

République Algérienne Démocratique & Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 08 Mai 1945 Guelma



THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Productique

Présentée par

Mohamed Khemissi BABOURI

SURVEILLANCE DE L'EVOLUTION DE L'USURE D'UN OUTIL DE COUPE EN TOURNAGE

Directeur de thèse : Pr. Ouelaa Nouredine

Devant le jury composé de MM.

Mohamed Cherif DJAMAA	Président	Professeur à l'université de Guelma
Nouredine OUELAA	Rapporteur	Professeur à l'université de Guelma
Abdelhamid MILOUDI	Examineur	Professeur à l'USTHB - Alger
Idriss AMARA	Examineur	Professeur à l'université de Constantine
Abderrazek DJEBALA	Invité	MC-A à l'université de Guelma

2016

Dédicaces

Je dédie très spécialement ce travail

à

A la mémoire de mon père Zidane

à

ma famille

à

ma femme qui m'a tellement soutenu

à

mes enfants

et à

mes sœurs et frères

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse Professeur OUELAA Nouredine de l'Université 08 Mai 45 de Guelma de m'avoir accueilli au sein de son équipe et son laboratoire ainsi que pour ces conseils, sa patience et la disponibilité qu'il m'a accordée pendant la direction de cette thèse.

Je remercie également mon collègue Docteur DJEBALA Abderrazek de l'Université de Guelma pour son soutien et son aide qu'il a porté à nos travaux.

A mon nom personnel et au celui de mon directeur de thèse je tiens à remercier les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté d'examiner cette thèse et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail. Mes sincères remerciements vont à monsieur le professeur DJAMAA Mohamed Cherif pour avoir accepté de présider le jury de thèse. C'est avec grand honneur que cet humble travail soit examiné par Messieurs le Professeur Miloudi Abdelhamid de l'USTHB - Alger et le Professeur Amara Idriss de l'Université de Constantine qui m'ont fait l'honneur d'avoir examiné mon travail, ont consacré de leur précieux temps à l'évaluation de mon travail.

Je tiens également à remercier tous les collègues et enseignants et à l'ensemble du personnel du département de génie mécanique de l'Université de Guelma. Mes remerciements vont aussi à tous les membres du Laboratoire de Mécanique et structures (LMS) sans oublier les techniciens du laboratoire. Enfin tous mes collègues et enseignants de département de construction et productique (CMP) de l'université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene - U S T H B - Alger.

Je remercie chaleureusement toute ma famille et j'exprime ma profonde gratitude à ma mère, à ma femme pour leur soutien et leurs encouragements.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes aux quelles je voudrais simplement exprimer ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

ملخص المذكرة

إن تحسين الإنتاجية ونوعية قطع الغيار، التي ترتبط ارتباطاً وثيقاً بمدى صلاحية أدوات القطع، يؤدي إلى أرباح تراكمية هامة. لتحقيق هذا الهدف، فإن وضع نظام مراقبة لعملية القطع دون توقيف التشغيل هو التحدي الحقيقي لشركات التصنيع. إن رصد تآكل أدوات القطع عن طريق قياس ومعالجة إشارات الاهتزازات الناتجة أثناء عملية التشغيل وفي الوقت الحقيقي تعتبر طريقة واعدة بمعنى أن الكشف عن الانتقال من التآكل الأولي وأوائل التآكل المفرط، قبل نهاية صلاحية الأداة أصبح ممكناً وقد أكدت النتائج المتحصل عليها ذلك.

إن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو توفير مؤشرات موثوق بها لحالة تدهور أداة القطع أثناء خراطة حديد الصلب AISI D3. لقد تم استخدام عدة مؤشرات منها الزمنية، الترددية أو زمنية-ترددية. بالإضافة إلى المؤشرات الرقمية الزمنية الكلاسيكية فقد تم اقتراح مؤشرين طيفيين يديعان المستوى العام (OL) ومركز الثقل الطيفي (CGS) للفصل بين المراحل التي تميز تآكل الأداة.

وبما أن غالبية إشارات الاهتزاز الناتجة عن عملية القطع ذات طابع غير ثابت فإن طرقاً زمنية-ترددية تم استخدامها على غرار التحليل متعدد السلام بالموجات (AMRO) وتجزئة الأوضاع التطبيقية (EMD) اللتين استخدمتا كأداة فعالة لتحسين حساسية المؤشرات الرقمية. والواقع أن هذه المؤشرات حساسة جداً للتغيرات في الإشارة الزمنية المرتبطة مباشرة بالاهتزازات الناتجة عن عملية الخراطة ولكن فاعليتها تبقى محدودة في وجود مستويات عالية من الضجيج العشوائي. لهذا اقترحنا طريقة هجينة (AMRO/EMD) باعتبارها طريقة جيدة ونتائجها أفضل بالمقارنة مع استخدام إحدى الطريقتين بصفة منفصلة.

الكلمات المفتاحية: تآكل أدوات القطع، إشارات الاهتزازات، المؤشرات الرقمية، مركز الثقل الطيفي، التحليل المتعدد السلام بالموجات، تجزئة الأوضاع التطبيقية.

Résumé

Une amélioration de la productivité et de la qualité des pièces, étant étroitement liée à la durée de vie des outils coupants, conduit à des gains cumulés importants. Pour réaliser cet objectif, la mise en œuvre d'un système de surveillance du processus de coupe sans faire arrêter le processus d'usinage est un enjeu réel des entreprises manufacturières. Surveiller l'usure de l'outil de coupe via la mesure et le traitement en temps réel des vibrations induites pendant le processus d'usinage est une tâche prometteuse. En effet, la détection de la transition entre l'usure normale et le début de l'usure excessive, juste avant la fin de la vie de l'outil, s'est avérée possible et les résultats obtenus l'ont confirmé.

L'objectif principal de cette étude est donc de proposer des indicateurs fiables de l'état de dégradation de l'outil de coupe lors du tournage de l'acier AISI D3. Plusieurs indicateurs temporels, fréquentiels, ou encore temps-fréquence sont alors utilisés. En plus des indicateurs scalaires temporels classiques, deux indicateurs spectraux ; le niveau global (OL) et le centre de gravité spectrale (CGS), sont proposés pour séparer les phases qui caractérisent l'usure de l'outil.

Comme la majorité des signaux vibratoires issus du processus de coupe ont un caractère non-stationnaire, des méthodes temps-fréquence ont alors été utilisées, à l'image de l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD). Ces dernières sont également utilisées en tant qu'outil efficace permettant d'améliorer la sensibilité des indicateurs scalaires. En effet, ces indicateurs sont très sensibles aux variations dans le signal temporel liées directement aux vibrations induites par l'opération de tournage. Néanmoins, leur fiabilité est immédiatement limitée en présence de niveaux intenses de bruit aléatoire. Une méthode hybride (AMRO/EMD) est enfin proposée comme outil performant et dont les résultats sont meilleurs par rapport à l'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes seule.

Mots-clés : Usure en dépouille, Signatures des vibrations, Indicateurs scalaires, Niveau global, Centre de gravité spectrale, Analyse multirésolution en ondelettes, Décomposition en modes empiriques.

Abstract

Improving productivity and parts quality, being closely related to the cutting tools' lifespan, leads to significant cumulated profits. To achieve this objective, the implementation of a cutting process' monitoring system without stopping the machining is a real challenge for manufacturing companies. Monitoring cutting tool's wear by real-time measure and processing of vibrations induced during the machining process is a promising task. Actually, the detection of the transition point from normal wear to the early excessive wear, just before the end of the tool-life, is possible and the obtained results confirmed that.

The main objective of this study is to propose reliable indicators of the cutting tool's degradation state during the machining of AISI D3 steel. Several time-domain, frequency-domain, or time-frequency indicators are used. In addition to conventional scalar indicators, two spectral indicators; the Overall Level (OL) and the Spectral Center of Gravity (SCG), are proposed to separate the phases that characterize the tool's wear.

As the majority of vibration signals of the cutting process have a non-stationary nature, time-frequency methods were then used, namely Wavelet Multi-Resolution Analysis (WMRA) and Empirical Mode Decomposition (EMD). They are also used as an effective tool allowing the improvement of the sensitivity of scalar indicators. Indeed, these indicators are very sensitive to the variations in the time-domain signal directly related to the vibrations induced during the turning operation. However, their reliability is immediately limited in the presence of high levels of background noise and other machine components. A hybrid method (WMRA/EMD) is finally proposed as an effective tool which gives best results than the application of WMRA or EMD alone.

Keywords: Flank wear, Vibration signature, Scalar indicators, Overall level, Spectral Center of Gravity, Wavelet Multi-Resolution Analysis, Empirical Mode Decomposition.

Index des Figures

Chapitre I

Figure I.1. Modes de défaillance de l'outil de coupe.	6
Figure I.2. Principe de fonctionnement d'un système de surveillance automatique de l'usinage	14

Chapitre II

Figure II.1. Quelques formes des ondelettes usuelles.	26
Figure II.2. Génération d'une famille d'ondelettes.	27
Figure II.3. Principe de la transformée en ondelettes.	28
Figure II.4. Le plan espace-fréquences de la transformée en ondelettes.	28
Figure II.5. Boîtes temps-fréquence des deux ondelettes $\psi_{a,b}$ et ψ_{a_0, b_0}	29
Figure II.6. Filtre en quadrature miroir.	32
Figure II.7. Algorithme de Malat.	32
Figure II.8. Décomposition de l'analyse multirésolution par banque de filtres.	33
Figure II.9. Principe de l'EMD.	35
Figure II.10. Principe de décomposition de l'EMD.	38
Figure II.11. Boucle de tamisage.	39
Figure II.12. Organigramme de l'EMD.	39
Figure II.13. Principe de tamisage pour l'estimation de la 1 ^{re} IMF du signal.	40
Figure II.14. Régularité de l'interpolation Linéaire et Spline.	41

Chapitre III

Figure III.1. Tour parallèle modèle SN40.	47
Figure III.2. Photos des éprouvettes utilisées.	48
Figure III. 3. Plaquette de coupe utilisée.	49
Figure III.4. Ordre de revêtement multicouche.	50

Figure III.5. Porte outil utilisé.	50
Figure III.6. Vue générale de l'installation expérimentale.....	51
Figure III.7. Pulse Lab shop et la chaîne de mesure.	51
Figure III.8. Dispositif utilisé pour mesurer les signaux vibratoire..... et l'usure en dépouille (VB).	52
Figure III.9. Schéma du test modal.....	52
Figure III.10. Réponses fréquentielles de l'outil de coupe..... a) direction axiale et b) direction verticale.	53
Figure III.11. Standard gage - Visual 250.	54
Figure III.12. Dispositif de mesure de l'usure en cratère.	55
Figure III.13. Mesure de rugosité sans démontage de la pièce.....	56
Figure III.14. Usure en dépouille (VB) en fonction du temps de coupe.	58
Figure III.15. Usure en cratère (KT) en fonction du temps de coupe.....	58
Figure III.16. Images 2-D de l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère à $V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $f = 0.12$ mm/tr. (a) à 4 min, (b) à 28 min, (c) à 40 min, (d) à 76 min.....	60
Figure III.17. Images 2-D de l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère à $V_c = 175$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $f = 0.12$ mm/tr. (a) à 2.81 min, (b) à 8.45 min, (c) à 11.26 min, (d) à 16.90 min.....	61
Figure III.18. Images 2-D de l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère à $V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $f = 0.12$ mm/tr. (a) à 1.93 min, (b) à 3.86 min, (c) à 5.80 min, (d) à 7.73 min.....	62
Figure III.19. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille..... $V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.....	63
Figure III.20. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille..... $V_c = 175$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.....	64
Figure III.21. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille..... $V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.....	64

Chapitre IV

Figure IV.1. Usure de l'outil.	68
Figure IV.2. Concaténation des signaux mesurés.	70
Figure IV.3. Evolution des indicateurs scalaires en fonction du temps de coupe suivant les directions X, Y et Z : $V_c = 120$ m/min. a) Energie b) RMS c) Puissance Moyenne.	72

Figure IV.4. Evolution des indicateurs scalaires en fonction du temps de coupe suivant les directions X, Y et Z : $V_c = 175$ m/min. a) Energie b) RMS c) Puissance Moyenne.	72
Figure IV.5. Evolution des indicateurs scalaires en fonction du temps de coupe suivant les directions X, Y et Z : $V_c = 250$ m/min, a) Energie b) RMS c) Puissance Moyenne.	73
Figure IV.6. Spectres obtenus: a) essai 12, b) direction radiale pour $V_c = 120$ m/min..	75
Figure IV.7. Spectres obtenus: a) essai 5, b) direction radiale pour $V_c = 175$ m/min...	75
Figure IV.8. Spectres obtenus: a) essai 4, b) direction radiale pour $V_c = 250$ m/min...	75
Figure IV.9. Différents détails et approximations issus de l'analyse multirésolution	77
en ondelettes du signal mesure (accélération radiale) pour $V_c = 120$ m/min.	
Figure IV.10. Evolution des indicateurs scalaires selon les différents détails.....	78
pour les essais 1,5,9 et 16 : a) Energie, b) RMS : $V_c = 120$ m/min.	
Figure IV.11. Evolution des indicateurs scalaires selon les différents détails.....	80
pour les essais 1,2,3 et 5 : a) Energie, b) RMS : $V_c = 175$ m/min.	
Figure IV.12. Evolution des indicateurs scalaires selon les différents détails.....	81
pour les essais 1,2,3 et 4 : a) Energie, b) RMS : $V_c = 250$ m/min.	
Figure IV.13. Signal reconstruit ($D1$) et son spectre pour différents essais.....	82
$V_c = 120$ m/min.	
Figure IV.14. Signal reconstruit ($D1$) et son spectre pour différents essais.....	83
$V_c = 175$ m/min.	
Figure IV.15. Signal reconstruit ($D1$) et son spectre pour différents essais.....	83
$V_c = 250$ m/min.	
Figure IV.16. Niveau global du signal reconstruit ($D1$) pour $V_c = 120$ m/min.....	85
Figure IV.17. Niveau global du signal reconstruit ($D1$) pour $V_c = 175$ m/min.....	85
Figure IV.18. Niveau global du signal reconstruit ($D1$) pour $V_c = 250$ m/min.....	86
Figure IV.19. Autospectres des signaux mesurés dans la direction radiale pour.....	89
différents usures en dépouille (VB). $V_c = 120$ m/min.	
Figure IV.20. Autospectres des signaux mesurés dans la direction radiale pour.....	89
différents usures en dépouille (VB). $V_c = 175$ m/min.	
Figure IV.21. Autospectres des signaux mesurés dans la direction radiale pour.....	90
différents usures en dépouille (VB). $V_c = 250$ m/min.	
Figure IV.22. CGS de l'autospectre de la figure V.18 en fonction du temps de coupe	92
Pour $V_c = 120$ m/min.	
Figure IV.23. CGS de l'autospectre de la figure V.19 en fonction du temps de coupe	92

Pour $V_c = 175$ m/min.....

Figure IV.24. CGS de l'autospectre de la figure V.20 en fonction du temps decoupe..93

Pour $V_c = 250$ m/min.....

