

Application de l'Analyse Multirésolution en Ondelettes Pour la Prédiction de l'Usure des Outils de Coupe

Mohamed Khemissi Babouri¹, Nouredine Ouelaa²

Laboratoire de Mécanique & Structures, Université de Guelma, BP 401, Guelma 24000, Algérie, babouri_bmk@yahoo.fr, n_ouelaa@yahoo.fr

L'usure des outils de coupe représente l'un des facteurs majeurs à étudier pour optimiser la production et garantir la qualité des produits manufacturés. En effet, l'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil-copeau. La dégradation de son état affecte aussi bien la qualité des surfaces usinées, les tolérances géométriques imposées, la tenue de l'outil et engendre des efforts élevés. Une des conséquences graves d'une usure non contrôlée et brutale est l'arrêt du processus de coupe, provoquant éventuellement la casse de l'outil et l'usure prématurée des organes mobiles de la machine et par conséquent, une baisse de la productivité. Donc, la surveillance du processus de coupe est nécessaire et fait appel à des méthodes de supervision robustes et fiables. Ces méthodes sont basées sur la mesure des efforts de coupe, des signatures vibratoires et de l'émission acoustique. A cet effet, une technique rapide et fiable de traitement des signaux est très nécessaire et importante pour identifier l'usure de l'outil de coupe dans le processus d'usinage. Dans cette étude, nous utilisons une méthodologie numérique et expérimentale basée sur les données des efforts de coupe et des signatures vibratoires mesurés en fonction des conditions de coupe. Les signaux recueillis sont traités par l'analyse multirésolution en ondelettes (AMRO), qui a un grand pouvoir de débruitage des signaux. L'application de l'AMRO a permis d'éliminer les fréquences de résonance du système usinant et a fait apparaître deux nouveaux pics dans les bandes de fréquences [1-2kHz] et [4,5-5kHz], lorsque l'usure dépasse la valeur admissible $[VB]=0.3\text{mm}$. L'amplitude de ces deux pics augmente avec l'augmentation de l'usure. Ce résultat est confirmé par les amplitudes des autospectres des signaux d'accélération mesurés dans la direction radiale et tangentielle de l'outil, qui restent insensibles pour des usures inférieures à 0.3mm et augmente avec l'augmentation de l'usure.

1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière est le procédé de fabrication le plus important dans l'industrie. Cependant, l'usure de l'outil de coupe représente l'un des facteurs majeurs dans le cas d'une plus grande productivité associée à une meilleure qualité des produits élaborés, qui nécessite une connaissance approfondie du processus de coupe. En effet, la dégradation de l'état de l'outil influe sur la qualité des surfaces usinées, les tolérances géométriques imposées et la tenue de l'outil dans le temps et engendre des efforts élevés qui ont pour effet d'augmenter la puissance de coupe et l'énergie consommée. La surveillance de l'état d'un outil de coupe permet aux opérateurs de maximiser le produit et d'améliorer la qualité de celui-ci. Une technique rapide et fiable de traitement des signaux des efforts de coupe et des vibrations est donc indispensable pour élaborer un système de surveillance du processus d'usinage.

Dans la littérature, Xiaozhi et Beizhi [1] ont proposé d'utiliser l'analyse en ondelettes sur des signaux d'émission acoustique (EA). Les expériences ont prouvé que la norme des coefficients de résolution de l'ondelette peut être un critère pour la surveillance de l'état de l'outil de coupe. Jemielniak et Otman [2] ont employé un algorithme de traitement statistique utilisant quelques indicateurs, tels que la racine carrée moyenne RMS, le Skew et le Kurtosis du signal d'EA dans la détection de l'endommagement brutale des outils de coupe. L'inspection des résultats des essais a montré que le Skew et le Kurtosis peuvent être de meilleurs indicateurs de défaillance brutale de l'outil que les valeurs du RMS. Weihong, Xie, Obikawa et Shirakashi [3] ont

