

**Université 8 mai 1945 – Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



**Mémoire de Fin d'Études**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Option: Construction Mécanique**

**Présenté par : KAHOUL SOHEYB**

=====  
**Identification et suivi de l'usure d'une plaquette de  
coupe par la mesure des vibrations**  
=====

Sous la Direction de :

**Pr. DJAMAA Mohamed Cherif**

**Pr. OUELAA Nouredine**

**Année universitaire 2018/2019**

# *Dédicaces*

*En premier lieu, je tiens à rendre grâce à Dieu qui m'a aidée et guidée dans  
Ce travail.*

*Je dédie cet humble œuvre à mon père Hakim, ma mère et à  
Ma chère sœur, Pour leur amour et leur incontestable appui.*

*En fin Je dédie ce travail à toutes les personnes chères à mon cœur.  
Qu'elles*

*Trouvent ici l'expression de toute ma gratitude et mon amour.*

# Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à exprimer mes profonds remerciements à toutes les personnes dont l'intervention, de près ou de loin au cours de ce projet, a favorisé son élaboration.*

*C'est ainsi j'exprime ma gratitude et mes vifs remerciements à mes encadreurs, le professeur DJAMAA Mohamed Cherif et le professeur OULEAA Nouredine, pour leur disponibilité, leurs remarques, leurs suggestions, leurs orientations et leurs conseils judicieux.*

*En fin je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie mécanique de l'université 8 mai 45 de Guelma.*

# Résumé

L'usinage est souvent confronté aux vibrations de l'outil de coupe qui s'amplifient d'autant plus que l'usure de ce dernier s'aggrave. Dans l'objectif de trouver une corrélation entre l'usure et les vibrations conséquentes, une évaluation expérimentale de l'usure d'une plaquette de coupe en tournage a été réalisée et les signaux vibratoires correspondants ont été relevés. Les résultats après le traitement des signaux vibratoires mesurés durant le processus de coupe par les méthodes temporelles, fréquentielles et par l'analyse en ondelettes (AMRO) ont permis de faire sortir des indicateurs scalaires qui ont mis en évidence le point de transition de l'usure d'une plaquette de coupe de sa phase normale à sa phase catastrophique. Cette démarche peut être adoptée pour la réalisation d'un système de surveillance en temps réel pour le suivi de l'usure des outils de coupe et qui peut alerter l'utilisateur dès que le critère de transition vers l'usure catastrophique est atteint.

# ملخص

كثيرا ما تتعرض أدوات القطع إلى الاهتزازات أثناء عملية التشغيل، وتزداد هذه الاهتزازات مع تآكل حدها القاطع. بهدف إيجاد علاقة بين التآكل والاهتزازات، قمنا بإجراء تجارب تقييمية لتآكل الحد القاطع لأداة القطع خلال عملية الخراطة مع تسجيل الإشارات الاهتزازية المرافقة لها.

عند تحليل الإشارات الاهتزازية المسجلة أثناء التشغيل بواسطة طرق زمنية وأخرى ترددية وكذا بتحليل الموجات سمحت النتائج المسجلة باستخراج المؤشرات الرقمية التي تظهر نقطة انتقال تآكل الحد القاطع لأداة القطع من مرحلته العادية إلى مرحلته الكارثية.

هذه الخطوات العملية من شأنها أن تؤخذ بعين الاعتبار لإنجاز نظام مراقبة آني لمتابعة تآكل أدوات القطع بإمكانه تنبيه المستعمل بمجرد أن يظهر مؤشر انتقال التآكل إلى الحالة الكارثية من دون القياس المباشر للتآكل.

# Sommaire

Introduction générale.....	05
Chapitre I : Etude bibliographique.....	07
I.1 Introduction.....	08
I.2 Phénomène d'usure des outils de coupe.....	08
I.3 Formes d'usure des outils de coupe.....	09
I.4 Méthodes de contrôle de l'usure.....	12
I.5 Réseaux de neurone pour la surveillance de l'usure.....	16
I.6 Position du problème.....	18
Chapitre II : présentation des résultats.....	19
II.1 Introduction.....	20
II.2 Equipements des essais.....	20
II.3 Equipements de mesure de l'usure.....	21
II.4 Moyens de contrôle de vibrations.....	22
II.5 Conditions de coupe.....	23
II.6 Présentation des résultats des essais vibratoires.....	24
II.7 présentation des résultats vibratoires	
Chapitre III : Traitement des résultats.....	31
III.1 Introduction.....	32
III.2 Analyse des signaux vibratoires.....	32
III.2.A Indicateurs temporels.....	32
III.2.B Indicateurs fréquentiels.....	33
III.3 Résultats et discussions.....	34
III.4 Analyse en ondelettes (AMRO).....	42
III.5 Conclusion.....	45
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques.....	48

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'enlèvement de matière d'une pièce brute par usinage est le processus de fabrication le plus productif qui peut donner à la pièce finie la forme voulue à travers l'utilisation d'une machine-outil. Dans le but d'augmenter la productivité tout en assurant la bonne qualité des pièces usinées, l'optimisation du processus d'usinage, par un choix rigoureux des conditions de coupe, est une priorité au regard de l'industrie mécanique.

Comme conséquence de l'usinage, l'usure des outils de coupe représente l'un des facteurs principaux qui influe sur la productivité et sur la qualité des produits usinés. Ainsi, l'état de l'outil de coupe utilisé se dégrade au cours d'usinage et la qualité de la pièce produite dépend principalement de la gravité de cette dégradation. D'où l'intérêt de prédire la durée de vie de l'outil de coupe au cours de l'usinage avant sa dégradation quasi-complète.

L'usinage est souvent confronté aux vibrations de l'outil qui s'amplifient d'autant plus que l'usure de l'outil s'aggrave. La réalisation d'un système de surveillance du processus de coupe pour automatiser le suivi de l'état des outils de coupe est possible, en exploitant les signaux prélevés en usinage tels que les signaux vibratoires. Dans ce contexte, des outils et des techniques récentes de traitement des signaux mesurés ont rendu leur exploitation très utile pour le suivi de la dégradation de l'état des outils de coupe.

Pour atteindre l'objectif visé, une évaluation expérimentale de l'usure d'une plaquette de coupe en tournage a été réalisée et les signaux vibratoires correspondants ont été relevés. Notre investigation repose sur l'extraction, à partir des signaux vibratoires mesurés, des indicateurs sensibles à la variation de l'usure de la plaquette de coupe afin de déterminer d'une manière précise la transition de l'usure normale vers l'usure rapide caractérisée par des valeurs excessives.

Le travail présenté dans ce manuscrit s'organise autour de trois chapitres :

Le premier présente une étude bibliographique sur les différentes méthodes qui s'intéressent au suivi de l'état des outils de coupe en usinage en mettant l'accent, principalement, sur celles basées sur la mesure des vibrations du système usinant. La synthèse des références bibliographiques est conclue par positionner notre étude par rapport aux travaux existants.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le protocole expérimental utilisé pour réaliser les essais en tournage permettant la mesure de l'usure et des vibrations. Une présentation détaillée des équipements de mesure de l'usure et de l'acquisition des vibrations a

été faite. Ainsi, les résultats concernant, principalement, la mesure de l'usure en dépouille de la plaquette utilisée et les signaux vibratoires correspondants ont été présentés.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation des résultats après le traitement des signaux vibratoires mesurés durant le processus de coupe pour les différents essais. Les méthodes temporelles, fréquentielles et celles en temps-fréquence à l'image de l'analyse multi-résolution en ondelettes (AMRO) tendent à faire sortir des indicateurs potentiels pouvant mettre en évidence le point de transition de l'usure d'une plaquette de coupe de sa phase normale à sa phase catastrophique significative de mise hors de service de l'outil.

# **Chapitre I : Etude bibliographique**

## I.1. Introduction

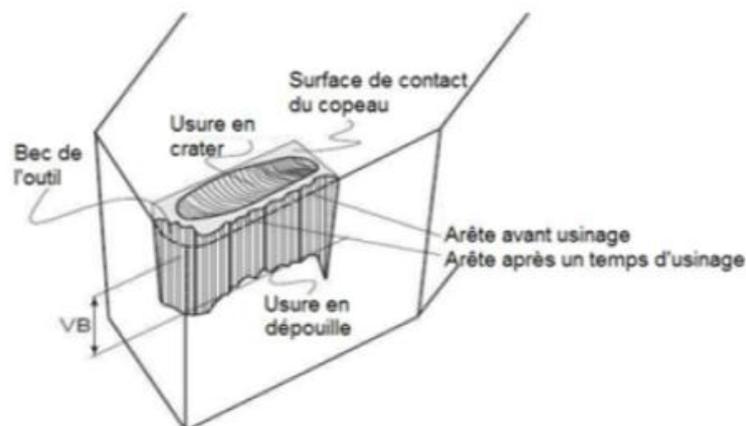
Dans le marché des produits et afin de gagner le défi de concurrence, la production industrielle doit perfectionner ses méthodes d'usinage en visant soit production maximale ou un cout minimal. Il arrive, parfois, que ce dernier passe au second plan et que seule la production maximale importe à travers le choix des vitesses de coupe élevées. Malheureusement, l'accroissement de la vitesse de coupe n'est pas toujours bénéfique car, en plus du frottement et des pressions élevés qui s'exercent à l'interface copeau / outil, elle génère d'importantes sollicitations mécaniques et thermiques sur l'arête de coupe. Tous ces facteurs, dans le processus d'usinage, provoquent l'usure rapide de l'outil dont la qualité des produits manufacturés dépend de son degré.

A cet effet, la gravité de l'usure a une influence directe sur la qualité de surface obtenue, sur la précision dimensionnelle, sur la tenue de l'outil, sur la puissance nécessaire à la coupe.

C'est en fonction du degré de l'usure que l'on conditionnera la tenue d'un outil. Donc, c'est dans cet objectif qu'il faudra maîtriser et contrôler l'évolution de l'usure par rapport aux paramètres d'usinage adoptés.

## I.2. Phénomène d'usure des outils de coupe

L'usure des outils de coupe est un phénomène qui accompagne le processus d'usinage et qui influence directement l'état de surface des pièces usinées, tout en augmentant les vibrations du système d'usinage et le bruit émis par ce système. L'usure est caractérisée par le changement de la géométrie originale de la plaquette de coupe suite à l'apparition des traces des contacts de copeaux et de la pièce sur ses surfaces (**Fig. I.1**).



**Fig. I.1. Aspects d'usure constatés sur un outil de coupe [1]**

L'usure peut être provoquée par deux phénomènes : mécanique et physico-chimique qui peuvent être associés ou distinctes en fonction de la nature de l'opération et des conditions d'usinage.

**A. Phénomènes mécaniques :** Les aspects mécaniques de l'usure peuvent être comme suit :

- **L'abrasion :** L'usure par abrasion mécanique est essentiellement due aux frottements du copeau sur l'outil et ceux de la pièce sur l'outil.
- **L'adhésion :** Cette forme d'usure est observée comme arrachement mécanique de particules d'outils après la formation des microsoudures entre le copeau et l'outil. Les microsoudures sont favorisées par les pressions locales importantes entre les aspérités du copeau et de l'outil entraînant des déformations importantes et une élévation de chaleur provoquant la soudure. L'usure par adhésion diminue lorsque la vitesse augmente jusqu'à une vitesse critique au-delà de laquelle se poursuit un autre type d'usure par diffusion.
- **La déformation plastique :** La déformation plastique provoque, en fait, l'affaissement de l'arête de coupe sous l'action des efforts de coupe d'autant plus rapide que la température à proximité du bec de l'outil augmente.

**B. Phénomènes Physico-chimiques :** Les aspects physico-chimiques de l'usure peuvent se manifester sous différentes formes :

- **La diffusion :** La diffusion est due, essentiellement, à la température qui apparaît lors de l'emploi des vitesses de coupe trop élevées. Des éléments de l'outil sont extraits par le copeau par quantités très petites et aussi par la diffusion des constituants de la matière usinée dans l'outil. Ce type d'usure dépend de la solubilité du matériau de l'outil dans le métal usiné et de la température d'interface atteinte en cours d'usinage.
- **La corrosion :** La corrosion peut être provoquée par le contact des deux matériaux constituant la pièce et l'outil et particulièrement sous l'effet des lubrifiants.

### **I.3. formes d'usure des outils**

Les formes d'usure des outils de coupe dépendent essentiellement de la nature de l'outil, du matériau usiné, des conditions de coupe et du type d'usinage. Nous pouvons rencontrer les formes suivantes (**Fig. I.2**) :

- **Usure en dépouille ou usure frontale :** Elle est due au frottement de la pièce sur la face en dépouille de l'outil et elle se manifeste par l'apparition d'une bande striée et brillante parallèle à l'arête de coupe. Du point de vue pratique, l'usure frontale est la plus importante

à considérer puisqu'elle détermine l'état de surface de la pièce et la précision dimensionnelle.

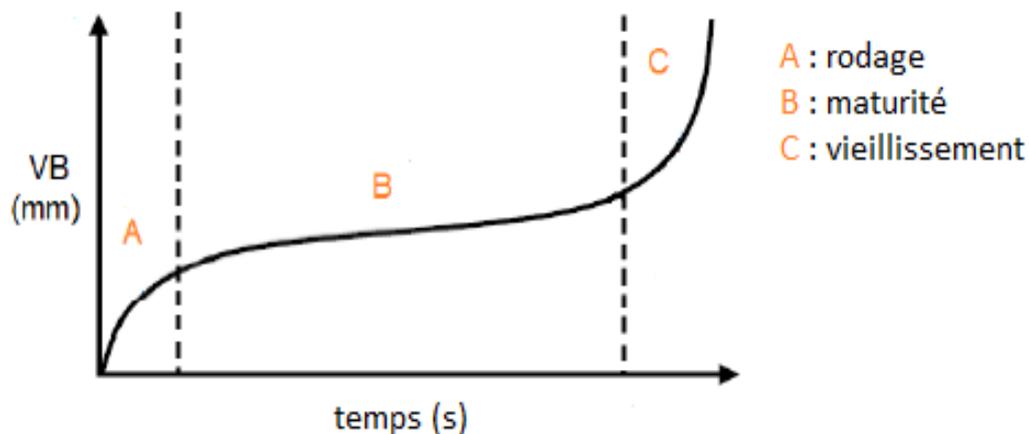
- **Usure en cratère** : Elle est caractérisée par une cuvette formée sur la surface d'attaque de l'outil par frottement du copeau. Cette forme d'usure est due à l'existence des températures élevées au contact du copeau avec la surface d'attaque de l'outil provoquant, ainsi, une diffusion importante.
- **Usure par déformation plastique** : La pointe de l'outil peut subir une déformation permanente sous l'effet des hautes pressions et des températures élevées dans la zone de coupe. Cette déformation de la pointe de l'outil influe sur sa géométrie, et par conséquent sur la précision et l'état de surface usinée.

