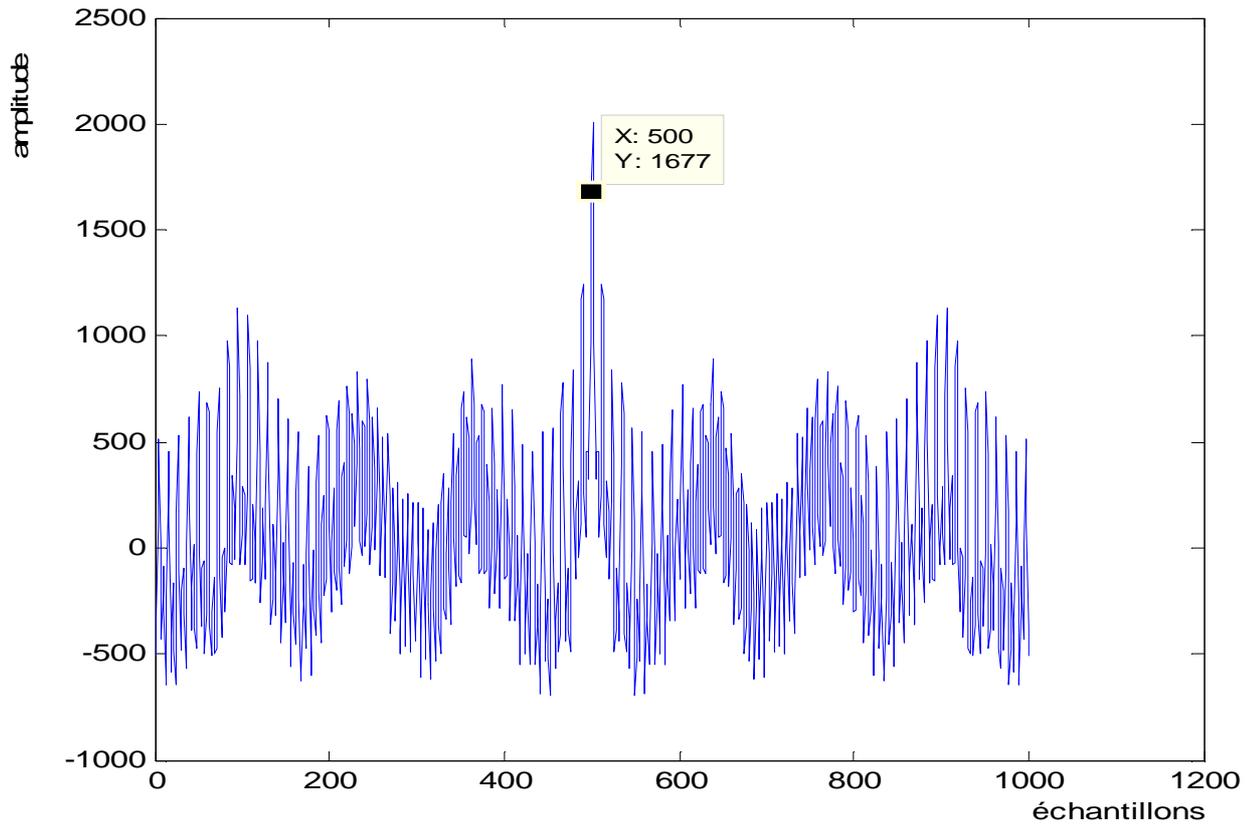


Figure III.10: l'autocorrélation du signal normal $x(t)$.

Si on applique de nouveau cette propriété de corrélation sur le signal $y_1(t)$ capté lors du mauvais fonctionnement de la machine, on aura la courbe représentée dans la figure III.11.

