

Comparaison de différentes méthodes de détection de défauts dans les roulements

Ing. X. MILISEN
Dr Ir V. LENAERTS
GRAMME – Liège

Le cadre économique actuel pousse à réaliser un maximum d'économies. Les méthodes de détection de défauts de roulement, basées sur l'analyse vibratoire, vont dans le sens de ces économies : elles permettent d'éviter des arrêts de production non programmés par une gestion en temps réel de l'état de la machine. Ainsi, différentes méthodes de détection (telles que la méthode de l'enveloppe ou la décomposition en valeurs singulières) permettent de prédire ces pannes. Cet article a pour objet de déterminer dans quelle mesure ces méthodes peuvent prévoir l'apparition du défaut précédant la panne ainsi que de comparer ces méthodes entre elles.

Mots-clés : analyse vibratoire, défaut, roulement, enveloppe, transformée en ondelettes, décomposition en valeurs singulières (SVD).

The current economic framework urges people to save up. The methods of detection of bearing defects, based on the vibratory analysis, go in this way: they avoid unprogrammed stops in the production by a management of the machine state in real time. Thus, different methods of detection (such as the method of the envelope or the singular values decomposition) allow forecasting these breakdowns. This work has the aim to determine how these methods can predict the manifestation of the defect preceding the breakdown and to compare these methods between themselves.

Keywords: vibratory analysis, defect, bearing, envelope, wavelet transform, singular values decomposition (SVD).

1. Introduction

A l'heure actuelle, de plus en plus d'industriels se tournent vers l'analyse vibratoire afin d'obtenir une disponibilité accrue de leurs machines : ils contrôlent l'état réel de leurs équipements (machines tournantes) afin d'éviter des arrêts non planifiés dus aux pannes.

L'analyse vibratoire est un outil puissant de détection de défauts des machines tournantes : elle permet notamment de détecter les défauts se manifestant dans les roulements.

Il peut s'agir d'un défaut de cage, de bille, de piste intérieure ou de piste extérieure. Ces différents défauts sont caractérisés par des fréquences de répétition fonction de paramètres connus (pour plus de renseignements, se référer entre autres à [1]). Dans le cadre de cet article, seule la fréquence du défaut de piste intérieure sera considérée ; elle se note BPFI.

Pour détecter ces défauts, plusieurs méthodes sont étudiées dans cet article : il s'agit de la méthode de l'enveloppe, de la transformée en ondelettes ainsi que de la décomposition en valeurs singulières. Le lecteur intéressé trouvera dans [8] une comparaison plus détaillée de ces méthodes.

L'étude se scinde en deux parties :

- l'une aborde ces différentes méthodes de détection d'un point de vue théorique,
- l'autre étudie l'application de ces méthodes sur des mesures réelles de vibrations prises sur un banc vibratoire.

2. Etude théorique des méthodes de détection de défauts dans les roulements

2.1 La méthode de l'enveloppe

La méthode de l'enveloppe est une technique utilisant la résonance haute fréquence du roulement (ou du capteur). Pour ce faire, elle utilise la

fréquence¹ de résonance du roulement pour extraire l'information nécessaire à la détermination de la présence du défaut et met en évidence cette information dans une plage fréquentielle normalement observée en analyse vibratoire (0 – 1500 Hz).

Plus précisément, la méthode de l'enveloppe utilise la modulation de l'amplitude de la fréquence de résonance du roulement, par la fréquence du défaut.

Qu'entend-t-on par « modulation d'amplitude » et d'où provient-elle ?

La modulation d'amplitude d'une fréquence est la variation périodique de l'amplitude du signal au cours du temps. Dans le cas présent, la fréquence de résonance est modulée par la fréquence du défaut de piste interne (BPFI) (seul ce défaut est considéré dans cet article).

L'impact généré par l'élément roulant sur le défaut de piste interne produit une vibration à la fréquence de résonance. A l'instant précis où l'impact se produit, l'amplitude de la vibration associée est maximale. Cette amplitude diminue ensuite au cours du temps, ce qui est dû à l'amortissement de la structure.

L'impact est un phénomène périodique, se produisant à une fréquence caractéristique du défaut. A chaque fois que ce phénomène se produit, il génère une vibration à la fréquence de résonance.

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

Grâce à la méthode de l'enveloppe, cette modulation d'amplitude peut être extraite du signal original. En effet, l'enveloppe d'un signal modulé en amplitude par un autre signal périodique est une fonction périodique de période égale à celle du signal modulant [6]. Il suffira alors d'interpréter le spectre fréquentiel (obtenu par la Transformée de Fourier) de cette enveloppe afin d'en retirer la fréquence des impacts, propre au défaut.

