

Contribution à l'amélioration de la surveillance de l'usure de l'outil de coupe en tournage par analyse des signaux vibratoires : Analyse de puissance de coupe

[Contribution to the improvement of the usury surveillance of the turning cutting device by the analysis of vibrating signals: Analysis of the cutting device power]

Jean Claude Mukaz Ilunga¹, Dany Katamba Mpoyi², and Moise Avoci Ugwir²

¹Institut Supérieur de Techniques Appliquées, Kinshasa, RD Congo

²Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RD Congo

Copyright © 2018 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This work is based on the analysis of vibrations generated during the classical shooting. The main objective is to improve the surveillance of the cutting device usury during its three phases of life. This analysis aims to demonstrate if there is a relation between the evolution of the usury and the measured length(vibrations)during the machining. To succeed , we have made many great campaigns by using tools in platelet and the monobloc in metallic carbureted engine. Thus, generated vibrations during the machining operations have been registered, following two axes on the machine tool thanks to the mono axial accelerometer situated on the turret. The first is oriented following the vertical direction x (radial), the second following z(axial) and parallel to cut effort. These directions have been qualified of privileged directions . however signals have been treated via two methods ; temporal method based on statistic indicators (RMS, kurtosis, skewness, variance, average) and frequential method. Furthermore,, we'll measure the electrical power and we have visualized and measured the width of the usury thanks to an optic microscope. Finally, the proposed methods in this work have permitted to determine the vibrating level of the signal and pertinent indicators permitting a surveillance of the tool usury of the classical turning cut.

KEYWORDS: turning, cutting tool, usury tool surveillance, vibrating analysis, power cut analysis.

RESUME: Ce travail est basé sur l'analyse des vibrations générées pendant le tournage classique. L'objectif principal est d'améliorer la surveillance de l'usure de l'outil de coupe pendant ces trois phases de vie. Cette analyse vise à démontrer s'il y a une relation entre l'évolution de l'usure et les grandeurs mesurées (vibrations) pendant l'usinage. Pour y arriver nous avons effectué plusieurs campagnes de mesure en utilisant les outils en plaquette et le monobloc en carbure métallique. Ainsi les vibrations générées pendant les opérations d'usinage ont été enregistrées, suivant deux axes sur la machine-outil à l'aide de deux accéléromètres mono axial positionnés sur la tourelle. Le premier est orienté suivant la direction verticale X (radiale), le second suivant Z(axiale) et parallèle à l'effort de coupe. Ces directions ont été qualifiées de directions privilégiées. Cependant les signaux ont été traités via deux méthodes : la méthode temporelle basée sur les indicateurs statistiques (RMS, Kurtosis, skweness, variance, moyenne) et la méthode fréquentielle. Par ailleurs nous allons mesurer la puissance électrique et nous avons visualisé et mesuré la largeur de l'usure en dépouille à l'aide d'un microscope optique. Enfin les méthodes proposées dans ce travail ont permis de déterminer le niveau vibratoire du signal et des indicateurs pertinents permettant une surveillance de l'usure de l'outil de coupe en tournage classique.

MOTS-CLEFS: tournage, outil de coupe, surveillance de l'usure d'outil, analyse vibratoire, analyse de la puissance de coupe.

1 INTRODUCTION

L'usinage par enlèvement de matière est un procédé de fabrication le plus important dans l'industrie mécanique ou les opérations de coupe sont basées sur l'usinage à grande vitesse (UGV) sont largement utilisées les pièces dans une large gamme d'applications (de l'aérospatiale à l'industrie mécanique) [1]. La minimisation de couts se présente comme une exigence incontournable dans tous les secteurs de production, car avec la mondialisation de l'économie seuls les produits réalisés à un cout raisonnable peuvent encore trouver leur place sur les marchés. L'état de l'outil et sa durée de vie sont des composantes critiques du cout d'usinage [2]. Il est donc important de pouvoir élaborer un moyen de détection d'usure et de prédiction de la durée de vie de l'outil pour une gestion rationnelle du temps de production, Les tolérances dimensionnelles et la qualité des pièces usinées en dépendent.

