

CFA/VISHNO 2016

Etude de la décomposition en mode empirique combinée dans le cas des signaux de vibrations de roulements et d'engrenages dans diverses conditions

A. Raad^a, S. Kass^a et J. Antoni^b

^auniversité Libanaise, faculté de Génie rue alarz, 0000 Tripoli, Liban

^bLVA, 25 bis av. Jean Capelle, 69621 Villeurbanne, France
amaniraad@hotmail.com



LE MANS

Les défauts d'engrenage et de roulement sont très utilisés en contexte industriel. Récemment, les techniques non stationnaires sont très répandues surtout en mode de variation de vitesse. Pour cela, une nouvelle méthodologie basée sur la décomposition en mode empirique (DME) où le signal peut être décomposé en un certain nombre des fonctions de mode intrinsèques (FMI) et le spectre d'enveloppe de ces fonctions. L'application de celle-ci en vue de faire un diagnostic et une classification des défauts mécaniques aura lieu sur des bases de données simulées et réelles fonctionnant en différents régimes.

1 Introduction

Parmi les outils du diagnostic, l'analyse des vibrations est celle qui connaît aujourd'hui un des développements les plus importants, quand des défauts ponctuels surviennent, des chocs sont générés et créent des vibrations. De nombreux types d'analyse et de traitement sont appliqués, parmi lesquels, se trouve l'analyse non stationnaire, en particulier la transformée de Fourier court terme (TFCT), la distribution de Wigner-Ville (DWV) et la transformée en ondelette discret (TOD) puis sont employés couramment dans le diagnostic. Toutefois, ces techniques présentent certaines limites, le TFCT convient d'analyser les signaux qui varient lentement, tandis que la DWV possède des termes croisés et des problèmes de repliement. L'utilisation de la version modifiée de la WVD dite pseudo WV élimine la puissance négative et le problème de repliement, mais les résultats obtenus ont une difficulté à être interprétés. Les limitations des TFCT et PDWV peuvent être surmontées en utilisant la TOD. Cependant, l'inconvénient principal de celle-ci est la difficulté de choisir la fonction de base et le nombre de niveaux de décomposition. Pour remédier à ce problème la décomposition en mode empirique (DME) a été utilisée [1].

Cet article est organisé comme suit : dans la section 2 la méthode de la DME est introduite, dans la section 3 la méthodologie proposée est détaillée, dans les sections 4 et 5, l'application de cette méthode sur des signaux simulés et réels puis des conclusions sont tirées dans la section 6.

2 La décomposition en modes empiriques (DME)

La technique est introduite par Norden Huang, appliquée au départ en 1998, pour décomposer tout signal en une série de composants oscillantes –appelés fonctions de mode intrinsèque (FMI).

Idéalement, ces FMIs sont des fonctions oscillantes, de moyenne nulle, et de plus, celles-ci reflètent les fréquences présentes localement dans le signal, depuis les plus hautes fréquences vers les plus basses. Le résidu est un terme de basse fréquence qui donne la tendance globale du signal.

La DME seule n'est pas une analyse temps-fréquence, mais sa combinaison avec la transformée d'Hilbert (TH) ou une autre méthode d'estimation de la fréquence instantanée (FI) permet d'obtenir une représentation temps fréquence [2,3].

Il est possible de retrouver l'amplitude, et donc la phase, d'un signal sinusoïdal par la transformé de Hilbert [4].

3 Méthodologie proposée

Dans cette étude, nous proposons d'utiliser d'abord la DME comme prétraitement, où le signal peut être

décomposé en un certain nombre des FMI qui sont mono-composants, on applique la TH qui a été largement utilisée en démodulation. Celle-ci permet l'extraction de composants porteurs d'information de défauts sur les machines tournantes si leurs vitesses sont constantes. Par contre en présence de hauts bruits, l'enveloppe ne peut pas détecter efficacement les résonances et il se présente quelques instabilités.

Sous une vitesse de rotation variable, la fréquence caractéristique et ses harmoniques ainsi que ces bandes latérales varient avec le temps, l'utilisation directe de la transformée de Hilbert sur les FMIs ne permet pas de détecter les défauts éventuels de la machine tournante.