¹ Il y a souvent plusieurs fréquences de résonance pour un même ensemble. Nous n'en prendrons qu'une par souci de compréhension.

Etant donné que cette méthode a recours à la Transformée de Fourier, celle-ci ne sera adaptée que pour des signaux stationnaires (signaux dont les composantes fréquentielles ne varient pas au cours du temps).

Dans le cas où, par exemple, la vitesse de rotation de la machine varie au cours du temps, cette méthode risque alors d'être moins efficace.

2.2 La transformée en ondelettes

Lorsque le signal n'est pas quasi périodique dans le temps, la transformée de Fourier n'est plus applicable. Il faut alors recourir à un autre outil mathématique : la transformée en ondelettes (TO).

Cette dernière permet d'étudier simultanément l'information temporelle et fréquentielle (la méthode de l'enveloppe traitant les signaux dans un domaine puis dans l'autre mais jamais simultanément).

De nombreux ouvrages décrivent la transformée en ondelettes. Dans [7], elle est notamment utilisée pour détecter les défauts dans les roulements.

Dans cet article, afin d'exploiter et interpréter l'information contenue dans la transformée en ondelettes, la décomposition en valeurs singulières est utilisée.

2.3 La décomposition en valeurs singulières

La décomposition en valeurs singulières (SVD) est un outil permettant l'extraction des composantes principales d'une matrice. Dans le cas de signaux vibratoires, ces composantes principales sont en fait liées à des structures de données maximisant l'énergie du signal. A titre d'exemple, la SVD d'une matrice composée des mesures vibratoires en différents points d'une structure, permet sous certaines conditions de retirer les modes propres spatiaux dominants présents dans ces données [4].

Dans cet article, la SVD est utilisée pour décomposer la matrice résultante de la TO en ses différentes composantes à énergie élevée : les composantes parasites de faible énergie, dues au bruit par exemple, sont alors écartées. La SVD met ainsi en évidence des « modes propres fréquentiels » correspondant aux différentes composantes de haute énergie.

La SVD permet ainsi de « zoomer » et de faire apparaître les différentes fréquences caractéristiques des défauts qui n'apparaissent pas clairement lors d'une première transformée en ondelettes. Elle agit un peu comme un filtrage des composantes inintéressantes au profit des composantes dominantes.

3. Application des différentes méthodes de détection de défauts de roulement

3.1 Introduction

Cette partie a pour objectif d'illustrer dans un cas réel (celui du défaut de piste interne) les différentes méthodes qui viennent d'être décrites. Ainsi, l'étude se basera sur des mesures vibratoires réalisées sur le banc d'essai SpectraQuest du laboratoire du service de Vibrations et Identification des Structures se trouvant à l'Université de Liège. Ce banc d'essai permet d'introduire les principaux défauts existant dans les roulements et d'acquérir des mesures relatives à ces différents défauts. Ces mesures ont été effectuées dans le cadre du travail de fin d'études « Diagnostic vibratoire des roulements dans une machine tournante » réalisé par Monsieur Christophe Thiry [6]. Elles ont été réalisées à l'aide d'accéléromètres (capteurs piézo-électriques) qui mesurent l'accélération de la vibration en différents endroits stratégiques. Ainsi, comme on peut le voir à la figure 1, le capteur sera placé le plus proche possible de la source des vibrations.

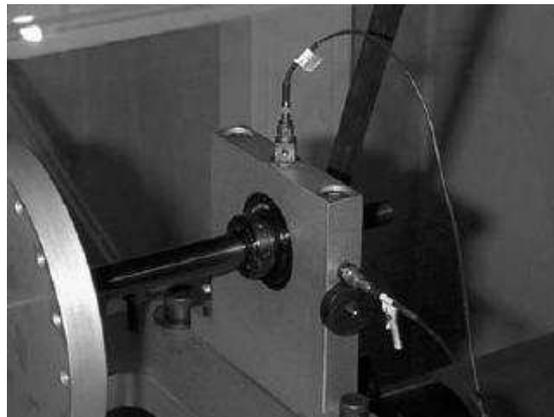


Figure 1 : Zoom sur les capteurs

Les signaux relevés sont alors amplifiés, enregistrés et traités afin de pouvoir les visualiser et en exploiter les informations nécessaires à la détection du défaut de roulement.