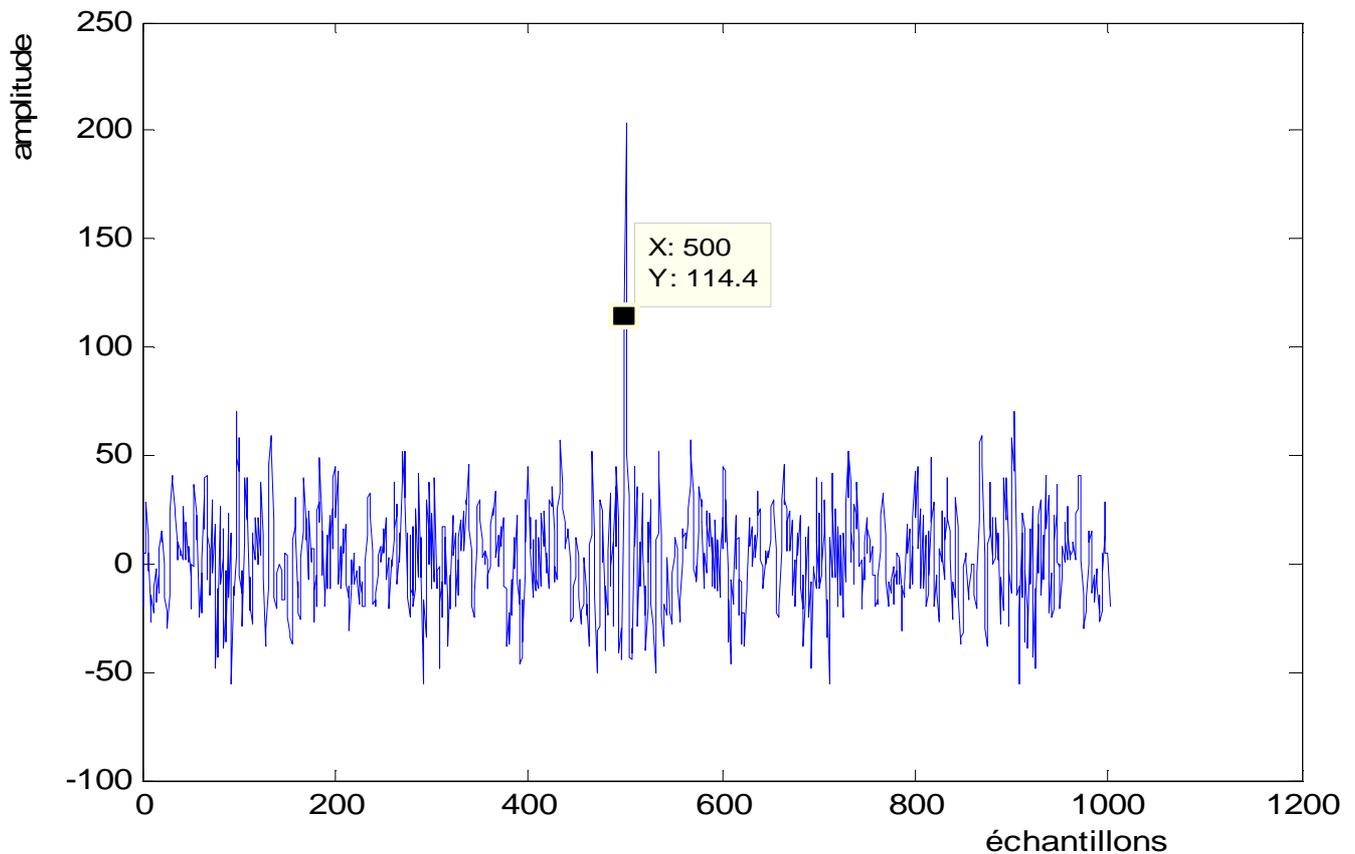


Figure III.11: L'autocorrélation du signal $y_1(t)$.

Pour le signal $y_1(t)$, la valeur de la puissance moyenne est de l'ordre de 114,4 hp, elle est obtenue au centre de la figure III.11.

La puissance moyenne 1677 hp est une valeur caractéristique de la machine lors du bon fonctionnement, et toute modification de cette valeur s'explique par l'apparition d'une anomalie dans la structure à étudier, si les conditions de mesure ont été fixées.

Cela nous permet de dire que le signal $y_1(t)$ présente un défaut, car la valeur de sa puissance moyenne est différente de celle de signal $x(t)$ qui est considérée comme une valeur de référence.

La figure III.12 représente l'autocorrélation du signal $y_2(t)$ qui nous permet de calculer sa puissance moyenne.

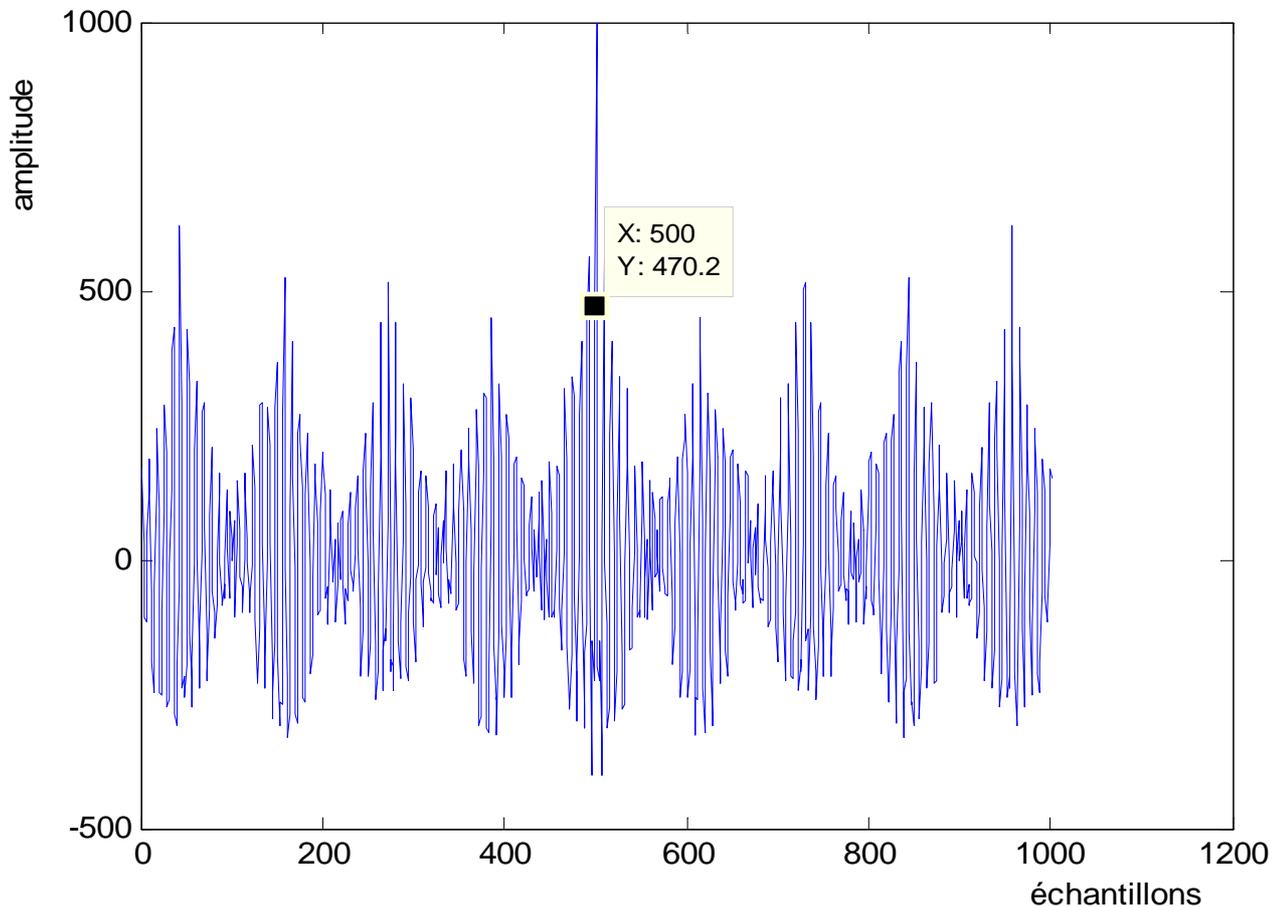


Figure III.12: L'autocorrélation du signal $y_2(t)$

Pour ce signal $y_2(t)$, la valeur de la puissance moyenne est égale à 470,2 hp.

