

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des Systèmes Embarqués

THÈME

*Prédiction de défauts dans un système mécanique par
analyse du signal vibratoire*

Préparé par :

-Khadir Djennat.

-Benslimane Maarouf

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Université	Qualité
- Bessoltane. L.	MAA	U-Tiaret	Président
-Ghellab.A.E.K	MCB	U-Tiaret	Encadreur
-Benabid. H	MAA	U-Tiaret	Examineur

REMERCIEMENT

Remerciements :

Je remercie tout d'abord « Allah » qui m'a donné la force et le courage pour l'achèvement de ce travail.

Je tiens à remercier plus particulièrement mon directeur de thèse Monsieur ghellab Abdelkader, Maître de Conférence classe A à l'Université ibn khaldoun Tiarret , pour son aide, ses conseils pendant toute la période d'étude, et la gentillesse qu'il m'a exprimée pour mener à bien et parachever dans les meilleures conditions.

Je remercie Monsieur Bessoltane d'avoir accepté de présider le jury de ma thèse de master .

Je remercie Monsieur Benabid d'avoir acceptés d'examiner ce travail.

Je remercie également beaucoup ma Mère pour son soutien fort, son affection, son amour et sa sympathie.

je tiens à remercier aussi Mr toussaint « tissouma » pour leur aide durant la dernière année de master

Et aussi toute ma famille, pour leurs conseils très précieux et leurs encouragements durant la période de la réalisation de cette thèse. Ainsi que mes amis d'être a mes côtés (boulaem Ahlem et kaderi Suzanne et Berdjouh arwa et étalement mon. Binôme). Mes adorables sœurs (djihen) ikhlas). Mon petit frère (fateh-samir))Enfin, mes sincères remerciements à toute ma famille qui m'apporté le soutien moral pour accomplir ce travail.

Khadir Djennat.

REMERCIEMENT

Remerciements :

Nous tenons tout d'abord à remercier l'université "**Ibn Khaldoun**" de **TIARET**, spécialement le département de Génie électrique et tous nos enseignants.

Nous adressons également nos remerciements à Mr le président du jury et Mrs les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Comme, nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Mr. **Abdelkader ghellab** pour la qualité de son encadrement et pour leur soutien sa disponibilité et leur conseils nous ont été d'une grand utilité à fin de mener à bien notre modeste travail , nous avoir dirigés durant la période de préparation de notre mémoire de Master.

Je voudrais exprimer ma gratitude à ma famille, en particulier ma chère mère, mon cher père, mon frère et mes sœurs

Ma chère grand-mère qui a toujours été un grand partisan.

Je tiens également à remercier tous mes amis, sans oublier mon. Binôme

Et toute sa famille, qui était le soutien qui nous a fait faire le travail

Benslimane Maarouf

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
I.1. Introduction :.....	3
I.2. Les méthodes de la maintenance :	4
I.2.1 Opérations de la maintenance :	4
I.2.2 Opérations s’effectuant par étapes :	4
I.2.3 La maintenance corrective :	5
I.2.3.1 La maintenance corrective palliative :.....	5
I.2.3.2 La maintenance corrective curative :.....	5
I. 2.4. La maintenance préventive :	5
I.2-4.1 Objectifs de la maintenance préventive :	5
I.2-4.2 La maintenance préventive systématique :.....	5
I.2-4.3 La maintenance préventive conditionnelle :.....	5
I.2-4.4 La maintenance préventive prévisionnelle :.....	5
I.3. Techniques d'analyse :	6
➤ La thermographie infrarouge:.....	6
➤ Le contrôle par ultrasons :	6
➤ <i>L'analyse acoustique</i> :	7
➤ L’analyse vibratoire :	7
➤ L'analyse d’huile :	7
I.4 .Choix des techniques d'analyse :.....	7
I.5. Activités de l’analyse vibratoire :	10
I.5.1. La surveillance :	10
I.5.2. La détection :	10
I.5.3. Le diagnostic :	10
I.6 Les outils du diagnostic :	12
I.6.1 Analyse temporelle :.....	12
I.6.2Méthodes fréquentielles :	13
I.6.3 Analyse temps –fréquence :	14
I.6.4 L’analyse cepstrale :.....	14
I.6.5. Ondelette :.....	14
I .6.6 Analyse d’enveloppe :.....	15

TABLE DES MATIÈRES

I.7.Conclusion :	16
II.1-Introduction :	17
II.2- Transmission par engrenages :	17
II.2.1Engrenage :	17
II.2.2-Description :	18
II.3 - Comportement dynamique de transmission par engrenage :	18
II.4-La modélisation :	19
II.4.1-Défaut de fabrication :	19
II.4.2-Défauts de montage :	19
II.5- Les Différents types de détérioration des dentures d'engrenages :	20
a) L'usure :	20
b) Les piqûres (Pitting) :	20
c) L'Écaillage :	21
d) Le grippage :	21
e)Fissure en fatigue :	21
II.6-Modélisation d'un Train d'Engrenage et de Défauts de Dentures :	22
II.7- Modèles dynamiques de l'engrenage :	23
II.7.1- Equation différentielle :	24
II.8- Signal d'engrènement d'un train simple d'engrenage :	24
II.9-simulation des défauts d'engrenage :	27
II 9.1-Défauts localisés :	27
II.9.2-Le défaut réparti :	28
II.9.3-les Méthodes de Diagnostic des Réducteurs à Engrenages :	28
II.9.3.1- Analyse Spectrale :	29
II.9.3.2-Manifestation d'un défaut de denture localisé :	30
II.9.4-spectre d'un signal d'engrènement dans le cas d'un défaut répartis (fissure) dans plusieurs dents :	31
II.9.5- Le cepstre :	33
II.10-Conclusion :	36
III.1-Introduction :	37
III.2-Généralités sur l'analyse temps -fréquence : [BRU96] :	38
III.3- Problématique :	39
III.4-Représentations Temps Fréquence RTF :	39

TABLE DES MATIÈRES

III.5- Transformée de Fourier à courte terme « STFT » : [ale07]	40
III. 6 -Distribution de Wigner Ville WVD :	41
III .7-simulation et Analyse Temps Fréquence « STFT »de signaux d'engrenage sains et portant des défauts :	42
➤ Choix de La fenêtre :	42
III .7.1 – spectrogramme, représentation temps-fréquence fenêtre d'analyse de 64 pts d'un signal d'engrènement dans le cas d'un signale sans défaut et le signal variant sans défaut :	42
III .7.2 - spectrogramme représentation temps-fréquence, fenêtre d'analyse de 64 pts signal d'engrènement dans le cas d'un signale avec défaut :	44
III.8. - spectrogramme représentation temps-quefrence, fenêtre d'analyse de 64 pts du signal d'engrènement	47
III.8.1. Analyse temps-quefrence :	47
III .7-Conclusion :	50
Conclusion Générale et Perspectives :	51

TABLE DES FIGURES

TABLE DES FIGURES:

Figure 1.1 :Formes de maintenance. [DJE.13].....	3
Figure 1.2 .Différentes méthodes d'analyse [DJE.13]	6
Figure 1.3 :Schéma présentatif des activités de l'analyse vibratoire. [MOU10].....	9
Figure 1.4 : Chaîne et matériel d'acquisition.	12
Figure 1.5: A) Signal mesuré sur une machine[DJE.13].B) signal de engrenement.....	13
Figure2. 1: Surface usée d'une roue [jbil.17].....	20
Figure2. 2 : Présentation d'écaillage Duns engrenage	21
Figure2. 3: Présentation de grippage Duns engrenage	21
Figure2. 4 : Les Types d'engrenages utilisés dans l'industrie : (A) Engrenage parallèle, (B) Engrenage hélicoïdal, (C) Engrenage conique et (D) Roue et vis sans fin.	22
Figure2. 5 . : Système d'engrenage droit. [BEN18].....	23
Figure2. 6 : Modèle à deux degrés de liberté [jin14].	23
Figure2. 7 : Fréquences d'engrènement et ses harmoniques. [BEN18]	25
Figure2. 8 : Algorithmes signal d'engrènement	26
Figure2. 9:A) signal de engrènement présentant un défaut localisé sur une dent. B) zoom sur le défaut.	27
Figure2. 10 : signal d'engrènement présentant un défaut réparti sur quelques dents.	28
Figure2. 11 : spectre du signal vibratoire d'un engrenage	29
Figure2. 12 : Signal bruité d'un défaut combiné d'engrenage, (a) signal d'engrènement bruité, (b) son spectre et (c) zoom sur le spectre.....	30
Figure2. 13 : spectre du signale de engrènement présentant un défaut sur quelques dents	31
Figure2. 14 : différence (erreur) entre spectre sans défaut et spectre de défaut localisé (une dent).....	32
Figure2. 15 : différence (erreur) entre spectre sans défaut et spectre du signal variant sans défaut.	32
Figure2. 16 : le cepstre d'un signal d'engrangement sain et le cepstre d'un signal variant.....	34
Figure2. 17 :A) le cepstre d'un signal d'engrangement sain,B) cepstre d'un signal présentant un défaut localisé.....	35
Figure3. 1 : Schéma synoptique montrant la problématique de Représentations Temps Fréquence.	39
Figure3. 2 : : A) signal de engrènement sans défaut, B) spectrogramme sans défaut, C) signal de engrènement variant sans défaut , D) spectrogramme signal de engrènement variant et sans défaut.	43
Figure3. 3 :A) signal d'engrènement avec défaut localisé,B) spectrogramme signal d'engrènement avec défaut localisé	44
Figure3. 4 :A) signal d'engrènement avec défaut répartis,B) spectrogramme signal d'engrènement avec défaut répartis.....	45
Figure3. 5 : spectrogramme d'un signal d'engrènement dans 3 cas a) sans défaut. b) avec défaut localisé. c)avec défaut réparti.	46
Figure3. 6 : Cepstrogramme d'un signal d'engrènement :A) sans défaut, b) variant sans défaut.	48

TABLE DES FIGURES

Figure3. 7: Cepstrogramme signal d'engrènement avec défaut localisé.....	48
Figure3. 8 : Cepstrogramme du signal d'engrènement avec défaut réparti.....	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante [DJE.13] ... 9
Tableau 1.2 : Principales méthodes d'analyse vibratoire [DJE.13] 12

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

Une machine se compose d'un ensemble d'organes ou de pièces, assemblés et destinés à remplir une fonction déterminée (entraînement, freinage, etc.). Les défauts de ces organes ont une influence néfaste sur certains paramètres physiques mesurables, tels que les vibrations, le bruit, les courants électriques, la pression, etc. Un mécanisme ne peut fonctionner sans contraintes qui se manifestent sous forme de vibrations et tout changement de ces contraintes se traduira par une modification de l'amplitude ou des fréquences des vibrations. Ainsi, les défauts peuvent être décelés suffisamment tôt grâce à un suivi correct des niveaux vibratoires. Cette surveillance permet d'éviter une panne qui peut paralyser une partie de l'usine et conduire à une perte financière importante.

L'analyse de Fourier permet ainsi de mettre en relation les amplitudes et les fréquences des phénomènes vibratoires stationnaires. Certains défauts mécaniques sont représentés par des signaux transitoires de caractère non stationnaires caractérisés par des variations complexes du spectre. Ces défauts mécaniques ne peuvent être détectés dans les premiers stades de leur apparition par l'utilisation de la transformée de Fourier et les méthodes de filtrage classique. Cependant, le cepstre : une transformation de signal du domaine temporel vers un autre domaine analogue au domaine temporel en introduisant le logarithme à l'amplitude du spectre afin de distinguer les faibles valeurs d'amplitudes, est capable de distinguer quelques cas de confusion tel que la différenciation entre un signal variant (signal sain) et un signal présentant un défaut local (début de fissure).

D'après l'étude expérimentale effectuée, le spectre et le cepstre sont capables de détecter une existence de défaut mécanique en analysant le signal vibratoire. Souvent une simple détection ne suffit pas lorsqu'il s'agit des équipements embarqués et complexes d'où la nécessité de poursuivre le défaut afin d'établir un diagnostic suffisant pour prédire un défaut.

Pour les signaux non stationnaires, la représentation temporelle du signal ne donne pas une bonne perception des composantes oscillantes multiples et la représentation fréquentielle ne permet pas l'accès à aucune information sur la localisation temporelle des composantes fréquentielles. Pour avoir simultanément les deux informations en temps et en fréquence, les

INTRODUCTION GENERALE

représentations temps-fréquences et temps-échelle ont été proposées pour fournir des informations sur la variation des fréquences des signaux en fonction du temps.

Nous effectuons ainsi une analyse des signaux vibratoires pour prévenir leurs défauts. Nous effectuons, pour cela les tâches suivantes :

Dans le chapitre-1 nous présentons une synthèse des résultats bibliographiques sur deux parties :

La première partie. Est consacré à la recherche bibliographique une sur les généralités sur la maintenance prévisionnelle des machines tournantes et sur les différents outils d'aide à la décision sont présentées.

Pour cela, l'historique de la maintenance est rappelé pour illustrer la nécessité de chercher une forme de maintenance optimale capable d'améliorer la disponibilité des équipements productifs.

Ainsi, les méthodes de surveillance et de contrôle de l'état de fonctionnement des machines sont présentées ainsi que les différents outils d'analyse pour l'aide au diagnostic pour opter à la fin du chapitre aux méthodes préventives basées sur le traitement du signal vibratoires (spectrale, cepstrale, temps-fréquence). la deuxième partie concerne les défaillances causées dans les systèmes mécaniques

Dans le chapitre-2, nous étudions et mettons en œuvre le spectre et le cepstre tout en les appliquant sur des signaux d'engrènement simulés sains et avec différentes natures de défauts. Ainsi, nous avons mis en reliefs leurs biais et avantages à partir des quels nous avons décidé d'appliquer une analyse temps-fréquence et une analyse temps-quéfrencence (la quéfrencence est l'analogue de la fréquence pour un cepstre) afin de pouvoir établir un diagnostic précoce.

Le chapitre-3 est consacré pour la l'analyse temps-fréquence représentée par le spectrogramme et l'analyse temps-quéfrencence représentée par le cepstrogramme. Ces deux outils permettent non seulement d'établir une détection précoce de défaut mais aussi d'avoir un diagnostic de défaut permettant d'intervenir à temps et éviter ainsi l'intervention curative.

La conclusion générale dressera à la fin de ce mémoire le bilan du travail effectué.

Chapitre I Etude bibliographique

I.1. Introduction :

L'innovation industrielle a significativement évolué au cours de ces dernières années par la création des machines (petites ou grandes) plus sophistiquées et performantes les unes que les autres. Toutefois, à elle seule, cette innovation n'aurait pas atteint un tel niveau si la maintenance n'avait pas été prise en compte au fur du développement industriel.

En effet, la maintenance avait toujours comme objectif d'arrêter une machine en pleine détérioration avant que celle-ci ne subissent d'énormes dégâts susceptible de la rendre inutilisable pour les tâches dont elle était prédestinée.

Ou tout simplement de sonner le signal d'alarme. Cette procédure permet d'assurer la protection du système mécanique.

Dans ce concept, la maintenance doit assurer de façon unique son rôle initiale de sécurité en favorisant notamment l'identification précoce de défauts et l'observance de leur changement progressive.

Dans la référence [Bou.03], un organigramme descriptif des types de maintenance est montré dans la figure 1.1.

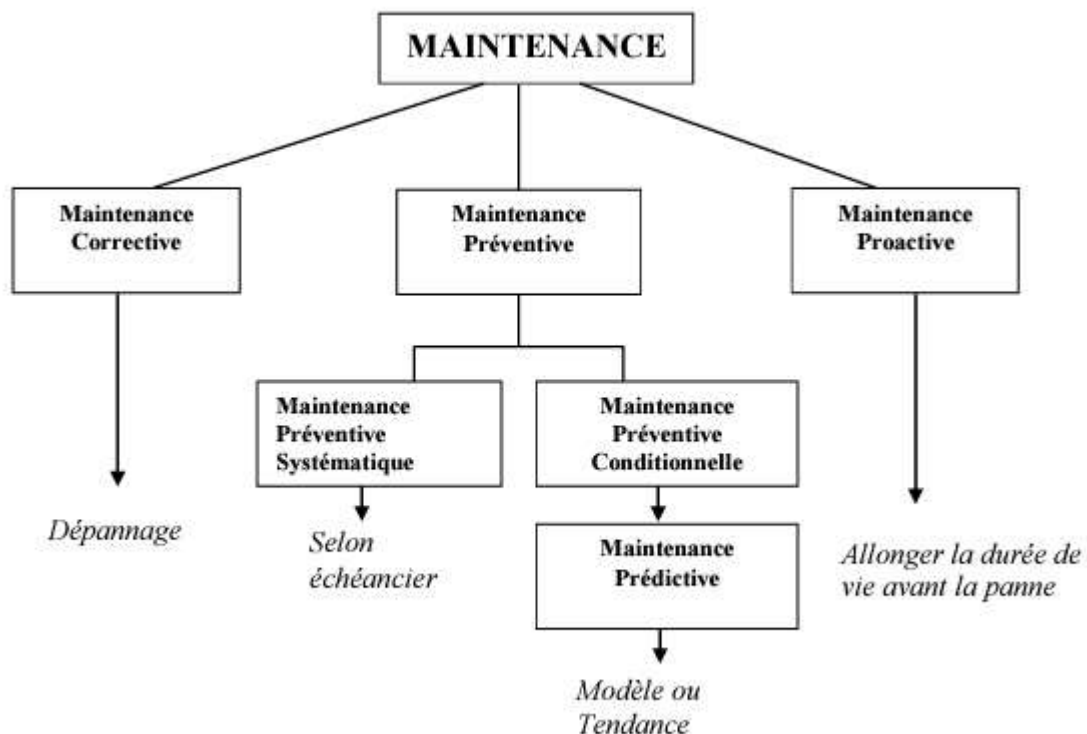


Figure 1.1 :Formes de maintenance. [DJE.13].

I.2. Les méthodes de la maintenance :

Les méthodes de maintenance les plus répandues sont : maintenance préventive systématique, maintenance préventive conditionnelle, maintenance corrective. Ces dernières ont des opérations de : inspection, contrôle, dépannage, réparation, etc. [nab20]

Pour choisir entre les méthodes de maintenance il faut donc connaître :

1. Les objectifs.
2. Les directions politiques de maintenance.
3. Le fonctionnement et les caractéristiques du matériel.
4. Le comportement du matériel en exploitation.
5. Les conditions d'application de chaque méthode.
6. Les coûts de maintenance.
7. Les coûts de perte de production

I.2.1 Opérations de la maintenance :

Après apparition d'une défaillance, l'ingénieur de la maintenance doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations, Ces opérations trouvent leurs définitions dans la norme NF X 60-010 et NF EN 13306 dont leur contexte est le contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un matériel ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements.[nab20]

I.2.2 Opérations s'effectuant par étapes :

Les étapes suivantes résument le scénario général que peut poursuivre une opération de maintenance :

- test : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de références ou a un phénomène physique significatif d'une marche correcte
- détection ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- localisation ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.
- Visite : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée)
- diagnostic : n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse afin d'indiquer les causes de la défaillance.
- dépannage, réparation ou remise en état (avec ou sans modification).
- contrôle du bon fonctionnement après intervention et vérification de la conformité à des données ,suivie d'un jugement.
- amélioration éventuelle : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- historique ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure

I.2.3 La maintenance corrective :

Définition : AFNOR (norme X 60-010) : «Opération de maintenance effectuée après défaillance ». La maintenance corrective correspond à une attitude de défense (subir) dans l'attente d'une défaillance . [Mess.19]

Elle correspondant à une action effectuée après la panne. Elle peut se décomposer en deux branches [Duc. 05] :

I.2.3.1 La maintenance corrective palliative :

L'action de dépannage permet de remettre provisoirement le matériel à un niveau de performance acceptable mais inférieur au niveau optimal.

I.2.3.2 La maintenance corrective curative :

L'intervention qui suit la défaillance permet le rétablissement du niveau de performance optimal du matériel.