Formes d'usures d'outil		Causes	Corrections
Usure en dépolie		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>• Angle de dépolie est trop petit.</li> <li>• Taux d'alimentation (vitesse d'avance) <math>V_f</math> est extrêmement faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure (plaquette avec revêtement <math>Al_2O_3</math>).</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>• Augmenter l'angle de dépolie.</li> <li>• Augmenter le taux d'alimentation <math>V_f</math>.</li> </ul>
Usure en cratère		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>• Taux d'alimentation <math>V_f</math> est trop élevé.</li> <li>• Température trop importante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité d'outil avec une résistance élevée à l'usure.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>• Taux d'alimentation réduit <math>V_f</math>.</li> </ul>
Usure par ébréchure		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Taux d'alimentation <math>V_f</math> est trop élevé.</li> <li>• Manque de résistance des arêtes de coupe.</li> <li>• Manque de rigidité de la tige ou du support.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil à ténacité élevée.</li> <li>• Taux d'alimentation <math>V_f</math> réduit.</li> <li>• Augmenter la profondeur de passe pour absorber le choc.</li> <li>• Utilisez une tige de grande taille à forte rigidité.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> </ul>
Fracture du bec d'outil		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manque de rigidité de la tige ou du support.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> </ul>
Usure par déformation Plastique		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est trop élevée.</li> <li>• Profondeur de coupe et le taux d'alimentation sont trop importants.</li> <li>• Température de coupe est élevée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil à haute résistance à l'usure.</li> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> réduite.</li> <li>• Diminuez la profondeur de passe et le taux d'alimentation <math>V_f</math>.</li> <li>• Qualité d'outil avec haute conductivité thermique.</li> <li>• Usinage lubrifié.</li> </ul>
Usure par soudure ou Arête rapportée		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vitesse de coupe <math>V_c</math> est faible.</li> <li>• Géométrie d'outil inadapté.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmenter la vitesse de coupe <math>V_c</math>.</li> <li>• Augmenter l'angle de coupe.</li> <li>• Qualité d'outil avec une faible affinité (grade enduit, grade cermet).</li> </ul>
Usure par fissuration en peigne		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fluctuations thermique en coupe.</li> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> <li>• Observé surtout en fraisage.</li> <li>• Arosage intermittent.</li> <li>• Usinage intermittent.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coupe à sec. (pour la coupe humide, inonder la pièce avec du fluide de coupe)</li> <li>• Qualité d'outil avec une ténacité élevée.</li> </ul>
Usure en entaille		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Surface dure telle que surface non coupée, pièce refroidie et couche durcie par usinage.</li> <li>• Friction causée par des copeaux de forme irrégulière. (causée par de petites vibrations)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité d'outil avec une grande résistance à l'usure.</li> <li>• Augmentez l'angle de coupe pour améliorer la netteté.</li> </ul>
Usure par écailage		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arête rapportée.</li> <li>• Mauvaise élimination du copeau.</li> <li>• Géométrie trop fragile.</li> <li>• Nuance d'outil est trop faible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Outil à ténacité élevée.</li> <li>• Augmentez l'angle de coupe <math>\beta</math>.</li> <li>• Augmentez le chanfrein du bec.</li> <li>• Réduisez le taux d'alimentation <math>V_f</math> au début de la coupe.</li> </ul>

Fig. I.2. Principales usures observées sur un outil de coupe [1]

- **Usure par ébréchure (écaillage) :** Des arrachements de matière peuvent se produire sur l'arête de l'outil, surtout dans le cas des chocs dus à des discontinuités de la pièce ou par des vibrations.
- **Fissuration d'arête :** Sous des conditions de coupe sévères, en particulier des températures de coupe élevées, on observe l'apparition des fissures sur l'arête de coupe. Les chocs mécaniques et thermiques provoquent des contraintes qui entraînent la fissuration.
- **Entaille :** Dans certaines conditions de coupe, il se produit des arrachements d'une partie de l'arête tranchante à la hauteur du diamètre périphérique et il y a un effondrement à cet endroit. L'entaille, observée sur la surface en dépouille, est due à des passages successifs de l'outil sur une couche écrouie, donc plus dure que la pièce.
- **L'arête rapportée :** La formation de l'arête rapportée est observée souvent lorsqu'on travaille à des vitesses faibles où la température est encore trop basse dans la zone de coupe, ce qui provoque un mauvais écoulement du copeau et celui-ci se soude à l'arête. Ce copeau adhérent entraîne un accroissement de la puissance nécessaire à la coupe et une détérioration rapide de l'état de surface de pièce.

L'usure se développe en fonction du temps de manière à distinguer trois phases qui représentent la durée de vie total d'une arête de coupe. La première phase dite de rodage caractérisé par une usure rapide dans un temps très court, suivie d'une seconde phase appelée phase d'usure normale, de période importante et qui représente l'exploitation optimale de l'arête de coupe. Une fois l'usure rentre dans la troisième phase, une usure accélérée est observée donnant signe de début de mise hors service de l'arête de coupe (**Fig. I.3**).



**Fig. I.3** évolution de l'usure en fonction du temps [3]

## **I.4. Méthodes de contrôle de l'usure**

Les méthodes de contrôle de l'usure des plaquettes de coupe peuvent être subdivisées en deux catégories selon les moyens disponibles pour le contrôle. Certaines méthodes nécessitent l'arrêt du processus d'usinage, d'autres peuvent être appliquées au cours d'usinage sans l'arrêt de la machine par surveillance de l'évolution de l'usure. On peut classer les méthodes en deux catégories, directe et indirecte :

### **I.4.A Méthodes directes**

Le principe de ces méthodes est basé principalement sur la mesure directe de l'usure par un microscope, un profil-mètre ou un autre dispositif après avoir stopper le processus d'usinage. Cela veut dire qu'on est obligé de faire un arrêt de travail d'usinage afin de contrôler l'usure de la plaquette après un certain nombre de passes pour analyser quand est-ce que l'usure est maximale.

Parmi les techniques récentes pour la mesure directe de l'usure, celle proposée par Čerče et al [2] s'intéressait à l'utilisation d'un capteur de profil Laser. Cette procédure directe, innovante et fiable permet de surveiller l'usure de coupe spatiale en temps réelle. La technique offre la possibilité de déterminer des profils d'usure en 3D telle que la technique en 2D utilisé actuellement. Ils ont développé le système dans le tournage CNC en utilisant un système de serrage spécial pour monter l'appareil de mesure Laser sur la tourelle. Dans le but de tester la fiabilité des mesures obtenues, une expérience a été effectuée en relevant l'usure des outils à intervalles de 20 mm et les résultats ont été comparés avec les méthodes conventionnelles ayant recours à utiliser des microscopes. Ils ont conclu que le système de mesure proposé offre une résolution et une précision significativement élevées dans la prédiction de l'usure. Un autre avantage de cette méthode est que la mesure peut être effectuée rapidement sans retirer la plaquette de sa position de fixation sur le porte-outil.

Malgré le développement connu dans les méthodes directes, le processus de mesure de l'usure coûte une perte de temps plus au moins considérable.

### **I.4.B Méthodes indirectes**

Dans le cas de contrôle de l'usure de façon indirecte, plusieurs solutions sont mises en œuvre et qui sont basées sur différentes techniques afin de suivre l'évolution de l'usure de la phase de rodage de la plaquette jusqu'à la transition à la phase de l'accélération d'usure au voisinage de 0.3 mm comme usure en dépouille admissible. Toutes les démarches de suivi de l'usure sont réalisées sans arrêt de l'usinage et peuvent être implémentées dans un système de surveillance on-line.

Dans le domaine de recherche, il y a beaucoup de chercheurs qui se sont à mettre l'usure de la plaquette de coupe sous surveillance pendant le travail où ils ont utilisé différentes méthodes et plusieurs idées pour trouver une solution de gestion de la progression de l'usure au cours d'usinage. Parmi les méthodes indirectes, on trouve : la mesure par émission acoustique, par acquisition des efforts de coupe, par dimensionnement des pièces usinées, par la mesure des signaux vibratoires et bien d'autres méthodes. La dernière technique a intéressé la majorité des chercheurs vu que tout changement du comportement vibratoire de l'outil de coupe suite à la progression de l'usure peut être capté sous forme de signaux vibratoires qui peuvent être traités et analysés.

### ▪ Méthodes basées sur les vibrations

En 2002, Dimla [4] s'intéressait au suivi des vibrations dans le processus de tournage des métaux, réalisé à l'aide d'une plaquette rainurée et revêtu. Il a montré que l'usure mesurée sur la plaquette était corrélée aux caractéristiques vibratoires de l'outil dans les domaines du temps et de fréquence en insistant sur la corrélation avec certaines fréquences de résonance de l'outil. Les résultats obtenus étaient effectives pour le suivi de l'usure et sa quantification et les signaux du capteur ont également été affectés par les différentes modes d'usure.

En 2006, Rmili et al [5] ont été intéressés aussi à la surveillance de l'usure d'un outil de tournage par la mesure des signaux vibratoires. Dans le but d'obtenir un résultat efficace, ils ont multiplié les sources d'informations par combinaison de deux méthodes ; l'une directe et l'autre indirecte. La technique directe adoptée consiste à mesurer l'usure de l'outil par microscope à binoculaire et par un profil-mètre 3D directement sur l'outil. Par contre ; les techniques indirectes utilisées décrivent la rugosité de la pièce, la puissance de coupe et les vibrations générées lors de l'usinage. Afin d'identifier l'usure des plaquettes de coupe à partir des signaux vibratoires, la stratégie adoptée s'appuie sur une analyse temporelle à travers le calcul des paramètres statistiques (variance, entropie, kurtosis et skewness) et sur une analyse fréquentielle à base de Fourier (spectres de puissance). Cette identification, renforcée par la corrélation des deux méthodes, a permis l'extraction d'un ensemble de paramètres pertinents comme la variance, l'entropie et le niveau vibratoire pour des fréquences spécifiques, considérés comme de bons indicateurs de l'état de l'outil coupant.

Babouri et al [6] ont proposé une méthode hybride basée sur la combinaison de l'analyse multi-résolution en ondelettes (AMRO) et la décomposition en mode empirique (EMD) pour l'analyse des signaux vibratoires acquis lors de processus d'usinage pour la surveillance de l'usure de l'outil de coupe. En utilisant la puissance moyenne et l'énergie comme principaux

indicateurs scalaires, la méthode proposée a été optimisée et évalué dans plusieurs régimes de coupe combinant la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe. Cette étude a montré l'efficacité de la méthode hybride proposé (WMRA / EMD) pour juger clairement l'usure de l'outil en comparaison avec l'application indépendante de WMRA ou de l'EMD seul. En outre, la variation des indicateurs scalaires pour les signaux vibratoires obtenus permet de localiser clairement les trois phases d'usure qui n'étaient pas évidentes à détecter directement du signal d'origine.

En 2017, Mali et al [7] ont présenté une tentative pour introduire un système de surveillance de l'usure des outils basé sur la combinaison d'un la mesure des vibrations et des efforts de coupe. Neuf essais expérimentaux ont été réalisés selon la méthode de Taguchi en procédant à une analyse de variance ANOVA pour identifier les paramètres significatifs. L'étude montre que l'utilisation conjointe de données des vibrations et des forces sont assez utiles pour établir une forte corrélation entre la force et l'usure de l'outil qui peut s'afficher en temps réel sur une interface graphique basée sur MATLAB.

En 2018, Perunalla et al [8] ont exposé une synthèse des méthodes développées pour l'acquisition, en temps réel, des données vibratoires de l'outil ou de pièce pendant le processus d'usinage par des capteurs à contact et sans contact. L'influence de divers paramètres d'entrée tels que la géométrie de l'outil, l'avance, la vitesse et la profondeur de coupe sur l'amplitude des vibrations est discutée. L'influence des vibrations sur la rugosité de la surface, la durée de vie de l'outil et la consommation d'énergie ont été examinée. La mesure de vibration tridimensionnelle avec un seul vibromètre Laser a été également couverte pour une analyse précise de la vibration des corps en rotation, comme les pièces de tournage, les fraises et les forêts qui ne peuvent pas être mesurées avec des capteurs de contact.

Zhengyou Xie et al [9] ont développé une technique par l'utilisation d'un porte-outil avec un capteur sans fil intégré pour la détection de signaux vibratoires pour une surveillance de l'état de l'outil en temps réelle dans les opérations de fraisage CNC. Le test de coupe prouve la fiabilité et la stabilité du système de mesure de vibrations sans fil et montre les avantages évidents par rapport aux capteurs câblés traditionnels. Finalement, le modèle de Markov (CHMM) a été adopté pour diagnostiquer l'état d'usure des outils en fonction des signaux de vibration mesurés par le dispositif développé et les résultats indiquent que l'approche proposée est efficace pour la surveillance de l'usure des outils.