conçu un algorithme rapide de la transformée par ondelettes basé sur une paire de filtre de miroir de quadrature (QMF). Ils ont constaté deux fréquences principales : le premier mode lié à la fréquence naturelle de l'outil dans la direction d'avance et le second mode lié à la torsion de l'outil. Les résultats ont montré une corrélation entre les variations des coefficients d'ondelettes et l'usure progressive de l'outil sous différentes profondeurs et vitesses de coupe. Cemal cakir et Yahya [4,5] ont effectué des mesures des forces de coupe, ils ont calculé la valeur de sortie pour indiquer l'usure de l'outil avec un système d'alarme. Les résultats expérimentaux ont prouvé que les variations de la force de coupe diminuent uniformément quand l'outil se casse. Zhou, Andersson et Ståhl [6] ont proposé de surveiller les contraintes agissant sur le tranchant de l'outil pendant le processus d'usinage afin de prédire la rupture brutale. En surveillant le "facteur risque", défini comme étant le rapport entre les contraintes instantanées, les auteurs ont conclu qu'il était possible de prédire la rupture brutale des outils de coupe. A travers cet aperçu, on conclut que la surveillance du processus de coupe est devenue nécessaire et indispensable.

L'approche proposée dans ce travail consiste à utiliser une méthodologie numérique et expérimentale basée sur l'analyse multirésolution en ondelettes des signaux mesurés, ce qui permet une supervision robuste et fiable pour identifier et estimer l'usure des outils de coupe dans l'opération de tournage. Les représentations fréquentielles sont assurées par les spectres d'enveloppe des coefficients d'ondelettes calculés à partir de la transformée de Hilbert du signal filtré ainsi obtenu par l'AMRO.

2 Surveillance des outils de coupe

Le dispositif de surveillance d'un outil de coupe permet le prélèvement d'un signal représentatif de l'état de l'outil, le traitement de ce signal et la détection d'éventuelle anomalie. A cet effet, le bon choix d'un dispositif de mesure et de traitement des données est indispensable pour un système de surveillance en ligne des outils de coupe. Ce traitement est en fonction du capteur et de la qualité des signaux prélevés. L'extraction des informations utiles incorporées dans ces signaux, soit par analyse ou par filtrage, permet la détection et l'identification de l'usure de l'outil.

2.1 Transformée en ondelettes

Une ondelette mère ψ est une fonction de base que l'on va traduire et dilater pour recouvrir le plan temps-fréquence et analyser le signal. L'ondelette doit être une fonction de moyenne nulle ; en d'autres termes, ψ doit être une onde. Ce qui s'écrit mathématiquement :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

On introduit alors les facteurs de translation b et d'échelle a :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

La transformée en ondelettes revient alors à :

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

Avec $\psi^*(t)$ la conjuguée de $\psi(t)$.

2.2 Analyse Multirésolution en ondelette (AMRO)

Les ondelettes permettent de représenter un signal, comme le font des fonctions cosinus dans l'analyse de Fourier, elles autorisent une bonne localisation en temps et en fréquence. La décomposition se fait à partir d'un ensemble d'ondelettes de base obtenu à partir d'une ondelette "mère". L'analyse se fait à partir de la dilatation et de la translation de l'ondelette mère. Cette transformation décrit les détails d'un signal pour chaque niveau de résolution. Ces détails correspondent à la différence d'information entre deux niveaux de résolutions successives. A cet effet, Stéphane Mallat a eu l'idée de considérer l'analyse par ondelettes comme une décomposition du signal par une cascade de filtres, associant une paire de filtres à chaque niveau de résolution (fig.1). Le signal est par suite décomposé en approximations (A_i) correspondant aux basses fréquences et

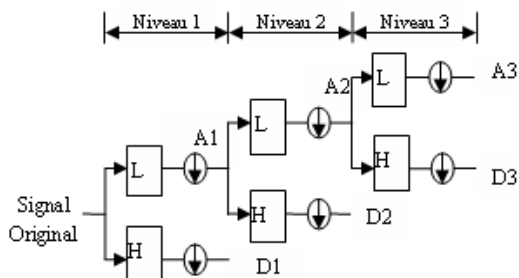


Figure 1 : Décomposition en cascade pour $n=3$.

les détails (D_i) correspondant aux plus hautes d'entre elles. Notons que dans cet algorithme seul les approximations sont décomposées.