Chapitre V

Figure V.1. Organigramme de la méthode hybride AMRO/EMD..... 97

Figure V.2. Signal de l'accélération et sa décomposition en utilisant l'AMRO. 98

$V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr

Figure V.3. Puissance moyenne et énergie de chaque vecteur de décomposition.... 100

Figure V.4. Signal reconstruit et son spectre. 101

Figure V.5. Signal d'accélération et sa décomposition par la méthode EMD..... 102

$V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr

Figure V.6. IMFs et leurs spectres $V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr..... 103

Figure V.7. Energie et puissance moyenne des quatre premières IMFs. 105

Figure V.8. IMF1 et son spectre. 105

Figure V.9. Variations de l'énergie et de la puissance moyenne en fonction des IMF et l'usure en dépouille (VB)..... 107

Figure V.10. Evolution des indicateurs scalaires (énergie et puissance moyenne) du signal original et du signal reconstruit obtenus à partir de la méthode hybride proposée $V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr. a) Energie b) Puissance moyenne.....111

Index des Tableaux

Chapitre II

Tableau II.1. Propriété de l'EMD par rapport à d'autres méthodes.....	45
---	----

Chapitre III

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier X200Cr12.....	48
Tableau III.2. Les caractéristiques relatives aux plaquettes utilisées.	49
Tableau III.3. Caractéristiques géométriques du porte outil.	50
Tableau III.4. Résultats des essais selon le plan expérimental proposé.	65

Chapitre IV

Tableau IV.1. Répartition des essais sur les trois phases d'usure en fonction de la..... vitesse de coupe.....	76
---	----

Chapitre V

Tableau V.1. Indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille (VB) pour les trois premières IMF.	108
Tableau V.2. Indicateurs scalaires pour $V_c = 120$ m/min.....	109
Tableau V.3. Indicateurs scalaires pour $V_c = 175$ m/min.....	110
Tableau V.4. Indicateurs scalaires pour $V_c = 250$ m/min.....	110

NOTATIONS (*)

A_j	Approximations
a	Paramètre d'échelle
AE	Emission Acoustique
AMRO	Analyse multirésolution en ondelettes
ap	Profondeur de passe, mm
ART2	Théorie de résonance adaptative
b	Paramètre de translation
CA_i	Coefficients d'approximation
CBN	Nitruure de Bore Cubique
CD_i	Coefficients de détail
CGS	Centre de graphite spectrale
D_i	Détails
E	Energie
EMD	Décomposition Modale Empirique
f	Avance, mm/rev
Fc	Facteur de crête
F_e	Fréquence d'échantillonnage
FFT	Transformée de Fourier rapide
HMM	Modele cache de markov (<i>Hidden Markov Models</i>)
HNN	Réseau de neurone hybride
$IMFs$	Fonction de mode intrinsèque
k	kurtosis
K-NN	Réseau du " plus proche voisin"
MLP	Perceptron multi-couches (<i>Multi Layer Perceptron</i>)
N	Nombre d'échantillons du signal
n	Nombre de niveaux
NG	Niveau globale (Overall Levels "OL")
P	Puissance
P_{moy}	Puissance moyenne
Ra	Ecart arithmétique moyen, μm

RMS	La valeur efficace du signal
R_t	Ecart total de la rugosité, μm
R_z	Hauteur moyenne de profil, μm
SOM	Cartes auto organisatrices
$s(t)$	Signal
t	Temps de coupe, s
TCMS	Système de supervision des états d'outils
TD	Tournage dur
VB	Usure en dépouille, mm
V_{BB}	Largeur moyenne de la bande de l'usure en dépouille (mm)
V_{BCmax}	Valeur maximum de largeur de la bande de l'usure du bec de l'outil
V_c	Vitesse de coupe, m/min
$\psi(t)$	Ondelette mère
ψ^*	Conjuguée de ψ
χ_r	Angle de direction principale, $^\circ$
λ	Angle d'inclinaison d'arête, $^\circ$
γ	Angle de coupe, $^\circ$
α	Angle de dépouille, $^\circ$

(*) Les notions dont les désignations ne figurent pas dans ce tableau seront identifiées dès leur citation dans le texte.

TABLES DES MATIERES

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
ملخص.....	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Index des Figures	vi
Index des Tableaux	x
Notations	xi
Introduction générale	1

Chapitre I : Surveillance de l'usure des outils de coupe : Etude bibliographie

I.1. Introduction.....	4
I.2. Modes de défaillance de l'outil de coupe	5
I.3. Méthodes de surveillance	6
I.3.1. La surveillance hors usinage.....	6
I.3.2. La surveillance pendant l'usinage	7
I.4. Détection de l'usure d'outil.....	7
I.5. Système de supervision des états d'outils	13
I.6. Système de surveillance automatique de l'usinage.....	13
I.6.1 Avantage des systèmes intelligents	15
I.6.2 Système de surveillance en ligne des outils de coupe dans la littérature.....	16
I.7. Problématique	20
I.8. Conclusion du chapitre	22

Chapitre II : Outils de Traitements des signaux au service de la surveillance de l'usure

II.1. Introduction	23
II.2. Analyse temporelle et statistique	23

II. 3. Analyse fréquentielle	24
II.3.1. Transformée de Fourier	25
II.3.2. Transformée de Fourier Discrète	25
II.4. Analyse par ondelettes	25
II.4.1. Ondelette mère et conditions d'existence des ondelettes.....	26
II.4.2. Famille d'ondelettes	26
II.4.3. Transformée en ondelettes	27
II.4.4. Transformée en ondelettes continue.....	28
II.4.5. La transformée en ondelettes discrète et multirésolution en ondelettes	29
II.5. Filtres discrets et algorithme de Mallat	31
II.5.1. Filtre en quadrature miroir	32
II.5.2. Algorithme de Mallat	32
II.6. Décomposition en Modes Empiriques (EMD)	34
II.6.1. Principe de la méthode	34
II.6.2. Fonction de mode intrinsèque	36
II.6.3. Processus algorithmique de tamisage	37
II.6.4. Paramètres pertinents de la décomposition	41
II.6.4.1. Interpolation des extrema	41
II.6.4.2. Critère d'arrêt du processus de tamisage.....	42
II.6.4.3. Conditions aux bords et l'influence de l'échantillonnage.....	43
II.6.5. Processus de filtrage et de débruitage par l'EMD	43
II.6.5.1. Filtrage par l'EMD	43
II.6.5.2. Débruitage par l'EMD	44
II.6.6. Propriétés de la méthode de l'EMD	44
II.7. Conclusion du chapitre	46

Chapitre III : Procédures expérimentales et caractérisation de l'usure

III.1 Introduction	47
III.2. Matériels utilisés	47
III.2.1. Machine-outil.....	47
III.2.2. Matériau utilisé	48
III.2.3. Outil de coupe	48

III.3. Dispositif expérimental d'usinage	51
III.3.1. Acquisition des signaux vibratoires.....	51
III.3.1.1. Analyse spectrale des fréquences caractéristiques	52
III.3.2. Mesures complémentaires	54
III.3.2.1. Mesure de l'usure en dépouille <i>VB</i>	54
III.3.2.2. Mesure de la profondeur du cratère.....	55
III.3.2.3. Contrôle de la rugosité	56
III.4. Condition expérimentales et analyse des mesures complémentaires.....	56
III.4.1. Evolution de l'usure des plaquettes en fonction du temps	57
III.4.2. Morphologie de l'usure des outils de coupe.....	58
III.4.3. Etat de surfaces usinées	63
III.5. Conclusion	66

Chapitre IV : Analyse statistique et prédiction de la transition de la durée de vie de l'outil

IV.1. Introduction.....	67
IV.2. Durée de vie des outils de coupe.....	68
IV.3. Analyse dans le domaine temporel	69
IV.3.1. Signaux vibratoires et caractérisation de l'usure	69
IV.3.2. Analyse statistique de l'usure	71
IV.4. Analyse spectrale des fréquences caractéristiques.....	74
IV.5. Prédiction de l'usure de l'outil par l'analyse en ondelettes.....	76
IV.5.1. Indicateurs fréquentiels.....	84
IV.6. Indicateurs spectraux.....	87
IV.6.1. Analyse des autospectres et de la morphologie de l'usure	87
IV.6.2. Centre de gravité spectrale	90
IV.7. Conclusion.....	94

Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'analyse multirésolution en ondelettes et la Décomposition en modes empiriques

V.1. Introduction	95
V.2. Surveillance de l'usure des outils de coupe en utilisant une méthode hybride AMRO - EMD.....	96
V.2.1. Choix du vecteur optimal obtenu par l'AMRO	97
V.2.2. Choix de l'IMF optimal obtenu par l'EMD	101
V.2.3. Comparaison des résultats obtenus par l'approche hybride avec ceux obtenus par l'AMRO et l'EMD seules.....	108
V.3. Conclusion.....	112
Conclusion générale et perspectives.....	113
Références bibliographiques	116
Annexes	121

Introduction générale

L'usinage par enlèvement de matière est le processus de fabrication le plus productif dans l'industrie. Son principe est d'enlever des copeaux de manière à donner à la pièce brute la forme voulue à l'aide d'une machine-outil. Ainsi, l'optimisation des processus d'usinage dans le but d'augmenter la productivité tout en assurant la qualité est une priorité au regard de l'industrie.

L'usinage est souvent confronté aux vibrations qui entraînent des problèmes de qualité de surface de la pièce usinée, de l'usure prématurée de l'outil et de l'endommagement de la machine. Cependant, l'usure de l'outil représente l'un des facteurs principaux qui influent sur la productivité et sur la qualité des produits traités, ce qui exige une parfaite connaissance du processus de coupe. De ce fait, la qualité de la pièce produite par usinage dépend principalement de l'état de l'outil de coupe utilisé qui se dégrade au cours du temps d'usinage. D'où l'intérêt de prédire la durée de vie de l'outil de coupe au cours de l'usinage avant la dégradation quasi-complète de l'outil.

La réalisation d'un système de surveillance du processus de coupe est nécessaire en faisant intervenir un grand nombre de paramètres, généralement liés entre eux selon le type de l'usinage, la nature des matériaux usinés et la nature de l'opération d'usinage. Récemment, de nombreux travaux se sont développés surtout en ce qui concerne l'automatisation de la surveillance de l'état des outils de coupe exploitant des signaux prélevés en usinage tels que les signaux vibratoires. Dans ce contexte, des progrès techniques récents, notamment en matière de traitement du signal, ont rendu l'analyse des signaux mesurés très utile pour le suivi de la dégradation de l'état des outils de coupe.

C'est dans cet esprit que le travail présenté dans cette thèse a été développé. Pour bien mener l'objectif visé, une évaluation générale de l'usure des outils de coupe en tournage a été réalisée. Notre investigation repose en premier lieu sur un choix rationnel des techniques et des méthodes d'analyse rapides et exploitables dans la surveillance des outils de coupe. En second lieu, le travail tend à extraire des indicateurs sensibles à la variation l'état de l'outil 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 cinq chapitres : Le premier chapitre présente un état de l'art des différentes méthodes qui s'intéressent au suivi de l'état de l'outil de coupe en usinage. Une attention particulière a été réservée aux méthodes basées principalement sur la mesure de la signature vibratoire. Une synthèse bibliographique a également permis de mieux situer notre étude par rapport aux travaux existants dans la littérature.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse des différentes méthodes de traitement du signal utilisées, ou pouvant l'être, dans le domaine de l'analyse des signaux vibratoires mesurés durant le processus de coupe. Un aperçu mathématique avec exemples d'application sont donnés pour validation. Entre indicateurs temporels, fréquentiels ou temps-fréquence, cette synthèse permet de bien comprendre les apports et les limitations de chaque méthode.

Dans le troisième chapitre, nous présentons le protocole expérimental utilisé pour mener les tests de coupe et la mesure des paramètres qui en découlent. Le chapitre comprend donc une présentation détaillée du matériel de la chaîne de mesure pour l'acquisition des vibrations, la rugosité et l'usure ainsi que les outils et les pièces utilisées. Les premiers résultats obtenus du contrôle direct de l'usure de l'outil de coupe ont été également exposés. Ces résultats concernent principalement la mesure des différents types d'usure et de la rugosité de la pièce usinée. Une analyse modale a été également réalisée pour déterminer les fréquences propres de l'outil de coupe.

Le quatrième chapitre comprend la présentation des résultats obtenus après le traitement des signaux vibratoires mesurés durant le processus de coupe dans différentes configurations. Les méthodes utilisées sont celles temporelles, fréquentielles, mais aussi temps-fréquence à l'image de l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO). Le chapitre tend également à désigner les paramètres qualifiés comme indicateurs potentiels pouvant mettre en évidence les trois phases de la durée de vie de l'outil de coupe depuis sa première utilisation jusqu'à sa détérioration complète. Le plus important reste enfin de déterminer le point de transition de l'usure normale vers l'usure accélérée significatif du début de vieillissement de l'outil.

Dans le cinquième chapitre, nous proposons une méthode hybride pour l'analyse des signaux vibratoires mesurés durant le processus de coupe, basée sur la combinaison de l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD). Le but étant de concevoir une méthode robuste pouvant déceler le moindre changement dans le signal vibratoire qui peut être un signe d'un

changement d'état de l'outil de coupe, notamment son vieillissement. Deux indicateurs scalaires ; l'énergie et la puissance moyenne ont été utilisés, à la fois, comme paramètres d'optimisation de la méthode hybride et aussi en tant que critères d'évaluation et de comparaison des résultats obtenus par rapport à ceux obtenus par l'une des deux autres méthodes.

Enfin, la conclusion générale regroupe les principaux résultats obtenus des travaux de cette thèse et les perspectives visés.

Chapitre I

Surveillance de l'usure des outils de coupe : Etude bibliographique

I.1. Introduction

La conception d'un système de surveillance doit tenir compte de la nature complexe du processus de coupe, à l'image du changement des paramètres de coupe, du matériau de la pièce et celui de l'outil utilisé. Les travaux antérieurs qui visaient le développement d'un système performant, se sont concentrés principalement sur des modèles mathématiques utilisant de grandes quantités de données expérimentales. En effet, l'automatisation du processus de coupe est devenue nécessaire en faisant appel à des méthodes de supervision et de surveillance en ligne très fiables. Ces méthodes sont basées le plus souvent sur la mesure de plusieurs indicateurs tels que les forces de coupe, de l'émission acoustique, de la température de coupe du tranchant d'outil et des signatures vibratoires (le plus souvent signaux d'accélération) à partir desquelles des paramètres corrélés qui sont liés à l'usure de l'outil de coupe doivent être extraits pour donner une mesure de l'ampleur de l'usure d'outil.

La surveillance de l'usure de l'outil de coupe est une tâche complexe qu'on l'imagine, parce qu'elle induit de très petits changements du processus avec un très grand changement dynamique. En outre, il est difficile d'identifier si un changement d'un signal est provoqué par l'usure de l'outil ou un changement des conditions de coupe. La tâche de la surveillance de l'usure de l'outil peut être subdivisée en quatre étapes [Sch'99] :

- Choix et déploiement du capteur ;
- Génération d'un ensemble de dispositifs indicatifs de l'état de l'outil de coupe ;
- Classification des informations rassemblées et traitées pour déterminer la quantité de l'usure de l'outil de coupe ;
- Détermination d'une stratégie optimale de remplacement des outils de coupe.

L'usure se manifeste sur l'outil de coupe sous plusieurs formes et qui dépendent :

- du matériau de l'outil de coupe.

- du matériau de la pièce à usinée.
- de la géométrie de l'outil de coupe.
- des conditions de coupe et du type de l'opération d'usinage.

L'usure de l'outil de coupe se développe en cinq étapes distinctes, à savoir :

- l'usure initiale.
- l'usure régulière.
- la micro-rupture la plaquette.
- l'usure rapide.
- la rupture de la plaquette.

Néanmoins, la plupart des auteurs identifient trois étapes de l'usure : initiale, régulière et rapide avec leur stratégie de surveillance. Plusieurs chercheurs ont également montré que les étapes de l'usure initiale et celle rapide (avant rupture de l'outil) se produisent plus rapidement que l'usure régulière. C'est-à-dire que l'usure rapide vient se manifester brièvement après une période de travail normal de la plaquette. D'où, la difficulté de détecter cette transition au moment opportun.

I.2. Modes de défaillance de l'outil de coupe

Il est important d'identifier les différents modes de défaillance de l'outil de coupe afin de choisir des conditions d'usinage appropriées. Les modes de défaillance de l'outil de coupe les plus largement rencontrés sont l'usure en dépouille, la rupture, l'usure en cratère et la déformation plastique (figure I.1). D'autres modes incluent également l'entaille et le broutement qui changent la courbure du nez de l'outil de coupe. L'usure en dépouille et en cratère sont généralement acceptées comme des modes de défaillance normaux de l'outil de coupe, parce que les autres modes de défaillance peuvent être évités en choisissant des paramètres d'usinage appropriés. La croissance de l'usure en dépouille et en cratère est directement liée au temps de coupe (longueur de la coupe), à la différence de certains autres modes de défaillance qui peuvent se produire inopinément, même avec un nouvel outil.

Il est bien connu que l'usure en dépouille ait la plus grande influence sur les dimensions de la pièce et la qualité de surface. Pour cette raison l'usure en dépouille a été largement recherchée, et les moyens de la prévoir a été la tâche principale des chercheurs pendant plusieurs d'années.