▪ **Méthode basée sur émission acoustique**

En 2016, Seemuang et al [10] ont utilisé une méthode peu coûteuse et non intrusive pour estimer l'état de l'outil en mesurant le son audible émis pendant l'usinage. La signature audio enregistrée peut être utilisée pour développer un système efficace de surveillance de l'usure des outils en cours de processus de coupe. L'utilisation des filtres numériques permet de conserver le signal associé au processus de coupe mais supprime les caractéristiques audio associées au fonctionnement de la broche de la machine. Dans cette étude, les auteurs ont utilisé un microphone pour enregistrer le son émis par l'usinage de l'acier EN24 sur un tour CNC avec lubrification en utilisant le contrôle constant de la vitesse de coupe. Le signal audio est comparé au développement de l'usure en dépouille sur les plaquettes de coupe pendant plusieurs différentes combinaisons de vitesse de coupe et d'avance. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de relation entre la fréquence du bruit de la broche et de l'usure de l'outil, mais la variation de la vitesse de coupe et l'avance ont une influence sur l'amplitude du bruit de la broche et cela pourrait être utilisé pour indiquer l'état d'usure de l'outil pendant le processus de coupe.

▪ **Par contrôle de dimensions**

En 2001, S. K. Choudhury et al [11] ont été intéressés à la variation du diamètre de la pièce pour suivre l'usure de plaquette de coupe. La méthode développée consiste à faire une surveillance sans contact de la pièce par le déplacement d'un capteur à fibre optique pour évaluer le diamètre de la pièce qui suit à l'usure de l'outil. Les résultats montrent que l'imprécision dimensionnelle de la pièce à cause de l'usure de l'outil peut être maintenue au-dessous de 0.03 mm.

En 2018, Sandeep et al [12] s'intéressaient au contrôle d'usure des outils lors de tournage de diamant. L'objectif est d'évaluer les effets de l'usure sur les précisions du composant usiné et de développer une méthodologie de compensation pour améliorer la précision de la taille et de la forme d'une tasse hémisphérique. Pour trouver le changement du centre et au rayon de l'outil avec l'usure croissante de l'outil, ils ont utilisé un programme MATLAB. Les résultats du modèle théorique montrent que les changements de rayon et de décalage selon (z) sont non significatifs. Cependant, le décalage selon x est proportionnel à l'usure de l'outil et c'est ce qui a été supposé lors de la réinitialisation de l'outil. Partant de la supposition qu'aucune erreur due au glissement de la broche de la machine, alors toute usure de l'outil sera reflétée sur le profil de la tasse. Malgré que la rugosité de surface affecte le centre et le rayon, mais le motif de déplacement du centre avec l'augmentation de l'usure de l'outil reste similaire à la condition idéale, c'est-à-dire sans rugosité de surface.

▪ **Par acquisition de signaux des efforts de coupe**

Zhang et Suet [13] ont utilisé les fréquences modales de la pièce usinée pour présenter le niveau d'usure de l'outil lors du procédé de coupe ultra précis. Les auteurs ont explorés les relations qui existent entre les composants de la force de coupe et leurs amplitudes et le niveau d'usure de l'outil dans le domaine temporel. Dans domaine fréquentiel, ils ont étudié la relation entre les fréquences modales de la pièce en réponse à l'excitation par la force de coupe et le niveau de l'usure de l'outil. Les résultats théoriques et expérimentaux révèlent que les valeurs crêtes de la densité spectrale de puissance de la vibration modale de la pièce, en particulier le premier mode, augmente avec la progression de l'usure de l'outil. Ce qui pourrait être utilisé pour prévoir l'usure des outils lors de la coupe ultra précise et même dans d'autres processus de coupe discontinus.

▪ **Par formation des copeaux**

En 2017, Zhang et al [14] ont eu l'idée de développer une technique de contrôle de l'usure des fraises par la formation des copeaux (largeur et rayon) lors du fraisage d'un matériau difficile à usiner. Le fraisage a été réalisé sur un centre d'usinage avec trois paramètres de coupe pour obtenir la formation de copeaux et l'usure des outils. Les résultats expérimentaux montrent que l'usure des outils augmente progressivement avec processus de coupe. En revanche, la largeur de copeaux et le rayon diminuent. Un modèle a été développé en ajustant les données expérimentales et les transformations de formules où la plupart des erreurs de surveillance de l'usure de l'outil par la formation de copeaux est inférieure à 10%. Finalement, ils comptent concentrer leur travail sur le développement du modèle de paramètres de coupe et de chaque représentation (vibration, qualité de surface, formation de copeaux et usure).

## **I.5. application des réseaux de Neurones artificiels**

En 2000, X Lil et al [15] ont présenté un travail qui consiste à utiliser une méthode d'apprentissage hybride pour trouver la relation entre les caractéristiques de la vibration de coupe et l'état de l'outil. Leurs résultats expérimentaux montrent qu'il est possible de surveiller efficacement l'usure des outils lors de perçage par un modèle neuronal avec logique floue donnant une réponse d'apprentissage algorithmique. Ce modèle présente de nombreuses caractéristiques avantageuses par rapport à un réseau de neurone avec rétro propagation en particulier en termes de temps de calcul. Les résultats expérimentaux ont démontré la possibilité d'utiliser des signaux de vibrations pour surveiller l'état d'usure de l'outil avec fiabilité et en temps réel.

En 2003, Abu-mahfuz [16] s'intéressait à la comparaison entre plusieurs architectures de réseau neuronal multicouches avec un algorithme d'apprentissage de la propagation en arrière pour la surveillance de l'état de l'usure de forêts hélicoïdales. L'algorithme utilise la vibration et l'analyse des signaux en tant que principale et unique source d'information de processus d'usinage. L'objectif de l'étude proposée est de produire un système de surveillance qui conduira à une utilisation plus efficace et économique des outils de forage. Comme résultat, il a prouvé l'efficacité de l'utilisation des signaux de vibration dans un réseau de neurone supervisé pour la détection et la classification de l'usure des forêts.

En 2008, Palanisamy et al [17] se concentrent sur l'utilisation de deux modèles différents : la régression mathématique et les réseaux de neurones artificiels. Ils ont considéré l'usure du flanc comme la réponse (sortie) variable, mesurée pendant le fraisage. Tandis que la vitesse de coupe, l'avance et la profondeur de coupe sont pris comme paramètres d'entrée. Des expériences ont été menées pour mesurer l'usure des outils lors du fraisage sur une fraiseuse universelle de l'acier AISI 1020 utilisant une fraise en carbure. Les valeurs expérimentales sont introduites dans le logiciel Six Sigma pour trouver les coefficients permettant de développer les modèles de régression. Les valeurs mesurées expérimentalement sont également utilisés pour former le réseau neuronal artificiel (ANN) afin de prédire l'usure de l'outil. Enfin, ils ont trouvé que le model ANN prédictif est capable de mieux prédire l'usure et il est beaucoup plus robuste et précis dans l'estimation des valeurs d'usure par rapport au modèle de régression.

Chelladurai et al [18] ont été intéressés à la surveillance de l'usure d'un outil dans le processus d'usinage par électroérosion. Une création d'une usure artificielle du flanc pour imiter l'usure réelle du flanc et les tests étaient réalisés avec des plaquettes de coupe en carbure revêtu. Les données acquises ont été utilisées pour développer un modèle de réseaux de neurones artificiels avec des modèles empiriques ont été développés en utilisant l'analyse de variance (ANOVA). Afin d'analyser la réponse du système, des expériences ont été effectuées pour différentes vitesses de coupe, profondeurs et les avances selon une analyse factorielle complète de 135 expériences. Les données de vibration et de contrainte pendant le processus de coupe sont enregistrées en utilisant deux accéléromètres et un pont de jauges de contrainte et une analyse spectrale de puissance a été réalisée pour tester le niveau de signification. L'analyse des résultats expérimentaux montre l'existence d'une corrélation entre les vibrations et l'usure.

En 2011, Saglam [19] a développé une technique pour le contrôle de l'usure d'une scie à ruban en choisissant un traitement par réseaux de neurones artificiels. Basé sur une acquisition

continue des données des signaux de force de coupe, il était possible d'estimer et de classer certains paramètres d'usure au moyen des réseaux de neurones avec une rapidité raisonnable et une grande capacité de traitement des données. Les réseaux de neurones artificiels (ANN) basés sur les forces de coupe pour estimer l'usure des outils en scie à ruban utilisent l'avance, la vitesse coupe, la longueur d'engagement et la dureté du matériau comme facteurs d'entrée. Les tracés du surface 3D sont générés en utilisant le modèle ANN pour étudier l'interaction selon les effets des conditions de coupe sur la lame de scie. L'analyse montre que la longueur, la dureté et la vitesse de coupe ont un effet significatif sur l'usure des dents, alors que l'avance à moins d'effet.

## **I.6. Position du problème**

En vue de suivre l'usure des outils de coupe, la surveillance de processus d'usinage joue un rôle très important dans la minimisation des durées des arrêts de la machine et l'empêchement de l'apparition de certains phénomènes non désirés tels que l'échauffement de la pièce et de l'outil, l'usure excessive ou la rupture de l'outil. Dans ce contexte, la stratégie adoptée dans notre étude consiste à utiliser une méthodologie qui combine l'expérimental et le numérique permettant de suivre l'usure des outils de coupe. La méthode est basée sur l'analyse de la signature vibratoire mesurée en vue de prédire la durée de vie de l'outil au cours de l'usinage avant sa dégradation définitive. Dans un premier temps, le travail consiste à l'acquisition des signaux vibratoires et l'usure correspondante lors du processus de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe. En second lieu, le travail est dédié au traitement des signaux mesurés en utilisant plusieurs méthodes, à savoir l'analyse temporelle et fréquentielle et l'analyse en ondelettes. L'objectif est de trouver des indicateurs scalaires et d'en déduire un critère de mise hors service de la plaquette de coupe et qui peut être implanté dans un système de surveillance en temps réel pour alerter l'utilisateur dès que ce critère est atteint.

# **Chapitre II : Partie expérimentale**

## II.1. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les équipements utilisés pour faire les essais ainsi que le protocole expérimental. Les résultats des essais qui concernent l'usure de la plaquette de coupe sont présentés sous forme de tableaux et par des graphes pour mieux voir la tendance de l'évolution de l'usure. Par contre, les résultats des essais vibratoires vont être présentés sous forme graphique vu le nombre important des points contenus dans le signal. Cette présentation est la meilleure car elle permet de faire des analyses avant et après traitement de ces signaux afin de trouver une corrélation possible avec l'évolution de l'usure.

Les expériences sont effectuées au laboratoire de coupe des métaux du département de Génie Mécanique à l'Université de 8 Mai 1945, Guelma en se servant des équipements existants et ceux du Laboratoire de Mécanique & Structures.

## II.2. Equipements des essais

Le tour qui a servi pour effectuer nos essais est un tour parallèle de marque TOS TRENCIN, modèle SN40C, de puissance sur la broche égale à 6.6KW (**Fig. II.1**) et qui possède 36 avances entre 0,08 et 0,8 mm/tr. Le variateur de vitesses, installé sur le tour, permet d'ajuster n'importe quelle fréquence de rotation sur la machine allant jusqu'à 2000 tr/min afin de travailler avec une vitesse de coupe constante lors de chaque essai d'usinage.

Le contrôle de la fréquence de rotation est réalisé par un tachymètre avec affichage numérique de la valeur de la fréquence (**Fig. II.2**).



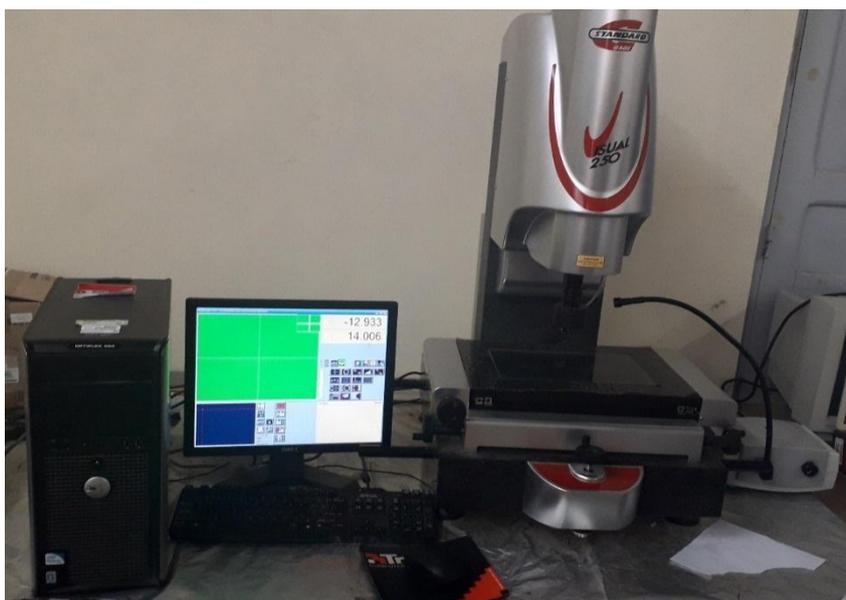
**Fig. II.1. Tour à charioter et à fileter modèle SN40 équipé d'un variateur de vitesses**



**Fig.II.2. Tachymètre pour le contrôle de la fréquence de rotation**

### **II.3. Equipements de mesure de l'usure**

Le contrôle de l'usure a été réalisé par un microscope, modèle Visual Gage 250, qui permet de relever les valeurs de l'usure en dépouille après chaque séquence d'usinage (**Fig. II.3**). L'appareil permet un agrandissement contrôlé afin de visualiser clairement l'usure en dépouille de la plaquette et de prendre les photos correspondantes. Le repaire sur l'écran permet de positionner l'arête de la plaquette avec la ligne horizontale et de faire le déplacement de la table jusqu'à la limite de la bande de l'usure et de relever sa valeur en micron telle qu'elle est affichée sur l'écran.