3 Démarche expérimentale

Dans cette étude, les opérations d'usinage ont été réalisées sur un tour modèle SN40, en utilisant un outil de coupe CSBNR 2525M 12 portant une plaquette de carbure non revêtue S40T. L'acier usiné dans les expériences est le Z200Cr12, il a une excellente tenue à l'usure. Les essais d'usinage ont été effectués sans lubrification et dans les conditions de coupe suivantes : Une avance $f = 0.12$ mm/tr, deux profondeurs de passe $a_p = 0.5$ et 1 mm et trois vitesses de coupe $V_c = 100, 135$ et 190 m/min. L'acquisition des signaux générés durant l'usinage a été effectuée à l'aide d'un dynamomètre (KISTLER), qui permet d'enregistrer l'intensité des efforts de coupe en temps réel dans les trois directions principales de coupe pour une fréquence d'échantillonnage de 10 KHz. D'autre part, les accélérations sont mesurées à l'aide d'un analyseur des signaux bicanal B&K 2035, avec deux accéléromètres piézoélectriques de type B&K 4384 placés dans les deux directions tangentielle et radiale pour une fréquence d'échantillonnage de 12 KHz. L'architecture expérimentale est illustrée par la figure 2.

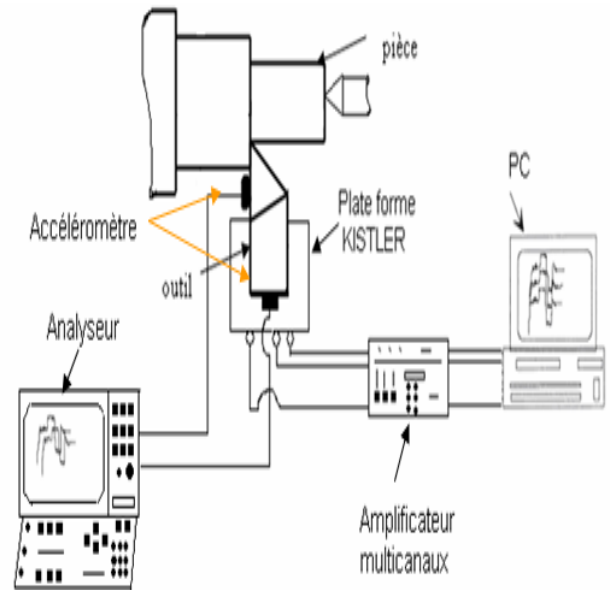


Figure 2 : Architecture expérimentale.

4 Résultats et discussions

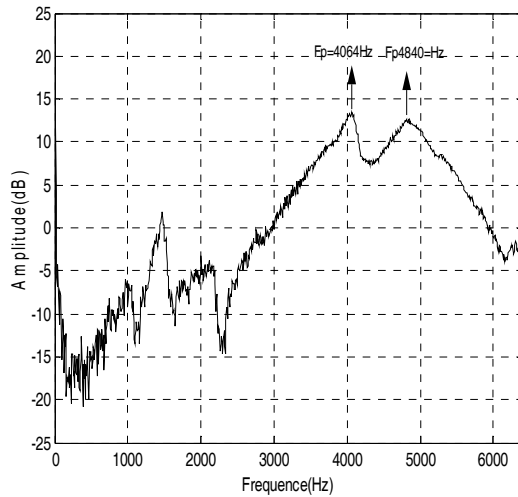
4.1 Fréquences propres de l'outil en vibration libre

Avant d'entamer le plan expérimental, nous avons réalisé une série de mesures dans différents points localisés sur la partie périphérique de l'outil de coupe. Le but de ces mesures est de déterminer les fréquences propres du système. La connaissance de ces fréquences propres nous permet de mieux analyser les résultats de mesures obtenues par la suite.

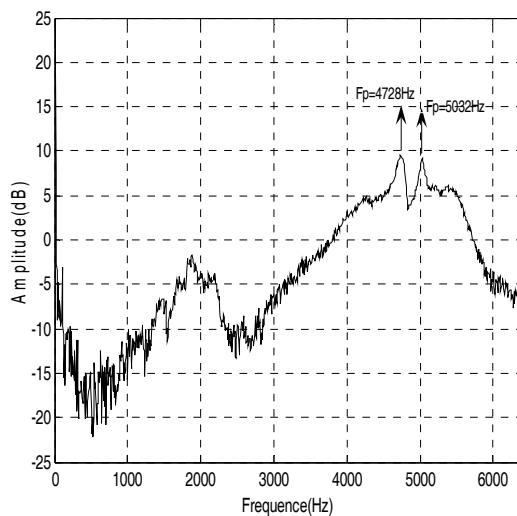
- Dans la direction axiale de l'outil figure (3.a), on constate l'apparition de deux pics, le premier à 4064 Hz et le deuxième à 4840 Hz.