Il ne sera pas question d'empêcher l'usure qui est un phénomène inhérent à tout processus de coupe vu les niveaux de contraintes, de frottement et de température auxquels l'outil est soumis. Mais une méthode permettant la détection de l'apparition de l'usure et son évolution est un réel besoin dans le cadre d'une politique « **juste à temps** » de changement d'outil [3,4].

Les trois principaux mécanismes responsables de l'usure des outils de coupe sont l'adhésion, l'abrasion et la diffusion [5]. La durée de vie de l'outil de coupe est principalement liée au développement de deux types d'usures : l'usure en face de dépouille et l'usure en caractère. La première est due aux frottements entre la matière et la face de coupe de l'outil, tandis que la seconde est induite par le contact entre les copeaux et la face d'attaque [6].

Plusieurs travaux ont proposé d'exploiter différents types de signaux issus de l'usinage tels que les efforts de coupe [7], l'émission acoustique [8], et les vibrations [9,10,11] dans le but d'en extraire l'information nécessaire pour réaliser une surveillance efficace. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été adoptées, notamment les méthodes fréquentielles, temporelles, statistiques et l'analyse conjointe temps-fréquence.

Les méthodes de surveillance d'outils sont généralement classées en deux groupes dont :

- 1) Les méthodes directes où l'usure est directement mesurée en utilisant des capteurs optiques, radioactifs ou des capteurs basés sur la résistance électrique ;
- 2) Les méthodes indirectes qui procèdent par une évaluation de l'usure sur base des paramètres mesurées pendant le processus de coupe : l'effort de coupe, l'émission acoustique ou les vibrations.

Toutes ces méthodes peuvent être classées en méthodes on-line appliquées pendant la coupe et en méthodes off-line où l'on interrompt le processus pour procéder au Contrôle.

2 EVALUATION DE LA DUREE DE VIE D'UN OUTIL DE COUPE

La définition de la durée de vie d'un outil selon la norme ISO 8688 : « C'est le temps coupe total de l'outil pour atteindre une valeur spécifiée de critère de durée de vie ».

Dans les conditions d'usinage normales, l'usure en dépouille est considérée comme l'usure prépondérante. Le développement de ce type d'usure sur une plaquette de coupe n'est pas un phénomène aléatoire, mais on peut observer trois phases au cours de la vie de l'outil (rodage, usure stabilisée et usure accélérée) [6].

Si la frange de cette usure est uniforme, il est conseillé d'accepter une largeur d'usure, notée V_b , égale à 0.3 mm. Si non, la limite admissible est fixée à 0.6 mm [14]. Dans notre cas, l'évolution limite admissible est fixé à 0.3 mm.

3 METHODES D'ANALYSE DES VIBRATIONS

Il existe différents outils d'analyse vibratoire permettant de détecter et de diagnostiquer l'apparition précoce des défauts. Elles sont généralement classées en deux grandes familles, analyse temporelle et fréquentielle.

L'analyse temporelle est basée sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut.

L'analyse du contenu fréquentiel est basée sur la transformation de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques.

3.1 ANALYSE DANS LE DOMAINE TEMPOREL

En surveillance vibratoire, les outils les plus simples pour la détection sont basés sur les inducteurs extraits dans le domaine temporel. Dans le domaine temporel, les indicateurs sont généralement définis sur base des moments statique [12].

$$F(x) = P(X < x) \quad (1)$$

la fonction de densité de probabilité est:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (2)$$

L'espérance mathématique d'une fonction $g(x)$ est l'intégrale

$$E\{g(x)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)f(x)dx \quad (3)$$

on définit la fonction caractéristique de variable aléatoire comme la transformé de Fourier de sa fonction de densité de probabilité $f(x)$ moyennant un changement de signe. Elle est donnée par:

$$\Phi(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{jwx}f(x)dx = E\{e^{jwx}\} \quad (4)$$

Cette fonction est aussi appelée *fonction de génération des moments statistiques*. En effet, les moment sont les coefficients de puissance de jw dans son développement en série de Taylor

$$E\{e^{(jwx)}\} = E\left\{1 + (jw)x + \frac{(jw)^2x^2}{2!} + \frac{(jw)^3x^3}{3!} + \dots\right\} \quad (5)$$