La valeur de la puissance moyenne du signal normal $x(t)$ est différente de celle du signal $y_2(t)$ ce qui montre qu'il est capté lors d'un état du mauvais fonctionnement, donc présence d'un défaut.

D'autre part, on remarque qu'il y a une différence entre les allures et entre les puissances moyennes des signaux $y_1(t)$ et $y_2(t)$, ce qui prouve qu'il s'agit de deux défauts distincts.

L'intercorrélation peut être utilisée pour caractériser l'état du fonctionnement de la machine.

En calculant l'intercorrélation entre le signal de référence $x(t)$ et le signal $y_1(t)$, on aura le résultat représenté par la figure III.13.

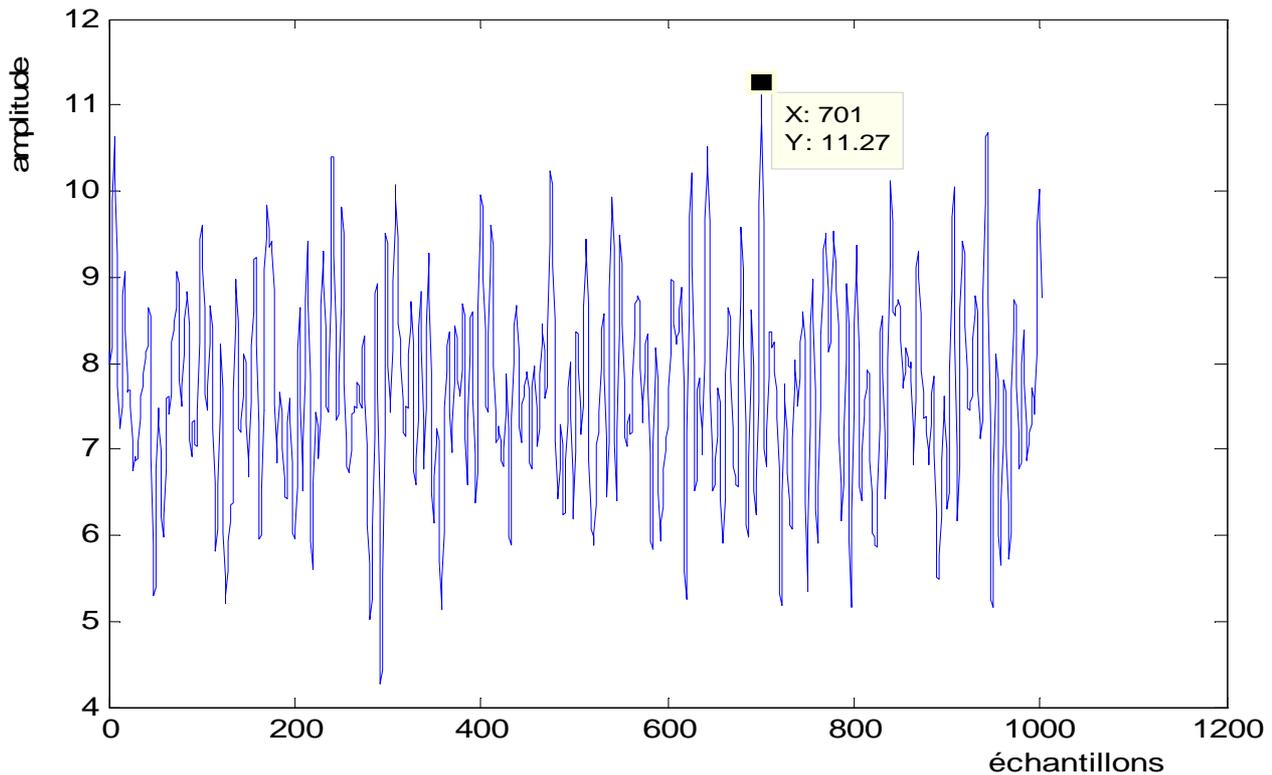


Figure III.13: L'intercorrélation entre les signaux $x(t)$ et $y_1(t)$.

L'intercorrélation entre deux signaux distincts devient une autocorrélation s'ils sont identiques.

On remarque que cette représentation n'est pas symétrique, et le maximum est décalé de 201 échantillons, ce qui montre que les deux signaux sont différents, ce résultat indique la présence de défaut.

La figure III.14 ci-dessous représente l'intercorrélation de même signal normal $x(t)$ avec un autre signal $y_2(t)$.