Pour identifier ces défauts, une méthodologie repose sur une seconde application de la DME pour obtenir des composants mono-fréquences, une seconde alternative est d'appliquer la TOD suite à la DME, comme la TOD joue le rôle d'un filtrage passe-bande autour de la fréquence de résonance excitée (utilisée pour générer une banque de filtre qui dépend de la teneur des fréquences composantes du signal). Par conséquent dans les deux possibles méthodologies pour isoler la haute fréquence contenant le défaut, le calcul du spectre d'enveloppe du détail de haute fréquence Permet de détecter et de classer les défauts possibles. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure 1.

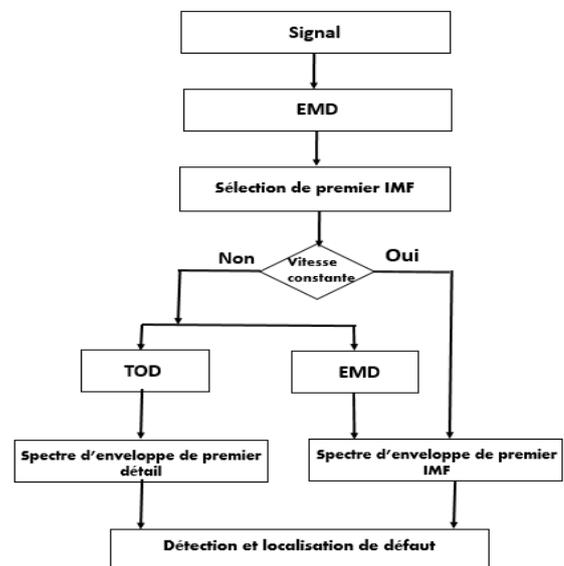


Figure 1- Organigramme de notre méthodologie

4 Application sur des signaux simulés

4.1 Engrenage à vitesse constante

Si l'on considère un engrenage sain ayant une roue de Z dents, dont le signal vibratoire $x_{nc}(t)$ est moyenné de

manière synchrone par rapport à la fréquence de rotation de l'arbre f_r , on a [5] :

$$x_{nc}(t) = \sum_{m=0}^M X_m \cos(2 \pi m Z f_r t + \varphi_m) \tag{1}$$

Où M est l'ordre d'analyse du signal d'engrènement, X_m est l'amplitude de l'harmonique m, φ_m Phase et x_{nc} est le signal considéré.

Certains défauts d'engrenage manifestent leurs présences par une modulation d'amplitude et de fréquence du signal d'engrènement.

Soit le modèle d'engrenage normal avec 20 dents et une fréquence de rotation de $f_r=20$ Hz, et fréquence d'engrènement de 400 Hz ($f_m=Z*f_r$) et fréquence d'échantillonnage de $f_e=20000$ Hz.

Soit le signal d'engrenage $x_c(t)$ défectueux [5] :

$$x_c(t) = \sum_{m=0}^M X_m (1 + a_m(t)) \cos(2 \pi m f_r t + \varphi_m + b_m(t)) \tag{2}$$

Où :

$$a_m(t) = \sum_{m=0}^M A_{mn} \cos(2 \pi n f_r t + \alpha_{mn}).$$

$$b_m(t) = \sum_{n=0}^N B_{mn} \cos(2 \pi n f_r t + \beta_{mn})$$

$a_m(t)$ et $b_m(t)$ représentent respectivement les modulations d'amplitude et de fréquence (figure 2.a)

Dans le spectre, la modulation d'amplitude créera des raies latérales autour des pics d'engrènement L'espacement des raies est égal à la fréquence de rotation de la roue portant le défaut (figure 2.b).

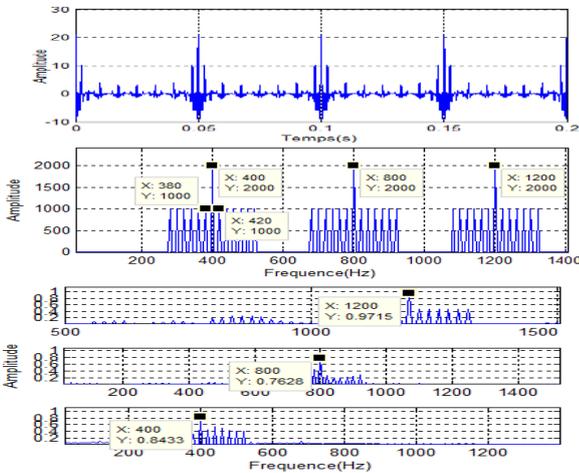


Figure 2- (a) Signal d'engrenage dans le domaine temporel (b) son spectre et (c) spectres de ces trois FMIs.

