



**HAL**  
open science

## Suivi de l'usure des outils de coupe en tournage à sec de la fonte FT25 par analyse vibratoire

Roger Serra, Wafaa Rmili, Abdeldjalil Ouahabi

### ► To cite this version:

Roger Serra, Wafaa Rmili, Abdeldjalil Ouahabi. Suivi de l'usure des outils de coupe en tournage à sec de la fonte FT25 par analyse vibratoire. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391441

**HAL Id: hal-03391441**

**<https://hal.science/hal-03391441>**

Submitted on 21 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Suivi de l'usure des outils de coupe en tournage à sec de la fonte FT25 par analyse vibratoire

R. SERRA<sup>a</sup>, W. RMILI<sup>b</sup>, A. OUAHABI<sup>c</sup>

a. ENI Val de Loire (ENIVL), Laboratoire de Mécanique et Rhéologie - E.A. 2640, Rue de la chocolaterie, B.P. 3410, 41034 Blois Cedex

b. Université François Rabelais, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie - E.A. 2640, 7 Avenue Marcel Dassault, 37200 Tours

c. Université François Rabelais, Groupe Signal et Image, 7 Avenue Marcel Dassault - 37200 Tours

## Résumé :

Le travail présenté porte sur l'analyse des signatures vibratoires générées en tournage à sec de la fonte FT25 afin de suivre l'usure des outils de coupe. Cette analyse vibratoire vise à identifier le lien existant entre l'état vibratoire du système usinant et l'état d'usure de l'outil de coupe au cours de son utilisation. Pour atteindre cet objectif, trente plaquettes de coupe, issues d'un même lot de fabrication, ont été utilisées pour une même opération d'usinage et pour des conditions de coupe identiques. Ainsi les signaux vibratoires générés lors de ces opérations d'usinage ont été enregistrés, selon les trois axes de la machine, à l'aide d'un accéléromètre tri-axial positionné sur l'outil de coupe. Chacune de ces trois directions a été étudiée et analysée par une méthode temporelle basée sur le calcul de l'enveloppe intégrale. La direction X (ou direction radiale de la coupe) a été qualifiée comme direction privilégiée. Par ailleurs, une analyse conventionnelle a été réalisée à partir d'une part, de la largeur de l'usure en dépouille de l'outil de coupe mesurée à l'aide d'un microscope optique à binoculaire, et d'autre part, de la puissance de coupe consommée au cours de l'usinage. Finalement, la méthode proposée a permis de montrer que le niveau vibratoire du signal est un indicateur performant du suivi de l'usure de l'outil de coupe.

## Abstract :

The work presented concerns the analysis of the vibratory signatures generated in dry turning of cast iron FT25 in order to follow the wear of the cutting tools. This vibratory analysis aims at identifying the existing bond between the vibratory state of the machining system and the state of wear of the cutting tool during its use. To achieve this goal, thirty cutting plates, resulting from the same manufacturing batch, were used for the same operation of machining and identical cutting conditions. Thus the vibratory signals generated at the time of these operations of machining were recorded, according to the three machine spindles, using a triaxial accelerometer positioned on the cutting tool. Each one of these three directions was studied and analyzed by a temporal method based on calculation of the integral envelope. Direction X (or radial direction of the cut) was qualified like privileged direction. In addition, a conventional analysis was carried out starting from a share, width of wear in skin of the cutting tool measured using an optical microscope with binocular, and in addition, power of cut consumed during machining. Finally, the method suggested made it possible to show that the vibratory level of the signal is a powerful indicator of the follow-up of the wear of the cutting tool.

**Mots clés :** usure en dépouille, tournage, outil de coupe, Fonte FT25, analyse vibratoire

## 1 Introduction

L'usinage par enlèvement de matière demeure le procédé de fabrication le plus employé dans l'industrie mécanique dans une large gamme d'applications (de l'aérospatiale à l'industrie automobile). Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe et le mouvement d'avance. Il existe deux manières de générer la surface recherchée : par travail de forme ou par travail d'enveloppe. Dans le premier cas, c'est la forme de l'outil qui conditionne la surface obtenue. Dans le second cas, c'est la trace de l'arête de l'outil qui donne la surface finale. De ce fait, la qualité de la pièce produite en usinage dépend principalement de l'état de l'outil de coupe utilisé. Ainsi, la maîtrise de l'usure de cet outil de coupe au cours de l'usinage s'avère très importante [1, 2]. Les trois principaux mécanismes responsables de l'usure des outils de coupe sont l'adhésion, l'abrasion et la diffusion [3]. La durée de vie de l'outil de coupe est principalement liée au développement de deux types d'usures : l'usure en dépouille et l'usure en cratère. 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 [4].