Soit encore

$$E\{e^{(jwx)}\} = 1 + (jw)E\{x\} + \frac{(jw)^2}{2!}E\{x^2\} + \frac{(jw)^3}{3!}E\{x^3\} + \dots \quad (6)$$

Les moments d'ordre n sont:

$$E\{x^n\} m_n \quad (7)$$

On pourra aisément remarquer que les moments sont des dérivées de la fonction caractéristique par rapport à jw et calculées au point $w=0$

$$m_n = \frac{d^n\Phi(0)}{d(jw)^n} \quad (8)$$

La transformation consistera à représenter le signal temporel dans l'espace d'indicateurs basés sur les moments statistiques dont les plus utilisés sont :

3.1.1 LA VALEUR EFFICACE (RMS)

temporel qui mesure le contenu énergétique dans un signal vibratoire. Pour une série temporelle $\{x_i\}$ longueur n , la valeur efficace s'exprime par:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Où \bar{x} est la valeur moyenne de $\{x_i\}$. la valeur de RMS est la racine carrée du deuxième moment statistique m_2 . la valeur efficace calculées ont des bandes fréquentielles données peuvent servir d'indicateurs particulièrement simple à utiliser [13]: on considère généralement un ensemble de quatre à dix bandes de fréquences pour leur définition. Pour un signal aléatoire, la fonction de répartition des amplitudes suit une *loi normale* de moyenne nulle et d'écart-type sigma. La valeur efficace RMS doit être égale 1/3 de la valeur crête.

3.1.2 COEFFICIENT D'ASYMETRIE (SKEWNESS)

Il caractérise le degré de dissymétrie d'une distribution autour de la moyenne. il est calculé

$$Skew = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{RMS} \right)^3 \quad (10)$$

Pour un système mécanique le signal vibratoire de bon fonctionnement à une distribution qui suit la loi normale. Le Skewness doit être égale à zéro par contre l'apparition d'un défaut modifie l'allure de sa distribution et si nous observerons une déviation de la loi normale le skewness sera différent de zéro par contre l'apparition d'un défaut modifie l'allure de sa distribution et si nous observerons une déviation de la *loi normale* le skewness sera différent de zéro.

3.1.3 COEFFICIENT D'APLATISSEMENT (KURTOSIS)

Il est un indicateur de la proportion d'échantillons qui s'écartent faiblement de la valeur moyenne comparée à ceux qui s'en écartent largement. l'allure aplatie d'une distribution par rapport à la distribution normale est calculé par:

$$Kurt = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{RMS} \right)^4 - 3 \quad (11)$$

La présence d'un terme de puissance 4 donne un poids considérable aux amplitudes élevées. le *kurtosis* permet de détecter l'apparition de chocs et suivre l'évolution des défauts induisant des forces impulsionnelles périodiques. la valeur du Kurtosis est de 1,5 pour un signal harmonique et de 3 pour un signal aléatoire. Pour un outil en bon état, la valeur du Kurtosis est de l'ordre de 3 (entre 2,75 et 3,25) alors qu'elle s'approche de 4 lorsque l'outil se détériore.

3.1.4 FACTEUR DE CRETE FC

Le facteur de crête est un des indicateurs spécifiques qui accentuent l'apparition de chocs dans les vibrations. Les pics dans le signal temporel correspondront à un accroissement du facteur de crête. Cet indicateur, comme le kurtosis, est utilisé pour la détection des anomalies qui se traduisent par des chocs liés par exemple au contact de surfaces dégradées [14]. Dès l'apparition du défaut, l'augmentation des chocs induit la croissance du niveau de crête alors que la valeur efficace évolue de manière moins marquée. Il en résulte une augmentation significative du facteur de crête. Le facteur de crête est donné par:

$$FC = \frac{\max(x_i)}{RMS} \quad (12)$$

Si une dégradation survient, la vibration devient alors aléatoire et le rapport de crête devient supérieur à 3. Le suivi du rapport de crête permet donc détecter les apparitions de défauts, sans toutefois permettre d'en diagnostiquer la source.

An fi de mieux capturer le contenu informationnel les signaux de vibration, il est toujours conseillé, been qu'étant dans le domaine temporel, d'extraire les indicateurs suivant des plages fréquentielles judicieusement choisies. Dans cet objectif, les filtres analogiques et digitaux fourniront un traitement adéquat au signal.