Le spectre des trois FMIs (Figure 2.c) montre que la fréquence d'engrènement et de ses harmoniques n'est pas un composant mono vu qu'ils sont constitués par plusieurs fréquences. Ils sont modulés par la fréquence de rotation et de ses harmoniques.

Si on calcule le spectre d'enveloppe de ces FMIs, une démodulation est faite et la fréquence de rotation $f_r=20$ Hz apparait ainsi que ses harmoniques (40Hz, 60Hz, 80Hz ...) et sont nettement visibles dans le graphe ci-dessous (voir figure 3).

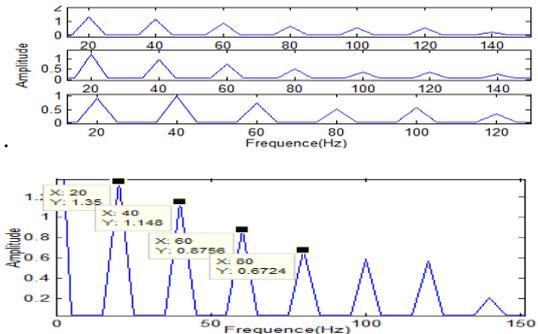


Figure 3- a) Spectre d'enveloppe des FMI, b) un zoom est fait.

4.2 Engrenage à vitesse variable

Le signal de vibration généré sain $x_{nv}(t)$, peut être représenté comme suit :

$$x_{nv}(t) = \sum_{m=0}^M X_m \cos(2 \pi m Z f_s t + \varphi_m) \tag{3}$$

Où f_s vitesse de rotation variable de l'arbre. La vitesse de rotation variable peut se manifester par une relation linéaire en fonction de temps :

$$f_s = f_r \cdot t$$

Par DME quelques FMIs apparaissent dont les trois premières sont les plus significatifs. Les spectres de ces FMI (figure 4) montrent qu'elles sont constituées des bandes fréquentielle. Pour les rendre mono-composants afin de détecter clairement le défaut, une deuxième DME ou en ondelette est nécessaire.

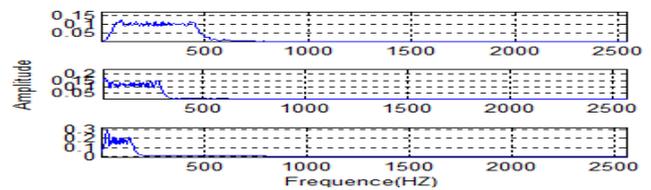


Figure 4- Spectres des FMIs obtenues par DME du signal

Tandis que Le signal de vibration $x_{fv}(t)$ défectueux et à vitesse variable peut être représenté par l'équation suivante [5] :

$$x_{fv}(t) = \sum_{m=0}^M X_m (1 + a_{mv}(t)) \cos(2 \pi m Z f_s t + b_{mv}(t)) \tag{4}$$

Où $a_{mv}(t)$ et $b_{mv}(t)$ sont respectivement les fonctions de modulation d'amplitude et de phase.

$$a_{mv}(t) = \sum_{m=0}^M A_{ml} \cos(2 \pi n f_s t + \alpha_{mn}).$$

$$b_{mv}(t) = \sum_{n=0}^N B_{ml} \cos(2 \pi n f_s t + \beta_{mn}).$$

Une première DME ne suffit pas pour la détection de défaut, la deuxième est nécessaire, On remarque qu'on obtient la fréquence du défaut qui est de 120 Hz sans ses harmoniques (figure 5.a). Tandis que si on applique le TOD du premières FMI issue de la DME des meilleurs résultats peuvent être obtenus et les harmoniques de la fréquence de

défaut sont présentée (voir figure 5.b), il suffit de choisir seulement le premier détail qui contient les fréquences où le défaut se manifeste puis en calculer à la suite son spectre d'enveloppe.

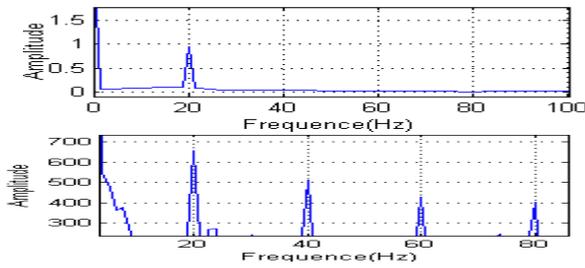


Figure 5- Spectre d'enveloppe de a) Première FMI issue de la second application de la DME, b) Premier détail issu de TOD après DME.

