

## Identification de l'évolution de l'usure d'un outil de tournage basée sur l'analyse des efforts de coupe et des vibrations

Mohamed Khemissi Babouri, Nouredine Ouelaa & Abderrazek Djebala

Laboratoire de Mécanique & Structures,  
Université 8 Mai 1945 de Guelma, BP 401, Guelma 24000, Algérie.

Révisé le 16/10/2011

Accepté le 02/02/2012

### ملخص

تأثير تآكل أدوات القطع على جودة السطح لا يزال يمثل مشكلة رئيسية في طرق التشغيل. إن مراقبة طرق التشغيل قد أصبحت تلعب دور جدم مهم لمنع حدوث بعض الظواهر الغير المتوقعة، مثل التآكل المفرط أو الانكسار للأداة. في هذا العمل، نقترح طريقة الرصد على أساس التحليل الزمني و الترددي للإشارات المقاسة للكشف عن تآكل الأداة. الأهداف الرئيسية لهذا العمل هو إثبات من جهة مدى حساسية المؤشرات الرقمية بالنسبة لمتغيرات تآكل الأداة. و من جهة أخرى لتحديد مؤشرات عديدة لترددات مميزة ، مستوى الاهتزاز والتغيرات المفاجئة التي يمكن الكشف عن الأضرار التي لحقت أداة القطع. وتستند هذه الدراسة على التحليل المتعدد السلالم بالموجات. النتائج المتحصل عليها و المتضمنة في هذه الورقة تظهر فعالية هذه الأساليب في الخراطة.

الكلمات المفتاحية : تآكل الأداة - قوى القطع - إشارات الاهتزازات - المؤشرات الرقمية - التحليل الترددي - التحليل المتعدد السلالم بالموجات.

### Résumé

L'influence de l'usure des outils coupants sur la qualité de l'état de surface demeure un problème principal dans un procédé d'usinage. La surveillance des processus d'usinage joue alors un rôle très important pour éviter l'apparition de certains phénomènes non désirés, tels que l'usure excessive et la rupture de l'outil. Dans ce travail, nous proposons une méthode de surveillance basée conjointement sur l'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle des signaux mesurés en tournage pour identifier l'usure de l'outil. Les objectifs principaux de ce travail sont de montrer, d'une part, la sensibilité d'indicateurs scalaires à la variation de l'usure et d'autre part de déterminer plusieurs indicateurs de l'usure à l'image des fréquences caractéristiques, du niveau vibratoire et des changements brusques qui permettent de déceler l'endommagement de l'outil de coupe. Cette dernière étude fréquentielle est basée sur une analyse multirésolution en ondelettes. Les résultats obtenus et présentés dans cet article, montrent l'efficacité de ces approches en tournage.

**Mots-clés :** Usure d'outil- Effort de coupe - Signatures vibratoires - Indicateurs scalaires - Analyse fréquentielle- Analyse multirésolution en ondelettes.

### Abstract

The influence of the cutting tools wear on the surface roughness quality remains a principal problem in a machining process. The monitoring of the machining processes plays a very significant role in the prevention of the appearance of some undesired phenomena such as excessive wear and the tool rupture. In this work, we propose a monitoring method based on both temporal and frequency analysis, of the measured signals in turning operations in order to identify tool wear. The principal objectives of this work are to show, on one hand, the sensitivity of scalar indicators to the wear variation and on the other hand the determination of several wear indicators such as the characteristic frequencies, the vibration level and the abrupt changes which can detect the damage of the cutting tool. This latest study is based on a frequency multiresolution wavelet analysis. The results obtained and presented in this paper show the effectiveness of these approaches for turning operations.

**Keywords:** Tool wear - Cutting force - Vibrations signatures - Scalar indicators - Frequential analysis - Wavelet Multiresolution analysis.

Auteur correspondant : babouri\_bmk@yahoo.fr

## 1. INTRODUCTION

L'usinage par enlèvement de matière est un des procédés de fabrication des plus importants dans l'industrie. L'usure de l'outil de coupe représente l'un des facteurs majeurs limitant une plus grande productivité associée à une meilleure qualité des produits élaborés. Pour maîtriser ceci, une connaissance approfondie du processus de coupe est nécessaire. La dégradation de l'état de l'outil influe sur la qualité des surfaces usinées, les tolérances géométriques et la tenue de l'outil dans le temps. Cette dégradation 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 la production et d'améliorer la qualité. Une technique rapide et fiable de traitement des signaux des efforts de coupe et des vibrations est 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 pour identifier quelques caractéristiques, tels que la racine carrée moyenne RMS, le Skew (SB) et le Kurtosis (KB) du signal d'EA pour la détection de l'endommagement brutal 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 *et al.*, [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 propre de l'outil est une flexion due à l'effort dans la direction d'avance et le second mode est 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 pour différentes profondeurs de passe et vitesses de coupe. Cemal Cakir et Yahya [4] 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 *et*

*al.*, [5] 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, notons que la surveillance du processus de coupe est devenue opérationnelle. Mais il est indispensable de la développer encore.

L'approche proposée dans ce travail consiste à utiliser une méthodologie numérique et expérimentale basée sur l'analyse multirésolution en ondelettes des signaux mesurés pour 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 une analyse multirésolution en ondelettes (AMRO).

## 2. EVALUATION DE L'USURE DES OUTILS DE COUPE

La surveillance des outils de coupe prend de plus en plus d'importance dans les processus d'usinage moderne. Plusieurs techniques proposées s'appuient sur les méthodes de mesures directes, alors que les méthodes de surveillance indirecte sont majoritairement utilisées. Les méthodes directes sont celles qui utilisent les effets provoqués directement par l'usure de l'outil. Ce sont des méthodes optiques et radiométriques. Les méthodes indirectes mesurent des facteurs qui sont les conséquences de l'usure d'outil.

Les méthodes d'évaluation de l'usure les plus fréquemment utilisées dans l'environnement de l'usinage industriel sont les efforts de coupe, les signatures vibratoires, etc....