**Fig. II.3. Visual Gage 250 piloté par ordinateur**

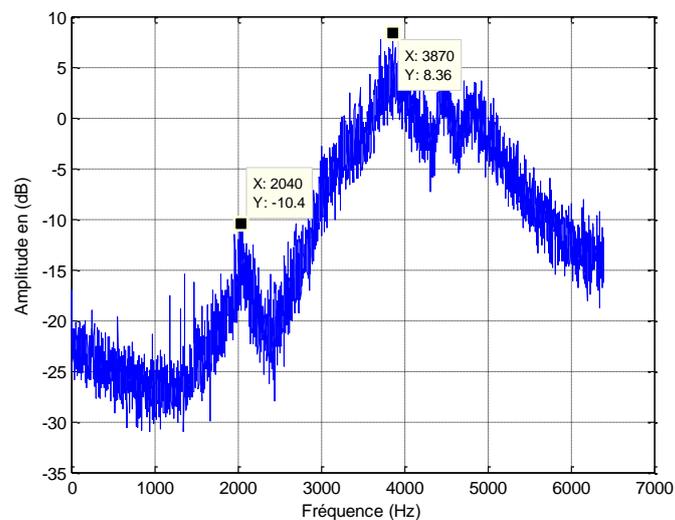
## II.4. Moyens de contrôle de vibrations

Avant la réalisation des essais d'usure, nous avons procédé à la détermination des fréquences propres de l'outil de coupe en position sur son porte-outil suivant les trois directions à l'aide d'un marteau d'impact instrumenté (**Fig. II.4**).



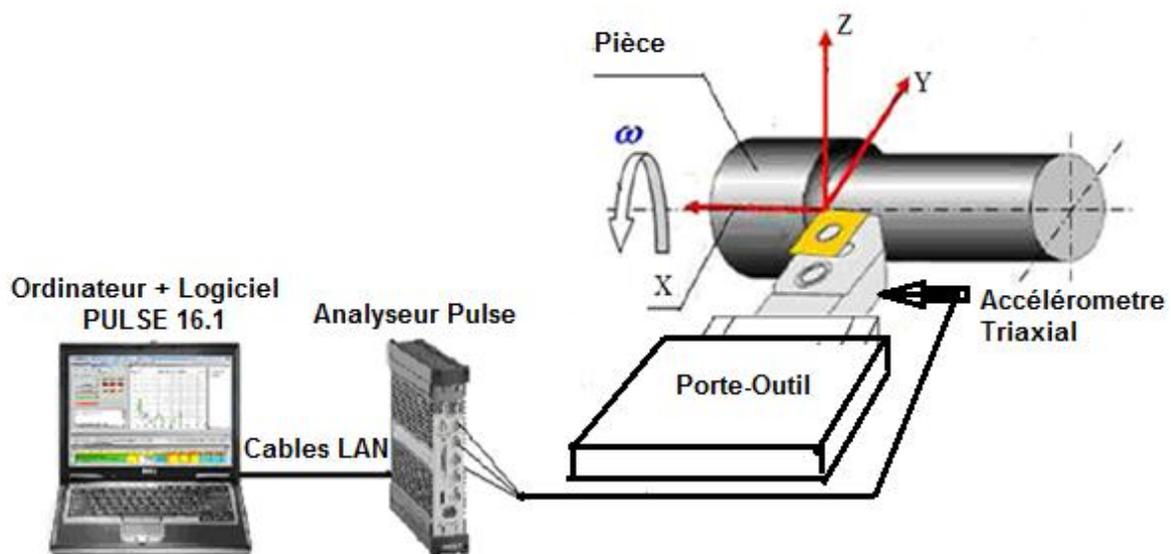
**Fig. II.4** Test modal de l'outil de coupe

Le spectre mesuré selon la direction tangentielle (**Fig. II.5**) montre la présence de deux pics de résonance. Le premier aux alentours de 2000 Hz et qui représente la fréquence propre de la plate-forme qui porte l'outil et le second aux alentours de 3900 Hz et qui présente la fréquence propre de l'outil. Cette démarche permet, par la suite, de chercher des indicateurs qui jugent l'usure de l'outil à partir du signal dans la bande de fréquence qui couvre la résonance ou à partir du spectre à la fréquence propre.



**Fig. II.5.** Spectre mesuré dans la direction tangentielle

L'acquisition de signaux vibratoires a été effectuée pendant l'usinage en utilisant un accéléromètre piézoélectrique triaxial **Brüel & Kjaer** du type **4524B**, placé sur la base inférieure de l'outil dans la zone la plus proche au secteur de coupe pour enregistrer l'intensité des accélérations en temps réel dans les trois directions principales (x, y, z). Le capteur est connecté à un système multi-analyseur **Brüel & Kjaer** du type **3160-A-042** à 4 entrées/2 sorties (**Fig. II.6**). La bande de fréquence choisie varie entre (0 - 6400Hz) où chaque signal contient 16384 points. Le logiciel d'acquisition et de traitement **Pulse Labshop 16.1** permet de faire l'analyse FFT, l'analyse CPB en temps réel, l'analyse 1/n octave, l'analyse d'ordre, l'analyse d'enveloppe et l'analyse spectrale. La mesure des signaux vibratoires qui dure une seconde et les autospectres correspondent dans les trois directions X, Y et Z ont été stockés directement sur le PC en utilisant le système d'acquisition de l'analyseur.



**Fig. II.6. Vue générale sur le montage d'acquisition des signaux**

## II.5. Conditions de coupe

Les barres utilisées comme matière à usiner sont des aciers durs de type 100C6. Les plaquettes de coupe sont amovibles de forme carré, réversibles et de nuance carbure revêtu de Sandvik GC415.

Nous avons utilisé la méthode uni-factorielle pour planifier les essais. Dans notre cas, la vitesse de coupe est le facteur variable vue son influence significative sur la manifestation de l'usure. Alors, la profondeur de passe et l'avance sont maintenues constantes dans tous les essais.

- Vitesses de coupe :  $V_1=100$  m/min,  $V_2=120$  m/min et  $V_3=150$  m/min
- Avance  $a = 0.12$  mm/tr
- Profondeur de passe  $P = 0.5$  mm
- Les essais ont été réalisés sans lubrification

## II.6. Résultats des essais d'usure

La récapitulation de l'ensemble des résultats des 3 essais d'usure est portée dans les tableaux (**Tab. II.1**, **Tab. II.2** et **Tab. II.3**). Nous avons commencé un premier essai avec une vitesse de 120 m/min puis avec 100 m/min et enfin avec 150 m/min.

Tab. II.1. Valeurs d'usure du premier essai		
Vc = 120 m/min		
N° de séquence	t (s)	VB (mm)
1	233	0.069
2	466	0.081
3	688	0.102
4	910	0.118
5	1169	0.127
6	1417	0.186
7	1665	0.217
8	1904	0.259
9	2144	0.286
10	2374	0.314
11	2605	0.374

Tab. II.2. Valeurs d'usure du deuxième essai		
Vc = 100 m/min		
N° de séquence	t (s)	VB (mm)
1	100	0.04
2	347	0.054
3	583	0.065
4	819	0.085
5	1044	0.095

<b>6</b>	1269	0.122
<b>7</b>	1483	0.145
<b>8</b>	1697	0.175
<b>9</b>	1900	0.180
<b>10</b>	2103	0.2
<b>11</b>	2295	0.215
<b>12</b>	2487	0.240
<b>13</b>	2668	0.26
<b>14</b>	2849	0.275
<b>15</b>	3019	0.287
<b>16</b>	3189	0.293
<b>17</b>	3348	0.30
<b>18</b>	3507	0.320
<b>19</b>	3655	0.344

<b>Tab. II.3. Valeurs d'usure du troisième essai</b>		
<b>Vc = 150 m/min</b>		
<b>N° de séquence</b>	<b>t (s)</b>	<b>VB (mm)</b>
<b>1</b>	62	0.025
<b>2</b>	124	0.41
<b>3</b>	248	0.051
<b>4</b>	370	0.075
<b>5</b>	459	0.1425
<b>6</b>	517	0.185
<b>7</b>	606	0.242
<b>8</b>	663	0.270
<b>9</b>	750	0.285
<b>10</b>	834	0.299
<b>11</b>	891	0.313
<b>12</b>	946	0.342
<b>13</b>	1000	0.804
<b>14</b>	1027	0.885

A partir des tableaux précédents, on a voulu présenter ces mêmes résultats graphiquement (Fig. II.7, Fig. II.8 et Fig. II.9) pour mieux voir la tendance de l'usure en fonction du temps en faisant une approximation polynomiale des points de mesure.

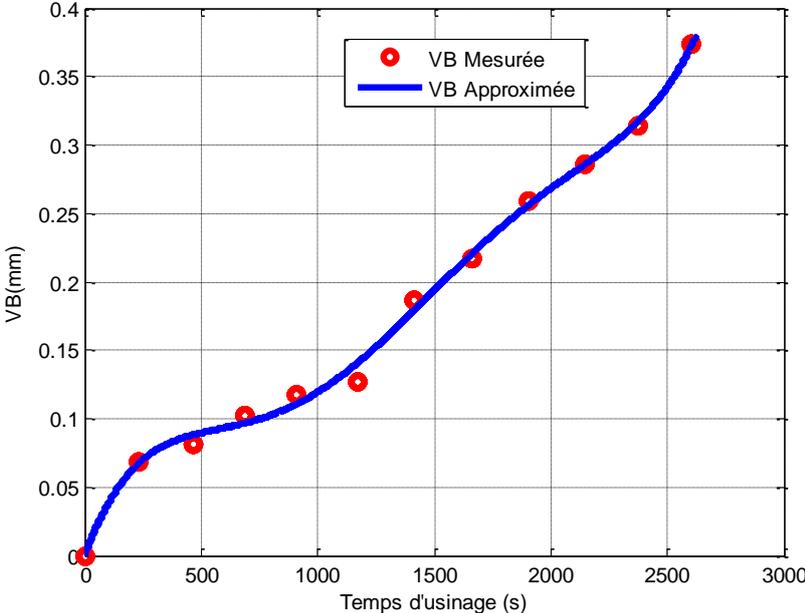


Fig. II.7. Evolution de l'usure VB en fonction du temps à 120 m/min

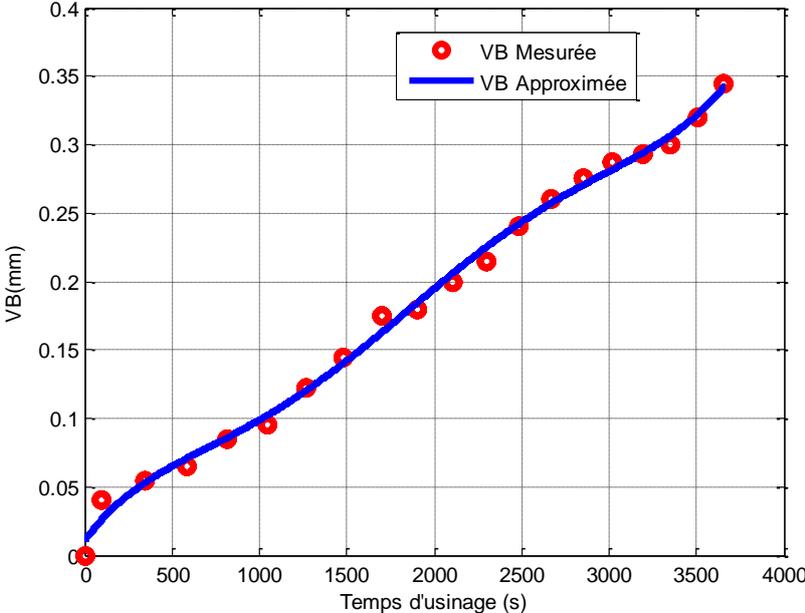
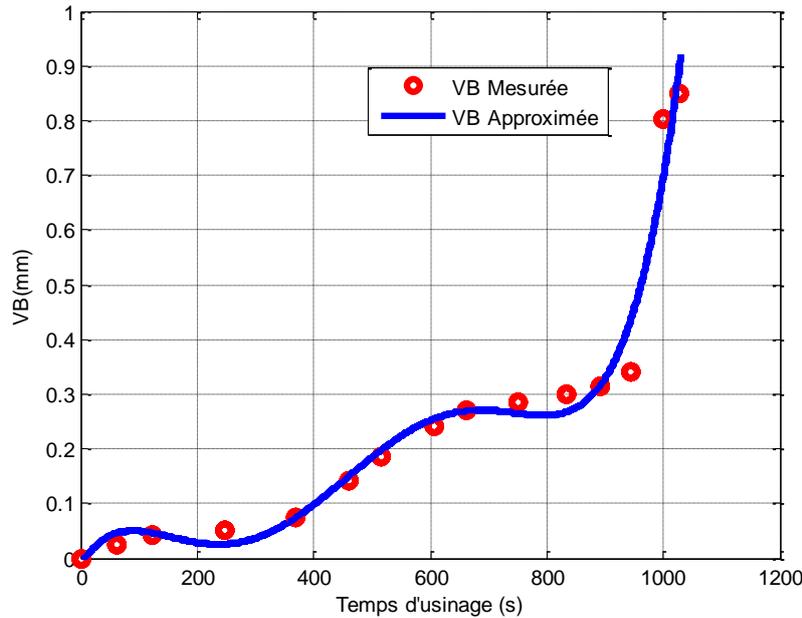


Fig. II.8. Evolution de l'usure VB en fonction du temps à 100 m/min



**Fig. II.9. Evolution de l'usure VB en fonction du temps à 150 m/min**

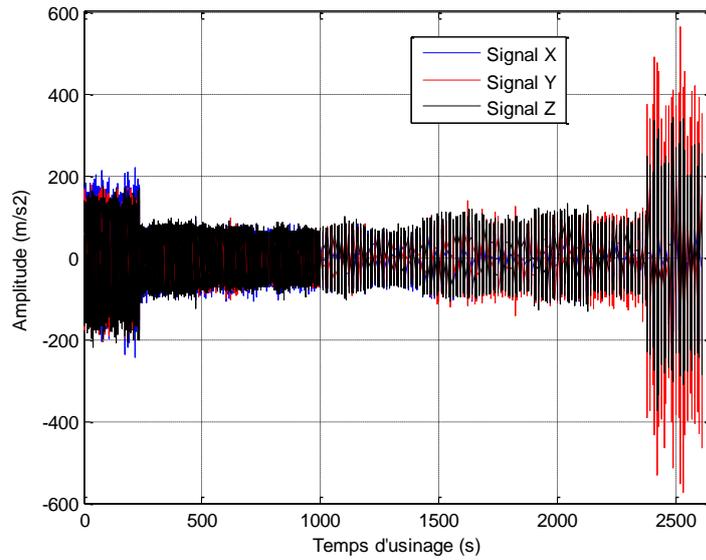
D'après les figures (II.7, II.8 et II.9), on constate que l'usure en dépouille augmente avec le temps d'usinage et que l'accroissement de la vitesse de coupe provoque une usure plus rapide pour le même critère d'usure  $[VB]=0.3\text{mm}$ .

