

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMÉRI DE

TIZI-OUZOU

FACULTÉ DU GÉNIE DE LA

CONSTRUCTION

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme
de Master en **ÉLECTROMÉCANIQUE**

Option **MAINTENANCE INDUSTRIELLE**

Sujet

Etude comparative des indicateurs scalaires
utilisés dans le diagnostic des machines tournantes

Proposé par : Mr. Kamel Belaid

Réalisé par : Amine Zitouni / Mouloud Ourzane

Année universitaire : 2021-2022

Dédicaces

Nous dédions ce travail à nos chères familles qui grâce à eux nous sommes arrivés à ce niveau. A tous nos amis et à nos proches.

Remerciement

Le grand remerciement revient à Dieu qui nous a donné La force et le courage à réaliser et terminer ce modeste travail. Et on tient à exprimer nos remerciements à monsieur Kamel Belaid pour nous avoir proposé ce sujet et pour sa disponibilité dans le suivi de ce travail et pour ses précieux conseils et orientations. Que monsieur le président et les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et de notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants, les responsables et personnel de la spécialité électromécanique filière maintenance industrielle département génie mécanique.

On tient aussi à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Introduction generale	9
Chapitre I : Les aspects théorique de la maintenance	12
I.1 Introduction :	13
I.2 La maintenance industrielle :	13
I.2.1 Définition de la maintenance AFNOR X60-000 (mai 2002):	13
I.2.2 Le rôle de la maintenance :	13
I.2.3 Les grands principes de la maintenance :	13
I.3 Les types de la maintenance :	14
I.3.1 La maintenance corrective :	15
I.3.2 La maintenance palliative :	16
I.3.3 La maintenance curative :	16
I.3.4 La maintenance préventive :	16
I.3.5 La maintenance préventive systématique :	16
I.3.6 La maintenance préventive prévisionnelle :	17
I.3.7 La maintenance préventive conditionnelle :	17
I.4 Les avantages de la maintenance préventive :	18
I.5 Diagnostic industriel et dépistage :	18
I.6 Les différentes étapes techniques du diagnostic :	18
I.7.3 L'analyse d'huile :	20
I.7.4 Analyse vibratoire en maintenance :	20
I.7.4.1 Caractérisation d'une vibration :	20
I.7.4.2 La fréquence :	20
I.7.4.3 L'amplitude :	21
I.7.6 Les captures :	21
I.7.6.1 Définition :	21
I.7.7 Les types de capteur :	21
I.7.7.1 Proximètres :	21
I.7.7.2 Intérêts et limites d'utilisation des proximètres :	22
I.7.7.3 Vélocimètres :	22
I.7.7.4 Les accéléromètres :	23
Chapitre II : Traitement du signale et analyse temps-echelle	24
II.1 Introduction:	25

II.2 Représentation temporelle des signaux :	25
II.2.1 Série de Fourier :	25
II.2.2 Période d'un signal :	25
II.2.3 Exemple de signaux temporelle:	25
II.2.4 Pourquoi on utilise le domaine temporel :	26
II.2.5 Limite du domaine temporel :	26
II.3 Représentation fréquentielle des signaux:	27
II.3.1 Transformée de Fourier :	27
II.3.2 Transformée de Fourier discrète :	28
II.3.3 Exemples de spectre fréquentielle :	28
II.3.4 Limite du domaine fréquentiel :	29
II.4 Analyse temps-fréquence des signaux:	29
II.4.1 La transformée de Fourier à court terme :	29
II.4.2 Atomes temps-fréquence et spectrogramme:	30
II.4.3 Exemple de signal analysé en temps-fréquence (TFCT):	31
II.4.4 Les limites de la TFCT:	32
II.5 Analyse temps-échelle des signaux :	33
II.5.1 Les coefficients d'ondelettes:	34
II.5.2 Exemple de coefficients d'ondelettes:	35
II.5.3 Transformée en ondelette continue :	36
II.5.4 Transformée en ondelette discrète :	37
II.5.5 Qu'apportent les ondelettes par rapport à l'analyse de Fourier? :	37
Chapitre III : Optimisation des paramètres d'ondelettes de morlet et choix de l'indicateur scalaire	39
III.1 1ere partie : optimisation des paramètres de l'ondelette de morlet	40
III.1.1 Introduction :	40
III.1.2 Ondelette de morlet :	40
III.1.3 Ondelette de morlet complexe :	40
III.1.4 Les paramètres de l'ondelette de Morlet :	41
III.1.4.1 La fréquence central de l'ondelette:	41
III.1.4.2 L'échelle (s):	41
III.1.4.3 Le paramètre de la bande passante (fb):	42

III.2 2eme partie : choix de l'indicateur scalaire	43
III.2.1 Introduction:	43
III.2.2 Les indicateurs scalaires :	43
III.2.2.1 Définition:	43
III.2.3 Les indicateurs scalaires utilisés:	44
III.2.3.1 Le kurtosis :	44
III.2.3.2 L'indicateur SI :	44
III.2.3.3 L'indicateur SM:	44
III.2.4 Comparaison de trois indicateurs:	44
III.2.5 Sélection de la bande de démodulation optimale:	47
Chapitre IV : Validation expérimentale	50
IV.1 Introduction:	51
IV.2 Défauts d'engrenages:	51
IV.2.1 Cas 1 : Une dent cassée :	51
IV.2.1.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM:	52
IV.2.1.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:	53
IV.2.2 Cas1-2:	54
IV.2.2.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM:	55
IV.2.2.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:	56
IV.2.3 Cas 2 : deux dents cassées	57
IV.2.3.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :	59
IV.2.3.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:	59
IV.2.4 Cas 2-2:	60
IV.2.4.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :	61
IV.2.4.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:	62
IV.3 Défauts de roulements:	63
IV.3.1 Cas 1 : Défaut sur la bague externe :	63
IV.3.1.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :	64
IV.3.1.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:	65
IV.3.2 Cas 2 : Défaut sur la bague interne :	65
IV.3.2.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :	66
IV.3.2.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:	66

IV.4 Conclusion:	67
V. Conclusion générale :	68
VI. Références bibliographiques:	70

Introduction generale

Depuis plus de vingt ans, les exigences du marché ainsi que les mutations des systèmes productifs ont conduit à des évolutions structurelles profondes de la maintenance industrielle, il s'agit de plus en plus, d'établir les moyens de contrôles et de surveillance nécessaires pour les systèmes de production, afin de garantir au meilleur coût la disponibilité requise, et d'apporter des solutions efficaces aux pannes imprévues qui sont très onéreuse et d'accroître leurs performances.

Puisque la plupart des usines se composent des systèmes électromécaniques, la surveillance vibratoire est un outil préventif important pour les opérations de la maintenance. La signature vibratoire permet à elle seule de détecter pratiquement tous les défauts susceptibles d'apparaître dans les machines tournantes. Un balourd, un jeu, un défaut d'alignement, un roulement usé ou endommagé ... se traduisent par une variation des efforts internes que subit la machine et donc à une modification de son comportement vibratoire.

L'analyse de Fourier est la méthode la plus utilisée dans le traitement du signal vibratoire d'une machine, mais elle n'est pas vraiment efficace vu que l'information temporelle est complètement perdue. En plus, elle n'est pas bien adaptée à l'analyse des signaux à caractères instationnaires de type chocs. L'analyse spectrale et l'analyse d'enveloppe sont des méthodes complémentaires, mais cela reste insuffisant.

La nécessité d'avoir l'information temporelle et l'information fréquentielle pour l'analyse d'un processus donné a poussé les spécialistes à développer une analyse dans le domaine temps-fréquence, elle a pour nom la transformée de Fourier à court terme (TFCT). Cette dernière est généralement utilisée pour le traitement de signaux instationnaires. Cependant, elle ne permet pas une analyse à la fois locale en temps et précise en fréquence. Plusieurs signaux exigent d'autres techniques où nous pouvons changer la taille de la fenêtre pour analyser des composantes de différentes échelles.

La transformée en ondelette qui offre une représentation temps-échelle, dont l'échelle est liée à la fréquence, est plus indiquée pour résoudre les problèmes liés à la faible résolution conjointe temps/fréquence de la TFCT.

Les défauts de types choc sont les plus difficiles à diagnostiquer en plus ils affectent les organes les plus importants dans une machine qui sont les roulements et les engrenages. L'image vibratoire de ces défauts au niveau des basses fréquences, c'est-à-dire la recherche de la composante principale du défaut et ses harmoniques, est commune à plusieurs défauts, d'où la difficulté de statuer sur l'existence d'un tel ou tel défaut. L'autre méthode utilisée pour diagnostiquer ces défauts consiste à rechercher et à analyser les résonances excitées par ces derniers. Mais en pratique, les valeurs des résonances excitées ainsi que leurs bandes optimales de démodulation ne sont pas connues au préalable. Pour cela, il faut impérativement utiliser des indicateurs scalaires pour la recherche de la forme instationnaire générée par les défauts de ce genre.

L'objectif principal de ce travail est d'utiliser la transformée continue en ondelettes, qui permet un filtrage optimal multi-échelle implémenté avec l'ondelette complexe de Morlet, pour la détection des résonances et leur bande optimale de démodulation. Nous allons par la suite, utiliser trois indicateurs scalaires pour la recherche de la forme instationnaire au niveau des coefficients d'ondelettes. L'étude concerne trois indicateurs, le premier est le Kurtosis, c'est l'indicateur le plus utilisé pour la recherche et le diagnostic des défauts de type choc. Les deux autres indicateurs sont le Sparsity measurement et le Smoothness index. Ces derniers sont nouvellement utilisés pour la recherche de la forme instationnaire. Nous avons donc mené une étude comparative afin de sélectionner le plus adéquat pour ce genre de situations

Dans le premier chapitre nous présentons quelques aspects sur la maintenance dans le domaine industriel en général et les capteurs les plus utilisés dans le domaine d'analyse vibratoire.

Dans le deuxième chapitre nous avons donné les principes de bases du traitement de signal

d'une manière générale et les méthodes temps-fréquences et temps-échelles d'une manière particulière.

Le troisième chapitre est consacré, dans un premier temps, à l'étude théorique de l'ondelette de Morlet complexe et ses avantages par rapport aux autres ondelettes analysante, par la suite, nous avons présenté l'étude comparative des trois indicateurs scalaires choisis. Nous avons donc donné les avantages de deux indicateurs, SM et SI, par rapport à l'indicateur le plus utilisé qui est le Kurtosis.

Le dernier chapitre est réservé à la validation expérimentale de la démarche proposée. Nous avons appliqué la méthode sur des bancs d'essai comportant des organes défectueux.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale qui va résumer les principaux résultats obtenus.

Chapitre I : Les aspects théorique de la maintenance

I.1 Introduction :

Le monde industriel et le monde des transports disposent de machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes un rôle prépondérant. Elle doit permettre de n'intervenir qu'en présence d'éléments défectueux, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements. Dans ce chapitre, nous introduisons l'approche de maintenance, nous donnons les différents types de maintenance et présentons les causes de défaillances. Un rappel sur l'analyse vibratoire des machines tournantes est également donné.

Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale la machine industrielle tourne à une cadence infernale afin de rétablir ce que cette guerre a démoli. Les besoins de l'homme en produits de consommation divers ont augmenté et se sont amplifiés d'une année à l'autre. La complexité et le coût croissant des appareils de production ont entraîné une forte augmentation de leur intensité d'utilisation mettant en évidence le besoin d'une bonne maintenance afin d'assurer une meilleure performance des installations et machines.

La maintenance industrielle, qui a pour vocation d'assurer le bon fonctionnement des outils de production, est une fonction stratégique dans les entreprises. Intimement liée à l'incessant développement technologique, à l'apparition de nouveaux modes de gestion, à la nécessité de réduire les coûts de production, elle est en constante évolution. Elle n'a plus aujourd'hui comme seul objectif de réparer l'outil de travail mais aussi de prévoir et éviter les dysfonctionnements

I.2 La maintenance industrielle :

I.2.1 Définition de la maintenance AFNOR X60-000 (mai 2002):

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise(3).

La maintenance est définie comme étant « l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé »(4). Maintenir c'est donc effectuer des opérations (dépannage, graissage, visite, réparation, amélioration, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production. Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût global optimum.

Il est à noter que la définition de la maintenance n'est pas limitée aux deux définitions précédentes qui lui donnent l'aspect d'entretien. Nous pouvons définir la maintenance comme étant un état d'esprit, une manière de penser, ensuite une discipline nouvelle.

I.2.2 Le rôle de la maintenance :

La maintenance doit assurer la rentabilité des investissements matériels de l'entreprise, en maintenant le potentiel d'activité set en tenant compte de la politique définie par l'entreprise. La maintenance a pour objet de caractériser les défauts de fonctionnement puis d'optimiser le remplacement ou la réparation d'équipements usés ou défectueux(1).

I.2.3 Les grands principes de la maintenance :

Pour un objet vieilli, la maintenance est l'art de le garder en état de marche. Si on savait

comment l'objet vieillit, on pourrait évidemment améliorer les maintenances : on saurait quelles pièces doivent être remplacées, avec quel délai. On voit donc immédiatement l'impact que peut avoir une amélioration des connaissances fondamentales sur le vieillissement, car les maintenances sont nécessaires au quotidien, que ce soit pour les appareils ménagers, les réseaux domestiques, l'énergie, etc. Une maintenance pose en vérité deux problèmes, assez distincts :

- **Un problème scientifique** : quelles pièces doivent être remplacées, et pourquoi ?

- **Un problème d'organisation**, lié au coût : lorsqu'on démonte pour remplacer une pièce, ne faut-il pas mieux remplacer aussi la pièce voisine ? Comment planifier ces maintenances, pour réduire le coût et réduire l'immobilisation ou l'indisponibilité de l'objet ?

Ces actions diffèrent selon les techniques mises en oeuvre, à savoir :

- La maintenance corrective (palliative ou curative).
- La maintenance préventive (systématique. Conditionnelle ou préventive)

Une maintenance consiste à mettre en oeuvre, pour chaque ensemble; voir chaque sous ensemble, voir chaque élément, la technique la mieux adaptée et la technique optimale.

Ce choix se fera en fonction des critères suivant

- Comportement du matériel ;
- Historique ;
- Pannes totalement aléatoires.
-

De l'analyse de ces critères et de leur confrontation à la réalité, on est amené à choisir une technique de maintenance.(2)

I.3 Les types de la maintenance :

Dans les ateliers de maintenance où le fonctionnement est quasi continu, les responsables souhaitent des taux de disponibilité très élevés, et le dépannage en maintenance corrective doit être limité le plus possible à cause des conséquences fâcheuses et imprévisibles qu'il peut y avoir.

Les prochains paragraphes décrivent donc les différents types de maintenance, ainsi que leurs applications :

Evénement	Défaillance	Echéancier	Seuils prédéterminés
Concepte de maintenance	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Maintenance corrective</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Maintenance palliative</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Maintenance curative</div> </div> </div>	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Maintenance préventive</div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Maintenance Systématique</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: 40%;">Maintenance conditionnelle</div> </div> </div>	
Operation de maintenance	Dépannage Réparation	Remplacement	

Figure 1: tableau sur les types de maintenance en fonction de la défaillance

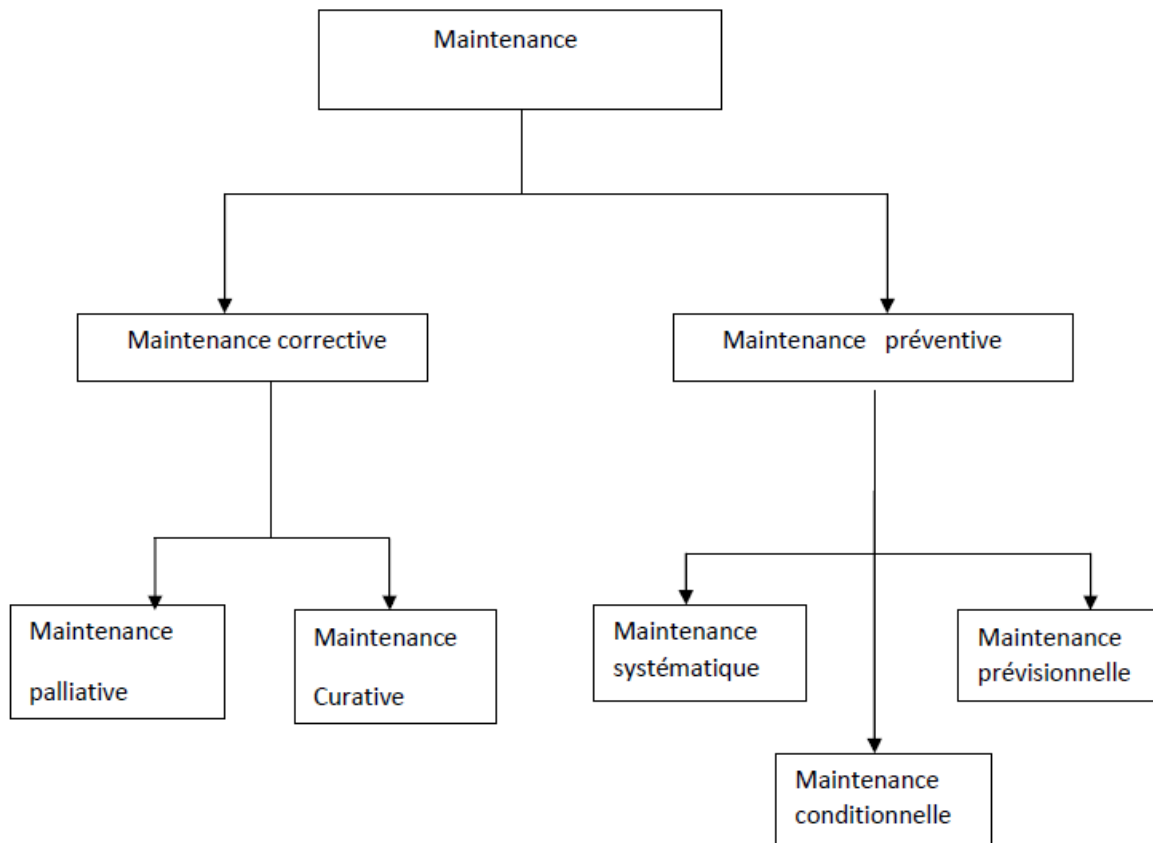


Figure 2: schéma sur les types de maintenance

I.3.1 La maintenance corrective :

Elle s'effectue après défaillance et la caractéristique aléatoire de cette dernière fait qu'il n'est pas possible de planifier les interventions. La qualité du remède est directement liée à la qualité du diagnostique (2); Ce type de maintenance intervient après la détection et la localisation d'un défaut, elle est destinée à remettre une entité dans un état qui lui permet d'accomplir la fonction requise. On distingue deux types de maintenance corrective : la maintenance corrective palliative et la maintenance corrective curative(6).

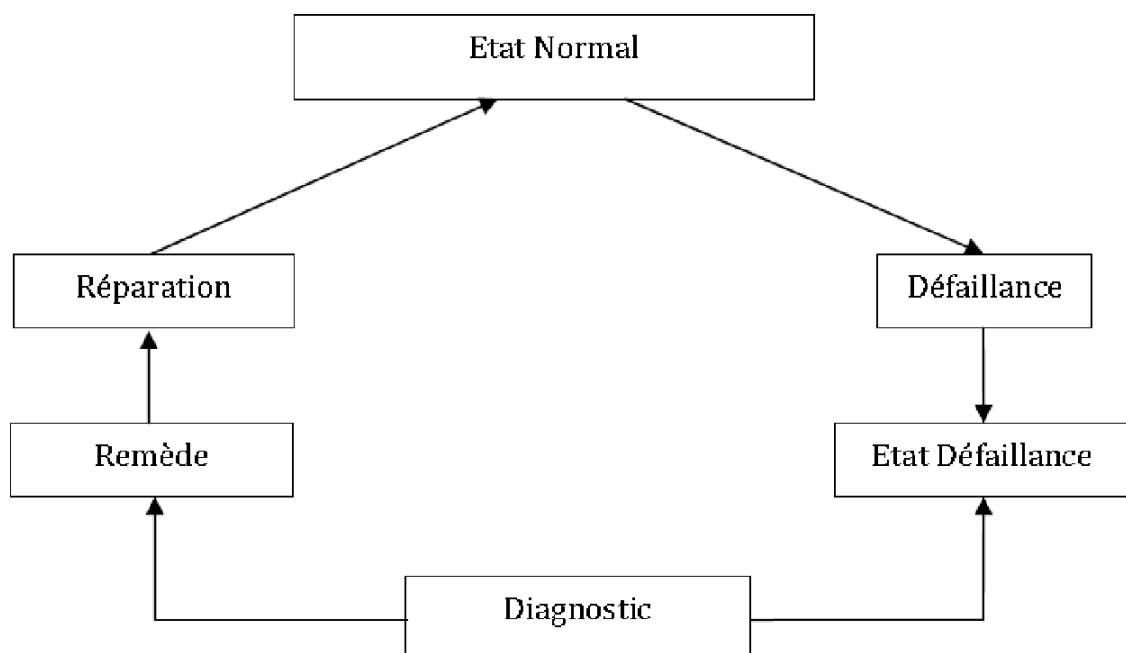


Figure 3 : Diagramme d'une maintenance corrective

I.3.2 La maintenance palliative :

La maintenance palliative consiste à rétablir les fonctions requises du système d'une façon temporaire et provisoire. En général, ce type de maintenance est toujours suivi de la maintenance curative, appelée aussi, dans un langage courant, dépannage, son rôle est de gagner du temps pour la préparation et la planification pour les tâches de la maintenance curative.

I.3.3 La maintenance curative :

La maintenance curative est un ensemble d'actions qui permettent de faire rétablir le bon fonctionnement du système d'une façon permanente, ces actions pouvant être des réparations ou des remplacements de composants.

I.3.4 La maintenance préventive :

C'est une maintenance effectuée selon des critères prédéterminés dans l'intention de réduire la probabilité de la défaillance d'un bien(2).

L'objectif de la maintenance préventive est de diminuer la probabilité de défaillance ou de dégradation d'un composant qui pourrait nuire à sa fonction requise(6). Ce type de maintenance intervient si une durée de vie d'un composant est expirée (maintenance systématique) ou si ce composant se trouve dans un état de dégradation significatif et qui pourrait provoquer une défaillance sur le système qui le rend incapable d'accomplir sa fonction requise (maintenance conditionnelle).

Elle s'adresse aux éléments provoquant une perte de production ou des coûts d'arrêts imprévisibles classés comme importants pour l'entreprise.

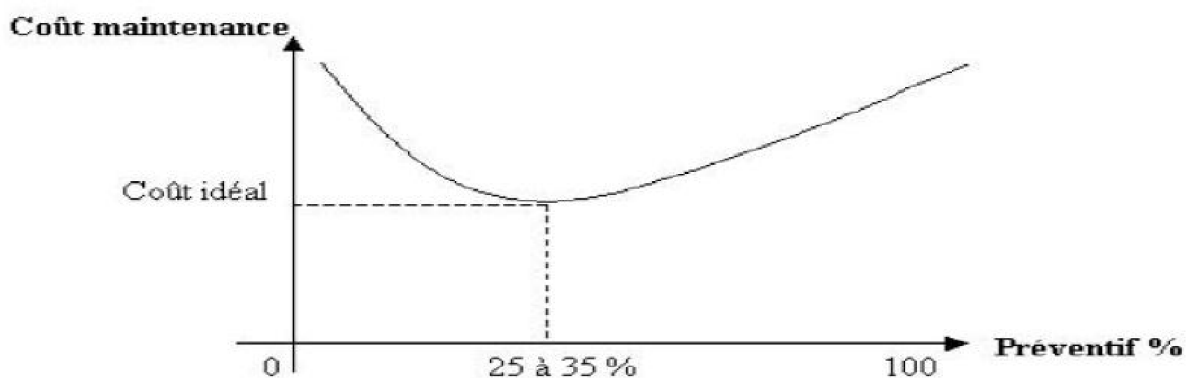


Figure 4 : Évaluation du coût de la maintenance.

I.3.5 La maintenance préventive systématique :

La maintenance préventive systématique intervient avant même qu'une simple dégradation ait été constatée, car, elle intervient à la limite de la durée de vie des composants et sans prendre en considération l'état du système à cet instant. Le composant est alors remplacé d'une façon systématique.

Les étapes de cette politique de maintenance sont schématisées dans la figure :

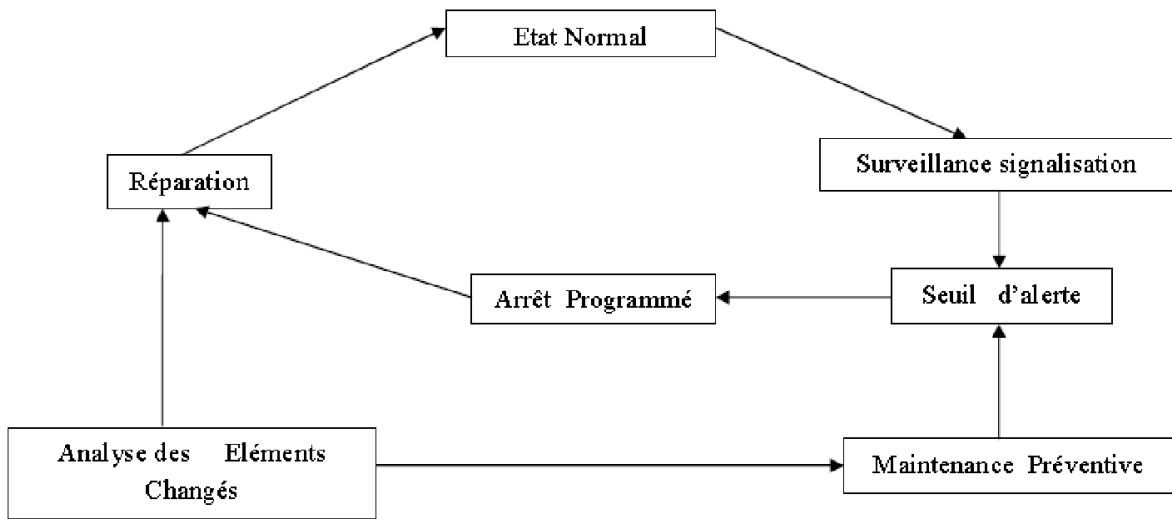


Figure 6: Diagramme d'une maintenance préventive conditionnelle

I.4 Les avantages de la maintenance préventive :

Dans tout type d'industrie, l'entretien préventif des équipements garantit un fonctionnement optimal ; cela comprend généralement la lubrification, le nettoyage et le réglage ou le remplacement des pièces dysfonctionnelles.

Lorsqu'un programme de maintenance d'une machine est bien établi sur une période donnée, il contribue à la réduction des pannes et à la réalisation rapide des interventions de réparation.

Si la mise en œuvre d'un programme complet de maintenance préventive est assez coûteuse a première vue, elle s'avère rentable à long terme et présente de nombreux avantages :

- Productivité des équipements.
- Gain de temps.
- Economies financières.
- Un bon fonctionnement des équipements.
- Éviter les défaillances et préparer à des événements indésirables.
- Rallonger la durée de vie des outils et des équipements.