4.3 Roulement à vitesse constante :

Pour générer un signal temporel défectueux, il faut réaliser en théorie un produit de convolution entre un signal d'une force excitatrice et la réponse impulsionnelle de la structure, en appliquant le modèle de [6]. Ce modèle est donné par la formule suivante :

$$x(t) = (e^{-\alpha k t'} \sin(2\pi f_1 k t) + \sin(2\pi f_2 k t)) \quad (5)$$

$$t' = \text{mod}(k t, \frac{1}{f_0})$$

Dans la suite les valeurs initiales suivantes sont prises en compte $\alpha=80$, $f_1=3000$ Hz, $f_2=8000$ Hz, et $f_0=120$ Hz.

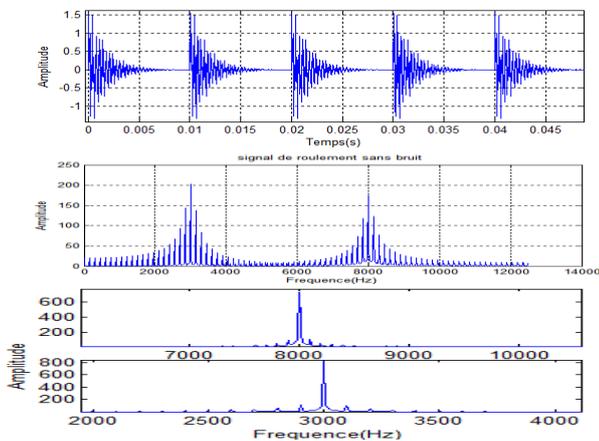


Figure 6 - (a)Signal de roulement dans le domaine temporel (b) son spectre et (c) spectres de leur deux FMIs.

La figure 6.c montre le spectre de 2 FMIs du signal décomposé par la DME pour un défaut sur un roulement. A partir du spectre (figure 6.b), les fréquences de résonance et d'engrènement sont apparues, et autour d'elles, les raies latérales espacées d'une valeur qui représentent la fréquence caractéristique du défaut $f_0=120$ Hz. Une isolation de composante fréquentielle ($f_1=3000$ Hz, $f_2=8000$ Hz) était faite (figure 6.c). Cependant, il y a besoin de faire une démodulation des résultats afin de détecter la fréquence de défaut directement sans les fréquences d'engrènement.

La figure 7 représente le spectre d'enveloppe des FMIs, montre la fréquence défaut $f_0=120$ Hz ainsi que ses harmoniques 240 Hz, 360Hz Les mêmes résultats sont obtenus après l'application de TOD après la DME.

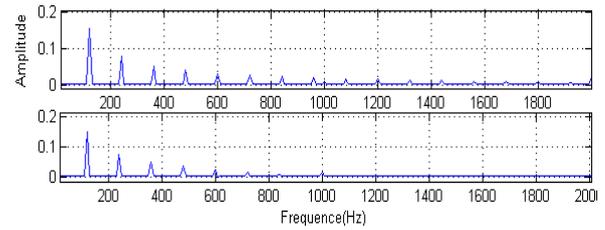


Figure 7 - Spectre d'enveloppe des deux FMIs

4.4. Roulement à vitesse variable

Supposons qu'un défaut attaque le roulement, sous une vitesse variable :

$$X(t) = e^{-\alpha k t} (\sin(2\pi f_{r1} k t) + \sin(2\pi f_{r2} k t)) \quad (6)$$

$$f_{r1} = f_1 \cdot t$$

$$f_{r2} = f_2 \cdot t$$

Où f_1 et f_2 sont les fréquences de résonances.

Une première DME ne suffit pas pour la détection de défaut, le deuxième est nécessaire (voire cas précédent). On obtient les mêmes résultats que dans le cas d'engrènement à vitesse variable.

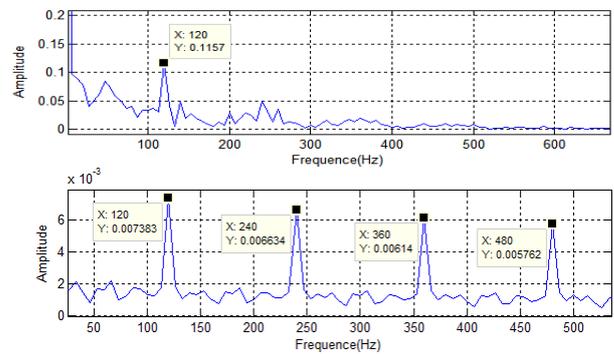


Figure 8 - Spectre d'enveloppe de a) Première FMI issu de la second application de la DME, b) Premier détail issu de TOD après DME.