Dans les conditions normales d'usinage, l'usure en dépouille (VB) est considérée comme l'usure prépondérante. La norme française NF E 66-505 définit un critère d'usure admissible pour une usure en dépouille VB de 0.3 mm si la frange de cette usure est uniforme [5]. Pour cette raison, l'évaluation limite de la durée de vie de l'outil de coupe a été fixée à 0.3 mm dans cette étude. Cette mesure est le moyen le plus utilisé pour évaluer la durée de vie de l'outil de coupe [6]. Elle est généralement considérée dans les milieux industriels pour deux raisons principales :

1. la première est l'aspect dimensionnel, en effet l'accroissement de l'état d'usure de l'outil induit un recul de l'arête de coupe et donc par conséquent une modification de la cote réalisée ;
2. la seconde est liée à la qualité de l'état de surface qui peut se dégrader avec cette usure en dépouille.

Le développement de ce type d'usure n'est pas un phénomène aléatoire [7]. En effet, nous pouvons distinguer trois phases de l'évolution de la durée de vie d'un outil de coupe : une première phase d'usure rapide correspondant au rodage de la plaquette, une seconde phase de stabilisation de l'usure et enfin une troisième phase d'usure accélérée correspondant à l'effondrement de la plaquette [8].

Pour ces raisons, il est nécessaire d'étudier ce mécanisme afin de développer un système de suivi en usinage dans le but d'évaluer l'état d'usure de l'outil de coupe au cours de l'usinage et d'en prédire sa durée de vie [9]. Dans ce contexte, l'approche proposée dans cet article consiste à identifier la relation existant entre l'état vibratoire du système usinant et l'état de l'outil de coupe au cours de l'usinage.

## 2 Protocole expérimental

L'étude bibliographique a souligné les principales sources d'information disponibles au cours d'une opération d'usinage. Aussi, pour mener à bien cette étude, une évaluation générale de l'usure des outils de coupe en tournage a été réalisée au cours d'une importante campagne d'essais.

### 2.1 Dispositif et conditions d'usinage

Les essais d'usinage ont été réalisés sur un tour à commande numérique SOMAB référence "Unimab 450" (FIGURE 1) selon les conditions d'usinage décrites dans le TABLE 1.



FIGURE 1 – Dispositif expérimental et système d'acquisition.

Tour CN	SOMAB Unimab 450	Opération de tournage	chariotage
Outil plaquette	DCLNL 2525M 12 CNMG 120408 5B OR2500	Lubrification	non
Angle d'attaque	$\beta = 95^\circ$	Avance	$Vf = 0.18 \text{ mm}/Tr$
Angle de dépouille	$\eta = 5^\circ$	Profondeur de passe	$ap = 1.5 \text{ mm}$
Matériau	FT25	Vitesse de coupe constante	$V_{cc} = 340 \text{ m}/\text{min}$
		Temps contact matière	60 s

TABLE 1 – Conditions d'usinage.

Le matériau choisi est une fonte grise à graphite lamellaire FT25 (ou FGL250) avec 3.5% de carbone, d'une dureté moyenne de 322 Hv. Les dimensions du cylindre usiné sont 220 mm de longueur et 190 mm de diamètre. Le choix de ce matériau nous assure une usure régulière de la plaquette de coupe et permet d'atteindre rapidement sa limite de durée de vie. La plaquette utilisée en carbure de tungstène revêtue TiAlN (MTCVD) est une plaquette polyvalente.

## 2.2 Instrumentations des essais d'usinage

L'instrumentation de la zone de coupe, les moyens d'analyse et d'observation des surfaces usinées et de l'outil de coupe faciliteront la compréhension des phénomènes mis en jeu par l'opération d'usinage.



FIGURE 2 – Microscope optique à binoculaire.