I.5 Diagnostic industriel et dépistage :

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

Deux tâches essentielles sont nécessaires à l'établissement d'un diagnostic :

- Observer les symptômes de défaillance
- Identifier la cause de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur les observations

I.6 Les différentes étapes techniques du diagnostic :

Les étapes techniques du diagnostic industriel nécessaires à la conception, au développement et à l'exploitation de systèmes d'aide au diagnostic, sont définies dans la figure :

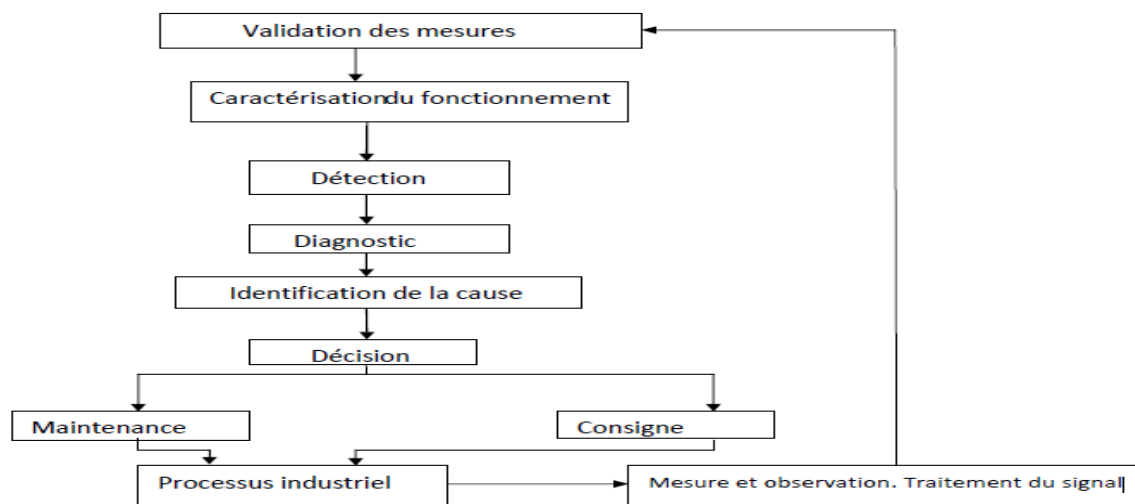


Figure 7: Les différentes étapes du diagnostic industriel.

La première étape en diagnostic industriel consiste à extraire des informations nécessaires à la mise en forme des caractéristiques associées aux fonctionnements normaux et anormaux. Ces mesures sont réalisées par un personnel compétent avec des moyens de mesure (capteurs), afin de détecter un défaut et identifier ses causes.

La décision consiste à fixer des seuils d’alarme sur la valeur de l’écart mesuré entre la signature nominale (théorique) et celle observée.

La maintenance et la consigne (changements) interviennent pour corriger les anomalies existantes à l’aide d’un processus industriel. Pour s’assurer de l’efficacité de ce processus mis en œuvre, des mesures doivent être réalisées et traitées.

I.7 Les techniques de surveillance :

I.7.1 La thermographie infrarouge :

La thermographie est une des techniques utilisées pour contrôler l’état des structures et des systèmes industriels. Elle mesure l’intensité des émissions de rayons infrarouges (c’est-à-dire de chaleur) par une caméra infrarouge, afin de déterminer les conditions opératoires de l’équipement. Grâce à la détection des anomalies thermiques certaines zones sont plus chaudes ou plus froides qu’elles ne devraient l’être, un inspecteur expérimenté peut localiser et identifier les incidents dès leur naissance. Le champ d’application de cette technique est très vaste et on peut citer :

- la détection des points chauds dans les équipements électriques (conducteurs sous dimensionnés, cosses mal vissées, etc..) ou mécaniques (dégradation d’un palier) [figure]
- la détection des fuites thermiques dans les fours, canalisations etc....

La thermographie infrarouge est relativement coûteuse, mais c’est un outil très polyvalent.

I.7.2 L’analyse des mesures ultrasonores :

Tout mouvement relatif entre pièces produit des ultrasons de friction. La mesure et l’enregistrement des signaux ultrasonores effectués à cadence régulière, et leur suivi dans le temps permettent de détecter beaucoup de problèmes de façon simple efficace et peu onéreuse. La technique offre de multiples applications dans le contrôle d’équipements

hydrauliques et pneumatiques (détection de fuites, contrôle d'étanchéité) et permet aussi de détecter les ultrasons émis par des défauts d'origine électrique (mauvais contacts, effets corona, effets d'arc, etc.).(12)

I.7.3 L'analyse d'huile :

L'analyse d'huiles est d'une importance primordiale dans tout programme de maintenance des machines industrielles. La mise en œuvre de cette analyse est simple et presque tous les mécanismes lubrifiés sont susceptibles d'être sujets à ce diagnostic. L'huile est en contact permanent avec les pièces en mouvement. Elle fournit de nombreuses informations sur l'état de la machine. Lorsque l'équipement est mis à rude épreuve, la qualité du lubrifiant s'en ressent.

L'analyse d'huile permet de suivre dans le temps les caractéristiques physico-chimiques du lubrifiant. Cela permet d'apprécier son état de dégradation et donc son aptitude à remplir sa fonction dans la machine.

Les résultats de l'analyse permettent de déceler des anomalies telles que :

- La contamination par des particules internes de l'équipement
- La pollution par des agents extérieurs
- L'usure par abrasion

L'analyse d'huile fait partie des moyens mis en œuvre pour faire la maintenance préventive. Avec l'analyse vibratoire et la thermographie, elle permet d'éviter les pannes imprévues et les réparations coûteuses.(12)

I.7.4 Analyse vibratoire en maintenance :

L'analyse vibratoire est certainement l'outil favori dans la maintenance préventive conditionnelle des machines tournantes. Les techniques d'analyse vibratoires ont tellement évolué qu'on est passé d'une détection tardive à la prédiction. Dans ce contexte l'ingénieur de maintenance pourra détecter le problème dès sa naissance, suivre son évolution dans le temps et choisir le moment opportun pour intervenir de manière à faire un compromis entre disponibilité de la main d'oeuvre, des pièces de rechanges et les surcharges de la production, bref c'est le paradis sur terre.

I.7.4.1 Caractérisation d'une vibration :

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

Une oscillation est une vibration dans le temps de la magnitude d'une quantité en regard d'une référence spécifiée, lorsque cette magnitude est alternativement plus grande ou plus petite que la référence .En effet, Un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence .Nous pouvons dire qu'une vibration se caractérise principalement par son amplitude, sa fréquence et la nature des forces qu'ils animent.

I.7.4.2 La fréquence :

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz [Hz], (1 Hertz=1 cycle/seconde). La fréquence f est l'inverse de la période T : $f = 1/T$.(7)

I.7.4.3 L'amplitude :

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. Vu la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs pour caractériser son amplitude.(7)

I.7.5 Chaîne de mesure :

La chaîne pour mesurer les vibrations doit remplir les fonctions suivantes :
Transformer la vibration mécanique en un signal électrique :

Le signal délivré par le capteur peut être exprimé à l'aide des grandeurs suivantes :

- La tension électrique : pour les capteurs de tension (en mV/g, mV/ μ m, ...)
- La charge électrique : pour les accéléromètres piézoélectriques (en PC/g).

Amplifier le signal de sortie du capteur pour le rendre exploitable et transportable :

Le préamplificateur peut être ou non incorporé au capteur et il donne :

- soit une amplification simple de la tension de sortie du capteur
- soit une transformation de la charge électrique en tension avant son amplification.

I.7.6 Les captures :

I.7.6.1 Définition :

Il constitue le premier maillon de la chaîne de mesure, sa fonction est de transformer le mouvement vibratoire en un signal électrique. La grandeur mesurée peut être : le déplacement, vitesse ou accélération.

I.7.7 Les types de capteur :

I.7.7.1 Proximètres :

Les capteurs de déplacement ou proximètres (ou encore appelés capteurs de proximité) mesurent la distance comprise entre la surface surveillée (généralement celle d'un arbre tournant) et l'élément détecteur du capteur (appelée sonde). Ce sont des capteurs dits relatifs, par opposition aux capteurs de vitesse ou d'accélération qui sont dits absolus.

Un capteur de déplacement à courants de Foucault mesure le mouvement relatif de l'arbre par rapport au support sur lequel il est fixé (généralement le corps du palier) alors qu'un vélocimètre ou un accéléromètre mesurent le mouvement vibratoire de ce support consécutif à la vibration du rotor.(13)

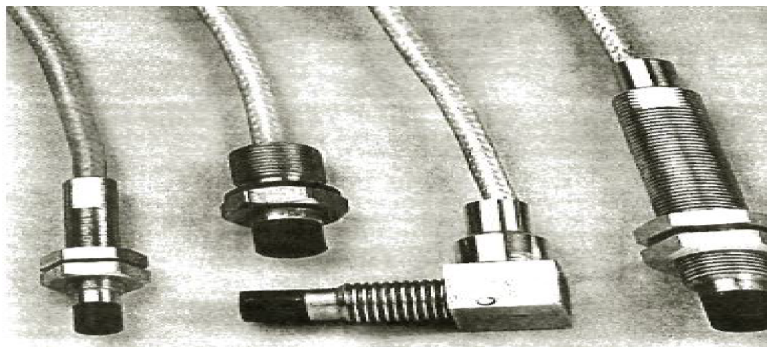


Figure 8:Exemples de proximètres

I.7.7.2 Intérêts et limites d'utilisation des proximètres :

L'utilisation privilégiée de ces capteurs est la surveillance des machines à paliers à film d'huile, soit pour surveiller le déplacement axial de l'arbre, soit pour mesurer son mouvement radial relatif et déterminer la position de son axe de rotation par rapport au centre du palier.

Mais Quelle qu'en soit l'utilisation, ces capteurs mesurent le déplacement et leur emploi est de ce fait limité à la surveillance des défauts se manifestant aux basses fréquences, c'est-à-dire dont la fréquence des composantes vibratoires induites n'excède généralement pas l'ordre 4 de la fréquence de rotation.

I.7.7.3 Vélocimètres :

Les capteurs de vitesse ou vélocimètres sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté (Figure 9). Le mouvement de la bobine, induit par la vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse du mouvement de la bobine.

Ce type de capteur présente l'avantage de ne nécessiter ni source d'alimentation ni préamplificateur. L'amplitude du signal délivré est directement proportionnelle à la vitesse de la vibration absolue du palier au point de mesure.

L'utilisation des vélocimètres, très fréquente dans les services de maintenance jusqu'aux années 1990, tend aujourd'hui à disparaître au profit des accéléromètres piézoélectriques qui, moins encombrants et plus fiables, présentent une bande passante et une dynamique de mesure beaucoup plus étendues.(13)

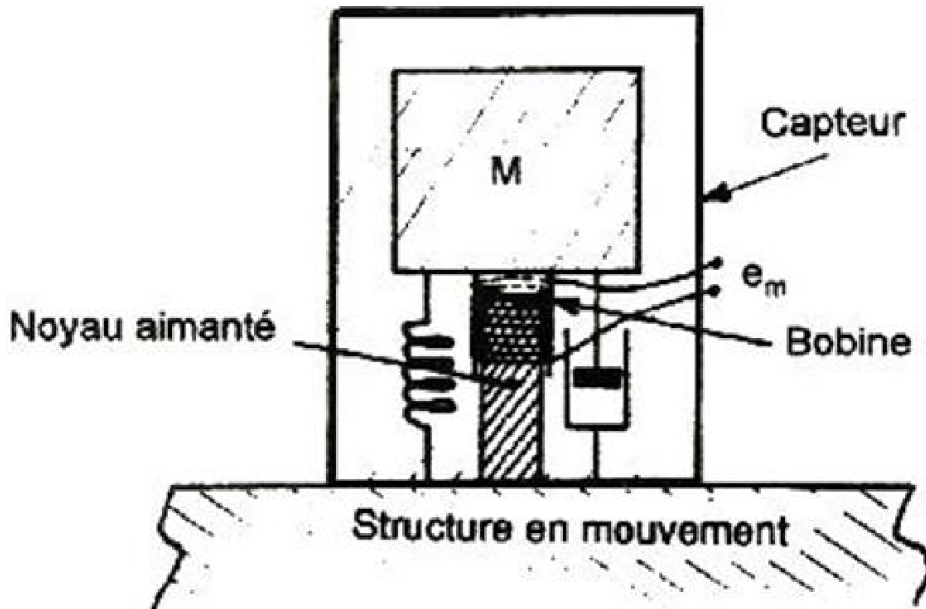


Figure 9:Schéma de principe d'un vélocimètre

I.7.7.4 Les accéléromètres :

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes. Leur principe de fonctionnement repose sur la propriété des matériaux piézo-électriques. Schématiquement (Figure 10), un accéléromètre est composé d'un disque en matériau piézoélectrique qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque piézoélectrique des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération.

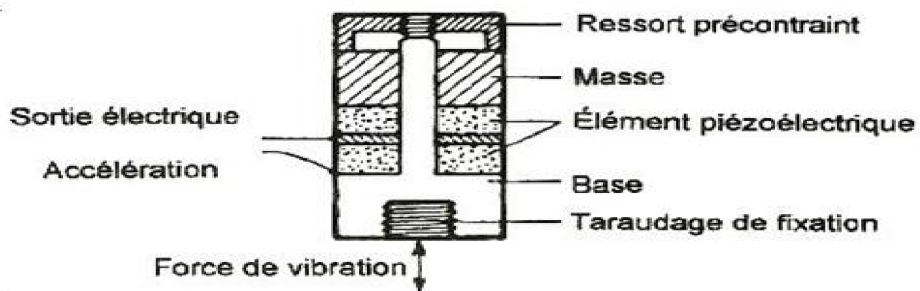


Figure 10:Principe de fonctionnement d'un accéléromètre.

Chapitre II : Traitement du signale et analyse temps-echelle

II.1 Introduction:

Le traitement du signal est la discipline qui développe et étudie les techniques de traitement, d'analyse et d'interprétation des signaux porteurs d'informations, qui peuvent provenir de sources très diverses, et dans notre cas, les signaux sont les vibrations générées par la machine surveillée qu'on ne peut étudier sans quelle soient passés par des étapes de traitement du signal (échantillonnage, filtrage...), le but de cette discipline est donc de réussir à extraire un maximum d'informations utiles sur un signal. Dans notre cas, le signal de n'importe quel phénomène vibratoire de la machine surveillée est traité dans deux domaines principaux: le domaine temporel et fréquentiel.

II.2 Représentation temporelle des signaux :

Le domaine temporel se rapporte à l'analyse de fonctions mathématiques ou de signaux physiques, modélise une variation quelconque au cours de temps. En domaine temporel, la valeur de la fonction ou du signal est connue, soit en quelques points discrets de la durée d'analyse ou peut être pour l'ensemble des nombres réels.

Dans une analyse temporelle, la variable est toujours mesurée en fonction du temps. Il existe plusieurs dispositifs utilisés pour analyser les données sur une base temporelle. L'oscilloscope à rayons cathodiques (CRO) est l'appareil le plus utilisé pour l'analyse de signaux électriques dans un domaine temporel. Pour avoir une représentation temporelle il faut appliquer la série de Fourier et elle nous permet de voir les harmoniques de signal fondamental au fil de temps.

II.2.1 Série de Fourier :

Les séries de Fourier sont un outil fondamental dans l'étude des fonctions périodiques. C'est à partir de ce concept que s'est développée la branche des mathématiques connue sous le nom d'analyse harmonique.

II.2.2 Période d'un signal :

La période d'un phénomène ou d'un signal périodique est la plus petite durée au bout de laquelle il se reproduit identique à lui-même. La période se note T et son unité est la seconde.

II.2.3 Exemple de signaux temporelle:

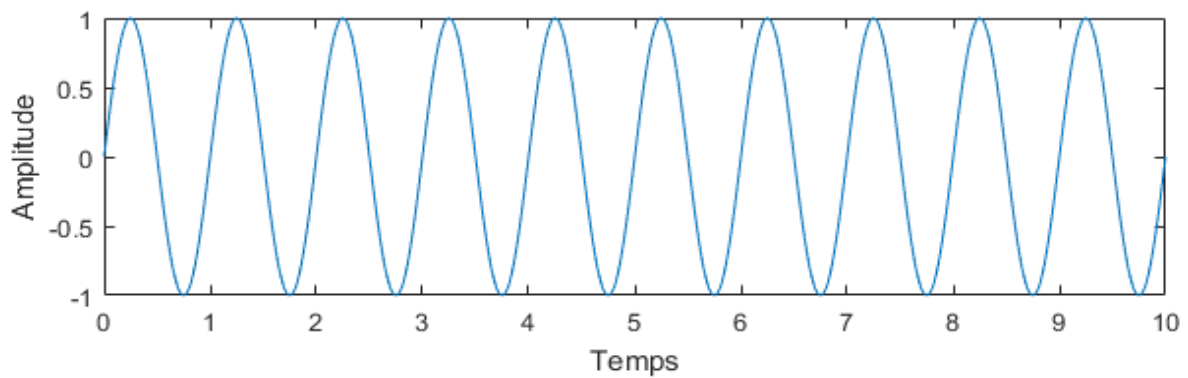


Figure 11: Signale sinusoïdale avec une période de $T=1$

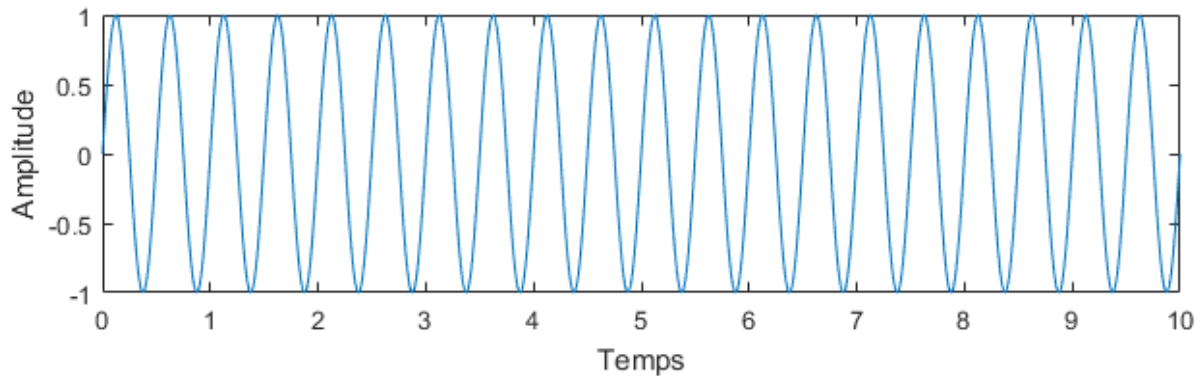


Figure 12: Signale sinusoïdale avec une période de $T=0.5$

II.2.4 Pourquoi on utilise le domaine temporel :

L'analyse dans le domaine temporel donne le comportement du signal dans le temps. Cela permet des prédictions et des modèles de régression pour le signal. L'analyse dans le domaine temporel est utilisée pour comprendre les données envoyées dans de tels modèles de bits au fil du temps.

II.2.5 Limite du domaine temporel :

En analyse d'un phénomène dans le domaine temporel on obtient son signal en fonction du temps. C'est à partir de ce signal qu'on peut distinguer sa période et son temps d'acquisition et aussi déduire la fréquence de ce signal mais seulement si c'est un signal périodique simple comme par exemple les signaux dans les figures précédant 1 et 2. Dans le cas d'un signal périodique complexe par exemple le signal de la Figure 13 ci-dessous, on ne peut pas déduire la fréquence du phénomène avec son signal périodique. C'est la limite du domaine temporel et aussi la raison qui fait que pour obtenir la fréquence d'un signal on analyse le signal dans le domaine fréquentiel .

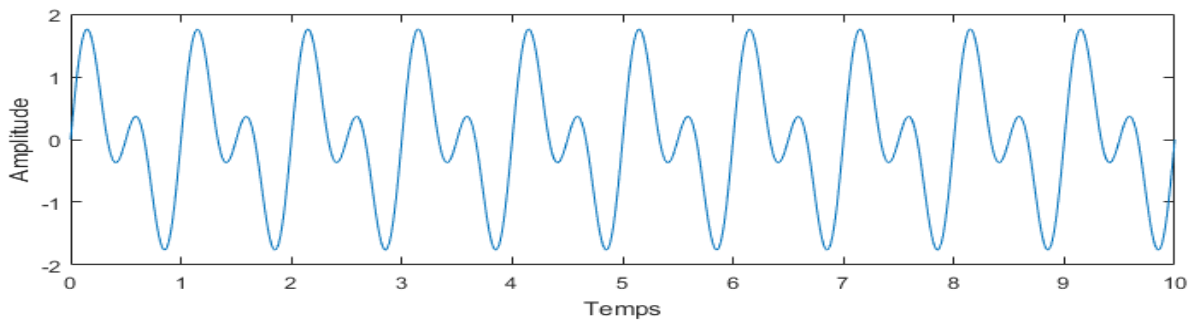


Figure 13: Signal somme des deux signaux sinusoïdaux précédents (Figure 11 et 12)

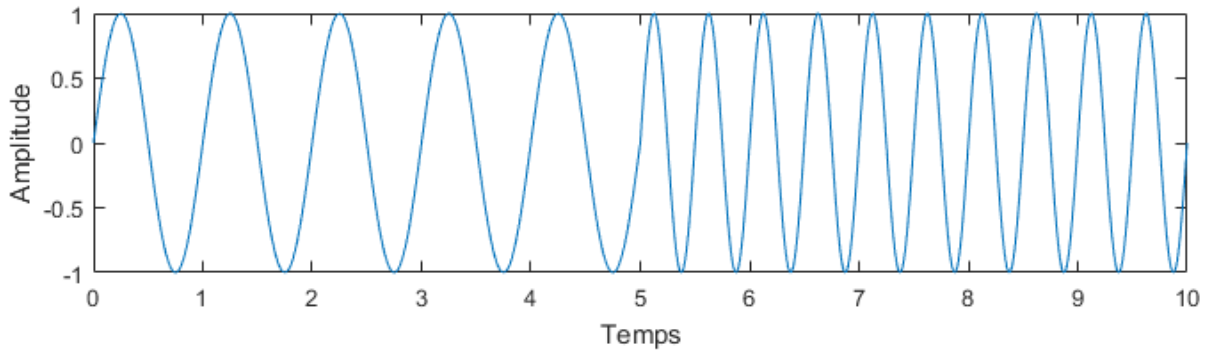


Figure 14: Signal avec rupture de fréquence des deux signaux sinusoïdaux précédents (Figure 11 et 12)

II.3 Représentation fréquentielle des signaux:

Le domaine fréquentiel se rapporte à l'analyse de fonctions mathématiques ou de signaux physiques manifestant une fréquence. Alors qu'un graphe dans le domaine temporel présentera les variations dans l'allure d'un signal au cours du temps, un graphe dans le domaine fréquentiel montrera quelle proportion du signal appartient à telle ou telle bande de fréquences, parmi plusieurs bancs. Une représentation dans le domaine fréquentiel peut également inclure des informations sur le décalage de phase qui doit être appliquée à chaque sinusoïde afin de reconstruire le signal en domaine temporel. Un analyseur spectral, par exemple le spectromètre, permet de visualiser les signaux physiques du domaine fréquentiel. Pour avoir une représentation fréquentielle d'un signal temporel, il faut appliquer la transformation de Fourier.

II.3.1 Transformée de Fourier :

La transformée de Fourier est une opération qui permet de représenter en fréquence (développement sur une base d'exponentielle) des signaux qui ne sont pas périodiques. Il s'agit de l'analogue des séries de Fourier pour les fonctions périodiques (développement sur la base de fonctions sinusoïdales).

$$TF[x(t)] = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

II.3.2 Transformée de Fourier discrète :

Lorsqu'on désire calculer la transformée de Fourier pour une fonction à l'aide d'un ordinateur. Ce dernier n'ayant qu'un nombre fini de mots de taille finie, on est amené à :

1. Discrétiser la fonction temporelle.
2. Tronquer la fonction temporelle.
3. Discrétiser la fonction fréquentielle.

II.3.3 Exemples de spectre fréquentielle :

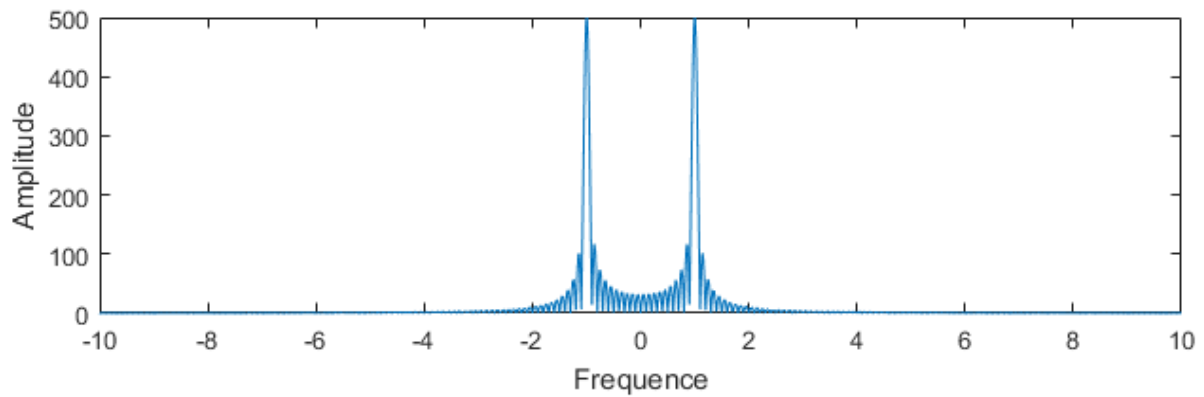


Figure 15: Spectre fréquentielle du signal temporelle (Figure 11)

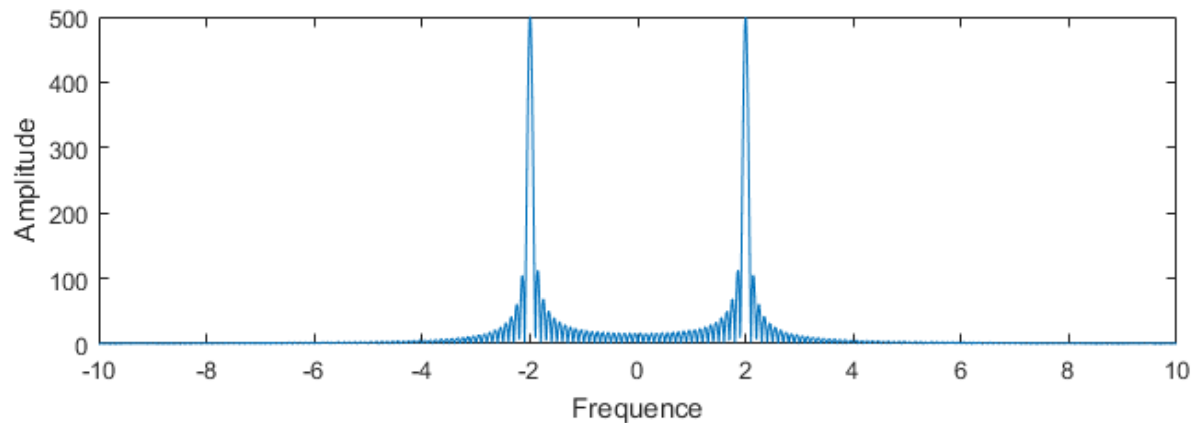


Figure 16: Spectre fréquentielle du signal temporelle (Figure 12)

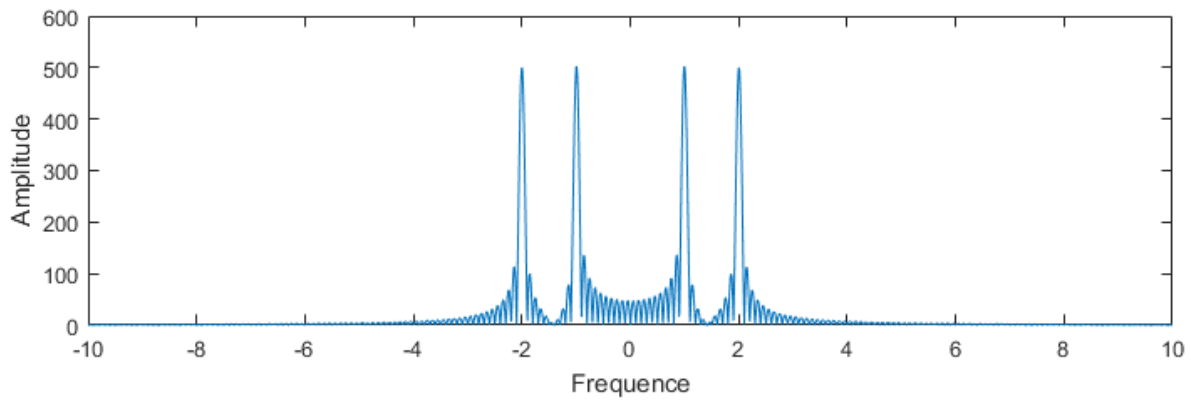


Figure 17: Spectre fréquentielle du signal somme (Figure 13)

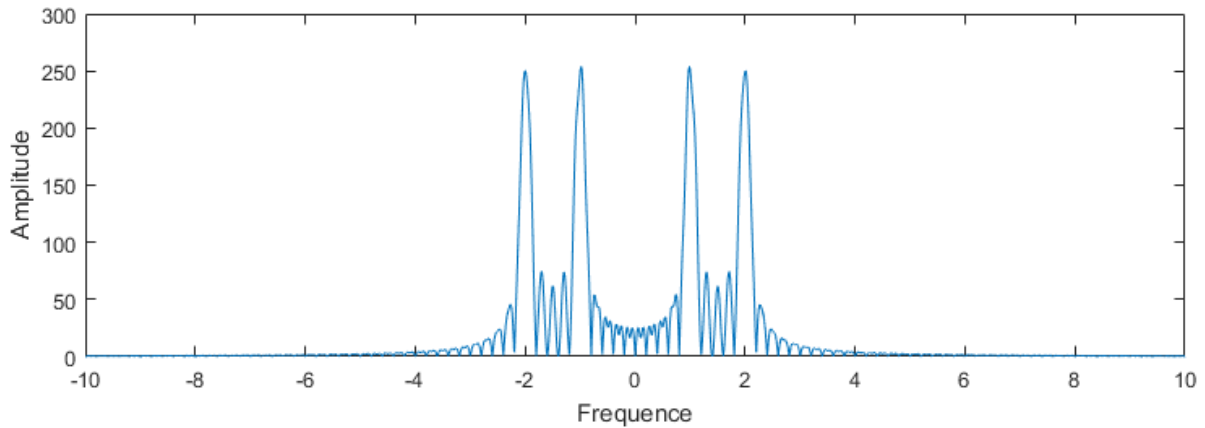


Figure 18: Spectre fréquentielle du signal avec rupture de fréquence (Figure 14)

II.3.4 Limite du domaine fréquentiel :

En analyse d'un phénomène dans le domaine fréquentiel on obtient un spectre de fréquence avec laquelle on peut distinguer les fréquences du phénomène. La limite du domaine fréquentiel c'est qu'on perd les informations relatives au temps du phénomène analysé comme sa période ou son temps d'acquisition. Pour remédier aux limites des deux domaines temporel et fréquentiel la transformée de Fourier à court terme a été développée pour permettre une analyse du signal en temps et en fréquence en même temps.