4.5. Applications sur des modèles avec bruit

Maintenant le signal d'engrènement est bruité avec de différents taux de bruit, suivant le taux de bruits l'application de la DME sur ce signal donne un nombre variable des FMIs, les FMIs causées par le bruit sont celles à haute fréquences.

Les résultats apparaissent dans le spectre d'enveloppe de la ième FMI où i augmente avec l'augmentation de taux de bruit.

En effet, les résultats -la fréquence de rotation 20Hz avec ses harmoniques- apparaissent dans le spectre d'enveloppe de la première FMI dans le cas d'absence de bruit (voir figure 9.a), tandis qu'ils apparaissent dans le spectre d'enveloppe de la deuxième et de la troisième FMI,

Lorsqu'un taux de bruit est additionné à notre signal (voir figure 9.b), et la première FMI est celle de bruit et ne contient aucune information sur le défaut.

Lorsque le taux de bruit est augmenté (voir figure 9.c), alors la première et la deuxième FMI ne contiennent aucune information sur le défaut, la fréquence de rotation 20Hz avec ses harmoniques 40 Hz, 60 Hz, 80Hz... apparaît à partir de spectre d'enveloppe de la troisième FMI.

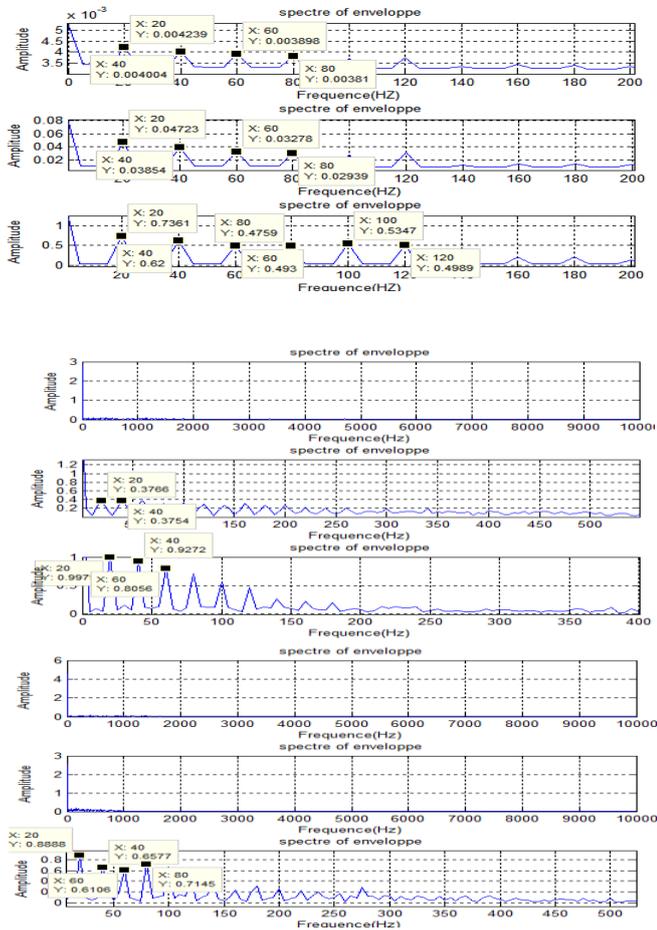


Figure 9 - Spectre d'enveloppe des signaux d'engrenage (a) sans bruit (b) avec un taux de bruit (c) avec un grand taux de bruit.

5. Application sur des signaux réels

La capacité de notre méthode à détecter la présence de défauts sur les roulements d'une façon précoce est montrée par l'application sur les signaux réels. Dont les signaux à vitesse constantes sont celles venant du Bearing Data Center, qui est une base de données des essais de roulements à billes normaux ou défectueux, recueillis sur un banc d'essai très simple, composé d'un moteur, d'un accouplement et d'une génératrice. Alors que le second type des signaux a été fourni par le CETIM (Centre technique des industries mécaniques). Les roulements passent de l'état normal à celui détérioré sous une vitesse variable au cours de cette campagne d'essais.