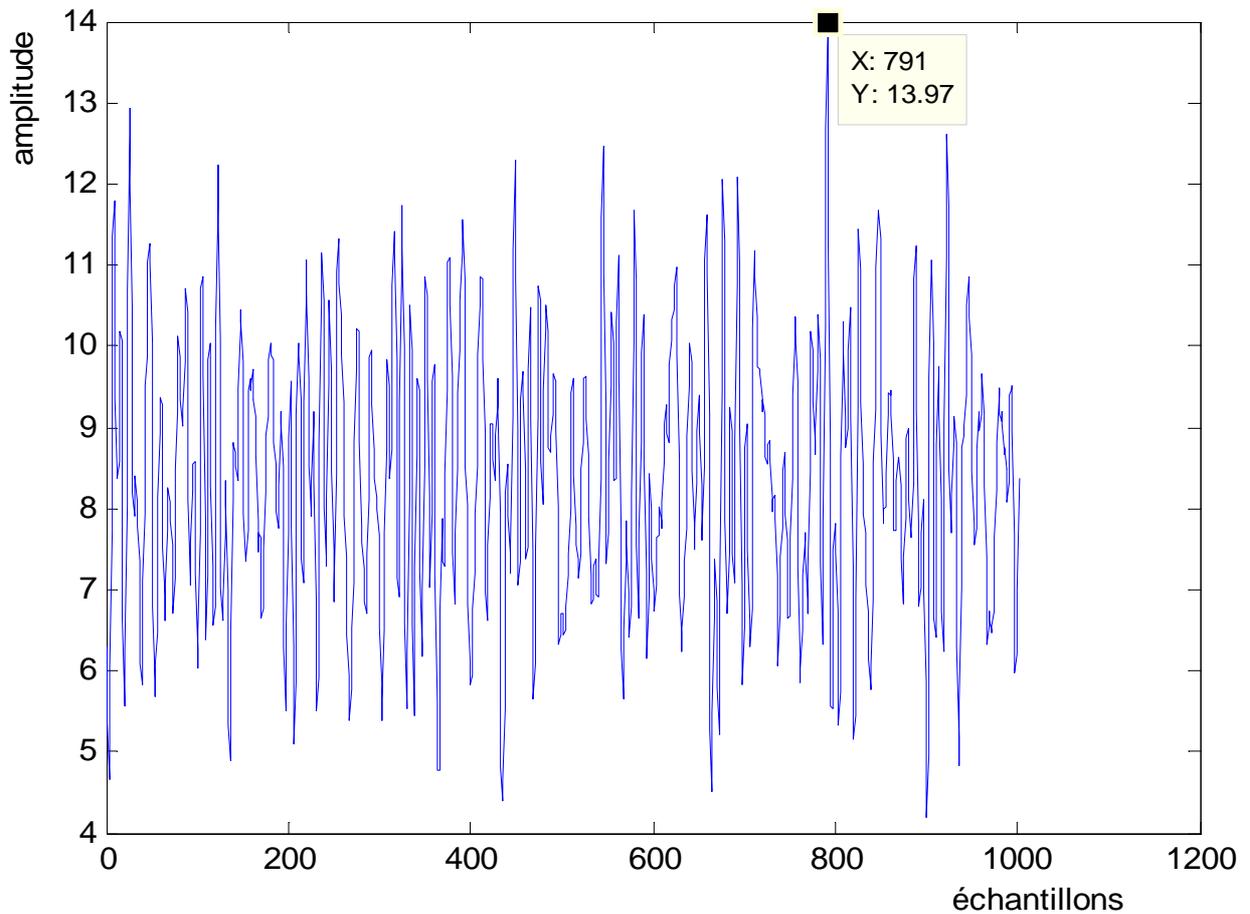


Figure III.14: L'intercorrelation entre les signaux $x(t)$ et $y_2(t)$.

Le décalage du maximum d'une valeur égale à 291 échantillons, indique qu'il s'agit d'une intercorrelation et non pas d'une autocorrelation, c'est-à-dire que les deux signaux $x(t)$ et $y_2(t)$ ne sont pas identiques.

Ce résultat peut nous indiquer qu'un défaut est présent dans le signal $y_2(t)$.

Remarque:

Les courbes représentées par les figures III.13 et III.14 montrent que les maximums sont décalés de deux valeurs différentes, ce qui prouve qu'il ne s'agit pas de même défaut.

Récapitulation:

	Signal normal x(t)	Signal défaut y ₁ (t) avec	Signal défaut y ₂ (t) avec
Puissance moyenne (hp)	1677	114,4	470,2
Décalage du maximum (échantillon)		201	291

III.5. Application de la méthode d'enveloppe pour la détection de défauts de roulement :

La méthode d'enveloppe est une technique utilisant la résonance haute fréquence du roulement, pour extraire l'information nécessaire à la détermination de la présence du défaut, et met en évidence cette information dans une plage fréquentielle normalement observée en analyse vibratoire (0-1500Hz).

Cette technique met en application la transformée d'Hilbert qu'on va définir ci-dessous.

III.5.1.La transformée d'Hilbert :

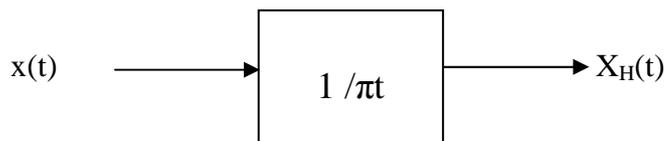
La transformation d'Hilbert s'utilise notamment en diagnostic industriel en présence d'un signal de la forme $x(t) = a(t)\cos(w_0t + \Phi)$, pour la détection de l'enveloppe $a(t)$ et de la phase instantanée $w_0t + \Phi$.

La transformée d'Hilbert notée $X_H(t)$ est définie par :

$$X_H(t) = TH(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \dots\dots\dots(III.15)$$

τ est une variable temporelle.

On peut constater que la transformée d'Hilbert est le produit de convolution du signal $x(t)$ et la fonction $w(t) = 1/\pi t$.



L'enveloppe du signal $x(t)$ est donnée par le module du signal analytique $y(t)$ tel que :

$$y(t) = x(t) + jx_H(t) \dots\dots\dots(III.16)$$

III.5.2. La modulation d'amplitude :

La méthode d'enveloppe utilise la modulation d'amplitude de la fréquence de résonance du roulement par la fréquence du défaut, la fréquence de résonance est modulée par la fréquence du défaut.

Le défaut produit une vibration à la fréquence de résonance, à l'instant de l'apparition de l'impact, l'amplitude des vibrations associée est maximale.

Ensuite, elle diminue au cours du temps, ce qui est dû à l'amortissement de la structure. L'impact est un phénomène périodique, se produit à une fréquence caractéristique du défaut. À chaque fois que le phénomène se produit, il génère une vibration à la fréquence de résonance.

Alors, l'amplitude de la vibration à la fréquence de résonance varie avec une période égale à la période de répétition de l'impact, caractéristique du défaut.

L'amplitude est modulée, donc il suffit d'interpréter le spectre fréquentiel (FFT) de cette enveloppe afin d'en retirer la fréquence des impacts, propres au défaut.

III.5.3. Les étapes de la méthode d'enveloppe :

En pratique, la méthode d'enveloppe demande une série de traitement du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat, se sont trois étapes essentielles qui peuvent être résumées comme indiqué par la figure ci-dessous.