I. 2.4. La maintenance préventive :

Maintenance prévenant le défaut, effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation d'un service rendu. [nab20]

I.2-4.1 Objectifs de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie du matériel.
- Diminuer la probabilité des défaillances et le temps d'arrêt
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Éviter les consommations anormales d'énergie,
- Améliorer les conditions du travail du personnel
- Diminuer le budget de maintenance.
- Éviter les causes d'accidents graves.

I.2-4.2 La maintenance préventive systématique :

Les dates de révisions sont déterminées à partir des durées de vie statistiques, ce type est adopté selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

I.2-4.3 La maintenance préventive conditionnelle :

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé). C'est la maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé. Un arrêt remis en état n'est décidé que si les valeurs des indicateurs de surveillance retenus ont dépassé des valeurs limites ou seuils prédéfinis. Cette technique s'appuie sur des paramètres physiques tels que la pression et la température, huiles, ... tension et intensité électrique, jeux mécaniques ... Etc.

I.2-4.4 La maintenance préventive prévisionnelle :

La décision d'intervention et son degré d'urgence reposent sur l'identification préalable du ou des défauts et sur l'estimation de leur gravité. Ce type de maintenance est exécuté en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du matériel [Mec. 05].

I.3. Techniques d'analyse :

Pour certaines machines productives. Des défauts peuvent s'avérer lourds ; de conséquent il faut éviter des arrêts imprévus et les pertes qui en découlent, il faut surveiller en permanence, réduire le nombre d'arrêt, augmenter le taux de disponibilité des machines et le plus important de fiabiliser l'outil de production. Pour cela il existe une variété de techniques d'analyse (figure 1.2) L'analyse vibratoire, l'analyse d'huiles, la thermographie infrarouge et l'analyse acoustique sont les principales techniques d'analyse des machines tournantes. Toutes ne permettent pas de détecter et étudier les mêmes types de défauts, ni de réaliser un diagnostic approfondi pour en connaître l'origine et la gravité. Le choix de telle méthode ou technique et son domaine d'application dépend du type et la criticité de la machine et le niveau de défaillance que l'on détecte.

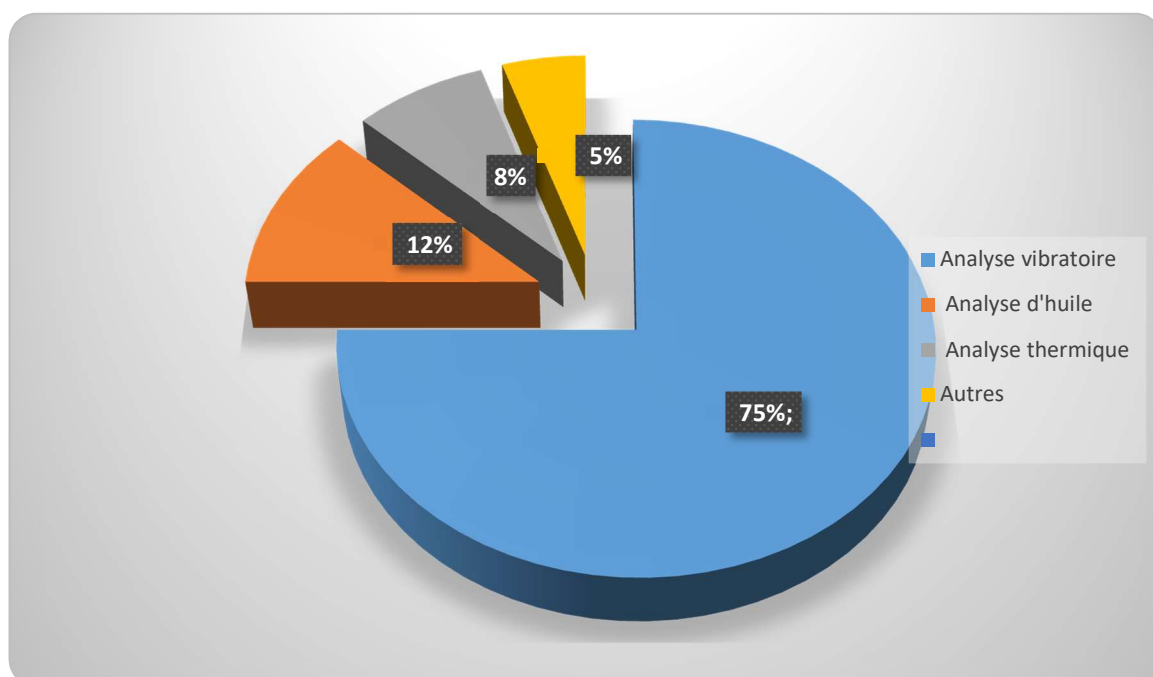


Figure 1.2 -Différentes méthodes d'analyse [DJE.13]

➤ La thermographie infrarouge :

Est la science de la détection de l'énergie infrarouge émise par un objet, de sa conversion en température apparente, et de l'affichage du résultat sous forme d'image infrarouge (à longueurs d'onde infrarouge qui ne sont pas visibles à l'œil nu). Ces tendances thermiques peuvent aider à identifier des composants qui se détériorent avant qu'ils ne tombent en panne.

➤ Le contrôle par ultrasons :

Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle non destructif qui repose sur le phénomène de réflexion des ondes acoustiques lorsqu'elles rencontrent, lors de leur propagation, des objets. L'onde sera renvoyée jusqu'à sa source d'origine si la discontinuité est dans une position normale par rapport au faisceau provoqué. [DJE.13]

➤ ***L'analyse acoustique :***

consiste à détecter tout bruit anormal à l'aide de microphones à distance de l'équipement. [MOU10] ;

➤ **L'analyse vibratoire :**

Consiste à analyser le comportement vibratoire de la machine en utilisant un accéléromètre appartenant à toute une chaîne d'acquisition. Ensuite l'analyse spectrale du signal vibratoire permettrait de détecter, localiser et identifier le défaut. Le même principe d'analyse peut être effectué sur l'intensité du courant électrique circulant ou induit.

➤ **L'analyse d'huile :**

Les analyses d'huile sont utilisées par les professionnels de la maintenance, elle est appliquée à toutes les machines contenant des fluides de lubrifications. Elle permet de mettre en évidence la présence de polluants et de pouvoir ainsi contrôler l'état mécanique général d'une machine lubrifiée (boîtes de vitesses, ponts, réducteurs, systèmes hydrauliques, etc.).

I.4 .Choix des techniques d'analyse :

L'examen ou le contrôle régulier de l'état des équipements représente un changement dans la manière d'organiser les tâches de maintenance dans le temps. Il s'agit de relever de façon périodique l'état de dégradation des machines. Ainsi plusieurs techniques d'analyse (Tableau 1.1) tels que : l'analyse vibratoires, l'émission acoustique, la thermographie, l'analyse des huiles et des lubrifiants, la variation de résistance dans un circuit électrique, etc.... Rappelons que le choix de l'indicateur est fonction du type de machines à étudier et du type de dégradations qui a été décelée. A l'exception des machines tournantes qui de façon fréquente, utilisent les indicateurs de type vibratoire pour détecter la plus part des défaillances constatées. [MOU10]

	Principaux avantages	Principales limitations	Champs d'applications privilégié
Analyse vibratoire	<ul style="list-style-type: none"> - détection de défauts à un stade précoce - possibilités de réaliser un diagnostic approfondi - autorise une surveillance continue - permet de surveiller - l'équipement à distance (télémaintenance) 	<ul style="list-style-type: none"> - spectres parfois difficile à interpréter - dans le cas de la surveillance continue, installations relativement coûteuses 	<ul style="list-style-type: none"> - détection des défauts de tous les organes - cinématiques de la machine (balourd, défauts d'alignement, jeux, etc..) et de sa structure.
Analyse d'huile	<ul style="list-style-type: none"> - détection d'une pollution anormale du lubrifiant, avant que celle-ci n'entraîne une usure ou un échauffement - - possibilités de connaître l'origine de l'anomalie par analyse des particules 	<ul style="list-style-type: none"> - ne permet pas de localiser précisément le défaut - nécessite de prendre de nombreuses précautions dans le prélèvement de l'échantillon 	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle des propriétés physico-chimiques du lubrifiant, détection d'un manque de lubrifiant, analyse des éléments d'usure.
Thermographie IR	<ul style="list-style-type: none"> - permet de réaliser un contrôle rapide de l'installation - interprétation souvent immédiate des résultats 	<ul style="list-style-type: none"> - détection de défauts à un stade moins précoce que l'analyse vibratoire 	<ul style="list-style-type: none"> - détection de tous les défauts engendrant un échauffement (manque de lubrification en particulier)

Analyse acoustique	<ul style="list-style-type: none"> - permet de détecter l'apparition des défauts audibles - autorise une surveillance continue 	<ul style="list-style-type: none"> - sensibilité au bruit ambiant - diagnostic souvent difficile à réaliser - problèmes de répétabilité des mesures 	<ul style="list-style-type: none"> - détection d'un bruit inhabituel pouvant ensuite être analysé par analyse vibratoire
--------------------	--	--	---

Tableau 1.1 : Différentes techniques d'analyse de l'état d'une machine tournante [DJE.13]

L'évolution non cessante des vibratoires techniques dans les domaines de mécanique et du traitement du signal les a rendus le pilier d'une stratégie de maintenance préventive conditionnelle.

C'est grâce à l'analyse vibratoire qui permet de faire un diagnostic plus fiable et plus rapide que cette technique ne se limite pas juste à détecter la présence d'un défaut lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration) fixe est atteint. Mais il est aussi nécessaire de pouvoir réaliser un diagnostic approfondi pour le localiser précisément et de quantifier sa sévérité. [MOU10] pour cette technique d'analyse a deux principales activités : la surveillance « la détection » et le diagnostic. (Figure. 1. 3)

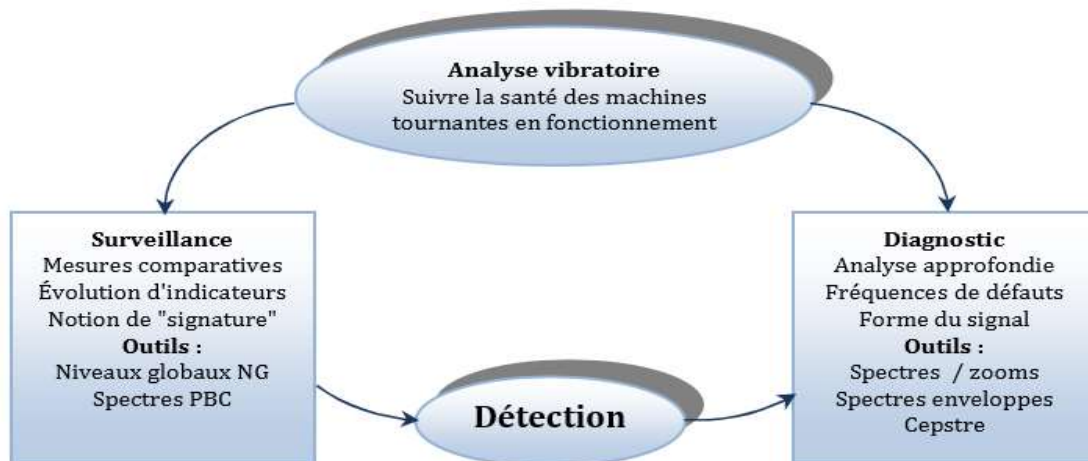


Figure 1.3 :Schéma présentatif des activités de l'analyse vibratoire. [MOU10]

I.5. Activités de l'analyse vibratoire :

I.5.1. La surveillance :

Suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations par rapport à des valeurs de référence d'après[MOU10].on distingue deux types de surveillance : surveillance «*On line* », les mesures des indicateurs soit de manière continue, et soit d'une manière périodique qui est la surveillance «*Off line* ».

I.5.2. La détection :

C'est la classification des situations observables comme étant normales ou anormales. Pour détecter l'apparition de défaillance d'un système.

I.5.3. Le diagnostic :

Identifier l'élément de la machine défectueux suite à l'analyse et interpréter les signaux vibratoires constatés lors de la mesures [Bad. 97].

Les principaux outils de traitement de mesures adaptés pour le suivi de comportement des machines tournantes qui peuvent être collectés par plusieurs techniques de détection et diagnostiquer l'apparition des défauts. Elles sont généralement classées en deux grandes familles (Tableau 1.2).

. tels que les outils sophistiqués du traitement de signal (l'analyse spectrale, cepstrale, l'analyse du signal enveloppe) pour les méthodes fréquentielles ainsi les outils statistiques tels que les indicateurs scalaires ou les niveaux globaux pour les méthodes temporelles.

	Principaux avantages	Principales limitations
Indicateurs vibratoires simples		
Niveau global (mesures d'accélération)	- indicateur simple et fiable	- détection tardive - diagnostic difficile - peu adapté aux faibles vitesses de rotation - détermination des seuils empiriques
Kurtosis (moment statique d'ordre 4)	- adapté à la surveillance des roulements des arbres tournant à de faibles vitesses de rotation (<600 tr/min) -déttection à stade précoce - grande sensibilité aux chocs périodiques et non périodiques	- décroissance de l'indicateur en fin de vie du roulement - diagnostic souvent difficile

Facteur de crête (rapport entre la valeur crête et la valeur efficace)	- indépendant des conditions de fonctionnement (dimensions des roulements, charge, vitesse de rotation)	- décroît lorsque les défauts se développent
Méthodes d'analyse vibratoire qualitatives		
Analyse temporelle	- adaptée aux faibles vitesses de rotation - permet d'analyser des phénomènes non périodiques (chocs aléatoires, chocs répétitifs à vitesses variable)	- diagnostic souvent difficile
Analyse fréquentielle	- permet de localiser les défauts et de réaliser le diagnostic fiable - ne nécessite pas de mesures supplémentaires	- interprétation des spectres parfois difficile - détection tardive - inopérant à vitesse ou charge variable
Analyse d'enveloppe	- détection de défauts à un stade précoce - permet de déterminer de manière fiable et rapide les fréquences de répétition des chocs	- interprétation des spectres parfois difficile - nécessite de connaître le domaine fréquentiel d'intérêt - inopérant si vitesse ou charge variable - généralement associée à d'autres indicateurs (le Kurtosis par exemple)

Analyse cepstrale	<ul style="list-style-type: none"> - met en évidence les composantes périodiques d'un spectre - permet de localiser et déterminer l'origine des défauts induisant les chocs périodiques - interprétation des spectres complexes 	- utilisation en complément d'autres techniques
-------------------	--	---

Tableau1. 2 : Principales méthodes d'analyse vibratoire [DJE.13]

I.6 Les outils du diagnostic :

le plus utilisé sont :

I.6.1 Analyse temporelle :

Cette méthode qui consiste à extraire des informations utiles des mesures réalisées est la plus simple et la plus facile. Cependant, la conséquence majeure de cette analyse est qu'elle ne permet pas l'identification de la source des défauts contenus dans le signal vibratoire acquis, souvent multi composants, dont une relation de modulation lie ses composantes temporelles multiple. Ce qui rend l'analyse temporelle difficile voir impossible. De ce fait, une analyse fréquentielle distinguant le comportement de chaque composant de celui d'un défaut éventuel.

- CAN : convertisseur analogique numérique

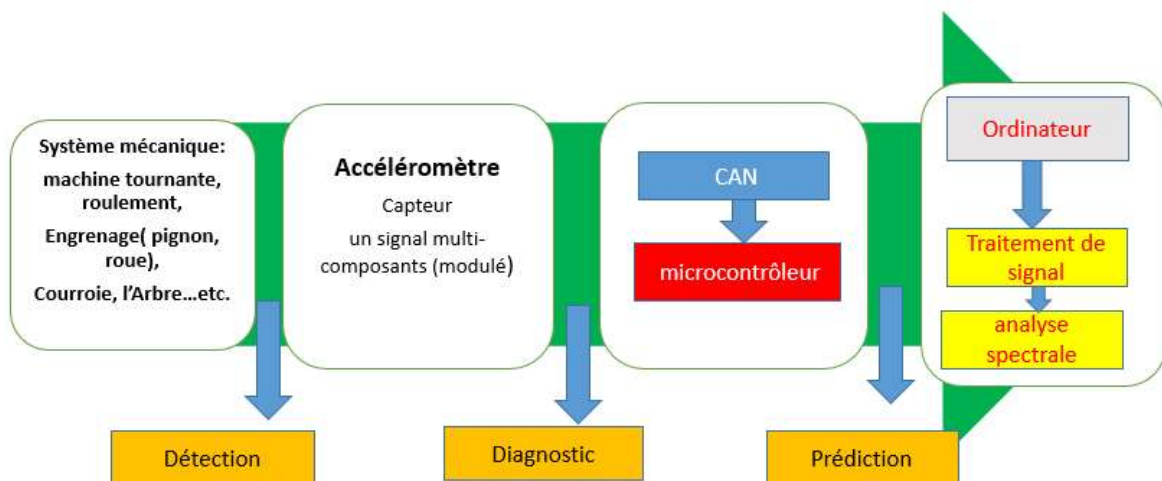


Figure 1.4 : Chaîne et matériel d'acquisition.

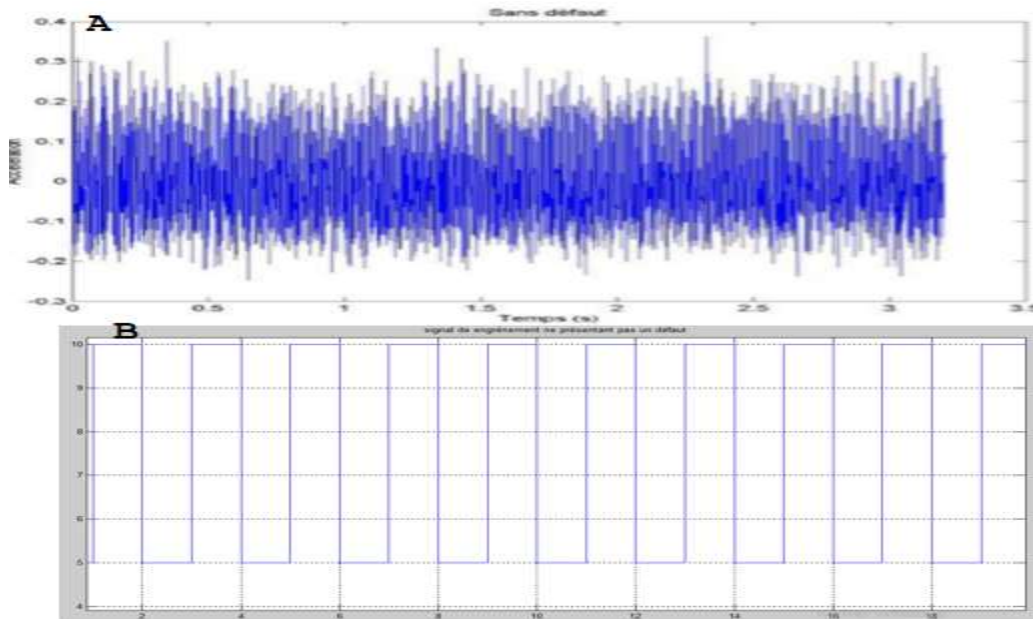


Figure 1.5: A) Signal mesuré sur une machine [DJE.13]. B) signal de engrenement

Remarques : Lorsque nous avons un signal multi-composants, il nous est difficile d'analyser une analyse temporelle donc nous avons recours à l'analyse fréquentielle afin de faciliter le processus d'analyse car nous avons une connaissance préalable de la fréquence de toutes les composants de la phrase mécanique.

I.6.2 Méthodes fréquentielles :

Analyse fréquentielle L'analyse fréquentielle ou l'analyse spectrale devenue un outil fondamental pour le traitement des signaux, elle montre les fréquences auxquelles se produisent des variations et leurs amplitudes aussi d'en trouver la source d'un défaut permet sa localisation, contrairement à l'analyse temporelle qui ne donne qu'une information globale. L'analyse fréquentielle s'appuie sur la transformée de Fourier qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. [BEN18]

$$X(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (1.1)$$

$X(k\Delta f)$ 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.

I.6.3 Analyse temps –fréquence :

L'analyse temps-fréquence contient des techniques qui étudient en même temps un signal dans les domaines temporel et fréquentiel en utilisant les diverses représentations temps-fréquence.