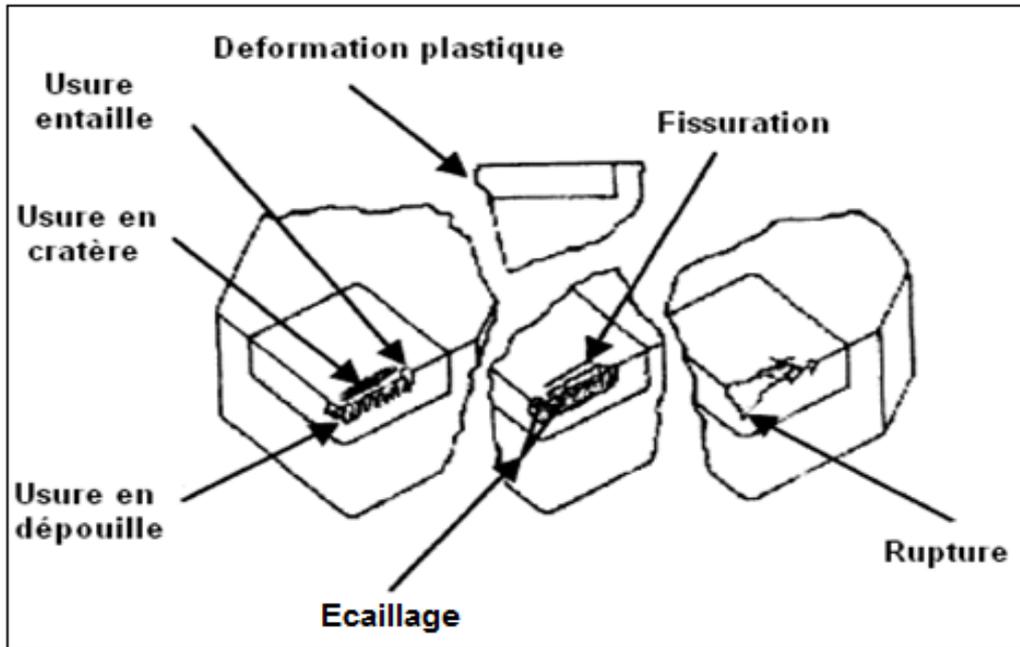


Figure I.1. Modes de défaillance de l'outil de coupe [Sch'99].

I.3. Méthodes de surveillance

Afin de détecter les défaillances citées auparavant, deux systèmes de surveillance de l'usinage sont souvent employés. Ceux basés sur une observation directe de l'outil et ceux basés sur une observation indirecte, c'est-à-dire en suivant l'évolution d'une grandeur physique lors de l'usinage (les efforts de coupe par exemple). La surveillance est également menée soit pendant l'usinage, soit hors usinage par intermittence [Mat'06].

I.3.1. La surveillance hors usinage

La surveillance du processus de coupe donne une information intermittente et différée dans le temps. Ceci ne convient pas pour la détection de la rupture de l'outil car la réaction doit être immédiate. Par contre, elle peut être appliquée pour observer une dérive lente du processus dont l'usure d'outil fait partie. Une observation directe est alors possible en mesurant l'usure en dépouille ou en cratère par exemple ou en contrôlant des témoins d'usure incorporés à l'outil. Elle peut aussi être indirecte en mesurant l'état de surface de la pièce usinée ou en suivant l'évolution d'une dimension de la pièce sur des cartes de contrôle.

I.3.2. La surveillance pendant l'usinage

Une surveillance pendant l'usinage donne une information en continu. Elle permet une réaction en temps réel afin de limiter les dégâts. Une observation directe de l'outil (mesure de sa géométrie, de son usure, ...etc.) serait plus précise mais elle est plus difficile à mettre en oeuvre.

Les systèmes de surveillance automatique de l'usinage sont principalement basés sur une observation indirecte de l'état de l'outil, même si le traitement de l'information est plus complexe, notamment pour établir une corrélation avec l'usure. Notons que l'observation indirecte n'empêche pas d'effectuer, en complément, un palpage mécanique ou par laser hors usinage si le système a un doute quant à l'endommagement d'un outil.

Les mesures les plus fréquemment utilisées dans l'environnement de l'usinage industriel pour la surveillance continue de l'usure d'une façon indirecte sont :

- L'émission acoustique.
- Les efforts de coupe.
- Les signatures vibratoires.
- La température de l'arête de coupe.
- D'autres variétés de mesures sont utilisées dans divers systèmes de surveillance telles que les contraintes, les déformations, le courant, la puissance du moteur,...etc.).

I.4. Détection de l'usure d'outil

Les signaux mesurés sont affectés par la structure du matériau de la pièce, ainsi que par la géométrie de l'outil de coupe et les conditions de coupe. Un système de surveillance en ligne de l'usure de l'outil de coupe, conçu pour prendre en compte toutes ces contraintes, est extrêmement recommandé.

Ouahabi et al [Oua'07] ont proposé une analyse conjointe en temps et en fréquence des signaux vibratoires générés en usinage afin de déterminer l'usure des outils de coupe. Deux méthodes d'analyse sont utilisées dans ce travail : La transformée de Fourier à court terme et la transformée en ondelettes. La comparaison entre ces deux méthodes a été faite du point de vue de leur capacité à suivre l'évolution de l'usure des outils de coupe, le niveau vibratoire, la détection d'événement brusque, l'élargissement spectrale et les fréquences caractéristiques. Les résultats des spectrogrammes

montrent deux bandes fréquentielles centrées au voisinage de 4200 Hz et 5100 Hz correspondant aux fréquences propres de l'ensemble outil et porte-outil. A partir du troisième essai, ils ont constaté l'apparition d'une bande fréquentielle centrée à 2800 Hz qui peut être un mode créé par le contact pièce - outil. Le niveau vibratoire aux fréquences caractéristiques citées augmente progressivement avec la détérioration de la plaquette de coupe utilisée. En dernier essai, ils ont remarqué l'apparition du phénomène de l'élargissement spectral. D'autre part, dans l'analyse temps-échelle, ils ont remarqué que la localisation de l'énergie vibratoire dans le plan temps-fréquence est croissante en fonction de l'usure de l'outil de coupe. Du fait que le signal est stationnaire localement, la transformée de Fourier à court terme s'avère suffisante pour le suivi du développement de l'usure des outils de coupe.

Un travail semblable conduit par Rmili et al [Rmi'07] consiste à traiter la signature vibratoire générée en usinage. La stratégie adoptée s'appuie sur une analyse temporelle ou sur des paramètres statistiques en calculant la moyenne, la puissance du signal, la variance, le skewness pour ten fonctionous les essais. Ensuite, dans le domaine fréquentiel à l'aide de la méthode des périodigrammes lissés et moyennés pour étudier le comportement des niveaux vibratoires en fonction de l'usure des outils de coupe. L'objectif de cette analyse, d'après les auteurs, est de pouvoir identifier l'influence d'une usure de l'outil de coupe sur les vibrations produites lors d'un processus d'usinage. La démarche expérimentale permet de toujours conserver les mêmes conditions de génération des réponses vibratoires et de détecter correctement toute déformation du signal vibratoire étroitement liée au changement de l'état de la plaquette de coupe. Cette identification, renforcée par la corrélation des trois grandeurs physiques (largeur de l'usure en dépouille, la puissance de coupe et les réponses vibratoires relevées en usinage), a permis l'extraction d'un nombre pertinent de descripteurs de l'usure notamment la variance, la puissance du signal et le niveau vibratoire pour une fréquence spécifique à 4200 Hz. Le niveau de puissance du signal vibratoire relatif à la plaquette usée est très supérieur à celui relatif à la plaquette neuve.

Bourdim et al [Bou'07] ont mis en évidence l'influence de la variation continue de la vitesse de coupe sur le comportement vibratoire de l'outil d'un cas d'un usinage particulier. Ceci a permis de tracer des cartes de stabilité montrant clairement l'influence de la vitesse de coupe sur l'amplitude de vibration. Malheureusement, les essais effectués dans cette étude sont très longs et difficiles à mener parce qu'ils demandent de faire plusieurs tests avec des vitesses de coupe différentes. Les

expériences consistent à dresser un disque plein en acier C35 (XC38) à l'aide d'un outil monté volontairement en porte à faux afin de favoriser l'apparition du phénomène de broutage. Le dressage de la surface se fait du centre vers l'extérieur du disque. Ils ont constaté l'influence de la variation de la vitesse de coupe sur la variation de l'amplitude des vibrations horizontale et verticale de la pointe de l'outil. Cependant, les auteurs montrent la transition brusque de l'état stable à l'état instable d'une façon claire. Cette transition correspond à la limite de stabilité ou seuil de broutage. Après l'application de la méthode des moindres carrés, ils ont confirmé encore la transition brusque de l'état stable à l'état instable en déterminant la vitesse critique qui correspond au seuil du broutage qui est égale à 47,54 m/min et la fréquence fondamentale des vibrations de broutage de 301,5 Hz.

Dimla [Dim'04] a proposé un système de supervision de l'état d'outil qui est véritablement applicable dans des conditions de coupe insatisfaisantes, Puisque la prévision de la tenue de l'outil est une tâche difficile, car elle a une distribution large et dispersée, Il peut être pratiquement impossible d'avoir un changement idéal de l'état de l'outil. Le but de ce travail est d'étudier l'impact des conditions de coupe (V_c , f , a_p) sur les signaux des forces de coupe et des vibrations lors d'une opération de tournage. Des signaux ont été enregistrés avec une variation significative des conditions de coupe quand l'outil était relativement neuf ou usé. L'analyse temporelle et fréquentielle a été employée pour indiquer la nature exacte des changements sur le signal suite au changement des conditions de coupe. Cependant, les spectres des signaux des forces de coupe et des vibrations offrent la séparabilité maximale entre les outils neuf ou usé. Généralement, pour un outil usé la distribution des spectres est concentrée au niveau de la fréquence maximale tandis que pour les spectres de l'état neuf, elle peut être dispersée avec une gamme de petites crêtes. Finalement, l'auteur considère que l'effet de l'avance est plus remarquable pour distinguer le changement du signal agissant sur suite les changements de l'état de l'outil avec une bande de fréquence spécifique la plus sensible aux changements.

Lin et al [Lin'03] ont étudié le rapport entre l'usure de l'outil et les forces de coupe pendant l'usinage d'un composite à matrice métallique en Aluminium avec des outils en diamant polycristallin (PCD). A cet effet, ils ont utilisé deux techniques : l'analyse de Régression Multiple (MRA) et les réseaux de neurone généralisés de fonctions à bases radiales (GRBF). Les données des forces de coupe ont été employées à travers les équations généralisées de la force/usure. L'exposition des résultats de l'équation force/usure obtenus par la technique de MRA est une manière assez précise pour

prévoir l'usure de l'outil de coupe. Cependant, l'utilisation de GBRF peut promouvoir améliorer l'exactitude de la prédiction de l'usure de l'outil de coupe, particulièrement dans la région où le changement de l'usure montre un rapport non linéaire avec les forces de coupe. D'autre part, dans la gamme linéaire, les deux méthodes ont permis une prédiction avec exactitudes très semblables. La raison de ceci peut être attribuée au fait que l'analyse de régression est un cas spécial de la méthode de réseau de neurones qui utilise une fonction d'activation linéaire. En outre, il peut être affirmé que la surveillance de l'usure dans le cas spécial de l'usinage des matériaux composites peut être efficacement réalisée en mesurant seulement la force d'avance.

Wang et al [Wan'01] ont présenté une nouvelle approche de la surveillance de l'usure de l'outil de coupe basée sur les coefficients de la transformée en ondelettes avec six niveaux. Des essais de coupe ont été réalisés pour évaluer l'efficacité de l'approche. Les expériences préliminaires ont montré que le signal vibratoire dans la direction d'avance est la plus sensible à l'usure de l'outil de coupe. Sur le plan temps-fréquence, l'énergie des coefficients d'ondelettes la plus élevée est concentrée aux basses échelles (fréquences) pour un outil neuf. Cependant, elle est localisée aux fréquences plus élevées quand l'outil est usé. En outre, les vecteurs de dispositif des différents états d'outil ont été identifiés et classifiés par HMM. Les résultats expérimentaux ont montré un taux moyen de détection de l'usure de l'outil de 97 %. Ces résultats indiquent que la transformée en ondelettes pourrait-être un outil efficace pour le traitement des signaux d'usinage.

Rubio et al [Rub'06] se sont concentrés sur l'application des systèmes de surveillance des signaux de l'émission acoustique aux processus d'usinage. Ils ont décrit certaines des méthodes avancées les plus diffuses de traitement des signaux employées dans ce type de systèmes tels que transformée continue et discrète (Fourier, Gabor et ondelette) et les méthodes d'analyse statistique (méthode de distribution d'amplitude et la méthode de distance entropique).

Sharma et al [Sha'08] ont développé principalement un modèle mathématique du processus de coupe qui dépend de grandes quantités de données expérimentales pour l'évaluation de l'usure de l'outil dans des opérations de tournage. Ce modèle est construit par un système d'ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) Où Ils ont considéré le temps, les forces de coupe, les vibrations et l'émission acoustique comme paramètres d'entrée et l'usure d'outil comme sortie. Ainsi, ils ont conclu qu'il y a une relation étroite entre les résultats simulés et les résultats pratiques obtenus. Le modèle

a donné des résultats tout à fait satisfaisants avec les valeurs réelles et prévues de l'usure de l'outil de coupe.

Prateepasen et al [Pra'01] ont décrit le développement d'un système intelligent de surveillance en ligne des différentes étapes de l'usure de l'outil de coupe en tournage. Ce système utilise des mesures de l'émission acoustique (AE) et des vibrations pour la surveillance des différentes étapes de l'usure d'outil. La valeur efficace du signal de l'émission acoustique et la fonction de concordance entre les signaux d'accélération dans les directions tangentielle et axiale ont été étudiées pour détecter la progression de l'usure en dépouille des plaquettes en carbure. Ils ont trouvé que les valeurs de la fonction de concordance à proximité de la fréquence propre (2,5 – 5,5 KHz) de l'outil de coupe diminuent avec l'évolution de l'usure de l'outil parce que les effets de friction étaient plus dominants que les effets de cisaillements, tandis que dans la gamme des hautes fréquences (18 – 25 KHz), la valeur de concordance augmente. Afin d'employer un système expert, appelé le réseau de Belief basé sur la règle de Bayes, l' AE_{RMS} et les vibrations ont été utilisées en tant qu'informations principales pour pouvoir à la fin classifier l'état de l'outil de coupe. Les outils usés ont été divisés en deux sous-ensembles égaux : un pour former le réseau et l'autre pour l'examiner. Le succès du réseau pour détecter l'usure de l'outil est très satisfaisant avec un taux d'erreur de 3,3 %.

Mikko *et al* [Mik'03] présentent un système expérimental basé sur la source de lumière laser de vitesse élevée (Stroboscope), un appareil photo CCD et l'acquisition des signaux de l'émission acoustique. Le but principal de cette recherche était l'obtention de nouvelles informations sur les sources d'émission acoustique dans le processus de tournage et sur les images à haute résolution de la formation de copeau des différents aciers alliés. Une comparaison des images démontre que la taille de la zone de déformation primaire a un impact évident au niveau du signal de l'émission acoustique.

Gradisek et al [Gra'98], dans leur tentative d'étudier le phénomène de broutement qui se produit en raison de la variation cyclique de l'effort de coupe, ont proposé une nouvelle méthode basée sur les différentes propriétés de la coupe dynamique et celle accompagnée de broutement. En exploitant le changement significatif de la coupe dynamique provoquée par le début du broutement. Expérimentalement, des essais de tournage sur des pièces cylindriques et coniques ont été exécutés. L'analyse montre qu'une valeur élevée du taux d'entropie est typique de la coupe de broutement libre,

alors une baisse significative de la cette valeur indique le début du broutement. La normalisation limite des valeurs de CER s'étend sur une gamme entre zéro et l'unité. L'analyse montre qu'une valeur élevée de CER est typique d'un broutement libre, alors qu'une basse valeur indique le début du broutement (notamment des valeurs en dessous de 0,2). En conclusion, la méthode présentée, basée sur le taux d'entropie offre une interprétation physique qualitative du processus de coupe. D'autre part, la méthode est aisément applicable pour la détection en ligne du broutement dans un environnement industriel.

Oraby et Alaskari [Ora'09] ont étudié l'usure de l'outil dans l'opération de tournage en régime variable. Des procédures expérimentales ont été conçues pour étudier tous les effets de changement des conditions de coupe avec des plaquettes revêtues et non revêtues. L'étude illustre comment l'information de test du paramètre fixe peut être exploitée pour donner une approche acceptable de l'usinage pratique du paramètre variable. Ils ont constaté que les valeurs de déviation d'usure étaient beaucoup plus étroit et plus uniformément pour des arêtes de coupe non revêtue, qui est du au différent mécanique par lequel les outils revêtue déforment, particulièrement au zone de taux d'usure constante. D'une façon générale, ils ont conclu qu'il y a une bonne corrélation entre l'information dérivée des deux paramètres. Par conséquent, il est possible d'employer l'approche proposée pour extraire des informations sur un usinage pratique avec conditions variable sans nécessité de conduire les conditions de coupe variables. En outre, la différence au niveau de l'usure, développée des processus d'essai discrets et continus, est dépendante du type de l'outil et des conditions de fonctionnement. Cette différence est moindre pour les plaquettes revêtues mais augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'avance.