3.2 Application de la méthode de l'enveloppe

En pratique, la méthode de l'enveloppe demande une série de traitements du signal temporel brut avant d'obtenir le résultat. Ceux-ci sont repris sur la figure 2.

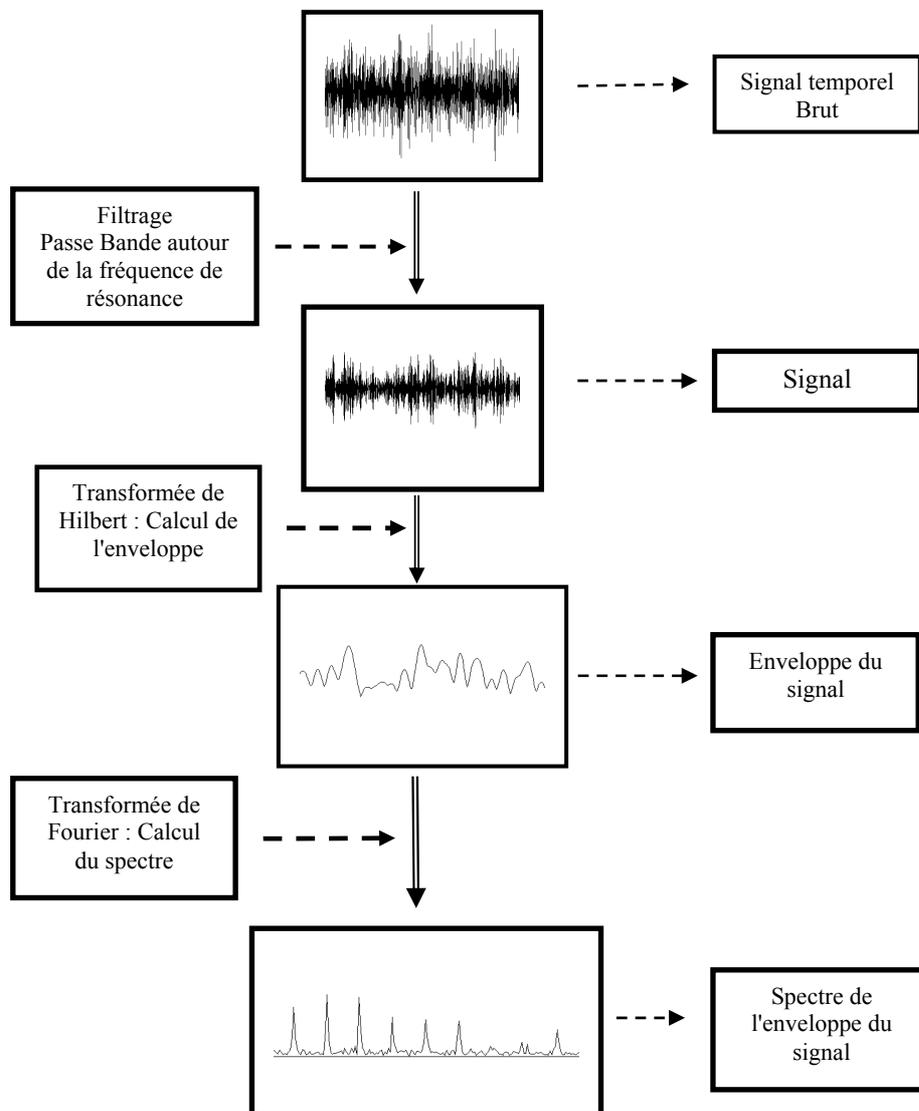


Figure 2 : Schéma de fonctionnement de la méthode de

La première étape est la filtration du signal brut afin d'éliminer les composantes indésirables : ceci favorise la robustesse de la méthode vis-à-vis du bruit. Ensuite, l'enveloppe est calculée : il s'agit en quelque sorte d'un redressement du signal ; à ce moment, nous disposons d'une information temporelle. Enfin, en ayant recourt à la transformée de Fourier, on obtient le spectre de l'enveloppe qui est un graphe d'amplitude de vibration en fonction de la fréquence. C'est à partir de ce spectre que les conclusions vont être tirées.