5.1 Signaux provenant du Bearing Data Center

La Figure 10 montre le spectre d'enveloppe de la première FMI d'un signal de roulement (a) sain (b) avec un défaut de bague intérieure (c) avec un défaut de bague extérieure et (d) avec défaut de bille. Les trois premières FMIs seront suffisantes, leurs spectres d'enveloppe donnent l'information nécessaire. Dans (a) seulement la fréquence de rotation de 29.91 Hz ainsi que ses harmoniques apparaissent, tandis que dans (10.b, 10.c, 10.d) La fréquence de rotation (29 Hz) et ses harmoniques, la fréquence de défaut (de bague interne 158 Hz, de bague extérieure 104.8 Hz, et de bille 138.3 Hz) et ses harmoniques ainsi que la fréquence de rotation modulée par celle de défaut apparaissent dans le spectre d'enveloppe de première FMIs.

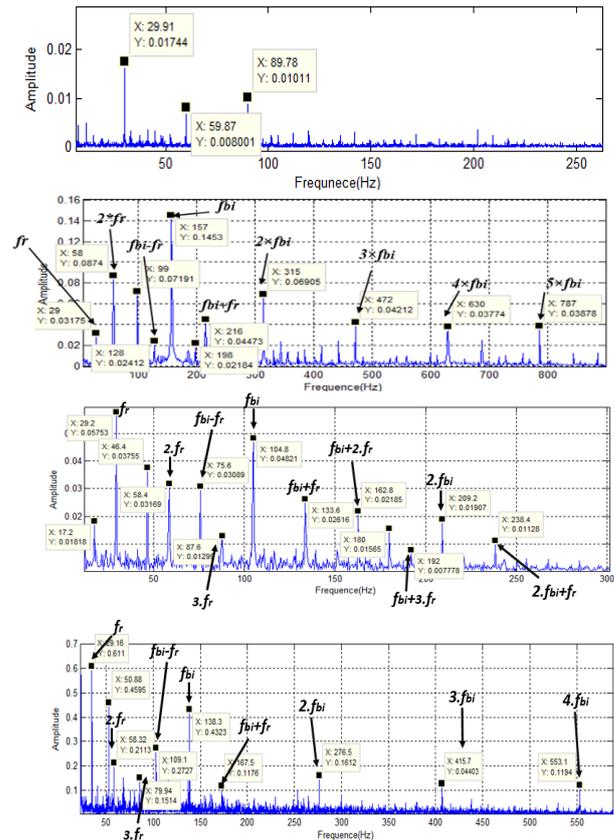
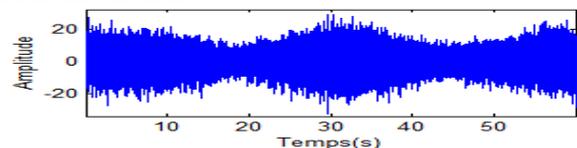


Figure 10 - le spectre d'enveloppe de la première FMI de roulement (a) sain (b) avec un défaut de bague intérieure (c) avec un défaut de bague extérieure et (d) avec défaut de bille.

5.2 Signaux provenant du Centre technique des industries mécaniques (CETIM)

La figure 11 montre un signal de roulement sans défaut sous une vitesse variable qui augmente et diminue dans une période approximée à 60 secondes dans le domaine temporel et son spectre. Le spectre d'enveloppe des FMI ne montre aucun pic anormal ce qui est en accord avec l'absence de défaut.



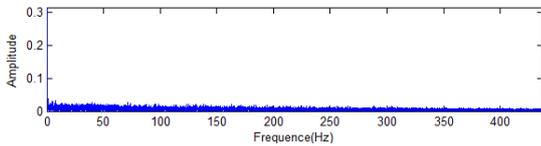


Figure 11- Signal dans le domaine temporel et le spectre d'enveloppe de la première FMI.

La (figure 12.a) montre un signal de roulement avec défaut sous une vitesse variable dans le domaine temporel et son spectre. Le spectre d'enveloppe des FMIs ne montre aucune variation anormale qui son celle du défaut (voir figure 12.b), tandis que l'application du spectre d'enveloppe suite à la second DME ou bien suite à la TOD après la DME permet de détecter des pics apparaissent à la fréquence 43 HZ - qui est celle de défaut- et ses harmoniques (voir figure 12.c).