- Dans la direction verticale de l'outil figure (3.b), on constate l'apparition de deux pics le premier mode à 4728 Hz et le deuxième à 5032 .

D'après ces mesures, on constate l'apparition en premier lieu le mode de flexion dans la direction axiale à environ 4064 Hz, le deuxième pic est le mode de torsion qui apparaît entre (4728 ÷ 4840 Hz) dans les deux directions axiale et tangentielle. Le troisième pic correspond au premier mode de flexion dans la direction tangentielle, il apparaît à 5032 Hz.



(a) Direction axiale de l'outil



(b) Direction verticale de l'outil

Figure 3 : Les Spectres des fréquences propres du système pour deux sensibilités du marteau de choc

4.2 Analyse fréquentielle des signaux des efforts de coupe

L'analyse des spectres des efforts de coupe, figures 4, pour les trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min et pour une profondeur de passe 0.5 mm et une avance 0.12 mm/tr montre :

- Un pic correspondant à la fréquence propre de la plate forme dans le plan x, y, qui apparaît entre 2800 Hz et 3100 Hz.
- Un deuxième pic apparaît entre 3800 et 3900 Hz correspondant au premier mode de flexion de l'outil dans sa direction axiale. En vibration libre ce mode apparaît à environ 4000 Hz.

- La composante radiale de l'effort de coupe fait apparaître d'une manière très claire la première fréquence propre axiale de l'outil, suivie de la composante axiale. Alors que la composante tangentielle reste bruitée et ne permet pas l'apparition de la fréquence propre surtout pour la profondeur de passe 0.5 mm.

- Une augmentation significative des amplitudes des signaux d'un palier à un autre avec l'augmentation de l'usure, surtout pour les vitesses 135 et 190 m/min.

Nous présentons dans le tableau 1 une synthèse des résultats de la variation de l'usure en dépouille (VB) et en cratère (KT) des cinq paliers (1 à 5) en fonction des paramètres du régime de coupe.

- L'analyse des spectrales ne permet pas une apparition claire de l'usure de l'outil, à part un certain nombre de pics à basse fréquence [1000-2000] Hz qui peuvent être dues au phénomène d'usure [7] et l'augmentation des amplitudes du pic correspondant à la fréquence de résonance de l'outil avec l'augmentation de l'usure VB.

En conclusion, l'analyse des spectres ne permet pas un bon suivi de l'évolution de l'usure, parce que les signaux des efforts de coupe mesurés sont très bruités. Nous présentons dans la section suivante les résultats obtenus par l'application de l'analyse multirésolution en ondelettes permettant le débruitage de ces signaux et le filtrage des composantes de la machine.

4.3 Analyse multirésolution en ondelettes des signaux des efforts de coupe

Nous présentons sur la figure 5 les FFT des enveloppes des signaux reconstruits D1, après application de l'AMRO aux signaux des composantes radiales des efforts de coupe. L'analyse des résultats obtenus à partir du plan d'expérience présenté dans le tableau 1, montre:

- L'application de l'AMRO aux signaux des efforts de coupe permet le débruitage des signaux et l'élimination des fréquences propres du système usinant. D'autre part, elle fait apparaître deux pics l'un dans la bande [1-2] KHz et le deuxième dans la bande [4.5-5] KHz dans le cas d'une usure en dépouille de l'outil $VB \geq 0.3\text{mm}$.

- Pour la vitesse de coupe 100 m/min et une profondeur de passe 0.5mm, les spectres d'enveloppe des composantes radiales des efforts de coupe des cinq paliers ne font pas apparaître les deux pics d'usure parce que VB reste inférieure à 0.3mm voir tableau 1.