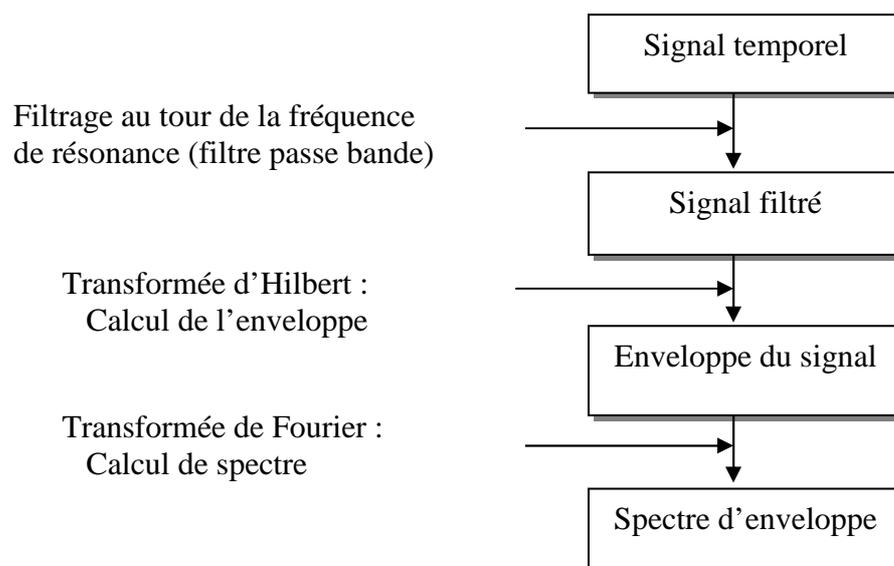


Figure III.15: Schéma de fonctionnement de la méthode d'enveloppe.

La 1^{ère} étape est le filtrage du signal afin d'éliminer les composantes indésirables, pour cela, on applique un filtre passe bande centré sur la fréquence de résonance de la machine, car l'apparition d'un défaut de roulement met la machine dans un état de résonance. Et pour la détection de ce type de défaut, on filtre notre signal de manière à ne laisser que la partie intéressante où se trouve l'information.

En suite, on passe à la transformée d'Hilbert pour le calcul de l'enveloppe du signal, qui se résume à une démodulation du signal qui est modulé par le défaut.

Et pour terminer, on applique la transformée de Fourier pour calculer le spectre de l'enveloppe qui nous permet la détection du défaut s'il existe.

III.5.4.Application :

On applique cette méthode sur les signaux définis précédemment, on aura les spectres donnés par les figures III.16, III.17 et III.18.

La figure III.16 montre le spectre de l'enveloppe du signal normal, après le suivi de toutes les étapes citées ci-dessus.

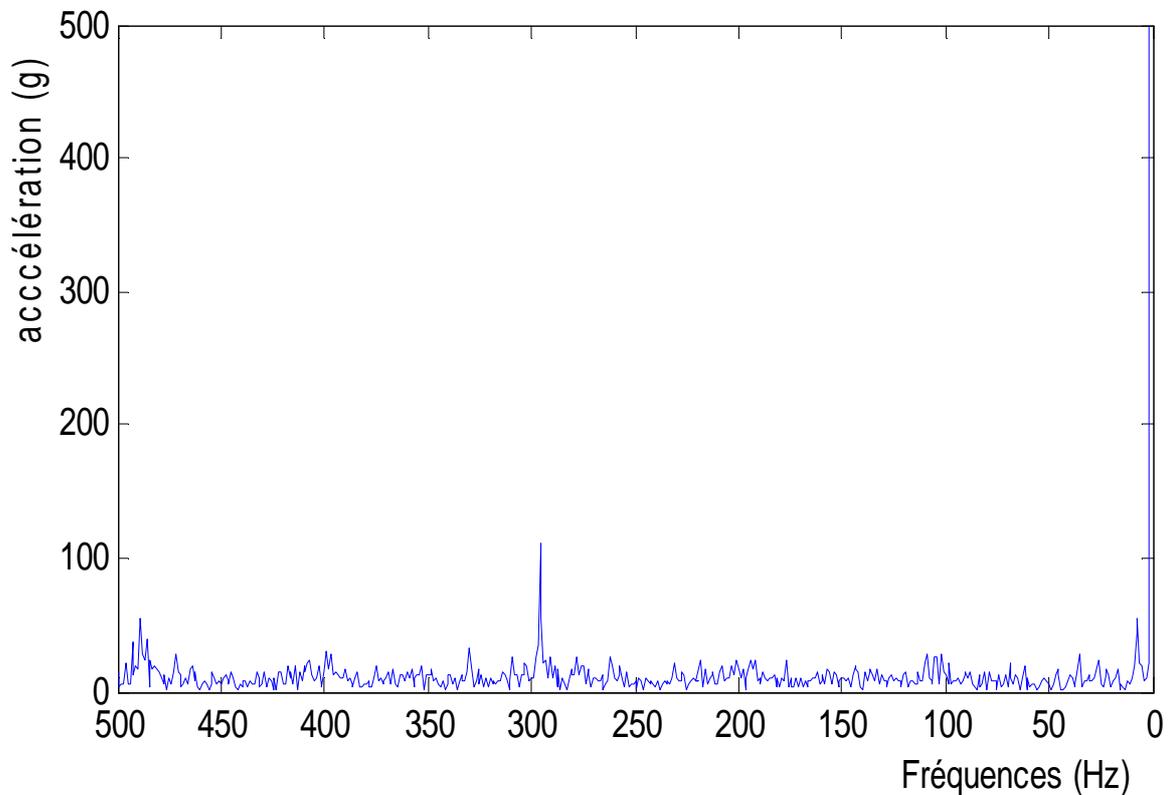


Figure III.16 : Spectre d'enveloppe du signal normal $x(t)$.