Pour que ces indicateurs puissent être comparés, il faut veiller à ce que les échantillons temporels soient filtrés dans des conditions rigoureusement identiques; il a en effet été constaté que les caractéristiques d'un filtre influencent fortement la valeur des niveaux extrêmes. De plus, la comparaison de valeur de crête ne put être logiquement effectuée que sur des échantillons de même durée, si le signal comporte une composante aléatoire. Un facteur crête supérieur à 6 est caractéristique de l'apparition de forces impulsionnelles [15].

3.2 ANALYSE DANS LE DOMAINE FRÉQUENTIEL

L'intérêt de cette analyse est donc d'éliminer les bruits qui perturbent la lecture du signal (climatique, par exemple) dont témoigne une courbe, et de distinguer les différents éléments qui interfèrent dans la composition de ce signal. La transformation de Fourier est l'une des méthodes utilisées fréquemment en analyse spectrale [16].

L'analyse spectrale « en fréquence » est devenue l'outil fondamental pour le traitement des signaux vibratoires. Elle s'appuie sur la transformée de Fourier:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (13)$$

Où $x(f)$ est la transformée de Fourier, t est la variable de temps, f est la variable fréquence qui permet le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel. Cette représentation permet de connaître le contenu spectral d'énergie ou de puissance, présent dans le signal à la fréquence f , et donc de détecter la présence d'un défaut générant un choc périodique à une fréquence de défaut.

Dans la pratique, on utilise la transformée de Fourier discrète rapide (FFT) sur des signaux numérisés:

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} |X(f)|^2 df \quad (14)$$

permet de rendre compte du fait que, le premier membre étant par définition l'énergie temporelle du signal, $|X(f)|^2$ s'interprète comme la distribution de l'énergie le long de l'axe des fréquences. On appelle densité spectrale de puissance (DSP) ou spectre de puissance, le carré du module de la transformée de Fourier, rapportée au temps d'observation. Elle présente l'avantage d'être corrélée à la sévérité d'un défaut. Elle est la représentation fréquentielle (spectre de puissance) la plus utilisée dans le diagnostic vibratoire des éléments des machines tournantes, des roulements, des outils de coupe, etc...

$$DSP(f) = \frac{|X(f)|^2}{d} \quad (15)$$

Où $DSP(f)$ est la densité spectrale de puissance, $X(f)$ est la transformée de Fourier du signal, d est la durée d'observation. La mesure n'étant réalisée que sur un échantillon de signal de durée finie, la précision se trouve limitée. Le spectre est constitué de raies élargies, entourées de lobes latéraux. Il faut donc nécessairement introduire une fenêtre de pondération pour réduire l'effet des ondulations dues à la troncature du signal:

$$DSP_p(f) = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(k) - x(k)e^{j2\pi fk} \right|^2 \quad (16)$$

Où est la densité spectrale de puissance pondérée, $x(k)$ représente le signal discret à analyser, $f(k)$ la fenêtre de pondération, N le nombre d'échantillons prélevés dans le signal temporel.

4 ETUDE EXPÉRIMENTALE

4.1 CADRE DE L'ÉTUDE

Les essais d'usinage ont été réalisés à l'atelier mécanique de l'institut supérieure des techniques appliquées (ISTA) sur un tour classique de marque HYDROGALLIC, elle porte un moteur Siemens à deux vitesses de puissance de 10 cv alimenté en triphasé 3x220, un mandrin 250 mm, alésage de broche de 45 mm, les vitesses de broche correspondantes sont :40 à 2000 tours/min avec une avance de travail de 0,005 à 4,5 mm avec le poids net approximatif de 2200 Kg. Le matériaux choisi est un acier dur, les dimensions du cylindre usiné sont 300 mm de longueur et 50 de diamètre nous avons utilisé les outils en plaquette et le monobloc en carbure métallique.