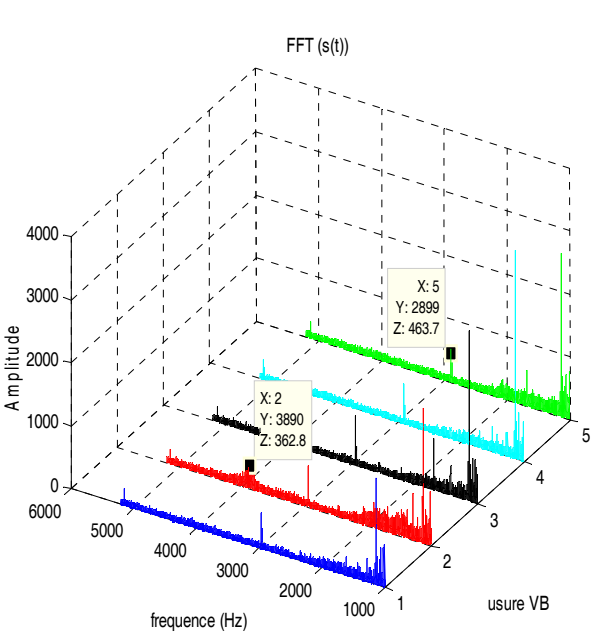
- Pour la vitesse de coupe $V_c=135\text{m/min}$ et une profondeur de passe 0.5mm, on constate l'apparition des deux pics d'usure à partir du troisième palier où $VB \geq 0.3\text{mm}$ et n'apparaissent pas sur les deux premiers paliers puisque $VB < 0.3\text{mm}$.

- Pour la vitesse de coupe 190 m/min et une profondeur de passe 0,5mm, on constate l'apparition des deux pics d'usure à partir du premier palier où $VB > 0.3\text{mm}$.

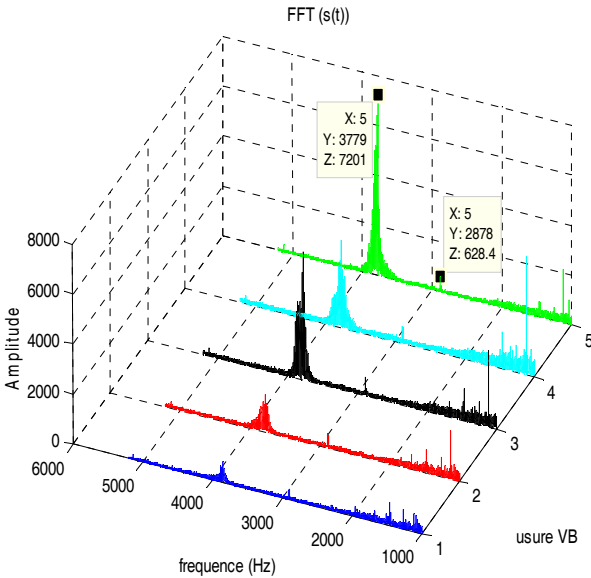
En conclusion, nous pouvons dire que l'AMRO a permis le filtrage et le débruitage des signaux des efforts de coupe et fait apparaître deux pics l'un en dessous de la fréquence de résonance de l'outil et l'autre au dessus de cette dernière qui peuvent être utilisés comme indicateurs de dépassement de l'usure admissible $[VB]=0.3\text{mm}$ dans un système de surveillance on-line.

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Usure VB (mm) dans les cinq paliers					Usure KT (mm) dans les cinq paliers				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
100	0,12	0,5	0,086	0,131	0,2	0,225	0,261	0,012	0,02	0,024	0,031	0,041
		1	0,123	0,2	0,248	0,286	0,34	0,015	0,02	0,03	0,044	0,071
135		0,5	0,221	0,275	0,425	0,502	0,601	0,023	0,034	0,046	0,061	0,081
		1	0,301	0,46	0,555	0,603	0,7	0,048	0,054	0,074	0,084	0,097
190		0,5	0,401	0,501	0,561	0,821	1,112	0,039	0,053	0,107	0,168	0,184
		1	0,5	0,617	0,662	0,999	1,502	0,074	0,11	0,15	0,205	0,239

Table 1 : Usure en dépouille VB et en cratère KT en fonction des paramètres du régime de coupe Vc, f et ap