II.4 Analyse temps-fréquence des signaux:

L'analyse temps-fréquence a pour objectif de produire une représentation mathématique du contenu temps-fréquence d'un signal.

Les méthodes temps-fréquence ont été développées pour l'étude des signaux non-stationnaires. Les signaux dont le contenu fréquentiel change au cours du temps sont dits non-stationnaires. Par conséquent, si une localisation conjointe temporelle-fréquentielle de ces composantes est nécessaire, les représentations temps-fréquence deviennent nécessaires.

II.4.1 La transformée de Fourier à court terme :

L'analyse temps-fréquence s'appuie sur une idée très naturelle et très simple. Puisque la TF n'est pas localisée en temps du fait de l'intégration sur \mathbf{R} , il suffit d'y introduire une fonction bien localisée en temps, une fenêtre d'analyse.

Pour une fenêtre notée $w(t)$ ci-dessous, on définit la transformée de Fourier à court terme, dite aussi transformée de Fourier fenêtrée par :

$$Sw[x](s, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w(t - s) e^{-j2\pi\nu t} dt \quad (2)$$

Cette fenêtre d'analyse étant centrée sur l'instant s , l'intégrante prend des valeurs significatives essentiellement dans l'intervalle $[s - \Delta t/2, s + \Delta t/2]$ seulement ; le résultat est une fonction qui dépend de la fréquence ν mais aussi conjointement de l'instant s considéré. Parmi les fenêtres $w(t)$ habituelles, on trouve la fenêtre rectangulaire (indicatrice d'un intervalle de durée finie), les fenêtres de Hemming, Han, Blackman, etc. Toutes ces fonctions sont unimodales et rapidement décroissantes vers $\pm\infty$, par exemple une arche de fonction sinusoïdale, une gaussienne... En pratique, les fenêtres à support compact en temps sont privilégiées.

Le choix de la forme de la fenêtre d'analyse $w(t)$ est surtout guidé par ses propriétés de localisation fréquentielle. La transformée de Fourier $W(\nu)$ de la fenêtre rectangulaire présente.(9)

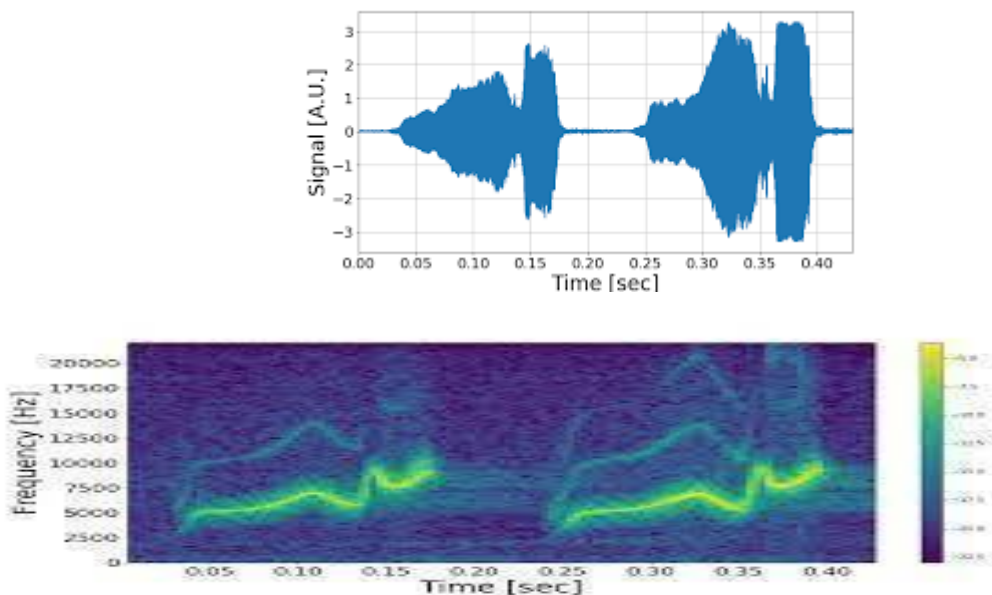


Figure 19: Encodage de l'information temps-fréquence du chant ("cui-cui") d'un oiseau par un spectrogramme : (haut) amplitude du signal enregistré au cours du temps ; (bas) spectrogramme du signal : densité d'énergie par unité de temps et de fréquence.

II.4.2 Atomes temps-fréquence et spectrogramme:

Au-delà d'une idée simple et naturelle, la TF à court terme s'avère être un bel objet d'analyse fonctionnelle avec de bonnes propriétés. Elle est notamment associée à la famille des atomes temps-fréquence $\{g_{s,\nu} = w(t - s) e^{j2\pi\nu t}, (s, \nu) \in \mathbf{R}^2\}$ qui permettent de sonder le plan temp-fréquence.

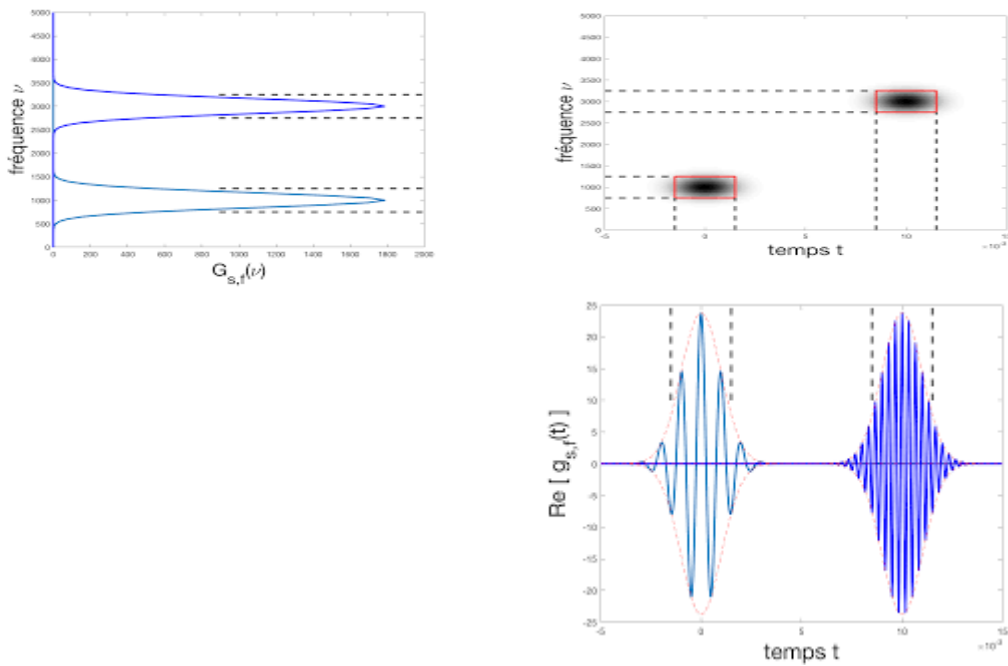


Figure 20: Exemples d'atomes temps-fréquences pour 2 couples instant-fréquence (s_1, f_1) et (s_2, f_2) associés à $g_{s,f}(t)$ dans le domaine temporel, $G_{s,f}(\nu)$ dans le domaine fréquentiel, et représentation de leurs étendues dans la plan temps-fréquence. Les rectangles rouges de côtés $(\Delta t, \Delta \nu)$ sont appelés boîtes de Gabor.

La notion intuitive de "fréquence instantanée" prend ainsi un sens bien défini. Si la représentation fréquentielle est utile pour identifier les fréquences caractéristiques d'un signal stationnaire, la TF à court terme donne accès à une représentation temps-fréquence plus lisible, en particulier grâce à la redondance de l'image (2D) produite à partir du signal (1D).

Les atomes temps-fréquence décrivent le plan temps-fréquence par translation en temps et en fréquence. Il est aussi possible de proposer des familles de fonctions qui recouvrent le plan par translation en temps et dilatation en échelle : les ondelettes.

Les ondelettes s'avèrent mieux adaptées pour les signaux larges bandes et ont eu beaucoup de succès en traitement d'images.

II.4.3 Exemple de signal analysé en temps-fréquence (TFCT):

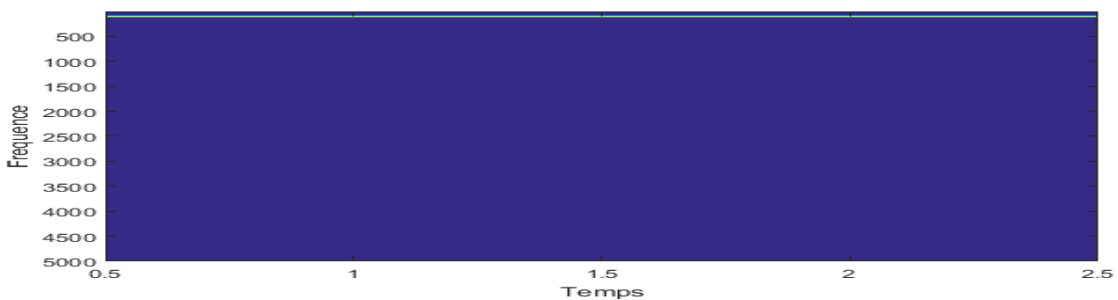


Figure 21: spectrogram du signale temporel (Figure 11)

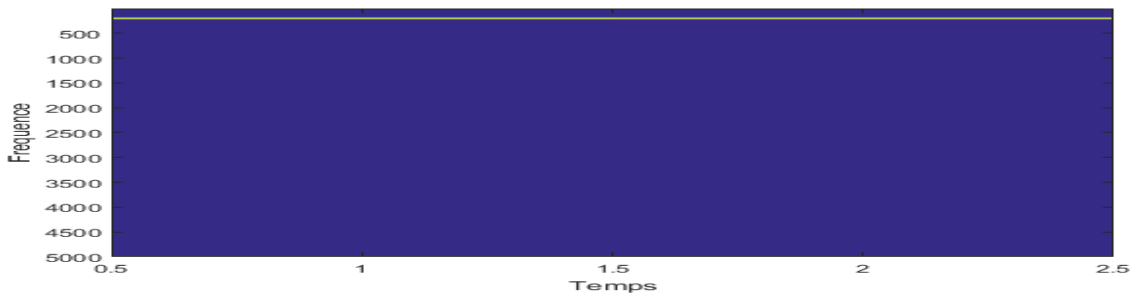


Figure 22: spectrogram du signale temporel (Figure 12)

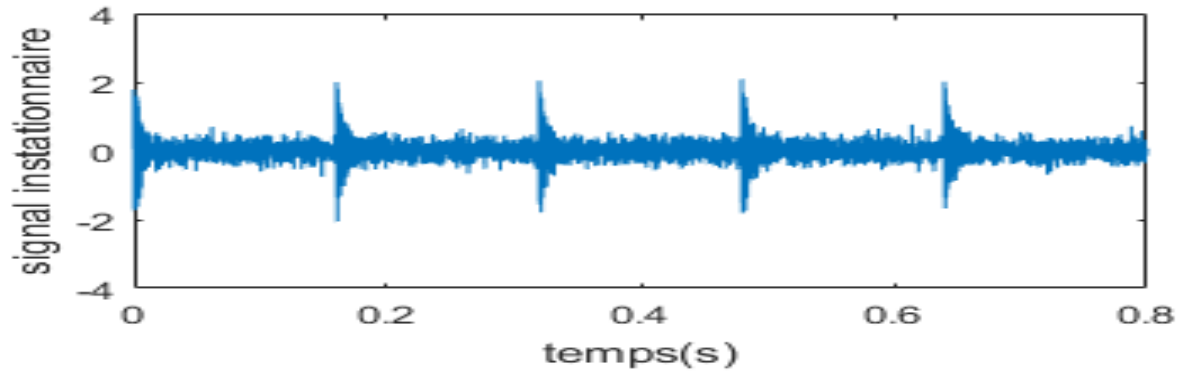


Figure 23: signale non-stationnaire.

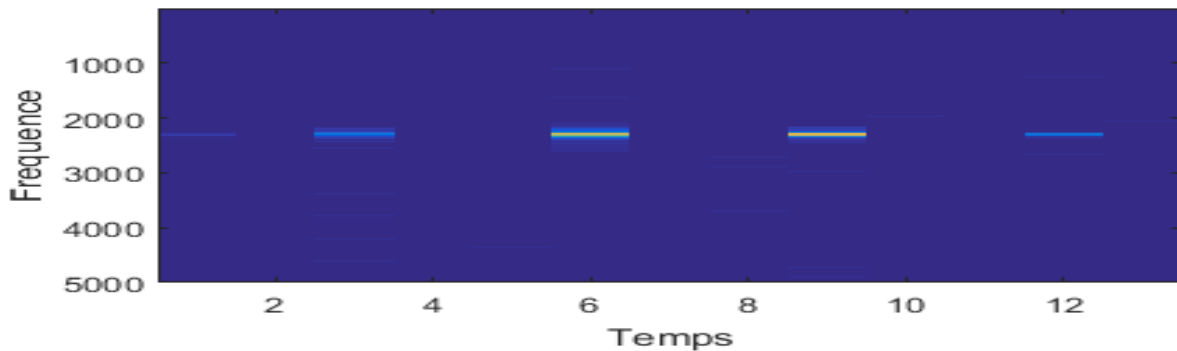


Figure 24: spectrogram du signale non-stationnaire (Figure 23)

II.4.4 Les limites de la TFCT:

La transformée de Fourier donne la quantité de chaque fréquence présente dans le signal pour l'ensemble de la période d'observation. La théorie de Fourier devient donc inefficace pour un signal dont le spectre des fréquences varie considérablement dans le temps. La figure ci-dessous illustre ce problème: la transformée de Fourier d'une fonction $z(t)$ composée d'un empilement de quatre contributions fréquentielles ressemble à celui d'une autre fonction $y(t)$ où ces contributions interviennent de manière isolée l'une à la suite de l'autre .

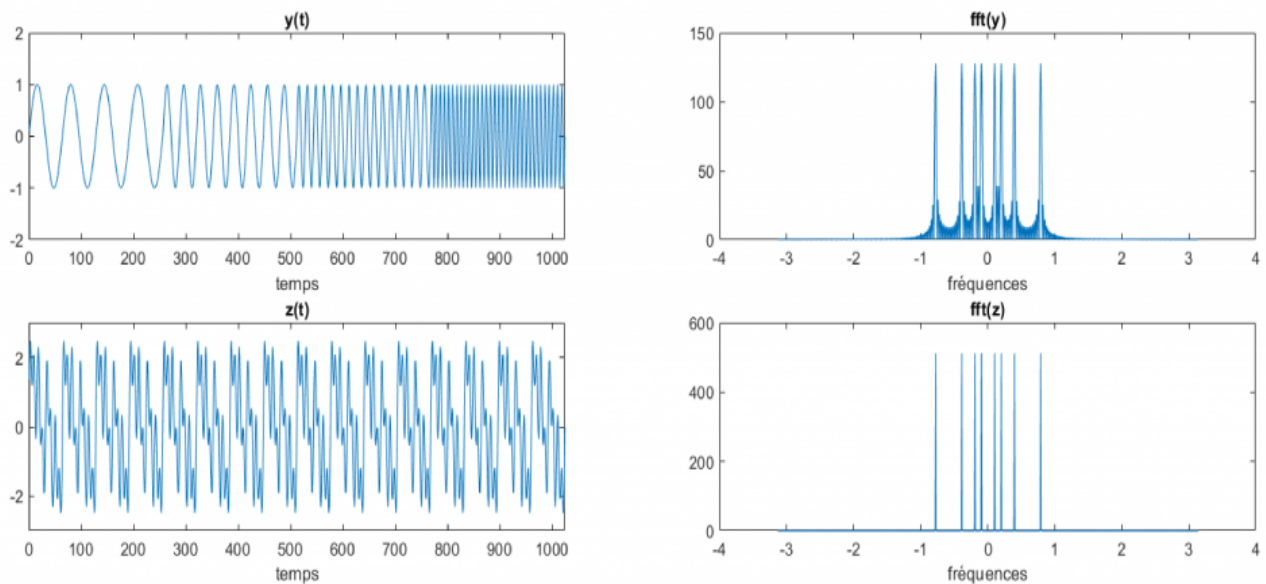


Figure 25: Limite de la transformée de Fourier .

Les signaux $y(t)$ et $z(t)$ sont différents et leurs transformées de Fourier est semblable.les 4 grands pics se trouvent aux mêmes fréquences, ils correspondent aux 4 fréquences présentées dans $y(t)$ l'un a la suite de l'autre et présenté dans $z(t)$ simultanément tout au long du signal.De plus, la transformée de Fourier est aussi utilisée pour approximer des fonctions. Certaines fonctions régulières ont une transformée de Fourier économique (ou parcimonieuse), autrement dit elles sont bien approximées avec peu de coefficients de Fourier non-nuls. Mais la transformée de Fourier ne fonctionne pas bien quand elle doit décrire localement une fonction qui montre des discontinuités, c'est-à-dire qui admet des sauts.La limite de la TFCT est due à sa fenêtre de taille fixe car pour analyser des composants transitoires de différentes tailles, il est nécessaire d'utiliser une fenêtre avec différents supports de temps. Wavelet transform (WT) a été développé comme une approche alternative pour surmonter le problème de résolution.

II.5 Analyse temps-échelle des signaux :

L'analyse des ondelettes (Wavelet transform (WT)) est similaire à l'analyse TFCT, dans le sens où le signal est multiplié par une fonction de fenêtre appelée ondelette. Le terme ondelette qui signifie une petite vague(8) (support compact) est une fonction à la base de la décomposition en ondelettes, décomposition similaire à la transformée de Fourier à court terme, utilisée dans le traitement du signal(11). Elle correspond à l'idée intuitive d'une fonction correspondant à une petite oscillation, d'où son nom.



Figure 26: une ondelette.

Le principe de cette méthode consiste en variation de l'échelle de la fenêtre, c.à.d. que, contrairement à TFCT qui utilise une fenêtre d'une longueur fixe (enveloppe fixe) dans laquelle on varie le nombre d'oscillation, la transformée en ondelettes propose une fenêtre qui présente un nombre d'oscillation fixe dans une enveloppe qu'on dilate et comprime pour l'adapter aux différents phénomènes susceptibles d'être présents dans le signal et ça pendant la même analyse. La fonction principale appelée ondelette mère est un prototype pour générer les autres fonctions de fenêtre. Une ondelette est une fonction $\Psi \in L^2(\mathbb{R})$ de moyenne nulle.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (3)$$

Dans WT, nous n'avons pas de paramètre de fréquence, comme le STFT, mais nous avons un paramètre d'échelle s qui est défini comme $1/\text{fréquence}$.

Les atomes temps-fréquence du WT sont obtenus par mise à l'échelle par s et translaté par b de l'ondelette mère Ψ :

$$\Psi_{s,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-b}{s}\right) \quad (4)$$

le facteur $\frac{1}{\sqrt{s}}$ est utilisé pour conserver la norme. Cette méthode existe en deux versions : la transformée continue et la transformée discrète en ondelettes.

II.5.1 Les coefficients d'ondelettes:

Les coefficients d'ondelettes sont dessinés dans une image et leur valeur est codée comme suit: bleu, vert et jaune pour les coefficients négatifs, nuls et positifs respectivement. L'axe horizontal représente le temps. L'axe vertical montre une quantité appelée la résolution (ou échelle); il correspond à la largeur du support temporel sélectionné par l'ondelette. Ceci veut dire que cela fonctionne comme pour une carte. Une grande échelle correspond à un grand support et donc à une vue globale non détaillée du signal et une petite échelle correspond à un petit support et donc à une vue détaillée d'une partie du signal. La résolution est souvent mieux comprise comme la réciproque de la fréquence. Ainsi une résolution fine (petite échelle) correspond à une haute fréquence et une résolution grossière (grande échelle) correspond à une basse fréquence. Souvent, dans un signal, ce qui est à petite échelle (et donc grande fréquence) apparaît de temps en temps comme des pics et ce qui est à grande échelle (et donc basse fréquence) est présent tout au long du signal. Dès lors, cette représentation temps-résolution donne de l'information temps-fréquence.

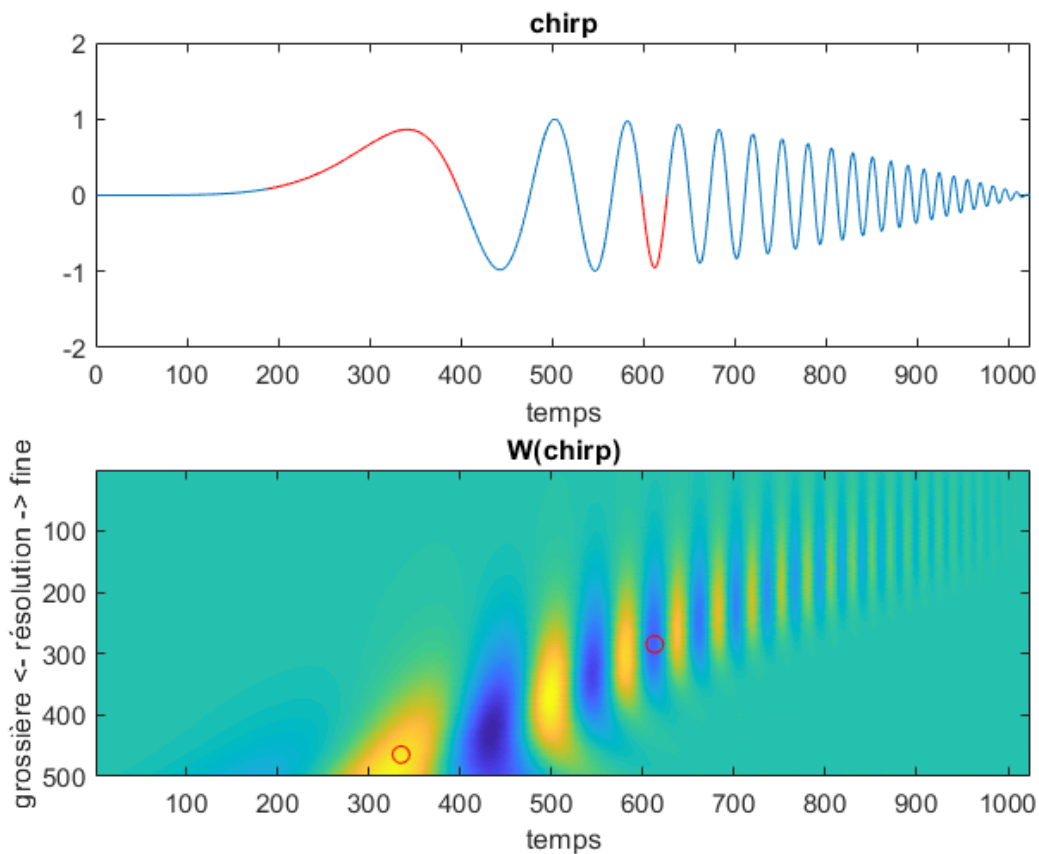


Figure 27: Interprétation des coefficients en ondelette. En haut, le signal Chirp fonction du temps. En bas l'image de sa transformée en ondelette.

Par exemple, comparons deux points de la transformée en ondelettes de la fonction « chirp » de la figure ci-dessus. On y voit un point jaune au temps 335 et à la résolution 465 et un point bleu au temps 613 et à la résolution 285. Le point jaune spécifie que la fonction varie dans un voisinage du temps 335 à une fréquence plus faible (car résolution plus élevée) que le point bleu qui a une fréquence plus élevée (car résolution plus faible). Le point bleu (coefficient négatif) spécifie que la fonction varie dans le sens opposé à celui du point jaune (coefficient positif). Le point jaune informe que la fonction varie dans un voisinage du temps 335, voisinage dont la taille est plus grande que le voisinage correspondant au point bleu au temps 613, car la résolution du point jaune 465 est plus grande que la résolution du point bleu 285.