## II.7. Présentation des résultats vibratoires

L'exploitation des signaux vibratoires acquis au cours de l'usinage doivent, en principe, donner la possibilité de suivre l'évolution de l'usure de l'outil. Un tel protocole expérimental permet de conserver toujours les mêmes conditions de génération des réponses vibratoires et de détecter d'une manière propre toute variation dans les caractéristiques du signal supposé, étroitement, lié à la variation de l'usure de la plaquette.

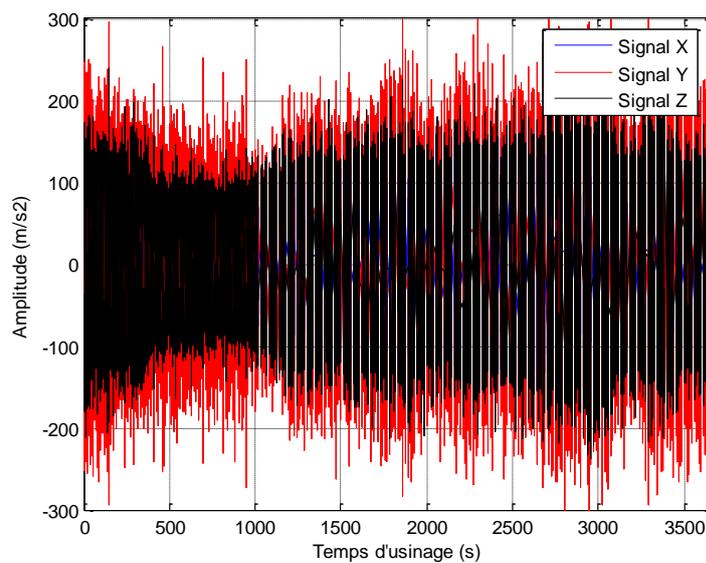
Les résultats de mesure des signaux de chaque essai sont concaténés de manière à voir l'allure générale de la première séquence propre au rodage suivi de période d'usure normale puis la transition vers l'usure catastrophique.

La figure (Fig. II.10) montre qu'à 120 m/min, les trois périodes d'usure sont distinctes. Au début, une période de rodage de courte durée, dont l'amplitude du signal est importante, est observé. Une période d'usure normale caractérisée par signal d'amplitude régulière et modérée. En fin, un signal de forte amplitude indiquant la naissance de la phase de l'usure accélérée.



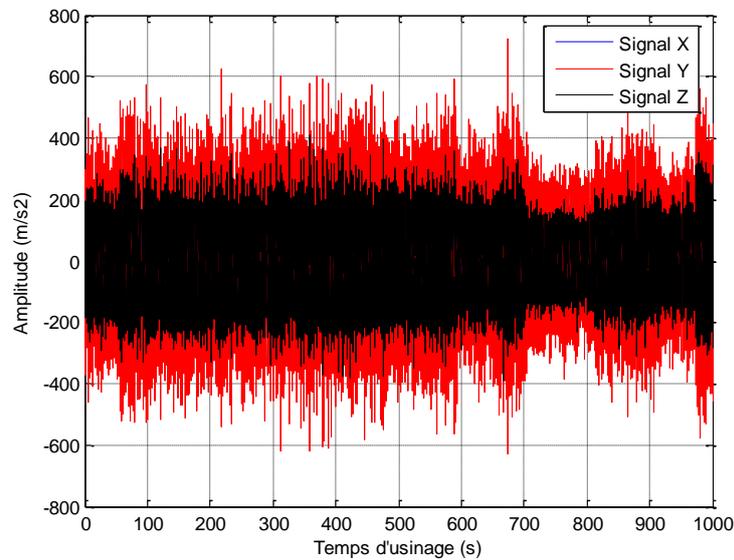
**Fig. II.10. Signaux concaténés pour  $V_c=120$  m/min**

Comme nous avons enchainé l'usinage pour le deuxième essai sur la même barre, le diamètre de cette dernière a été affaibli au point que la rigidité de la barre est amoindrie. Le signal concaténé à 100 m/min (**Fig. II.11**) montre une allure normale au début d'usinage mais il commence à avoir une amplification d'autant plus importante au fur et à mesure de l'évolution du temps. Cette forte amplitude est dominée par les vibrations de la barre de moins en moins rigide par rapport à la vibration de l'outil suite à l'usure.



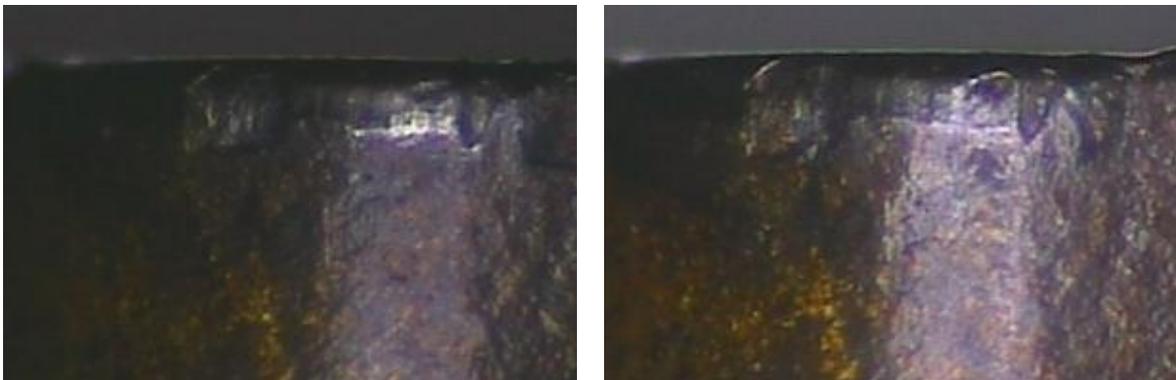
**Fig. II.11. Signaux concaténés pour  $V_c=100$  m/min**

Le signal concaténé à 150 m/min (**Fig. II.12**) montre une allure anormale au-delà du début d'usinage car une amplification importante est observée avec l'évolution du temps. Cette forte amplitude est due certainement à un ébrèchement précoce de l'arête de coupe probablement lié à un choc ou un serrage inapproprié de la plaquette sur son siège. Cette usure, observée dès le début, a causé une grande amplification du signal.

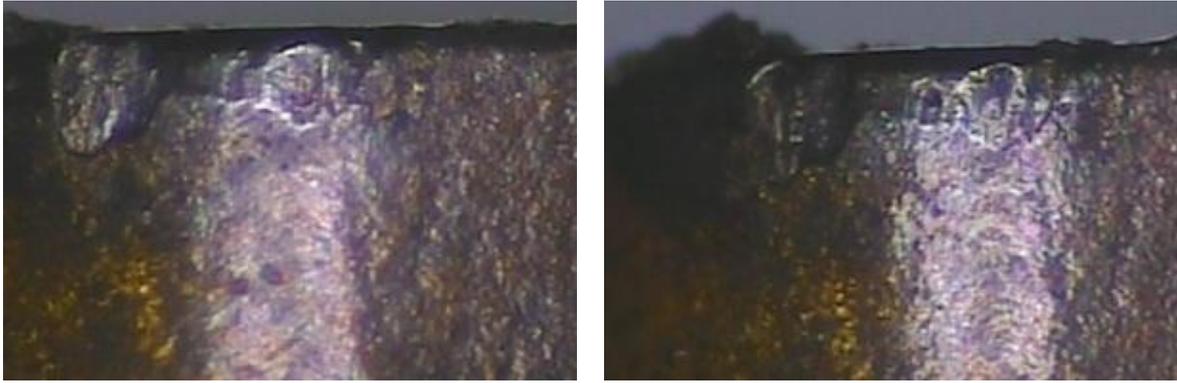


**Fig. II.12. Signaux concaténés pour  $V_c=150$  m/min**

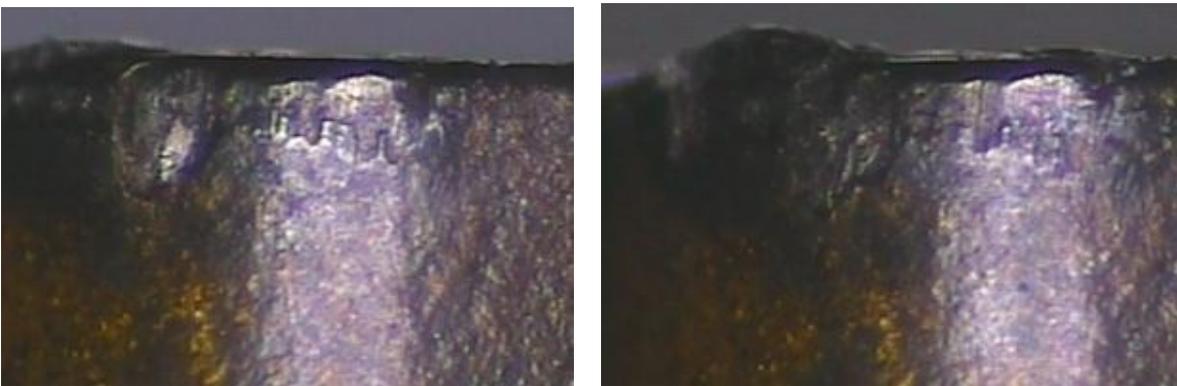
Les photos de la figure (**Fig. II.13**) montrent la présence d'un ébrèchement au niveau de l'arête de coupe dès la séquence 5 après 459s d'usinage. Ce phénomène a provoqué à son tour une accumulation des débris sur l'arête de coupe formant une bosse qui gêne la fluidité de glissement des coupeaux en provoquant des vibrations importantes.



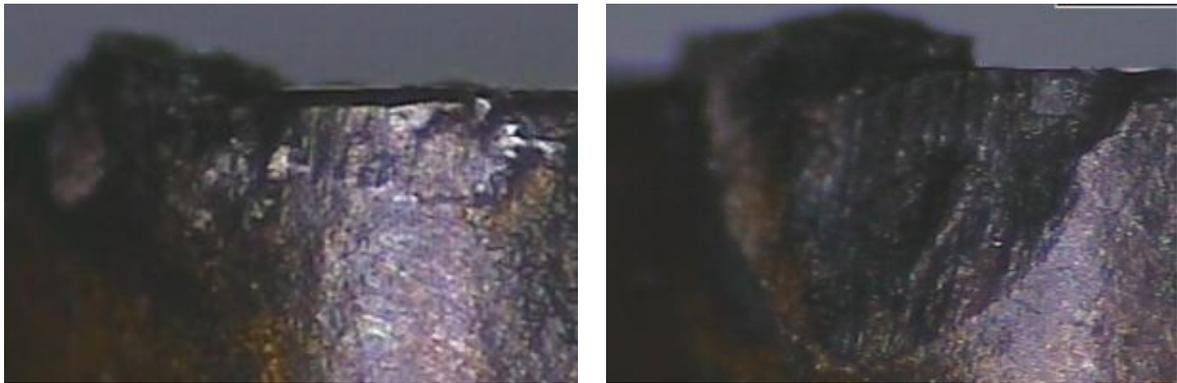
**Photo de l'usure séquence 5 & 6**



**Photo de l'usure séquence 7 & 8**



**Photo de l'usure séquence 9 & 10**



**Photo de l'usure séquence 12 & 13**

**Fig. II.13. Etat de la plaquette après plusieurs séquences de travail à 150 m/min**

# **Chapitre III : Traitement des résultats**

### III.1. Introduction

Dans le but de la détermination de certains indicateurs qui peuvent donner la bonne décision concernant les transitions de l'usure, le traitement des signaux et des spectres obtenus peut aider à suivre le passage de l'usure de la phase normale à la phase catastrophique. Dès que l'apparition de cette dernière phase l'usinage devient difficile et par conséquent, l'état de surface devient médiocre et la précision ne respectera pas les exigences du dessin de définition.

### III.2. Analyse des signaux vibratoires

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour le traitement des signaux afin d'en tirer profit des résultats des essais. L'analyse temporelle et l'analyse fréquentielle des signaux vibratoires vont permettre d'extraire un ensemble de paramètres susceptibles d'être considérés par la suite comme des indicateurs d'usure en cherchant la relation entre ces paramètres et le développement de l'usure en dépouille.

#### III.2.A Indicateurs temporelles

Les indicateurs scalaires associés à un signal, représentés par un nombre ou scalaire, sont calculés directement à partir des signaux temporels mesurés par le capteur et enregistrés par l'analyseur. Parmi les indicateurs utilisés, on peut citer la valeur efficace du signal **RMS** et l'énergie de signal **E**.

#### Valeur efficace du signal (RMS)

La valeur efficace d'un signal  $s(t)$  pendant un intervalle de temps  $T$  est donnée par :

$$RMS = \sqrt{\frac{\int_0^T s^2 dt}{T}}$$

#### Energie de signal (E)

L'expression de l'énergie d'un signal  $s(t)$  est la suivante :

$$E = \sum_{k=1}^{k=N} s_k^2$$

### III.2.B Indicateurs fréquentiels

Les indicateurs fréquentiels sont ceux calculés à partir des spectres tels qu'ils sont donnés par l'analyseur ou après l'application de la transformée de Fourier. Parmi ces indicateurs, on peut citer le niveau global **NG** et le centre de gravité spectrale **CGS**.