Fig. 1. Système d'acquisition

4.2 DISPOSITIF D'ACQUISITION

4.2.1 CAPTEURS ET ACQUISITION DES SIGNAUX VIBRATOIRES

Dans notre démarche expérimentale, le premier problème à résoudre sur site est le positionnement des capteurs. Ce dernier est défini selon les contraintes d'installation suivantes: à proximité de la zone de coupe, Independent du changement de l'outil et sur une partie fixe de la machine. Cependant, Plusieurs endroits de la machine sont inaccessibles ce qui limite le nombre de capteur et leur positionnement. Dans cet esprit, l'accéléromètre utilisé est fixé sur la tourelle afin de mesurer les réponses vibratoires dans l'outil de coupe selon les deux axes de la machine:

- Le premier est orienté suivant la direction verticale X (radiale);
- Et le deuxième suivant la direction de Z (axiale) au plan de la tourelle et parallèle à l'effort de coupe.



Fig. 2. Positionnement des capteurs

La mesure des signaux accélérométriques en cours d'usinage a été réalisée à l'aide d'une chaîne d'acquisition composée d'un accéléromètre piézoélectrique mono-axial de type et d'un système d'acquisition de National Instrument (NI) dont le Compact DAQ sur lequel nous avons monté le module 9233 pour le conditionnement de ces signaux est piloté par le logiciel LABVIEW qui nous a permis de programmer l'interface d'acquisition, la fréquence d'échantillonnage est de 25000 Hz, et les nombres d'échantillon de 250000 Hz ainsi nous avons enregistré les réponses générées au cours d'un usinage dans son intégralité.



Fig. 3. Module NI d'acquisition Compact DAQ

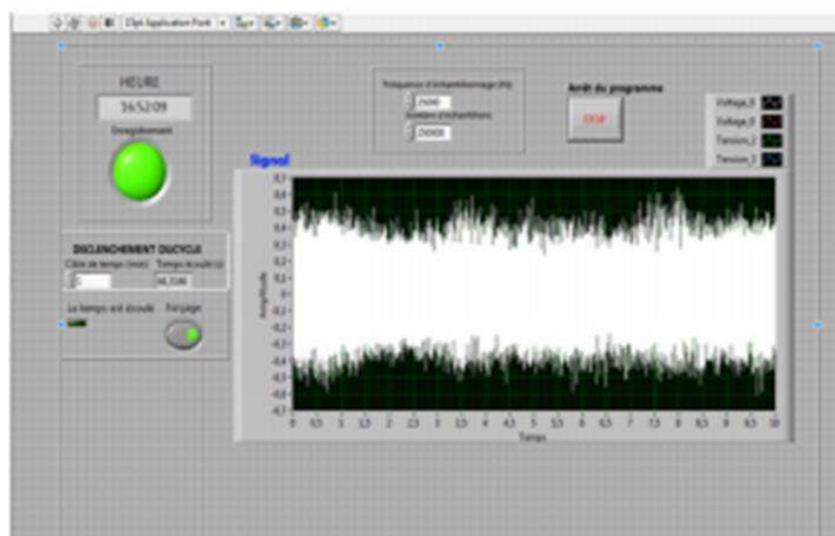


Fig. 4. Interface d'acquisition

4.2.2 MICROSCOPE OPTIQUE

Afin de mieux cerner le comportement dynamique associé à l'usinage, une expertise ex-situ a systématiquement été effectuée. Cette expertise a consisté en une observation au microscope optique à grossissement jusqu'à 4 fois la taille réelle avec une incertitude de mesure de 2%. Ceci afin de mesurer l'usure en d'épouille de nos outils de coupe (plaquette, monobloc).

4.2.3 PROCÉDURE DES TESTS

Les campagnes de mesures vibratoire sont effectuée sur trois phases principales de fonctionnement caractérisant l'état de l'outil de coupe: Outil neuve(N), Faible usure(U1), Usure avancée (U2) en variant le paramètre de coupe (vitesse de coupe, avance, passe) sans lubrification à sec et avec un montage mixte (entre mandrin et pointe).

Les essais de chariotage ont été réalisés sur une ébauche cylindrique de longueur 160mm et avec un diamètre 60mm pour un acier dur AISI 52100(66HRC).

5 INDICATEURS ET QUELQUES SPECTRES CARACTÉRISTIQUES

La figure 4 présente le filtrage d'un signal du fonctionnement de l'outil à l'état neuf par le moyen du filtre butterwoth d'ordre 5.