II.5.2 Exemple de coefficients d'ondelettes:

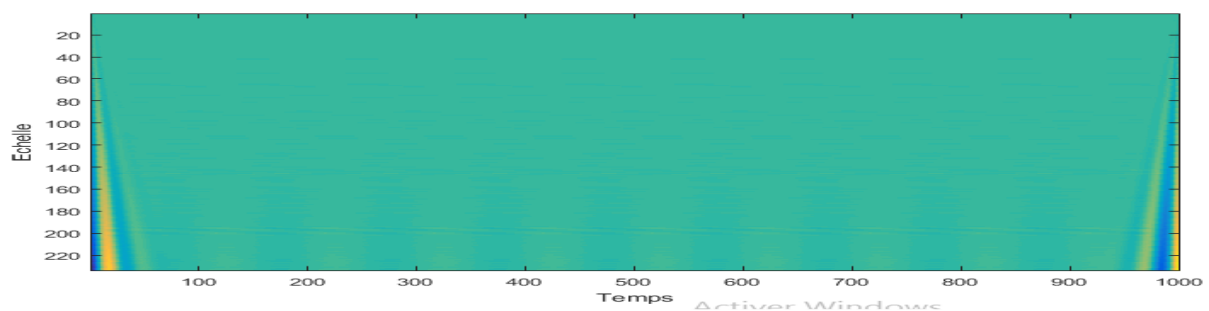


Figure 28: coefficients d'ondelettes du signale temporelle 1(Figure 11)

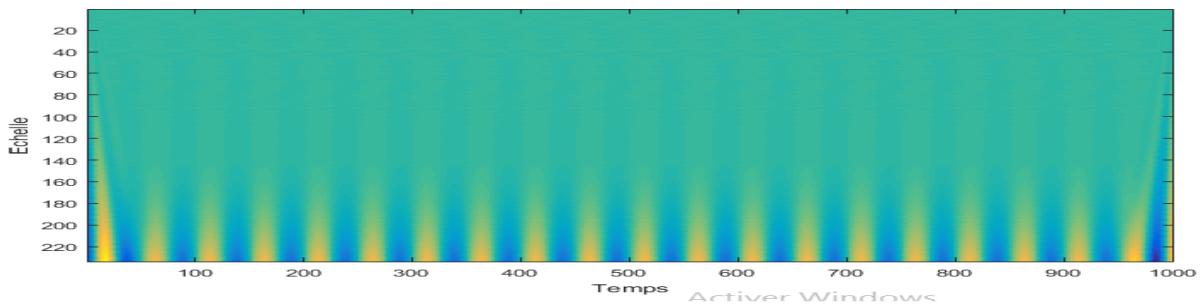


Figure 29: coefficients d'ondelettes du signale temporelle 2(Figure 12)

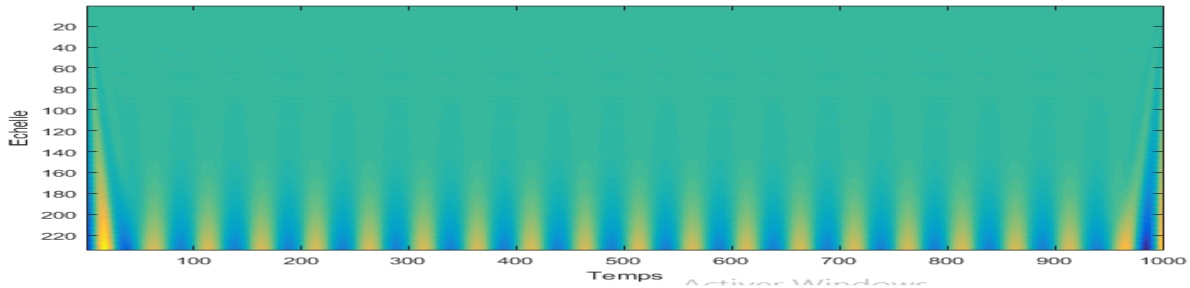


Figure 30:coefficients d'ondelettes du signale temporelle somme(Figure 13)

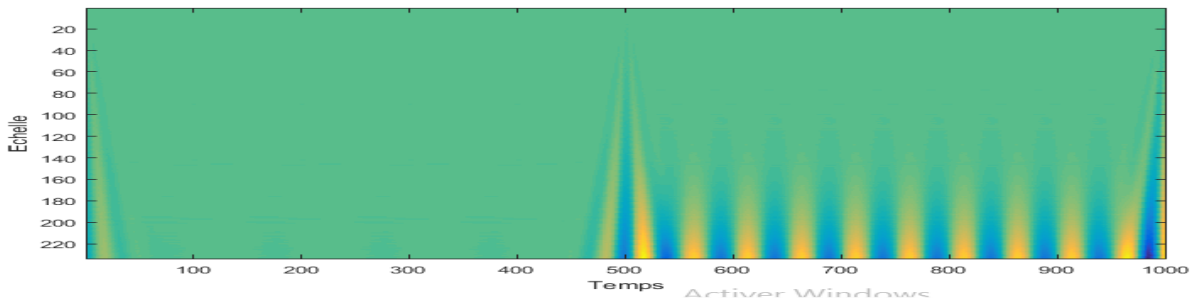


Figure 31: coefficients d'ondelettes du signale temporelle avec rupture de fréquence (Figure 14)

II.5.3 Transformée en ondelette continue :

La version continue du WT possède la capacité de construire une représentation temps-fréquence d'un signal qui offre une très bonne localisation temporelle et fréquentielle [28]. La transformée en ondelettes continue (CWT) d'une fonction continue $x(t)$ à l'échelle s ($s \in \mathbb{R}^*$) et à la valeur translationnelle $b \in \mathbb{R}$ s'exprime par l'intégrale suivante :

$$CWT_x(s, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi^* \left(\frac{t-b}{s} \right) dt \quad (5)$$

Où

b : le facteur de translation, il s'agit d'un nombre réel.

s : le facteur d'échelle, également appelé facteur de dilatation de ψ . Il s'agit d'un nombre réel.

(t) : l'ondelette mère.

ψ^* dénote le complexe conjugué de ψ

$CWT(s,)$: la matrice des coefficients d'ondelette

Le CWT est implémenté à l'aide d'échelles et d'ondelettes arbitraires. En termes de fréquences, les fréquences basses (échelles élevés) correspondent à une information globale d'un signal (qui couvre généralement l'intégralité du signal), tandis que les hautes fréquences (basse échelles) correspondent à une information détaillée d'un motif caché dans le signal (qui dure généralement un temps relativement court).

II.5.4 Transformée en ondelette discrète :

La transformée en ondelettes discrètes (DWT, Discrete Wavelet Transform) est une implémentation utilisant un ensemble discret d'échelles et de translations d'ondelettes obéissant à certaines règles. En d'autres termes, cette transformée décompose le signal en un ensemble d'ondelettes mutuellement orthogonales, ce qui constitue la différence principale avec la transformée en ondelettes continue, ou son implémentation en séries discrètes dans le temps parfois appelée transformée en ondelettes continue discrète dans le temps (DT-CWT, discrete-time continuous wavelet transform).(10)

II.5.5 Qu'apportent les ondelettes par rapport à l'analyse de Fourier? :

La colonne de gauche de la figure ci-dessous (d'après CHARLES, 2003) montre le graphe de trois fonctions (représentation temporelle): une fonction sinus en (A), une fonction « blok » en (D) et la fonction « chirp » en (G). La colonne du milieu ((B), (E) et (H)) montre les transformées de Fourier de ces fonctions (représentation fréquentielle). Finalement, la colonne de droite montre les transformations en ondelettes ((C), (F) et (I)). La même ondelette a été utilisée pour les trois fonctions.

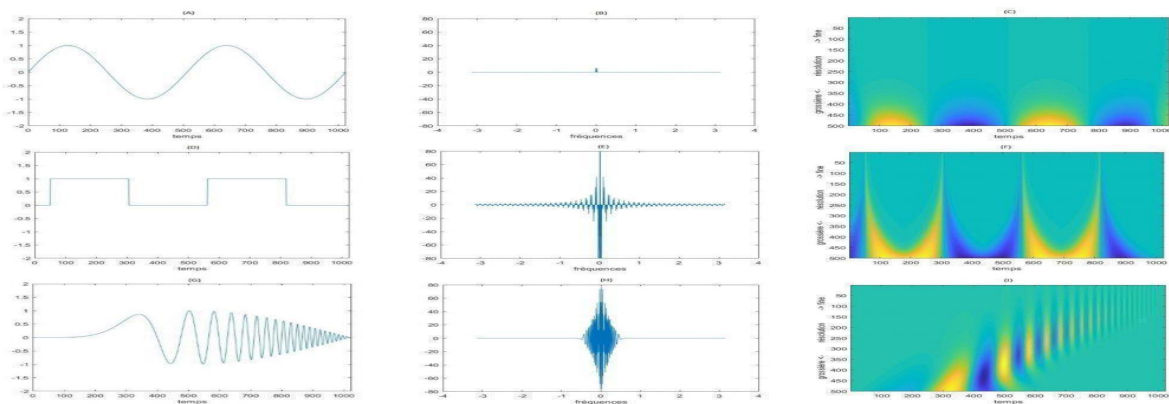


Figure 32: Comparaison entre la transformée de Fourier et la transformée en ondelette de trois fonctions.

En (A) la fonction sinus, en (B) sa transformée de Fourier et en (C) sa transformée en ondelette. En (D) la fonction « blok », en (E) sa transformée de Fourier et en (F) sa transformée en ondelettes. En (G), la fonction « chirp », en (H) sa transformée de Fourier et en (I) sa transformée en ondelettes. L'axe des abscisses est le temps pour les fonctions, la fréquence pour les transformées de Fourier et le temps pour les transformées en ondelettes. L'axe des ordonnées pour la transformée en ondelettes est la résolution, souvent mieux comprise comme la réciproque de la fréquence.

Regardant la transformée en ondelettes de la fonction blok, on voit immédiatement qu'il y a des hautes fréquences dans les régions contenant des points anguleux, et seulement des

zéros ailleurs. La transformée de Fourier montre certaines hautes fréquences mais ne donne aucune indication sur le moment où cela se passe. On peut aussi observer que les coefficients en ondelettes de la fonction sin et de la fonction blok se ressemblent à basse fréquence et deviennent très différentes quand la résolution devient petite. Notons aussi comment les transformées de Fourier des fonctions blok et chirp se ressemblent quelque peu, tandis que leur transformée en ondelette donne une image différente avec plus d'informations. Toutes ces observations montrent la supériorité potentielle de la représentation en ondelettes par rapport à la transformée de Fourier.

Chapitre III : Optimisation des paramètres d'ondelettes de morlet et choix de l'indicateur scalaire

III.1 1ere partie : optimisation des paramètres de l'ondelette de morlet

III.1.1 Introduction :

Pour une bonne interprétation de toute information envoyée par une source, nous devons construire une transformation qui représente les caractéristiques du signal simultanément en temps t et en fréquence f .

Gabor, qui a décrit la transformation de fréquence à court terme (STFT) en appliquant la transformation de Fourier d'une taille de la fenêtre de déplacement à la série d'entrée, fournit la première idée. La multiplication de la fenêtre sur la fonction de temps va extraire tout le contenu de fréquence dans cet intervalle de temps.

Pour analyser des composants transitoires de différentes tailles, il est nécessaire d'utiliser une fenêtre avec différents supports de temps. L'analyse par ondelette a été développée comme solution au problème des fenêtres de taille fixe du TFCT et comme une approche alternative pour surmonter le problème de résolution. L'ondelette de Morlet est la plus utilisée dans le diagnostic des défauts des machines tournantes.

III.1.2 Ondelette de morlet :

L'ondelette de Morlet possède la résolution optimale simultanément dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel et peut être adaptée aux différentes caractéristiques du défaut de la machine.

Cette ondelette est inspirée du signal élémentaire de Gabor et obtenue par une modulation gaussienne :

$$\Psi_1(t) = e^{-t^2/2} \cos(\omega_c t) \quad (6)$$

Il s'agit d'une fonction explicite ; cependant, la condition d'admissibilité de l'ondelette n'est pas vérifiée car sa transformée de Fourier n'est pas nulle à l'origine.

$$\hat{\Psi}_1(0) = \sqrt{2\pi} e^{-\frac{1}{2}(\omega - \omega_c)^2} \neq 0 \quad (7)$$

Une solution à ce problème consiste à réduire le nombre d'oscillations de l'ondelette en choisissant $5 \leq \omega_c \leq 6$. Avec $\cos(5t) = \cos(2\pi f_c t)$, f_c est approximativement égale à 0.8 (plus précisément 0.8125) Hz qui est la fréquence de l'approximation sinusoïdale de l'ondelette, elle représente donc la fréquence centrale du filtre Morlet f_c en représentation de Fourier.

III.1.3 Ondelette de morlet complexe :

La largeur de bande de fréquences de l'ondelette de morlet (MW) dépend de la valeur d'échelle s et de termes de courbe en cloche gaussienne. Pour cette raison ils existent plusieurs manières de définir ce terme comme le montrent les formules suivantes nommées ondelettes de morlet complexes :

$$\Psi_2(t) = \frac{f_b}{\sqrt{\pi}} e^{-f_b^2 t^2} e^{i2\pi f_c t} \quad (8)$$

$$\Psi_3(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} e^{-t^2/f_b} e^{i2\pi f_c t} \quad (9)$$

La valeur de f_b dans les termes $e^{-f_b^2 t^2}$ et e^{-t^2/f_b} contrôlent la résolution temps-fréquence de l'ondelette de Morlet. En augmentant f_b La résolution temporelle de l'ondelette augmente, tandis que la résolution fréquentielle diminue.

III.1.4 Les paramètres de l'ondelette de Morlet :

L'ondelette de Morlet est réglable grâce a ces paramètre qui sont : F_b le paramètre de la bande passante , l'échelle s et f_c la fréquence central de l'ondelette.

III.1.4.1 La fréquence central de l'ondelette:

Chaque ondelette mère a une fréquence centrale f_c , qui représente ses oscillations périodiques, généralement égale à 0.8 (plus précisément 0.8125) Hz qui est la fréquence de l'approximation sinusoïdale de l'ondelette.

III.1.4.2 L'échelle (s):

Le paramètre d'échelle est défini comme l'inverse de la fréquence :

$$f = \frac{1}{s} \quad (10)$$

Chaque ondelette mère a une fréquence centrale f_c , qui représente ses oscillations périodiques ; lorsque la durée de l'enveloppe de l'ondelette mère est modifiée, en d'autres termes, lorsque l'échelle de l'ondelette mère est changée en l'étirant ou en la comprimant, la nouvelle fréquence de l'ondelette fille est :

$$f = \frac{f_c}{s} \quad (11)$$

Maintenant, pour déterminer l'échelle correspondant à toute fréquence présente dans un signal spécifié, nous devons introduire la fréquence d'échantillonnage de ce signal dans l'équation précédente. L'équation finale qui permet de déterminer l'échelle de toute fréquence ou la fréquence de toute échelle est donnée comme suit :

$$s = \frac{f_c}{f} F_s \quad (12)$$

Pour étudier une fréquence spécifique avec en utilisant une ondelette (WT) spécifique, nous introduisons les caractéristiques d'information de l'équation (12) et nous obtenons l'échelle correspondante. Les analyses des coefficients d'ondelettes à cette échelle donnent des informations autour de la fréquence analysée .Pour démontrer , on analyse un signale qui contient les fréquences a analysé suivante: 1500 Hz, 2000 Hz, 3500 Hz avec chacune leur échelle respective de 4.33, 3.25, 1.85 respectivement.

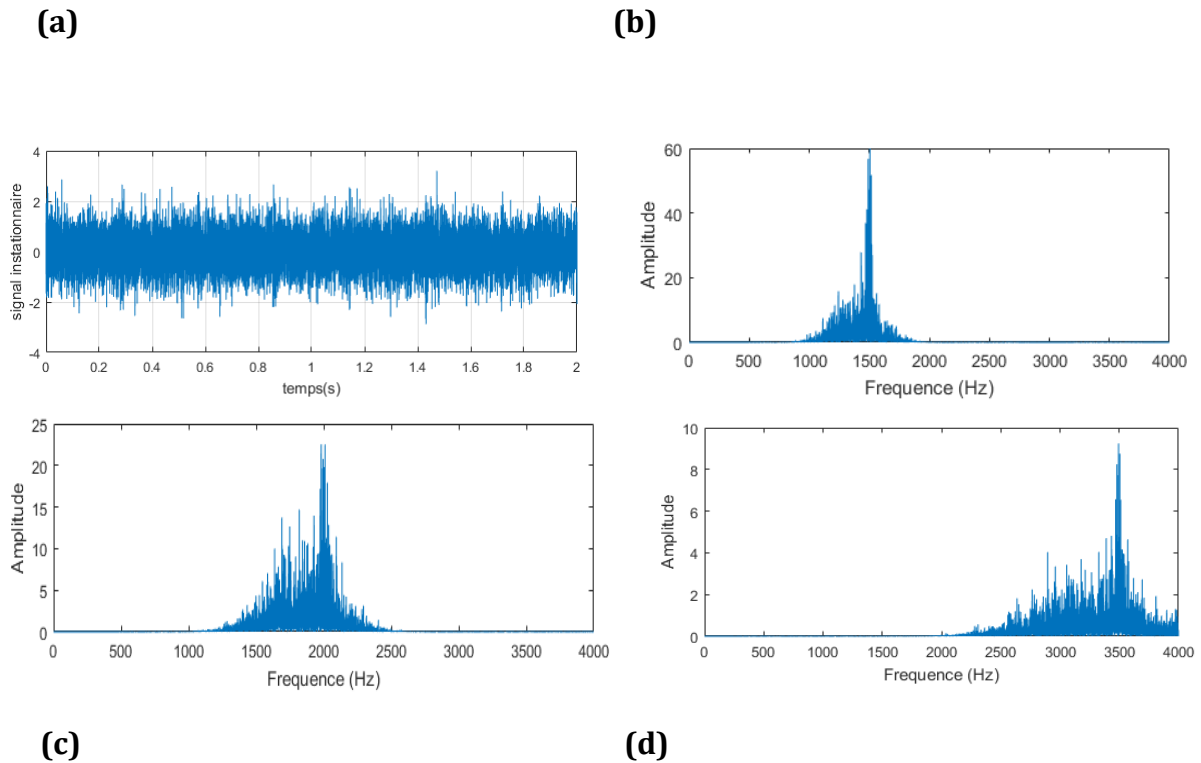


Figure 33: (a) un bruit gaussien ($F_s = 8000$ Hz) ; (b) spectre des coefficients d'ondelettes à l'échelle 4.33(1500 Hz) ; (c) spectre des coefficients d'ondelettes à l'échelle 3.25 (2000 Hz) et (d) spectre des coefficients d'ondelettes à l'échelle 2,2 (3500 Hz).

Les résultats présentés dans la Figure 33 montrent la simplicité de sélectionner n'importe quelle fréquence à analyser.

III.1.4.3 Le paramètre de la bande passante (f_b):

La CWT donne un rapport constant entre fréquence et largeur de bande (Δf) mais il est possible d'obtenir une largeur de bande donnée autour d'une fréquence spécifique. dans les cas où nous pouvons ajuster les valeurs de f_b (Figure 34). La bande de fréquence dépend de la valeur de l'échelle (ou fréquence centrale f_c) et de la valeur du facteur de forme.

Pour explorer et étudier n'importe quelle fréquence de résonance par CWT, il est nécessaire de déterminer l'échelle correspondante et la largeur de bande appropriée, qui incluent toutes les bandes latérales de défaut, et cela peut être rendu possible en utilisant les équations (8) ou (9).

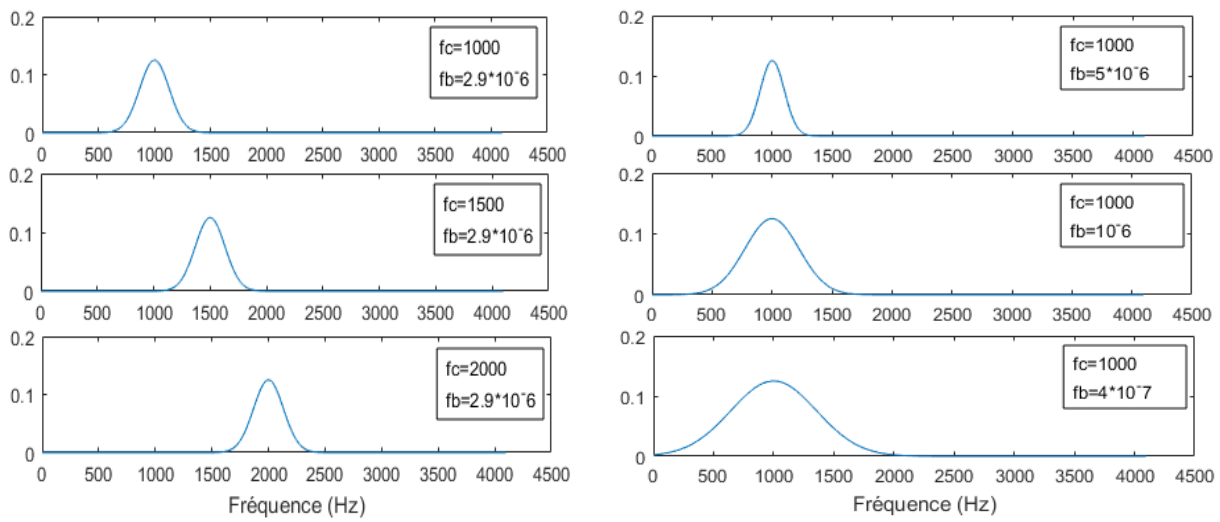


Figure 34:(a) Spectre CMW utilisant l'équation 2 pour trois valeurs de f_c (avec s fixe = 1) et (b) Spectre CMW utilisant l'équation 2 pour trois valeurs de f_b (avec s fixe = 1).

Il existe deux façons d'analyser une fréquence donnée par CWT en utilisant l'équation (9). La première consiste à remplacer le terme f_c par la valeur de la fréquence et à conserver la valeur d'échelle s égale à 1. La deuxième, il s'agit de maintenir la valeur de f_c à 0,8 et de générer des coefficients CWT avec l'échelle correspondante calculée par l'équation 3.

III.2 2eme partie : choix de l'indicateur scalaire

III.2.1 Introduction:

La détermination des valeurs exactes des fréquences de résonance est très importante pour améliorer le diagnostic des défauts. La présence d'impacts défectueux dans les engrenages excite les fréquences naturelles de la structure. Pour un bon diagnostic de ces défauts, il est nécessaire de détecter et d'étudier les résonances excitées.

Lorsque les valeurs des échelles s'éloignent de l'échelle de fréquence de résonance ($s \cong \frac{f_c}{f_0}$) l'amplitude des coefficients d'ondelettes devient de plus en plus faible et la ressemblance avec le train d'impulsions diminue de plus en plus jusqu'à devenir un bruit. L'approche proposée pour la détection améliorée des résonances consiste à définir un vecteur d'échelles à faible pas. La première valeur du vecteur d'échelle correspond à la fréquence maximale du signal à analyser et la dernière valeur correspond à quelques centaines de hertz dans le but d'éliminer les basses fréquences. Le pas du vecteur d'échelle est petit afin d'augmenter la redondance de la CWT. En effet, avec un pas égal à 1, une information redondante dans les coefficients CWT existe déjà ; elle est importante dans le cas des signaux stationnaires mais pas vraiment pour les signaux transitoires. Pour cette raison, un pas égal à 0.1 est proposé pour augmenter l'information redondante avec l'objectif de localiser les fréquences de résonance. La localisation des résonances dans les coefficients CWT nécessite l'utilisation d'un indicateur de forme non stationnaire.

III.2.2 Les indicateurs scalaires :

III.2.2.1 Définition:

Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Ces méthodes utilisent des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut.

III.2.3 Les indicateurs scalaires utilisés:

III.2.3.1 Le kurtosis :

Le plus couramment utilisé pour indiquer l'impulsivité du signal est le kurtosis. En conséquence, il a été largement utilisé dans la recherche sur le diagnostic des défauts. Le kurtosis est un paramètre statistique permettant d'analyser la répartition des amplitudes vibratoires contenues dans un signal temporel. Il correspond au moment d'ordre quatre normé. Son expression est de la forme:

$$Kurt = \frac{\langle x(t)^4 \rangle}{\langle x(t)^2 \rangle^2} \quad (13)$$

Le plus grand des kurtosis est traité comme un signe de la présence de défauts dans les composants de la machine. Malgré sa large utilisation, dans certaines situations, il a une appréciation limitée du caractère transitoire. Pour cette raison, d'autres indicateurs sont de plus en plus utilisés.

III.2.3.2 L'indicateur SI :

Il est appelée l'indice de lissage, il est utilisé à la place de kurtosis pour voir mieux et localiser les fréquences de résonances, Il est défini comme le rapport de la moyenne géométrique à la moyenne arithmétique :

$$SI(s) = \frac{\exp \left[\frac{1}{T} \int_0^T \ln(|CWT(b)|) db \right]}{\frac{1}{T} \int_0^T |CWT(b)| db} \quad (14)$$

III.2.3.3 L'indicateur SM:

Un autre indicateur utilisé appelle mesure d'éparsité (SM) ; Il est défini comme le rapport de la norme 2 (L2) à la norme 1(L1) .

$$SM(s) = \frac{\sqrt{\sum_{b=1}^N (CWT(b))^2}}{\sum_{b=1}^N |CWT(b)|} = \frac{L_2}{L_1} \quad (15)$$

III.2.4 Comparaison de trois indicateurs:

La Figure 35 montre la variation des trois indicateurs cités ci-dessus en fonction du nombre d'impacts. Le kurtosis est très sensible au nombre d'impacts présents dans le signal ; par conséquent, il est considérablement affecté par la fréquence de rotation de l'arbre, alors que les indicateurs SI et SM ne sont pas sensibles. Une autre situation où le kurtosis est limité est illustrée à la Figure 36. tandis que les indicateurs SI et SM sont insensibles à cette fluctuation. D'après une étude d'un roulement à éléments roulants, l'évolution du kurtosis n'est pas régulière après l'apparition d'un défaut de bague intérieure et retrouve sa valeur initiale après une dégradation sévère de ce défaut. Une autre étude a montré que le kurtosis est très sensible aux charges radiales et axiales appliquées sur un roulement à éléments roulants. De plus, le kurtosis est très sensible aux valeurs aberrantes dans les données, indiquant qu'il est sensible à la forme du signal et qu'il n'est pas adapté à la mesure de l'impulsivité dans toutes les situations.(5)

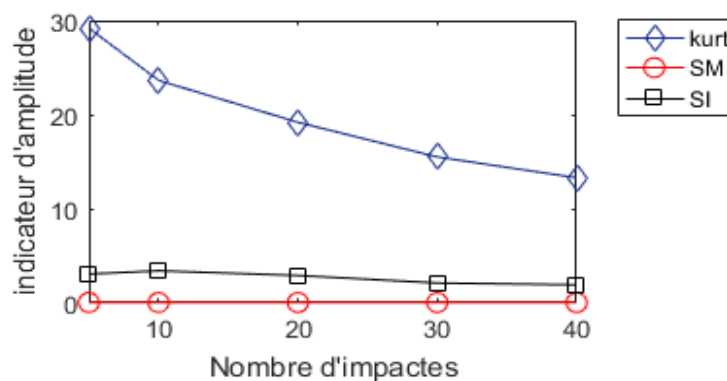
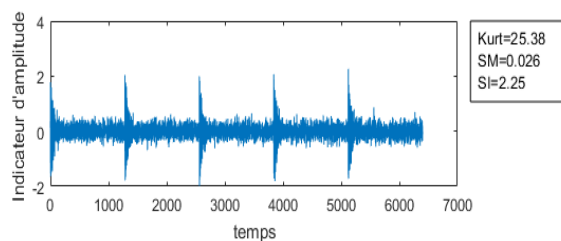


Figure 35 :La Variation des indicateurs en fonction du nombre d'impacts les signaux simulés ont le même bruit et la même amplitude.