Spectre de l'état de référence

Pour commencer, la méthode de l'enveloppe est appliquée sur une série de mesures prises sur un roulement neuf à la vitesse de rotation d'environ 30 tr/sec. Le filtrage est réalisé autour de la première fréquence de résonance importante à savoir, 1786 Hz². La figure 3 est ainsi obtenue :

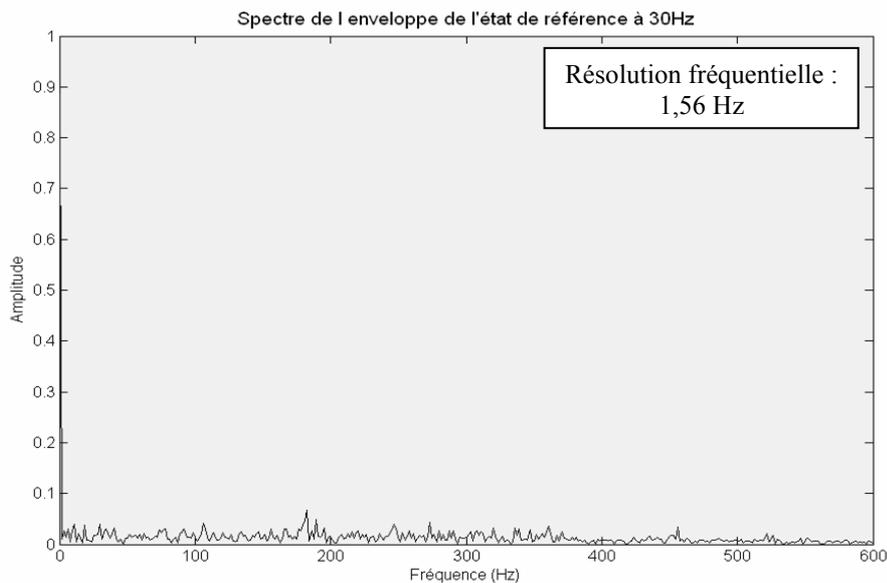


Figure 3 : Etat de référence – Filtrage autour de 1786Hz

Sur cette figure, aucun pic important n'est constaté, seul un léger bruit de fond est présent. Ceci confirme que le roulement est neuf : il n'y a aucun danger. Ce spectre est en quelque sorte la référence du roulement : toute

² Cette fréquence de résonance est trouvée par un test d'impact au marteau.

modification de spectre pour les mêmes conditions de fonctionnement peut être le signe d'une apparition d'un défaut.

Spectre du défaut de piste interne BPF1

Les défauts se caractérisent par une fréquence de manifestation qui leur est propre. Ainsi, pour le type de roulement mis en place et pour la vitesse de rotation de 29,69 tr/sec, la fréquence BPF1 vaut 146,9 Hz. Le spectre obtenu après application de la méthode de l'enveloppe sur le signal de base, est présenté à la figure 4.

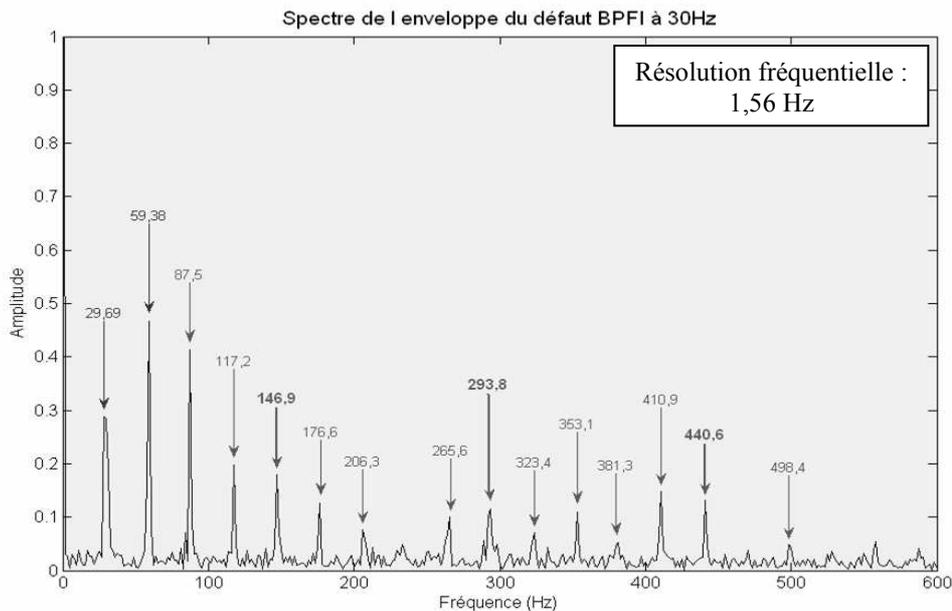


Figure 4: Défaut BPF1 – Filtrage autour de 1786 Hz

Sur ce spectre, il apparaît clairement une série de pics. Ceux-ci correspondent à la présence du défaut de piste intérieure. On constate un pic à 146,9 Hz égal à la fréquence BPF1 ; les deux premières harmoniques sont elles aussi présentes (293,8 Hz et 440,6 Hz). Avec ces seules informations, la présence du défaut est détectée.