La motivation pratique dans l'étude temps-fréquence est que l'analyse par la transformée de Fourier classique suppose que les signaux sont infinis dans le temps ou périodiques, cependant que la majorité des signaux en pratique sont de courte durée et changent considérablement au cours de cette durée [MOU10]

I.6.4 L'analyse cepstrale :

Le « cepstre » (anagramme du mot « spectre ») est un opérateur mathématique qui, associé à un spectre, permet d'identifier et de quantifier immédiatement toutes les structures périodiques (peignes de raies ou familles de bandes latérales) contenues dans ce spectres [Big. 94]. Le cepstre est caractérisé par les amplitudes des composantes dont les quéfrences (anagramme du mot « fréquence ») correspondent aux périodes de répétition des chocs , Il est largement utilisé par la détection précoce à des stades plus ou moins avancés [DJE.13]

Et est un opérateur non linéaire ; elle se repose à partir du domaine temporel, sur le passage dans le domaine des fréquences, et à revenir dans le domaine temporel. Par définition : le cepstre est la transformée de Fourier inverse du logarithme du spectre de puissance. Il est donné par l'équation suivante : [MOU10]

$$C[S(t)]=TF^{-1}\log|TFS(t)|^2 \quad . \quad (1.2)$$

I.6.5. Ondelette :

La transformée en ondelettes (TO) dans les années 1980 à partir du travail de Jean Morlet proposa d'utiliser d'applications sismiques Ensuite, la T.O a connue de nombreux développements mathématiques [Dje. 08_b]. Cette technique possède le pouvoir de dilatation/compression et de translation de la fonction analysante que la fenêtre d'observation ne possède pas [Bou. 03]. Un signal peut s'écrire alors sous forme d'une superposition de telles ondelettes décalés et dilatées. Les poids de ces ondelettes dans la décomposition, appelés coefficients d'ondelettes, forment « la transformée en ondelettes ». La transformée en ondelettes remplace les sinusoïdes de la transformée de Fourier par une famille de translations et dilatations d'une même fonction appelée ondelette. Mathématiquement la famille d'ondelettes se met sous la forme : [MOU10]

$$\Psi_{a,b}(t)=\frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1.3)$$

Avec a et $b \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$;

L'ondelette mère $\Psi_{a,b}(t)$ permet de déduire toutes les fonctions $\Psi_{a,b}(t)$ de la famille d'ondelettes.

b détermine la position et a donné l'échelle.

Cas d'un signal : a est la fréquence et b le temps. [BEN18]

I .6.6 Analyse d'enveloppe :

En dépit de ses maints avantages, le principal inconvénient de l'analyse de Fourier est qu'elle se base sur l'hypothèse des signaux stationnaires, ce qui ne favorise pas de relier à une signature fréquentielle l'intervalle temporel où elle se produit. Dans l'optique de faire le rapprochement entre les concepts de temps et de fréquence, la plus facile des idées est d'analyser les changements progressifs et temporels d'un harmonique sur une fréquence donnée. Ce procédé s'appelle "analyse d'enveloppe". [DJE.13].

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié, en général, les méthodes d'interventions curatives et préventives dans un contexte comparatif tout en mettant en reliefs leurs biais et avantages.

L'analyse préventive s'avère plus fiable et rentable. Parmi les méthodes préventives, nous avons montré que la technique se basant sur l'analyse du signal vibratoire est la plus adaptée pour prévenir, détecter et diagnostiquer un défaut sur les machines tournantes.

Ainsi, nous avons montré les limites que présente l'analyse temporelle du signal vibratoire. Pour cela, nous optons pour l'analyse fréquentielle du signal vibratoire en vue de détecter, à un stade précoce, et de diagnostiquer d'éventuel défaut mécanique.

Le chapitre suivant fera l'objet de l'analyse fréquentielle des signaux d'engrenages en présence et absence de défaut.

Chapitre II Etude expérimentale comparative entre les méthodes

II.1-Introduction :

Les techniques à base d'analyse vibratoire sont largement les techniques les plus célèbres dans le domaine de détection des défauts des machines tournantes [BEN18]. Les engrenages, sont les organes fréquemment utilisés en industrie, travaillent dans des conditions en général sévères et sont par conséquent soumis à une détérioration progressive de leur état, notamment au niveau des dentures (usure, écaillage, fissure, rupture, ...). En général, il existe trois catégories de techniques de traitement du signal vibratoire pour le diagnostic de défauts des machines tournantes : les méthodes du domaine temporel, les méthodes du domaine fréquentiels et les méthodes temps-fréquence, on parlera sur ces trois points plus tard dans ce chapitre et dans le chapitre qui suit. Aussi, la grande source de vibrations est due au phénomène d'engrènement et à l'erreur de transmission qui sont des grandeurs utilisées pour caractériser les nuisances sonores et définir la qualité d'une transmission par engrenages.[Bad. 99]

Dans ce chapitre, nous effectuons une analyse spectrale et cepstrale sur des signaux simulés d'engrènement présentant différents défauts et mettons en reliefs les limites de ces techniques afin de trouver des remèdes dans le chapitre qui suit.

II.2- Transmission par engrenages :

L'engrenage est l'organe de transmission de puissance par excellence. Il est adapté aux objectifs de rendement, de précision et de puissance spécifique imposées dans les architectures mécaniques contemporaines. Cette partie traite d'un récapitulatif bibliographique sur la transmission d'engrenage simple étage et à deux étages. [Bad. 99]

II.2.1 Engrenage :

Ensemble de pièces mécaniques

Comportant des dentures et destinées à engrener ensemble.

Engrenage à axes parallèles :

Engrenages qui ont des axes parallèles.

Engrenage concourant :

Engrenages qui ont des axes formant un

Point d'intersection.

Engrenage gauche : engrenage qui a des axes ni parallèles,

Ni concourants à la rotation

II.2.2-Description :

Le profil le plus connu est celui en

Développante de cercle, fréquemment utilisé en mécanique générale ; le profil en épicycloïde était le plus usuel dans les mécanismes horlogers, car pour les petits nombres de dents, la dent est plus épaisse à la base.

Il existe différents types de dentures

Les dentures droites ;

Les dentures hélicoïdales ;

Les dentures à chevrons (Citraën) ;

les engrenages à collets.

On distingue également plusieurs types d'engrenages :

Les engrenages à axes parallèles ;

À axes concourants ;

À axes non concourants - incluant les engrenages à roue et vis

Sans fin - et les engrenages à pignon et crémaillère.

Le mécanisme à engrenage le plus vétuste est la machine d'Anticythère.

En horlogerie, ne pas confondre avec mobile,

Assemblage d'une roue montée sur son pignon.

II.3 - Comportement dynamique de transmission par engrenage :

Le comportement dynamique de transmission par engrenages est sine qua none afin d'atténuer le bruit et les vibrations. De ce fait, plusieurs études se sont penchées sur la description de la dynamique du système d'engrenage. Singh et al. [Sin89]

ont mis au point un nombre important de modèles mathématiques non linéaires et linéaires de système physique générique pour comprendre, quantifier et contrôler la vibration et le bruit d'une transmission manuelle à cinq vitesses, et ils ont suggéré des critères de hochet et démontré leur application. [BON07], ont développé une méthode d'analyse des vibrations non linéaires des engrenages cylindriques présentant des défaillances de fabrication dans le but de comprendre l'effet des erreurs de profil et de sa variance sur la vibration de l'engrenage. [Gil09] a fait la description analytique du comportement linéaire des paires d'engrenages en se basant sur le modèle de déformation élastique par contact direct et parvient à la conclusion selon laquelle la viscosité a un impact important sur le comportement des systèmes à engrenages. Maintes études traitent du comportement vibratoire des engrenages avec et sans défauts.

[Bad. 99] a proposé deux nouveaux indicateurs pour le diagnostic des réducteurs complexes à engrenages. Ces derniers sont obtenus du cepstre d'énergie des signaux accélérométriques prélevés sur ces réducteurs. Les signaux issus de simulations numériques et sur des signaux réels ont permis la validation de ces indicateurs. Lesdites simulations sont issues d'un modèle mécanique déjà disponible, elles ont favorisé la réalisation d'une étude paramétrique des défauts de type écaillage en dentures droites et hélicoïdales et aussi de faire émerger la signature temporelle

II.4-La modélisation :

Des engrenages en tant qu'une véritable équation à résoudre, constitue encore le sujet des études très poussés. Cependant, une abondante littérature traite du comportement des engrenages cylindriques droits et hélicoïdaux depuis les trente dernières années. Maintes études ont porté sur la modélisation numérique du comportement vibratoire des engrenages avec et sans défauts. Pendant la survenance d'un défaut dans les engrenages ou la détérioration d'une dent, leur comportement vibratoire change. L'importante source de vibration dans les engrenages est en premier lieu engendré par l'engrènement. D'autres impacts s'ajouteront et modifieront la réponse vibratoire notamment la flexion des dents qui change la ligne d'action, les défauts de montage (jeu, mauvais alignement), les défauts de fabrication des engrenages (excentricités, erreur de profil, surface des dents), le mauvais montage (désalignement, déséquilibre, serrage, . . .). En conséquence, n'importe quel seuil de variation de ces facteurs influence fortement le comportement dynamique des engrenages. [BEN18].

Selon les données analysées sur les raisons mécaniques de défaillances et la localisation des défauts dans les transmissions de puissance par engrenage permettent de conclure que les dents constituent les organes les plus fragiles. Les raisons de défaillances observées sont multiples à savoir : les défauts de fabrication de l'appareil, ensuite les défauts de montages et de fonctionnement du mécanisme en engrenage. La maintenance préventive régulière permet la détection des défauts. La première étape d'une démarche de surveillance est de se poser la question les types de défauts susceptibles d'être rencontrés sur les appareils surveiller. La deuxième étape consiste à connaître les manifestations de ces défauts, c'est à dire quelles informations, quels paramètres descripteurs du défaut faut-il élaborer et mesurer afin d'avoir les informations nécessaires qui permettront de déterminer si la situation est normale ou non etc... Les récentes travaux de recherches démontrent que les modulations d'amplitude A sont introduites par un défaut d'excentricité. [BEN18].

II.4.1-Défaut de fabrication :

Les défauts de fabrication, appelés aussi écarts de forme, sont liés principalement à la génération de dentures [Bren. 03] , [MIN18] ont étudié l'effet des défauts de fabrication sur le comportement dynamique d'une transmission par engrenage à deux étages à denture.

II.4.2-Défauts de montage :

Les défauts de montage sont liés à la phase d'assemblage des divers composants du réducteur. Pour le cas de dentures droites, le défaut le plus rencontré est le défaut d'entraxe. Ce type de défaut n'est pas introduit sous forme d'une force extérieure d'excitation par contre, il va provoquer un changement des paramètres d'identification du modèle. [Gue. 16]

II.5- Les Différents types de détérioration des dentures d'engrenages :

a) L'usure :

L'usure est un phénomène local. Il se distingue à travers un enlèvement de matière causé par le glissement de deux surfaces parallèles. L'évolution de l'usure est fonction de la charge et de la vitesse de glissement en chaque point des surfaces de contact, ainsi que de la présence à peu près important d'éléments usants dans le lubrifiant. L'usure normale, évolue lentement, et est en revanche proportionnelle à la consistance de la surface de la denture. L'usure anormale se manifeste lors de la souillure du lubrifiant par de particules abrasives ou lors de la corrosivité du lubrifiant. Elle aboutit à un dysfonctionnement de l'engrenage, voire à l'abandon de son utilisation.

[Bad. 99]



Figure2. 1: Surface usée d'une roue [jbil.17]

b) Les piqûres (Pitting) :

Il s'agit de trous superficiels portants préjudicieux à toutes les dents. Le pitting est une avarie qui se manifeste principalement sur des engrenages en acier de construction relativement moins solide. La crainte est minime si la viscosité du lubrifiant est élevée. La survenance des piqûres est aussi fonction de l'épaisseur de film lubrifiant sur rugosité composite insuffisante pour avorter des contacts entre aspérités.

c) L'Écaillage :

Il se caractérise par des trous plus ou moins nombreux, plus profonds et plus étendus que ceux des piqûres. L'écaillage est présent dans les engrenages cémentés les plus connus à l'heure actuelle puisqu'ils tolèrent de passer des couples importants avec de faibles dimensions. Ledit engrenage ne présente en réalité aucun phénomène d'usure, l'écaillage, qui représente le réel défaut, progresse de façon rapide vers la rupture. La cause est connue : la pression superficielle est trop importante.

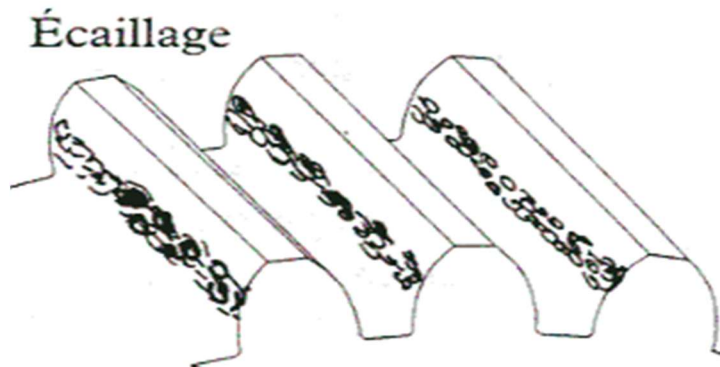


Figure2. 2 : Présentation d'écaillage Dans engrenage

d) Le grippage :

Il est le résultat immédiat de la destruction violente du film d'huile engendré par la température qui résulte d'un frottement sous charge. Le grippage est né principalement des vitesses élevées, de gros modules et un faible nombre de dents en contact. L'état physico-chimique du lubrifiant et les conditions de sa mise en service influencent fortement la probabilité de grippage. [BEC7]

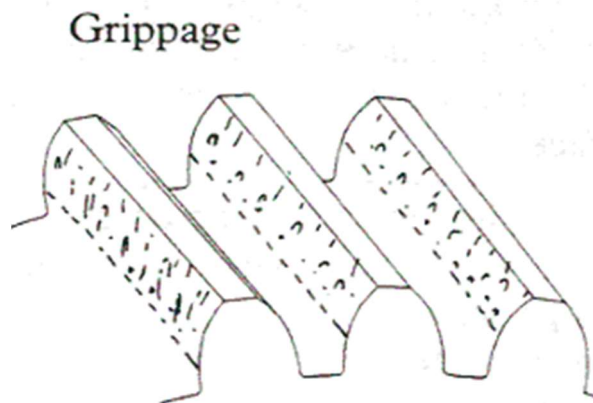


Figure2. 3: Présentation de grippage Dans engrenage

e) Fissure en fatigue :

Les fissures en fatigue se produisent fréquemment dans les endroits où les obstacles sont très importants, dans les arrondis des pieds des dents, du côté où la dent est sollicitée en traction. Ces fissures affaiblissent les dents, notamment en s'incurvant pour rejoindre l'autre côté de la dent diminuant ainsi la solidité de cette dernière. De façon générale, ce type de fissure commence au creux d'une piqûre de contact située autour de la région de forte sollicitation en flexion. [BEC7]

II.6-Modélisation d'un Train d'Engrenage et de Défauts de Dentures :

Les réducteurs (ou multiplicateurs) à engrenages (figure 2.4)Sont nombreux et les plus connus en mécanique, ils existent dans tous types d'industries, notamment en Automobile (boîtes de vitesse), en aéronautique (hélicoptères), en cimenteries et en raffineries. Ce sont des éléments mécaniques très demandés sur le marché, compliqués à dimensionner et à réaliser (calcul, choix et traitement des matériaux, taillage des dents, . . .), qui peuvent présenter des défaillances limitant leurs durées de vie. [MOU10].

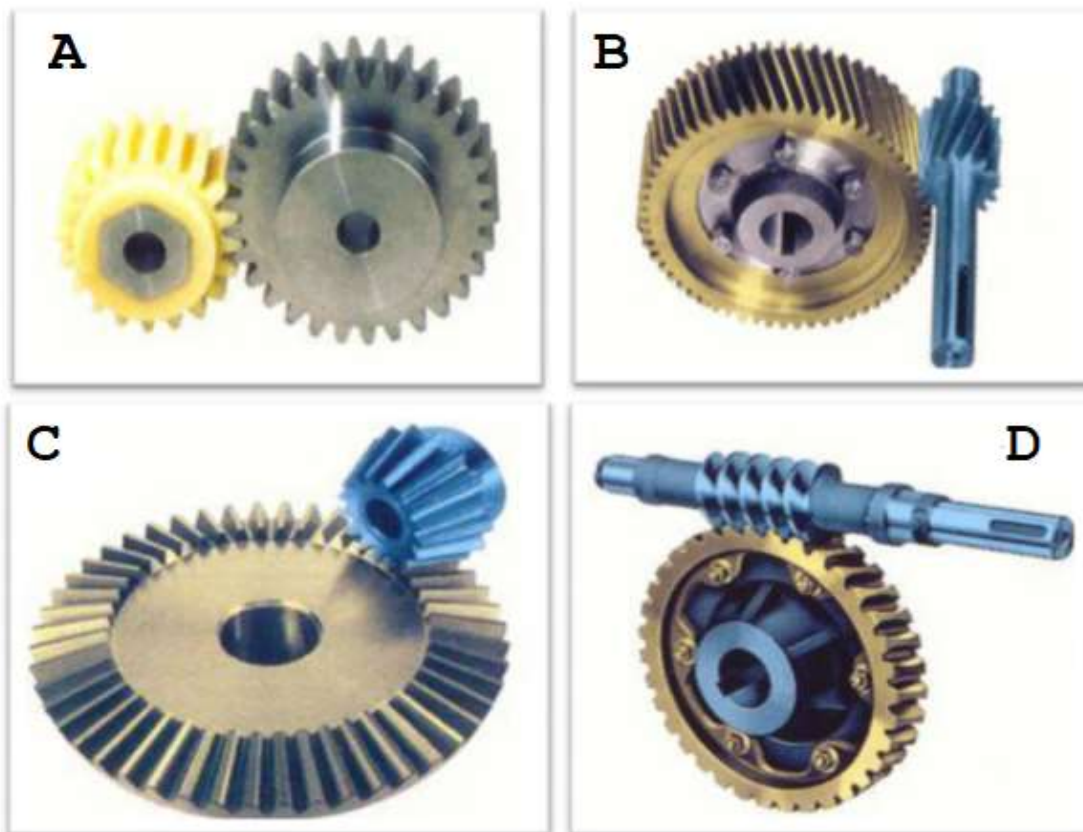


Figure2. 4 : Les Types d'engrenages utilisés dans l'industrie : (A) Engrenage parallèle, (B) Engrenage hélicoïdal, (C) Engrenage conique et (D) Roue et vis sans fin.

II.7- Modèles dynamiques de l'engrenage :

Système d'engrenage : Le système étudié est schématisé par la figure 2.5, le modèle représenté est une transmission par engrenage à un simple étage de dentures droites. [BEN18].

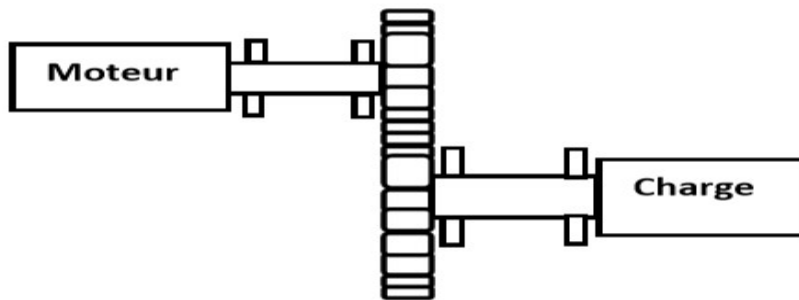


Figure2. 5 . : Système d'engrenage droit. [BEN18].