(a)



(b)

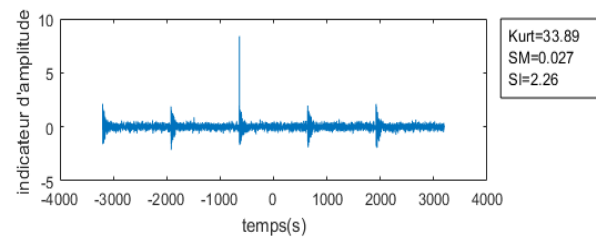
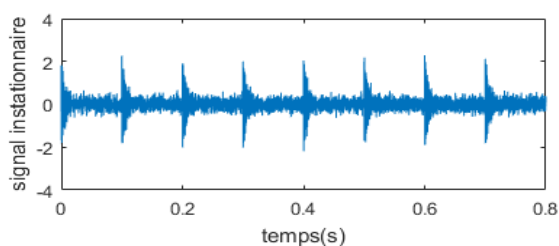


Figure 36:Un signal de train d'impulsions, (a) faible variation de l'amplitude des impacts (b) grande variation de l'amplitude des impacts.

Depuis les Figure 35 et 36 on constate que le Kurtosis est moins fiable que les indicateurs SM et Si.

En considérant le signal suivant:

(a)



(b)

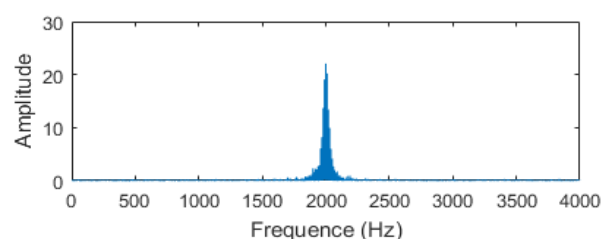


Figure 37 (a) Un signal simulé de train d'impulsions avec une fréquence de résonance $f_0 = 2000$ Hz, ($F_s = 8000$ Hz). (b) sa transformée de Fourier.

les indicateurs SM et SI de ses coefficients CWT utilisant le CMW (Eq 9 avec $f_b = 10$ et $f_c = 0,8$) sont donnés à la Figure 38. Le vecteur d'échelle commence avec la valeur 1.6, qui correspond à la fréquence maximale du signal, jusqu'à 20 avec un pas de 0.1 et ceci donne lieu à une matrice d'échelle temporelle bidimensionnelle. Pour sélectionner l'échelle correspondant aux fréquences de résonance, on calcule l'indicateur utilisé à chaque valeur du vecteur d'échelle et on obtient la courbe de l'indicateur en fonction de l'échelle. Les résultats sont affichés sur la Figure 38 où les deux indicateurs donnent une grande amplitude à l'échelle de résonance ($s=3.2$). On note que l'indicateur SI donne une courbe grossière, ce qui rend plus difficile la localisation des résonances.

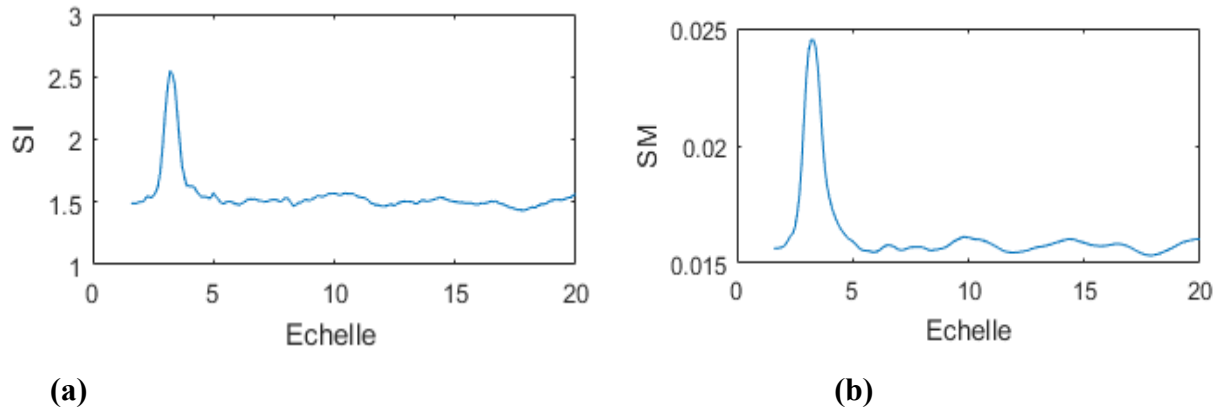


Figure 38: Les coefficients CWT ($f_b = 10, f_c = 0,8$) du signal donné à la Figure 37 (a) SI en fonction de l'échelle, (b) SM en fonction de l'échelle.

La Figure 39 montre les bandes de filtrage autour des résonances 1200 Hz et 2000 Hz avec respectivement deux valeurs du facteur de forme.

Avec $fb = 5$, il existe de nombreuses composantes d'interférence entre les deux bandes proches (Figure 39(a)), en augmentant fb à 23.3, les termes d'interférence sont atténués, ainsi, lorsque deux résonances sont très proches, nous pouvons ajuster le facteur de forme fb pour améliorer la détection (Figure 40).

Supposons que l'équation de la largeur de bande de fréquence de l'ondelette de Morlet utilise l'équation (9) :

$$e^{-\frac{\pi^2}{f_b^2}(s_w f - f_c)^2} \quad (16)$$

Avec s_w est l'échelle correspondant à la fréquence de l'ondelette. En supposant que l'Eq 16 se rapproche de α , la solution est donnée par :

$$f = \frac{f_c \pm \frac{\sqrt{-\log(\alpha)} f_b}{\pi}}{s_w} = \frac{f_c}{s_w} \pm \frac{\sqrt{-\log(\alpha)} f_b}{\pi s_w} \quad (17)$$

La gamme de fréquences entre deux résonances peut être exprimée par :

$$\frac{f_c}{s_{w2}} - \frac{f_c}{s_{w1}} = \frac{\sqrt{-\log \log(\alpha)} f_b}{\pi s_{w2}} + \frac{\sqrt{-\log \log(\alpha)} f_b}{\pi s_{w1}} \Leftrightarrow f_2 - f_1 = \left(\frac{\sqrt{-\log \log(\alpha)}}{\pi s_{w2}} + \frac{\sqrt{-\log \log(\alpha)}}{\pi s_{w1}} \right) f_b \quad (18)$$

$$\text{Puis: } f_b = \frac{f_2 - f_1}{\frac{\sqrt{-\log \log(\alpha)}}{\pi} \left(\frac{1}{s_{w2}} + \frac{1}{s_{w1}} \right)} \quad (19)$$

L'équation 19 est utilisée pour déterminer le facteur de forme f_b nécessaire pour discriminer les fréquences de résonance adjacentes.

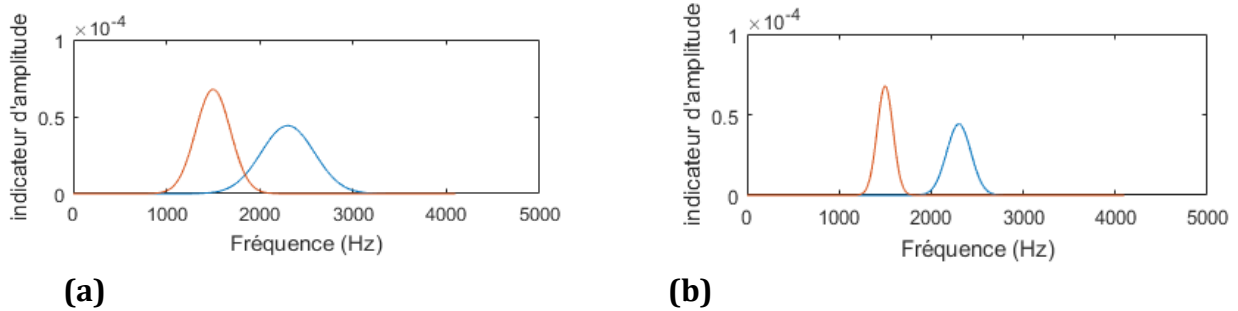


Figure 39: L'enveloppe de l'ondelette de Morlet autour des fréquences de résonance 1500 Hz et 2300 Hz (a) $f_b = 5$ et (b) $f_b = 23.3$.

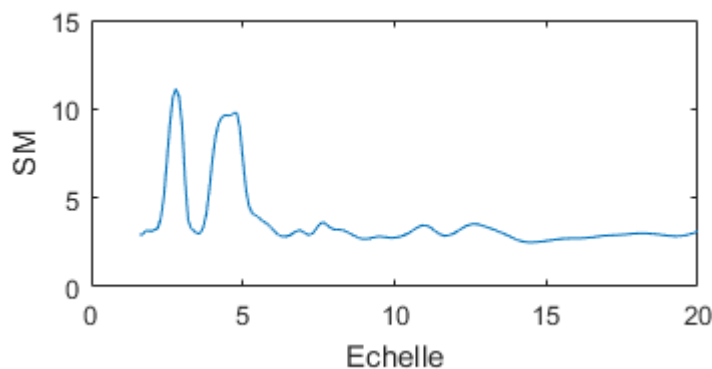


Figure 40: Le SM des coefficients CWT ($f_b = 23,3, f_c = 0,8$) du signal avec les deux résonances 2300 Hz et 1500 Hz.

III.2.5 Sélection de la bande de démodulation optimale:

La détection des valeurs de résonance structurelle à partir des signaux de vibration est insuffisante pour un diagnostic fiable des défauts, car la bande de fréquence de résonance portant l'information de défaut impulsif est distribuée sur une gamme de fréquence spécifique dont la largeur de bande optimale est inconnue. Ainsi, pour déterminer la bande de fréquence de démodulation optimale qui inclut les informations significatives contenues dans les bandes latérales de modulation autour des résonances détectées, le signal est soumis à un filtrage passe-bande, centré sur la fréquence de résonance, en plusieurs bandes.

La bande la plus impulsive peut être déterminée sur la base de la valeur maximale de la mesure de sparsité (SMM). La largeur de bande de fréquence dépend du paramètre f_b , mais aussi de la valeur de la fréquence de résonance (Figure 33). Dans l'équation de la largeur de bande de fréquence de l'ondelette de Morlet (Eq. 4), la valeur maximale de l'amplitude est égale à 1 lorsque $s_w f = f_c$. Par conséquent, la durée de fréquence de l'ondelette de Morlet (MWF) peut être estimée en supposant que cette équation se rapproche de zéro :

$$e^{-\frac{\pi^2}{f_b^2}(s_w f - f_c)^2} = 0.01 \quad (20)$$

Ainsi, les fréquences maximale et minimale de la largeur de bande de l'ondelette de Morlet sont données par :

$$f_{max} = \frac{f_c + \frac{\sqrt{\log \log(100)}}{\pi} f_b}{s_w} \quad (21)$$

$$f_{min} = \frac{f_c - \frac{\sqrt{\log \log(100)}}{\pi} f_b}{s_w} \quad (22)$$

La Figure 41(a) montre la largeur de bande de fréquence de l'ondelette de Morlet autour de 2000 Hz ($f_b = 17.6$, $f_c = 0.8125$, $s_w = 4.0625 \cdot 10^{-4}$, c'est l'échelle de la fréquence 2000 Hz), elle va de $f_{min} = 1159$ Hz à $f_{max} = 2840$ Hz. Le filtrage autour de 2000 Hz dans le signal donné à la Fig 22(a) donné la même gamme que celle obtenue à la Figure 41(a) ($s = 3,25$ c'est l'échelle de la fréquence 2000 Hz) (Figure 41 (b)). La soustraction terme à terme des deux équations 9 et 10 donne les largeurs de bande des filtres d'ondelettes autour de la fréquence centrale de l'ondelette (équation 23).

$$\Delta f = f_{max} - f_{min} = \frac{2 \frac{\sqrt{\log \log(100)}}{\pi} f_b}{s_w} \quad (23)$$

Ainsi, le facteur de forme Morlet f_b en fonction des bandes passantes Δf est donné par :

$$f_b = \frac{s_w}{2 \frac{\sqrt{\log(100)}}{\pi}} \Delta f \quad (24)$$

Lors du traitement d'un signal physique ayant une fréquence d'échantillonnage F_s , le f_b paramètre pour une largeur de bande spécifiée Δf autour d'une fréquence de résonance d'échelle s , est donné par :

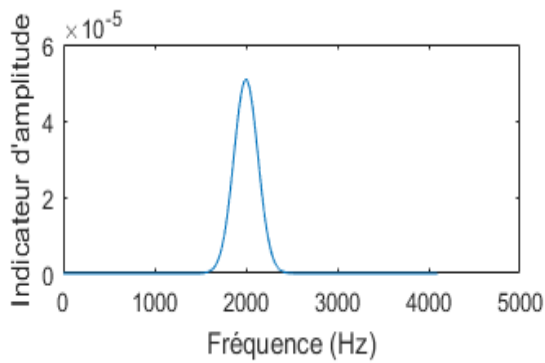
$$f_b = \frac{\frac{s}{F_s}}{2 \frac{\sqrt{\log(100)}}{\pi}} \Delta f \quad (25)$$

Si l'on remplace l'échelle s dans l'équation 25, le paramètre f_b est également défini par :

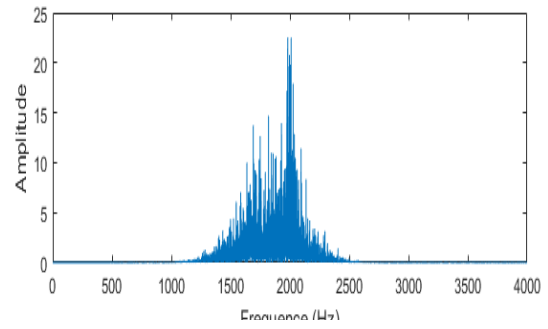
$$f_b = \frac{\frac{f_c}{f_0}}{2 \frac{\sqrt{\log(100)}}{\pi}} \Delta f \quad (26)$$

Ainsi, l'ondelette de Morlet complexe est utilisée comme banque de filtres et avec l'équation 23, nous pouvons calculer pour chaque valeur de largeur de bande de fréquence la valeur du facteur de forme correspondant. Le CWT est implémenté en utilisant le CMW avec les différentes valeurs de facteur de forme correspondant aux largeurs de bande de fréquence choisies. Le processus de filtrage passe-bande à chaque résonance commence avec une largeur de bande égale aux trois premières lignes harmoniques de la caractéristique du défaut recherché ($3fd$).

Dans le cas d'une investigation multi-défauts, la première bande prend trois fois les fréquences des plus petits défauts. Les autres longueurs de bande passante après la première (i.e. $3fd$) seront égales à $(2n + 1)fd$ (avec $n=1, 2, 3, \dots$) ce qui donne une différence de longueur entre elles égale à $2fd$.



(a)



(b)

Figur 41 : (a) La largeur de bande de l'ondelette de Morlet ($fb = 17.6$, $f_0 = 2000$ Hz), (b) les coefficients CWT du signal donné dans la Figure 33(a) à l'échelle correspondant aux 2000 Hz obtenus avec l'ondelette donnée dans la Figure 41(a).

Dans les situations où une seule bosse d'échelle de résonance est apparue, la largeur de sa dernière bande de filtre (Δf_{max}) peut être choisie en respectant le théorème de Bedrosian qui stipule que la largeur de bande d'un signal démodulé n'excède pas sa fréquence porteuse (c.-à-d. $\Delta f \leq f_0$). Cependant, lorsque plusieurs maxima d'échelles de résonance apparaissent, la valeur maximale de la bande passante de filtrage autour de chaque résonance doit être choisie avec soin afin de ne pas inclure les informations des résonances voisines. Pour cette raison, nous prendrons comme largeur de bande maximale le double de la différence entre les deux résonances proches diminuée de 20%, soit $\Delta f_{max} = 80\%$ de $2 * |fk - fk-1|$ ou $2 * |fk - fk+1|$, tout dépend de la résonance qui est proche de celle étudiée (celle avant ou après la *nième* résonance). Et automatiquement, la largeur de bande de filtrage maximale de la première résonance sera choisie par rapport à la deuxième résonance et la largeur de bande de filtrage maximale de la dernière résonance sera choisie par rapport à l'avant-dernière résonance. Il est possible qu'il y ait quelques bandes latérales de la résonance fermée, qui pourraient être incluses dans la dernière largeur de bande de filtrage Δf_{max} de la résonance traitée, mais qui n'auront pas d'incidence en raison de leur nombre réduit et de leur faible amplitude.

Chapitre IV : Validation expérimentale

IV.1 Introduction:

Dans ce dernier chapitre, nous allons tester l'efficacité de la méthode développée dans le chapitre précédent sur des signaux vibratoires recueillis sur différents bancs d'essai. Ces bancs d'essai permettent de simuler les défauts plus courants sur leurs organes mécaniques d'une manière contrôlée afin de valider les méthodes et les démarches développées dans ce contexte. Pour les deux premiers défauts sur les engrenages, l'expérimentation a été réalisée au niveau du centre du soudage et de contrôle (actuellement : Centre de Recherche en Technologies Industrielles) sis à Chéraga, Alger.

Le banc d'essai sur lequel sont simulés les défauts est réalisé au niveau du centre et les défauts sont créés par l'équipe en place en collaboration avec les enseignants du laboratoire " Vibration et Acoustique" de l'ESTHB. Pour les défauts de roulement, les signaux traités sont issus du banc d'essai de SpectraQuest au nom de Machinery Fault Simulator (MFS). Les défauts simulés sur cette machine sont déjà prédéfinis et sont créés par ses concepteurs. Les campagnes de mesure sont réalisées au niveau du Laboratoire de Techniques Aéro-Spatiales, section Vibrations et Identification des structures de l'université de Liège en Belgique. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus de l'application de la méthode proposée sur les signaux recueillis sur ces bancs d'essai accompagnés des valeurs optimales obtenues dans chaque cas.

IV.2 Défauts d'engrenages:

IV.2.1 Cas 1 : Une dent cassée :

L'expérience de ce premier cas test est réalisée avec un engrenage à un seul étage comme représenté sur la Figure 42 (a). La configuration de la conception de ce banc d'essai comporte un moteur à courant alternatif de 50 Hz, un pignon sur la premier palier à 80 dents qui a une dent cassée, une roue à 100 dents. noter que ce train d'engrenages est lubrifié par bain d'huile et non chargé.

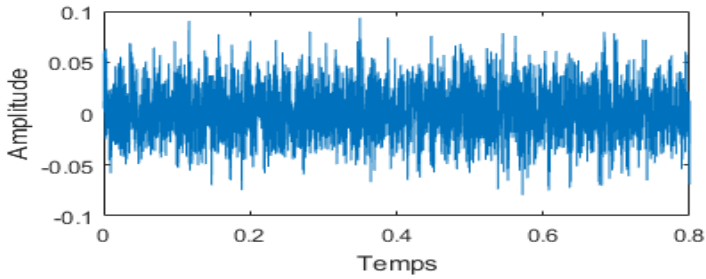
Une dent d'engrenage cassée va générer une amplitude élevée à la composante $1xT$ PM (Tours Par Minute) et ses harmoniques, de plus, elle peut exciter la fréquence naturelle de l'engrenage ou d'autres fréquences naturelles des structures composant la machine. Pour l'acquisition du signal temporel, la fréquence d'échantillonnage a été fixée à 5120 Hz avec 4096 échantillons et un temps d'acquisition de 0,8 s. Le signal vibratoire est recueilli à l'aide d'un système OROS 25 PC-Pack. Le signal analysé, donné dans la Figure 42(b) est délivré par un accéléromètre qui a une sensibilité de 10 mV/g et une plage de sensibilité de 1 à 4 kHz, placé à proximité du logement de roulement supportant l'arbre du pignon. La vitesse de l'arbre d'entrée a été maintenue constante à 900 tr/min et la vitesse de l'arbre de sortie est égale à 720 tr/min. La fréquence de ce défaut sera 15 Hz (900/60). Le spectre de Fourier illustré à la Figure 42(c) montre de nombreux harmoniques relatifs aux fréquences de rotation des deux arbres et un niveau d'énergie significatif autour de 58 et aussi autour de [880-1040].

La mesure d'éparsité SM et l'indice de lissage SI des coefficients d'ondelettes en fonction d'échelle de ce signal est donnée dans les Figure 42 (d et e). Nous constatons la présence de six pics de redondance avec le SM et dix avec le SI.

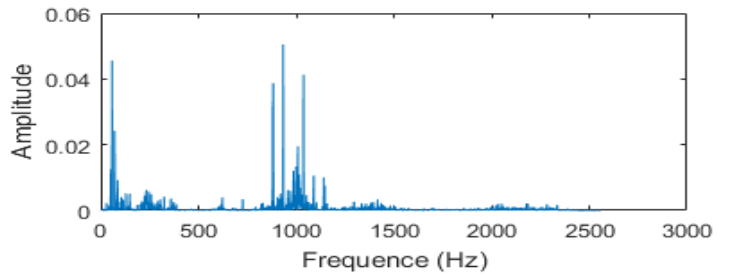
(a)



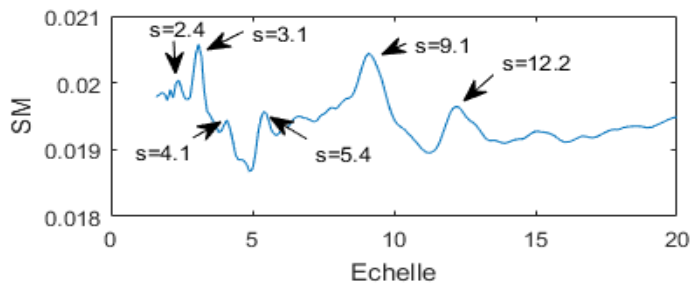
(b)



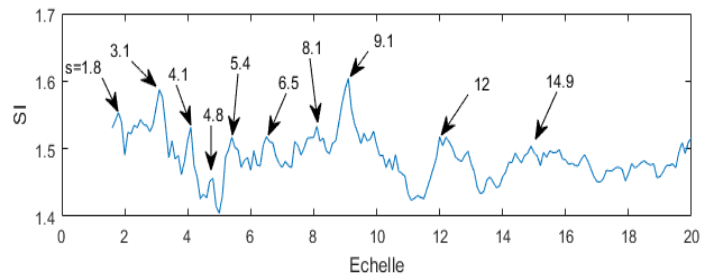
(c)



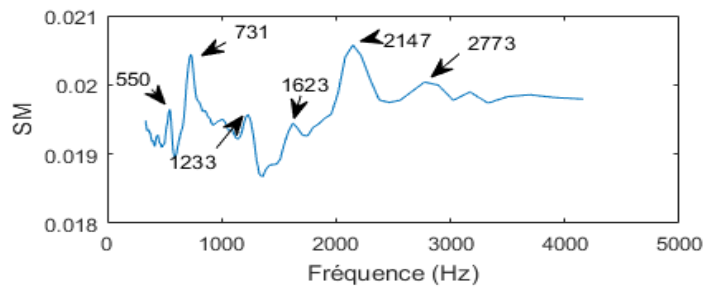
(d)



(e)



(f)



(g)

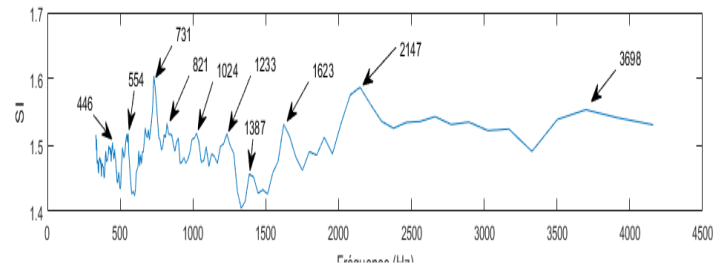


Figure 42 - Analyse du signal avec une dent cassée en fonction des indicateurs SM et SI:

(a) banc d'essai,

(b) signal temporel à 900 tr/min, (c) spectre correspondant,

(d) indicateur SM en fonction de l'échelle, (e) indicateur SI en fonction de l'échelle,

(f) indicateur SM en fonction de la fréquence, (g) indicateur SI en fonction de la fréquence,

IV.2.1.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM:

(a)

(b)

(c)

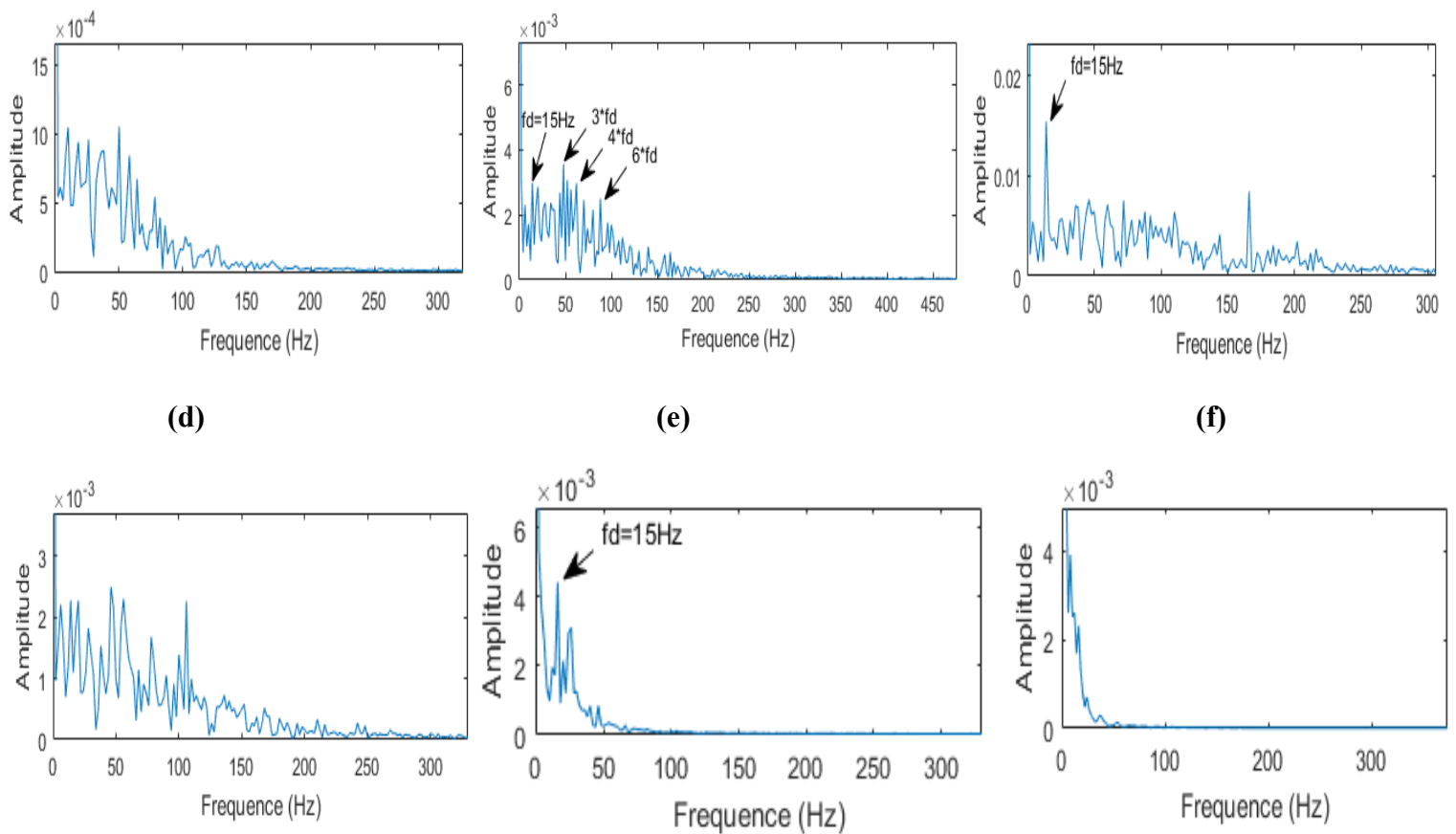


Figure 43 : Résultats en fonction de l'indicateur SM

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s= 2.4$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f= 255$ Hz, (b) $s= 3.1$ avec $\Delta f= 405$ Hz, (c) $s=4.1$ avec $\Delta f=615$ Hz, (d) $s= 5.4$ avec $\Delta f=345$ Hz, (e) $s= 9.1$ avec $\Delta f=105$ Hz, (f) $s= 12.2$ avec $\Delta f= 45$ Hz.