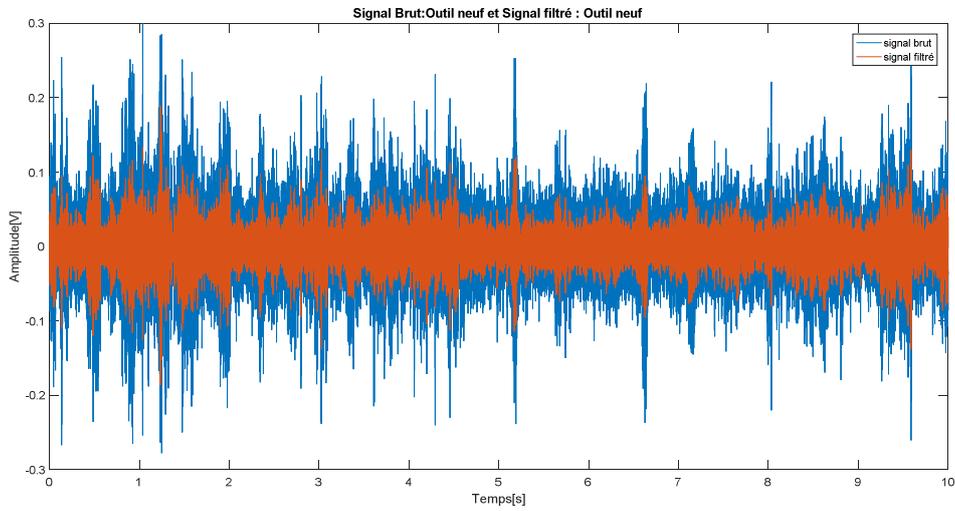


Fig. 5. Signal brut (blue) et filtré(rouge)

Sur la figure 5 on retrouve différents indicateurs temporels :

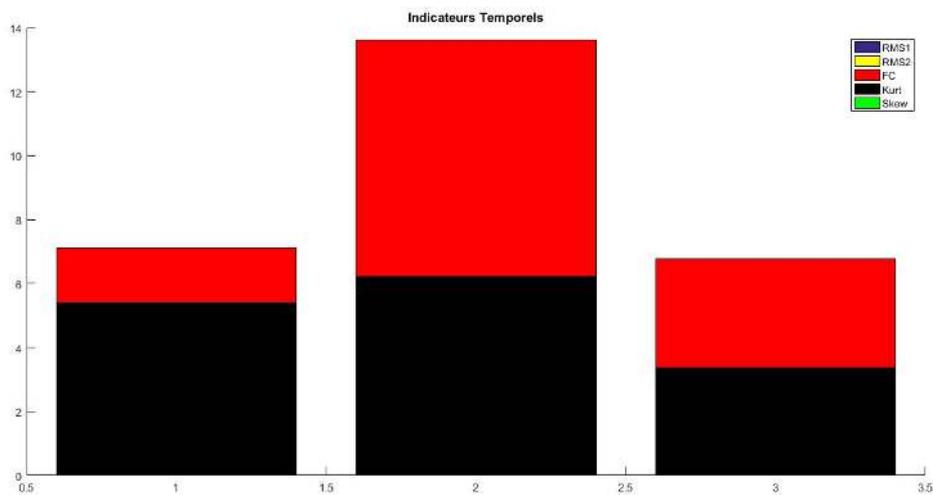


Fig. 6. Indicateurs temporel

La figure 6 montre que l'essentiel de l'information se trouve contenu dans les composantes fréquentielles entre 4 et 6 kHz.