Le système est composé d'un moteur, d'une paire d'engrenage droit et d'une charge

Dans notre modèle, le système d'engrènement est modélisé par un modèle à deux degrés de liberté (Figure 2.6), représenté par un amortissement

$C(t)$: un amortissement et un ressort

$K(t)$: un ressort

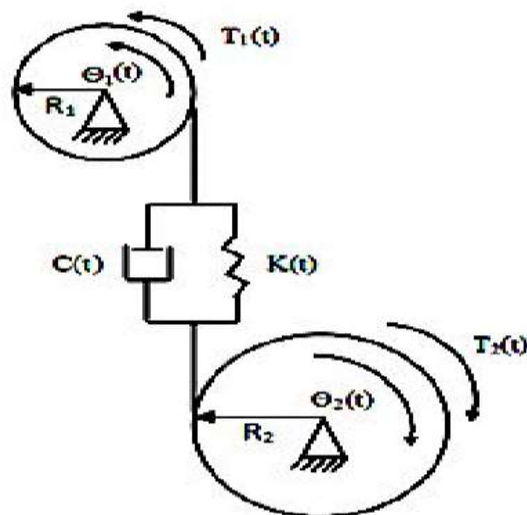


Figure2. 6 : Modèle à deux degrés de liberté [jin14].

II.7.1- Equation différentielle :

(Analyse dynamique non linéaire) Le comportement dynamique du système de transmission par engrenages, peut être représenté par un système d'équations

Différentielles sous forme :

$$m\ddot{U}(t)+c\dot{U}(t)+kU(t)=F(t) \quad (2.1)$$

Où m, c, k représentent respectivement la masse, l'amortissement et la rigidité et F(t) la force d'excitation $\ddot{U}(t)$, $\dot{U}(t)$ et U(t) représentent respectivement l'accélération, la vitesse et le déplacement. . [BEN18].

II.8- Signal d'engrènement d'un train simple d'engrenage :

Une simple transmission par engrenage peut être modélisée par un système à deux degrés de liberté, un pour le pignon et le deuxième pour la roue. Pendant l'engrènement, les dents opposent une raideur de la flexion et un couple d'amortissement visqueux qui dépend généralement du temps selon qu'un seul ou bien deux couples de dents sont engagés lors de la transmission du mouvement [MOU10] Les vibrations d'un engrenage sont produites principalement par le choc entre les dents des deux roues qui le composent. Ces vibrations, sont traduites par un signal appelé « signal d'engrènement » [mob 99].il est périodique, et sa fréquence d'engrènement est égale à la fréquence de rotation de l'une des deux roues, multipliée par le nombre de dents de cette roue, Mathématiquement donné par l'expression suivante :

$$S_{en}(t)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_e(t - n \times \tau_e) \quad (2.2)$$

$$\tau_e = \frac{T_1}{Zr_1} - \frac{T_2}{Zr_2} \quad (2.3)$$

$S_e(t)$ est le signal produit par le passage d'une dent au point d'engrènement

$\tau_e = 1/F_e$: est la période d'engrènement,

Zr1 : Le nombre de dents du pignon.

Zr2 : Le nombre de dents de la roue.

F_e : La fréquence réelle de l'engrènement. [MOU10]

Signal d'engrènement est modulé en amplitude et en fréquence à la fois par un signal périodique de période égale à la période de rotation du pignon, et un signal périodique de période égale à la période de rotation de la roue et sa fréquence.

La fréquence d'engrènement est égale à la fréquence de rotation de l'une des deux roues Multipliée par le nombre de dents de cette roue.

Si nous considérons un engrenage composé de deux roues dentées 1 et 2 et

Présentant Z1 et Z2 dents et tournant aux fréquences f1 et f2 respectivement.

$$F_{eng} = f_1 \times Z_1 = f_2 \times Z_2$$

Si la denture est correcte, le spectre est constitué de composante dont les fréquences correspondent à la fréquence d'engrènement et ses harmoniques [54], figure 2.7

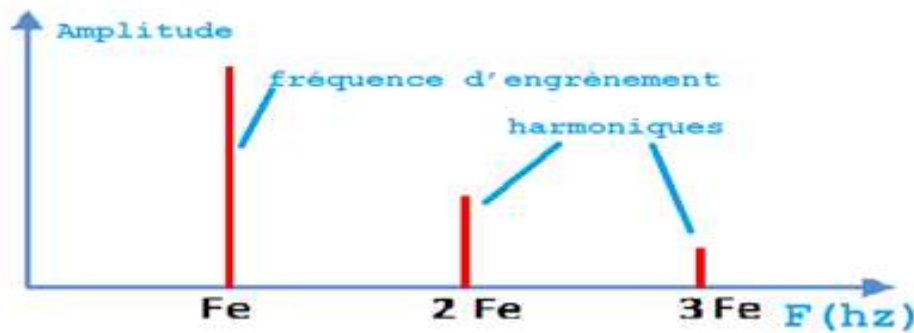


Figure2. 7 : Fréquences d'engrènement et ses harmoniques. [BEN18]

De plus ce signal d'engrènement est modulé en amplitude et en fréquence à la fois par un signal Périodique de période égale à la période de rotation du pignon, et un signal périodique de période égale à la période de rotation de la roue

En global la modulation de fréquence est beaucoup moins importante que la modulation D'amplitude. En négligeant les modulations de fréquence, on peut utiliser le modèle établi par :[Bad. 99]

$$S_e(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_c(t - nT_e) \cdot (1 + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} S_{p1}(t - mT_{p1}) + \sum_{p=-\infty}^{+\infty} S_{r1}(t - pT_{r1})) \quad (2.4)$$

T_e : Période d'engrènement

$T_{p1} = N1 \times T_e =$: période de rotation du pignon et $N1$ est le nombre de dents du pignon

$T_{r1} = N2 \times T_e$: Période de rotation de la roue et $N2$ est le nombre de dents de la roue $s_c(t)$: signal d'engrènement

S_{p1} : signal périodique de période T_{p1} induit par la rotation du pignon

S_{r1} : signal périodique de période T_{r1} induit par la rotation de la roue. [Bad. 99]

Par des programmes conformément aux étapes ci-dessus dans le logiciel MATLAB

La fonction FFT peut être appelée directement dans le logiciel MATLAB. Il est donc facile de transformer le résultat d'une réponse dans le domaine temporel en réponse à un domaine fréquentiel. Programmée de façon itérative selon l'algorithme décrit ci-dessous :

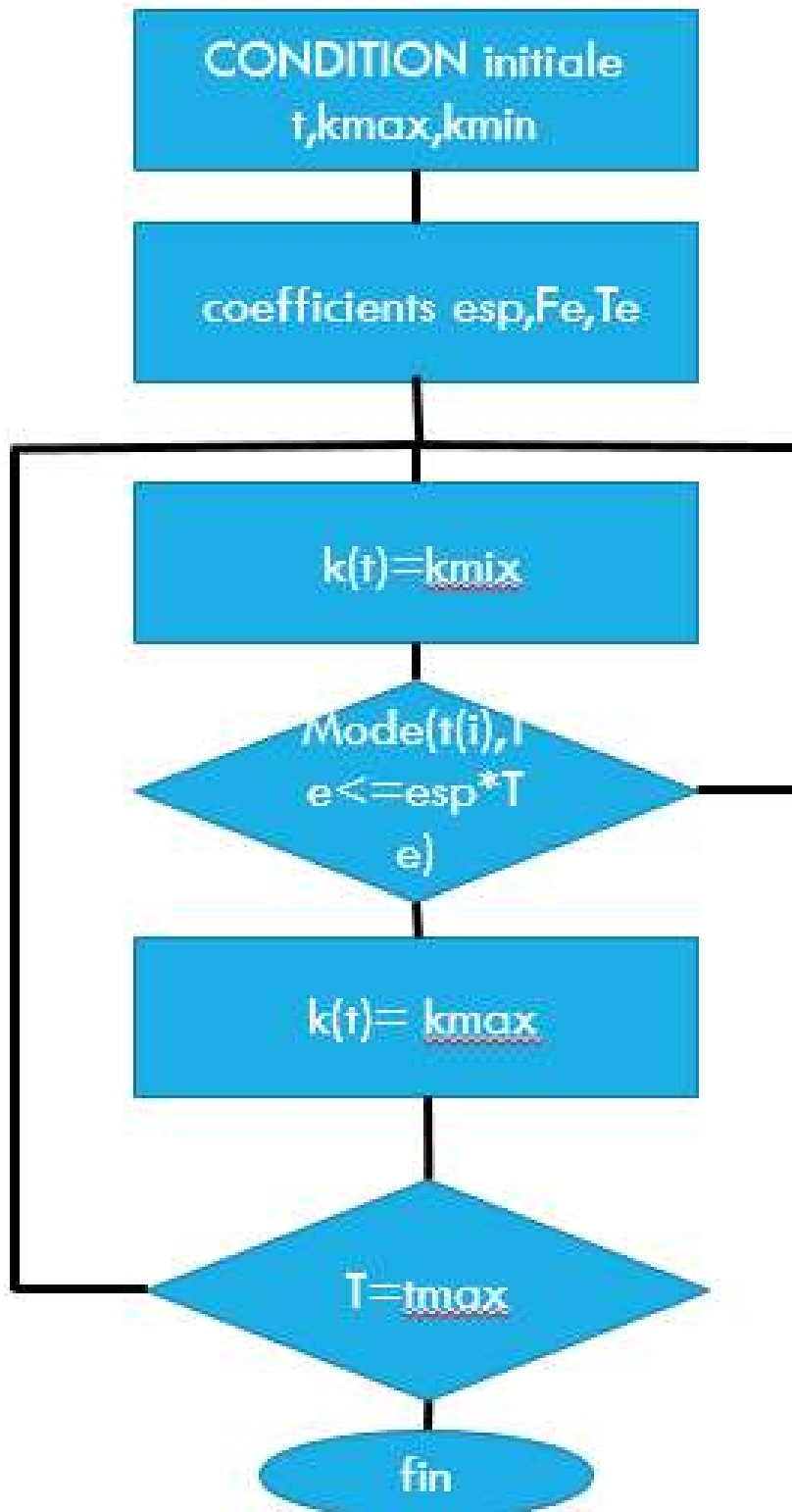


Figure2. 8 : Algorithme signal d'engrènement

II.9-simulation des défauts d'engrenage :

II 9.1-Défauts localisés :

L'amorçage d'un défaut sur une dent va donc se traduire par des impulsions dans la réponse temporelle, qui vont se répéter à chaque engrènement de cette dent .

La simulation d'un tel défaut combiné, on a essayé de modéliser et de simulé numériquement ce type de défaut sous Matlab©, et de faire une optimisation des indicateurs de détection de ce type de défaut

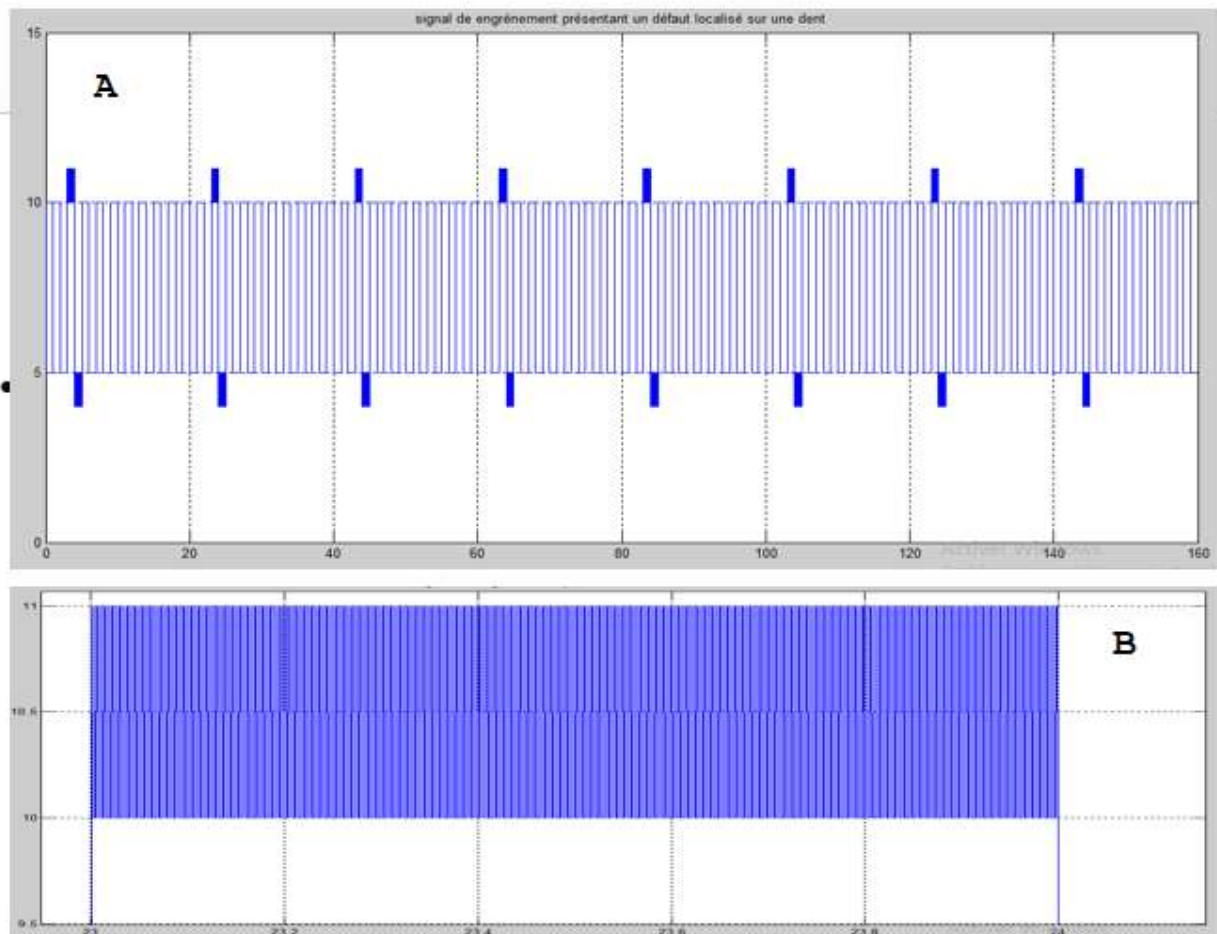


Figure2. 9:A) signal de engrènement présentant un défaut localisé sur une dent. B) zoom sur le défaut.

II.9.2-Le défaut réparti :

Sur toutes les dents se manifeste sur le signal par une augmentation de l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ses harmoniques.

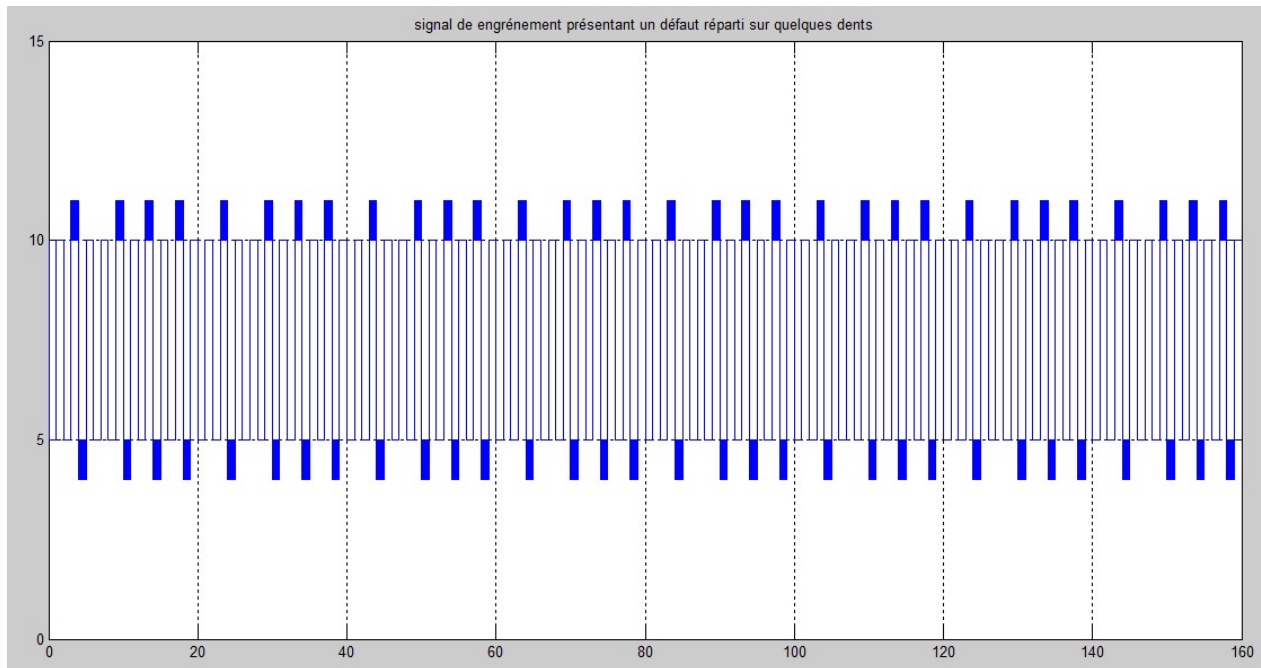


Figure2. 10 : signal d'engrènement présentant un défaut réparti sur quelques dents.

II.9.3-les Méthodes de Diagnostic des Réducteurs à Engrenages :

Les matériels et logiciels d'aujourd'hui sont très favorables à la mise en place rapide des méthodes mathématiques les plus perfectionnées dans le domaine du traitement du signal. Un meilleur choix et utilisation des méthodes de traitement en analyse vibratoire requièrent des savoirs a priori sur les signaux à traiter.

Dans cette partie on fait le point des méthodes d'analyse vibratoire les plus utilisées dans le cas de signaux des machines tournantes, notamment ceux utilisées pour les signaux d'engrenages. Toutes les méthodes de traitements existantes pour le l'examen des machines tournantes peuvent être catégorisées : l'analyse spectrale, l'analyse cepstrale

La première partie concerne l'analyse spectrale, qui est évidemment la méthode la plus usuelle en analyse vibratoire, de fait qu'il existe souvent des rapports entre les événements mécaniques et leur contenu spectral. Dans la pratique, en parallèle, la richesse du spectre en harmonique fait que la lisibilité s'avère complexe. Quant à l'analyse cepstrale, elle représente un bon complément de l'analyse spectrale pour les basses fréquences.

II.9.3.1- Analyse Spectrale :

L'analyse spectrale : est un outil naturel pour le traitement des signaux en mécanique. L'analyse fréquentielle ou l'analyse spectrale établit la signature de la machine et révèle les fréquences auxquelles se produisent des variations d'amplitude significatives [mar12].

En générale, le signal de vibration prélevé sur une machine tournante est une composition de réponse à toute force d'excitation. L'intérêt de l'analyse spectrale est de pouvoir dissocier et identifier les sources vibratoires en fonction des caractéristiques cinématiques des différents éléments. . [BEN18].