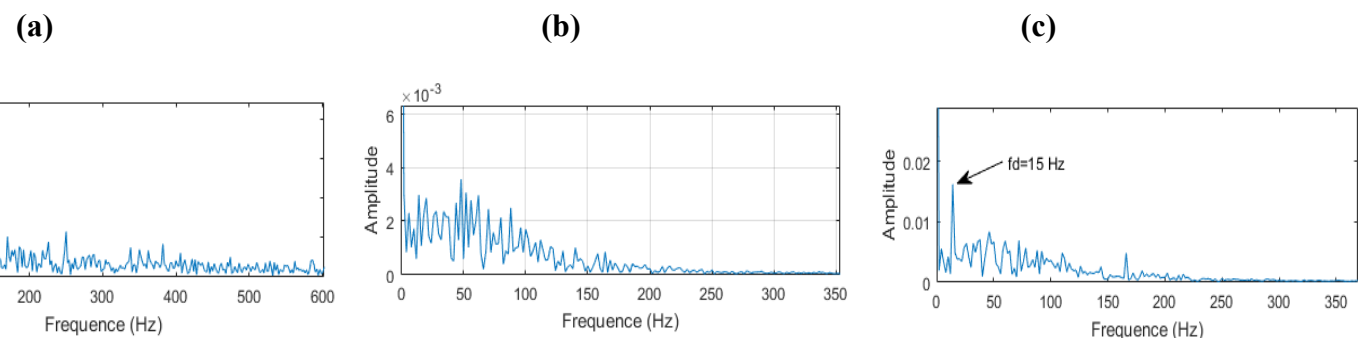
Les spectres d'enveloppe des coefficients d'ondelettes aux échelles 2.4, 3.1, 4.1, 5.4, 9.1 et 12.2 avec les largeurs de bande optimales sont donnés respectivement aux Figures 43(a), (b), (c), (d), (e) et (f)).

Nous pouvons voir dans la Figure 43(b) les harmoniques de la fréquence à 15 Hz qui se distinguent les unes des autres, cette image vibratoire correspond au défaut du pignon qui est obtenu avec une largeur de bande optimale de 405 Hz.

Par contre, les autres résonances ne donnent aucune information concernant le défaut simulé Figures 43 (a), (d) et (f)).

Néanmoins, il y a lieu de signaler la présence au niveau du spectre d'enveloppe de la résonance à 1623 Hz et 731 Hz Figures 43(c) et (e)) d'un pic à la fréquence du défaut ($fd = 15$ Hz).

IV.2.1.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:



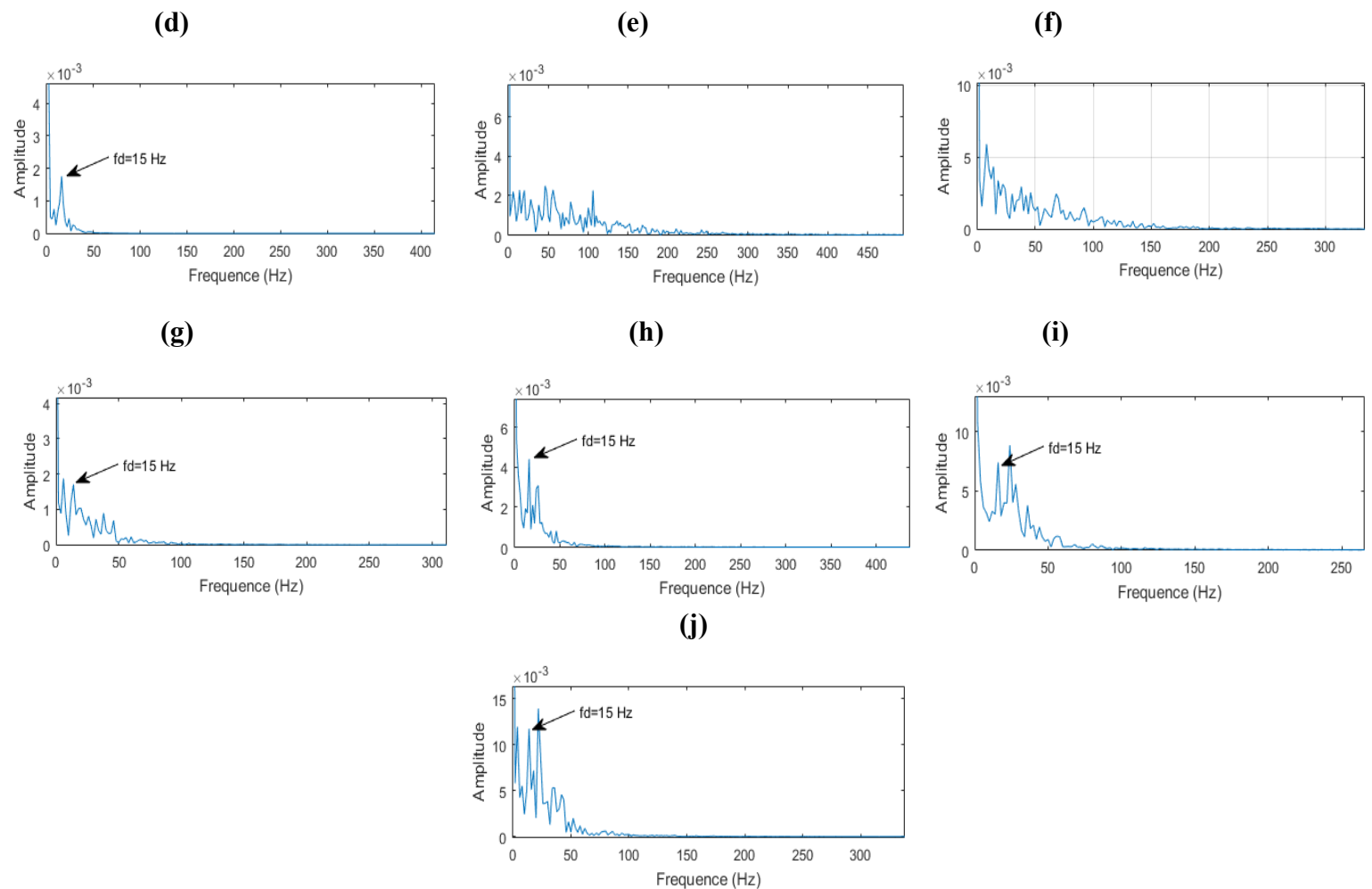


Figure 44: Résultats en fonction de l'indicateur SI

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s = 1.8$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f = 3075$ Hz, (b) $s = 3.1$ avec $\Delta f = 405$ Hz, (c) $s = 4.1$ avec $\Delta f = 465$ Hz, (d) $s = 4.8$ avec $\Delta f = 45$ Hz, (e) $s = 5.4$ avec $\Delta f = 345$ Hz, (f) $s = 6.5$ avec $\Delta f = 285$ Hz, (g) $s = 8.1$ avec $\Delta f = 105$ Hz, (h) $s = 9.1$ avec $\Delta f = 105$ Hz, (i) $s = 12$ avec $\Delta f = 105$ Hz, (j) $s = 14.9$ avec $\Delta f = 105$ Hz.

Les spectres d'enveloppe des coefficients d'ondelettes aux échelles 1.8, 3.1, 4.1, 4.8, 5.4, 6.5, 8.1, 9.1, 12 et 14.9 avec les largeurs de bande optimales sont donnés respectivement aux Figures 44((a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i) et (j)).

On constate la présence d'un pic à la fréquence du défaut ($fd = 15$ Hz) aux resonances 1623 Hz, 1387 Hz, 821 Hz, 731 Hz, 554 Hz, 446 Hz Figures 44((c), (d), (g), (h), (i) et (j)) et que les autres resonances Figures 44 ((a), (b), (e) et (f)) n'affiche aucune information à propos du défaut.

Contrairement aux mesures en fonction de L'indicateur SM, aucune des figures résultant des mesures en fonction de L'indicateur SI ne montrent la fréquence du défaut accompagner de ces harmoniques.

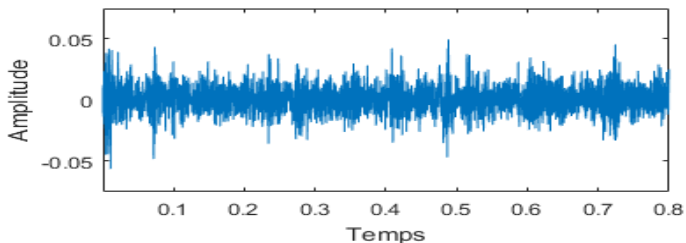
IV.2.2 Cas1-2:

Ce cas-ci et la même expérience que le cas précédent, la différence c'est que la pignon est sur le palier numéro trois au lieu du premier et la vitesse de l'arbre d'entrée est de 300 tr/min ce qui fait la fréquence de notre défaut est de 5 Hz, la vitesse de l'arbre de sortie est égale à 240 tr/min.

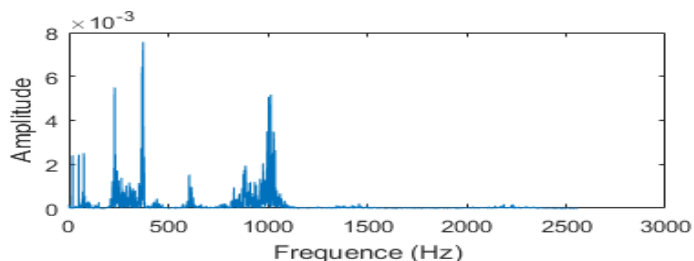
Le spectre de Fourier illustré à la Figure 45 (b) montre de nombreux harmoniques relatifs aux fréquences de rotation des deux arbres et un niveau d'énergie significatif autour des fréquences 230 Hz, 373 Hz et [880–1010 Hz].

La mesure d'éparsité SM et l'indice de lissage SI des coefficients d'ondelettes en fonction d'échelle de ce signal est donnée dans les Figure 45 (c et d). Nous constatons la présence de 8 pics de redondance avec le SM et sept avec le SI.

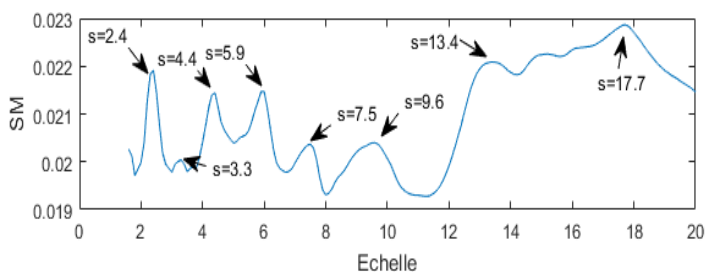
(a)



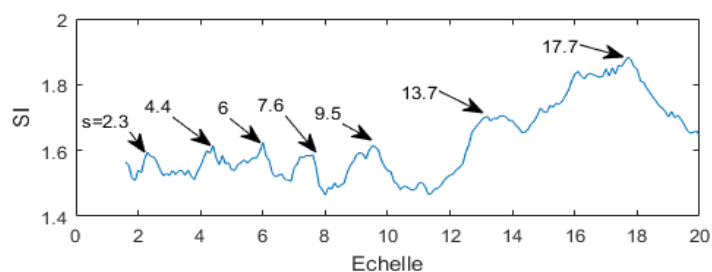
(b)



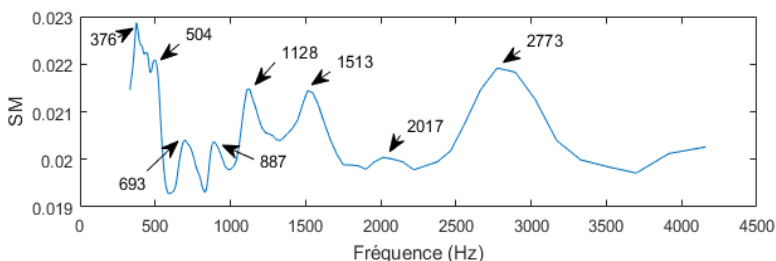
(c)



(d)



(e)



(f)

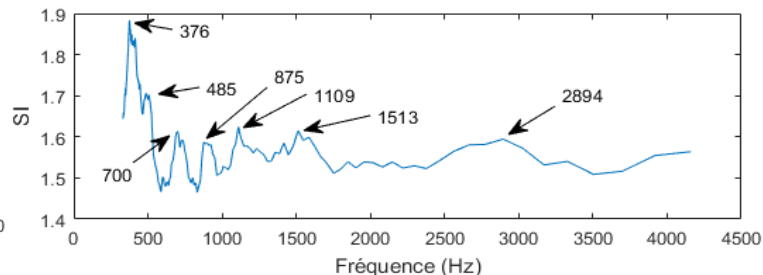
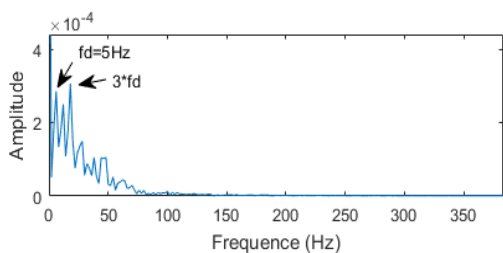


Figure 45 - Analyse du signal avec une dent cassée en fonction des indicateurs SM et SI :

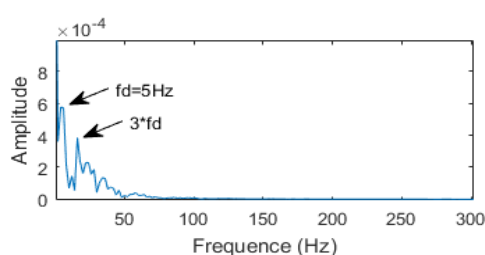
- (a) signal temporel à 300 tr/min, (b) spectre correspondant,
- (c) indicateur SM en fonction de l'échelle, (d) indicateur SI en fonction de l'échelle,
- (e) indicateur SM en fonction de la fréquence, (f) indicateur SI en fonction de la fréquence,

IV.2.2.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM:

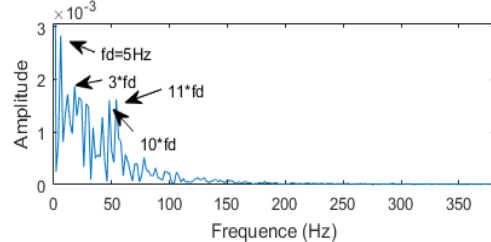
(a)



(b)



(c)



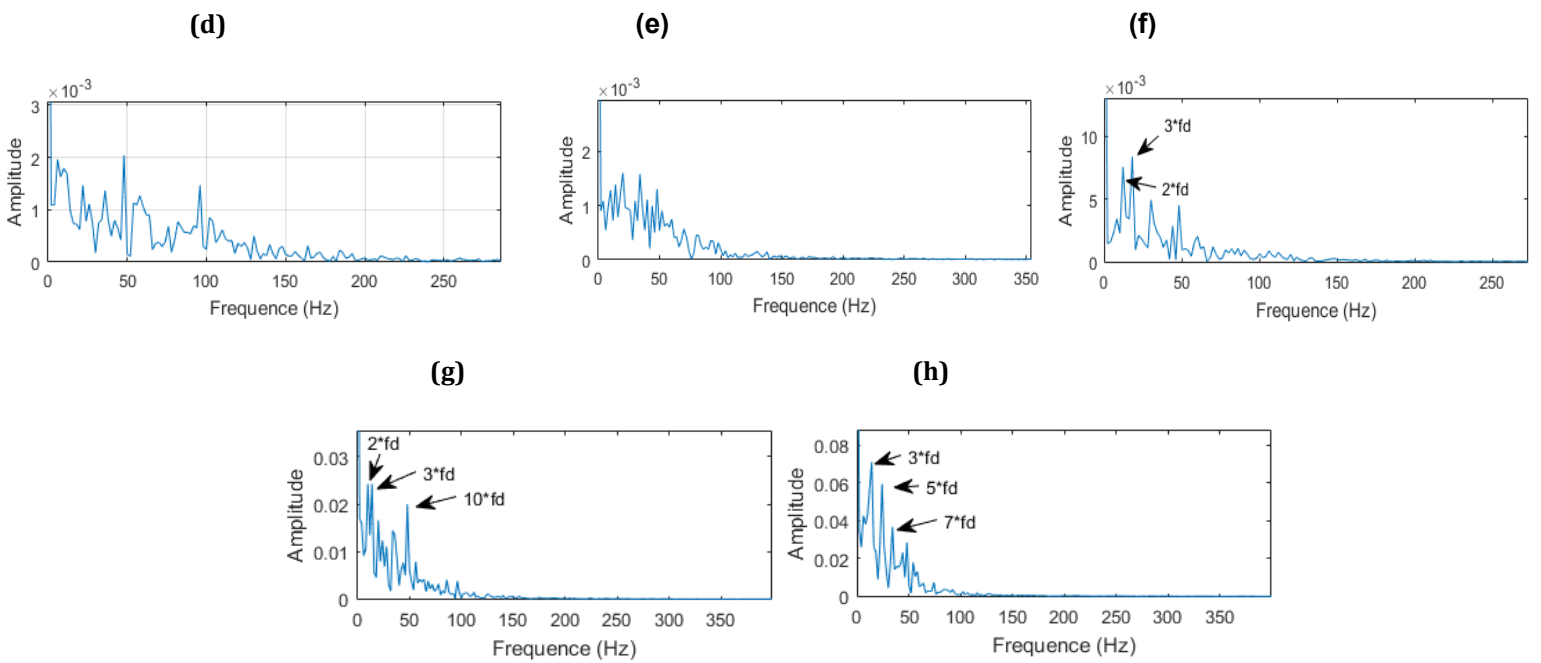


Figure 46: Résultats en fonction de l'indicateur SM

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2.4$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=145$ Hz, (b) $s=3.3$ avec $\Delta f=105$ Hz, (c) $s=4.4$ avec $\Delta f=215$ Hz, (d) $s=5.9$ avec $\Delta f=315$ Hz, (e) $s=7.5$ avec $\Delta f=195$ Hz, (f) $s=9.6$ avec $\Delta f=45$ Hz, (g) $s=13.4$ avec $\Delta f=265$ Hz, (h) $s=17.7$ avec $\Delta f=235$ Hz.

Les spectres d'enveloppe des coefficients d'ondelettes aux échelles 2.4, 3.3, 4.4, 5.9, 7.5, 9.6, 13.4 et 17.7 avec les largeurs de bande optimales sont donnés respectivement aux Figures 46((a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) et (h)).

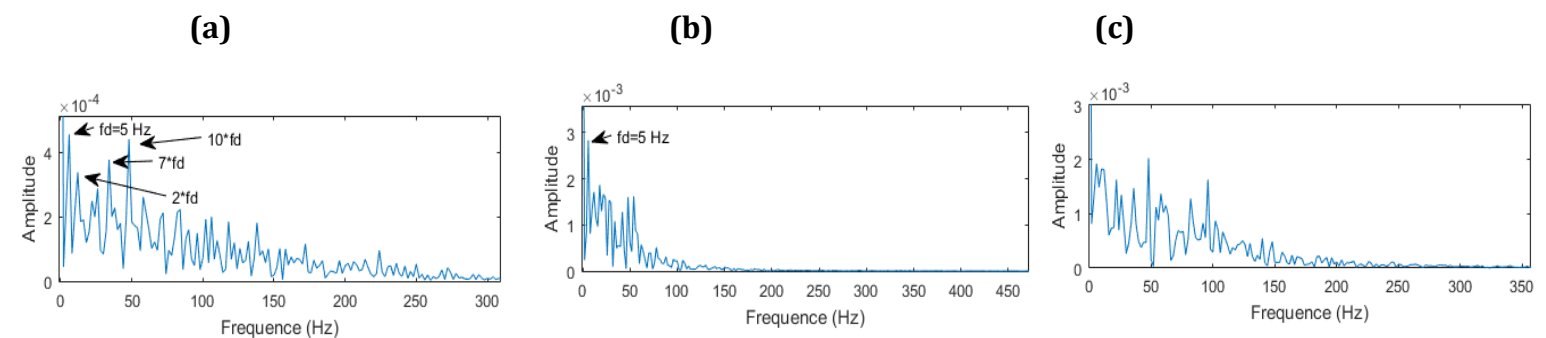
On constate dans la Figure 46(c) les harmoniques de la fréquence à 5 Hz qui se distinguent les unes des autres, cette image vibratoire correspond au défaut du pignon qui est obtenu avec une largeur de bande optimale de 215 Hz.

Aussi aux fréquences de résonances 2773 HZ et 2017 Hz Figures 46((a) et (b)) on peut apercevoir la fréquence défauts et la présence d'une seule harmonique qui sont obtenu avec une largeur de bande optimale de 145 Hz et 105 Hz.

Dans les Figures 46 ((f), (g) et (h)) on distingue pas la fréquence de défauts mais on constate la présence de ce qui semble être ces harmoniques.

Par contre, les autres résonances ne donnent aucune information concernant le défaut simulé Figures 46 ((d) et (e)).

IV.2.2.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:



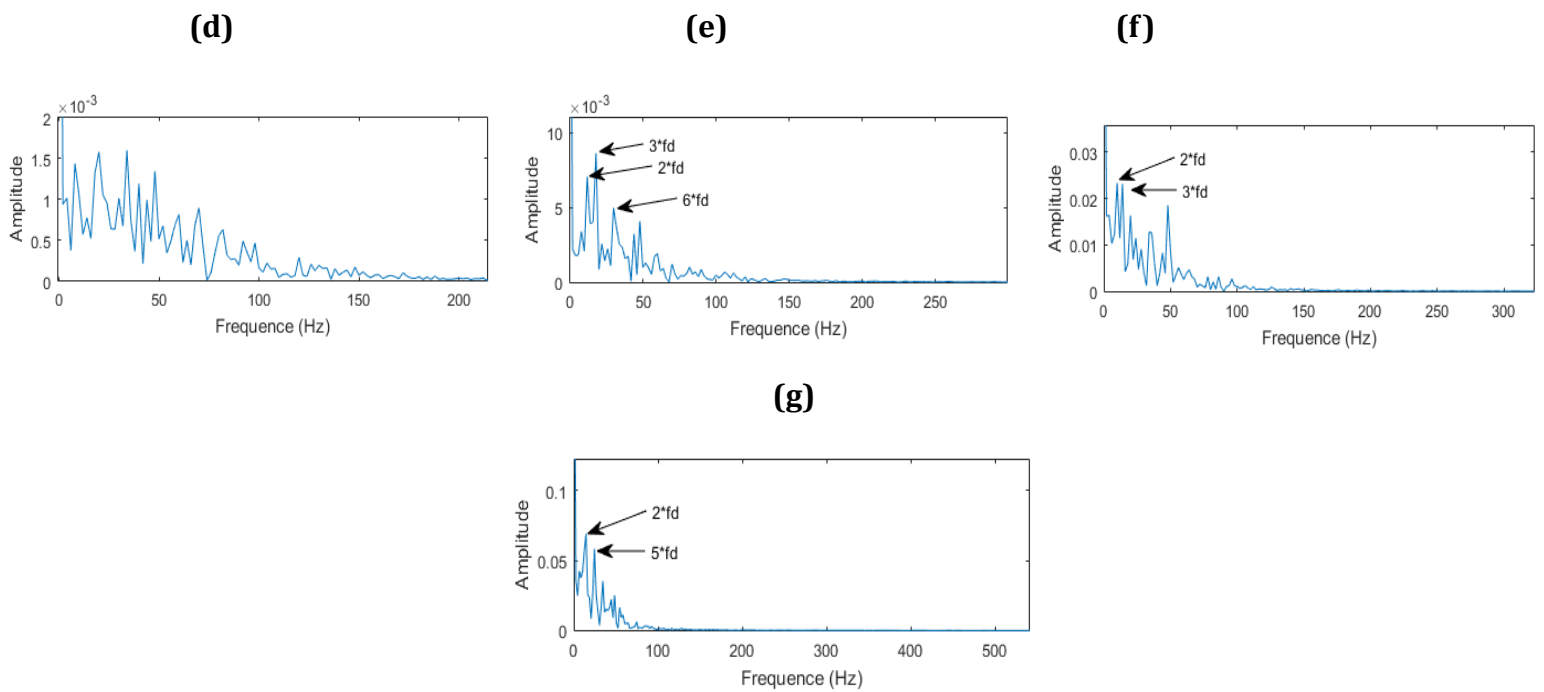


Figure 47: Résultats en fonction de l'indicateur SI

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2.3$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=545$ Hz, (b) $s=4.4$ avec $\Delta f=215$ Hz, (c) $s=6$ avec $\Delta f=335$ Hz, (d) $s=7.6$ avec $\Delta f=225$ Hz, (e) $s=9.5$ avec $\Delta f=225$ Hz, (f) $s=13.7$ avec $\Delta f=215$ Hz, (g) $s=17.7$ avec $\Delta f=215$ Hz

Les spectres d'enveloppe des coefficients d'ondelettes aux échelles 2.3, 4.4, 6, 7.6, 9.5, 13.7 et 17.7 avec les largeurs de bande optimales sont donnés respectivement aux Figures 47(a) , (b), (c), (d), (e), (f) et (g),).

On constate dans la Figure 47(a) la fréquence de défaut qui 5 Hz et ses harmoniques qui se distinguent les unes des autres, cette image vibratoire correspond au défaut du pignon qui est obtenu avec une largeur de bande optimale de 545 Hz.

la fréquence de résonance 1513 Hz Figure 47(b) on peut apercevoir la fréquence du défauts mais aucune harmonique, qui est obtenue avec une largeur de bande optimale de 215 Hz.

Dans les Figures 47 ((e), (f) et (g)) on distingue pas la fréquence de défauts mais on constate la présence de ce qui semble être ces harmoniques.

Par contre, les autres résonances ne donnent aucune information concernant le défaut simulé Figures 47((c) et (d)).

IV.2.3 Cas 2 : deux dents cassées

Le deuxième signal analysé concerne le cas d'une dent cassée conjointement au niveau du pignon et de la roue du même banc d'essai présenté dans la Figure 46 (a).

Dans cette situation, trois chocs vont s'ajouter au signal de vibration délivré par la machine.

Les deux premiers concernent la participation au contact de chaque défaut aux fréquences f_1 et f_2 , le troisième se produit lorsque les deux défauts se rencontrent après chaque période $1/f_{\text{coïn}}$, avec $f_{\text{coïn}}$ étant la fréquence de coïncidence.

Cette fréquence de coïncidence $f_{\text{coïn}}$ est généralement très faible, donc difficile à repérer dans

le spectre de base. Dans notre cas, nous avons une configuration de système d'engrenage qui permet d'avoir la fréquence de coïncidence toujours égale à la différence des fréquences de rotation des deux arbres.