### 2.1 Force de coupe

La variation de la force de coupe peut être corrélée à l'usure des outils. La force augmente considérablement lorsque l'usure de l'outil augmente [6-10]. Dans la pratique, l'application et l'interprétation de ce paramètre ont été exploitées diversement aussi bien pour l'étude des caractéristiques dynamiques du signal de force de coupe que pour

l'interprétation de sa relation pour des niveaux d'usure des outils de coupe.

**2.2 Signatures vibratoires**

Les vibrations sont générées par des variations cycliques des composantes dynamiques des forces de coupe. Habituellement, ces mouvements vibratoires commencent comme de petites oscillations responsables des dentelures sur la surface finie et des irrégularités d'épaisseur du copeau et progressent, ce qui est nommé généralement vibrations auto entretenues ou broutement. Suivant la nature des vibrations on distingue plusieurs types de vibrations, à savoir les vibrations libres, forcées, périodiques et aléatoires, auto entretenues ou non [11-15].

**3. SURVEILLANCE DES OUTILS DE COUPE**

Un dispositif de surveillance des outils de coupe permet le prélèvement d'un signal représentatif de l'état de l'outil, le traitement de ce signal et l'identification ou la détection d'éventuelle anomalie. A cet effet, le bon choix d'un dispositif de traitement des données est indispensable. Ce traitement est en fonction du capteur et de la qualité des signaux prélevés.

L'extraction des informations utiles incorporées dans ces signaux par analyse ou par filtrage, permet la détection et l'identification de l'usure de l'outil.

La tâche d'identification s'effectue habituellement avec l'étape de traitement préliminaire des données, à travers l'application de l'analyse statistique (RMS, Valeur crête, Energie, Kurtosis, Puissance,...etc.) et avec une analyse détaillée du signal (FFT ou ondelettes). L'analyse par ondelettes est un outil très efficace, car il permet une analyse adaptée à la fréquence du signal. Ceci entraîne un gain de rapidité de traitement et un gain de masse de données à conserver. C'est ce traitement que nous avons choisi d'exploiter dans notre application.

**3.1 Transformée en ondelettes**

Une ondelette mère  $\psi$  est une fonction du temps translatée et dilatée pour recouvrir le plan temps-fréquence et analyser le signal. L'ondelette doit être une fonction de moyenne nulle ; en d'autres termes,  $\psi$  doit être une onde. Ce qui s'écrit mathématiquement [16-17] :

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

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

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

La transformée en ondelettes revient alors à :

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

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

**3.2 Analyse Multirésolution en Ondelette (AMRO)**

Les ondelettes permettent de représenter un signal, de manière analogue à la représentation par des fonctions cosinus dans l'analyse de Fourier. Elles autorisent une bonne localisation, à la fois, 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 [18] 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 les détails ( $D_i$ ) correspondant aux plus hautes d'entre elles. Notons que dans cet algorithme, seules les approximations sont décomposées.

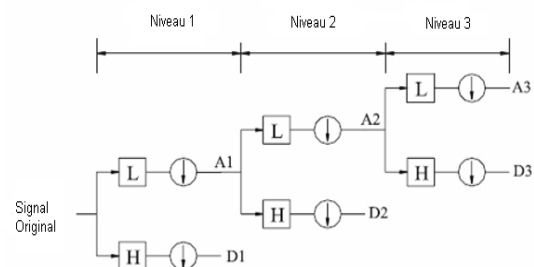


Figure 1. Décomposition en cascade pour n=3.

### 3.3 Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe consiste à filtrer le signal mesuré par un filtre passe-bande autour d'une fréquence de résonance identifiable. Le signal filtré est ensuite traité par la transformée de Hilbert, puis par la transformée de Fourier inverse.

Soit  $s(t)$  le signal temporel, la transformée de Hilbert  $\tilde{s}$  de ce signal est définie par :

$$\tilde{s}(t) = H(s(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

$$\tilde{s}(t) = s(t) * \frac{1}{\pi t}$$

Le signal obtenu est souvent appelé enveloppe à partir de laquelle on peut calculer un spectre afin d'aboutir au spectre d'enveloppe. Toutefois, il est tout à fait possible de calculer un spectre directement à partir du signal issu de la transformée de Hilbert.

### 4. DEMARCHE EXPERIMENTALE

Dans cette étude, les opérations d'usinage ont été réalisées sur un tour modèle SN40, de la société TOS TRENCIN en utilisant un outil de coupe de désignation ISO CSBNR 2525M 12 portant une plaquette de carbure non revêtue ISO 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 ;
- 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 (de la société 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 et une fréquence d'échantillonnage de 12 kHz. L'architecture expérimentale est illustrée par la figure 2.

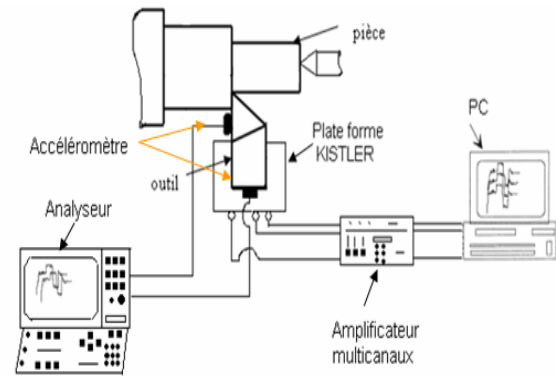


Figure 2. Architecture expérimentale.

## 5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 5.1 Evolution de la rugosité et des indicateurs scalaires en fonction de l'usure VB

Sur la figure 3, nous présentons l'évolution des trois critères de rugosité, l'écart moyen de rugosité ou arithmétique  $R_a$ , la hauteur moyenne de profil  $R_z$  et la rugosité totale  $R_t$ , de l'état de surface d'une pièce en acier Z200Cr12 usinée pour trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min, en fonction de l'usure en dépouille VB.