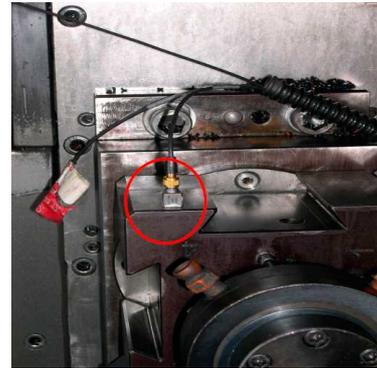


FIGURE 3 – Accéléromètre tri-axial.

### 2.2.1 Microscopie optique de l'usure des plaquettes de coupe

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 lunette binoculaire LEICA MS5 à grossissement jusqu'à 4 fois la taille réelle avec une incertitude de mesure de 2%. Celle-ci est équipée d'une caméra JVC couplée à un logiciel d'analyse d'image analySIS, ceci afin de mesurer l'usure en dépouille de notre plaquette de coupe comme illustré sur la FIGURE 2.

### 2.2.2 Mesure de la puissance de coupe

La mesure de la puissance de coupe en cours d'usinage s'effectue sur un wattmètre intégré au système d'alimentation de la machine. Au cours de chaque passe d'usinage, la valeur moyenne de la puissance de coupe a été relevée.

### 2.2.3 Positionnement des capteurs et acquisitions des signaux accélérométriques

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, indépendant du changement d'outil et sur une partie fixe de la machine. Cependant, plusieurs endroits de la machine sont inaccessibles ce qui limite le nombre de capteurs et leurs positionnements.

Dans cet esprit, l'accéléromètre utilisé a été fixé sur la tourelle afin de mesurer les réponses vibratoires dans l'outil de coupe selon les trois axes de la machine (FIGURE 1) : la direction verticale  $X$  (ou radiale), la direction perpendiculaire  $Y$  (ou tangentielle) et la direction longitudinale  $Z$  (ou axiale).

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 tri-axial B&K de type 4520 (FIGURE 3) dont les sensibilités selon ses trois axes de mesure sont :  $1.032 \text{ mV/ms}^{-2}$  selon l'axe  $X$ ,  $1.067 \text{ mV/ms}^{-2}$  selon l'axe  $Y$  et  $1.045 \text{ mV/ms}^{-2}$  selon l'axe  $Z$  et d'un système d'acquisition B&K (FIGURE 1) piloté par le logiciel PULSE LabShop. L'acquisition des réponses vibratoires issues de l'accéléromètre utilisé a été effectuée sur une bande utile de  $[0 - 6400 \text{ Hz}]$  et à une fréquence d'échantillonnage de  $16384 \text{ Hz}$ . Ces réponses vibratoires sont enregistrées pendant 70 secondes (soit 1146600 échantillons) dont 60 secondes représentent la durée de chaque essai d'usinage et 10 secondes représentent le temps nécessaire pour l'entrée et la sortie de l'outil par rapport à la pièce à usiner comme le montre la FIGURE 4. Ainsi nous enregistrons la réponse générée au cours d'un usinage dans son intégralité.

Sur cette figure, nous pouvons observer que le niveau relevé dans la direction  $Y$  (ou direction de coupe) est nettement plus élevée que dans les autres directions, ceci est confirmé dans la littérature. Les niveaux selon la direction  $X$  (ou direction de refoulement) et la direction  $Z$  (ou direction d'avance) sont du même ordre de grandeur.

## 2.3 Traitement des signaux vibratoires

L'exploitation des signaux vibratoires acquis en usinage permet d'estimer et de suivre l'état d'usure de l'outil de coupe à partir de l'évolution de divers paramètres pertinents. En d'autres termes, la présence d'irrégularités

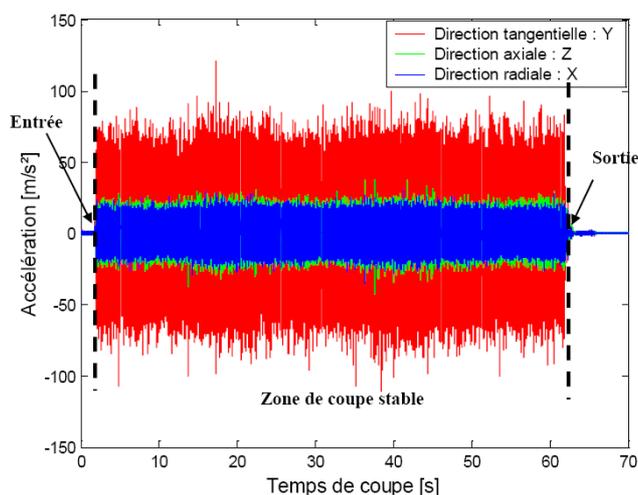


FIGURE 4 – Allures des réponses vibratoires acquises en usinage.

mécaniques peut être décrite par un changement de ces paramètres.