#### Niveau global (NG)

Pour rendre cet indicateur plus efficace pour la détection des changements dans la valeur de l'usure des outils de coupe, Babouri et al [20] ont proposé une légère modification sur l'expression du niveau global en limitant le calcul à la sommation du nombre de lignes du spectre autour de la fréquence de résonance de l'outil, délimité par  $F_{max}$  et  $F_{min}$ ,

$$NG = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{F_{min}}^{F_{max}} (N_i)^2}$$

#### Centre de gravité spectrale (CGS)

Cet indicateur est, largement, utilisé pour révéler une dimension perspective du son sur le timbre des instruments de musique ainsi que pour l'analyse des sons de véhicules et le bruit de trafic. Il est, donc, considéré comme le facteur le plus fiable pour juger la dissemblance entre deux sons de corpus, correspondant à deux défauts de gravités différentes [20]. Dans le travail de Babouri et al. [21], les auteurs ont trouvé que cet indicateur dépend principalement du changement des amplitudes des fréquences propres, les plus dominantes, du système d'usinage en particulier celles de l'outil de coupe. D'où l'idée de trouver un rapport entre cet indicateur et l'usure de l'outil.

Le CGS est calculé à partir de l'autospectre des signaux mesurés autour des fréquences propres de l'outil de coupe, sujet aux sollicitations, pour la surveillance de l'usure. Son expression est donnée par :

$$CGS = \frac{\sum_{i=1}^N f_i L_i}{\sum_{i=1}^N L_i}$$

Avec  $f_i = i * f_e / 2N$

$f_e$ : Représente la fréquence d'échantillonnage

$L_i$ : Niveau de l'amplitude de l'autospectre à la fréquence  $f_i$

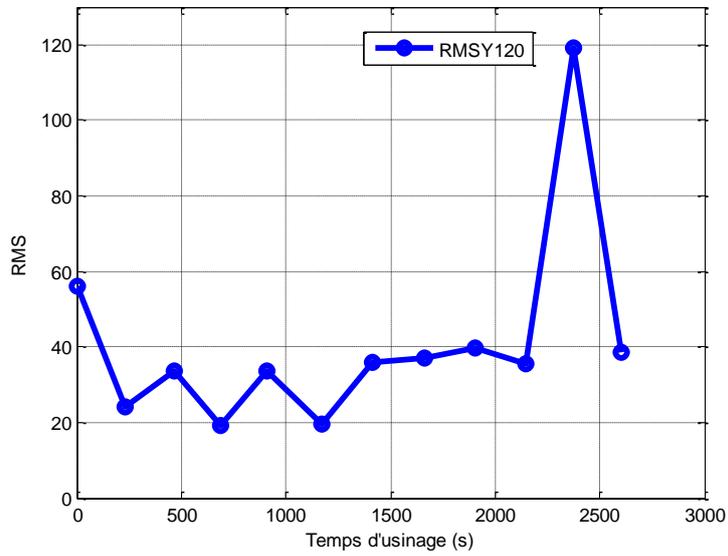
$N$ : La moitié du nombre de lignes contenus dans l'autospectre (N=8192).

### III.3. Résultats et discussions

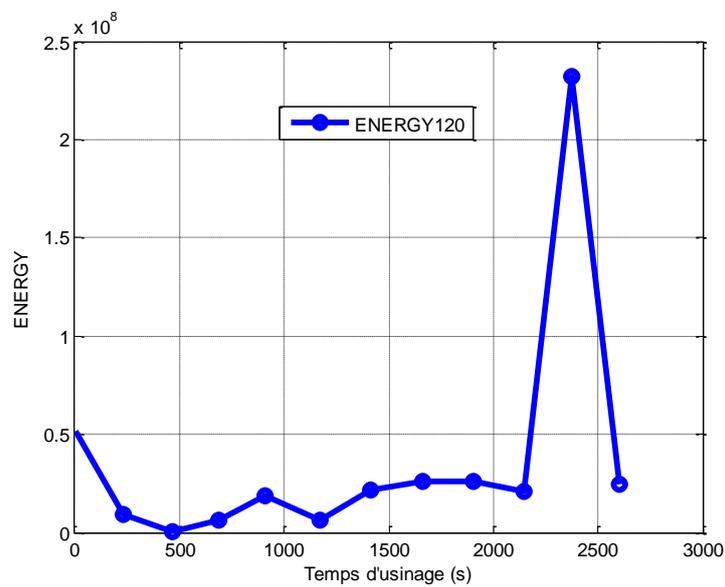
D'après les résultats des signaux mesurés dans les trois directions, nous avons constaté que les signaux dans la direction tangentielle à la pièce (Direction Y selon le montage du capteur Fig. II.10 – Fig. II.12) sont ceux qui contiennent de l'information concernant la résonance de l'outil. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs du RMS et de l'énergie E, calculées à partir des signaux mesurés pour diverses vitesses de coupe.

N° du signal	RMS			E		
	100 m/min	120 m/min	150 m/min	100 m/min	120 m/min	150 m/min
1	70.23	56.23	113.64	8.08 E7	5.18E7	2.10 E8
2	57.09	23.95	144.17	5.34 E7	9.40 E6	3.40 E8
3	53.96	33.72	127.61	4.77 E7	1.86 E5	2.66 E8
4	52.14	19.12	124.33	4.45 E7	5.99 E6	2.53 E8
5	50.52	33.69	132.07	4.18 E7	1.86 E7	2.85 E8
6	44.94	19.51	135.68	3.30 E7	6.24 E6	3.01 E8
7	52.94	36.01	145.28	4.50 E7	2.12 E7	3.45 E8
8	48.68	37.16	139.93	3.87 E7	2.62 E7	3.20 E8
9	50.18	39.77	133.80	4.18 E7	2.59 E7	2.93 E8
10	49.54	35.63	142.24	4.02 E7	2.08 E7	3.31 E8
11	57.17	119.11	113.37	5.35 E7	2.32 E8	2.10 E8
12	46.97	38.46	138.73	3.61 E7	2.42 E7	3.15 E8
13	52.63		98.88	4.53 E7		1.60 E8
14	43.37		96.29	30.08 E7		1.51 E8
15	47.76		112.98	3.73 E7		2.09 E8
16	51.62		116.81	4.36 E7		2.23 E8
17	96.22			1.50 E8		
18	72.52			8.61 E7		
19	71.51			8.30 E7		

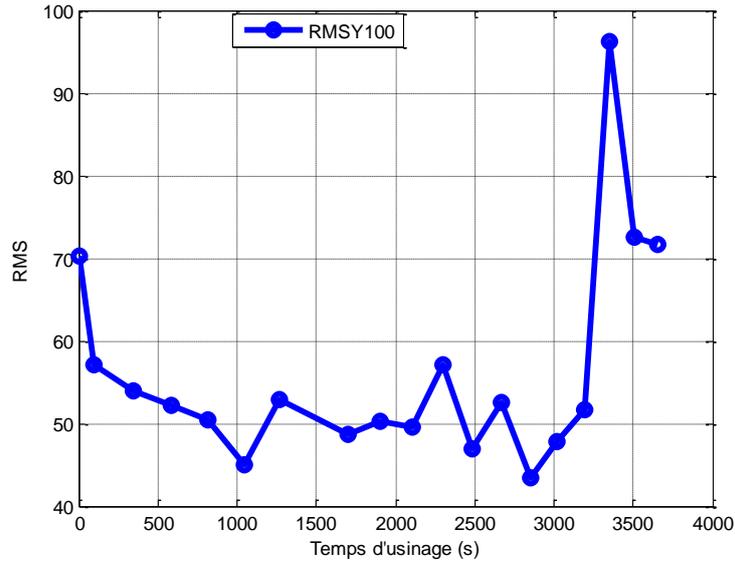
Les figures (Fig. III.1 - Fig. III.6) représentent les tendances du RMS et de l'énergie E pour différentes vitesses.



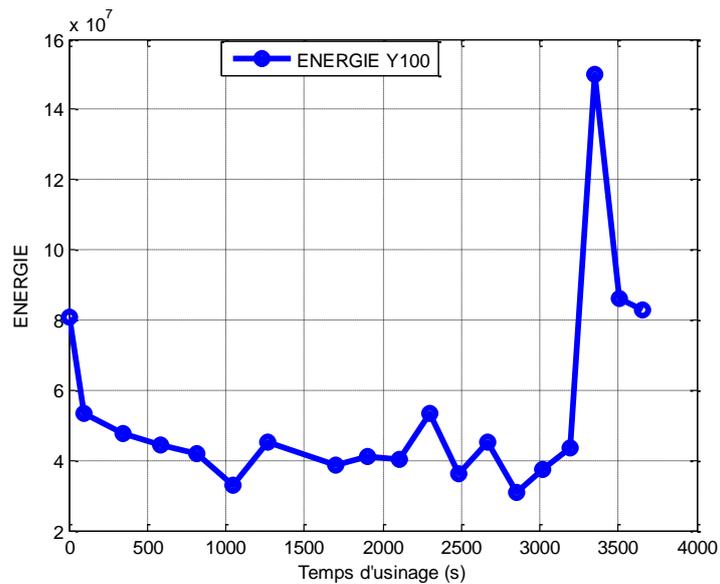
**Fig. III.1. Tendence du RMS en fonction du temps d'usinage**  
( $V_c=120\text{m/min}$  -  $T_{[VB=0.3]}=2263\text{s}$ )



**Fig. III.2. Tendence de l'énergie E en fonction du temps d'usinage**  
( $V_c=120\text{m/min}$  -  $T_{[VB=0.3]}=2263\text{s}$ )



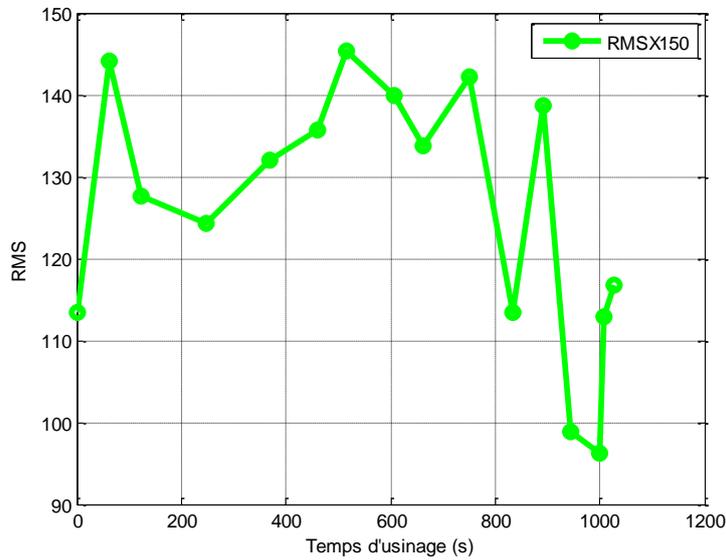
**Fig. III.3. Tendance du RMS en fonction du temps d'usinage**  
**(Vc=100m/min - T<sub>[VB=0.3]</sub>=3280s)**



**Fig. III.4. Tendance de l'énergie E en fonction du temps d'usinage**  
**(Vc=100m/min - T<sub>[VB=0.3]</sub>=3280s)**

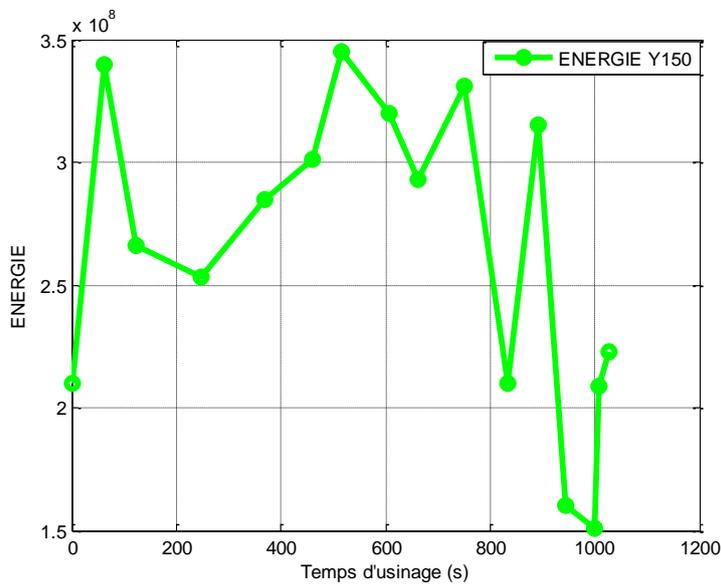
La représentation graphique de l'énergie **E** et de la valeur efficace de signal **RMS** pour les deux premières vitesses ou **Vc= 120m/min** et **Vc=100 m/min** montre une allure correcte. Les valeurs de ces deux indicateurs diminuent avec l'accroissement du temps, puis elles tendent d'augmenter vers des valeurs importantes. En calculant la tenue de la plaquette pour une usure admissible, on constate que les valeurs des deux indicateurs sont pratiquement

égales à la première valeur qui caractérise la phase de rodage. A la base de cette remarque, on peut adopter un critère équivalent à l'usure admissible de **0.3 mm** qui peut être au voisinage de la première valeur relevée de chaque indicateur.



**Fig. III.5. Tendence du RMS en fonction du temps d'usinage**

( $V_c=150\text{m/min}$  -  $T_{[VB=0.3]}=880\text{s}$ )



**Fig. III.6. Tendence de l'énergie E en fonction du temps d'usinage**

( $V_c=150\text{m/min}$  -  $T_{[VB=0.3]}=880\text{s}$ )

Les résultats de la dernière vitesse  $V_c=150 \text{ m/min}$  n'ont pas suivi la même logique précédente. Les deux indicateurs ont des valeurs représentatives des signaux relevés durant

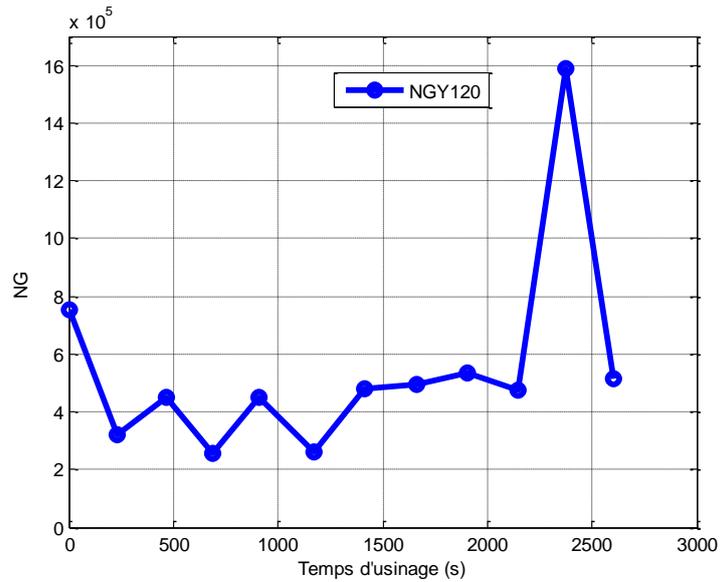
cet essais qui reflètent la présence d'un comportement vibratoire lié à un ébrèchement probablement accidentel de l'arrête de la plaquette de coupe comme le montre la figure **II.13**.