L'analyse de ces résultats montre que l'augmentation de l'usure VB entraîne une dégradation rapide de la qualité de la surface usinée, principalement quand la valeur de l'usure dépasse  $VB = 0.5$  mm. Cette constatation est confirmée par la représentation des indicateurs scalaires (RMS et puissance) en fonction de l'usure sur la figure 4.

Le RMS et la puissance du signal de l'effort de coupe évoluent progressivement en fonction de VB pour la vitesse 100 m/min, alors que la vitesse de coupe 190 m/min entraîne une augmentation brusque de ces deux indicateurs pour  $VB \geq 0.5$  mm. Au delà de cette valeur on constate que l'augmentation devient progressive, cela peut s'expliquer par la rupture de l'arrête de l'outil. On constate aussi que le RMS et la puissance de la composante radiale du signal de l'effort de coupe passe dans ce dernier cas ( $V_c = 190$  m/min) au dessus des deux autres composantes.

Donc, on peut conclure d'après cette analyse que la composante radiale est la plus sensible à l'usure que les deux autres composantes surtout avec l'augmentation de la vitesse de coupe.- Tout ceci va être étudié par la suite par l'analyse fréquentielle.

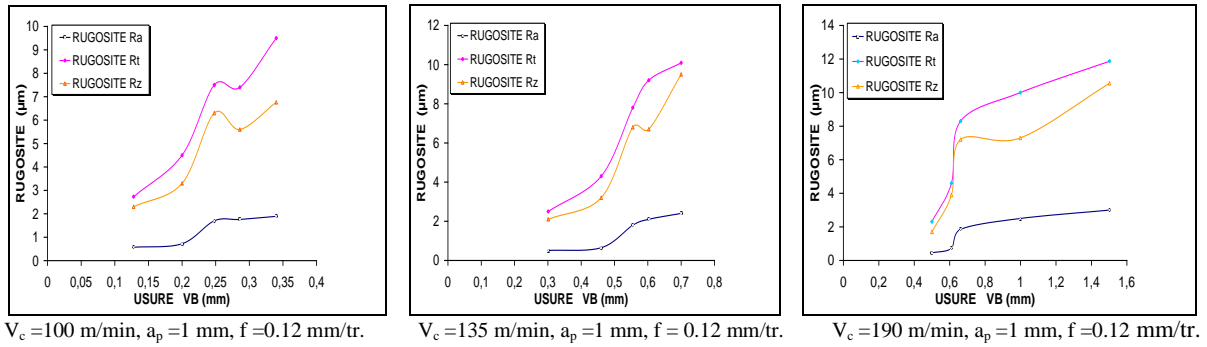


Figure 3. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour différentes vitesses de coupe.

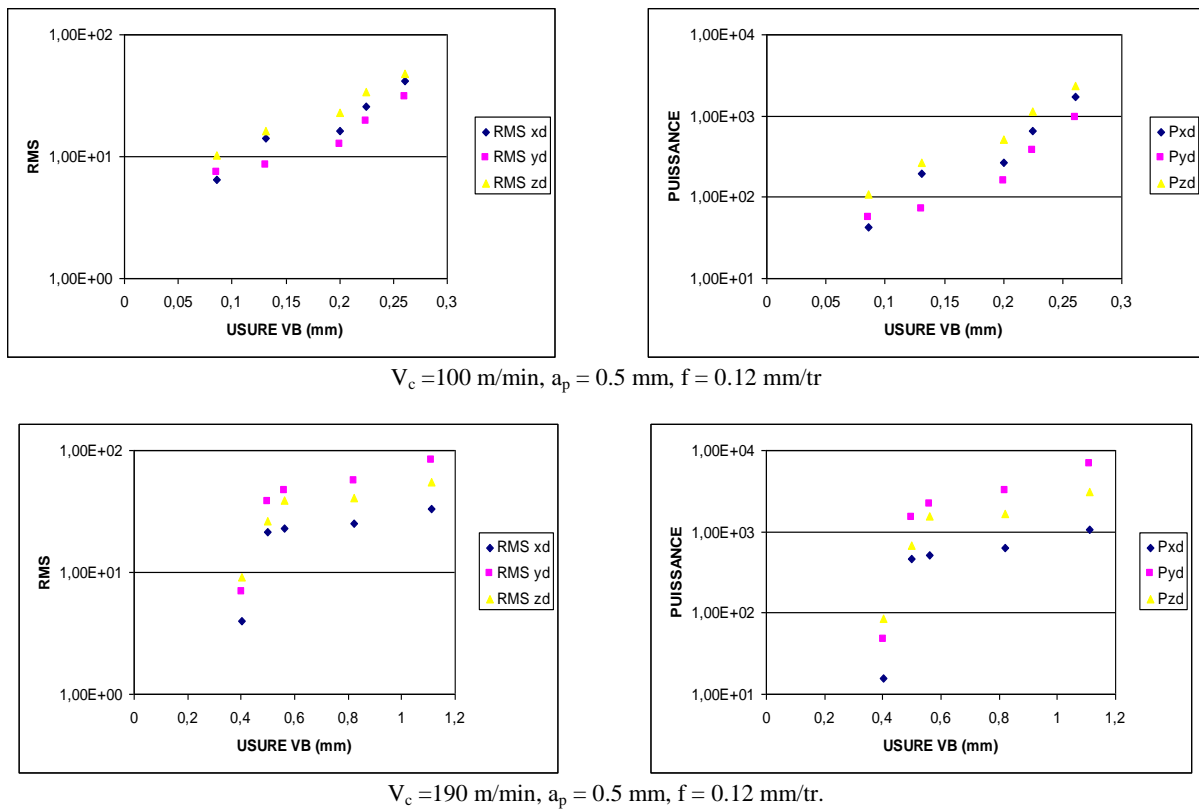


Figure 4. Indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille.