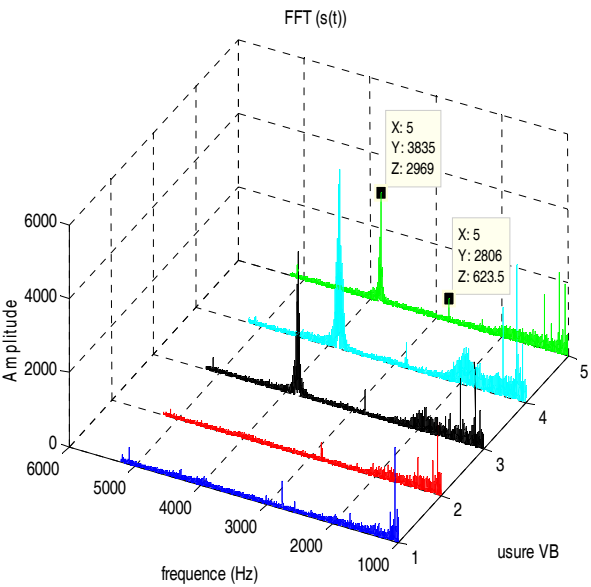


V_c =100 m/min, a_p = 0.5 mm, f = 0.12 mm/tr

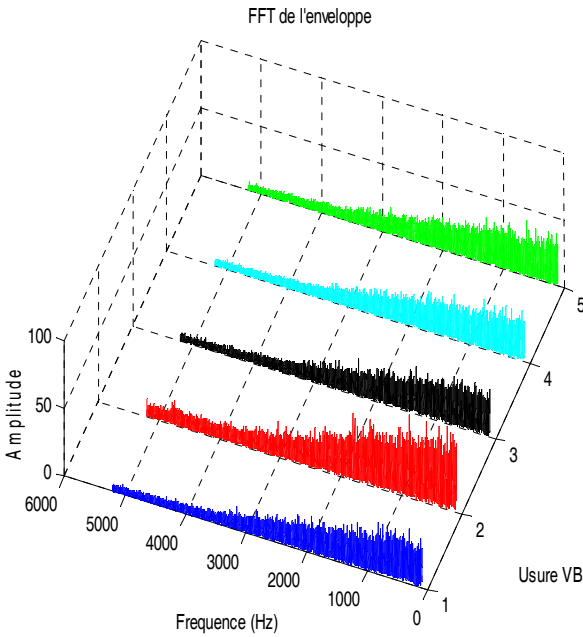


V_c =190 m/min, a_p = 0.5 mm, f = 0.12 mm/tr

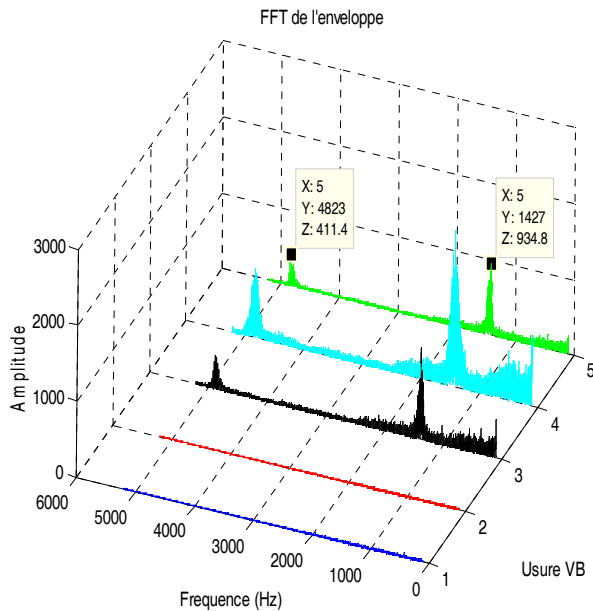
Figure 4 : Les spectres des efforts de coupe direction radiale (Fy) en fonction de l'usure en dépouille (VB)