Cependant, on constate toute une série de pics entourant ces fréquences. Il s'agit en fait de la modulation de la fréquence BPF1 par la fréquence de rotation. Ceci provient du fait que lorsque l'arbre tourne, il entraîne la bague

intérieure : le défaut étant présent sur la piste intérieure de cette bague, il « tourne » avec l'arbre. Ainsi, le défaut passe successivement d'une zone plus chargée (direction dans laquelle s'applique la charge sur le roulement) à une zone moins chargée. L'amplitude de la vibration est donc influencée par la zone dans laquelle se trouve le défaut au moment de l'impact (la vibration sera plus intense si la charge exercée est plus élevée). La fréquence du défaut est donc modulée par la fréquence de rotation de l'arbre (RPS = nombre de rotations par seconde de l'arbre). Ceci se vérifie par le tableau suivant, reprenant les valeurs des pics présents sur le spectre.

<i>Fréquence observée</i>	<i>Cause possible</i>	<i>Fréquence théorique</i>
87,5	BPFI – 2xRPS	87,5
117,2	BPFI – RPS	117,2
176,6	BPFI + RPS	176,6
206,3	BPFI + 2xRPS	206,3
265,6	BPFI + 4xRPS	265,7
323,4	2xBPFI + RPS	323,5
353,1	2xBPFI + 2xRPS	353,2
381,3	3xBPFI – 2xRPS	381,3
410,9	3xBPFI – RPS	411,0
498,4	4xBPFI-3xRPS	498,5

Relevé des fréquences liées au défaut de piste intérieure

Il est maintenant clair qu'un défaut de piste interne est présent dans le roulement.

Deux pics présents sur le spectre n'ont pas encore été expliqués : le pic à 29,69 Hz et le pic à 59,38 Hz. Il s'agit en fait de la fréquence de rotation et de sa première harmonique. L'apparition de ces deux pics est due au calcul de l'enveloppe : en effet, l'enveloppe extrait toute modulation d'amplitude

d'un signal ; or la fréquence du défaut BPFi est elle-même modulée en amplitude par la fréquence de rotation. Lorsque l'enveloppe est calculée, cette dernière extrait aussi la modulation de la fréquence BPFi par la fréquence de rotation. C'est la raison pour laquelle ces deux pics sont observés sur le spectre.

Bien entendu, les mesures effectuées sur le banc vibratoire sont assez « propres » : le bruit est faible par rapport à des mesures réelles prises dans des conditions industrielles mais le résultat est plus que satisfaisant.

3.3 Application de la transformée en ondelettes

Transformée en ondelettes de l'état de référence

En effectuant la transformée en ondelettes sur les mesures réalisées à 30Hz sur le roulement neuf dans la plage fréquentielle correspondant à la fréquence du défaut à observer, on obtient la figure 5.