Dans le processus de tournage, la qualité d'une pièce est considérablement influencée par les paramètres de coupe, la géométrie d'outil, le matériau d'outil, la formation de copeau, l'usure d'outil et les vibrations pendant la coupe. Une haute qualité de produit avec la plus longue tenue d'outil peut être réalisée par le choix des paramètres d'usinage et par la surveillance directe du processus de coupe. C'est dans cet esprit que le travail présenté par Thamizhmani et al [Tha'07] traite l'usure d'outil et la rugosité de surface d'un acier de catégorie AISI 8620 en utilisant des outils en céramique revêtue. Ces outils ont une dureté exceptionnelle, une bonne résistance aux températures élevées ainsi qu'à l'usure. Les essais ont été réalisés sous différentes combinaisons des conditions de coupe avec une période de temps d'usinage fixe. En conclusion, les résultats montrent que la rugosité de surface est inversement

proportionnelle à la vitesse de coupe et que l'usure d'outil n'était même pas apparente dans quelques essais. Elle a augmenté rapidement pour une vitesse de coupe, un taux d'avance et une profondeur de coupe plus élevés avec un temps de coupe plus long. D'autre part pendant l'usinage, la formation de l'arrête rapportée était due à la haute température et aussi en raison de la diffusion du matériau de la pièce usinée sur l'outil de coupe.

I.5. Système de supervision des états d'outils

L'instrumentation existante permet de surveiller le comportement des paramètres du processus d'usinage. Le choix de ces paramètres pour le développement d'un TCMS doit prendre en considération la robustesse, la fiabilité et l'applicabilité des signaux de sonde qui doivent être conformes aux critères tels que [Dim'00] :

- Facilité de mesure ;
- Rapport signal bruit élevé ;
- Conformité dans la sensibilité de l'usure ;
- Exigence d'instruments périphériques minimaux pour l'exploitation.

Les différentes opérations d'usinage exigent des vitesses de coupe variables, alors que l'opération de coupe peut être continue ou discontinue. De faibles conditions de coupe provoquent une augmentation des forces de coupe, de l'énergie et de la température ayant pour résultat un taux plus élevé de l'usure de l'outil de coupe. La coupe aux vitesses et aux taux d'avance élevés donne naissance à une augmentation de la température sur la face de l'outil, ayant pour résultat une augmentation de l'usure en cratère. A basses vitesses de coupe, l'apparition du phénomène de l'arrête rapportée est inévitable. Les effets des conditions de coupe sur les forces statiques et dynamiques, et les signatures de vibration ont une large marge de variabilité. Il est difficile de prévoir exactement ce que serait l'importance des forces de coupe aux vitesses spécifiques de coupe. Par conséquent, il est possible d'utiliser les conditions de coupe pour l'implémentation des systèmes de type TCMS, car les variations significatives des signaux résultent des changements de ces paramètres.

I.6. Système de surveillance automatique de l'usinage

Traditionnellement, la surveillance d'usinage est dévolue à un opérateur dont le rôle est de s'assurer du bon déroulement du process et de réagir en cas de problème en mettant fin à l'usinage en cours ou en ajustant quelques paramètres opératoires.

Cependant, les capacités sensorielles de l'opérateur deviennent souvent insuffisantes. L'observation visuelle peut être perturbée par la lubrification et l'ouïe par les autres machines de l'atelier. En outre, la diversification et l'extension des tâches assignées à l'opérateur ne lui permettent plus d'effectuer une surveillance en continu de l'usinage. Une fois la production lancée et stabilisée, sa présence n'est plus vraiment justifiée.

L'alternative serait l'automatisation de cette surveillance. A cet effet, pour être entièrement automatisé, un site de production doit pouvoir intégrer le changement automatique des outils de coupe. Ce changement automatique se fait dès que l'outil n'est plus dans les limites géométriques préalablement définies, pour respecter les différentes spécifications dimensionnelles imposées par le cahier des charges. Ces limites se caractérisent par deux familles principales de défauts [Bar'99] :

- Une rupture d'éléments de la partie active de l'outil ;
- Une usure excessive de la partie active de l'outil.

Le but d'un système de surveillance automatique de l'usinage est de s'assurer du bon fonctionnement du processus de fabrication. Si un incident est détecté, le système conduit alors une action de sauvegarde adéquate pour pallier le problème. La figure I.2 illustre le principe de fonctionnement des systèmes de surveillance automatique de l'usinage.

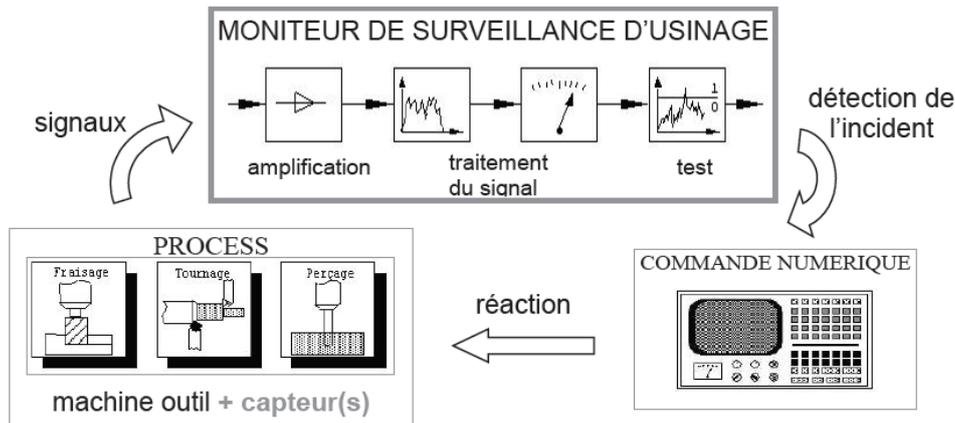


Figure I.2. Principe de fonctionnement d'un système de surveillance automatique de l'usinage [Mat'06].

L'action doit avoir lieu au plus tôt et, si possible, avant que des dommages ne soient causés. Par exemple, si une surcharge est constatée sur l'outil, il serait bon d'adapter les conditions de coupe avant que l'arête ne s'effondre. Pour que le système de production puisse établir si un accident va survenir pendant la coupe, il a besoin

d'informations sur le procédé de fabrication. Un moniteur de surveillance d'usinage peut alors traiter le ou les signaux, pour supprimer notamment le bruit, puis effectuer des tests pour déterminer si un incident a eu lieu. Si c'est le cas, la commande numérique mène l'action de sauvegarde selon les instructions données par le moniteur. L'ajout de capteurs permet d'augmenter l'intelligence d'un système. Il en va de même pour une CN, si l'on souhaite qu'elle soit plus intelligente, capable de détecter des incidents lors de la coupe, préparée à la maintenance, la machine-outil doit être équipée de capteurs et de systèmes de surveillance automatique.

I.6.1 Avantage des systèmes intelligents

De tels avantages sont décrits en détail dans ce qui suit :

- Les méthodes, principalement basées sur les systèmes hybrides et intelligents, sont devenues particulièrement appréciées, parce que l'usure de l'outil est intrinsèquement un processus fortement non linéaire, sa représentation par l'intermédiaire d'un système intelligent est une alternative fiable et attractive aux méthodes précédemment utilisées.

- Les systèmes intelligents, avec les dispositifs de traitement robustes et fortement parallèles, sont capables de modéliser des problèmes non linéaires. La description explicite du problème n'est pas exigée, ces systèmes sont capables de manipuler de grandes quantités de données (expérimentales) utilisées afin d'établir des bases de connaissance qui sont consultées pendant la prise de décision.

- L'usure excessive mène à une situation telle que l'outil de coupe ne puisse plus supporter les efforts de coupe engendrés, et qui peuvent mener à la rupture brutale de l'outil. La vitesse de progression de l'usure de l'outil n'est pas prise en considération en premier lieu et n'a pas d'incidence sur le processus de coupe, par contre des facteurs tels que l'état de surface, l'intégrité dimensionnelle de la pièce et de la dynamique globale de la machine outil doivent être pris en considération par le processus.

- les systèmes de production se sont rapidement convertis en systèmes entièrement automatisés, nécessitant une fabrication assistée par ordinateur et des ateliers flexibles. Il semblerait logique que la surveillance de l'usure de l'outil de coupe devienne inévitablement un dispositif automatisé pour compléter la chaîne de fabrication. Par conséquent, et par mesure de sécurité il est primordial et opportun d'identifier et de remplacer un outil de coupe usé pour s'affranchir des répercussions néfastes sur la pièce, l'outil et la machines. Au-delà d'un certain seuil d'usure, divers

phénomènes apparaissent, on peut citer entre autres les vibrations excessives de la machine-outil, occasionnant la rupture brutale de l'outil donnant lieu à des surcharges de puissance et éventuellement la détérioration aussi bien de la machine-outil que de la pièce. La mise en oeuvre de systèmes de surveillance en ligne permet de parvenir préalablement à une prédiction de l'usure, contournant ainsi tous les écueils du phénomène d'endommagement des outils de coupe.

I.6.2 Système de surveillance en ligne des outils de coupe dans la littérature

Plusieurs systèmes de surveillance en ligne de l'usure des outils coupants, basés sur les méthodes de fusion combinées de capteurs, ont été largement affectés par le temps de calcul élevé, particulièrement prépondérant lors de la phase d'apprentissage.

Mardapittas et Au [Mar'08] se sont intéressés à la surveillance en ligne de l'usure et la rupture de l'outil de coupe dans un système de surveillance des processus d'usinage. La méthodologie employée dans ce travail comprend notamment, l'acquisition des signaux, l'analyse de ces signaux afin d'extraire les indicateurs qui peuvent donner une information sur l'état de l'outil de coupe, et la classification de ces indicateurs par l'utilisation des probabilités bayésiennes. L'intégration de cette méthodologie avec un système expert permet de fournir un système de surveillance efficace et fiable. L'influence de l'usure de l'outil de coupe et des autres variables du processus d'usinage sur les signaux a été étudiée. Cinq paramètres principaux ont été mesurés dans ce travail, à savoir les forces de coupe, l'émission acoustique, l'ensemble optique, le déplacement et l'accélération. La mise en oeuvre de ce système expert peut fournir des informations fiables sur toutes les anomalies avec un taux de succès et une vitesse d'exécution acceptables.

Antić et al [Ant'06] ont conduit un travail sur la possibilité d'appliquer un système de surveillance de l'usure de l'outil de coupe en tournage dur en employant des outils modernes et les méthodes de l'intelligence artificielle (AI). La configuration de base de l'installation expérimentale contient un tour à commande numérique équipé de sondes de mesure de la force de coupe et une jauge de contrainte placée sur le support de l'outil de coupe. Les plaquettes utilisées dans les expériences ont été revêtue par TIN (TNMG 220408). Le réseau de neurones utilisé dans cet article est du type perception multicouche (MLP) pour établir les valeurs de l'usure en dépouille (VB). Le réseau contient trois couches : la couche d'entrée contenant trois variables, la couche cachée et la couche de sortie qui sert à estimer l'usure en dépouille. Le nombre de neurones

dans la couche cachée a été déterminé par l'exécution du réseau pour différents nombres de neurones (deux à sept neurones). Il a été montré que les réseaux avec deux et trois neurones dans la couche cachée ne donnaient pas des résultats satisfaisants, alors que ceux contenant cinq neurones donnaient de bons résultats, la raison pour laquelle la structure finale du réseau a été choisie de la forme « 3-5-1 ». Par ailleurs, les auteurs ont montré l'efficacité de ce réseau de neurones qui permet une parfaite concordance avec une erreur allant de 10^{-4} à 10^{-3} entre la valeur estimée par le réseau et celle exacte mesurée.

L'objectif principal du travail de Tuğrul et al [Tuğ'07] est d'étudier l'influence des paramètres de coupe sur l'usure en dépouille et la qualité de surface en tournage dur de l'acier à outil AISI D2 (60 ± 1 HRC) avec des plaquettes en céramique mélangée d'alumine (Multi rayons). Les auteurs ont développé des modèles de réseau de neurones multicouche de propagation en avant pour la prédiction de l'usure en dépouille et de la rugosité de surface. La vitesse de coupe, le taux d'avance, le temps de coupe, la force de coupe moyenne (F_m), la puissance de coupe et la force spécifique sont employés comme paramètres d'entrée du réseau de neurones. La taille du vecteur entrée/sortie de ce réseau forme une combinaison de 18/09 (apprentissage/test) choisie aléatoirement à partir des différentes conditions de coupe. Ainsi, des structures de réseaux de neurones «6-5-1» et «6-4-1» sont utilisées respectivement pour la prédiction de la rugosité de surface (R_a) et de l'usure en dépouille (VB). Les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir de basses valeurs de la rugosité de surface (R_a) entre $0,18 - 0,20 \mu m$. En général, une avance et une vitesse de coupe basses permettent d'avoir une meilleure tenue d'outil, tandis qu'une meilleure finition de la surface est obtenue par la combinaison d'un faible taux d'avance et d'une vitesse de coupe élevée. Pour des vitesses de coupe élevées, l'usure en dépouille de l'outil de coupe atteint une valeur critère de sa tenue ($VB = 0,15$ mm) au bout de 15 minutes de temps de coupe, ceci est dû essentiellement aux températures élevées pendant le processus d'usinage.

Les opérations de remplacement des outils de coupe ont une grande influence sur le coût des pièces usinées. Dans ce contexte, Enrique et al [Enr'09] ont présenté un nouveau procédé pour améliorer la décision du moment économique du remplacement de l'outil de coupe. L'approche proposée est basée sur l'analyse des images numériques des arrêtes tranchantes pour déterminer si l'usure de l'outil de coupe est sous la limite de l'utilisation. Les essais ont été réalisés sur un tour à commande

numérique, l'acier usiné est du type ANSI SAE 4340 et 4140, et les plaquettes de l'outil sont en carbure de tungstène (CNMG 120404 MF235). 1383 images de l'usure en dépouille ont été acquises avec une application spécifiquement développée (545 images du début d'usure et 787 images de l'usure développée). La description de la forme de l'arrête de l'outil est assurée par une approche de détection de contours. La signature est calculée comme vecteur contenant 40 et 100 éléments de contour normalisés entre 0 et 1, ces vecteurs modifiés constituent l'entrée du classificateur. Une classification a été effectuée par des images selon deux critères différents. Le premier critère est la valeur de V_{BB} , qui représente la largeur moyenne de la bande d'usure en dépouille. Le deuxième critère est la valeur maximum V_{BCmax} , qui représente la valeur maximum de la largeur de la bande d'usure. En conclusion, les auteurs ont remarqué que la description de la région d'usure au moyen d'un vecteur de signature avec 40 éléments est meilleure que celle contenant 100 éléments, ceci avec un réseau de neurones du type MLP ayant un taux d'erreur de 5,1 %.

Jemielniak [Jem'03] a appliqué un réseau de neurones du type « Perception Multicouche » pour la surveillance de l'usure de l'outil de coupe en tournage. Les expériences ont été effectuées sur un tour conventionnel avec un support d'outil équipé d'une plaquette de carbure de SNUN 120408 revêtue de Tin- Al_2O_3 -TicN. Par conséquent, le critère de tenue d'outil ne devrait pas excéder $V_{BB} = 0,3$ mm. Néanmoins, les essais ont été menés jusqu'à l'occurrence d'une rupture de l'outil de coupe. Six configurations de paramètres d'entrée ont été étudiées pour indiquer leur rentabilité. Dans chaque réseau, la couche intermédiaire (couche cachée) comprend dix neurones, tous qualifiés avec un coefficient d'apprentissage de 0,9 et un facteur "momentum" de 0,6 et plus de 200000 itérations. Les erreurs d'évaluation de l'usure de l'outil sont plutôt acceptables et elles ne résultent pas tellement de toutes les imperfections des réseaux eux-mêmes. La structure finale a été optimisée au moyen d'une méthode qui rend automatique la configuration du réseau en choisissant automatiquement le nombre minimum de neurones dans la couche cachée. Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'approche proposée.