Sur cette figure, aucun pic important n'est constaté, seul un léger bruit de fond est présent. Ceci confirme que le roulement est neuf: il n'ya aucun danger. Ce spectre est en quelque sorte la référence du roulement: toute modification de spectre pour les mêmes conditions de fonctionnement peut être le signe d'une apparition d'un défaut

La figure III.17 est le résultat de l'application de la méthode d'enveloppe de premier signal avec défaut $y_1(t)$ (résultat de démodulation de signal $y_1(t)$)

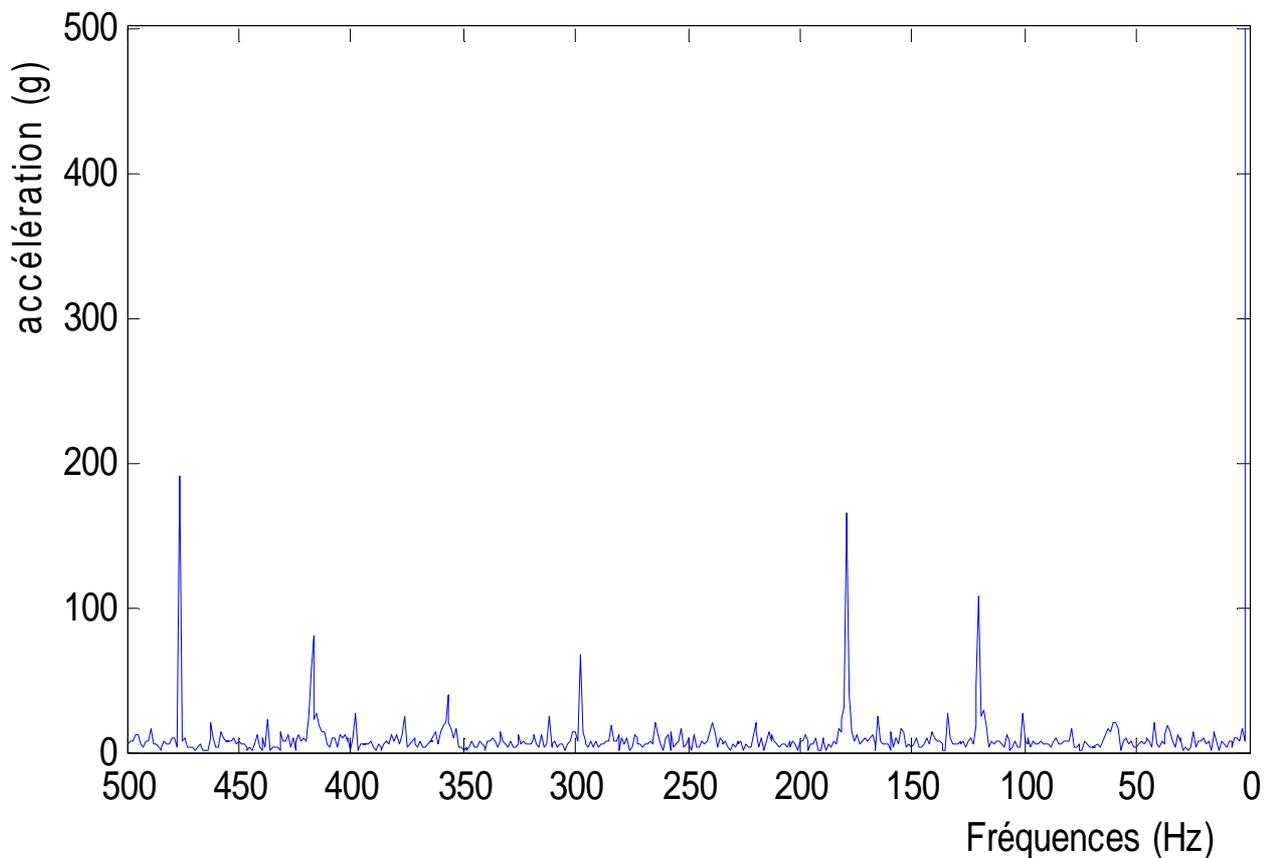


Figure III.17: Spectre d'enveloppe du signal $y_1(t)$.

Sur ce spectre, il apparaît clairement une série de pics, celle-ci correspond à la présence de défaut dans les roulements. Ces harmoniques se répètent à des intervalles égaux.

Avec ces seules informations, la présence du défaut est détectée.

La figure III.18 est le résultat de l'application de la méthode d'enveloppe sur le deuxième signal avec défaut $y_2(t)$ (résultat de démodulation de signal $y_2(t)$).