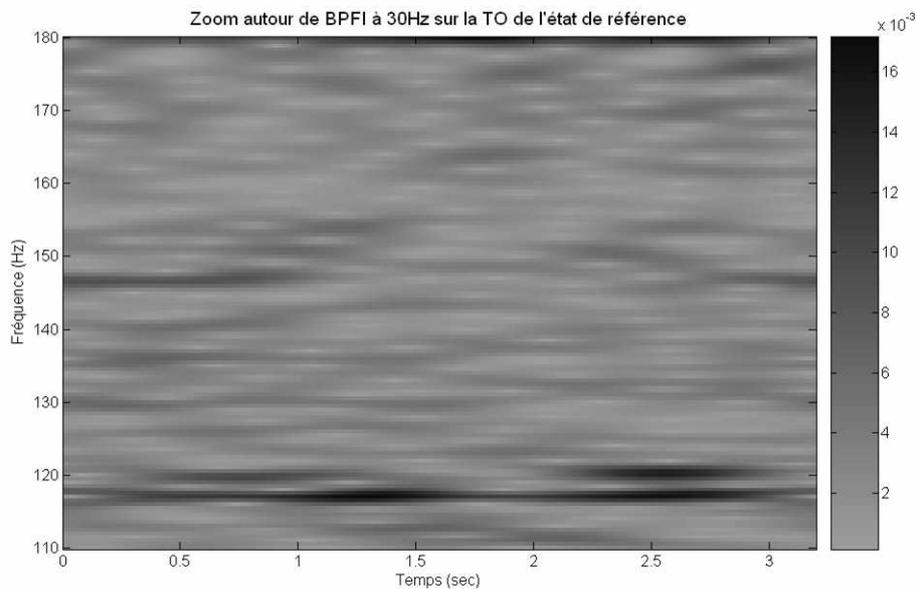


Figure 5 : TO dans la plage 110Hz-180Hz

D'après cette figure, il semblerait qu'aucun défaut ne soit présent. En effet, aucune raie n'est réellement visible ce qui est logique puisque dans ce cas-

ci, le roulement est neuf. A souligner tout de même pour la suite : la valeur maximale de l'amplitude est de 0,016 : le niveau est donc assez faible.

Transformée en ondelettes du défaut de piste interne

En appliquant la transformée en ondelettes sur le signal mesuré lorsque le roulement avec le défaut de piste est placé, on obtient la figure 6. Bien évidemment, la plage fréquentielle observée comprend la fréquence recherchée.

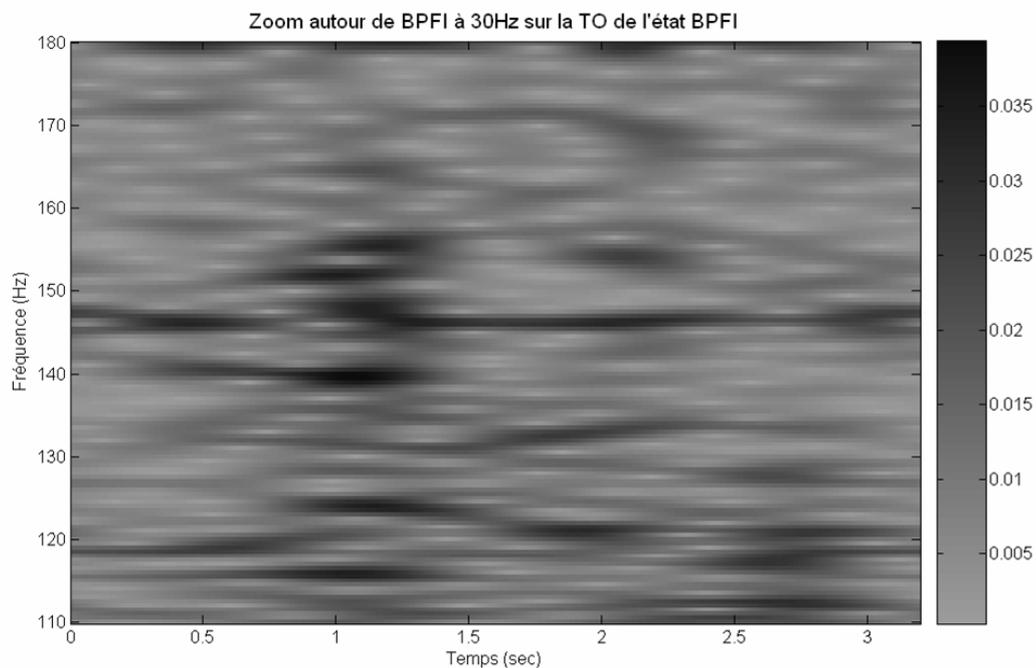


Figure 6 : TO dans la plage 110Hz-180Hz

A partir de cette figure, il est difficile de dire si un défaut est présent ou pas. On peut souligner que le niveau d'énergie a sensiblement augmenté : pour 0,016 en état de référence, on est passé à 0,035 dans le cas BPFI. Les zones foncées sont à présent plus importantes. Une très légère raie peut être constatée aux environs de la fréquence de défaut BPFI mais rien de réellement significatif. Il est impossible de se prononcer précisément : la TO semble donc mal adaptée.

3.4 Application de la décomposition en valeurs singulières

Cependant, sur base des résultats de la TO, il est possible d'effectuer une décomposition en valeurs singulières (singular value decomposition ou SVD). Cette dernière permet donc d'extraire les composantes à hautes énergies contenues dans la matrice des résultats de la TO.

SVD de la TO de l'état de référence

Sur base de la figure 5, la SVD peut être appliquée afin d'étudier la présence éventuelle d'un défaut (fig. 7).