Dans cette étude, le traitement des signaux vibratoires s'effectue par une analyse temporelle. Ainsi, notre choix s'est posé sur le calcul de l'enveloppe intégrale associée aux signaux acquis durant la vie de l'outil.

L'enveloppe est calculée à partir du module du signal analytique associé au signal vibratoire :

$$Z(t) = X(t) + j \tilde{X}(t) \quad \text{avec} \quad \tilde{X}(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{X(\tau)}{\tau - t} d\tau \quad (1)$$

où  $\tilde{X}(t) = TH\{X(t)\}$  est la transformée de HILBERT de  $X(t)$ .

### 3 Résultats

#### 3.1 Analyse de l'usure des plaquettes de coupe

La campagne expérimentale décrite précédemment nous a permis de relever, pour chacune des trente plaquettes, plusieurs observations de la face de dépouille depuis son état neuf jusqu'à la fin de sa durée de vie ou son effondrement.

Les courbes moyennes et les écart-types des évolutions de la largeur des usures en dépouille (VB) sont tracées en fonction de passes d'usinage pour chaque groupe de plaquettes dont nous expliquerons les raisons plus loin (FIGURE 5).

Sur cette figure, la phase de rodage est difficilement obtenue par lecture directe même si elle semblerait se dérouler au cours des deux premiers essais. A partir du troisième essai, toutes les plaquettes entrent dans une phase de stabilisation de leurs usures et adoptent le même comportement jusqu'à l'essai six. Ainsi depuis le début, nous pouvons remarquer la faible dispersion entre les groupes et au sein de chaque groupe vu les valeurs faibles des écart-types. Ensuite, à partir de l'essai sept, la dispersion commence à s'accroître et chaque groupe se détache pour évoluer selon son propre comportement avant d'atteindre la phase d'accélération de l'usure marquée par des valeurs des écart-types nettement élevés. Le point de passage de la phase de stabilisation à la phase d'accélération de l'usure change d'un groupe à l'autre. Globalement il est difficile de cibler avec précision cet instant.

D'autre part, l'effondrement de la plaquette est rapide ce qui montre bien l'importance de détecter son amorçage afin d'en limiter les conséquences.

Bien que les trente plaquettes de coupe soient issues d'un même lot de fabrication, nous avons constaté que leurs durées de vie variaient de 10 à 13 minutes et qu'il n'y pas de corrélation entre la durée de vie et la longueur usinée, ni entre la durée de vie et la vitesse de rotation de la broche.

#### 3.2 Analyse de la puissance de coupe

Les mesures de la puissance de coupe ont permis de vérifier les éléments observés dans la bibliographie. La FIGURE 6 illustre la moyenne et l'écart-type correspondant aux évolutions de la puissance de coupe consommée nécessaire à l'usinage pour les quatre groupes de plaquettes.

Ce paramètre a une allure croissante dans les quatre cas. Cette allure est corrélée à l'augmentation des efforts de coupe due à l'accroissement de l'usure de l'outil de coupe et à son arête moins tranchante nécessitant une augmentation de la puissance de coupe puisque ces deux grandeurs sont proportionnelles. Malgré sa sensibilité à l'usure, la puissance de coupe, n'est pas un indicateur assez précis. Il ne permet pas de suivre l'état d'usure

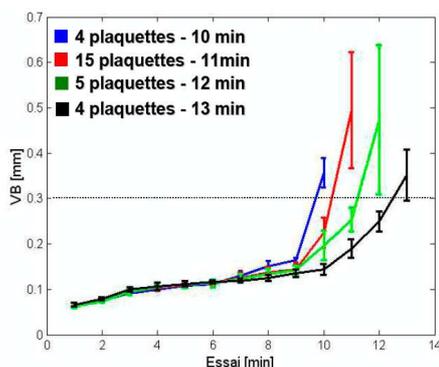


FIGURE 5 – Evolution de l'usure en dépouille au cours de l'usinage.