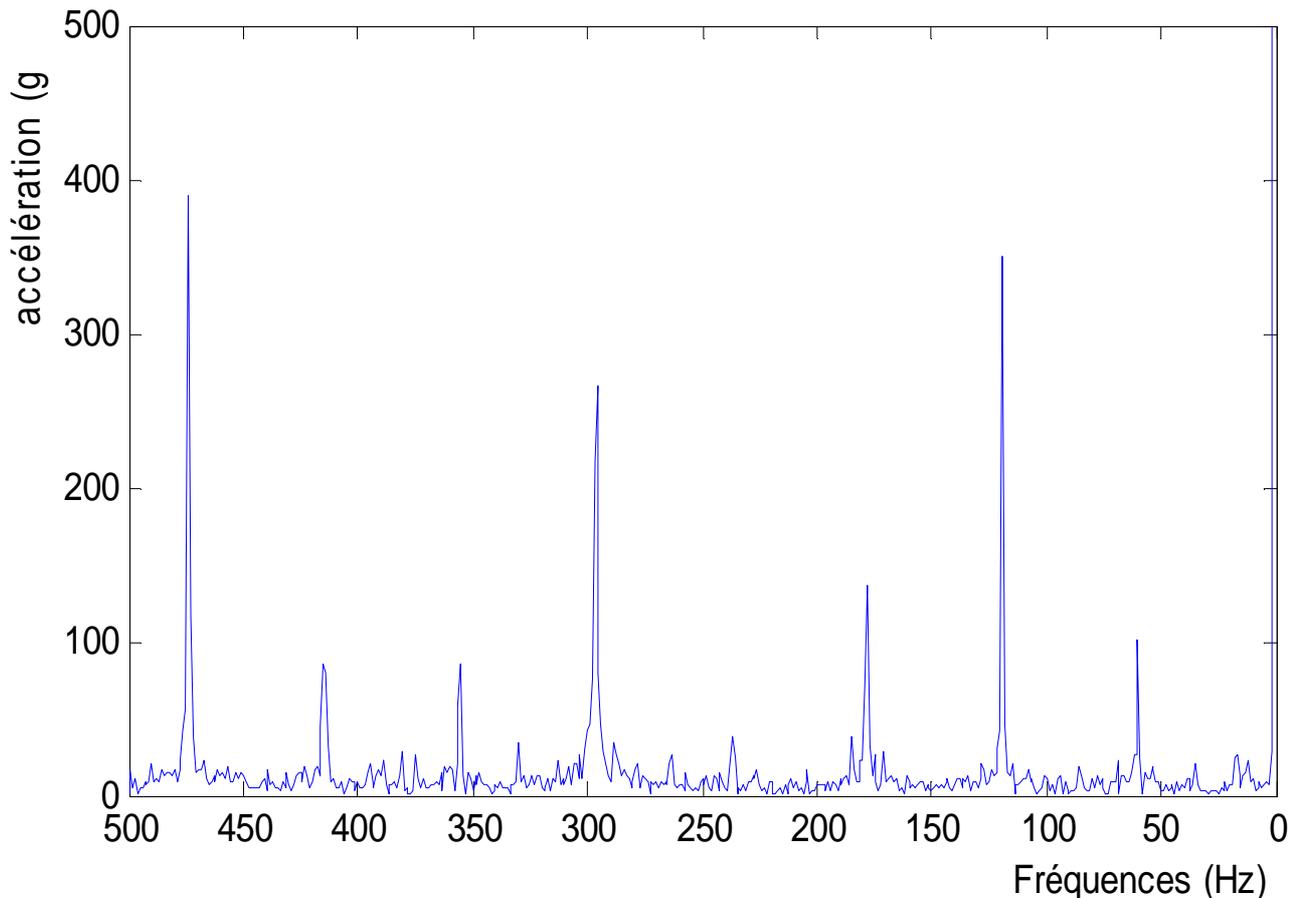


Figure III.18: Spectre d'enveloppe du signal $y_2(t)$.

Sur le spectre de la figure III.18, il apparaît clairement une série de pics, qui correspond à la présence du défaut.

En connaissant les fréquences propres de chaque élément constituant le roulement et en les identifiant sur le spectre, on arrivera à détecter le type du défaut.

Cependant, on constate toute une série de pics qui entoure cette fréquence, il s'agit en fait de la modulation de la fréquence propre par la fréquence de rotation.

III.6. Conclusion:

Ce chapitre nous a permis de détecter la présence de défauts dans les roulements en appliquant différentes méthodes qui sont basées sur différents outils du traitement de signal.

L'analyse spectrale et la corrélation nous ont permis seulement de détecter la présence de défaut sans le caractériser, par contre la méthode de l'enveloppe est efficace pour la détection et la localisation des défauts de roulement, en connaissant les fréquences de résonance de la structure à étudiée, et les fréquences caractéristiques des impacts.

Le diagnostic des défauts des machines tournantes par analyse vibratoire est une tâche difficile qui demande des outils pointus en matière de traitement de signal et un personnel qualifié pour mener à bien tout travail de recherche d'anomalies. En outre, cela nécessite la bonne connaissance de la machine et de son historique afin de répertorier les défauts susceptibles de l'affecter ainsi que les méthodes à entreprendre pour les surveiller. La relation entre défaut et phénomène observé n'est pas biunivoque et c'est là justement où réside la difficulté de statuer sur l'existence de tel ou tel défaut.

Cette étude montre que l'analyse d'enveloppe est un outil efficace pour la détection précoce de défauts sur les roulements. Elle apporte une finesse d'analyse permettant d'obtenir un diagnostic précis.

Ce traitement permet d'éliminer les fréquences parasites ou les phénomènes qui ne se rapportent pas directement à la modulation et qui, par conséquent, créeraient des raies inutiles dans l'enveloppe. Cet outil est donc très intéressant pour le diagnostic des roulements car les fréquences de modulation sont révélatrices des défauts.

Cependant, un travail énorme reste à faire dans cette branche de maintenance qui n'a pas encore délivré tous ses secrets. Ses techniques sont récentes ce qui a fait que l'ensemble des symptômes associés à chaque défaut n'a pas encore pu être observé ou analysé de manière approfondie.

Bibliographie

Ouvrages

- [1] Alain boulanger, C. Pachaud
Analyse vibratoire en maintenance. Dunod, 2007.
- [2] Gilles zwingelstein
La maintenance basée sur la fiabilité
- [3] Gilles zwingelstein
Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels. Hermès
1995.
- [4] R. Toscano
Commande et diagnostic des systèmes dynamiques: modélisation, analyse, commande
par PID et par retour d'état, diagnostic. Ellipses 2005.
- [5] Georges Asch et coll.
Les Capteurs en instrumentation industrielle. Dunod 1991 .
- [6] J. Max
Méthodes et technique de traitement du signal et applications aux mesures physiques.
Masson 1985.
- [7] L. Bourgain, R.Dart, J. Bourgain
Machines tournantes et circuits pulsés: applications industrielles et médicales de
l'analyse spectrale. Dunod 1988.

Thèses

- [8] SARADOUNI Tarek et CHIHANI Hakim
Maintenance conditionnelle appliquée par un système d'aide au diagnostic, mémoire
d'ingénieur institut d'électronique UMMTO 2000.
- [9] LOUNIS Djedjiga et HALES Fatiha
Détection et classification des défauts des machines tournantes à l'aide des réseaux de
neurones, mémoire d'ingénieur institut d'électronique UMMTO 2003.
- [10] HAMMICHE SOFIAN
Surveillance et détection de pannes sur des machines industrielles, mémoire
d'ingénieur institut d'électronique UMMTO 2005.
- [11] BELAID KAMEL

Méthodes de suivi et de diagnostic des défauts des machines tournantes par application de la transformée en ondelettes, magistère en mécanique appliqué UMMTO 2007.