Silva et al [Sil'00] ont conçu un système de surveillance en ligne de l'usure de l'outil de coupe dans le cas où les conditions de coupe peuvent changer. Les paramètres mesurés étaient constitués de deux composantes de la force de coupe, de l'émission acoustique, du signal vibratoire et du courant de la broche. Six plaquettes de carbure revêtu ont été employées dans chaque condition avec trois niveaux de l'usure en dépouille de l'outil : neuf, moitié – usé ($V_{BB} \approx 0,15$ mm), usé ($V_{BB} \approx 0,3$ mm). L'étude

a montré que l'usure d'outil peut être efficacement détectée dans des conditions de coupe fixes par un système de surveillance utilisant deux réseaux de neurones artificiels (SOM, ART2). Par ailleurs les performances de ce système sont radicalement réduites dès qu'on lui demande de classifier l'usure d'outil sous des conditions de coupe variables, bien qu'il y ait une zone d'influence autour des conditions d'apprentissage où le réseau de neurones fonctionne efficacement. Enfin, les résultats montrent que les deux réseaux de neurones ont un taux de réussite semblable égal à 80%.

L'évaluation de la tenue d'outil implique un certain nombre d'essais à effectuer dans diverses conditions de coupe jusqu'à la rupture totale. Cette approche consomme non seulement beaucoup d'outils et de pièces usinées, mais également exige beaucoup de temps. Dans l'article [Ojh'05], les auteurs ont proposé une méthode d'expérimentation plus rapide et plus fiable pour l'évaluation de la tenue de l'outil de coupe en tournage. La méthodologie adoptée consiste à effectuer 5 à 7 passes dans chaque condition de coupe. La tenue d'outil est estimée à partir des meilleures données obtenues dans la zone d'usure régulière, la rupture est finalement estimée par extrapolation. Des réseaux de neurones de propagation en avant, ou " feed – forward ", sont employés pour trouver les évaluations probables de la tenue d'outil. Les réseaux ont exigé un total de 22 données composées de 14 données d'apprentissage et de 8 pour les tests. Cependant, les résultats montrent que l'erreur de la valeur moyenne efficace est de 29,1 % pour les tests et de 48,6 % pour le résultat final donnant une plus basse tenue d'outil de 37 min. En raison d'un certain nombre de facteurs aléatoires, ces erreurs sont jugées raisonnables.

Yeo et al [Yeo'00] ont présenté une nouvelle approche pour l'évaluation de l'usure de l'outil de coupe. Les auteurs ont employé une méthode basée sur la réflectivité de la surface du copeau et un réseau de neurones de rétro propagation. Le travail a montré que la vitesse de coupe, le taux d'avance, la profondeur de coupe, les forces de coupe, les rapports des forces de coupe et la réflectivité de la surface du copeau sont liés à l'usure en dépouille de l'outil. D'autre part, ils ont démontré la possibilité d'employer ces paramètres comme entrées et l'usure en dépouille comme seule sortie pour former un réseau de neurones du type «8-7-1». Les résultats prouvent l'efficacité du réseau conçu en montrant que l'usure en dépouille estimée par le réseau était très proche de celle mesurée.

Dans l'étude menée dans [Tug'02], un ensemble d'algorithmes de réseau de neurones de rétro propagation est employé pour prévoir l'usure en dépouille des outils de coupe. L'arête de coupe utilisée est en CBN avec deux géométries différentes, et les pièces usinées sont en acier durci H-13. L'avantage principal du réseau de neurones conçu est le fait qu'il peut estimer la progression de l'usure en dépouille rapidement et exactement, nécessitant seulement la connaissance des forces de coupe. Le réseau de neurones se compose de trois couches : la couche d'entrée avec cinq éléments (la vitesse de coupe, l'avance, le temps, la largeur de coupe et le rapport de la force de coupe). La couche moyenne comprend trente éléments et enfin celle de sortie huit éléments. Les résultats montrent un accord raisonnable entre l'usure en dépouille estimée par le réseau et celle mesurée.

La détection automatique de la rupture de l'outil durant le processus de coupe est très importante afin d'empêcher des dommages possibles de la pièce usinée et de la machine-outil. Une technique fiable et efficace est exigée pour fournir une réponse rapide à une rupture inattendue d'outil. Dans cet esprit Wang et al [Wan'03] ont présenté plusieurs méthodes visant à surveiller l'usure de l'outil en mesurant différents paramètres comme l'effort de coupe, la puissance du moteur et l'émission acoustique (AE). Cependant, en raison de la difficulté de distinguer diverses sources des signaux (AE) émis, l'analyse temps-fréquence est adoptée pour extraire les informations à partir des signaux mesurés. Les auteurs ont observé quatre types de variation du signal de puissance quand la rupture de l'outil de coupe s'est produite. Ceci montre que le changement de ces signaux dans le domaine temporel a été stochastique. Par conséquent, les auteurs ont proposé une autre méthode appelée « désaccord retardé ». Le traitement des signaux de puissance par cette méthode montre l'augmentation de la variance des signaux en raison de la rupture de l'outil de coupe. D'autre part, l'état de l'outil peut être identifié par un réseau de neurones basé sur la théorie de résonance adaptative (ART2) avec un taux d'identification de la rupture de l'outil de coupe de 95 % quand le paramètre de vigilance est de l'ordre de 0,97.

I.7. Problématique

En vu de suivre l'usure des outils de coupe, la surveillance des processus d'usinage joue un rôle très important dans la minimisation des durées de pannes et l'empêchement de l'apparition de certains phénomènes non désirés tels que le broutement, l'usure excessive ou la rupture de l'outil. Dans ce contexte, la stratégie adoptée dans cette thèse consiste à utiliser une méthodologie qui combine le

numérique et l'expérimental permettant de suivre l'usure et l'endommagement des outils de coupe. La méthode est basée sur l'analyse des signatures vibratoires mesurées 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 de données issues 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 approches, à savoir l'analyse temporelle et fréquentielle, l'analyse en ondelettes, la décomposition en modes empiriques, ou encore une approche hybride.

I.8. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art des méthodes de détection de l'usure des outils de coupe, à savoir les méthodes basées sur la mesure des efforts de coupe, l'émission acoustique, les signatures vibratoires, la température, ainsi que les autres méthodes moins utilisées. La synthèse bibliographique effectuée montre que la surveillance des outils de coupe a une grande signification dans les processus d'usinage moderne.

L'étude bibliographique a également permis de mettre en évidence l'intérêt de la surveillance automatique en ligne des outils de coupe et l'intérêt de développer de tels systèmes. En effet, le développement des systèmes de surveillance de l'état de l'outil de coupe a attiré un grand effort de recherche avec les systèmes qui se concentrent sur le broutement, la rupture d'outil et les différentes manifestations de l'usure de l'outil de coupe. Il est évident que les systèmes intelligents offrent l'opportunité de remplacer l'opérateur humain, qui peut être subjectif et relativement imprécis, quant à la prise de décision sur l'état d'usure de l'outil de coupe. A ce propos, nous avons constaté que le système intelligent largement expérimenté pour la supervision de l'état des outils de coupe est celui du type hybride en raison de sa capacité d'exécution et de son taux de convergence rapide.

Chapitre II

Outils de traitement des signaux au service de la surveillance de l'usure

II.1. Introduction

Afin de comprendre les principes des stratégies de surveillance proposées dans cette étude, il est nécessaire de discuter certains détails mathématiques concernant les différentes méthodes d'analyse vibratoire choisies et les différentes méthodes de surveillance de l'usure appliquées dans le domaine temporel, fréquentiel et par l'analyse en ondelettes. En outre, la décomposition en modes empiriques (EMD) sera utilisée dans ce travail comme méthode de traitement des signaux pour la quantification de l'usure des outils de coupe et la prédiction de leur durée de vie. Généralement, le traitement des signaux mesurés comprend deux phases, à savoir, l'extraction de l'information et le traitement pour le suivi du développement de l'usure.

La plupart des techniques de surveillance de l'usure durant le processus de coupe sont basées sur la mesure des grandeurs physiques sensibles à la variation de l'état de l'outil. Parmi ces grandeurs, on peut citer les efforts de coupe, les vibrations et l'émission acoustique acquis pendant l'usinage. Une fois ces grandeurs sont traitées et analysées, l'état de l'outil peut être prévu avec une identification de modèle ou toute autre technique de classification telle que :

- Valeur moyenne
- Valeur efficace du signal (RMS)
- Skewness
- Puissance dans une bande de fréquence spécifique au moyen de la FFT.

Les principes mathématiques de base derrière chacun de ces aspects dans la stratégie de surveillance sont discutés en ce qui suit.

II.2. Analyse temporelle et statistique

Les indicateurs scalaires associés à un signal, le plus souvent observé sous sa forme temporelle, un nombre ou scalaire sont calculés directement à partir des signaux temporels enregistrés par tous les capteurs et l'analyseur. L'analyse statistique est

largement utilisée aussi bien au niveau académique qu'au niveau industriel puisque la statistique est le meilleur outil de traitement des processus aléatoires tel que l'état des outils de coupe. Le choix des indicateurs de l'analyse temporelle : Valeur moyenne, RMS, l'énergie, la puissance et la puissance moyenne est obtenu de l'expérimentation et de la littérature. Une brève discussion sur les indicateurs choisis suit :

a) Valeur moyenne

La valeur moyenne d'un signal $S(t)$ pendant un intervalle T est donnée par l'expression suivante :

$$\bar{s} = \frac{\int_0^T s(t) dt}{T} \quad (\text{II-1})$$

b) Valeur efficace du signal (RMS)

La valeur RMS d'un signal $S(t)$ pendant un intervalle de T est donnée par :

$$s_{rms} = \sqrt{\frac{\int_0^T s(t)^2 dt}{T}} \quad (\text{II-2})$$

g) l'énergie et la puissance

Les expressions des deux nouveaux indicateurs sont les suivantes :

$$E = \sum_{k=1}^{k=N} S_k^2 \quad (\text{II-3})$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} S_k^2 \quad (\text{II-4})$$

Avec N le nombre d'échantillons du signal.

k) la puissance moyenne

La puissance moyenne d'un signal à N échantillons est définie par [Rmi'07] :

$$P_{moy} = \frac{F_s}{N} \sum_{K=1}^N S_k^2 \quad (\text{II-5})$$

Avec F_s la fréquence d'échantillonnage.

II.3. Analyse fréquentielle

Les méthodes d'analyse fréquentielle ou spectrale sont très répandues dans les études vibratoires. Elles permettent de mettre en évidence les composantes

périodiques d'un signal. La transformée de Fourier, particulièrement sa version discrète, est l'une des méthodes les plus employées en analyse fréquentielle.

II.3.1. Transformée de Fourier

En analyse, la théorie des séries de Fourier est limitée à l'étude des fonctions périodiques. Sa généralisation aux fonctions non périodiques est la transformée de Fourier (TF). Les fonctions de base de Fourier sont les fonctions cosinus et sinus ou leurs expressions sous la forme exponentielle. L'intégrale de Fourier qui assure le passage de l'espace temporel à l'espace fréquentiel, elle permet donc à partir d'une représentation temporelle d'accéder à la représentation fréquentielle

On appelle transformée de Fourier du signal $S(t)$, la fonction :

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (\text{II-6})$$

On définit la transformée inverse (TF⁻¹) par l'expression :

$$S(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df \quad (\text{II-7})$$

II.3.2. Transformée de Fourier Discrète

La transformée de Fourier discrète (TFD) s'introduit quand il s'agit de calculer la transformée de Fourier des signaux numériques de durée finie. Pour calculer numériquement un spectre, de la même manière que pour le domaine temporel, il faut discrétiser les fréquences en N intervalles (N est couramment une puissance de 2) afin de permettre l'utilisation de l'algorithme de la transformée de Fourier rapide (FFT).

L'algorithme de la FFT utilise le fait que la TFD globale peut être décomposée en TFD de séquences de plus en plus courtes. En fait, l'algorithme FFT n'est pas une nouvelle transformation mais juste une décomposition de la TFD [Cro'08].

II.4. Analyse par ondelettes

Le principe de l'analyse par ondelettes est basé sur l'utilisation des fenêtres d'analyse de tailles variables. Ce qui permet d'effectuer une étude multirésolution des données d'une surface, et de quantifier localement les différentes composantes fréquentielles de l'image topographique de la surface. On examine ces données à résolution grossière à l'aide d'ondelettes larges et avec un petit nombre de coefficients. Par contre, à une grande résolution, on utilise un grand nombre de petites ondelettes qui permettent une analyse plus fine. Par analogie, l'analyse par ondelettes est

équivalente à l'observation par un microscope optique, dont les grossissements des objectifs sont les ondelettes analysantes à différentes largeurs ou échelles.

II.4.1. Ondelette mère et conditions d'existence des ondelettes

La fonction $\psi(x)$ de variable réelle « x », s'appelle " ondelette mère " qui est une fonction oscillante comme une onde, mais localisée. Ces conditions suggèrent que $\psi(x)$ vibre comme une onde et décroît rapidement quand x augmente.

Une fonction $\psi(x)$ est dite ondelette analysante si elle satisfait les conditions suivantes :

- être continue, absolument intégrable et de carrée intégrable (énergie finie)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^2(x) dx < \infty \quad (\text{II-8})$$

- être analytique : sa transformée de Fourier doit être nulle pour $f < 0$
- être admissible : $\psi(0) = 0$

Cette dernière condition n'implique que $\Psi(x)$ est de moyenne nulle :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (\text{II-9})$$

II.4.2. Famille d'ondelettes

Parmi une grande famille des ondelettes, on trouve : Gaussienne complexe, Daubechies, coiflets, symlets, Morlet, Chapeau mexicain, Meyer. Les ondelettes sont choisies surtout en fonction du type d'analyse voulu et de leur régularité (figure. II.1).

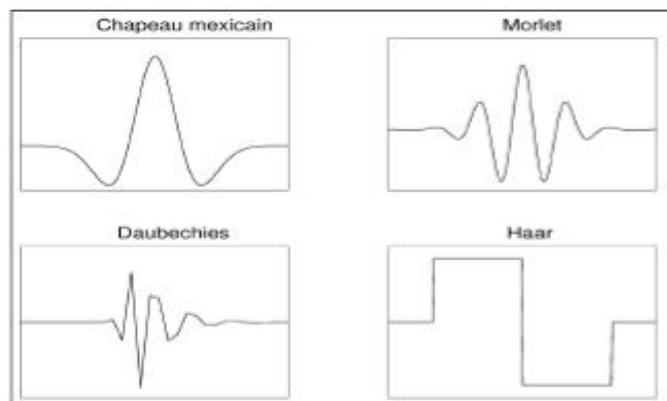


Figure II.1. Quelques formes des ondelettes usuelles.

La famille d'ondelettes $\psi_{a,b}(x)$ $a > 0, b \in \mathbb{R}$ s'écrit :

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (\text{II-10})$$

Où « a » traduit le changement d'échelle et « b » la translation dans l'espace. Le nombre d'oscillations des fonctions analysantes de la transformation en ondelettes ont le même nombre d'oscillations : elles s'étirent ou se contractent. (Fig. II.2).

Si on considère $\psi_{a,b}(x)$ comme un banc de filtres, la résolution en temps augmente avec la fréquence centrale des filtres et Δf n'est pas constant mais proportionnel à la fréquence centrale. Le banc de filtres est composé par un ensemble de filtres passe bande avec une largeur de bande relative constante.

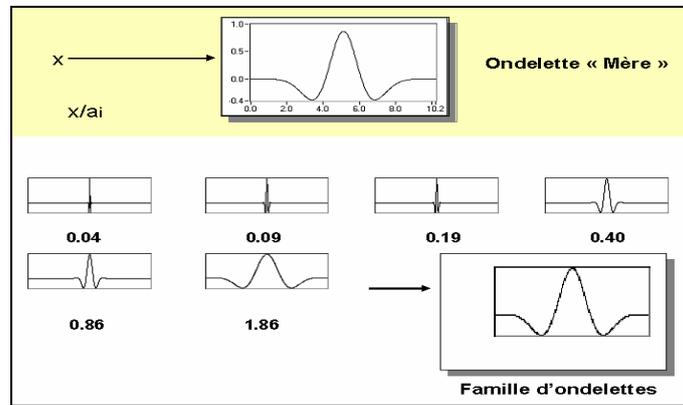


Figure II.2. Génération d'une famille d'ondelettes.

II.4.3. Transformée en ondelettes

La fonction à deux variables est une représentation temps-échelle appelée "Transformation en ondelettes". La transformée en ondelette d'une fonction $f(x)$ est définie par :

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (\text{II-11})$$

Le principe de calcul de cette transformation est décrit dans la figure II. 3.