Afin de calculer les indicateurs dans le domaine fréquentiel, on a utilisé les signaux mesurés obtenus directement par l'analyseur. Un programme Matlab est élaboré pour obtenir les autospectres correspondants par une simple transformé de Fourier et d'en pouvoir calculer les valeurs du **NG** et du **CGS**. Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs du NG et du CGS pour diverses vitesses de coupe.

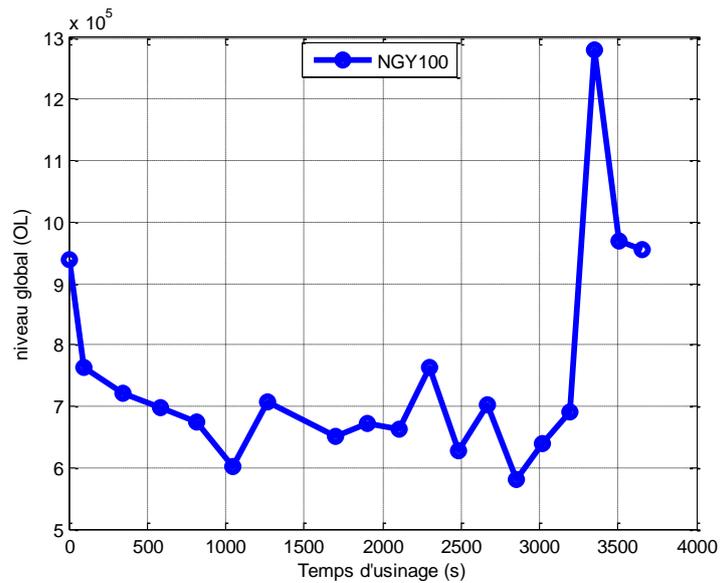
<b>Tab. III.2 Valeurs NG &amp; CGS</b>						
N° du signal	NG			CGS		
	100 m/min	120 m/min	150 m/min	100 m/min	120 m/min	150 m/min
1	9.39 E5	7.52 E5	1.51 E6	5792.4	4408.6	6203.1
2	7.63 E5	3.20 E5	1.92 E6	5239.6	4176.6	6388
3	7.21 E5	4.51 E5	1.70 E6	4764.3	4544.9	6242.9
4	6.97 E5	2.55 E5	1.63 E6	4705.3	4334.3	6168.5
5	6.75 E5	4.50 E5	1.76 E6	4715.3	4296.1	6172.6
6	6.01 E5	2.61 E5	1.81 E6	4405.5	4331.6	6089
7	7.08 E5	4.81 E5	1.94 E6	4925.5	4295.3	5997
8	6.50 E5	4.94 E5	1.87 E6	4752.4	4501.9	5996.5
9	6.71 E5	5.32 E5	1.79 E6	4909	4274.4	5886.7
10	6.62 E5	4.76 E5	1.90 E6	4646.3	4373.3	6076.4
11	7.64 E5	1.59 E6	1.51 E6	4951.3	5555.3	5779.3
12	6.28 E5	5.14 E5	1.85 E6	4714.9	4565.5	5931.9
13	7.03 E5		1.32 E6	4599.2		5612.2
14	5.80 E5		1.28 E6	4731.5		5561.5
15	6.39 E5		1.51 E6	4734.2		6036.6
16	6.90 E5		1.56 E6	4573.9		6248
17	1.28 E6			5882.4		

18	9.70E5			5855.6		
19	9.56E5			5334.3		

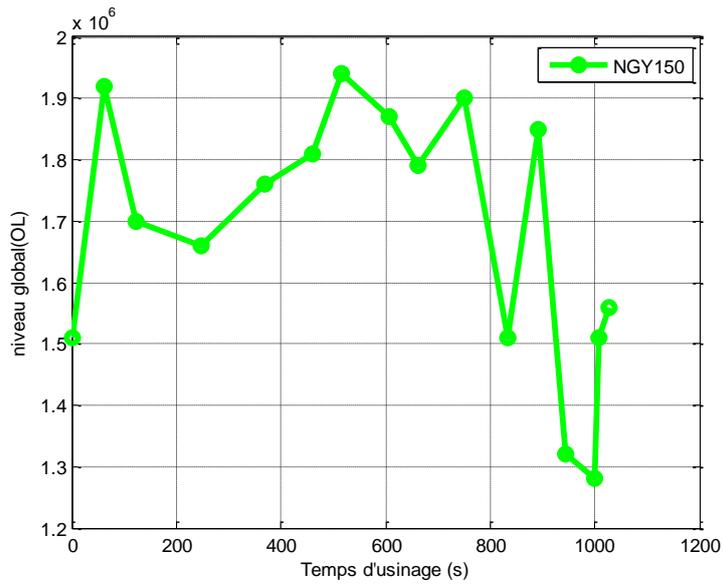
Les figures (Fig.III.7, Fig.III.8 et Fig.III.9) représentent les tendances de niveau global NG selon la direction tangentielle Y.



**Fig. III.7. Tendance du NG en fonction du temps d'usinage**  
(Vc=120m/min - T<sub>[VB=0.3]</sub>=2263s)



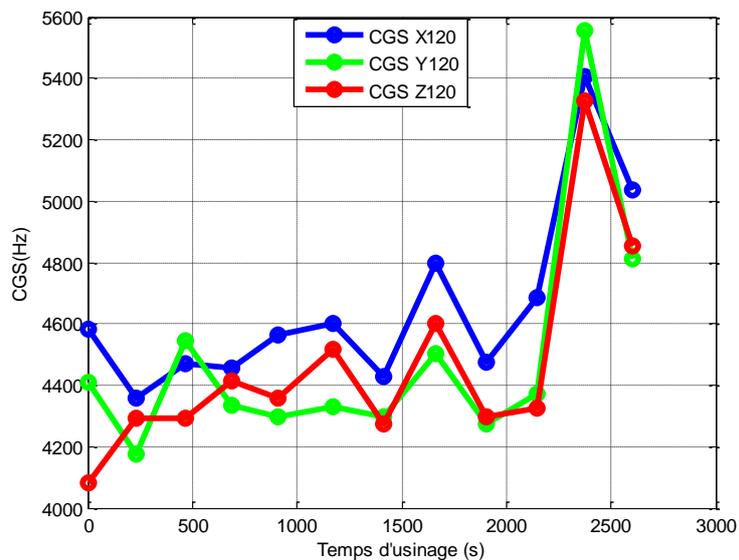
**Fig. III.8. Tendance du NG en fonction du temps d'usinage**  
(Vc=100m/min - T<sub>[VB=0.3]</sub>=3280s)



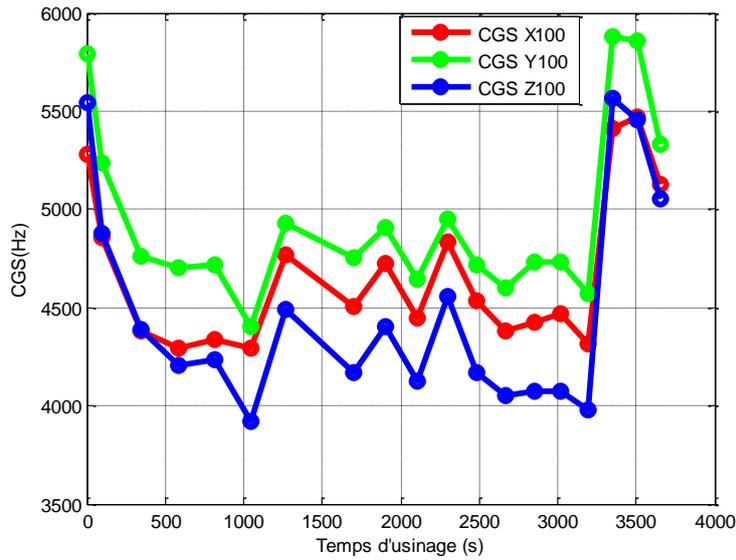
**Fig. III.9. Tendence du NG en fonction du temps d'usinage**  
 (Vc=150m/min - T<sub>[VB=0.3]</sub>=880s)

Les représentations graphiques du niveau global **NG** pour tous les essais confirment les mêmes remarques pour le cas des indicateurs temporels.

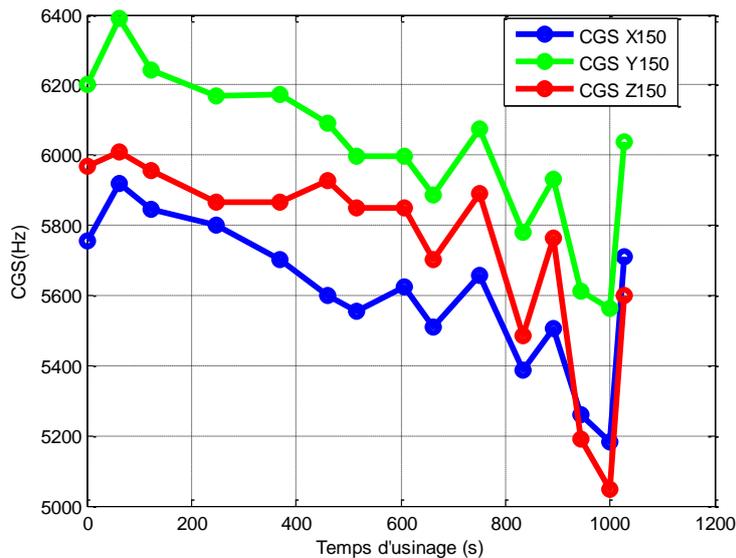
Les figures (**Fig.III.10**, **Fig.III.11** et **Fig.III.12**) représentent les tendances de **CGS** calculé à partir des signaux mesurés selon les 3 composantes (**X**, **Y** et **Z**).



**Fig. III.10. Tendence du CGS selon (X, Y et Z) en fonction du temps d'usinage**  
 (Vc=120m/min - T<sub>[VB=0.3]</sub>=2263s)



**Fig. III.11. Tendence du CGS selon (X, Y et Z) en fonction du temps d'usage  
( $V_c=100\text{m/min}$  -  $T_{[VB=0.3]}=3280\text{s}$ )**



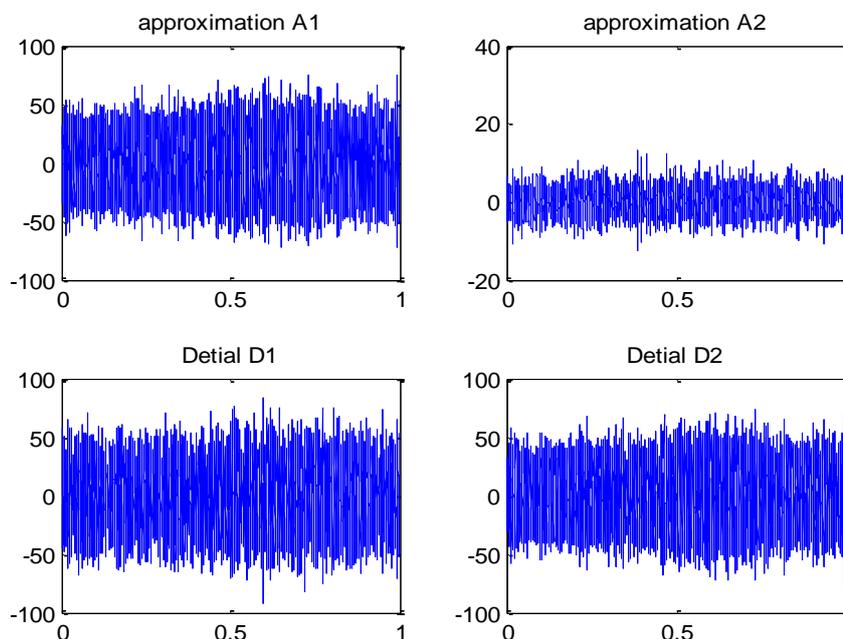
**Fig. III.12. Tendence du NG selon (X, Y et Z) en fonction du temps d'usage  
( $V_c=100\text{m/min}$  -  $T_{[VB=0.3]}=3280\text{s}$ )**

A part le cas de la vitesse 100 m/min, les tendances du CGS calculé à partir des autospectres des signaux mesurés montrent qu'elles sont incompatibles avec celles du **RMS**, **E** et **NG**. La tendance du CGS pour la vitesse 100 m/min comporte une descendance au début jusqu'au voisinage de 0.3 mm d'usure et elle s'accroît au-delà. Par contre, dans les autres cas, les tendances n'ont pas de sens pour en tirer des conclusions fiables malgré que pour la vitesse de 120 m/min, les périodes d'usure sont assez distinctes.

Dans ce qui suit, on essaiera de faire une décomposition de signal vibratoire par l'analyse en ondelettes afin de cerner la bande de fréquence qui couvre la résonance de l'outil. L'idée est de trouver le détail ou l'approximation qui couvre la résonance et qui est riche d'informations afin de calculer le CGS pour le cas de la vitesse de 120 m/min.

#### III.4. Analyse en ondelettes (AMRO)

Lors de la transformation au domaine fréquentiel par FFT, l'information du temps est perdue. Dans ce cas, on est incapable de définir quand un évènement prend naissance. Dans toute mesure, le bruit et d'autres composants viennent polluer les profils des signaux vibratoires acquis. A cet effet, l'analyse en ondelettes est proposée pour filtrer les signaux mesurés du bruit aléatoire et d'autres composantes de la machine afin d'améliorer la sensibilité du CGS. Les résultats de la décomposition en détails et approximations obtenus à deux niveaux à partir du signal vibratoire de la composante verticale (selon Y) sont présentés par la figure (Fig. III.13). En se servant de l'ondelette de Daubechies (db5) qui permet un filtrage optimal du signal mesuré, le détail D1 semble beaucoup plus clair par rapport au signal original. Le D1 couvre la fréquence propre de l'outil de coupe et on compte avoir un meilleur résultat lors du calcul du CGS.