La fréquence de coïncidence est définie comme telle:

$$F_{coin} = \frac{f1 Z1}{PPCM(Z1,Z2)} = \frac{f2 Z2}{PPCM(Z1,Z2)} \quad (27)$$

avec :

PPCM est le plus petit multiple commun,

f1 : la fréquence de rotation de l'arbre d'entrée,

f2 : la fréquence de rotation de l'arbre de sortie,

Z1 = 80 : le nombre de dents du pignon,

Z2 = 100 : le nombre de dents de la roue.

Dans notre cas f1=40 Hz ,f2= 32 Hz et la fcoin=8 Hz

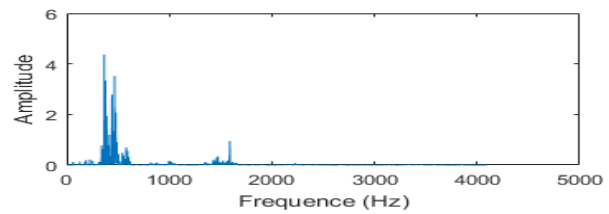
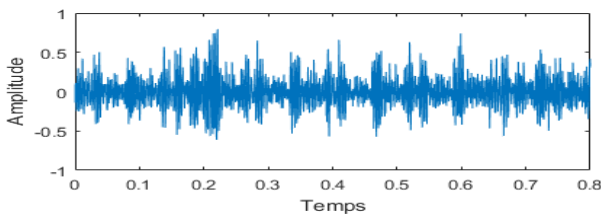
Le signal temporel recueilli avec une vitesse de 2400 tr/min ainsi que le spectre correspondant sont présentés respectivement sur les Figures 46((a) et (b)).

Le spectre présente une grande énergie autour de 366 Hz et 466 Hz.

La mesure d'éparité SM et l'indice de lissage SI des coefficients d'ondelettes en fonction d'échelle de ce signal sont données dans les Figure 48 (c et d) . Nous constatons la présence de sept pics de redondance avec le SM et dix avec le SI.

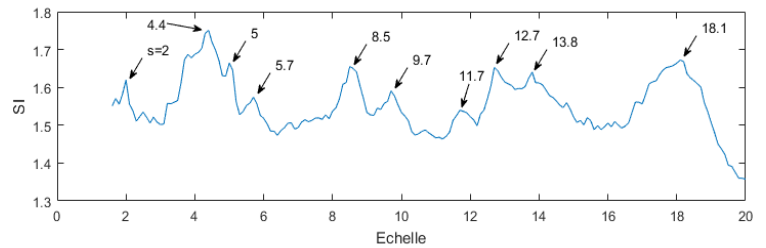
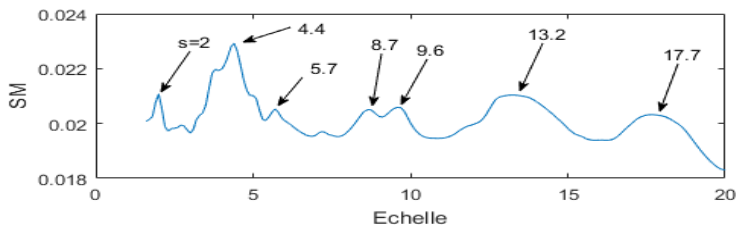
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

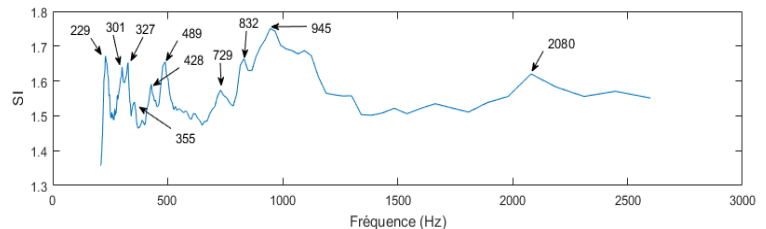
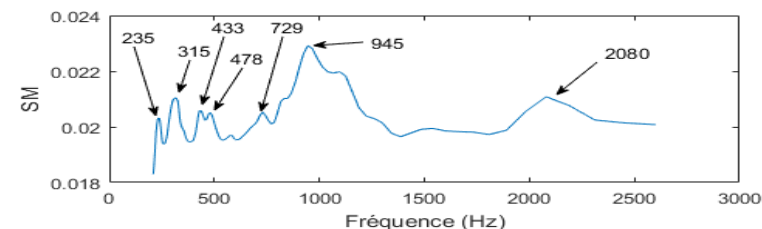


Figure 48 - Analyse du signal avec deux dent cassée en fonction des indicateurs SM et SI :

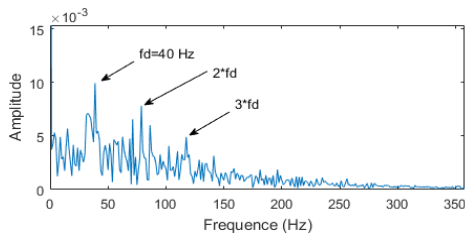
(a) signal temporel à 2400 tr/min, (b) spectre correspondant,

(c) indicateur SM en fonction de l'échelle, (d) indicateur SI en fonction de l'échelle,

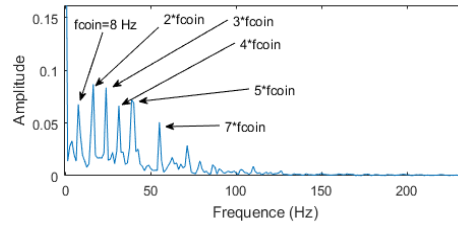
(e) indicateur SM en fonction de la fréquence, (f) indicateur SI en fonction de la fréquence,

IV.2.3.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :

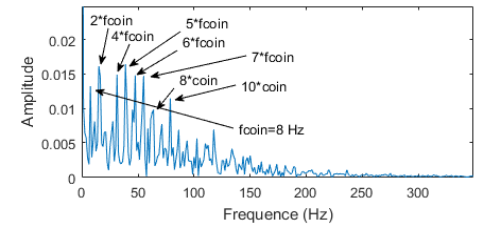
(a)



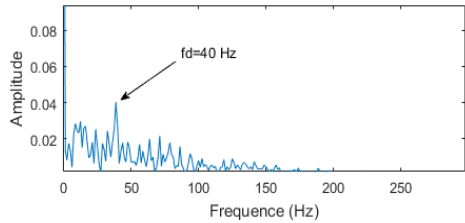
(b)



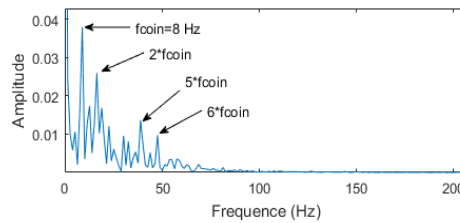
(c)



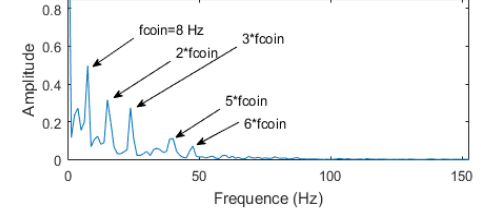
(d)



(e)



(f)



(g)

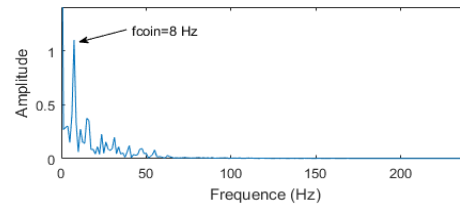


Figure 49 : Résultats en fonction de l'indicateur SM

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=600$ Hz, (b) $s=4.4$ avec $\Delta f=200$ Hz, (c) $s=5.7$ avec $\Delta f=280$ Hz, (d) $s=8.7$ avec $\Delta f=280$ Hz, (e) $s=9.6$ avec $\Delta f=120$ Hz, (f) $s=13.2$ avec $\Delta f=120$ Hz, (g) $s=17.7$ avec $\Delta f=120$ Hz.

L'analyse de la première résonance donne l'image vibratoire du défaut de pignon.

La composante fondamentale et ses harmoniques sont bien distinguées sur la Figure 49 (a), la largeur de bande optimale est de 600 Hz.

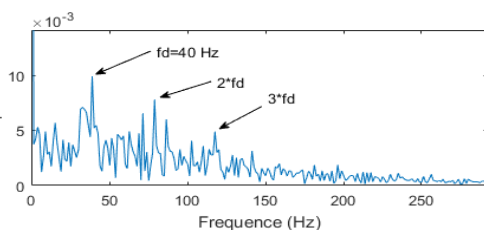
Le spectre d'enveloppe des résonances aux échelles 4.4, 5.7, 9.6 et 13.2 (945 Hz, 729 Hz, 433 Hz et 315 Hz) montre les fondamentales et les harmoniques de la fréquence coïncidence (8 Hz). Les largeurs de bande optimales de ces résonances sont respectivement de 200 Hz, 280 Hz, 120 Hz et 120 Hz Figures 49 (b), (c), (e) et (f).

A la résonance 478 Hz (échelle 8.7) on constate la fondamentale du défaut de pignon mais pas ses harmoniques (Figure 49(d)). Sa largeur de bande optimale est de 280 Hz.

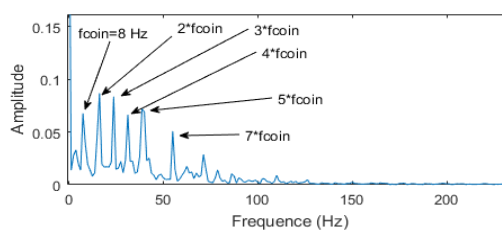
Aussi à la résonance 235 Hz on distingue la fondamentale de la fréquence de coïncidence mais pas ses harmoniques (Figure 49(g)). Sa largeur de bande optimale est de 120 Hz.

IV.2.3.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:

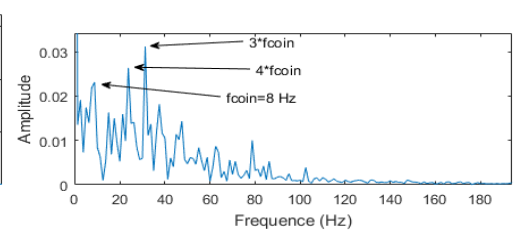
(a)



(b)



(c)



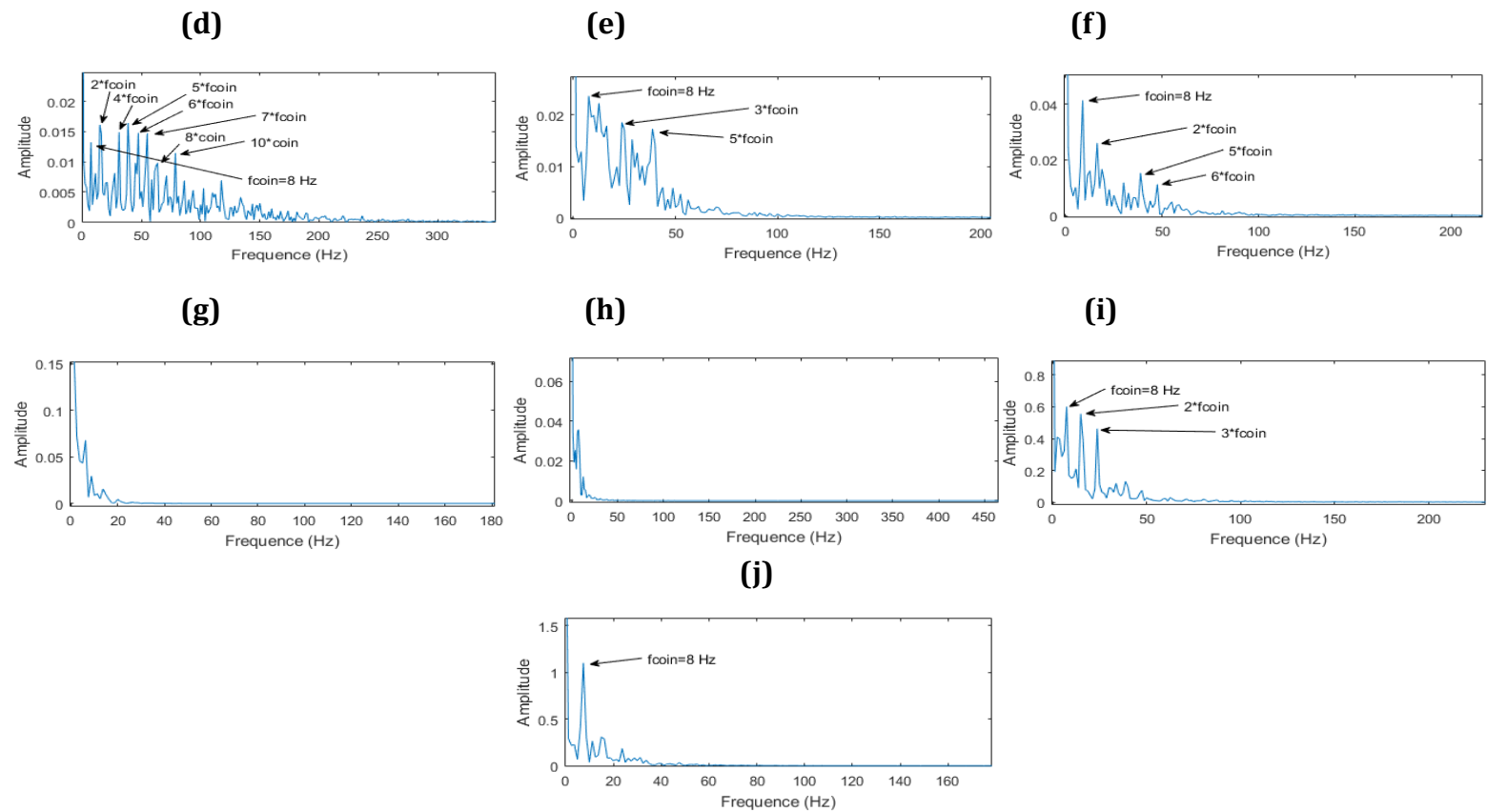


Figure 50: Résultats en fonction de l'indicateur SI

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=600$ Hz, (b) $s=4.4$ avec $\Delta f=200$ Hz, (c) $s=5$ avec $\Delta f=200$ Hz, (d) $s=5.7$ avec $\Delta f=280$ Hz, (e) $s=8.5$ avec $\Delta f=120$ Hz, (f) $s=9.7$ avec $\Delta f=120$ Hz, (g) $s=11.7$ avec $\Delta f=24$ Hz, (h) $s=12.7$ avec $\Delta f=24$ Hz, (i) $s=13.8$ avec $\Delta f=136$ Hz, (j) $s=18.1$ avec $\Delta f=88$ Hz.

L'analyse de la première résonance donne l'image vibratoire du défaut de pignon. La composante fondamentale et ses harmoniques sont bien distinguées sur la Figure 50 (a), la largeur de bande optimale est de 600 Hz.

Le spectre d'enveloppe des résonances aux échelles 4.4, 5, 5.7, 8.5, 9.7 et 13.8 (945 Hz, 832 Hz, 729 Hz, 489 Hz, 428 Hz et 301 Hz) montre les fondamentales et les harmoniques de la fréquence coïncidence (8 Hz). Les largeurs de bande optimales de ces résonances sont respectivement de 200 Hz, 200 Hz, 280 Hz, 120 Hz, 120 Hz et 136 Hz Figures 50 (b), (c), (d), (e), (f) et (i)).

A la résonance 229 Hz on distingue la fondamentale de la fréquence de coïncidence mais pas ses harmoniques (Figure 50 (j)). Sa largeur de bande optimale est de 88 Hz.

Les deux résonances 327 Hz et 355 Hz ne donnent aucune information concernant les défauts. (Figures 47 (g) et (h)).

Nous pouvons constater à travers les résultats des indicateurs SM et SI que les défauts qui ont une fréquence faible peuvent exciter des résonances qui se situent au niveau des basses fréquences.

IV.2.4 Cas 2-2:

Ce cas présente le même défaut que le précédent qui est de deux dents cassé et aussi effectué sur le même banc, la différence c'est que le pignon est placé sur le palier numéro trois au lieu du premier palier.

La vitesse de l'arbre d'entrée est de 1800 tr/min et la vitesse de l'arbre de sortie est égale à 1440 tr/min, la fréquence de notre défaut est de 30 Hz et la fréquence de coïncidence de 6 Hz. Le signal temporel recueilli est présenté à la Figure 51 (a), le spectre de Fourier illustré à la Figure 51 (b) présente une amplitude significative aux harmoniques de la fréquence du défaut et une grande énergie autour de [230 Hz- 288 Hz].

La mesure d'éparité SM et l'indice de lissage SI des coefficients d'ondelettes en fonction d'échelle de ce signal sont données dans les Figure 51 (c et d). Nous constatons la présence de six pics de redondance avec le SM et sept avec le SI.

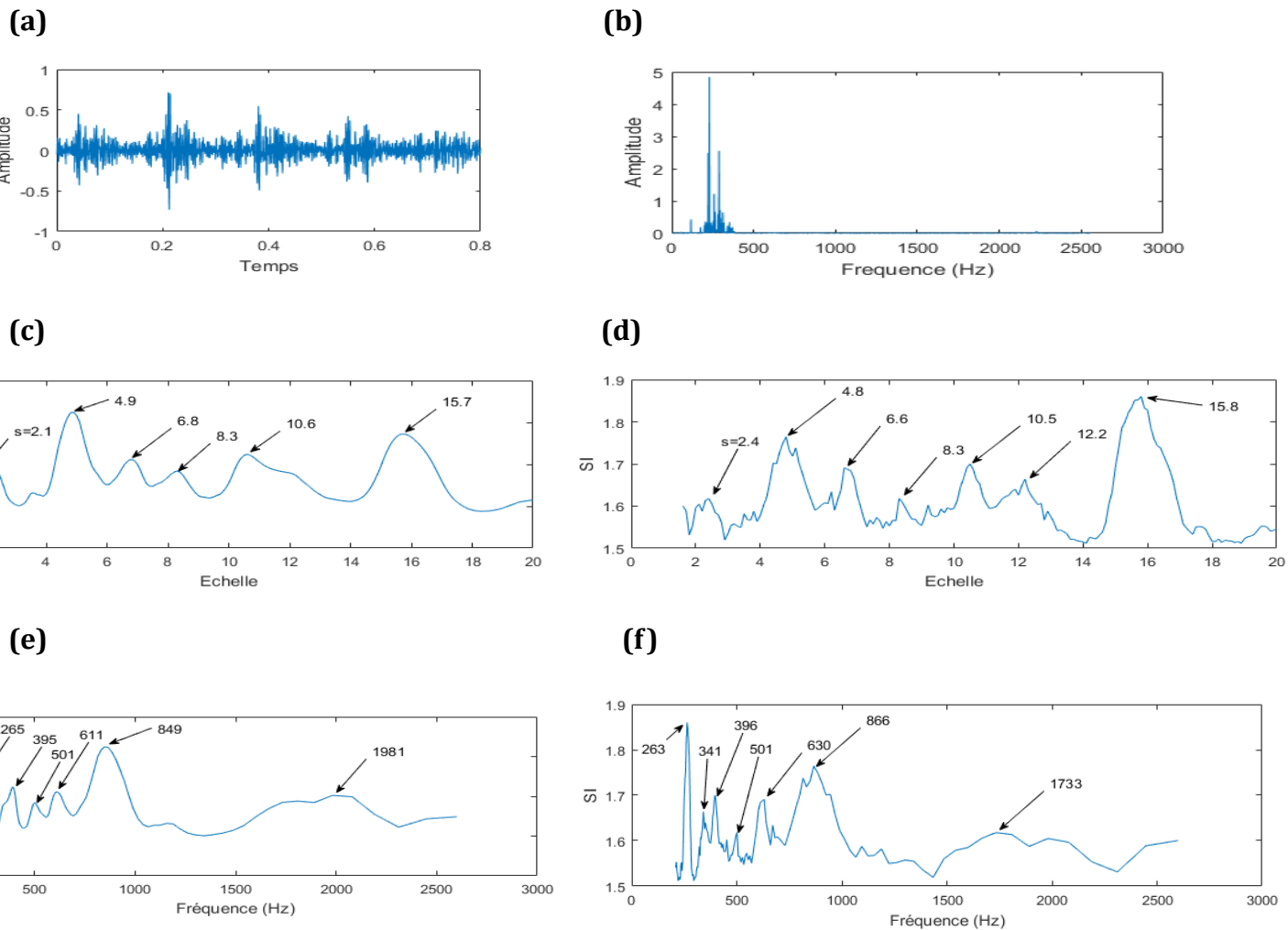
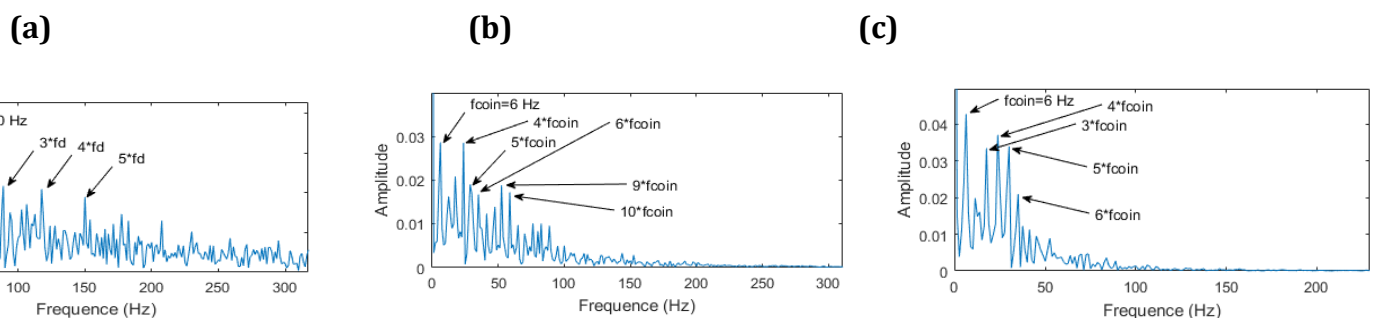


Figure 48 - Analyse du signal avec deux dent cassée en fonction des indicateurs SM et SI :
(a) signal temporel à 1800 tr/min, **(b)** spectre correspondant,
(c) indicateur SM en fonction de l'échelle, **(d)** indicateur SI en fonction de l'échelle,

IV.2.4.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :



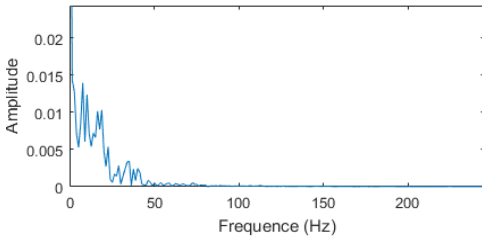
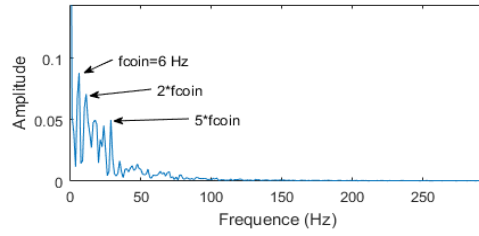
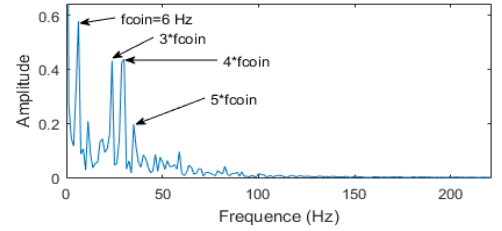
(d)**(e)****(f)**

Figure 51: Résultats en fonction de l'indicateur SM

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s= 2.1$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f= 1026$ Hz, **(b)** $s= 4.9$ avec $\Delta f= 330$ Hz, **(c)** $s= 6.8$ avec $\Delta f=210$ Hz, **(d)** $s= 8.3$ avec $\Delta f=78$ Hz, **(e)** $s= 10.6$ avec $\Delta f=150$ Hz, **(f)** $s= 15.7$ avec $\Delta f= 138$ Hz.

L'analyse de la première résonance 1981 Hz donne l'image vibratoire du défaut de pignon 30 Hz. La composante fondamentale et ses harmoniques sont bien distinguées sur la Figure 51 (a), la largeur de bande optimale est de 1026 Hz.

Le spectre d'enveloppe des résonances aux échelles 4.9 , 6.8, 10.6 et 15.7 (849 Hz, 611 Hz, 392 Hz et 265 Hz) montre les fondamentales et les harmoniques de la fréquence coïncidence (6 Hz). Les largeurs de bande optimales de ces résonances sont respectivement de 330 Hz, 210 Hz, 150 Hz et 138 Hz Figures 51 ((b), (c), (e) et (f)).

La résonance 501 Hz (échelle 8.3) ne donne aucune information concernant les défauts. Figure 51(d) .

IV.2.4.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:

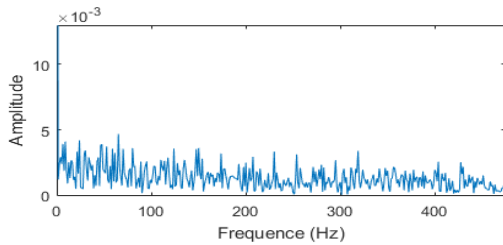
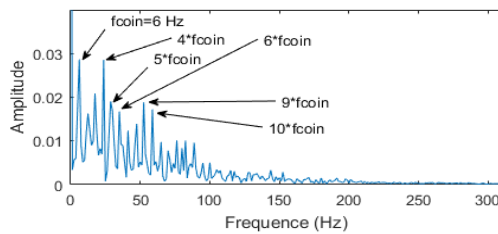
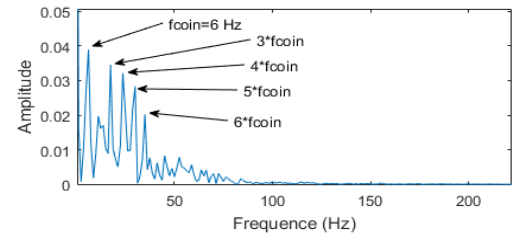
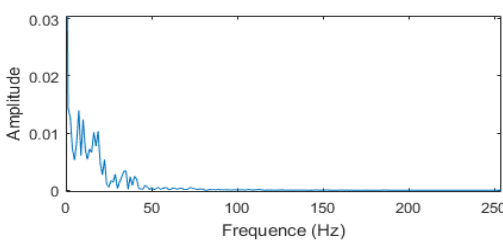
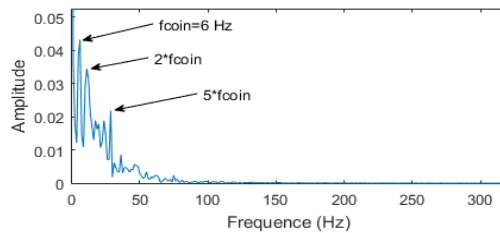
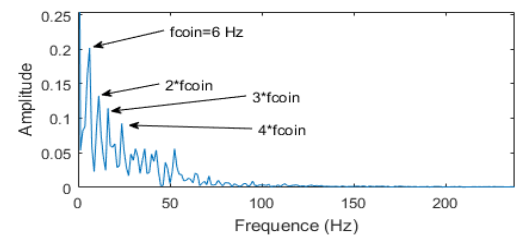
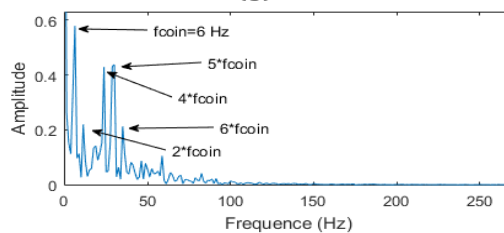
(a)**(b)****(c)****(d)****(e)****(f)****(g)**

Figure 52: Résultats en fonction de l'indicateur SI

(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2.4$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=1560$ Hz, (b) $s=4.8$ avec $\Delta f=440$ Hz, (c) $s=6.6$ avec $\Delta f=200$ Hz, (d) $s=8.3$ avec $\Delta f=78$ Hz, (e) $s=10.5$ avec $\Delta f=102$ Hz, (f) $s=12.2$ avec $\Delta f=126$ Hz, (g) $s=15.8$ avec $\Delta f=138$ Hz.