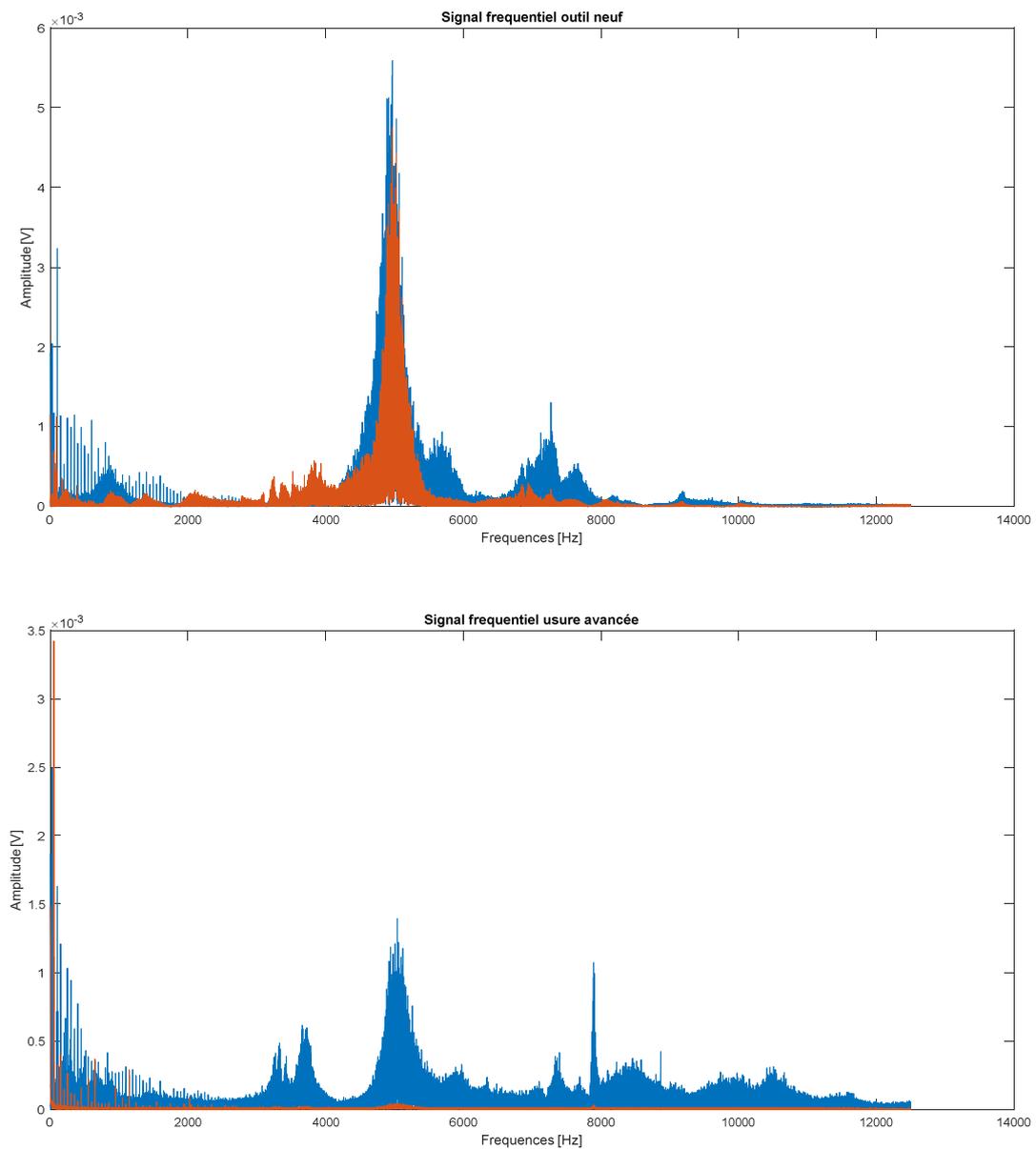


Fig. 7. Quelques spectres fréquentiel du processus de tournage

6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

6.1 CONTRÔLE DIRECT DE L'OUTIL DE COUPE

La campagne expérimentale décrite précédemment nous a permis de prélever plusieurs observations depuis l'état neuf de la plaquette (figure 5-a) jusqu'à sa destruction (figure 5-b).