La conversion des réponses dans le domaine des fréquences peut rendre l'interprétation des informations qu'elles contiennent beaucoup plus aisée.

a transformée de Fourier d'un signal temporel (t) est définie par [BEN18]:

$$X(f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi n f} \quad dt \quad (2.5)$$

Avec $X(f)$ est la $f^{\text{ème}}$ composante du spectre,

N est l'indice temporel, f est indice fréquentiel, x est le signal de la série temporelle,

•les vibrations issues d'un réducteur simple étage, étaient principalement dues à la déviation de la position des roues par rapport à un mouvement de rotation parfait

La vibration, appelée signal d'engrènement, est périodique et sa fréquence (fréquence d'engrènement

Spectre du signal à caractéristique la plus marquante du signal, est la modulation d'amplitude due à la rotation des roues. Le spectre sera composé par une famille de raies de fréquence due au fondamental et aux harmoniques du signal d'engrènement (Figure2.11)

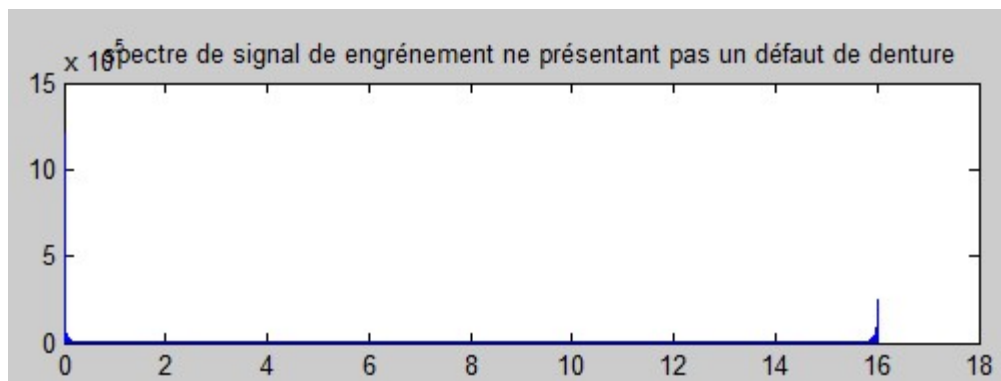


Figure2. 11 : spectre du signal vibratoire d'un engrenage

Cette famille de raies est étalée sur une grande partie du spectre, car la nature du signal d'engrènement est de type large bande. De plus, la modulation d'amplitude se traduit par la présence de bandes latérales autour des harmoniques d'engrènement

II.9.3.2-Manifestation d'un défaut de denture localisé :

a)Dentures saines :

Considérons un engrenage, si la denture est correcte, le spectre vibratoire aura la même allure que celui défini sur la Figure (2.11 avec des bandes latérales d'amplitudes données.

b)-Défaut de dentures :

Si l'une des deux roues possède une dent détériorée, il se produit alors, un choc périodique à la fréquence de rotation de cette roue. Ce choc modulera en amplitude le signal d'engrènement, il y aura donc une augmentation du facteur de modulation de la roue considérée, et donc une augmentation d'amplitude de ses raies latérales . [Bad. 99]

spectre d'un signal d'engrènement dans le cas d'un défaut localisé (fissure) dans une seule dent :

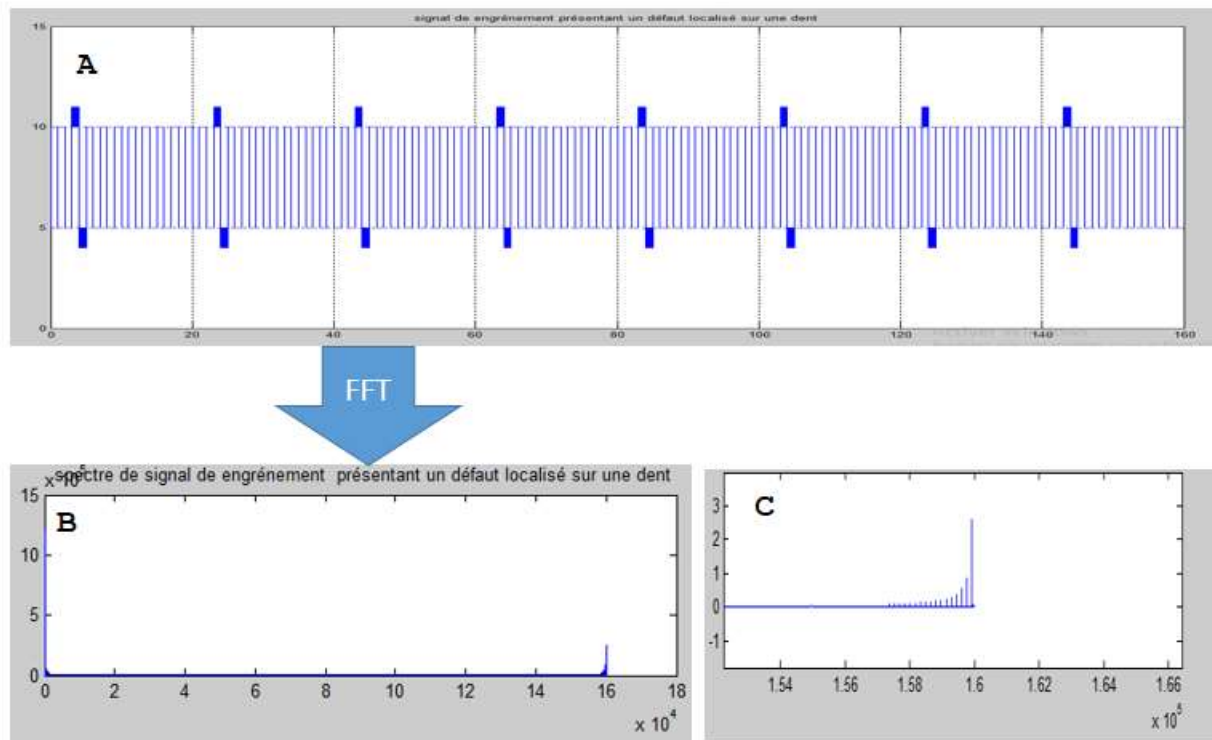


Figure2. 12 : Signal bruité d'un défaut combiné d'engrenage, (a) signal d'engrènement bruité, (b) son spectre et (c) zoom sur le spectre.

II.9.4-spectre d'un signal d'engrènement dans le cas d'un défaut répartis (fissure) dans plusieurs dents :

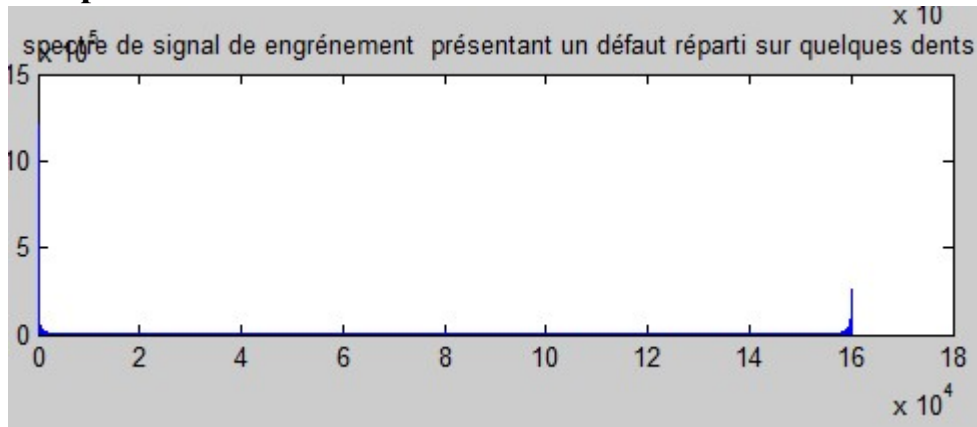


Figure2. 13 : spectre du signale de engrènement présentant un défaut sur quelques dents

Résumé, le signal acquis d'un réducteur (ou multiplicateur) avec une dent d'engrenage défectueuse ou plusieurs dents a les caractéristiques suivantes

Les fréquences caractéristiques de défauts, sont focalisées dans la région de basse fréquence. La difficulté, concernant les engrènements, est de juger la gravité des défauts. En effet, même sur une machine en bon état, on obtient ces images. Même spectre d'un signal d'engrènement sans défaut et signal avec défaut, ne permet pas de diagnostiquer et identifier une dégradation de l'engrènement. On peut néanmoins retenir règle toujours vérifiées : si les amplitudes du peigne de raies ne dépassent pas celle de la fréquence centrale, l'engrènement peut être considéré comme en bon état ou nom après spectre des signaux.

Concernant les réponses spectrales, la différence entre le cas sain et celui avec défauts est illustrée par la figure 2.14.

Dans le cas de dégradations c'est à dire une dent détériorée ou plusieurs dents sur chaque roue, il y aura un train d'impulsions, qui va apparaitre sur le spectre à travers une fréquence fondamentale appelée « fréquence de coïncidence »

L'augmentation d'amplitude est constatée à la fréquence ($16 \cdot 10^4$) dans le cas de défaut, elle est de l'ordre (noté l'AMP) $2 \cdot 10^4$.

L'information existe alors elle est considérée comme un défaut

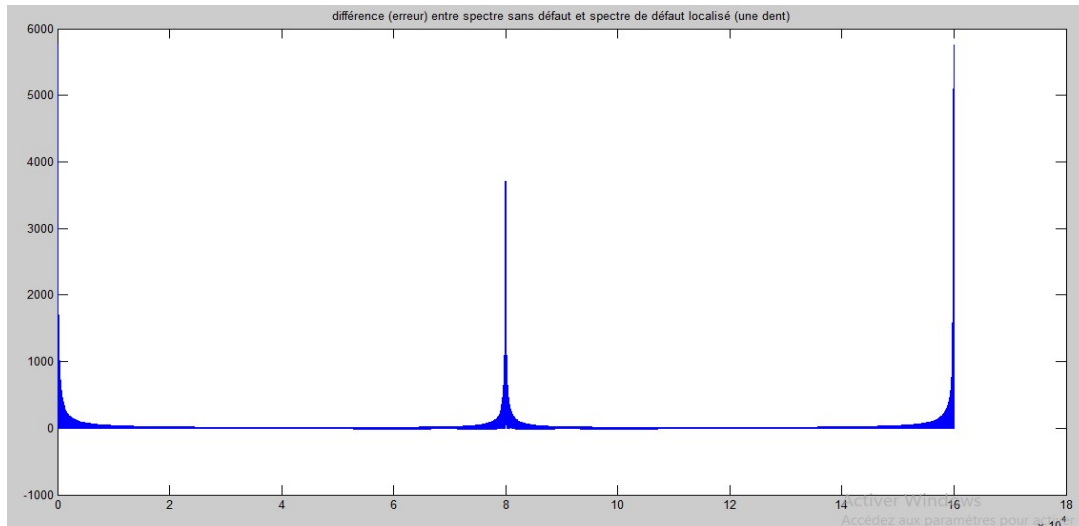


Figure2. 14 : différence (erreur) entre spectre sans défaut et spectre de défaut localisé (une dent).

Toujours au sujet des réponses spectrales, la différence entre le signal variant et celui sans défauts est illustrée par la figure 2.15.

L'augmentation d'amplitude est constatée à la composante continue (0), elle est égale à (hot l'amplitude) 3500 m.

Il y a une information mais pas facilement détectable. Elle est donc estimée comme une variance.

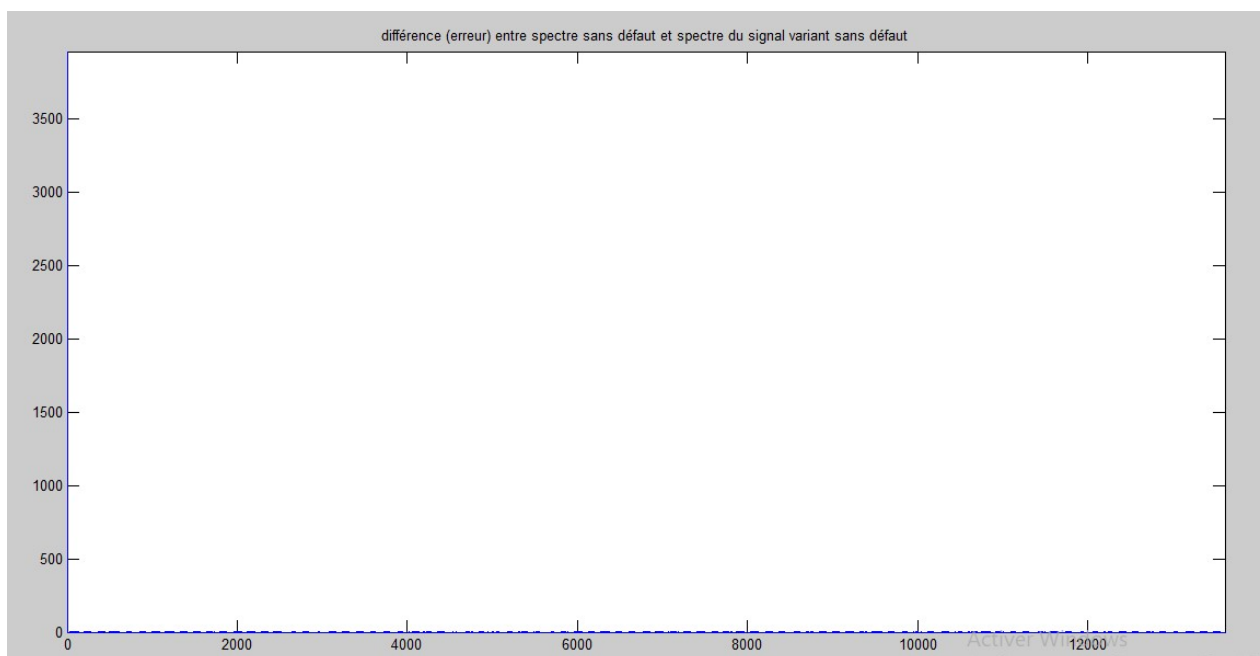


Figure2. 15 : différence (erreur) entre spectre sans défaut et spectre du signal variant sans défaut.

II.9.5- Le cepstre :

Le Cepstre est un outil mathématique qui permet la mise en évidence des périodicités dans un spectre en fréquence. Il résulte de la transformée de Fourier inverse d'un spectre de puissance [Bad. 99].

$$S(t) = \text{TF}^{-1}[\text{Ln}|s(v)|] \quad (2.6)$$

S est la transformée de Fourier du signal s. Bien que la variable générique du cepstre ait la dimension d'un temps, elle est souvent appelée quéfrencce car le cepstre peut être interprété comme le spectre d'un spectre. On remarque que le cepstre d'énergie transforme le ~ produit de convolution

$$S(t) = h(t) * e(t) \text{ en une addition } s \sim (t) = h \sim (t) + e (t).$$

Le cepstre associe à une famille de raies harmoniques ou un ensemble de bandes latérales une raie unique dans sa représentation graphique. Il est utilisé pour le diagnostic des phénomènes de de chocs périodiques (desserrages, défauts de dentures, écaillage de roulements) et des phénomènes modulation en fréquence ou en amplitude. [Bad. 99]

La complexité de ce spectre rend difficile l'identification des raies. En calculant le cepstre Figure () identifie clairement la présence des peignes de dirac décroissants, Il faut noter que, à l'inverse du spectre, la résolution du cepstre d'énergie est d'autant meilleure que les fréquences sont basses.

- La figure 2.16 montre le spectre d'un signal d'engrangement sain et aussi spectre d'un signal variant :
- Donc on remarque la superposition de deux cpestral, Alors le spectre d'un signal variant n'est pas détecté comme un défaut. De ce fait la superposition est avantage danalyse cpestrale.

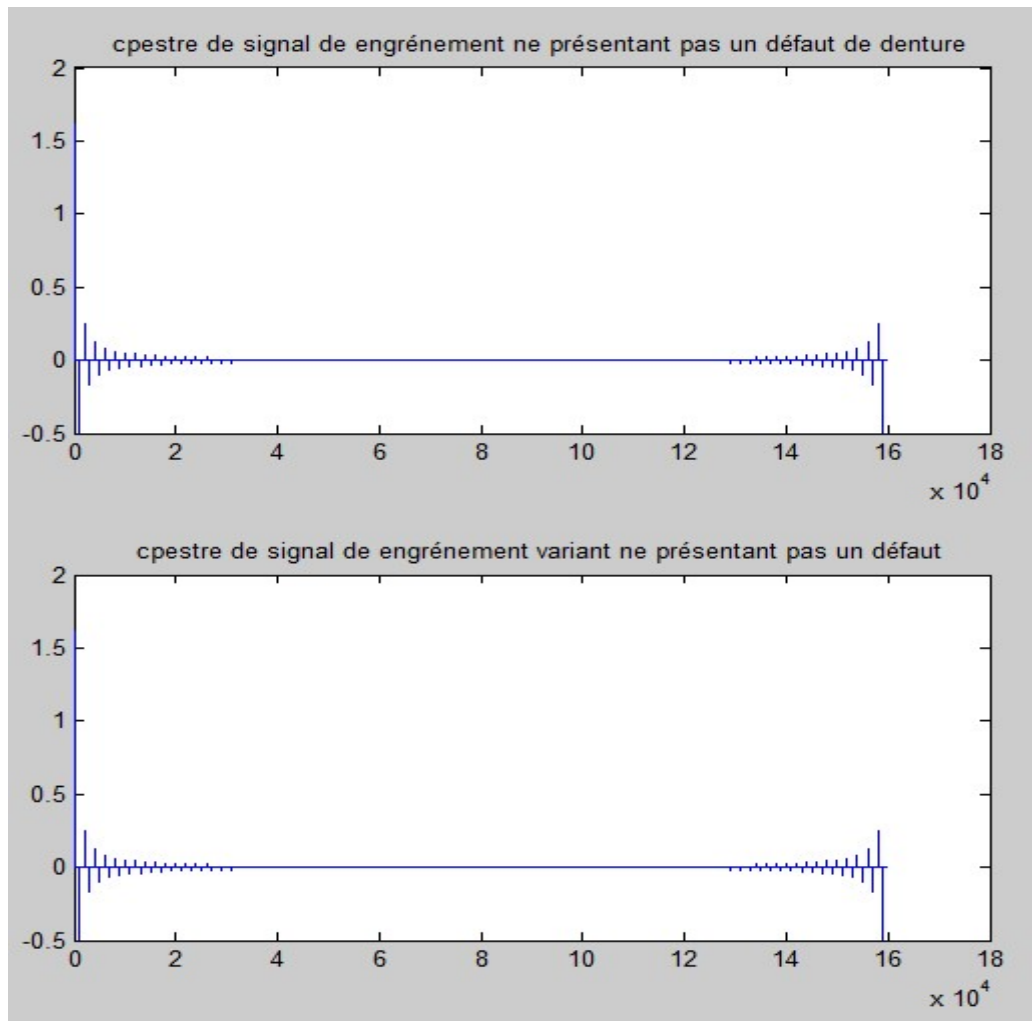


Figure2. 16 : le cepstre d'un signal d'engrènement sain et le cepstre d'un signal variant.

Un autre exemple de diagnostic par le cepstre d'énergie dont nous reportons les résultats essentiels sur la Figure 2.16, constitue le cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire relevant d'un réducteur qui comporte (un pignon de 20 dents et une roue de 20 dents). Un autre exemple de diagnostic par le cepstre d'énergie, dont nous reportons les résultats essentiels

Lors du fonctionnement, le réducteur sain devient dégradé.

La (Figure 2.17A) illustre le cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire du réducteur en fonctionnement sain. On note la présence des pics dont les abscisses correspondent aux périodes de rotation du pignon et de la roue. La (Figure 2.17.B) illustre le cepstre d'énergie calculé sur le signal vibratoire lorsque le réducteur comporte un défaut de denture.

On constate une augmentation d'énergie du signal (l'amplitude de la fréquence d'engrènement et ses harmoniques) occasionnée par le réducteur. Cela témoigne d'un défaut sur celui-ci. Cette indication est vérifiée avec le rapport d'expertise effectué sur ce réducteur.

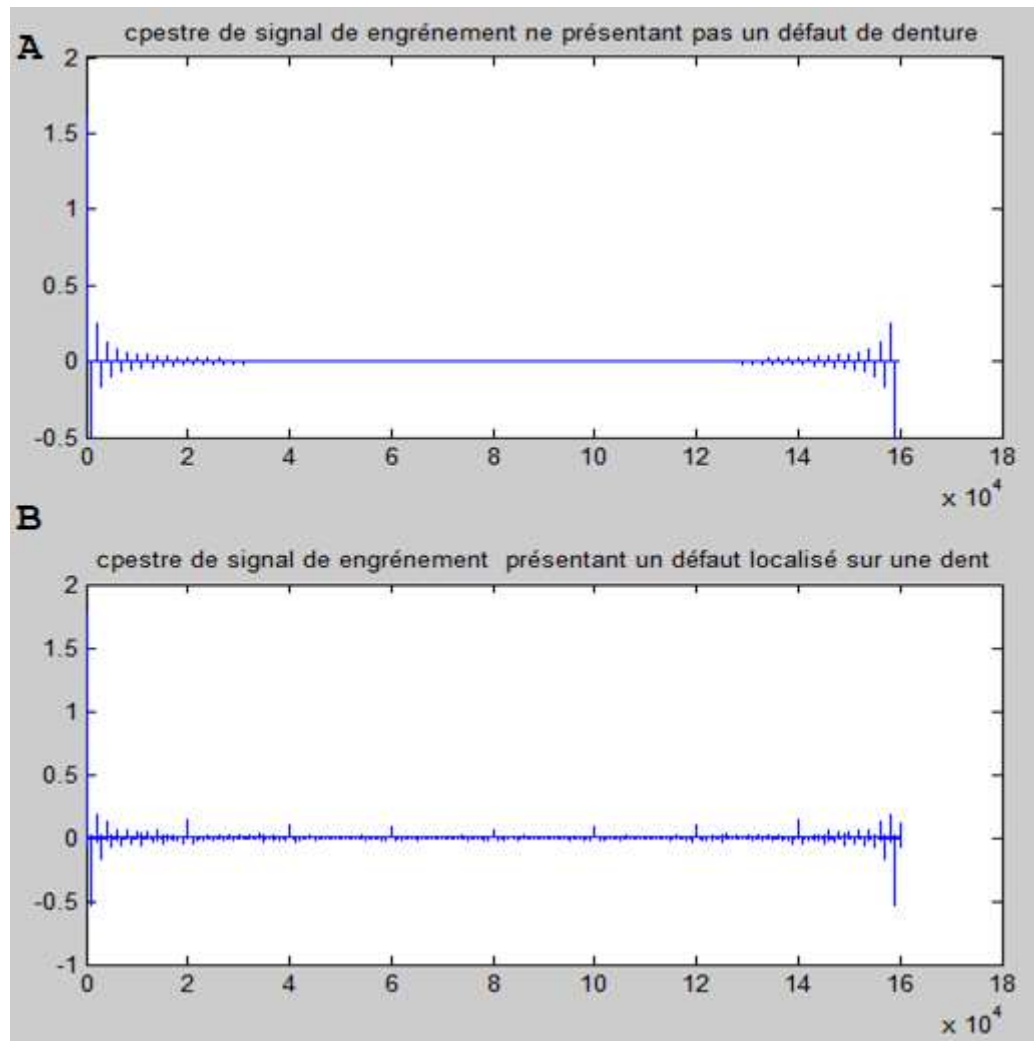


Figure 2.17 : A) le cepstre d'un signal d'engrangement sain, B) cepstre d'un signal présentant un défaut localisé.