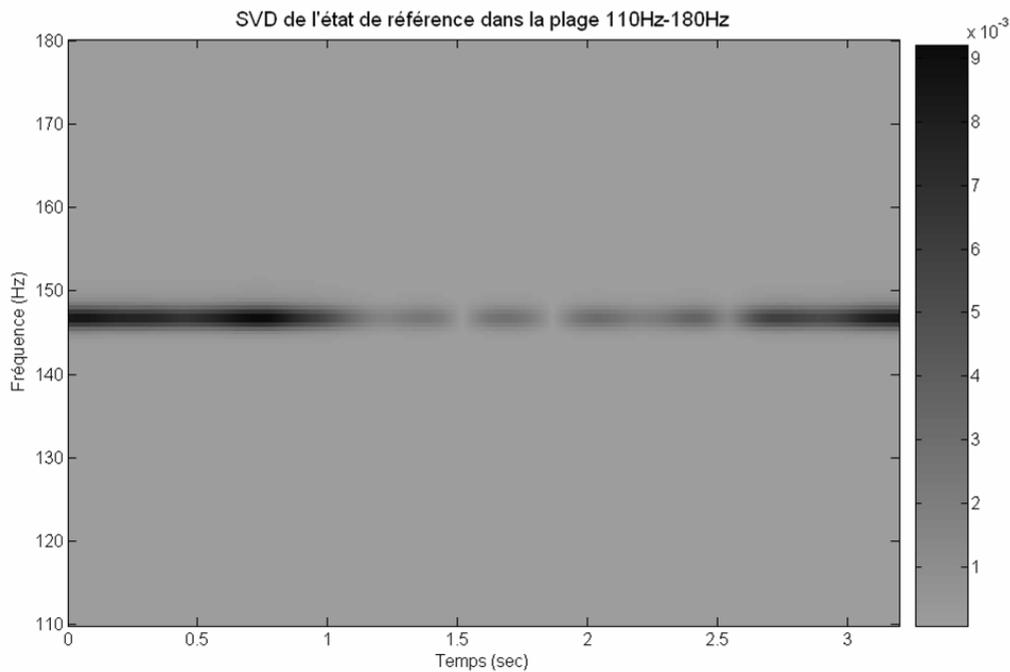


Figure 7 : 3^{ème} mode fréquentiel

Il faut attendre le 3^{ème} mode fréquentiel pour retrouver une raie à 146,9Hz : ceci signifie que l'énergie associée est relativement faible (0,009). Cette raie peut donc être due à une légère imperfection de la piste. Il n'est donc pas nécessaire de s'alarmer.

SVD de la TO du défaut de piste interne

La figure 8 correspond à la composante liée au maximum d'énergie dans la plage 110-180Hz. Elle est le résultat de l'application de la SVD sur la figure 6.