Sites internet.

[12] <http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/CWRUFlash.htm>

[13] <file:///G:/defaut%20de%20roulem.htm>

Les types de maintenance:

Dans le monde industriel, le concept de maintenance a évolué d'une simple maintenance corrective qui consiste à replacer les organes défectueux en une maintenance préventive ayant pour objet de réduire la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. On peut distinguer trois stratégies de maintenance préventive, ce qui est représenté le diagramme suivant:

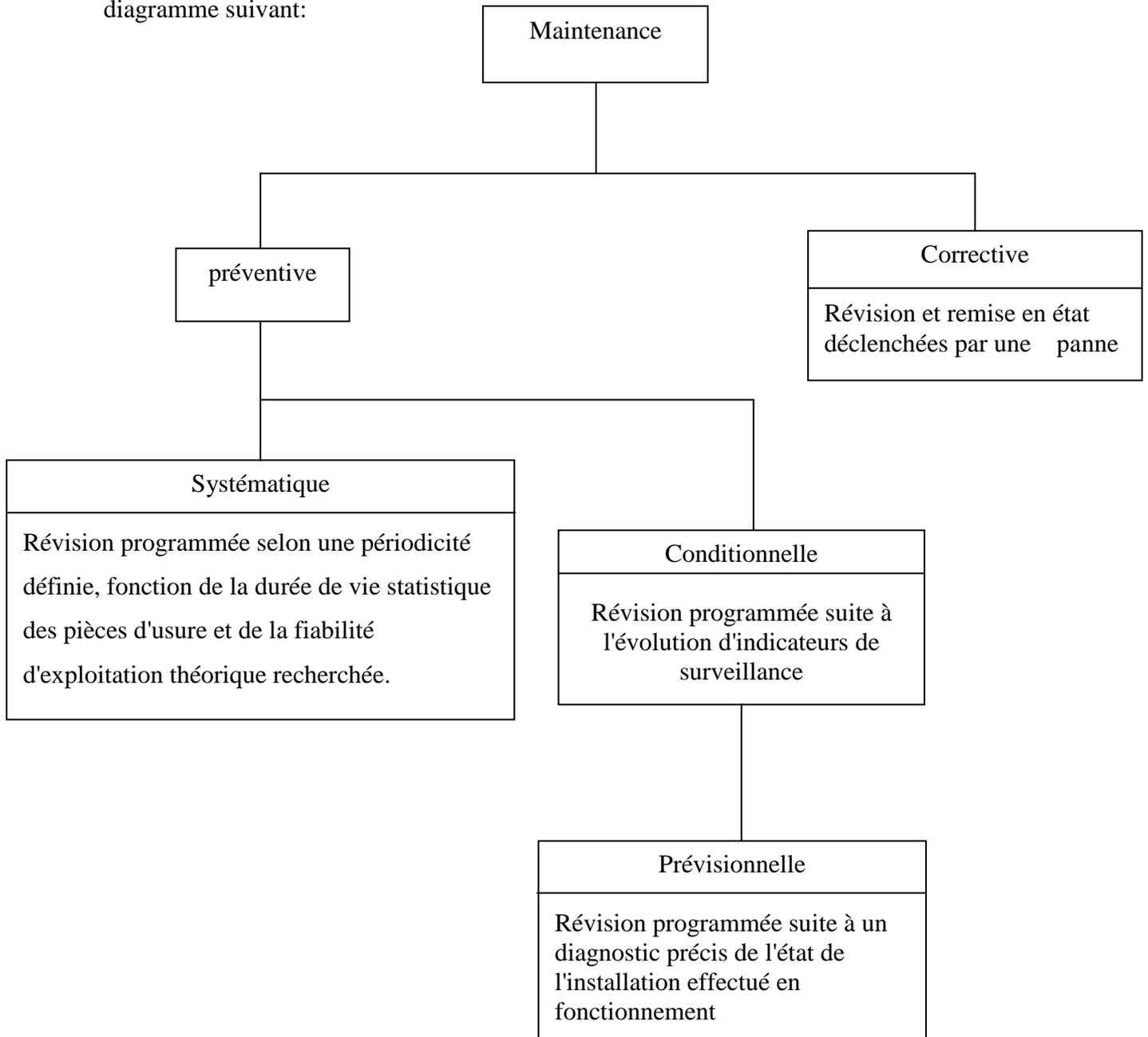


Figure. I. Les stratégies de maintenance

Pour effectuer un bon diagnostic, il faut disposer d'informations significatives sur les défauts à détecter.

Dans les machines tournantes les défauts les plus fréquents sont:

Balourd:

Un balourd est un défaut d'équilibrage d'une pièce tournante autour d'un axe.

Il existe trois types de balourd:

Balourd statique:

Un balourd statique apparaît quand le centre de gravité d'un rotor ne coïncide pas avec le centre géométrique de la machine.

Balourd couple:

Le centre de gravité coïncide avec l'axe géométrique, mais les vibrations sont causées par un couple résultant de masses excentrique mais diamétralement opposées.

Balourd dynamique

C'est la combinaison d'un balourd statique et d'un balourd couple, la forme la plus courante de balourd.

Alignement:

Il est possible de mettre en évidence deux types de défaut d'alignement: un délignage parallèle ou les axes accouplés sont parallèles, sans que ces axes ne coïncident ; un délignage angulaire dans lequel les axes forment un angle entre eux.

Jeux ou desserrage:

Le mauvais serrage de la structure peut être l'origine d'un défaut.

Défaut d'engrenage:

Les incidents caractéristiques des engrenages sont liés aux dégradations de la denture (denture cassée, abimée, usure uniforme, mauvais centrage).