### 5.2 Analyse fréquentielle (FFT) du signal de l'effort de coupe

Vu les limites d'acquisition du système de mesure des efforts de coupe nous avons mesuré ces derniers dans la bande de fréquence [0-5] kHz. Le constructeur du dynamomètre KISTLER précise que sa bande passante se situe environ entre 0 et 1.5 kHz (Résonance vers 2 kHz). Nous n'effectuons pas de correction particulière. Donc le signal que nous prélevons de 2 à 5 kHz est atténué en amplitude mais il est juste en fréquence.

Vu la complexité des phénomènes physiques qui se produisent à l'interaction outil-pièce-machine, nous avons choisi de faire une représentation tridimensionnelle (3D) des signaux et des spectres des efforts de coupe ainsi que des accélérations en fonction de l'usure en dépouille VB afin de faciliter l'analyse des résultats.

Tableau 1. Usure en dépouille VB et en cratère KT en fonction des paramètres de coupe Vc et f.

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		0.5	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	0.12	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

Dans un premier temps, sur le tableau 1, l'usure en dépouille VB et l'usure en cratère KT, mesurées pour diverses conditions de coupe sont fournies. On peut constater la variation de l'usure d'un palier à un autre (1 à 5) définie en fonction des paramètres du régime de coupe.

L'analyse des signaux et des spectres des efforts de coupe (Fig. 5 à 7) dans la direction radiale (composante la plus sensible à l'usure) pour trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min montre :

- Une augmentation significative des amplitudes des signaux d'un palier à un autre avec l'augmentation de l'usure.
- La composante radiale de l'effort de coupe fait apparaître, d'une manière très claire, une fréquence propre très puissante à environ 4 KHz. Cette fréquence dont l'amplitude est forte bien que le signal soit atténué par notre dynamomètre peut être attribuée au premier mode propre de l'outil en flexion.
- Sur la figure 6a, on constate que l'amplitude du signal sur le premier palier est très importante, cela peut être dû à la présence de l'arête rapportée qui provoque une augmentation de l'effort de coupe [19].
- Apparition d'un certain nombre de pics à basses fréquences jusqu'à 2000 Hz qui peuvent être dus au phénomène d'usure. Les amplitudes de ces pics sont très importantes par rapport à l'amplitude de la fréquence propre du premier mode de l'outil, c'est pour cette raison que nous commençons l'axe des fréquences à partir de 1000 Hz pour faire apparaître la fréquence propre.
- L'usure apparaît d'une manière très claire pour les vitesses 135 et 190 m/min par l'augmentation très significative des amplitudes de la fréquence de résonance de l'outil en fonction de l'augmentation de l'usure. D'autre part, pour la vitesse de coupe 190 m/min, les sollicitations mécaniques et s'amplifient d'un palier à un autre et conduisent

à une usure rapide (VB et KT). Au cinquième palier l'évolution de l'usure conduit à l'effondrement de l'arête de l'outil de coupe (Fig. 7a), suivi d'une diminution des efforts de coupe due à la diminution de la profondeur de passe provoquée par le recul de l'arête de coupe par rapport à la pièce usinée. La figure 7b montre une augmentation nette de l'amplitude du pic correspondant à la fréquence propre de l'outil avec l'augmentation de l'usure.

### 5.3 Analyse AMRO du signal de l'effort de coupe

L'AMRO a été utilisée comme un outil de traitement des signaux à cause de sa propriété temps-fréquence. Ceci permet de déceler tout changement dans le signal dû à une éventuelle usure. A ce propos un programme informatique en Matlab a été conçu pour traiter les signaux expérimentaux mesurés.

Nous présentons sur la figure 8 un exemple des signaux des efforts de coupe traités par l'AMRO, qui a été exploitée pour filtrer le bruit aléatoire des signaux mesurés et les autres composantes de la machine pour avoir uniquement les signaux liés à la coupe.

A cet effet, nous donnons ici uniquement la transformée de Fourier de l'enveloppe du signal reconstruit D1. L'analyse des résultats obtenus pour les trois vitesses de coupe montre :

- Pour les trois vitesses, on constate la disparition de la fréquence de résonance de l'outil.
- Cette disparition fait apparaître deux pics l'un dans la bande [1;2] kHz et le deuxième dans [4,5;5] kHz.
- Le spectre d'enveloppe de la composante radiale de l'effort de coupe Fy pour la vitesse de coupe 100 m/min et une profondeur de passe 0,5 mm ne fait pas apparaître de pics.

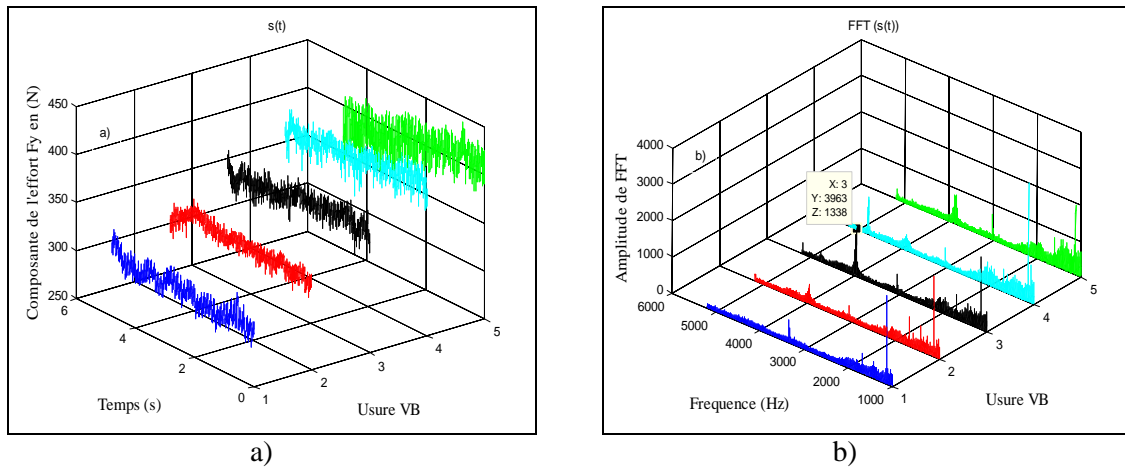


Figure 5. Effort de coupe radial ( $V_c = 100$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr) ; a) Signal temporel b) Spectre.