L'ensemble de fonctions $C(a, b)$ constitue les coefficients en ondelettes du signal $f(x)$ suivant la famille d'ondelettes $\psi_{a,b}$. Pour chaque couple (a, b) , $|C(a,b)|^2$ est proportionnel à l'énergie du signal $f(x)$ contenu dans la bande de fréquence et au

couple (a, b) . Dans un certain sens $C(a, b)$ mesure les fluctuations du signal $f(x)$, autour du point b , à l'échelle fournie par $a > 0$. La figure II.4 montre le plan Espace-Fréquence de la transformée en ondelette.

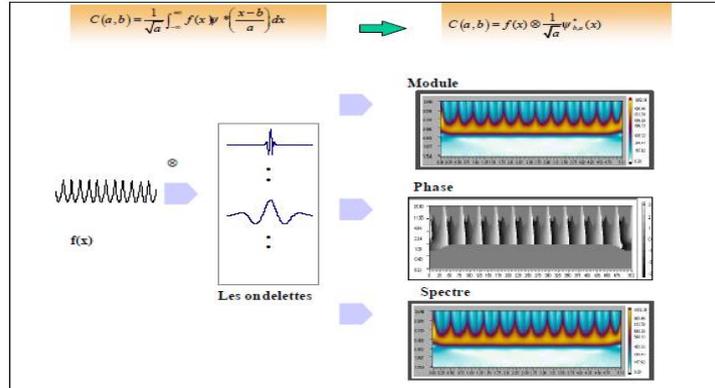


Figure II.3. Principe de la transformée en ondelettes.

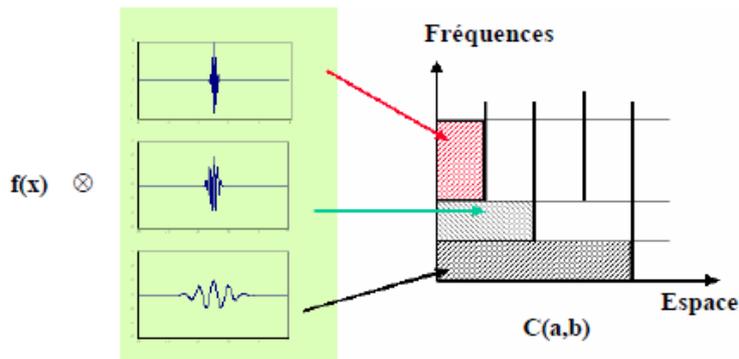


Figure II.4. Le plan espace-fréquence de la transformée en ondelettes.

II.4.4. Transformée en ondelettes continue

La transformée en ondelettes continue (TOC) utilise des ondelettes dont l'enveloppe rétrécit avec l'échelle tandis que le nombre d'oscillations reste constant. En effet, l'opération de changement d'échelle de facteur b sur l'axe des temps de $1/b$ sur celui des amplitudes. Dans ce cas, on obtient une largeur de bande qui augmente avec la fréquence, avec une résolution fréquentielle relative constante [Per'05].

La diffusion de temps et de fréquence est respectivement proportionnelle à a et à $1/a$. Quand a change, la longueur et la largeur du rectangle change mais sa surface reste toujours constante, comme illustré par la figure II.5. Quand l'échelle a diminue, le support du temps est réduit mais la diffusion de fréquence augmente et couvre un intervalle qui est décalé vers des hautes fréquences.

En notant η le centre de fréquence de l'ondelette élémentaire, le centre de fréquence d'une ondelette dilatée est $\xi = \eta/a$.

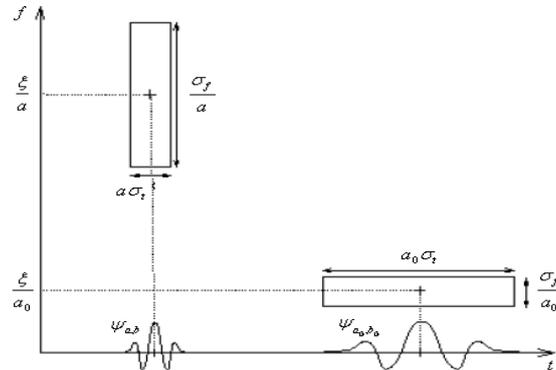


Figure II.5. Boîtes temps-fréquence des deux ondelettes $\psi_{a,b}$ et ψ_{α_0,b_0} .

La transformée en ondelettes continue, lorsqu'elle est utilisée pour l'analyse des signaux discrets, doit être échantillonnée, c'est-à-dire calculée pour des valeurs discrètes de b et de t . L'implémentation de la transformée continue correspond généralement à un échantillonnage uniforme du temps calqué sur celui du signal et à la sélection d'un nombre constant d'échelle par bandes d'octaves.

II.4.5. La transformée en ondelettes discrète et multirésolution en ondelettes

La transformée en ondelettes discrète (TOD) est issue de la version continue, à la différence de cette dernière, elle utilise un facteur d'échelle et une translation discrétisée. On appelle transformée en ondelettes discrète toute base d'ondelettes travaillant avec un facteur d'échelle égale 2^i .

La multirésolution en ondelettes permet d'analyser un signal en différentes bandes de fréquences, ce qui permet une vue la plus grossière. En outre, l'analyse multirésolution peut être interprétée comme la vision successive d'une même image avec un microscope ou une loupe dont l'œil s'éloignerait de plus en plus. L'analyse multirésolution permet d'avoir à la fois une bonne résolution temporelle en hautes fréquences et une bonne résolution fréquentielle en basses fréquences.

Les propriétés que doivent vérifier les espaces multirésolutions sont énoncées ci-après [Mar'01].

Définition 1 : $(V_i)_{i \in Z}$ une famille de sous espaces vectoriels fermés emboîtés de $L^2(\mathbb{R})$ est une approximation multirésolution si les propriétés suivantes sont vérifiées :

1. $\forall (i, j) \in \mathbb{Z}^2, f(x) \in V_i \Leftrightarrow f(x - j) \in V_i,$
2. $\forall i \in \mathbb{Z}, V_{m+1} \subset V_i,$
3. $\forall i \in \mathbb{Z}, f(x) \in V_i \Leftrightarrow f(2^i x) \in V_0,$
4. $\lim_{i \rightarrow +\infty} V_i = \bigcap_{i=-\infty}^{+\infty} V_i = \{0\},$
5. $\lim_{i \rightarrow +\infty} V_i = \bigcup_{i=-\infty}^{\infty} V_i$ est dense dans $L^2(\mathbb{R}),$
6. Il existe une $\varphi \in V_0$ telle que la suite $\varphi(x - n), n \in \mathbb{Z}$ soit une base de V_0 .

Quelques explications sur ces propriétés s'imposent :

- L'approximation multirésolution est invariante par translation (1),
- Toute l'approximation de niveau $i+1$ (plus grossière) est incluse dans le niveau supérieur i (2),
- Tous les sous espaces V_i correspondent à un changement d'échelle de l'espace V_0 (3),
- La propriété 4 montre que si i tend vers $+\infty$ (de plus en plus grossier), alors nous perdons alors la convergence vers f est assurée (propriété 5).
- La propriété 6 définit l'existence d'une fonction φ qui permet d'approximer toute fonction f de V_0 de manière discrète et unique : $\{\varphi_j^{i=0}; j \in \mathbb{Z}\}$ est une base orthogonale de V_0 .

La famille de fonction φ_j^i appelée fonctions d'échelle est définie sous la forme suivante:

$$\varphi_j^i(x) = 2^{-i/2} \varphi(2^{-i} x - j) \quad (\text{II-12})$$

L'ensemble $\{\varphi_j^i; j \in \mathbb{Z}\}$ constitue une base de orthonormée de V_i de la propriété 3. Le principe de l'analyse multirésolution de ses sous espaces emboîtés définit, aussi, une base d'ondelettes orthogonales $\{\varphi_j^i; i, j \in \mathbb{Z}\}$ de $L^2(\mathbb{R})$ sous la forme suivante :

$$\psi_j^i(x) = 2^{-i/2} \psi(2^{-i} x - j) \quad (\text{II-13})$$

Le facteur d'échelle dyadique mène à :

$$\varphi(x) = \sum_j 2h(j) \varphi(2x - j) \quad (\text{II-14})$$

$$\psi(x) = \sum_j 2g(j)\psi(2x - j) \quad (\text{II-15})$$

Les équations (II-14) et (II-15) représentent la décomposition de la fonction échelle et de l'ondelette en combinaison linéaire de la fonction échelle à la résolution haute directement.

On note que $h(j)$ et $g(j)$ sont les filtres passe-bas et passe-haut respectivement lors d'une décomposition par ondelettes.

Définition 2 : La transformée en ondelettes est une transformation mathématique qui représente un signal $s(t)$ en matière de fonctions issues de la dilatation et de la translation d'une fonction singulière appelée ondelette mère $\psi(t)$.

Une version pratique de cette transformée, appelée analyse multirésolution en ondelettes (AMRO), a été introduite pour la première fois par Mallat en 1989. Elle consiste à faire passer le signal $s(t)$ dans deux filtres passe-bas (L) et passe-haut (H). A ce niveau, deux vecteurs seront obtenus, cA_1 et cD_1 dont les éléments du vecteur cA_1 sont appelés coefficients d'approximation et qui correspondent aux plus basses fréquences du signal, tandis que les éléments du vecteur cD_1 sont appelés coefficients de détail et qui correspondent aux plus hautes d'entre elles. La procédure peut être répétée avec les éléments du vecteur cA_1 et successivement avec chaque nouveau vecteur cA_j obtenu. Le processus de décomposition peut être répété n fois. Lors de la décomposition, le signal $s(t)$ et les vecteurs cA_j subissent un sous-échantillonnage. C'est la raison pour laquelle les coefficients d'approximation cA_j et de détail cD_j passent à nouveau à travers deux filtres de reconstruction (LR) et (HR). Deux vecteurs en résultent : A_j appelé approximations et D_j appelé détails [Dje'12].

Nous avons défini les propriétés de l'analyse multirésolution. Il apparaît que cette analyse offre des avantages non négligeables pour l'étude de signaux par la décomposition dans différents sous espaces emboîtés orthonormaux. Il nous reste à présenter le lien entre les différents coefficients pour l'analyse multirésolution en ondelettes et les filtres.

II.5. Filtres discrets et algorithme de Mallat

Les fonctions ψ et φ sont, dans la majorité des cas, associées à des filtres discrets en miroir quadrature pour l'analyse multirésolution.

II.5.1. Filtre en quadrature miroir

Les filtres utilisés dans l'analyse multirésolution sont à réponse impulsionnelle finie (FIR) causal qui est définie par la séquence finie $\{h_n; n \in [0; N]\}$.

Les transformés $H(z)$ et $G(z)$ sont en quadrature miroir si :

$$G(z) = H(-z) \quad (\text{II-16})$$

Il apparaît clairement que $H(z)$ et $G(z)$ sont des filtres passe-bas et passe-haut, dont nous avons une représentation schématisée sur la figure (Fig. II.6). L'association de H et G permet de couvrir toute l'intervalle $[-\pi; \pi]$. Cette ensemble de filtres, en traitement du signal, est appelé banque de filtres.

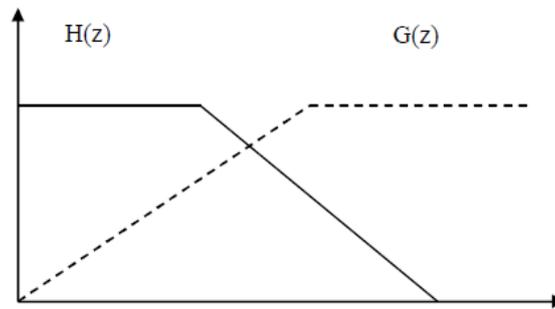


Figure II.6. Filtre en quadrature miroir.

II.5.2. Algorithme de Mallat

L'algorithme de Mallat est schématisé par la structure suivante (Fig. II.7) :

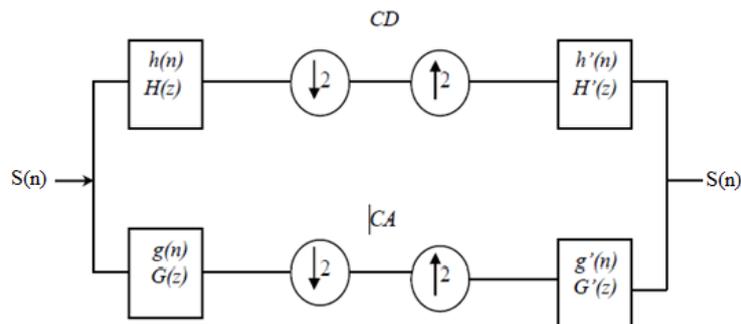


Figure II.7. Algorithme de Mallat.

Avec $H(z)$, $G(z)$, $H'(z)$ et $G'(z)$ représentent respectivement la transformée en z de $h(n)$, $g(n)$, $h'(n)$ et $g'(n)$.

Le signal $S(n)$ est décomposé par les deux filtres d'analyse $h(n)$ (filtre basses fréquences) et $g(n)$ (filtre hautes fréquences) pour donner deux vecteurs

respectivement CA et CD . Tous les deux sont de taille approximativement égale à la moitié du vecteur d'origine. Ceci est dû au fait de l'opération de décimation par 2.

La reconstruction parfaite est théoriquement possible. En faisant passer les deux vecteurs CA et CD , par un sur échantillonnage puis un filtrage en utilisant les filtres $h'(n)$ (filtre passe-bas de reconstruction) et $g'(n)$ (filtre passe-haut de reconstruction), respectivement, donne en somme le vecteur d'origine $S(n)$.

L'algorithme de Mallat permet de décomposer le signal en plusieurs niveaux comme illustré à la figure II.8 qui présente la décomposition de l'analyse multirésolution par banque de filtres. Les filtres sont réutilisés à chaque niveau pour un passage au niveau supérieur, plus grossier, avec une décimation par 2 des coefficients. Les détails sont conservés, alors que les coefficients d'approximation sont de nouveau filtrés.

Le vecteur $S(n)$ est un signal discret peut être décomposé en ses versions approximatives et détaillées en utilisant l'analyse multirésolution. Les premiers coefficients de décomposition sont A_1 et D_1 , où A_1 est la version approximative du signal original $S(n)$ et D_1 est la représentation détaillée du signal original $S(n)$.

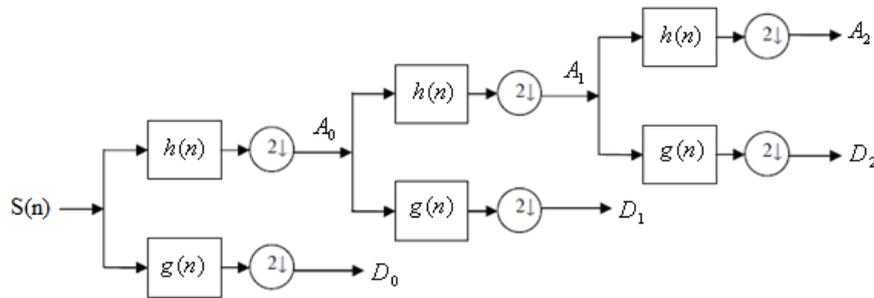


Figure II.8. Décomposition de l'analyse multirésolution par banque de filtres.

Lorsque $h(n)$ et $g(n)$ sont les filtres de décomposition de signal $S(n)$. A ce niveau, deux vecteurs seront obtenus : D_1 et A_1 . Le prochain niveau de décomposition est basé sur A_1 et les coefficients sont exprimés comme suit :

$$A_2(n) = \sum_k h(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{II-17})$$

$$D_2(n) = \sum_k g(k - 2n)A_1(k) \quad (\text{II-18})$$

Dans ce contexte, la contribution essentielle de notre travail est d'adapter l'analyse multirésolution en ondelettes (AMRO) au cas des signaux des vibratoires pour l'établissement d'un système de surveillance de l'usure des outils de coupe.

II.6. Décomposition en Modes Empiriques (EMD)

Dans cette partie, nous présentons une nouvelle méthode d'analyse des signaux, récemment introduite par Huang et al. [Hua'98] appelée en Anglais Empirical Modes Décomposition pour la décomposition des signaux non stationnaires.

La décomposition en modes empiriques d'un signal en une série de composantes oscillantes extraites directement de celui-ci d'une manière adaptative. Ces composantes (Intrinsic Mode Functions IMF) s'interprètent comme des formes d'ondes non stationnaires, modulées en amplitude et en fréquence, pouvant être éventuellement associées à des oscillations non linéaires.