II.10-Conclusion :

Après un étude comparative entre plusieurs méthodes d'analyse vibratoire dont nous avons utilisé comme indicateurs : le spectre d'énergie, le cepstre d'énergie. L'objectif était d'étudier les performances de ces différentes méthodes. Pour cette étude, il disposait d'un réducteur comportant un pignon de 20 dents et une roue de 20 dents, chargé au-delà de sa puissance nominale.

le cepstre d'énergie était le plus efficace, puisqu'il a permis de déceler de manière claire, comme en témoigne Figures ci-dessus, qui représentent l'évolution des coefficients cepstraux du pignon et de la roue. Dans le cas de l'analyse spectrale, il a suivi l'évolution de l'amplitude des pics d'engrèvements, des pics de la fréquence de rotation, du pignon et de la roue, et des bandes latérales. Il a constaté (Figure 22a) que l'évolution des pics d'engrènement et de rotation était pratiquement constante durant les essais. Cependant cette augmentation était difficilement décelable. L'analyse du cepstre s'avère être un complément important du spectre dans l'étude vibratoire des réducteurs à engrenages. Il est en général plus lisible qu'un spectre et possède certaines propriétés d'invariance vis à vis de l'amplitude des signaux.

Dans ce travail, on a réalisé la modélisation d'un système d'engrenage à un étage utilisé avec et sans défaut (local et distribué).

.à partir de l'étude paramétrique on tire les conclusions suivantes :

-pour le cas sain : le cepstre d'un signal d'engrangement est similaire au signal variant avantage évitant de fausses détections de défaut).

-pour les défauts : les réponses spectrales des signaux avec défauts, on trouve l'apparition des pics preuve de l'existence d'un choc sur une dent ou plusieurs dents ce qui implique que cette représentation cepstrale n'identifie pas le type de défaut qui est arrivé.

Le diagnostic et la localisation des types de défaut peuvent être pris en considération dans notre analyse tels que : temps — fréquence , cela fera l'objet du chapitre.

**Chapitre-III Analyse temps-
fréquence des signaux
D'engrènement**

III.1-Introduction :

La détection prématurée d'une roue présentant un début de défaut (sans le localiser ni le reconnaître) : nous avons pu donner le sens théorique de l'évolution du cepstre d'énergie dont traitent déjà nombreuses études scientifiques [Cap92] et [Fon92], [Bad. 99] pendant le déclenchement d'un défaut. Pour ce faire, nous avons calculé le cepstre d'un modèle réduit de structure de signaux issus d'engrènements. Le dit calcul a permis la mise à jour d'un invariant, à partir duquel, La localisation sur la roue incriminée et la mise en évidence d'un défaut de type fissures : au travers de signaux obtenus par simulation, nous avons pu détecter l'excitation résultante du passage d'une dent sur le défaut. Ce qui permet d'identifier la position du défaut en suivant l'intégrale du cepstre d'une fenêtre glissante sur le signal. Plus loin, nous verrons que le cepstre d'énergie d'un signal contenant une périodicité exhibe un peigne de pics au pas de cette période et que par nature, il permet une bonne résolution temporelle maximum. Pour cela, il est indispensable que les périodicités présentes dans le signal à traiter soient constantes afin de permettre la conservation d'une telle propriété. Cela n'est envisageable que si ce signal a été acquis sous échantillonnage angulaire, c'est à dire déclenché à partir des impulsions délivrées. Dans ce cas de figure, nous parlerons d'analyse cepstrale temps- quéfrenc favorisant ainsi d'isoler chacun des engrènements d'un réducteur complexe et d'aboutir à une diminution de l'influence du bruit. L'évaluation de méthode de diagnostic tel que l'analyse temps - fréquence pour l'identification de l'endommagement des dentures d'engrenage qui opèrent à faible vitesse. Le signal renvoyé par un accéléromètre disposé sur le carter d'un réducteur à engrenages d'un travail de comparaison fait à partir des cepstres et des spectres mesurés pour différents points de mesures, ont permis de localiser l'origine du défaut. L'étude montre que les deux méthodes utilisées sont des outils efficaces pour la détection de ce type de défauts, ainsi ils apportent une finesse d'analyse permettant d'obtenir un diagnostic précis. L'analyse temps - fréquence s'avère également une technique qui vient en complément à celle du cepstre pénalisée par sa grande sensibilité au bruit et aux fluctuations aléatoires de vitesse.

III.2-Généralités sur l'analyse temps -fréquence : [BRU96]

Un certain nombre de techniques analytiques traditionnelles peuvent être utilisées pour l'analyse des signaux non stationnaires et ils peuvent être classés grossièrement comme suit :

1) Diviser le signal en segments quasi-stationnaires en sélectionnant correctement la fenêtre d'analyse

a) Enregistrer le signal dans un tampon temporel (ou sur disque) puis analyser :
Analyse par balayage

b) Analyser en ligne et stocker les spectres pour une présentation ultérieure et post-traitement : mesures multifonctions

2) Analyser les événements individuels dans un cycle d'un signal et faire la moyenne sur plusieurs cycles : mesures fermées

3) Échantillonner le signal en fonction de ses variations de fréquence : Suivi des commandes des mesures. L'introduction de la transformée en ondelettes (WT), transformée de Fourier à court terme (STFT) et Wigner-Ville distribution (WVD) offrent des outils uniques pour l'analyse des signaux non stationnaires. La procédure utilisée est pour le moment celle décrite en a) ci-dessus. Ces techniques donnent une résolution optimale en temps et en fréquence simultanément. Les techniques d'analyse spectrale traditionnelles, basées sur la transformée de Fourier où le filtrage numérique fournit une bonne description des signaux stationnaires et pseudo-stationnaires. Malheureusement, ces techniques sont confrontées à certaines limites lorsque les signaux à analyser sont fortement non stationnaires (c'est-à-dire des signaux dont les propriétés spectrales varient dans le temps).

Dans ce cas, la solution consisterait à fournir un spectre instantané

Pour chaque indice de temps du signal. Les outils qui tentent de le faire sont appelés

Techniques d'analyse temps-fréquence

III.3- Problématique :

III.4-Représentations Temps Fréquence RTF :

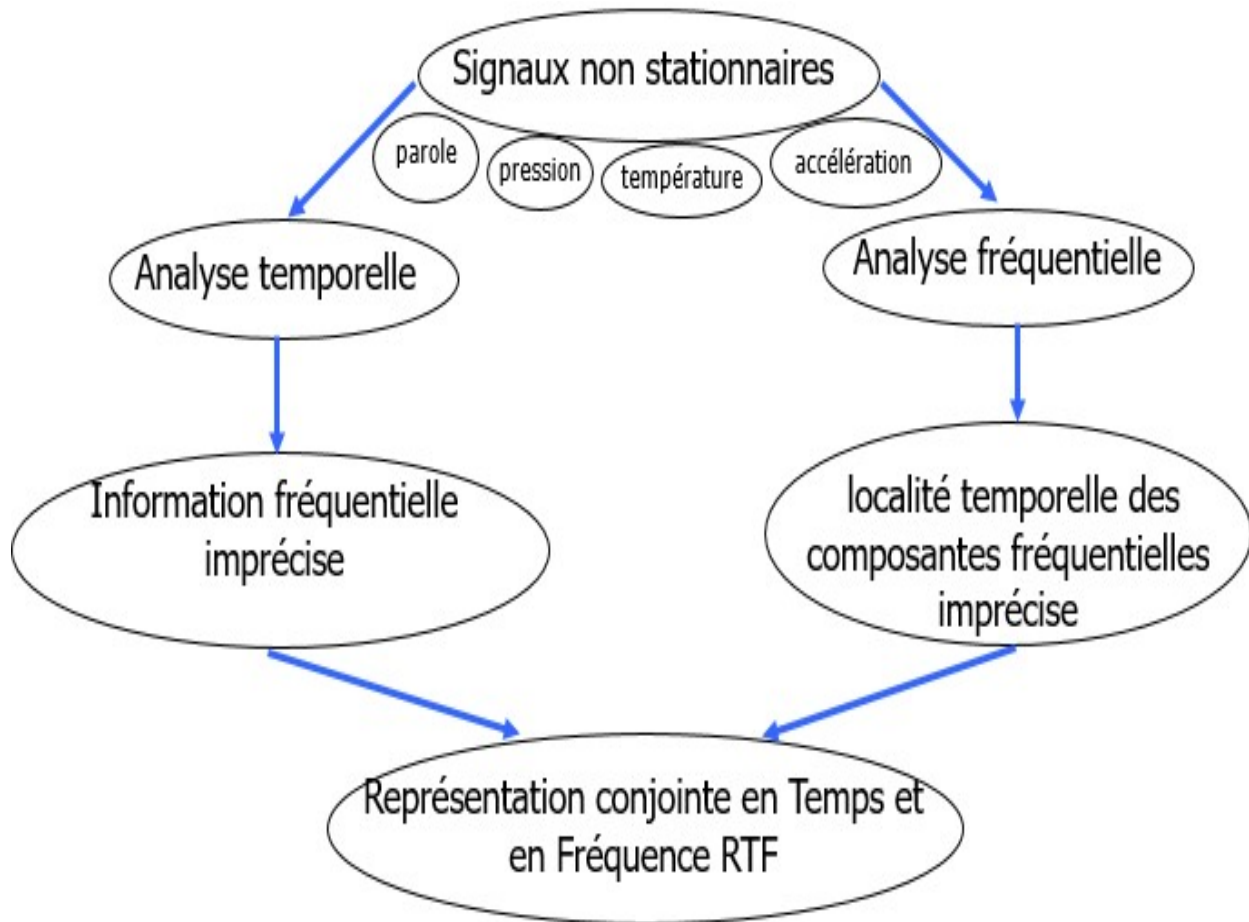


Figure3. 1 : Schéma synoptique montrant la problématique de Représentations Temps Fréquence.

Il existe de nombreuses Représentations Temps Fréquence mentionnés, par exemple :

- Spectrogramme (La transformée de Fourier à court terme (TFCT))
- Scalogramme (**Transformée en ondelettes**)
- Distribution de Wigner Ville WVD
- L'EMD (Empirical Mode Decomposition ou dite transformée de Huang) associée à la transformée de Hilbert THH

III.5- Transformée de Fourier à courte terme « STFT » : [ale07]

L'idée de la transformation de Fourier à court terme (STFT) est de diviser un signal temporel en intervalles de temps courts d'abord et après cela, pour effectuer une analyse de fréquence de chaque intervalle séparément. STFT est une transformation linéaire qui, pour remédier à la perte de toute localité temporelle par la transformation de Fourier, consiste à balayer les signaux avec des fonctions élémentaires (fenêtres), définies dans l'espace temporel et dans l'espace fréquentiel. La transformée de Fourier du signal $x(t)$ n'est pas adéquate pour l'analyse (la localisation temporelle) du domaine fréquentiel si elle n'est pas stationnaire. Une observation locale du signal est nécessaire. Par rapport à cela, le signal doit être divisé en segments avant d'effectuer l'analyse de Fourier. On suppose que, dans chaque segment, le signal est Stationnaire. Un tel signal $x(t)$ (divisé en segments) est appelé un signal fenêtré $XW(t)$ par la fenêtre $w(t)$:

$$XW(t) = x(t).w(t) \quad (3.1)$$

Afin de prendre en compte l'ensemble du domaine temporel, les différentes positions de la fenêtre sont à sélectionner, en vue de laquelle le signal est fenêtré.

x. $w(t)$ représente une fonction du temps t positions des fenêtres τ .

$$XW(t, \tau) = x(t).w(t - \tau) \quad (3.2)$$

Le résultat de la transformée de Fourier pour un tel signal peut être appelé transformée de Fourier fenêtrée, car il est fonction de la fréquence et de la position des fenêtres.

$$STFT(f, \tau) = Xw(t)(f - \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t).w(t - \tau).e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.3)$$

La sélection de la fonction de fenêtre $w(t)$ est possible de telle sorte que sa transformée de Fourier $W(f)$ est également une fonction de fenêtre. La transformée de Fourier fenêtrée présentée dans l'équation (3.1) est appelée une transformée de Fourier à temps court. Le carré du module de la transformée de Fourier de courte durée est appelé spectrogramme en ingénierie applications. Pour chaque position de la fenêtre, différents spectres peuvent être obtenus ; le nombre total de ces spectres est une fonction représentant une distribution temps-fréquence. Dans les applications d'ingénierie, les principaux problèmes concernant le spectrogramme sont liés au compromis entre la résolution temporelle et fréquentielle. Dans le diagnostic des machines, les problèmes de détection sont plus importants que la précision de localisation temps-fréquence ce qui rend le compromis temps-fréquence peu gênant pour la prédiction de défaut. Pour la détection, il est de la plus haute importance d'établir si les événements non stationnaires attendus, qui sont le résultat d'un défaut, sont présents dans le signal de vibration. En plus de cela, il peut être nécessaire d'estimer l'avancement du défaut. Ainsi, il est possible de simplifier les méthodes basées sur la transformée de Fourier à court terme en utilisant uniquement la localisation de fréquence à une résolution de localisation convenable en temps

et en fréquence pour détecter des événements non stationnaires. La procédure dite de fenêtre mobile est l'une des applications qui mérite une attention particulière. [ale07] ET [MOU10].

III. 6 -Distribution de Wigner Ville WVD :

WVD est une technique d'analyse qui fournit également une distribution d'énergie du signal dans le domaine temporel et fréquentiel. La caractéristique principale de cette transformée est qu'elle ne place aucune restriction sur la résolution simultanée en temps et en fréquence. En d'autres termes, le WVD n'est pas limité par la relation d'incertitude, du fait qu'il s'agit d'une transformée, sans utiliser de fonction d'analyse. Voir Eq. (3.4).

$$Ws(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t + \tau/2) \cdot S^*(t - \tau/2) \cdot e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3.4)$$

Notez que le WVD est une sorte de calcul combiné de transformée de Fourier et d'autocorrélation, c'est-à-dire une estimation de l'autospectre en fonction du temps ou une estimation de la relation auto-corrélation en fonction de la fréquence. [BRU96]

III .7-simulation et Analyse Temps Fréquence « STFT »de signaux d'engrenage sains et portant des défauts :

➤ Choix de La fenêtre :

Si elle est petite, elle a une meilleure précision de localisation temporelle au détriment de la localisation fréquentielle. Et si la fenêtre est grande, l'inverse est vrai. La fenêtre doit contenir un champ de défaut.

III .7.1 – spectrogramme, représentation temps-fréquence fenêtre d'analyse de 64 pts d'un signal d'engrènement dans le cas d'un signale sans défaut et le signal variant sans défaut :

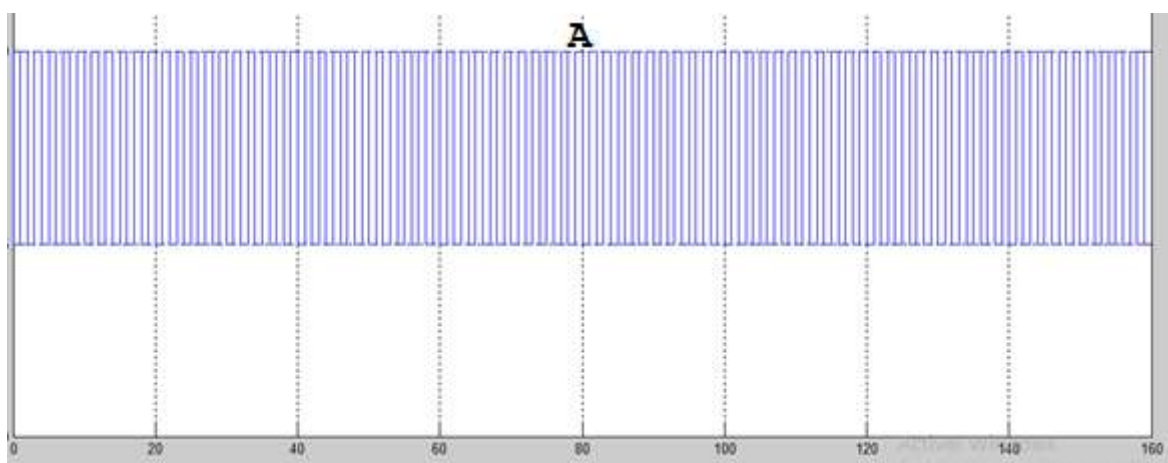
Dimension 1 (axe des y) : Axe de fréquence normalisée (cible de fréquence mesurée) : sa valeur maximale est de 0,5 et il n'a pas d'unité.

Dimension 2 (axe des x): Axe de temps

Dimension 3: représente par graduation de couleurs le niveau de gris. Il est inversé pour que sa plus grande valeur indique la couleur noire tandis que la plus petite indique la couleur blanche.

La figure 3.2 représente les représentations temps - fréquence d'un signal variant et un signal sans défaut. On constate une augmentation des amplitudes. La variance d'amplitude, le tout en ayant une très bonne résolution temporelle et fréquentielle, ce qu'on obtient est une superposition d'une représentation d'un signal sain sans défaut et un signal variant des résultats obtenus avec représentation temps- fréquence d'un signal variant et signal au cas sain est donnée par la figure(3.2.a.)