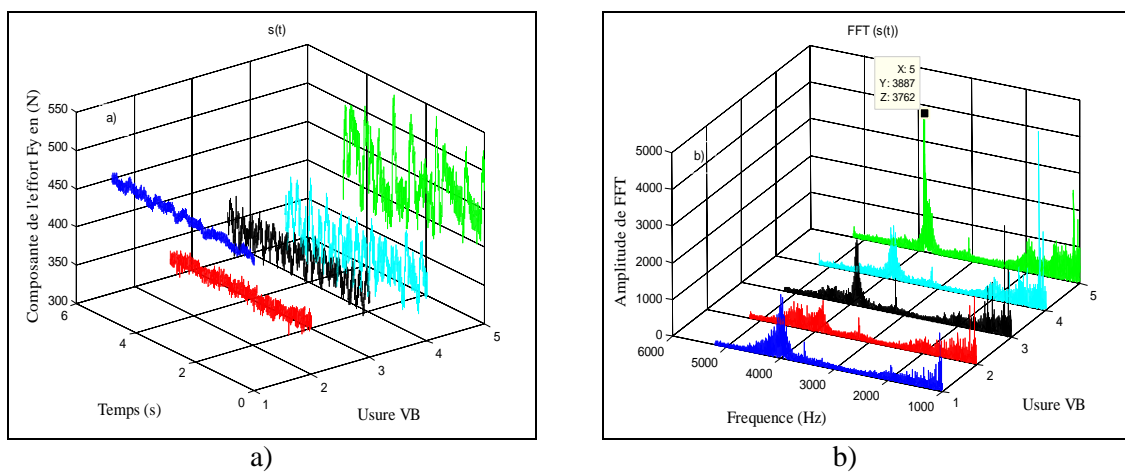


Figure 6. Effort de coupe radial ( $V_c = 135$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr) ; a) Signal temporel b) Spectre.

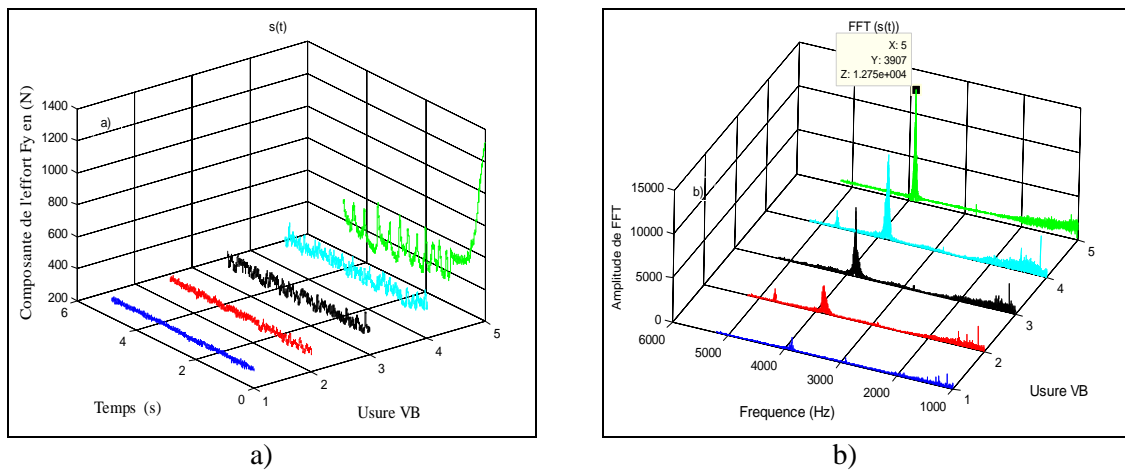


Figure 7. Effort de coupe radial ( $V_c = 190$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr) ; a) Signal temporel b) Spectre.

▪ Pour la vitesse de coupe  $V_c = 135$  m/min et une profondeur de passe de 0,5 mm, on constate l'apparition des deux pics à partir du troisième palier où  $VB \geq 0,3$  mm. On a du mal à attribuer ces pics à des phénomènes précis mais on observe qu'ils sont fixes en fréquence (1,5 et 4,8 kHz) et que leur amplitude est en forte corrélation avec l'usure VB. On constate également une diminution de l'amplitude de

ces deux pics sur le palier 5, cela peut s'expliquer par la rupture du bec de l'outil (recul de l'arête de coupe par rapport à la pièce usinée)  $VB > 0,6$  mm.

Pour la vitesse 190 m/min et une profondeur de passe de 0,5 mm, on constate les deux pics à partir du premier palier où  $VB > 0,3$  mm. Pour le dernier cas, la diminution de l'amplitude des

deux pics se produit sur le palier 4, où  $VB > 0,8$  mm.

L'augmentation de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe provoque une évolution plus rapide de l'usure en dépouille. Le niveau des amplitudes des pics augmente plusieurs fois avec l'augmentation de la vitesse de coupe surtout de 135 à 190 m/min.

En conclusion, notons que l'AMRO a permis le filtrage des signaux des efforts de coupe et a 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 renseigner sur l'évolution de l'usure de l'outil de coupe.

### 5.4 Traitement et étude des signaux des accéléromètres

Les figures 9 et 10 montrent les autospectres des signaux d'accélération délivrés par deux accéléromètres placés sur l'outil dans la direction radiale et tangentielle, respectivement. L'analyse globale des différents autospectres des deux composantes d'accélération radiale et tangentielle montre :

- Le phénomène d'usure apparaît sur toute la bande de fréquence étudiée par une augmentation du fond du spectre.
- Pour la composante radiale, on constate une décroissance des autospectres en fonction de la fréquence, la pente de décroissance diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe, sauf pour les deux derniers paliers ( $V_c = 190$  m/min) où l'usure de l'outil est catastrophique (synonyme de rupture du bec de l'outil) le niveau de l'autospectre est pratiquement le même sur toute la bande de fréquence étudiée (environ 20 dB).