Idéalement, ces IMFs sont des fonctions oscillantes de moyenne nulle. De plus, celles-ci reflètent les fréquences présentes localement dans le signal depuis les plus hautes fréquences vers les plus basses. Le résidu r_n est un terme basse-fréquence qui donne la tendance globale du signal.

L'EMD a été appliquée à un certain nombre de situations réelles [Gao'08, Pen'05, Du'07] motivant des études systématiques de la méthode dans des conditions contrôlées afin de mieux cerner ses possibilités et limitations.

L'objectif premier de l'EMD est d'extraire, d'un signal non-stationnaire, des modes qui se prêtent bien à une analyse temps-fréquence ; là où les analyses de Fourier et des ondelettes sont parfois inefficaces. Elle rend, en effet, la représentation temps-fréquence plus lisible et propre à l'interprétation physique.

L'EMD est définie par un processus appelé tamisage (sifting) permettant de décomposer le signal en contributions de base appelées modes empiriques ou IMF qui sont des signaux de type mono-composant, chacun de moyenne nulle. La décomposition est locale, itérative, séquentielle et entièrement pilotée par les données. En plus de sa simplicité de mise en œuvre informatique et de sa capacité à décrire ponctuellement et de manière instantanée les phénomènes fréquentiels non résolus par l'analyse de Fourier, l'EMD est bien adaptée à l'étude des signaux non-stationnaires et/ou générés par des systèmes non-linéaires.

II.6.1. Principe de la méthode

La décomposition en modes empiriques est une méthode d'itération au cours de laquelle chaque estimation de mode est retranchée du signal analysé et/ou l'estimation

du mode suivant est conduit à partir du signal résidu. Elle se base sur le principe de décomposition du signal en une somme d'une composante basse fréquence (tendance locale) appelée approximation et d'une composante locale haute fréquence (oscillation rapide) appelée détail (figure. II.9). Ce principe est illustré par l'équation (II-19) :

$$S(t) = a_k(t) + d_k(t) \quad (\text{II-19})$$

Où $S(t)$ constitue le signal à décomposer, $a_k(t)$ est le signal tendance, $d_k(t)$ est l'oscillation rapide et t indique le temps discret.

De même, le signal tendance peut être aussi décomposé en deux termes.

$$a_k(t) = d_1(t) + a_1(t) \quad (\text{II-20})$$

Où $d_1(t)$ est la composante haute fréquence et $a_1(t)$ est la composante basse fréquence.

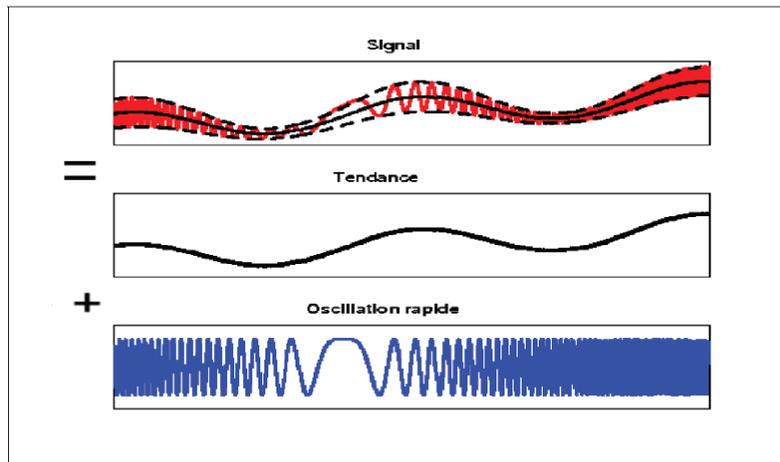


Figure II.9. Principe de l'EMD.

Pour calculer un mode relatif à un signal, on suit le principe suivant :

1. Extraire les maxima et les minima de $S(t)$: $\{t_i^{max}, S_i^{max}\}, \{t_i^{min}, S_i^{min}\}$
2. Interpoler les minima (respectivement les maxima) de manière à construire une certaine enveloppe: EnvMin (respectivement EnvMax).
3. Calculer la moyenne de deux enveloppes $m(t) = (EnvMin(t) + EnvMax(t))/2$.
4. Extraire le détail $d(t) = S(t) - m(t)$. Le signal $d(t)$ n'est considéré comme IMF qu'après un certains nombre d'itérations nécessaires afin que $d(t)$ obéisse à un critère d'arrêt donné.

En itérant, on obtient une décomposition du signal décrite comme suit:

$$S(t) = \sum_{j=1}^n IMF_j(t) + r_n(t) \quad (\text{II-21})$$

Où $IMF_j(t)$ est la j^e oscillation, le signal $r(t)$ est appelé résidu de la décomposition qui correspond à la composante ayant la plus basse fréquence du signal et n le nombre d'IMF.

D'après le principe de la méthode, une décomposition complète et étant fini, si l'on additionne toutes les IMFs ainsi que le résidu r_n , alors on reconstruit linéairement le signal original sans perte ou déformation de l'information initiale [Hua'98].

Toutefois, on ne parle d'une IMF que si elle vérifie les critères suivants [Hua'98]:

- (1) La moyenne des enveloppes supérieures et inférieures des modes est nulle. n est le nombre de modes trouvés.
- (2) La différence entre le nombre d'extrema et le nombre de passage à zéro est au plus de un (c'est à dire qu'entre un minimum et un maximum successif, l'IMF passe par zéro).

II.6.2. Fonction de mode intrinsèque

Un mode intrinsèque est une composante modulée en amplitude et en fréquence pouvant être considérée à bande étroite. En effet, on veut décomposer le signal en plusieurs fonctions (d_k), proches des sinusoïdes, pour lesquelles une définition de la fréquence instantanée sera possible. La notion d'IMF repose plus sur une intuition que sur une définition très rigoureuse, Une IMF est une fonction telle que :

$$IMF : \begin{cases} \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R} \\ t \rightarrow IMF_j(t) \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

Les composantes extraites par le processus de tamisage doivent être oscillatoires (conditions sur les zéros et les extrema) et centrées (condition de nullité de la moyenne). Donc, représentables sous forme de produit d'une modulation d'amplitude et d'une modulation en fréquence est peuvent être formalisées par le modèle suivant :

$$IMF_j(t) \approx \Re \left\{ a_j(t) e^{i\phi_j(t)} \right\} \quad (\text{II-23})$$

Avec $a_j(t)$ l'amplitude de l'enveloppe de la j^e IMF et $\phi_j(t)$ sa phase.

Donc cette fonction doit respecter certains critères comme préciser ci-dessous :

- Le nombre d'extrema et de passages par zéro diffèrent d'au plus de un. Cela signifie qu'entre un minimum et un maximum successif, une IMF passe par zéro.
- La moyenne locale est nulle.

La seconde condition est la plus importante. En effet, pour un signal de moyenne locale, la condition sur le nombre de zéros et d'extrema est directement vérifiée. Ainsi, algorithmiquement, seule la deuxième condition sera recherchée. Néanmoins, une notion d'échelle locale temporelle ne peut être définie, en général, pour des signaux non stationnaires, ce qui rend le choix d'une moyenne locale subjectif. Cependant, une première approche est proposée dans [Hua'98] où l'enveloppe supérieure est moyennée en interpolant les maxima locaux, et l'enveloppe inférieure est moyennée en interpolant les minima locaux. L'idée sous-jacente est que lors d'une analyse visuelle, l'échelle de temps des variations apparaissant naturellement est définie par les positions des extrema.

Un point de vue global, l'EMD ayant été créée pour traiter de manière locale les signaux non stationnaires, il semble naturel que la définition d'un IMF soit formulée de manière locale. En effet, si la première clause est sans ambiguïté, ce n'est pas le cas de la seconde qui nécessite de préciser ce qu'on entend par interpolation. Le problème est que les enveloppes dépendent, en fait, non seulement du schéma d'interpolation utilisé mais également de la manière dont sont traitées les conditions aux bords. De ce fait, la définition d'un IMF est en fait indissociable d'une implantation de l'EMD.

II.6.3. Processus algorithmique de tamisage

La méthode EMD est développée à partir de la prétention simple que n'importe quel signal se compose de différents modes intrinsèques simples des oscillations. Chaque mode devrait être indépendant des autres. De cette façon, chaque signal a pu être décomposé en un certain nombre des IMFs.

Le principe de décomposition de l'EMD est assuré par le processus de tamisage défini par l'algorithme décrit dans ce qui suit, où la figure II.10 montre le principe de l'EMD.

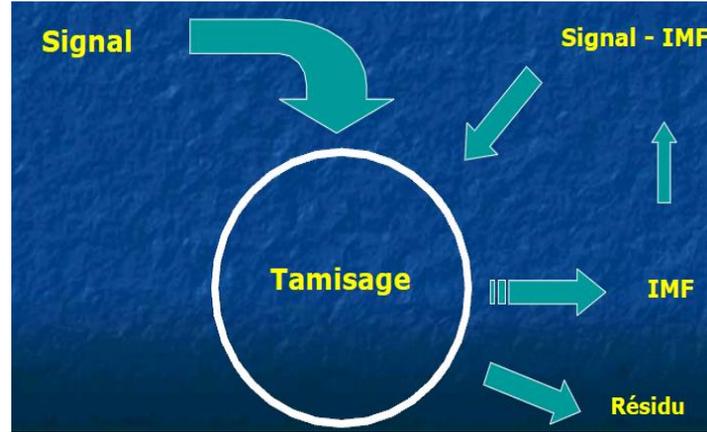


Figure II.10. Principe de décomposition de l'EMD.

Le processus de tamissage consiste en ce qui suit :

Etape 1) Fixation du seuil : $\varepsilon, j \leftarrow 1$ ($j^{\text{ème}}$ IMF) .

Etape 2) Initialisation du résidu : $r_{j-1}(t) \leftarrow s(t), r_0(t) = s(t), j = 1$.

Etape 3) Extraire la $j^{\text{ème}}$ IMF :

(a) Initialisation de l'IMF : $h_{j,k-1}(t) \leftarrow r_{j-1}(t), h_0 = r_{j-1}(t), k \leftarrow 1$ (k itération de la boucle de tamissage).

(b) Identification des extrema locaux (maxima et minima locaux) de $h_{j,k-1}(t)$.

(c) Calcul des enveloppes supérieure $E_s(t)$ et inférieure $E_i(t)$ par interpolation des maxima et des minima de $h_{j,k-1}(t)$.

(d) Calcul de la moyenne des enveloppes : $m_{j,k-1}(t) = (E_s(t) + E_i(t))/2$

(e) Mise à jour : $h_{j,k}(t) \leftarrow h_{j,k-1}(t) - m_{j,k-1}(t), k \leftarrow k + 1$.

(f) Calcul du critère d'arrêt : $SD(k) = \sum_{t=0}^T \frac{|h_{j,k-1}(t) - h_{j,k}(t)|^2}{(h_{j,k-1}(t))^2}$

Où T représente le nombre d'échantillons du signal.

(g) Décision : Si le critère d'arrêt est satisfait $SD(k) < \varepsilon$, $IMF_j(t) \leftarrow h_{j,k}(t)$

Si non, répéter l'étape (b) à (f).

Etape 4) Mise à jour du résidu : $r_j(t) \leftarrow r_{j-1}(t) - IMF_j(t)$.

Etape 5) Répétition de l'étape(3) avec $j \leftarrow j + 1$ jusqu' à $r_j(t)$ a encore au moins 2 extremas dans $r_j(t) \leq 2$, si non l'EMD est terminée.

La décomposition s'achève lorsque la dernière approximation ne présente plus d'oscillation. Le résultat du tamisage est illustré par l'équation (II-21). La figure II.11 montre la boucle de tamisage de l'EMD.

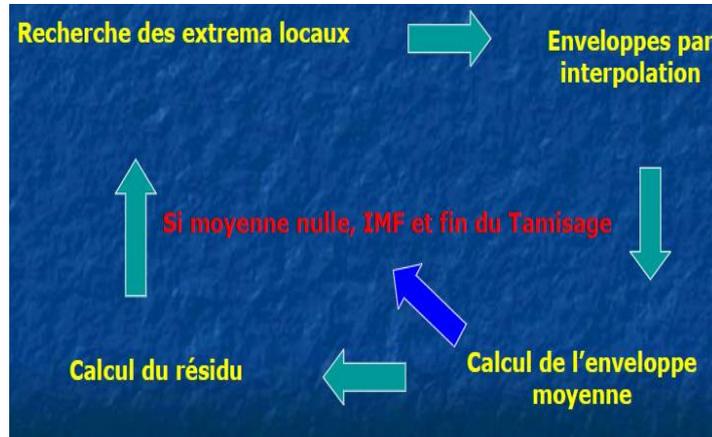


Figure II.11. Boucle de tamisage.

La procédure de l'EMD est expliquée en détail dans l'organigramme de la figure (II.12).

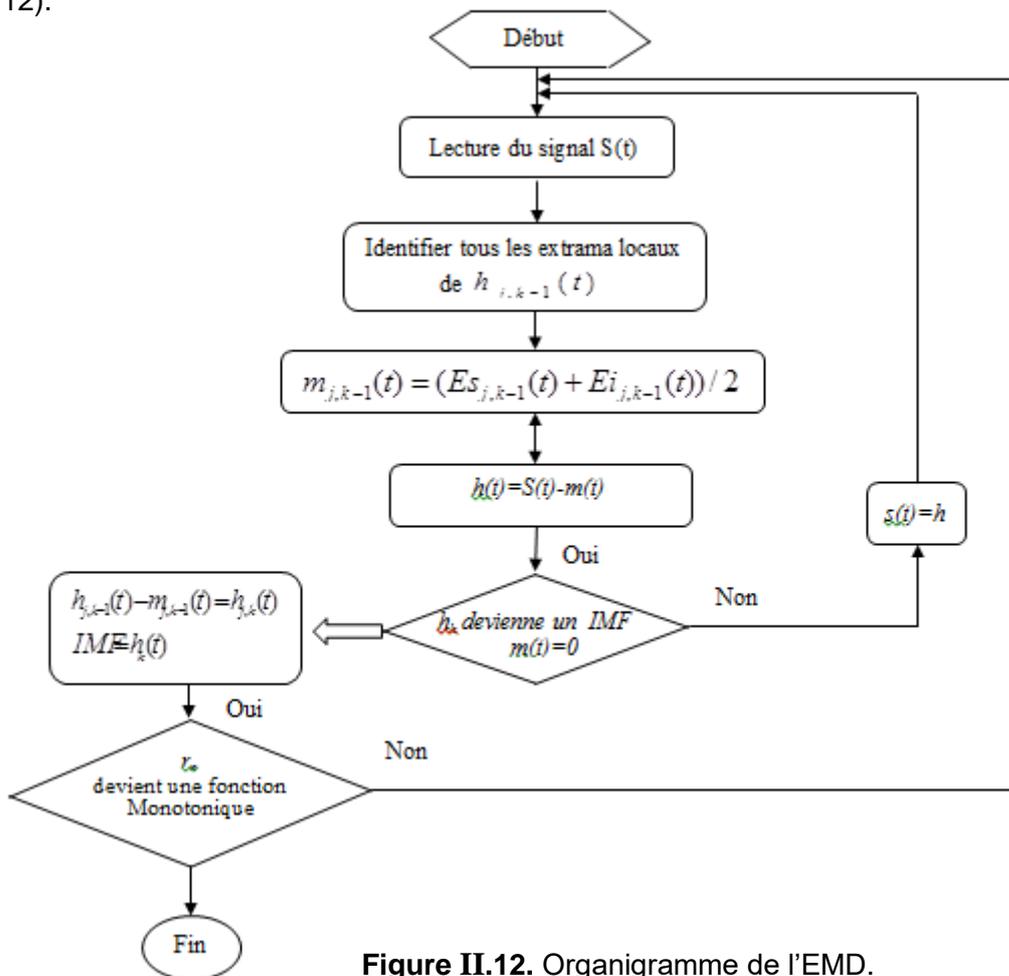


Figure II.12. Organigramme de l'EMD.