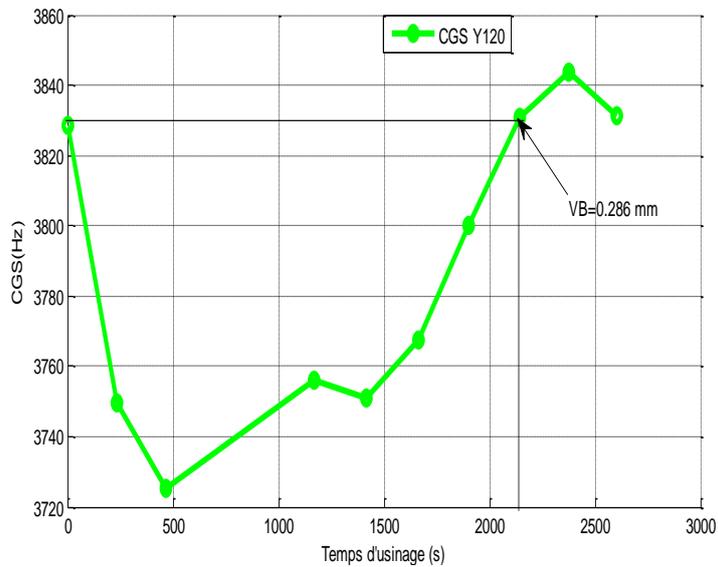


**Fig. III.13. Différents détails et approximations issus de l'analyse multi résolution en ondelettes du signal mesuré (accélération verticale) pour  $V_c = 120$  m/min**

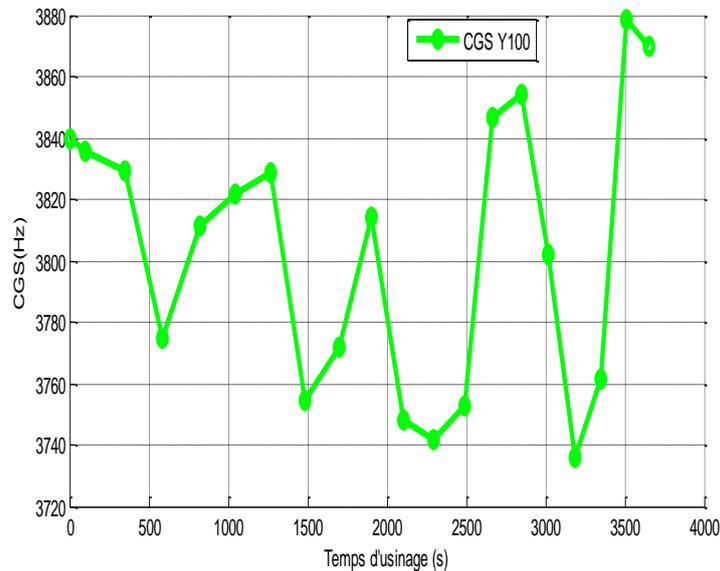
Les valeurs de CGS après la décomposition par **AMRO** sont regroupées dans le tableau III.3.

<b>Tab. III.3 Valeurs du CGS calculé à partir du détail D1</b>			
N° de signal	Vc = 100 m/min	Vc = 120 m/min	Vc = 150 m/min
Selon (Y)			
1	3839.9	3828.4	3762.9
2	3835.8	3749.4	3735.2
3	3829.3	3725.4	3680.2
4	3774.6	3815.5	3798.1
5	3811.3	3805.0	3792.7
6	3821.8	3755.9	3731.4
7	3828.9	3751	3731.4
8	3754.4	3767.5	3765.8
9	3771.8	3800	3806.6
10	3814.0	3830.9	3800.1
11	3748.2	3843.5	3761.3
12	3741.7	3831.4	3796.9
13	3752.7		3661.1
14	3846.6		3717.8
15	3854.2		3795.9
16	3802.0		3756.1
17	3736.2		
18	3761.3		
19	3878.6		

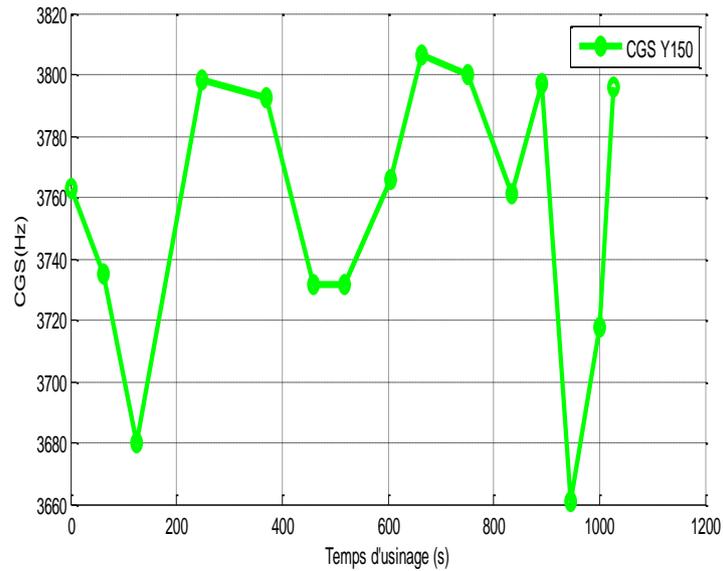
D'après les figures (**Fig. III.14**, **Fig. III.15** et **Fig. III.16**) qui représentent la tendance du CGS après la décomposition des signaux par **AMRO**, on déduit que la décomposition a amélioré les résultats pour la vitesse de **120 m/min** où le CGS se comporte de la même manière que les autres indicateurs. Pour les autres vitesses, les tendances de CGS se montrent une distribution aléatoire qui ne permet d'en tirer aucune information utile.



**Fig. III.14. Tendance de CGS calculé à partir du D1 à la vitesse 120m/min**



**Fig. III.15. Tendance de CGS de CGS calculé à partir du D1 à la vitesse 100m/min**



**Fig. III.16. Tendence de CGS de CGS calculé à partir du D1 à la vitesse 150m/min**

### III.5. Conclusion

D'après les résultats trouvés, on peut affirmer que les indicateurs **RMS**, **E** et **NG** sont de bons indicateurs pour le suivi de l'usure de l'outil de coupe à condition que les signaux mesurés aient été captés dans de bonnes conditions. Ceci est intéressant lorsqu'on veut les implanter dans un système expert de surveillance du fait qu'on utilise le signal brut directement. L'alerte lorsque le niveau de l'usure catastrophique est atteinte se fera automatiquement afin d'arrêter le processus de l'usinage. Autrement, des traitements spécifiques sont à appliquer obligatoirement pour avoir des résultats significatifs avec plus de contraintes lors de la mise en service d'un système expert de surveillance.

# **Conclusion générale**

Tout au long de ce projet, on a engagé un travail expérimental basé sur la mesure des signaux vibratoires lors d'une opération de tournage de l'acier AISI D3 dans l'objectif principal est de trouver une corrélation entre l'usure en dépouille, contrôlée directement sur la plaquette, et les vibrations conséquentes. Les résultats des essais vibratoires, après avoir concaténé les signaux pour chaque essai, montrent qu'à 120 m/min, les trois périodes d'usure sont distinctes à savoir un rodage de courte durée dont l'amplitude du signal est importante, suivi d'une usure normale caractérisée par signal d'amplitude régulière et modérée et finalement un signal de forte amplitude indiquant la naissance de l'usure accélérée. A la différence de l'essai précédent, le signal concaténé à 100 m/min montre une allure différente caractérisée par une amplification d'autant plus importante au fur et à mesure de l'évolution du temps. Cependant, le signal concaténé à 150 m/min montre une allure anormale au-delà du début d'usinage marqué par une amplification importante avec le temps suite à un ébrèchement précoce de l'arête de coupe probablement lié à un choc ou un serrage inapproprié de la plaquette sur son siège.

Afin de trouver un critère d'évaluation de l'usure, en particulier lors de la transition vers la phase d'usure accélérée, on a procédé au calcul de certains nombres d'indicateurs temporels, fréquentiels et en analyse par ondelettes sur la base des signaux vibratoires mesurés selon trois les trois directions. Les résultats que nous avons obtenus, à partir des signaux bruts, montrent la possibilité d'utiliser directement les indicateurs **RMS**, **E** et **NG** pour le suivi de l'usure de l'outil de coupe. A condition que l'acquisition des signaux vibratoires est réalisée dans de bonnes conditions, le critère qu'on a pu adopter pour détecter la transition vers la phase d'usure accélérée peut être considéré comme fiable dès que la valeur de chacun des indicateurs précédemment cités dépasse sa valeur au début d'usinage. Sur la base de ce critère, un système expert de surveillance pouvant alerter l'utilisateur en temps réel peut être implémenté facilement puisque car les signaux sont utilisés sans aucun traitement.

Concernant le CGS, comme indicateur susceptible d'être en corrélation avec l'usure, il a donné un bon résultat à la vitesse 100 m/min montrant la possibilité d'adopter le même critère qu'auparavant. Par contre, à la vitesse de 120 m/min et malgré que l'allure générale des signaux concaténés montre trois phases distinctes de l'usure, cet indicateur a échoué pour détecter un critère d'usure fiable à partir des signaux bruts. Une fois qu'on a procédé à la décomposition des signaux par **AMRO**, les résultats se sont nettement améliorés et le CGS se comporte de la même manière que les autres indicateurs.

## Références bibliographiques

- [1]. Bennegadi, M.E.L., *Coupe des métaux en fabrication mécanique et productive*. Université Mohamed Boudiaf – Oron, 2018. 45 pages.
- [2]. Babouri, M.K., N. Ouelaa, and A. Djebala, *Application of the Empirical Mode Decomposition method for the prediction of the tool wear in turning operation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **23**(2): p. 315-320.
- [3]. Čerče, L., F. Pušavec, and J. Kopač, *3D cutting tool-wear monitoring in the process*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015. **29**(9): p. 3885-3895.
- [4]. Dimla, D. E., *The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002. **19**(10): p.705-713.
- [5]. Rmili, W., R. Serra, and A. Ouahabi, *Suivi d'usure des outils de coupe en tournage par analyse vibratoire*. Assises MUGV. 2006: Aix en province, France.
- [6]. Babouri, M.K., N. Ouelaa, and A. Djebala, *Experimental study of tool life transition and wear monitoring in turning operation using a hybrid method based on wavelet multi-resolution analysis and empirical mode decomposition*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. **82**(9): p. 2017-2028.
- [7]. Rahul, M., M. T. Telsan, and T. V. K. Gupta, *Real time tool wear condition monitoring in hard turning of Inconel 718 using sensor fusion system*. Materials Today: Proceedings, 2017. **4**(8): p. 8605-8612.
- [8]. Perunalla, M. and R.K. Venkata, *Tool and workpiece vibrations measurement - A review*. Independent Journal of Management & Production, 2018. **9**(4): p. 1254-1273.
- [9]. Xie, Z., L. Jianguang, and L. Yong, *An integrated wireless vibration sensing tool holder for milling tool condition monitoring*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **95**(5): p. 2885-2896.
- [10]. Seemuang, N., T. McLeay, and T. Slatter, *Using spindle noise to monitor tool wear in a turning process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (2016). **86**(9): p. 2781-2790.
- [11]. Choudhury, S.K., V.K Jain, and S. K. Rama, *On-line monitoring of tool wear and control of dimensional inaccuracy in turning*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001. **38**: p. 718–727.
- [12]. Sandeep K., U.S. Rao, and R. Balasubramania. *Tool wear compensation scheme for DTM*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. **346**(1): 6 pages.
- [13]. Zhang, G., and S. To, *Relation between tool wear and workpiece modal vibration in ultra-precision raster fly cutting*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **93**(9): p. 3505-3515.
- [14]. Zhang, P., Y. Guo, and B. Wang. *Novel tool wear monitoring method in milling difficult-to-machine materials using cutting chip formation*. Journal of Physics: Conference Series, 2017. **842**(1): 8 pages.
- [15]. Dong, Li., S., and P.K. Nuvinod, *Hybrid learning for tool wear monitoring*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2000. **16**(5): p. 303-307.
- [16]. Abu-Mahfouz, I., *Détection et classification de l'usure de forage à l'aide de signaux de vibration et d'un réseau neuronal artificiel*. Journal International des Machines-Outils et de la Fabrication, 2003. **43**(7) : p. 707-720.

- [17] Palanisamy, P., I. Rajendran, and S. Shanmugasundaram, *Prévision de l'usure des outils à l'aide de modèles de régression et ANN dans les opérations de fraisage en bout*. Journal international des technologies de fabrication de pointe, 2008. **37**(1-2) : p. 29-41.
- [18] Chelladurai. H., V.K. Jain, and N.E. Vyas, *Développement d'un système de surveillance de l'état des outils de coupe pour les opérations de tournage à grande vitesse par analyse des vibrations et des contraintes*. Journal International des Technologies de Fabrication de Pointe, 2008. **37**(5-6): p. 471-485.
- [19] Saglam, H., *Surveillance de l'usure des outils lors du scannage à l'aide de réseaux de neurones et conception d'expériences de Taguchi*. Journal International des Technologies de Fabrication de Pointe, 2011. **55**(9-12): p. 969-982.
- [20] Krimphoff, J., S. Mcadams, and S. Winsberg, *Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique*. Journal de Physique IV, 1994. **5**(C5), p. 525-528.
- [21] Babouri, M.K., N. Ouelaa, M.C. Djamaa, A. Djebala, S. Boucherit, and N. Hamzaoui, *Prédiction de la durée de vie des outils de coupe basée sur le centre de gravité spectrale, Congrès Algérien de Mécanique, 2017. Constantine, Algérie. 11 pages.*