- La composante tangentielle (Fig.10) montre un comportement inverse à celui de la composante radiale, où on constate une croissance du niveau de l'autospectre et dont la pente augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

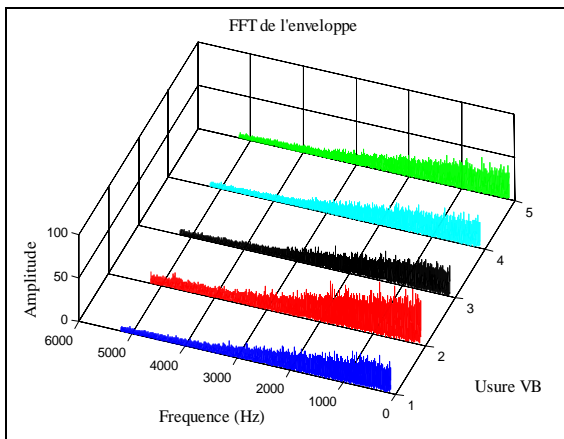
- Pour les deux composantes la variation des amplitudes des pics de fréquences situés vers 4 KHz, n'est pas très affectée par l'augmentation de l'usure.

- Principalement dans la composante tangentielle on constate l'apparition, en plus du mode de flexion de l'outil, un deuxième mode associable à la torsion [3].

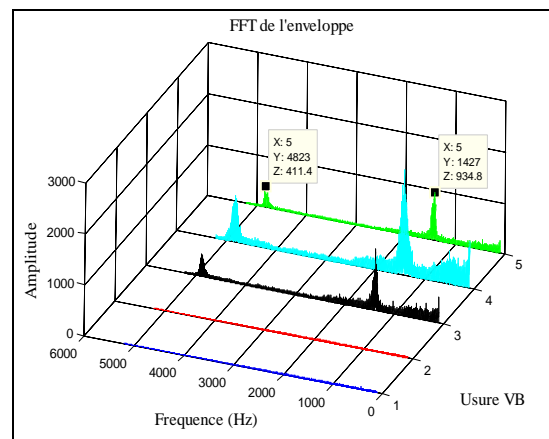
- Sur la composante tangentielle (Fig.10), on constate l'apparition de deux fréquences propres : Le premier mode est lié à la fréquence propre de l'outil dans la direction axiale (3872 Hz) et le second est attribué à la torsion de l'outil (4720 Hz).

- A l'issue de cette étude, nous avons constaté que l'énergie de l'autospectre du signal d'accélération ne dépasse pas 0 dB à part aux fréquences de résonances dans le cas où l'usure en dépouille ne dépasse pas 0,3 mm.

L'augmentation de l'usure entraîne une augmentation importante de l'énergie de l'autospectre que ce soit en dessous des fréquences propres dans la bande 0:2 kHz, ou en dessus 6:12 kHz.

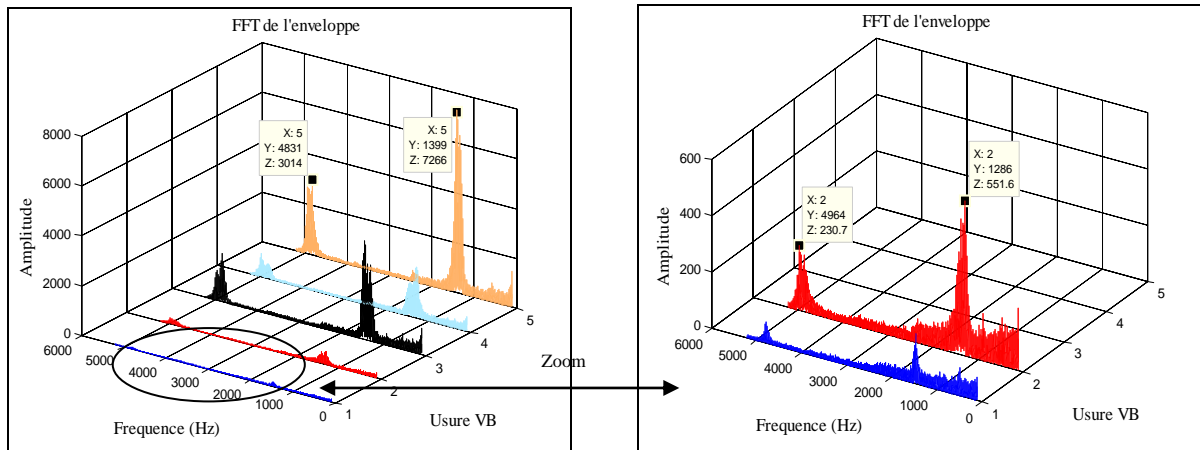


$V_c = 100$  m/min,  $a_p = 0,5$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

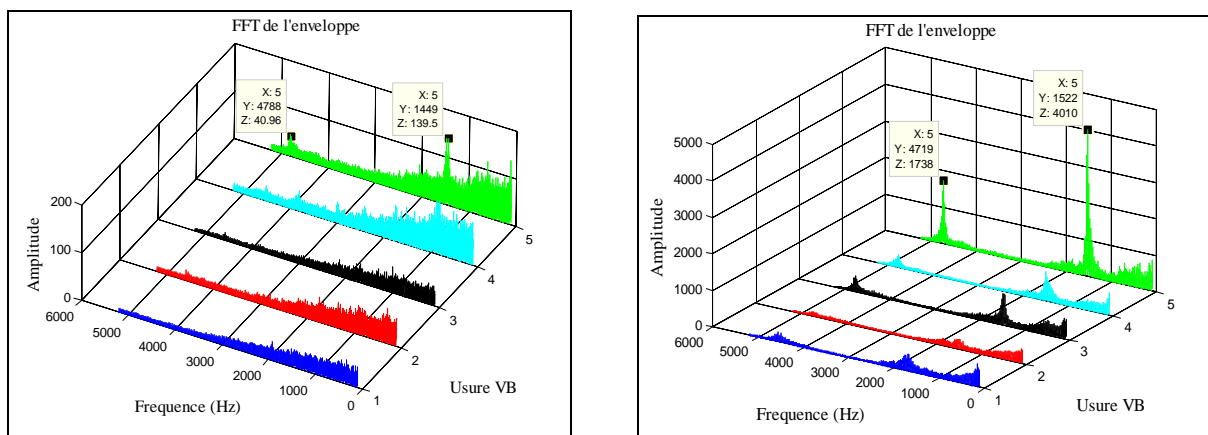


$V_c = 135$  m/min,  $a_p = 0,5$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.