- Par exemple à ce point $X=(1436)$, $(y)=2$, On remarque que : index de spectrogramme de signale sans défaut = 160.1 et index de signale sans défaut variant =156.9, indique un petit changement d la variance de nombre d'amplitude



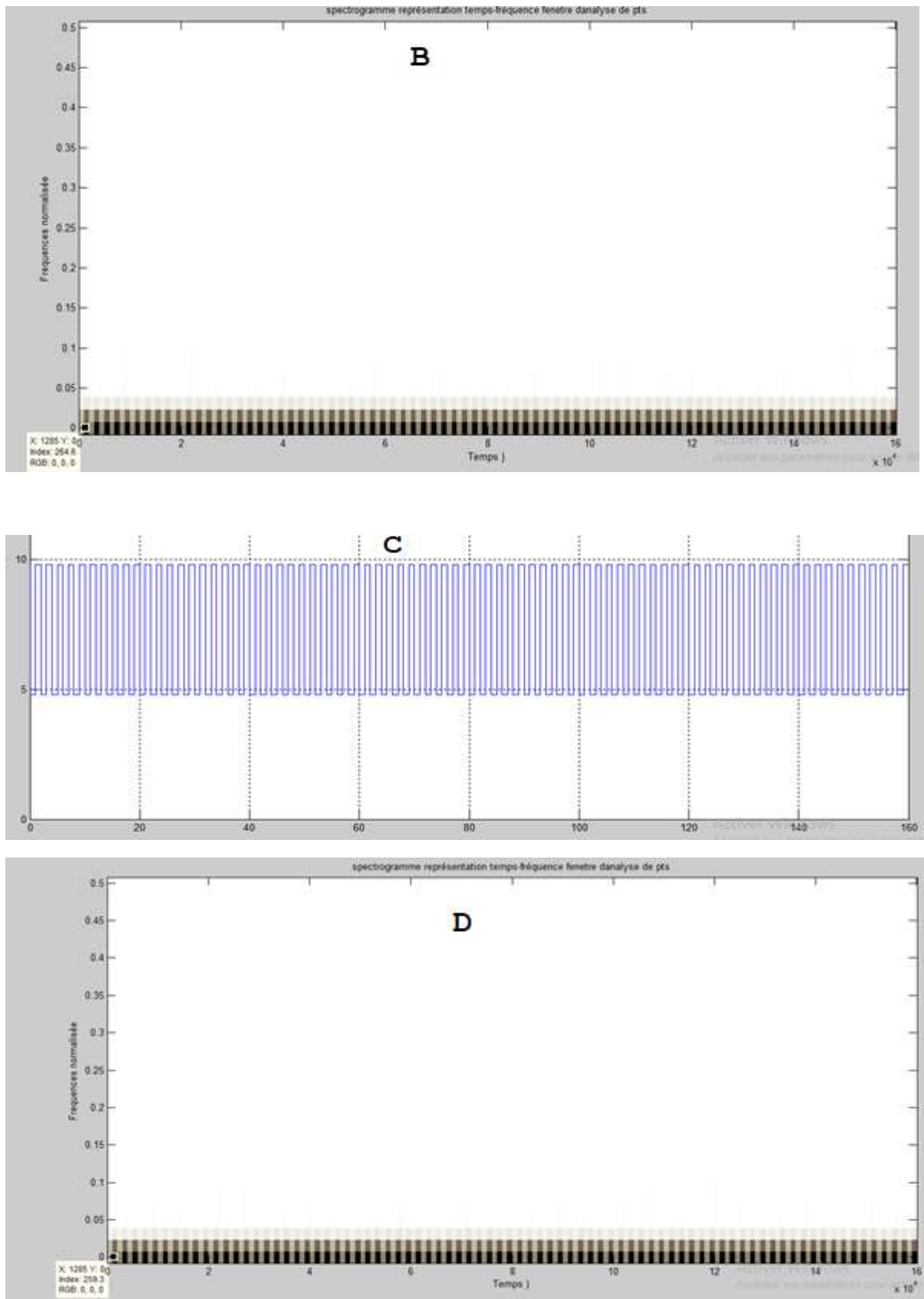


Figure 3. 2 : : A) signal de engrènement sans défaut, B) spectrogramme sans défaut, C) signal de engrènement variant sans défaut , D) spectrogramme signal de engrènement variant et sans défaut.

III .7.2 - spectrogramme représentation temps-fréquence, fenêtre d'analyse de 64 pts signal d'engrènement dans le cas d'un signale avec défaut :

Nous faisons une étude expérimentale qui aide à la détection des fissures dans les racines de dents de dentures d'engrenages. Une fissure par fatigue générée sur la racine d'une dent provoque des changements dans la raideur de la dent, donc la réponse dynamique est différente de celle d'une dent normale. Pour valider ce résultat, nous avons simulé des défauts tels que les fissures par fatigue sur la racine des dents. On conclut que la STFT est très efficace pour la détection des fissures sur la racine des engrenages si les signaux sont légèrement bruités.

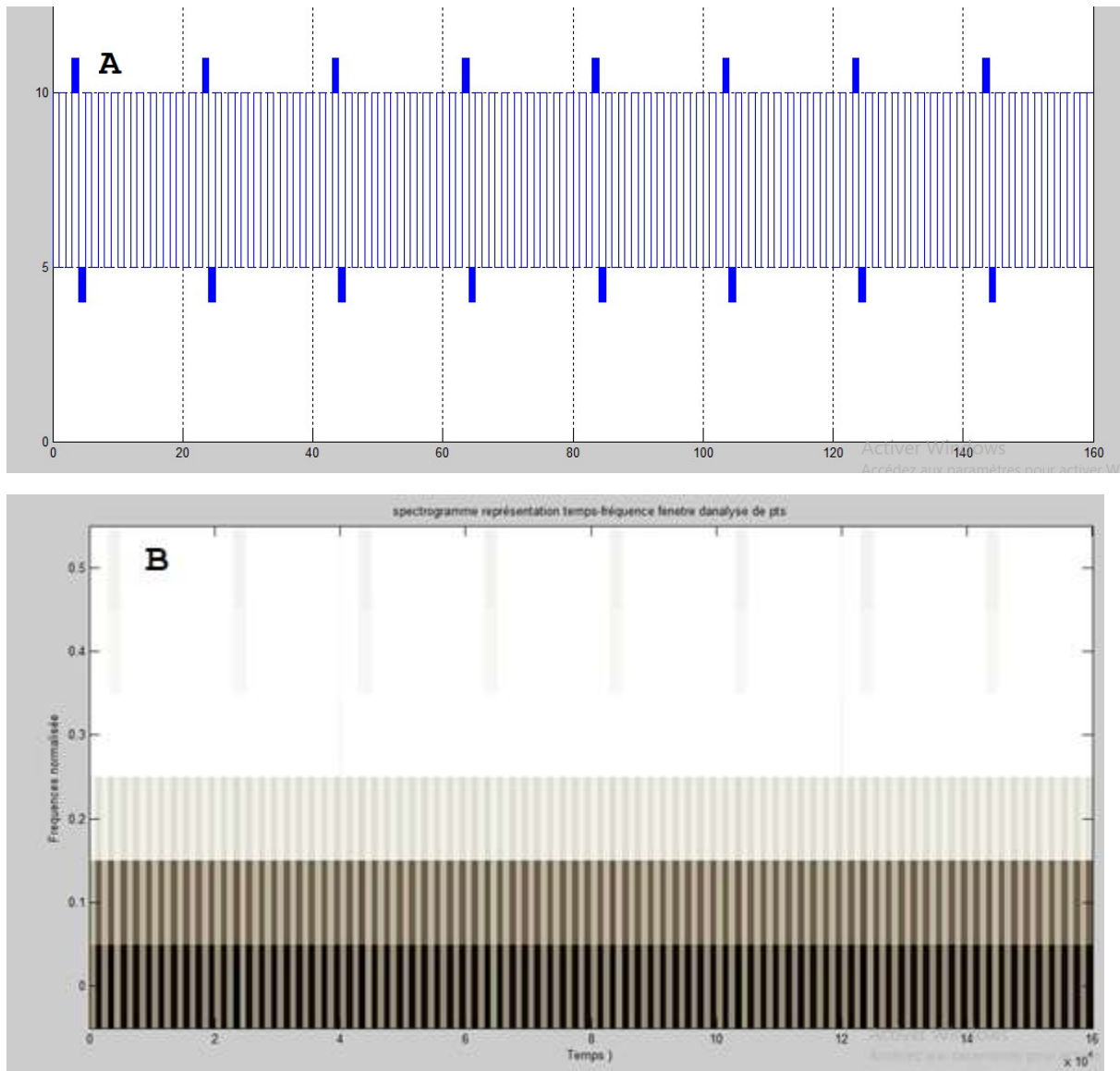


Figure3. 3 :A) signal d'engrènement avec défaut localisé,B) spectrogramme signal d'engrènement avec défaut localisé

Nous constatons des pics (hautes fréquences) au niveau du spectrogramme (ce n'aurait pas le cas pour le signal sain) et qui localise la dent fissurée qui se répète à chaque passage (le nombre total de dents). Ce qui reflète la capacité de non seulement la détection de défaut mais aussi son diagnostic qui nous informe qu'il existe une seule dent fissurée au niveau de l'engrenage. Pour conserver cette propriété remarquable il est nécessaire que les périodicités présentes dans le signal à traiter soient rigoureusement constantes.

Le pic se répète une seule fois dans la période parce que il y'a une seule dent cassée quand le défaut est localisé.

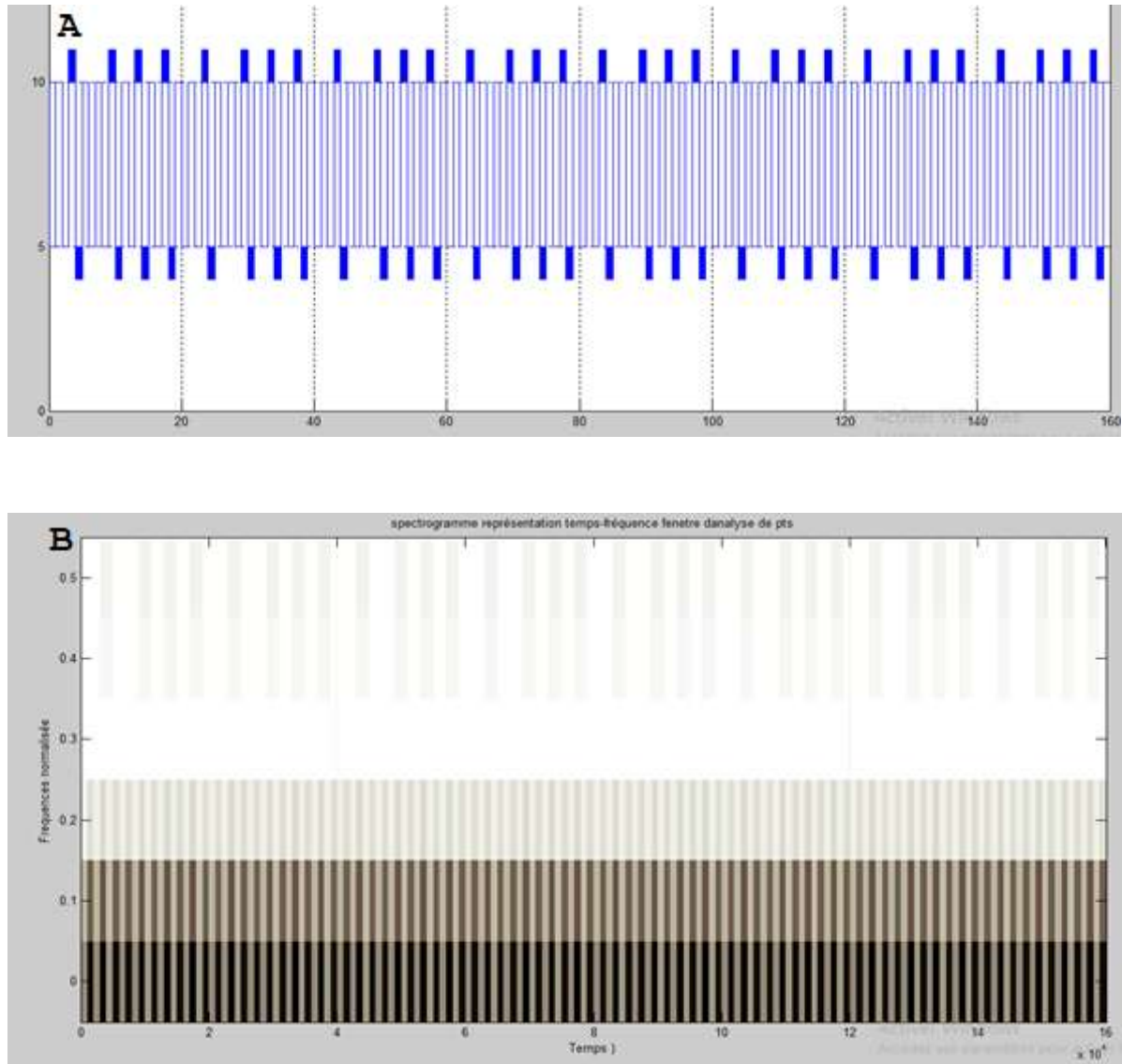


Figure 3. 4 :A) signal d'engrènement avec défaut répartis,B) spectrogramme signal d'engrènement avec défaut répartis.

Dans la figure 3.4, le pic se répète plusieurs fois dans la période par rapport au nombre de dents cassés, et cela car le défaut est réparti. Le diagnostique est donc aussi assuré par le spectrogramme dans le cas où le défaut est réparti sur quelques dents (quatre dents ici).

La figure 3.5 récapitule la simulation, du spectrogramme, faite sur les trois signaux d'engrènement sain, avec défaut localisé sur une seule dent et avec défaut réparti sur quelques dents.

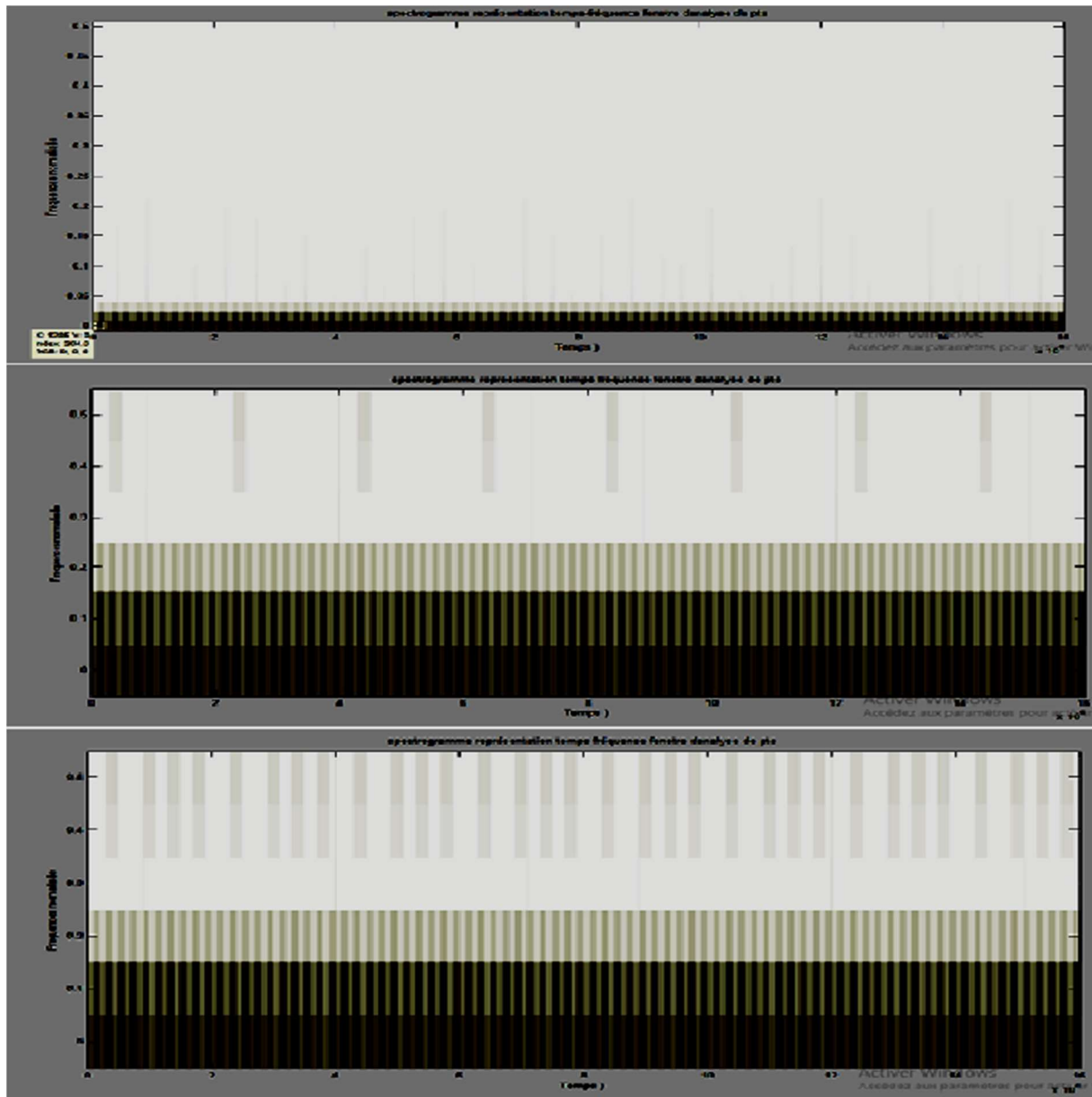


Figure3. 5 : spectrogramme d'un signal d'engrènement dans 3 cas a) sans défaut. b) avec défaut localisé. c) avec défaut réparti.

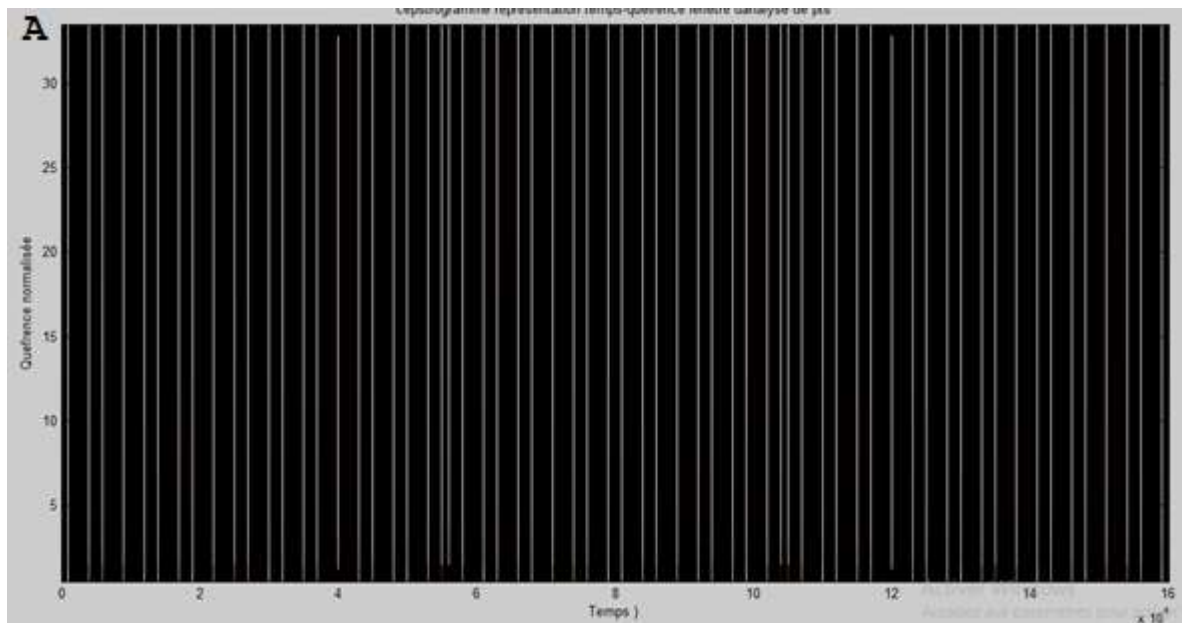
III.8. - spectrogramme représentation temps-quefrence, fenêtre d'analyse de 64 pts du signal d'engrènement

III.8.1. Analyse temps-quéfrence :

C'est la même idée qu'une analyse temps -fréquence mais au lieu de travailler avec un spectre, on travaille sur cepestre , où nous démontons chaque pièce(signal fenêtré) et à chaque fois on travaille sur le cepestre correspondant.

Par conséquent, la fiabilité de l'identification des défauts est améliorée, elle dispose d'une analyse temps -fréquence et analyse Temps -quéfrence, qui nous permet de déterminer le type de défaut.

La figure 3.6 représente les représentations temps – quéfrence d'un signal variant et un signal sans défaut. On constate leur représentation est similaire ce qui reflète la capacité du cepstrogramme à ne pas considérer un signal variant comme un signal avec défaut.