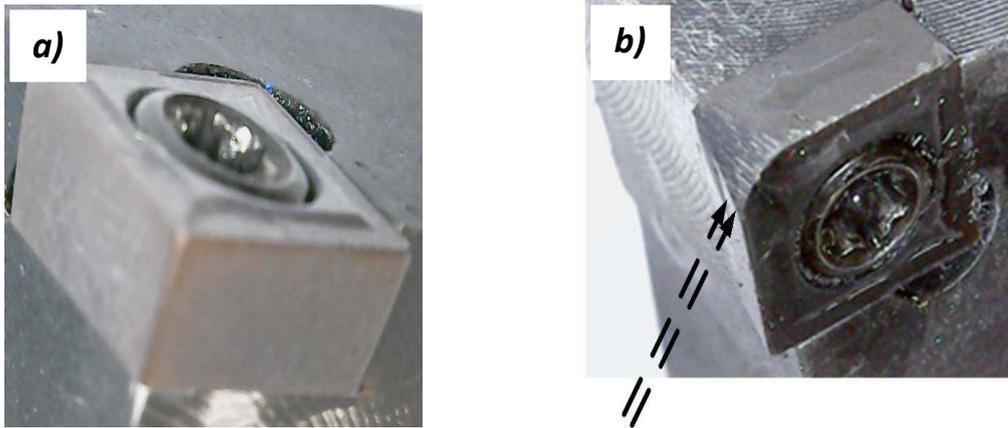


Fig. 8. Image de la plaquette neuve et usée

6.2 RESULTATS ISSUES DES VIBRATIONS

Deux domaines de traitement (temporel et fréquentiel) ont été exploités sur l'ensemble de données présentées ci-haut.

7 CONCLUSION

La surveillance de l'usure d'outils par des méthodes indirectes demeure un champ d'investigation ouvert, particulièrement pour la détermination du type de signal à utiliser et le traitement à lui imposer pour l'extraction d'indicateurs. Cette étude s'est essentiellement intéressée à l'état de l'outil.

Cette étude a mis en évidence deux aspects importants : la forte richesse en information des composantes hautes fréquences des signaux vibratoires et la robustesse des indicateurs définis qui prouve la possibilité de s'affranchir du bruit inutile par un filtrage passe-bande.

REFERENCES

- [1] W. Rmili, Roger Serra, A. Ouahabi, Suivi d'usure des outils de coupe en tournage par analyse vibratoire, ResearchGate, June 2006.
- [2] B. KILUNDU, Erkki Jantunen, Indirect multi signal monitoring and diagnosis of drill wear, PhD thesis, Helsinki University of technology, Janvier 2006
- [3] C.S. Lee, D.A. Dornfeld, Design and implementation of sensor-based tool-wear monitoring systems, Mechanical Systems and Signal Processing, 10(1996)328--347
- [4] M. NOUARI, "Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage à grande vitesse", thèse de doctorat de l'université de technologie de Metz, 2000.
- [5] S. ZIEBA, "Une méthode de suivi évolutif. Application au diagnostic de la qualité d'usinage" thèse de doctorat de l'université de technologie de Compiègne, 1995.
- [6] X. LI, "A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning", Machine Tools & Manufacture, 42, 2002, pp. 29-34.
- [7] E. KULJANIC, M. SORTINO, "A method based on cutting forces monitoring tool wear in face milling", Machine Tools and Manufacture, 45, 2005, pp. 29-34.
- [8] P. MARTIN, "influence de l'usure d'un outil de tour sur les vibratoires entretenues en coupe", Thèse de doctorat de l'université de Nancy I, 1973.
- [9] C. SCHEFFER, P.S HEYNS, "wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements", Mechanical systems and Signal Processing, 15(6), 2001, pp.1185-1202.
- [10] A. OUAHABI, W. RMILI, R. SERRA, C. GONTIER "Vibratory analysis for tool wear monitoring during machining (Turning, Milling)", 5th International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Senlis, France, Octobre 2004.
- [11] A. PAPOULIS, McGrawHill, Probability Random Variables and Stochastic Processes, 1965.
- [12] T. TOUTOUNTZAKIS et D.MBA, observations of acoustic measurement methods for the Detection of defects in rolling element bearings, Tribology International, 2003.

- [13] J. P DRON, F. BOLAERS et RASOLOFONDRAIBE, Optimisation de la détection de défauts de roulement par débruitage des signaux par soustraction spectrale, Mécanique et industries, 2003.
- [14] CHOUIKHI NADJETTE, Diagnostic des états de surface par analyse vibratoire dans les procédés d'usinage, université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2008.
- [15] Frank P. Bowden et David Tabor, Introduction à la tribologie, nature et comportement des surfaces frottantes, aspects géométriques, Heinemann, 1073.