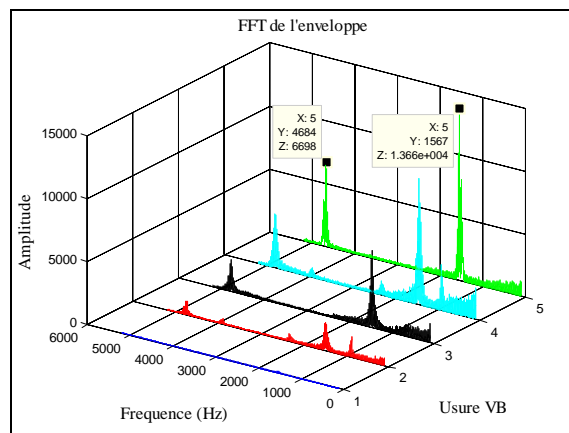


$V_c = 190$  m/min,  $a_p = 0,5$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.



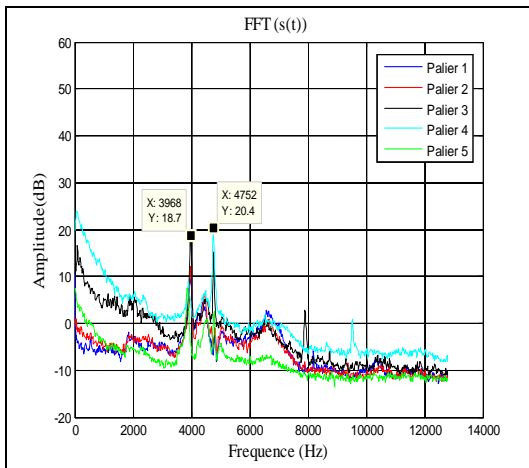
$V_c = 100$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

$V_c = 135$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

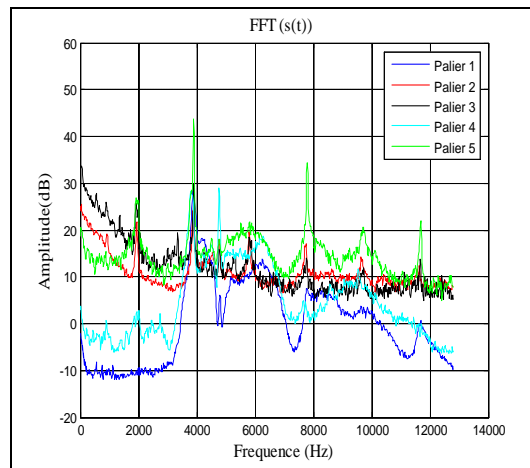


$V_c = 190$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

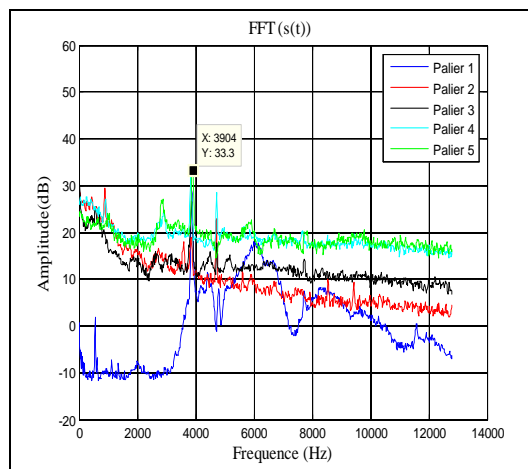
Figure 8. Les spectres d'enveloppe du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial ( $F_y$ ).



a)  $V_c = 100$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

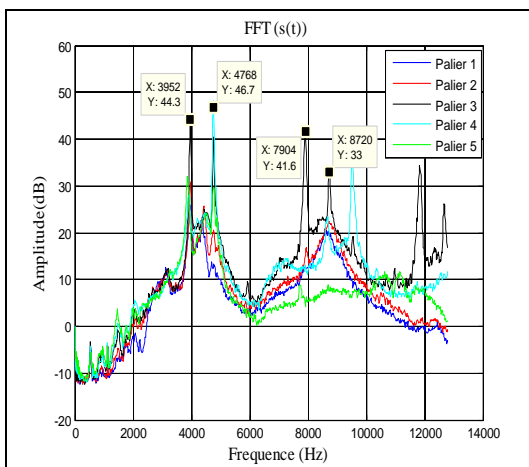


b)  $V_c = 135$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

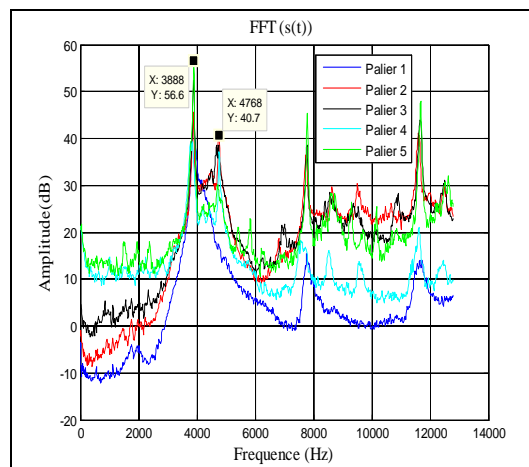


c)  $V_c = 190$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.