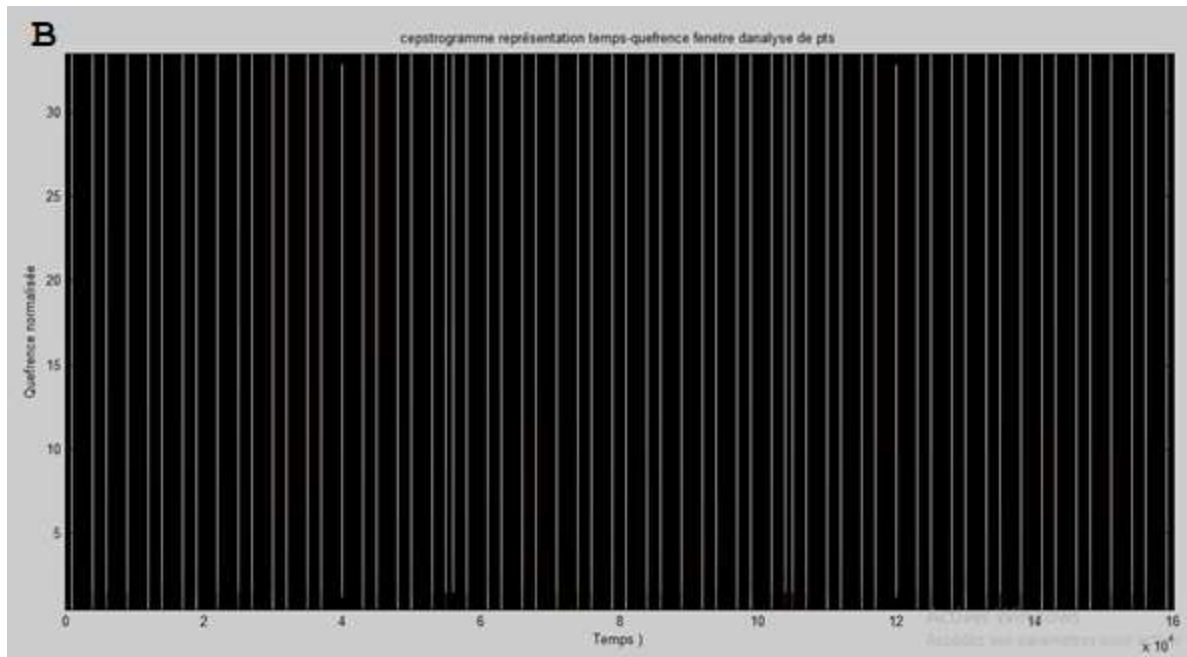


Figure3. 6 : Cepstrogramme d'un signal d'engrènement :A) sans défaut, b) variant sans défaut.

La figure 3.7 représente les représentations temps – quefrenc d'un signal d'engrènement avec défaut localisé. On constate l'émergence d'une nouvelle quefrenc qui est la quefrenc de défaut. Elle se répète une fois à chaque période, c'est –à– dire un défaut localisé sur une seule dent donnant ainsi un diagnostic performant au cas considéré.

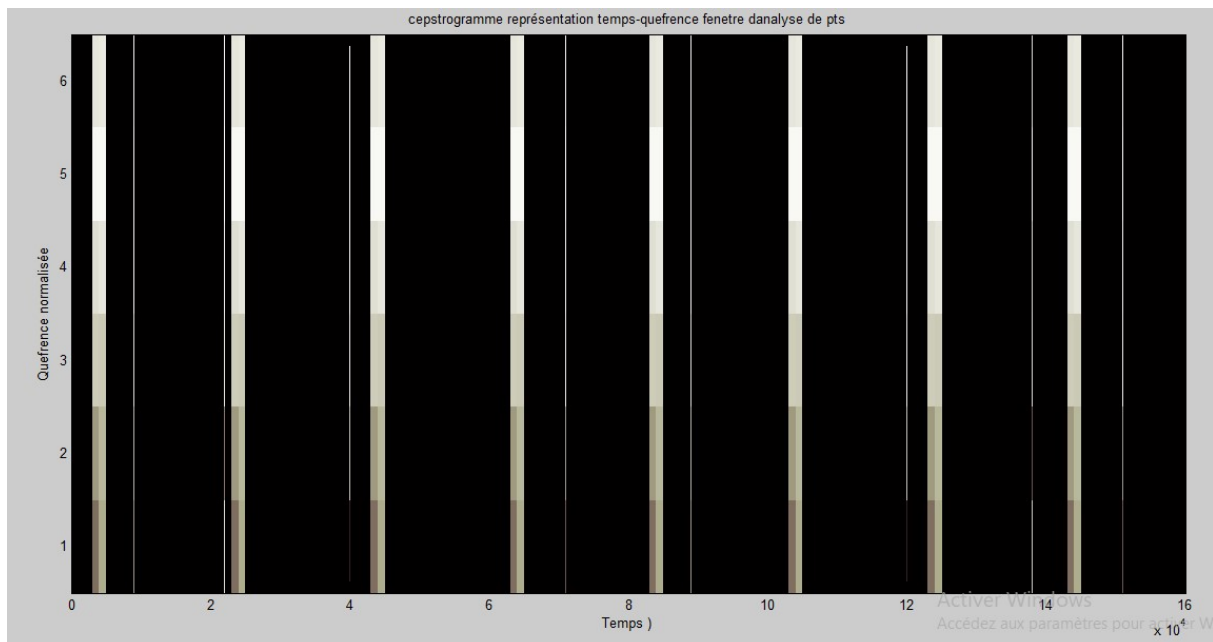


Figure3. 7: Cepstrogramme signal d'engrènement avec défaut localisé.

La figure 3.8 représente la représentation temps - fréquence du signal d'engrènement avec défaut localisé. On constate l'émergence de quelques nouvelles fréquences qui ont celles de défaut, car elles se répètent 4 fois à chaque période, c'est -à- dire un défaut réparti.

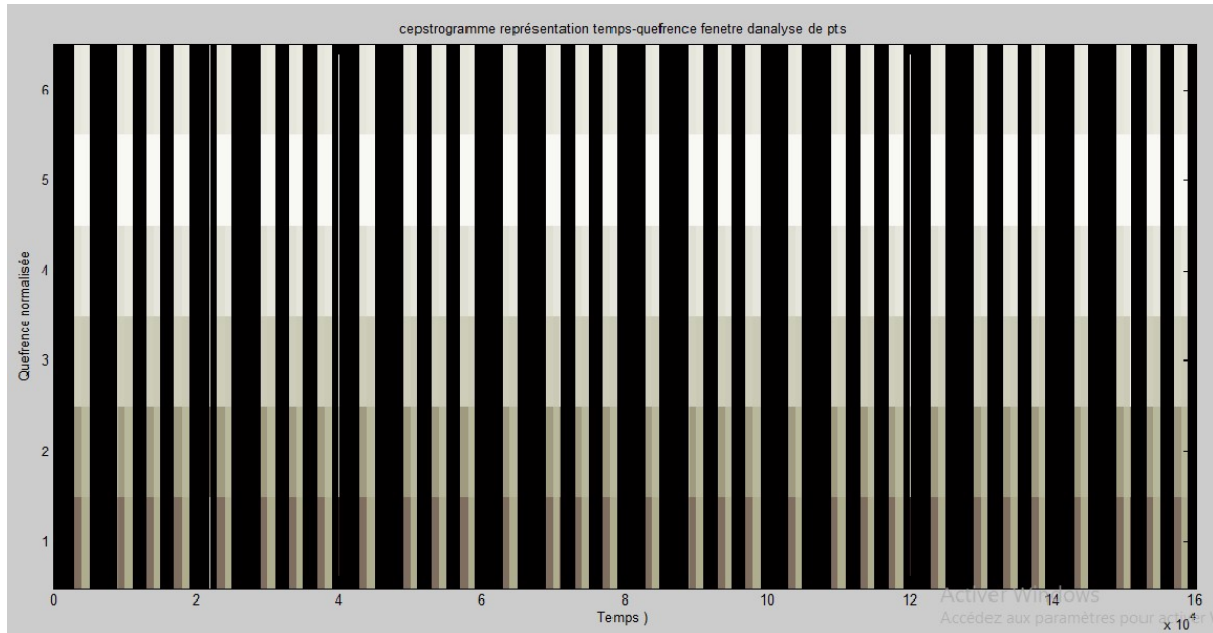


Figure3. 8 : Cepstrogramme du signal d'engrènement avec défaut réparti.

III .7-Conclusion :

Ce chapitre vient compléter le précédent qui a abouti à la détection de défaut utilisant le spectre et le cepstre. Néanmoins, ces deux outils, chacun avantageux par rapport à l'autre, ne présentent pas une localisation temporelle de défaut et donc n'offrent pas un diagnostic de celui-ci mais seulement indiquent son existence.

L'analyse temps-fréquence et l'analyse temps-quéfrece, qui correspondent respectivement au spectre local et au cepstre local, simulées pour des signaux d'engrènement sain et avec défauts ont montré l'apport au diagnostic des défauts en les localisant en temps et en fréquence/quéfrece conjointement.

Le cepstre présentait par rapport au spectre (chapitre II) la capacité de ne pas confondre un signal variant avec un signal avec défaut localisé mais classe le signal variant comme étant un signal sain. Pour le spectrogramme et le cepstrogramme, ne confondent pas tous les deux les deux cas de figures du signal. Cela est justifié, d'une part, par le fait que le cepstrogramme est basé sur le cepstre qui est déjà capable de ne pas confondre les deux cas de figure du signal. D'autre part, le spectrogramme étant présenté en niveau de gris, l'œil ne différencie pas la différence en niveau de gris entre les deux amplitudes des deux spectres des deux signaux : variant et sans défaut. De même que pour l'œil, la machine peut assembler les deux cas (variant et sans défaut) dans le même diagnostic (sain) en utilisant des binarisations à des seuils prédéfinis pour le niveau de gris.

Bien que ces deux outils d'analyse temps-fréquence/quéfrece obéissent au compromis temps-fréquence, leur application dans le domaine de prédiction de défaut et son diagnostic ne s'affecte pas par ce compromis car le signal vibratoire présente souvent une périodicité continue qui vient remédier au manque de précision de localisation temporelle ou fréquentielle.

Conclusion Générale

Conclusion Générale et Perspectives :

Dans ce travail, nous avons étudié la maintenance préventive des machines tournantes par analyse vibratoire. Cette dernière est devenue un outil puissant pour surveiller l'état de fonctionnement d'une machine à tout moment grâce à des indicateurs spéciaux statistiques et spectraux que l'on peut calculer à partir des signaux vibratoires que produisent ces machines. Nous avons fait une étude des modèles de signaux d'engrènement concrétisée par leur simulation numérique dans le cas sain et avec défaut.

L'analyse de Fourier a fait l'objet de très nombreuses études, grâce auxquelles un grand nombre d'outils sont à présent disponibles. De nombreuses analyses ont montré ses limites dans la détection de défaut mécanique en analysant le signal vibratoire dès lors qu'elle donne un spectre à amplitudes non comparables ou lorsqu'elle ne donne pas une localisation temporelle de ses composantes fréquentielles souvent représentées par des pics dans le spectre du signal.

Dans le premier cas de limite, le scepstre, au contraire au spectre, est applicable avec efficacité dès lors qu'il compare les différentes échelles d'amplitudes (détection précoce et différenciation entre signal variant et défaut précoce).

Dans le deuxième cas de limite, la solution la plus simple serait de calculer les spectres instantanés pour chaque pas temporel du signal. Plusieurs méthodes existent et aucune ne prédomine sur l'autre. Leur utilisation va dépendre de l'application visée et des avantages et des inconvénients de chacune pour faire apparaître les informations recherchées. La transformée de Fourier à fenêtre constitue une alternative pour donner une localisation temporelle plus ou moins approchée des différents éléments de fréquence exprimés dans le signal.

En particulier, la FFT est une analyse par bloc temporel qui suppose le signal échantillonné stationnaire sur toute la durée du bloc. Malheureusement, ces techniques ont de nombreuses limitations quand les signaux à analyser sont très non-stationnaires.

Conclusion Générale et Perspectives

Dans ce mémoire, une analyse sur des signaux non vibratoires (signaux d'engrènement) afin de détecter un défaut précoce a été effectuée. Pour cela, nous avons au premier lieu mis en œuvre l'analyse spectrale et cepstrale. Selon cette étude expérimentale, le cepstre a permis de remédier à la limite du spectre qui détecte difficilement un défaut précoce et le confond souvent au signal variant sain.

Le spectre et le cepstre ont montré leurs capacités de détection mais souvent la détection d'une existence d'un défaut dans un équipement mécanique embarqué n'est pas suffisant d'où la nécessité de poursuivre le défaut et établir son diagnostic. Pour cela, nous avons mis une analyse temps-fréquence et une analyse temps-quéfrencce représentées respectivement par le spectrogramme et cepstrogramme. D'après l'étude expérimentale effectuée, ces deux outils sont capables de donner un diagnostic permettant une intervention précoce évitant ainsi l'intervention curative. L'analyse conjointe en temps et en fréquence des signaux vibratoires, bien qu'elle soit soumise au compromis d'Heisemberg-Gabor, la périodicité continue du signal vibratoire de la machine facilite la lecture de localisation même si elle ne soit pas précise.

Perspectives :

- L'analyse effectuée a été appliquée sur des signaux d'engrènement simulés et isolés. Une analyse appliquée sur des signaux modulés (engrènement, arbre tournant, roulement à bille...etc tous ensemble) serait plus proche à la réalité,
- Une réalisation d'une chaîne d'acquisition du signal vibratoire offrirait un modèle pratique permettant de réaliser une base de données pour d'éventuels futurs travaux,
- Une réalisation d'une interface graphique faciliterait l'accès au système d'analyse.

Résumé :

Ce sujet vise une étude sur les méthodes de prédiction de défauts mécaniques afin d'éviter les interventions curatives. Ce genre de maintenance réduit les dégâts que pourrait causer un défaut mécanique (défaut d'engrenages, de roulements à billes..etc). Ainsi, une prédiction de défaut à temps augmente la durée de vie des machines et évite l'arrêt de production pour une intervention curative.

Le travail a été mené pour simuler des signaux vibratoires d'engrènement sains et avec défaut pour effectuer une analyse basée sur des outils de traitement du signal permettant de prédire d'éventuels défauts. Ainsi une analyse spectrale et cepstrale a permis la détection précoce de défaut. Etant donné que pour un système mécanique embarqué, la détection n'est souvent pas suffisante. Pour cela, nous avons effectué une analyse temps-fréquence et une analyse temps-quéfrencce afin de poursuivre le signal conjointement en temps et en fréquence et de pouvoir ainsi établir un diagnostic précoce de défaut.

ملخص:

يهدف هذا الموضوع إلى دراسة طرق التنبؤ بالعيوب الميكانيكية لتلافي التدخلات العلاجية. يقلل هذا النوع من الصيانة الضرر الذي يمكن أن يسببه عطل ميكانيكي (تروس معيبة، محامل كروية ... إلخ). وبالتالي، فإن التنبؤ المبكر بالأخطاء يزيد من عمر الآلات ويتجنب توقف الإنتاج من أجل التدخل العلاجي.

تم تنفيذ العمل لمحاكاة إشارات اهتزاز متشابكة صحية وخاطئة لإجراء تحليل بناءً على أدوات معالجة الإشارات للتنبؤ بالأعطال المحتملة. وبالتالي، سمح التحليل الطيفي والعمودي بالكشف المبكر عن الخلل. نظرًا لأن النظام الميكانيكي مضمن، غالبًا ما يكون الاكتشاف غير كافٍ. للقيام بذلك، أجرينا تحليلًا للتردد الزمني وتحليلًا للتردد الزمني من أجل تتبع الإشارة معًا في الوقت والتردد وبالتالي نكون قادرين على إنشاء تشخيص مبكر للخطأ.

Abstract :

This subject aims at a study on the methods of prediction of mechanical defects in order to avoid curative interventions. This type of maintenance reduces the damage that a mechanical fault could cause (faulty gears, ball bearings, etc.). Thus, an early fault prediction increases the life of the machines and avoids the stoppage of production for a remedial intervention.

Work was carried out to simulate healthy and faulty meshing vibration signals to perform analysis based on signal processing tools to predict possible faults. Thus a spectral and cepstral analysis allowed the early detection of defect. Since for an on-board mechanical system, detection is often not sufficient. To do this, we performed a time-frequency analysis and a time-frequency analysis in order to track the signal together in time and frequency and thus be able to establish an early fault diagnosis.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bibliographie :

- [ale07] Ales Belsak *, Joze Flaker. Detecting cracks in the tooth root of gears. University of Maribor, Faculty of Mechanical Engineering, Smetanova 17, 2000 Maribor, Slovenia ,2007
- [Bad. 97] M. El Badaoui, M. Guillet, N. Nejjar, P. Martini et J. Danière, Diagnostic d'un train d'engrenages par analyse cepstrale synchrone, 16ème Colloque GRETI sur le traitement du signal et des images, 15-19 Septembre grenoble
- [Bad. 99] M. El Badaoui, Contribution au Diagnostic Vibratoire des Réducteurs Complexes à Engrenages par l'Analyse Cepstrale . le 9 juillet 1999
- [BEC7] Bechkri Bouchra, ANALYSE DES DÉFAUTS DE DENTURE ET LEURS INFLUENCES SUR LES TRANSMISSIONS MÉCANIQUES PAR ENGRENAGES. 2007
- [BEN18]. H. BENMOHAMED Hanène , MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT VIBRATOIRE DES MACHINES TOURNANTES (DES ENGRENAGES) EN PRESENCE DE DEFAU. 2018.
- [BON07] Bonori G, Pellicano F. "Non-smooth dynamics of spur gears with manufacturing errors". Journal of Sound and Vibration, 2007, Vol. 306, N° 1, pp. 271-283.
- [Bou. 03] A. Boulenger et C. Pachaud, Analyse vibratoire en maintenance, Surveillance et diagnostic des machines, Dunod, 2003.
- [Bren. 03] Breneur C. "Eléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements". Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003
- [BRU96] Svend Gade, Klaus Gram-Hansen Non-stationary Signal Analysis using wavelet transform, Short time Fourier transform and Wigner-Ville Distribution. 1996
- [Capd92] Capdessus C., « Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal », thèse de l'INPG, 1992.
- [DJE.13] O. DJEBILI , Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement. 26 septembre 2013
- [Duc. 05] G. Duchemin, Maintenance des machines et des moteurs, traité de maintenance, Techniques Techniques de l'Ingénieur BM 4188, version 2005.
- [Fonta92] Fontanive C., Prieur P., « Surveillance et diagnostic des engrenages », Progrès récents des méthodes de surveillance acoustiques et vibratoires, Senlis, octobre 1992, pp.6
- [Gil09] Gill-Jeong C. "Analysis of the nonlinear behavior of gear pairs considering hydrodynamic lubrication and sliding friction", J. Mech. Sci. Tech, 2009, Vol. 23, N° 8, pp. 2125-2137.
- [Gue. 16] Guerine A. "Contribution à l'étude du comportement dynamique d'un système d'engrenage en présence d'incertitudes". Génie mécanique, INSA de Rouen, 2016.
- [jbil17] Dalia Jbily, Prise en compte de l'usure dans la modélisation du comportement sous charge des engrenages roues et vis tangentés, L'UNIVERSITE DE LYON, 16.04.2016
- [jin14] Hui Ma, Jin Zeng, Review on dynamics of cracked gear systems, Article history: Received 5 December 2014

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **[mar12]** Marc THOMAS. “ Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines”. 2012
- [Mec. 05] B. Mechin, Introduction aux méthodes de maintenance, traité de maintenance, Techniques de l’Ingénieur MT 9280, version 2005
- [Mec. 05_b] B. Mechin, Introduction aux méthodes de maintenance, traité de maintenance, Techniques de l’Ingénieur MT 9280, version 2005.
- [Mess.19] A Messaoud BOULECHEFAR.a,Optimisation et amélioration de la maintenance par la fiabilité Cas d’une turbine d’une centrale électrique,2019
- [MIN18] MinjiaHe, ShuoLi No smooth Vibration Characteristic of Gear Pair System with Periodic Stiffness and Backlash 2018, Article ID 3498057,
- [mob 99] R. Keith Mobley, Vibration Fundamentals, Newnes – Butterworth–Heinemann,1999
- [MOU10] I. MOUMNE. identification des défauts mixtes d' engrenage et de roulement par analyse vibratoire,2010 !
- [nab20]Iset nabeule les stratégies de la maintence
- [Sin89]] Singh R, Xie H, Comparin R. “Analysis of auto motive neutral gear rattle”. “Journal of Sound and Vibration”(, 1989, Vol. 131, N°.2, pp.177-196