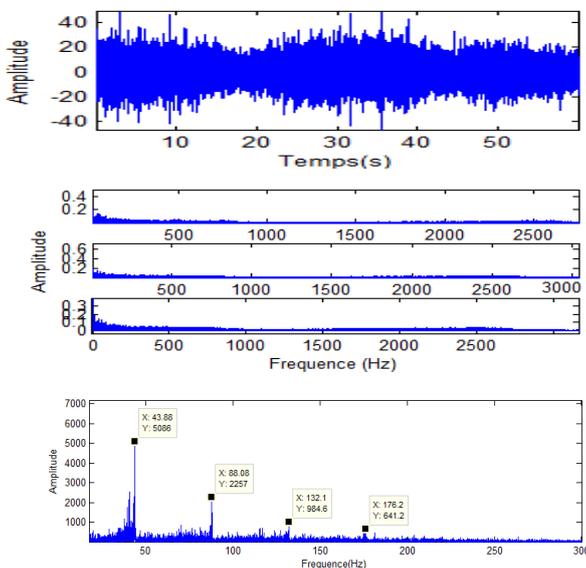


Figure 12- Signal dans (a) le domaine temporel (b) le spectre d'enveloppe de trois premières FMIs (c) le spectre d'enveloppe du premier détail.

6 Conclusion

Dans cet article la DME est utilisée comme outil de prétraitement qui est particulièrement adaptée pour traiter des signaux non stationnaires. Plusieurs FMIs sont obtenues dont on choisit les plus significatives pour extraire l'enveloppe qui contient l'information requise sur le défaut dans le cas de vitesse constante.

Mais sous une vitesse de rotation variable, la fréquence caractéristique et son harmonique ainsi que les bandes latérales varient avec le temps. L'utilisation directe de la transformée de Hilbert sur les FMIs issues de la DME ne permet pas de détecter les défauts possibles. L'idée originale est d'appliquer la DME une seconde fois pour obtenir des composants mono-fréquentiels ou bien la TOD. Cette dernière a donné de meilleurs résultats comme les harmoniques des fréquences de défaut apparaissent dans ce cas. Pour la première fois, l'application de cette technique est obtenue dans le cas des défauts mécaniques en mode de variation de vitesse.

Par conséquent, la méthode proposée est capable de détecter les fréquences significatives et l'occurrence de défaut d'engrenage et de roulement. Celle-ci permet non seulement de faire la détection de défauts mais aussi de les classifier. L'avantage de celle-ci est qu'elle ne requiert pas plusieurs paramètres à régler.

Références

- [1] H.MAHGOUN, R.E.BEKKA AND A. FELKAOUI, GEARBOX FAULT DETECTION USING A NEW DENOISING METHOD BASED ON ENSEMBLE EMPIRICAL MODE DECOMPOSITION AND FFT, *MECHANICAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING*, 331-350 (2011).
- [2] G.RILLING. DECOMPOSITIONS MODALES EMPIRIQUES, CONTRIBUTIONS LA THEORIE, L'ALGORITHME ET L'ANALYSE DE PERFORMANCES, *THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE DE LYON*, 125–129 (2007).
- [3] N. E. HUANG, INTRODUCTION TO THE HILBERT-HUANG TRANSFORM AND ITS RELATED MATHEMATICAL PROBLEMS. *HILBERT-HUANG TRANSFORM AND ITS APPLICATIONS, INTERDISCIPLINARY MATHEMATICAL SCIENCES* 5, 1-24 (2005).
- [4] Z.K.PENGA, W.PETER, F.TSEA, AN IMPROVED HILBERT-HUANG TRANSFORM AND ITS APPLICATION IN VIBRATION SIGNAL ANALYSIS, *JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION* 286, 187–205 (2005).
- [5] H.MAHGOUN, A.FELKAOUI, S.FEDALA, F.CHAARI, DETECTION OF GEAR FAULTS IN VARIABLE ROTATING SPEED USING EEMD DECOMPOSITION AND INSTANTANEOUS FREQUENCY, *IN ADVANCES IN CONDITION MONITORING OF MACHINERY IN NON-STATIONARY OPERATIONS, SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING*, 177-195 (2015).
- [6] P.D.MCFADDEN, DETECTING FATIGUE CRACKS IN GEARS BY AMPLITUDE AND PHASE DEMODULATION OF THE MESHING VIBRATION, *TRANSACTION OF THE ASME, JOURNAL OF VIBRATION, ACOUSTICS, STRESS AND RELIABILITY, IN DESIGN VOL.108*, 165-170 (1986).