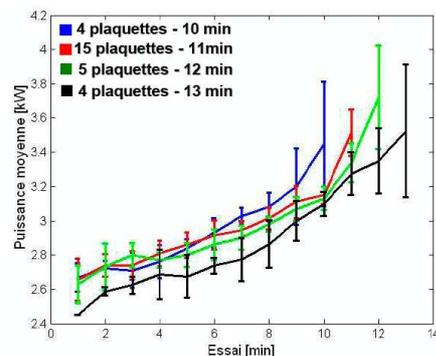


FIGURE 6 – Puissance de coupe moyenne consommée lors de l'usinage.

de la plaquette et surtout de détecter le point de passage de la phase de stabilisation à la phase d'accélération de l'usure compte-tenu des incertitudes dans cette région de la courbe.

### 3.3 Analyse des signaux accélérométriques dans le domaine temporel : enveloppe intégrale

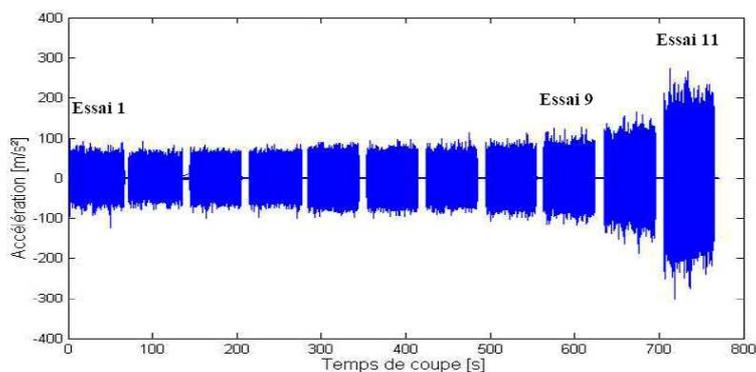


FIGURE 7 – Evolution des signaux temporels enregistrés au cours de l'usinage.

Nous pouvons constater d'après la FIGURE 7 que les accélérations prélevées en fonction du temps de coupe c'est-à-dire en fonction de la détérioration de l'état de l'outil, sont d'amplitude quasi-constante jusqu'à l'essai neuf. A partir de cet essai, l'amplitude croît régulièrement jusqu'à la fin. Nous pouvons donc faire deux remarques. La première est que la réponse vibratoire est sensible à l'état d'usure de l'outil car nous pouvons associer le changement d'amplitude au vieillissement de l'outil (accélération de l'usure) sans toutefois distinguer l'amorçage. Une seconde remarque est que cette dégradation de l'outil de coupe est rapide ce qui confirme l'importance de la détermination de la transition avant l'effondrement de la plaquette.

En scrutant les enveloppes calculées à l'aide de la relation (1) pour les directions  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  (FIGURE 8), nous observons que l'enveloppe est sensible à l'usure de l'outil et donc qu'il permet de suivre l'état de ce dernier. Suivant chaque direction, nous remarquons que les enveloppes moyennes des groupes de 10, 11 et 12 minutes se superposent quasiment, tandis que l'enveloppe moyenne du groupe de 13 minutes ne se situe pas au même niveau. Les allures sont comparables pour les quatre groupes et se composent de deux paliers, le premier représenterait la phase de rodage de l'outil et le deuxième rassemble les deux phases restantes de l'usure de l'outil de coupe (stabilisation et accélération de l'usure) sans pouvoir les distinguer vraiment sauf peut-être pour la direction  $X$ . Ainsi, il apparaît délicat d'identifier précisément les trois phases de la durée de vie de l'outil de coupe et donc de détecter les transitions. Nous remarquons également, sur cette figure, que le niveau d'amplitude des courbes est plus faible pour le groupe des plaquettes dont la durée de vie est la plus longue. Autrement dit, plus le niveau des vibrations est important plus la durée de vie de la plaquette sera courte.

## 4 Conclusion

L'objectif de notre travail était le développement d'une stratégie de suivi de l'usure des outils de coupe, répondant à une demande industrielle, appliquée au problème particulier de l'usinage en tournage et dont la