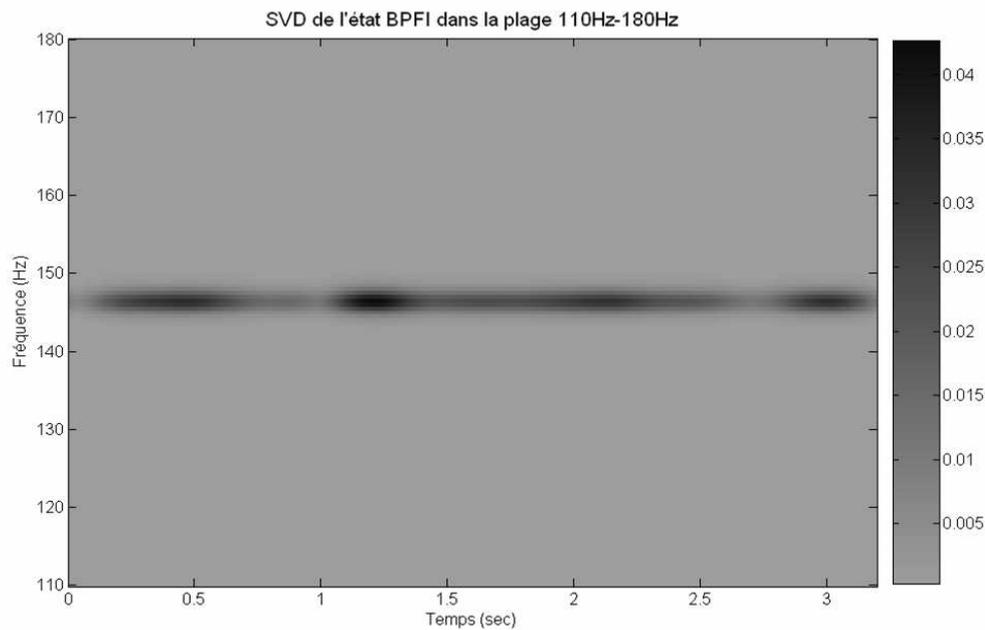


Figure 8 : 1^{er} mode fréquentiel

Le premier mode correspond à une raie à 146,9 Hz (égale à fréquence du défaut BPF1) : ceci signifie donc que le maximum d'énergie est associé à cette composante. Le défaut est donc mis clairement en évidence par cette méthode. L'évolution de la fréquence au cours du temps peut être suivie avec grande facilité. Dans le cas présent, la fréquence reste constante tout au long de l'échantillon : ceci provient du fait que la vitesse ne varie pas au cours du temps. Cependant, en industrie, les mesures sont acquises en fonctionnement : il peut se produire une variation de vitesse de l'arbre due, par exemple, à une variation de charge. La SVD devrait alors donner des résultats similaires mais des tests doivent encore être effectués pour le confirmer.

4. Conclusions

Cet article aborde différentes méthodes de détection de défauts dans les roulements.

Ainsi, la méthode de l'enveloppe est une méthode qui se base sur l'excitation de la fréquence de résonance et la recherche de l'information à travers la modulation d'amplitude de cette fréquence de résonance, afin de ramener le signal en basses fréquences. Celle-ci s'est avérée très satisfaisante du point de vue pratique où elle a permis de diagnostiquer aisément le défaut de piste interne. Cette méthode est robuste par rapport au bruit (ceci est dû au filtrage autour de la fréquence de résonance).

Toutefois, cette méthode a ses inconvénients : la recherche préalable des fréquences de résonance du roulement (et de son palier) est indispensable. D'autre part, le choix de la fréquence de résonance autour de laquelle est effectué le filtrage, reste déterminant : les résultats risquent de varier selon que le filtrage s'effectue autour de telle ou telle fréquence de résonance.

La transformée en ondelettes est un outil particulier : elle permet de résoudre le problème de « non stationnarité » et de « non périodicité » en représentant le signal dans le plan temps-fréquence. Celle-ci est donc très utile lorsque les signaux sont non stationnaires, ce qui peut arriver en industrie puisque les mesures sont relevées en fonctionnement.

Toutefois, il semble que celle-ci soit mal adaptée à l'analyse directe des signaux car les fréquences caractéristiques des défauts n'apparaissent pas dans le plan temps fréquence sans l'aide d'un pos-traitement. Heureusement, il est possible d'utiliser une décomposition en valeurs singulières (SVD) sur les résultats de la TO afin d'extraire l'information représentative du défaut.

La SVD décompose la matrice résultante de la TO en modes propres fréquentiels correspondant aux maximums d'énergie (filtration des fréquences d'intérêts). Ceci a permis d'extraire les composantes relatives aux défauts qui étaient invisibles avec la TO. La SVD permet ainsi d'exploiter au mieux les résultats de la transformée en ondelettes.

Il reste encore à valider ces résultats sur des mesures prises sur site industriel.

5. Références bibliographiques

- [1] COLLIENNE G., *Comparaison d'un capteur sonore et d'un capteur d'accélération dans le cadre de la maintenance vibratoire*, travail de fin d'études, Gramme Liège, 2004.
- [2] *L'analyse vibratoire en maintenance préventive prévisionnelle*, CSI Europe, Computational System Inc, document pdf.
- [3] DECKERS K., SAS J., DENGIS O., ADRIEN D., *Analyse vibratoire et diagnostic*, CSI Europe, révision 4, 2000.
- [4] LENAERTS V., *Identification de modèles structuraux en dynamique non linéaire*, Belgique, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, thèse de doctorat, 2003.
- [5] MALLAT S., *A Wavelet tour of Signal Processing*, site internet : http://cas.ensmp.fr/~chaplais/Waveletour_presentation.
- [6] THIRY C., *Diagnostic vibratoire des roulements dans une machine tournante*, Belgique, Université de Liège, 2004.
- [7] LESCEUX J.M., *Détection précoce de défauts dans les roulements par analyse vibratoire*, Revue Scientifique des ISILF – vol 10, Avril 1996.
- [8] MILISSEN X., *Comparaison de différentes méthodes de détection de défauts dans les roulements*, Travail de fin d'études, Gramme, Liège, 2005.