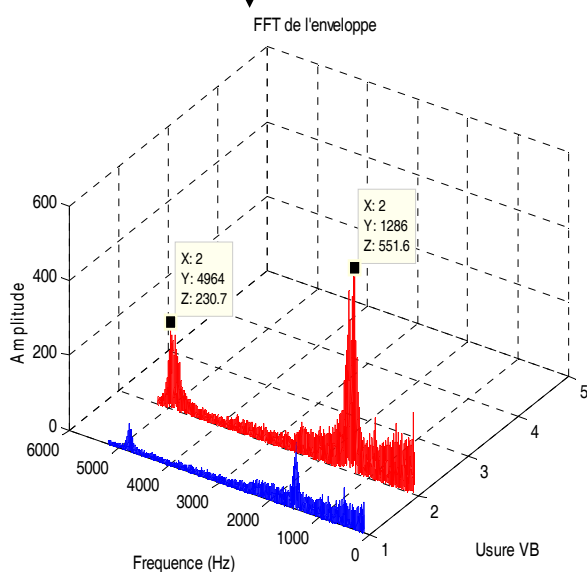
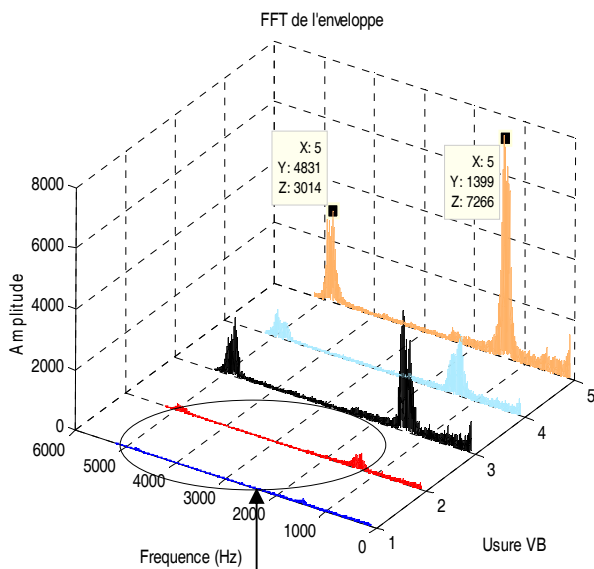
V_c =135 m/min, a_p = 0.5 mm, f = 0.12 mm/tr



V_c =100 m/min, a_p = 0.5 mm, f = 0.12 mm/tr



$V_c = 135 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$



$V_c = 190 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

Figure 5 : Les spectres d'enveloppe du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y).

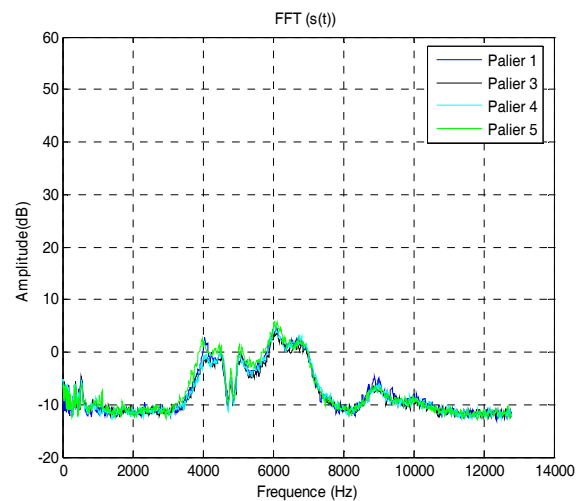
4.4 Analyse des autospectres des signaux d'accélération

La figure 6 montre les autospectres des signaux d'accélération délivrés par l'accéléromètre placé dans la direction radiale de l'outil. L'analyse globale des différents autospectres montre:

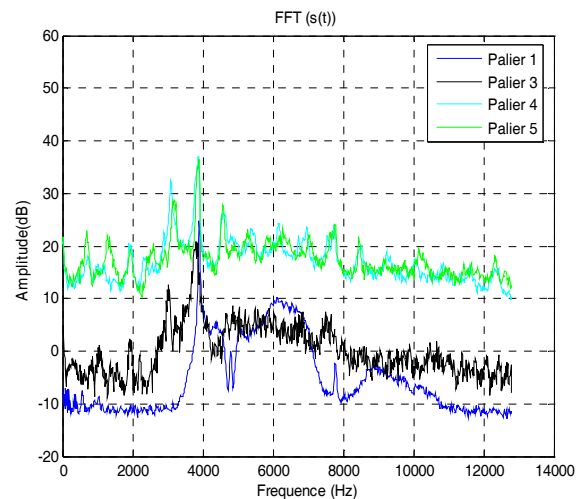
- Pour $V_c = 100 \text{ m/min}$, les autospectres des cinq paliers restent superposés sur toute la bande de fréquence (-10dB en dehors de la fréquence de résonance de l'outil), l'usure $VB < 0.3 \text{ mm}$. L'usure n'a pas d'influence significative sur l'amplitude des autospectres.