Le spectre d'enveloppe des résonances aux échelles 4.8, 6.6, 10.5, 12.2 et 15.8 (866 Hz, 630 Hz, 390 Hz, 341 Hz et 263 Hz) montre les fondamentales et les harmoniques de la fréquence coïncidence (6 Hz). Les largeurs de bande optimales de ces résonances sont respectivement de 440 Hz, 200 Hz, 102 Hz, 126 Hz et 139 Hz Figures 52 (b), (c), (e), (f) et (g).

Les résonance 1722 Hz et 501 Hz aux échelle 2.4 et 8.3 respectivement, ne donnent aucune information concernant les défauts. Figures 52(a) et (d)).

IV.3 Défauts de roulements:

IV.3.1 Cas 1 : Défaut sur la bague externe :

Sur le banc d'essai N° 2, un roulement avec un défaut sur la bague externe est placé du côté droit (poulie) avec un couple de 0.11 N.m. Un accéléromètre de type piézoélectrique est placé au niveau du palier le plus proche. La fréquence de rotation est fixée à 30 Hz, le signal temporel est acquis avec un temps d'observation de 1.25 s et une fréquence d'échantillonnage de 6400 Hz.

La Figure 53 (a) montrent le banc d'essais N° 2, les Figures 53 ((b) et (c)) donnent respectivement le signal temporel ainsi que son spectre.

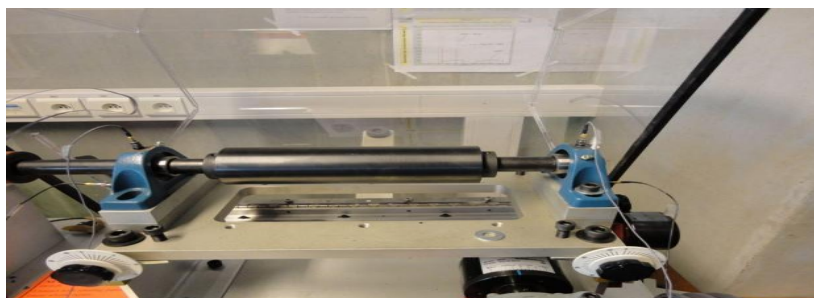
La fréquence du défaut sur la bague externe peut être obtenue par la formule $3,052fr$ donnée par le constructeur, donc l'image vibratoire du défaut sera composée d'un peigne de raies espacées de 91 Hz.

le diagnostic des défauts de roulements en se basant le principe d'analyser plusieurs résonances fait face à une limitation au niveau des largeurs des bandes de démodulation.

Les fréquences des défauts de roulement sont nettement plus grandes par rapport à celles des engrenages, par conséquent, il est impossible de rechercher la bande optimale des résonances qui se trouvent aux basses ou au moyennes fréquences avec la méthode proposée dans notre travail.

La mesure d'éparité SM et l'indice de lissage SI des coefficients d'ondelettes en fonction d'échelle de ce signal sont données dans les Figure 53 (d et e). Nous constatons la présence de dix pics de redondance avec le SM et treize avec le SI.

(a)



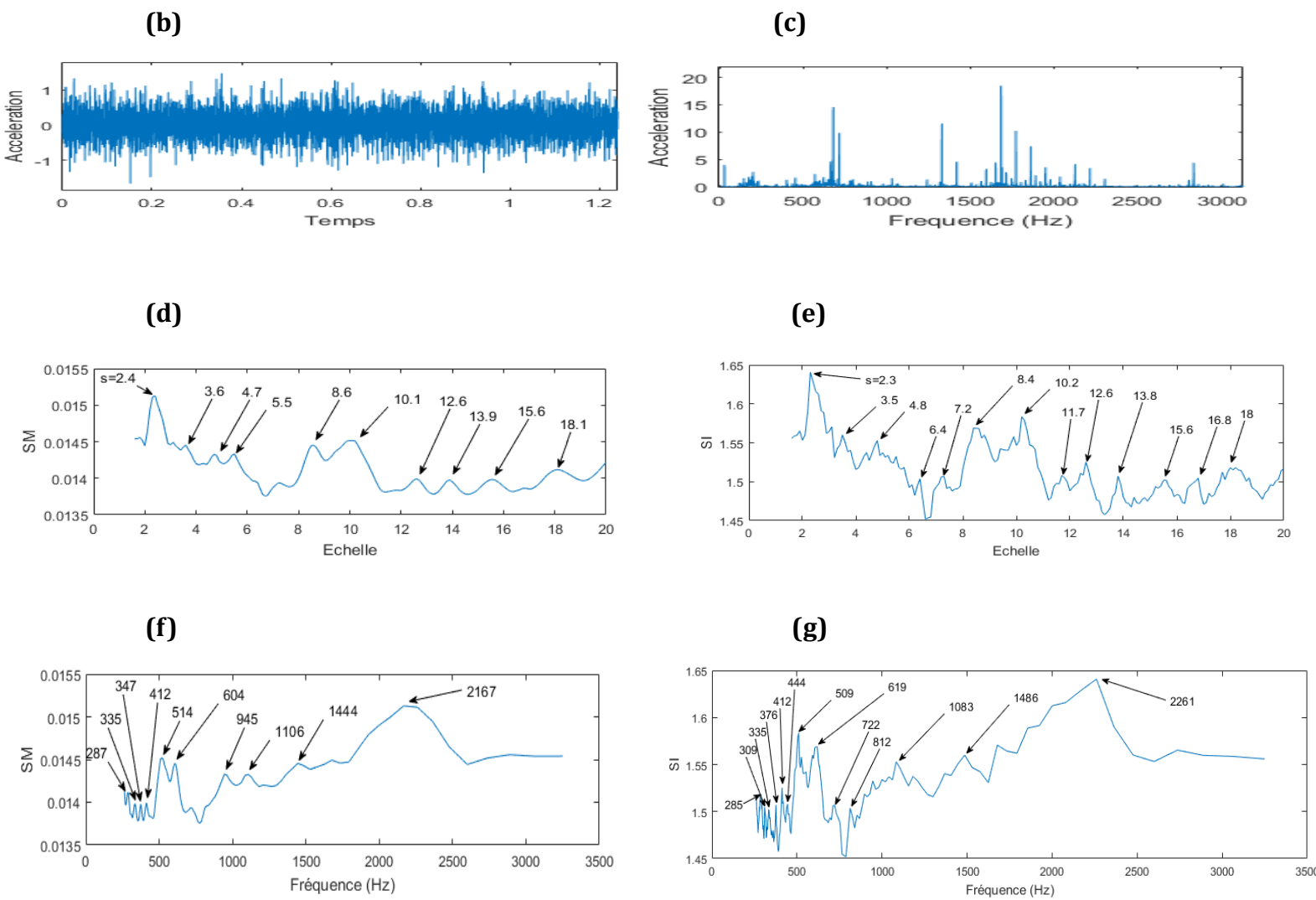


Figure 53: Analyse du signal avec un défaut sur la bague externe fonction des indicateurs SM et SI.

- (a) banc d'essai,
- (b) signal temporel à 1800 tr/min, (c) spectre correspondant,
- (d) indicateur SM en fonction de l'échelle, (e) indicateur SI en fonction de l'échelle,
- (f) indicateur SM en fonction de la fréquence, (g) indicateur SI en fonction de la fréquence,

IV.3.1.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :

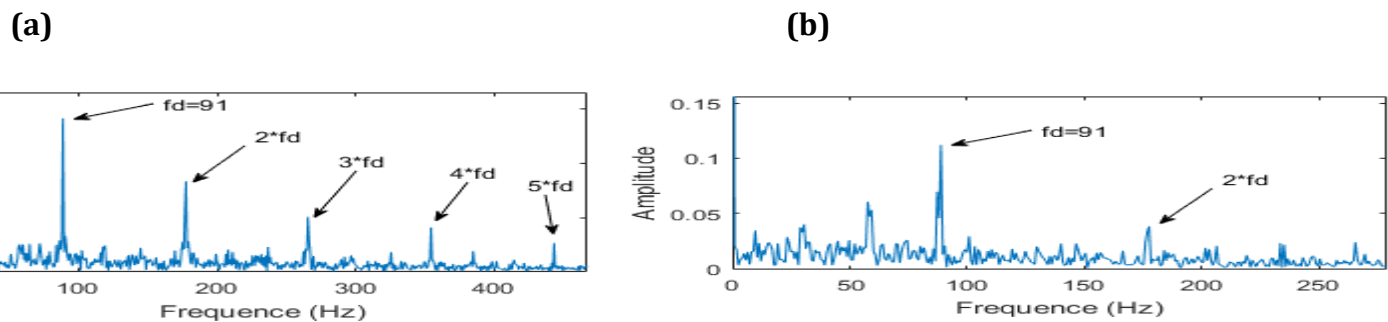


Figure 54: Résultats en fonction de l'indicateur SM
 (a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2.4$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=1365$ Hz, (b) $s=3.6$ avec $\Delta f=637$ Hz.

Les spectres d'enveloppe des résonances 2167 Hz et 1444 Hz sont donnés respectivement aux

Figures 54 ((a) et (b)) , présentent la base de la fréquence de défauts 91 Hz mais la résonance 2167 Hz avec une largeur de bande optimale de 1365 Hz présente plusieurs harmoniques qui se distinguent très bien contrairement à la résonance 1444 Hz qui ne présente qu'un seul harmonique.

On a présenté uniquement les résultats de l'analyse des résonances aux échelles 2.4 et 3.6 car toutes les autres résonances ne donnent aucune information sur le défaut simulé.

IV.3.1.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:

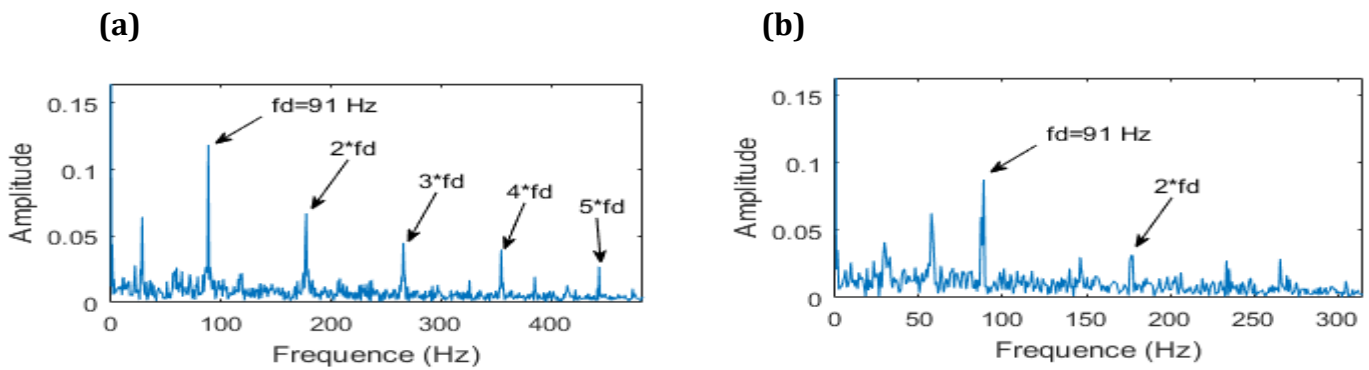


Figure 55: Résultats en fonction de l'indicateur SI
(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=2.3$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=1547$ Hz, **(b)** $s=3.5$ avec $\Delta f=637$ Hz.

Les spectres d'enveloppe des résonances 2261 Hz et 1486 Hz sont donnés respectivement aux Figures 55 ((a) et (b)) , présentent la base de la fréquence de défauts 91 Hz, mais la résonance 2261 Hz avec une largeur de bande optimale de 1547 Hz présente plusieurs harmoniques qui se distinguent très bien contrairement à la résonance 1486 Hz qui ne présente qu'un seul harmonique.

On a présenté uniquement les résultats de l'analyse des résonances aux échelles 2.3 et 3.5 car toutes les autres résonances ne donnent aucune information sur le défaut simulé.

IV.3.2 Cas 2 : Défaut sur la bague interne :

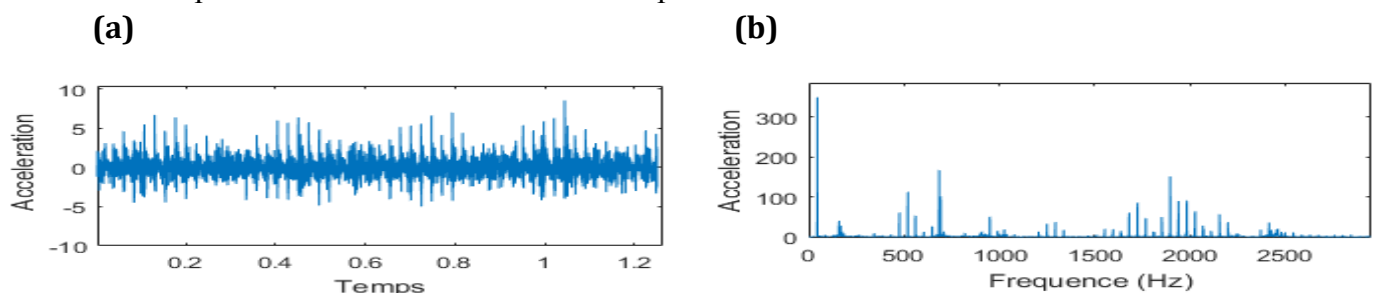
On simule un roulement avec un défaut sur la bague interne dans les mêmes conditions que le cas du roulement avec défaut sur la bague externe.

La fréquence de rotation est fixée à 45 Hz, le signal temporel est acquis avec un temps d'observation de 1.25 s et une fréquence d'échantillonnage de 6400 Hz.

Les Figures 56 ((a) et (b)) donnent respectivement le signal temporel ainsi que son spectre.

La fréquence du défaut sur la bague interne est obtenue avec la même formule que celle de la bague externe, dans notre cas elle est égale 137 Hz.

La mesure d'éparité SM et l'indice de lissage SI des coefficients d'ondelettes en fonction d'échelle de ce signal sont données dans les Figure 56 (c et d). Nous constatons la présence de neuf pics de redondance avec le SM et sept avec le SI.



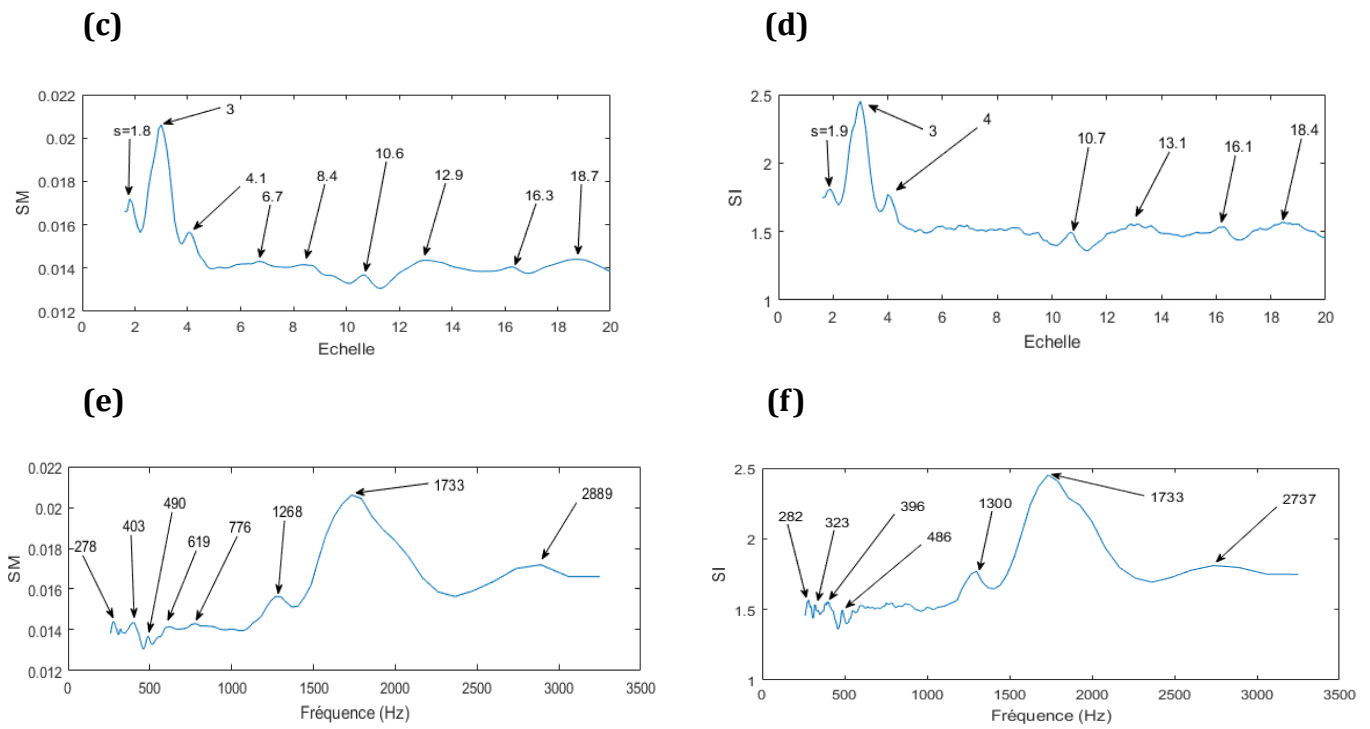


Figure 56 : Analyse du signal avec un défaut sur la bague interne fonction des indicateurs SM et SI.

(a) signal temporel à 2700 tr/min, (b) spectre correspondant,
 (c) indicateur SM en fonction de l'échelle, (d) indicateur SI en fonction de l'échelle,
 (e) indicateur SM en fonction de la fréquence, (f) indicateur SI en fonction de la fréquence,

IV.3.2.1 Résultats en fonction de l'indicateur SM :

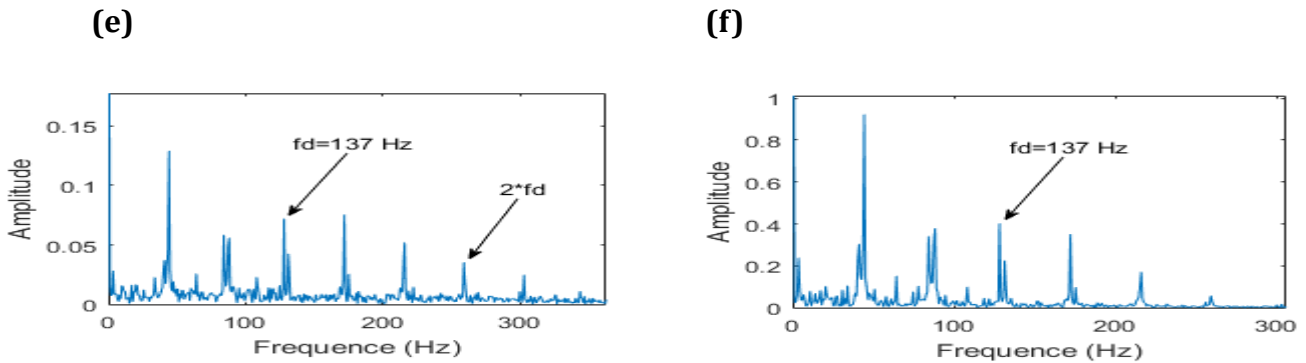


Figure 57: Résultats en fonction de l'indicateur SM
 (a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=1.8$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=959$ Hz, (b) $s=3$ avec $\Delta f=685$ Hz.

Le spectre d'enveloppe de la résonance 2889 Hz avec une largeur de bande optimale de 959 Hz Figure 57 (a), présente la base de la fréquence de défauts 137 Hz et une harmonique qui se distingue. La résonance 1733 Hz ne présente que la base de la fréquence de défaut. Les autres résonances ne donnent aucune information sur le défaut simulé.

IV.3.2.2 Résultats en fonction de l'indicateur SI:

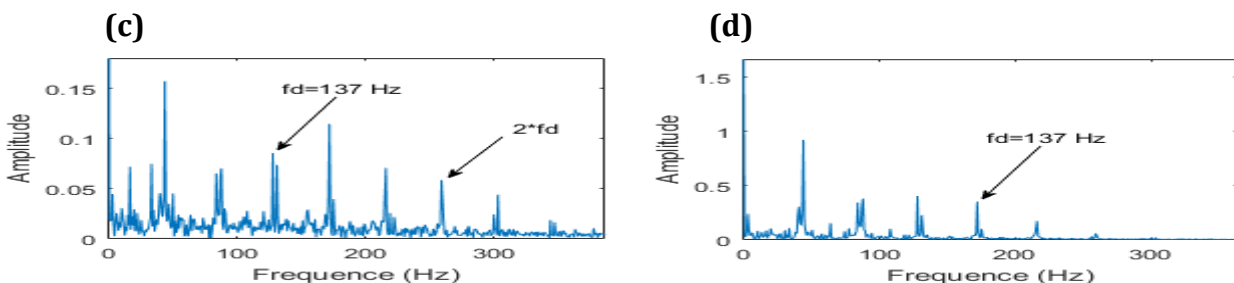


Figure 58: Résultats en fonction de l'indicateur SI
(a) enveloppe des coefficients d'ondelettes à l'échelle $s=1.9$ avec une largeur de bande optimale de $\Delta f=959$ Hz, (b) $s=3$ avec $\Delta f=685$ Hz.

Le spectre d'enveloppe de la résonance 2737 Hz avec une largeur de bande optimale de 959 Hz Figure 58 (a), présente la base de la fréquence de défauts 137 Hz et une harmonique qui se distingue. La résonance 1733 Hz ne présente que la base de la fréquence de défaut. Les autres résonances ne donnent aucune information sur le défaut simulé.

IV.4 Conclusion:

Les résultats des cas pratiques qu'on vient de mener, démontrent qu'il est impératif de détecter et analyser plusieurs résonances pour réaliser un bon et fiable diagnostic sur les défauts impulsionnels. Cette méthode est très efficace et montre de bons résultats quand il s'agit d'un défaut d'engrenage, mais pour les défauts de roulement, à une difficulté majeure liée aux largeurs de bandes de filtrage concernant les résonances qui se trouvent aux basses et aux moyennes fréquences.

Les résultats obtenus en utilisant chacun des deux indicateurs scalaires SI et SM sont dans la plupart des cas similaires mais il y a des cas où on a obtenu de meilleurs résultats avec l'indicateur SM qu'avec le SI mais dans aucun des cas on a constaté l'inverse. De là on a pu déduire que l'indicateur mesure d'éparpiment SM est plus précis et plus fiable que l'indicateur indice de lissage SI.

V. Conclusion générale :

Le coût de la maintenance représente de 15 à 40 % du coût total de la production, et pour réduire ce pourcentage, la maintenance doit occuper une place plus importante au niveau des entreprises et participer à la réalisation de ses objectifs. Les roulements et les engrenages sont des organes de transmission de puissance et de couple, pour cette raison, ils sont le sujet de plusieurs défauts d'où la nécessité de les surveiller plus par rapport aux autres organes mécaniques. La majorité des défauts affectant ces organes induisent des forces d'excitations impulsionnelles, périodiques, appelés chocs. Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à proposer une démarche pour le diagnostic de ces défauts. Le diagnostic des défauts de type choc par l'analyse vibratoire est une tâche difficile, il nécessite des outils très précis et avancés en matière de traitement de signal. Ces résonances se trouvent en général aux hautes fréquences, mais comme on l'a constaté elles peuvent se situer au niveau des moyennes fréquences et contenir des informations importantes.

Dans un premier temps, pour augmenter nos chances de détecter les défauts excitateurs, nous avons recherché le maximum de résonances excitées, cette méthode est très efficace dans le cas de présence de plusieurs défauts. Pour améliorer nos résultats, nous avons implémenté une méthode qui permet de déterminer la bande optimale de démodulation de chaque résonance pour obtenir un signal avec un SNR aussi faible que possible, cela permet d'avoir un spectre d'enveloppe riche en harmonique de la fréquence de défaut. La méthode que nous avons utilisée exploite la redondance de la transformée continue en ondelette implémentée avec l'ondelette de Morlet complexe avec la possibilité d'adaptation de sa résolution en fréquence en ajustant la valeur du facteur de forme fb pour concevoir une banque de filtres en cascade. Cette technique permet un filtrage puissant du signal avec des bandes passantes optimales dont les fréquences correspondent exactement aux résonances. Le kurtosis est l'indicateur scalaire le plus connu est le plus utilisé pour la recherche du caractère impulsionnel, mais ce dernier a des limites qui ont été démontrés par l'étude comparative menée dans notre travail de trois indicateurs scalaires. Les résultats obtenus nous ont obligés à recourir à d'autres indicateurs pour surmonter les limites du Kurtosis. Nous avons donc recouru à deux autres indicateurs, en l'occurrence, le Sparsity measurement (SI) et le Smoothness index (SM). Ces derniers sont utilisés en télécommunication et le traitement de parole et sont nouvellement utilisés en diagnostic vibratoire. Ils ont donné des résultats plus intéressants que le Kurtosis, mais puisqu'il faut juste utiliser un seul indicateur, nous pensons que le SM est plus indiqué pour vu les résultats obtenus dans la partie expérimentale.

À partir des résultats obtenus de l'analyse expérimentale effectuée sur des bancs d'essai avec des défauts réels, on peut conclure que la méthode proposée est efficace pour l'identification de défauts isolés ou même combinés et permet aussi d'extraire l'information relative aux défauts à un stade précoce.

VI. Références bibliographiques:

1. ABBAS Faouzi,HARRAT Karim, mémoire de fin d'étude : Diagnostic vibratoire des défauts de types chocs par les méthodes temps –échelle ;2019/2020,UMMTO.
2. ALICHE Souhil , MESSAOUDI Lyes, mémoire de fin d'étude : Etude de la fiabilité et maintenance des systèmes mécanique d'un appareil de forage. Cas : Treuil de forage et une pompe à boue au niveau de la station ENTP-TP127,2017/2018 ,UMMTO .
3. Jean-pierre vernier, livre: 1000 Question/reponses pour la maintenance.
4. HAMOUDI Khalef ,mémoire fin d'étude : Etude Numérique et Expérimentale des Défautsd'Engrenage dans le Domaine Temps-Fréquence ,2012/2013 ;UMMTO.
5. KamelBelaida, Abdelhamid Miloudib, NacerHamzaoui, article : Resonances processing excited by gearbox impulses faults by continuous wavelet transform with adapted complex Morlet wavelet and sparsity measurement.
6. LARABI Hamimi , AHCENE Sidali, mémoire de fin d'étude : Application de la méthode SVM à la détection et la classification des défauts dans les machines tournantes, février 2022.
7. TABTI Azzedine ,mémoire fin d'étude :dépistage et diagnostic des défauts des installations mécanique par signature vibratoire,12 février 2015 ;UMMTO.
8. LA TRANSFORMATION EN ONDELETTES
9. De la transformée de Fourier à l'analyse temps-fréquence bivariée
10. Transformée en ondelettes discrète
11. Ondelette — Wikipédia
12. les techniques de surveillances
13. surveillances des machines tournantes par analyse vibratoire