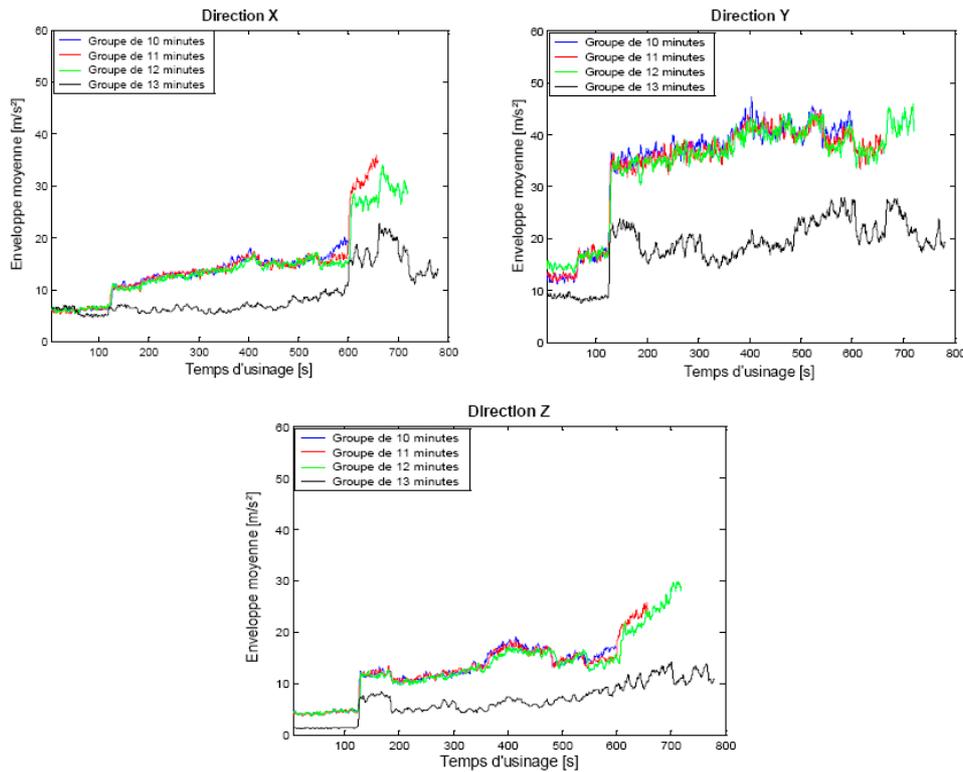


FIGURE 8 – Evolution de la moyenne de l'enveloppe selon les trois directions.

mise en oeuvre devait être simple. Dans le cadre de cet article, nous avons étudié un système basé sur le suivi de l'usure des plaquettes de coupe en tournage par analyse des signaux vibratoires dans le domaine temporel. Cette étude de l'évolution de l'enveloppe du signal a montré une sensibilité de ce paramètre à la dégradation de l'état de l'outil. En effet, nous avons pu suivre l'usure de l'outil mais sans pouvoir distinguer précisément les trois phases de la vie de l'outil.

Les résultats de cette analyse ont été validés par le contrôle direct de l'outil en mesurant la largeur de l'usure en dépouille.

Cette étude doit être généralisée à d'autres matériaux et à d'autres méthodes d'analyses comme l'analyse spectrale ou temps-fréquence afin d'obtenir à terme un ensemble de paramètres sensibles à l'usure de l'outil de coupe et un système de détection de l'accélération de l'usure, tout cela dans le but d'élaborer un système de surveillance automatique de l'usage.

## Références

- [1] Martin P. Influence de l'usure d'un outil de tour sur les vibrations entretenues en coupe. PhD thesis, Université de Nancy I, France, 1973.
- [2] Devillez A., S. L., and W. M. Cutting tool crater wear measurement with white light interferometry. *WEAR*, (256), 56–65, 2004.
- [3] Nouari M. Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage grande vitesse. PhD thesis, Université de Metz, France, 2000.
- [4] Zieba S. Une méthode de suivi évolutif. Application au diagnostic de la qualité d'usinage. PhD thesis, Université de technologie de Compiègne, France, 1995.
- [5] AFNOR . Essai de durée de vie des outils de tournage à partie active unique. Norme Française E 66-505, 1993.
- [6] Braun S. and E. L. Machine tool wear monitoring in mechanical signature analysis. A. Press. London, GB, pages 321–342, 1986.
- [7] Altintas Y. Manufacturing automation - metal cutting mechanics, machine tool vibrations and cnc design. Cambridge University Press - University of British Columbia, 2000.
- [8] Rmili W. Analyse vibratoire pour l'étude de l'usure des outils de coupe en tournage. PhD thesis, Université François-Rabelais, Tours, France, 2007.
- [9] Scheffer C. and Heyns P. Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(6), 1185–1202, 2001.