- Pour $V_c = 135 \text{ m/min}$, l'amplitude de l'autospectre du palier 1 reste faible (-10dB), l'usure $VB < 0.3 \text{ mm}$, alors que pour les trois derniers paliers, on constate une augmentation progressive et significative des amplitudes des autospectres sur toute la bande de fréquence (10 à 20 dB), sur ces derniers paliers l'usure $VB \geq 0.3 \text{ mm}$.

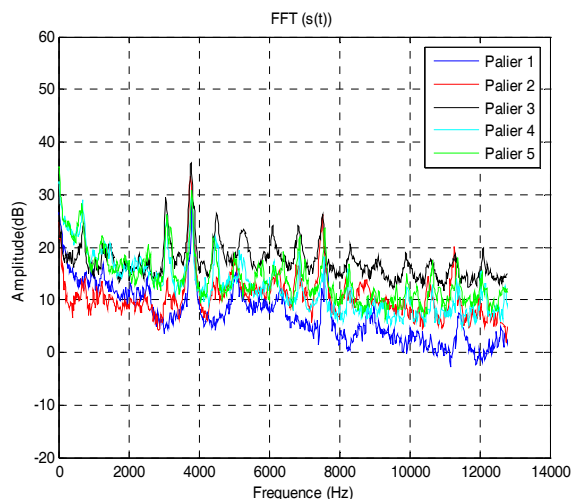
- Pour $V_c = 190 \text{ m/min}$, l'amplitude des autospectres sur les cinq paliers augmente d'une manière très significative sur toute la bande de fréquence (10 à 20dB), l'usure $VB \geq 0.3 \text{ mm}$ dès le premier palier.



$V_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$



$V_c = 135 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$



$V_c = 190 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

Figure 6 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale pour les différents paliers (différentes usures en dépouille).

5 Conclusion

D'après cette étude, nous avons constaté que la surveillance de l'usure de l'outil de coupe en tournage nécessite la mise en place d'un suivi on-line efficace vue que le phénomène d'usure est très complexe à suivre durant les différentes phases du processus d'usinage par sa mesure directe.

L'utilisation de l'analyse multirésolution en ondelettes a permis le filtrage et le débruitage des signaux des efforts de coupe. Dans le cas d'une usure en dépouille de l'outil $VB \geq 0.3 \text{ mm}$, le spectre d'enveloppe du signal reconstruit D1 met en évidence l'apparition de deux pics en dessous et au dessus de la fréquence de résonance de l'outil, qui peuvent nous renseigner sur l'évolution de l'usure de l'outil de coupe. La surveillance de l'usure de l'outil à partir des signaux d'accélération est possible en se basant sur le niveau des amplitudes des autospectres qui peuvent être un bon indicateur d'usure dans un système de surveillances on-line.

En fin, nous avons constaté une bonne concordance entre les résultats obtenus par l'application de l'AMRO aux signaux des efforts de coupe et ceux des autospectres des signaux d'accélérations de l'outil.

Références

- [1] Xiaozhi C., Beizhi L., "Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis", *Int J Adv Manuf Technol*, 33, 968-976 (2007).
- [2] Jemielniak K., Otman O., "Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals", *J. J. Materials Processing Technology*, 76, 192-197 (1998).
- [3] Weihong G., Xeiguo T., Obikawa T., Shirakashi T., "A method of recognizing tool-wear states based on a fast algorithm of wavelet transform", *J. Materials Processing Technology*, 170, 374-380 (2005).
- [4] Cemal C.M., Yahya I., " Detecting tool breakage in turning aisi 1050 steel using coated and uncoated

cutting tools", *J. Materials Processing Technology*, 159, 191-198 (2005).

- [5] Yahya I., Cemal cakir M., "Finite element analysis of cutting tools prior to fracture in hard turning operations", *Materials and design*, 26, 105-112 (2005).
- [6] Zhou J.M., Andersson M., Ståhl J.E., "A system for monitoring cutting tool spontaneous failure based on stress estimation", *J. Materials Processing Technology*, 48, 231 (1995).
- [7] Dimla Snr D.E., "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations A review of methods ", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, 1073-1098 (2000).