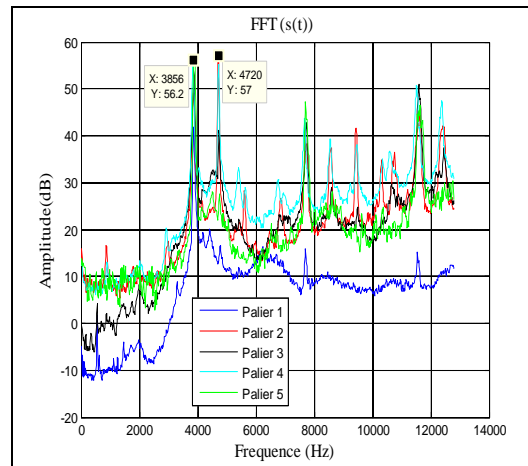
Figure 9. Les autospectres des accélérations dans la direction radiale pour les différents paliers (différentes usures en dépouille).



$V_c = 100$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.



$V_c = 135$  m/min,  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,12$  mm/tr.



$$V_c = 190 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0,12 \text{ mm/tr.}$$

Figure 10. Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle pour les différents paliers (différentes usures en dépouille).

## 6. CONCLUSION

Après cette étude, nous constatons que la surveillance de l'usure de l'outil de coupe en tournage nécessite la mise en place d'un suivi efficace. Notons que le phénomène d'usure est très complexe à suivre durant les différentes phases du processus d'usinage. Plusieurs grandeurs ont été étudiées telles que l'usure en dépouille et la rugosité, les efforts de coupes et les réponses vibratoires (accélérations radiale et tangentielle). Nous avons montré que les indicateurs scalaires tels que le RMS et la puissance des signaux de l'effort de coupe évoluent progressivement en fonction de l'usure en dépouille. Nous avons constaté aussi que la composante radiale de l'effort de coupe est la plus sensible à la variation de l'usure. Ce résultat est confirmé par l'analyse fréquentielle. L'utilisation de l'analyse multirésolution en ondelettes (AMRO) a permis le filtrage des signaux des efforts de coupe. Le spectre d'enveloppe du signal reconstruit met en évidence l'apparition de deux pics en dessous et au dessus de la fréquence de résonance de l'outil qui peut 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 de l'énergie des autospectres. Ils peuvent être de bons indicateurs et ils permettent de mettre en évidence le phénomène de broutement. L'ensemble des résultats obtenus a conduit à déterminer les changements de l'état de l'usure de l'outil, ce qui rend sa détection et son évaluation possibles.

Enfin la méthodologie de la détection de l'usure de l'outil de coupe proposée dans ce papier, notamment celle basée sur l'utilisation de l'AMRO, permet une évaluation plus fiable, plus précise mais plus précoce par rapport à ce que d'autres méthodes le permettent, basées sur les indicateurs statistiques ou de simple spectres fréquentiels.

## REFERENCES

- [1] Xiaozhi C., Beizhi L., 2007. Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 33, 968-976.
- [2] Jemielniak K., Otman O., 1998. Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals, *J. Materials Processing Technology*, Vol 76, 192-197.
- [3] Weihong L., Xeiguo G., Obikawa T., Shirakashi T., 2005. A method of recognizing tool-wear states based on a fast algorithm of wavelet transform, *J. Materials Processing Technology*, Vol. 170, 374-380.
- [4] Cemal C.M., Yahya I., 2005. Detecting tool breakage in turning aisi 1050 steel using coated and uncoated cutting tools, *J. Materials Processing Technology*, Vol. 159, 191-198.
- [5] Zhou J.M., Andersson M., Ståhl J.E., 1995. A system for monitoring cutting tool spontaneous failure based on stress estimation, *J. Materials Processing Technology*, Vol. 48, 231.

- [6] Dimla D.E., 2000. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations a review of methods, *Int. J. Machine Tools and Manuf.*, Vol. 40, 1073-1098.
- [7] Choi D., Kwon W.T., Chu C.N., 1999. Real-time monitoring of tool fracture in turning using sensor fusion, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 15 (5), 305-310.
- [8] Jae-seob K., 2006. Application of wavelet transform technique to detect tool failure in turning operations, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 28, 1078-1083.
- [9] Yahya I., Cemal Cakir M., 2005. Finite element analysis of cutting tools prior to fracture in hard turning operations, *Materials and design*, Vol. 26, 105-112.
- [10] Blum T., Inasaki I., 1990. A study on acoustic emission from the orthogonal cutting process, *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112 (3), 203-211.
- [11] Liang S.Y., Kwon Y.K., 2004. Chiou R.Y., Modelling the effect of flank wear on machining thrust stability, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 23, 857-864.
- [12] Chelladurai H., Jain V.K., Vyas N.S., 2008. Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 37 (5-6), 471-485.
- [13] Arnaud D., Daniel D., 2007. Tool vibration detection with eddy current sensors in machining process and computation of stability lobes using fuzzy classifiers, *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 21, 441-456.
- [14] Dimla D.E., Lister P.M., 2000. On-line metal cutting tool condition monitoring-I: Force and vibration analyses, *Int. J. Machine Tools and Manuf.*, Vol. 40 (5), 739-768.
- [15] Scheffer C., Heyns P.S., 2001. Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements, *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 15(6), 1185-1202.
- [16] Djebala A., Ouelaa N., Hamzaoui N., 2008. Detection of rolling bearing defects using discrete wavelet analysis, *Meccanica*, Vol. 43, 339-348.
- [17] Djebala A., Oualaa N., Hamzaoui N., 2007. Optimisation de l'analyse multirésolution en ondelettes des signaux de chocs. Application aux signaux engendrés par des roulements défectueux, *Mécanique et Industries*, Vol. 4 (8), 379-389.
- [18] Mallat S., 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machines Intelligence*, Vol. 11 (7), 674-693.
- [19] Yallese M. A., 2005. Etude du comportement à l'usure des matériaux de coupe modernes en tournage dur, Thèse de Doctorat d'état en Génie Mécanique, option Productique, Université Badji Mokhtar Annaba, Algérie.170p.