De manière plus littérale, l'extraction des IMFs suit le schéma général suivant [Cex'05]:

- Trouver les extrema locaux (maximum et minimum) du signal (étape : 3b). Ceux-ci sont symbolisés par des points sur la figure II.13 (b) ;
- Estimer les enveloppes supérieure et inférieure par interpolation respective des maxima et minima locaux (étape : 3c). Ceux-ci sont indiqués par les courbes plus foncées sur la figure II.13 (b). L'interpolation utilisée dans ce cas est basée sur les Spline cubiques ;
- Estimer l'enveloppe moyenne locale à partir des enveloppes supérieure et inférieure (étape : 3d). Celle-ci est représentée par la courbe plus foncée sur la figure II.13 (c) ;
- Soustraire l'enveloppe moyenne du signal d'entrée (étape : 3e). Le résultat est représenté par la courbe de la figure II.13 (d). Cela correspond alors à la première itération du tamisage. On calcule le critère d'arrêt (étape : 3f) et on vérifie alors que le signal remplit les critères d'une IMF (étape : 3g).
- Vérifier si le résidu présente un nombre suffisant d'extrema (supérieur a deux) et réitérer sur le signal résultant le processus d'extraction de l'IMF (étape : 3) ; sinon, le résidu est considéré comme étant le résidu final $r(t)$ de l'équation (Eq.25). Idéalement, le processus d'extraction des IMFs est terminé lorsque le résidu ne contient plus d'extrema. Cela signifie que le résidu est une fonction monotone qui correspond à la dérive ou tendance du signal initial $x(t)$.

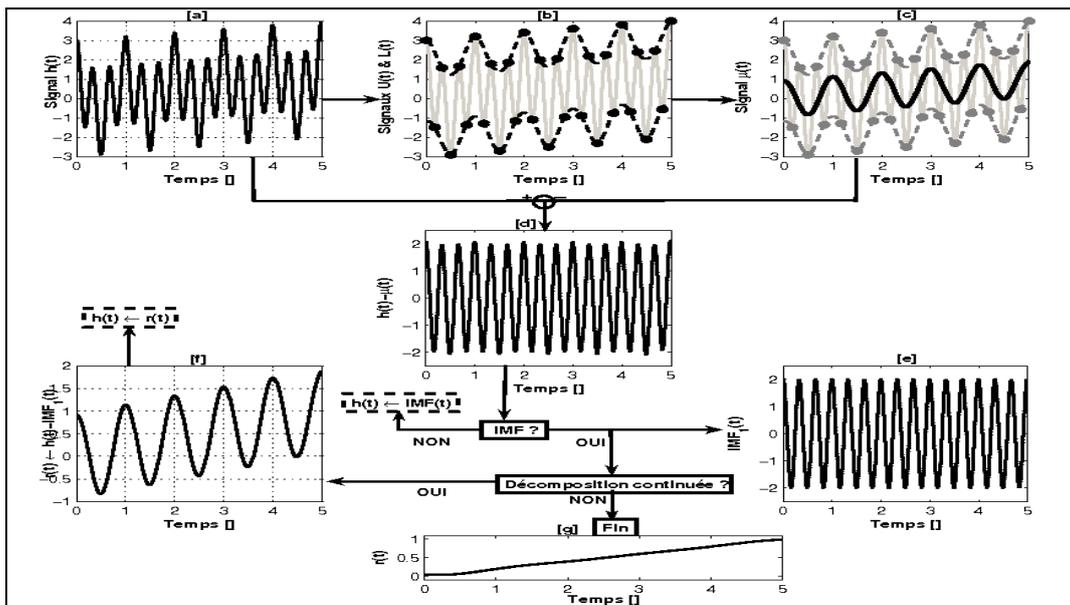


Figure II.13. Principe de tamisage pour l'estimation de la 1^{ère} IMF du signal [Cex'05].

II.6.4. Paramètres pertinents de la décomposition

II.6.4.1. Interpolation des extrema

L'interpolation est une problématique importante aussi bien dans le domaine de traitement des signaux. Aussi bien, c'est l'une des étapes clés dans l'estimation et l'extraction des IMFs à partir des extrema. Bien évidemment, pour passer des ensembles de maxima et minima locaux du signal à leurs enveloppes supérieures et inférieures, on utilise généralement une technique d'interpolation. Le choix de la technique d'interpolation n'est pas banal dans la mesure où les IMFs, en dehors du premier, sont tous des sommes d'un plus ou moins grand nombre d'interpolations. De plus, le comportement de l'algorithme, en fonction du nombre d'itérations de tamisage, dépend très fortement du schéma d'interpolation utilisé.

En pratique, les enveloppes calculées par l'interpolation Spline cubique (figure II.14) présentent souvent de petits dépassements où le signal se trouve localement du mauvais côté de l'enveloppe.

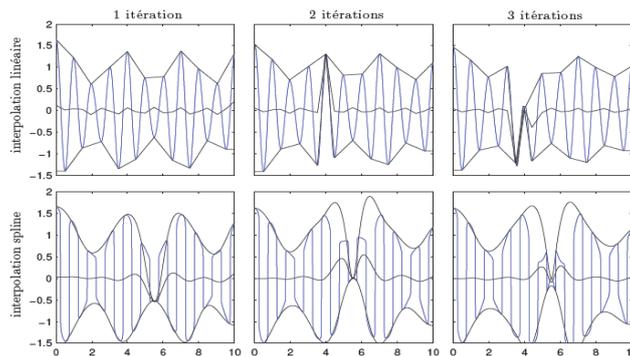


Figure II.14. Régularité de l'interpolation Linéaire et Spline [Ril'07].

En pratique, l'interpolation la plus utilisée pour l'EMD est la Spline cubique. Celle-ci n'est clairement pas optimale du point de vue de la localité, mais elle semble en revanche particulièrement bonne du point de vue de la régularité et présente un bon compromis entre la qualité de l'interpolation et la simplicité du calcul. Le choix des Splines Cubiques comme interpolateur est guidé par le souci d'éviter les oscillations excessives. En effet, pour un même réseau de points à interpoler, plus le degré du polynôme est élevé, plus le phénomène d'oscillations est accru, ce qui est indésirable quand il s'agit de calculer la tendance d'un signal.

Les autres types d'interpolation, linéaire ou polynomiale, ont tendance à faire augmenter significativement le nombre d'itérations du processus de tamisage et à capturer des fréquences dans des IMFs où elles ne devraient pas se trouver.

Pour finir, l'interpolation des enveloppes supérieure et inférieure nécessaires pour estimer les IMF est un problème non négligeable.

II.6.4.2. Critère d'arrêt du processus de tamisage

Comme expliqué précédemment, l'objectif du processus de tamisage est d'extraire une IMF du résidu laissée par l'itération précédente de l'algorithme de l'EMD. On a vu que la définition d'une IMF résidait en deux points : la différence d'au plus un entre le nombre de zéros et le nombre d'extrema, et la moyenne locale nulle. La première condition découle de la seconde, il faut donc se concentrer sur celle-ci pour trouver un critère d'arrêt adéquat. En effet, si l'on itère trop le processus de tamisage, des fréquences trop basses vont être capturées dans les premières IMFs, tandis que si l'on n'itère pas assez, les fréquences hautes vont se propager dans toutes les IMFs. La décomposition manquerait alors d'intérêt.

Huang et al [Hua'03] proposent un critère d'arrêt $SD(k)$ reposant sur la déviation standard. Le test d'arrêt est validé lorsque la différence entre deux tamisages consécutifs est inférieure à un seuil prédéfini ε . Typiquement, la valeur permettant de stopper le tamisage est compris entre 0.2 et 0.3 [Aye'10].

Un autre critère local $\sigma(t)$ a été proposé par Flandrin et al [Fla'04]. Ce critère est défini comme suit :

$$\sigma(t) = 2 \left| \frac{m_{j,k-1}(t)}{Es_{k-1}(t) - Ei_{k-1}(t)} \right| \quad (\text{II-24})$$

Plus récemment, un critère fondé sur l'orthogonalité supposée des modes générés par l'EMD a été proposé Cheng et al [Che'06]. Un autre critère d'arrêt exploite l'idée que chaque mode doit être à bande limitée [Xua'07]. Ceci est corroboré par les travaux de Flandrin et al [Fla'04] qui suggère que l'EMD se comporte comme un banc de filtres sélectif.

Les différents critères proposés suggèrent que l'EMD calcule des modes qui sont à bande limitée, quasi-orthogonaux et de moyenne locale nulle. Tous les critères d'arrêt adoptés exigent que $h_{j,k}(t)$ vérifie bien les propriétés d'une IMF. Cependant, ces critères reposent sur des approches encore empiriques et nécessiteraient des études plus approfondies.

II.6.4.3. Conditions aux bords et l'influence de l'échantillonnage

La décomposition en modes empiriques n'échappe pas aux effets de bords engendrés d'une part par le problème d'échantillonnage, et d'autre part, pour les besoins de l'interpolation des extrêmes, autour de la qualité de maximum ou minimum des points aux bords du domaine de définition du signal.

II.6.5. Processus de filtrage et de débruitage par l'EMD

D'une manière générale, les signaux sont bruités lors de leur acquisition. Le filtrage ou le débruitage sont souvent indispensables pour améliorer la qualité de ces signaux et pouvoir les exploiter ultérieurement.

II.6.5.1. Filtrage par l'EMD

L'approche se fonde sur l'hypothèse que les premières IMFs, correspondant aux modes de plus hautes fréquences, sont majoritairement dominées par le bruit et sont peu représentatives d'information propre au signal initial. Ainsi, le signal filtré est reconstruit avec seulement quelques IMFs dans lesquelles le signal "pur" prédomine majoritairement. L'EMD décompose un signal donné $S(t)$ en une somme des IMFs par tamisage, chacune des composantes pouvant être vue comme un niveau d'échelle distinct les unes des autres. L'EMD peut être vue comme une approche de type ondelettes dont les bancs de filtres sont implicites et localisés à l'instant t de la décomposition.

Il existe un mode, $IMF_{j_s}(t)$ à partir duquel la distribution d'énergie du signal original est plus grande que celle du bruit. Cette propriété particulière nous permet alors de séparer le signal du bruit. Nous sélectionnons les modes qui sont significativement associés au signal original, tandis que les autres modes sont associés au bruit.

Les différentes étapes du filtrage par EMD, utilisant le critère énergétique appelée erreur quadratique moyenne consécutive CMSE [Cex' 05].

Etape 1) Fixer le critère d'arrêt du tamisage et appliquer l'EMD pour extraire les IMFs, $j \in \{1, \dots, N\}$ et le résidu $r_N(t)$; le signal $\tilde{y}(t)$ est ensuite reconstruit en utilisant $(N - j_s + 1)$ IMF indicées de j_s à N ,

$$\tilde{y}_{j_s}(t) = \sum_{j=j_s}^N IMF_j(t) + r_N(t), \quad j_s \in \{2, \dots, N\} \quad (\text{II-25})$$

Etape 2) Estimer les CMSEs consécutifs et trouver l'indice j_s à l'aide des équations :

$$\begin{aligned} CMSE(\tilde{y}_k, \tilde{y}_{k+1}) &= \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T [\tilde{y}_k(t_i) - \tilde{y}_{k+1}(t_i)]^2, k \in \{1, \dots, N-1\} \\ &= \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T [IMF_k(t_i)]^2 \end{aligned} \quad (II-26)$$

$$j_s = \arg \min [CMSE(\tilde{y}_k, \tilde{y}_{k+1})], \quad (II-27)$$

Etape 3) Reconstruire le signal débruité $\tilde{y}(t) \equiv \tilde{y}_{j_s}(t)$.

II.6.5.2. Débruitage par l'EMD

L'approche consiste à reconstruire totalement le signal avec toutes les IMFs préalablement pré-traitées. Le but de l'approche est de conserver les contributions importantes de toutes les IMFs. L'idée du débruitage est de pré-filtrer, au sens du débruitage par ondelettes, chaque IMF séparément.

Les différentes étapes du débruitage par EMD, peuvent se décrire comme suit [Cex'05]:

Etape 1) Fixer le critère d'arrêt du tamisage et appliquer l'EMD pour extraire les IMFs, $j \in \{1, \dots, N\}$ et le résidu $r_N(t)$;

Etape 2) Estimer les variances du bruit de chaque IMF, σ_j (niveau du bruit de la j^{eme} IMF), à l'aide :

$$\tilde{\sigma}_j = MAD_j / 0.6745, \quad (II-28)$$

$$MAD_j = \text{Median} \left\{ |IMF_j(t) - \text{Median}(IMF_j(t'))| \right\}. \quad (II-29)$$

Etape 3) Estimer le seuil, τ_j σ_j (seuil universel de Donoho) et débruiter chaque IMF en fonction de :

$$\tau_j = \tilde{\sigma}_j \sqrt{2 \cdot \log_e(T)}, \quad (II-30)$$

Où T est le nombre d'échantillons.

Etape 4) Reconstruire le signal débruité $\tilde{y}(t)$.

II.6.6. Propriétés de la méthode de l'EMD

Depuis la théorie de Fourier, de nombreux outils ont été d'enveloppes pour analyser de tels signaux : les principaux sont la transformée de Fourier à fenêtre (ou de Gabor), les distributions temps-fréquence quadratiques (de Wigner-Ville, ou encore la classe

de Cohen), ou encore les ondelettes. Dans la mesure où l'EMD partage les mêmes problématiques et, en partie du moins, une vision commune avec ces outils.

Le tableau 1 résume les propriétés de l'EMD par rapport à d'autres méthodes.

	Fourier	STFT	Ondelette	EMD
Fréquence	Convolution : Global	Convolution : Regional	Convolution : Regional	Differentiation : Local
Présentation	Energie - fréquence	Energie -Temps - fréquence	Energie -Temps -fréquence	Energie -Temps- fréquence
Non linéaire	Non	Non	Non	Oui
Non Stationnaire	Non	Non	Oui	Oui

Tableau II.1. Propriété de l'EMD par rapport à d'autres méthodes.

Dans ce contexte, si les transformées de Fourier à fenêtre ou en ondelettes ont permis des avancées dans l'analyse temps-fréquence des signaux, aucune de ces méthodes n'est adaptée pour traiter correctement des signaux non-stationnaires et non-linéaires dont on ne connaît pas à priori les caractéristiques. De plus, ces méthodes n'exploitent pas ou peu les caractéristiques intrinsèques du signal même si, pour les ondelettes par exemple, il existe de nombreuses bases plus ou moins adaptées à tel ou tel signal, ou des méthodes de poursuite pour la construction des bases. Au contraire, l'EMD est intrinsèquement adaptative car elle décompose le signal en "modes" construits au fur et à mesure à partir du signal lui-même.

Lors de la transformée en ondelette, un sous-échantillonnage est réalisé. L'algorithme se termine du fait de la précision finie des données, mais la décomposition est théoriquement infinie. Ce critère d'arrêt a cependant des intérêts pratiques évidents puisque l'on peut connaître à l'avance le nombre de composantes qu'il sera nécessaire de calculer. Au contraire, l'EMD se base sur les variations du signal pour l'extraction des modes, et on ne peut donc prévoir, a priori, leur nombre. Ceci est à la fois un inconvénient et une force de l'algorithme, puisqu'on pourrait ainsi penser qu'il y a une meilleure correspondance entre un mode et les origines de ses oscillations. Comme cela a été relevé précédemment, l'EMD s'adapte donc mieux aux données en entrée, et ceci sans le choix de paramètres pour la décomposition (type d'ondelette, nombre de sous-échantillonnage à effectuer, etc.).

II.7. Conclusion du chapitre

Le système de surveillance des outils de coupe nécessite le développement des outils mathématiques qui permettent de le caractériser dans ses différents états. Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des différentes méthodes utilisées pour le traitement des signaux mesurés durant le processus de coupe. Les fondements mathématiques de chaque méthode ont été présentés. En plus des méthodes dites « classiques », à l'image des méthodes temporelles et fréquentielles, une attention particulière a été réservée aux méthodes relativement récentes, telles que la décomposition en ondelettes et la décomposition en modes empiriques.

Un aperçu sur l'analyse continue et discrète en ondelettes appliquée aux signaux unidimensionnels a été explicitement présenté. En effet, cette technique, en plus de son caractère temps-fréquence, permet une analyse très fine des signaux qui permettra par la suite de construire un outil très efficace pour le traitement des signaux mesurés durant le processus de coupe.

Nous avons également présenté la décomposition en modes empiriques comme une nouvelle technique de traitement et d'analyse des signaux non stationnaires et non linéaires. L'avantage de cette décomposition réside dans son caractère auto-adaptatif et complètement non-linéaire. Ce qui peut être considéré en tant qu'outil prometteur pour l'analyse des signaux issus du processus de coupe. Pour bien comprendre l'approche de cette méthode, en plus des fondements mathématiques, nous avons présenté d'une manière détaillée l'algorithme du processus de tamisage ainsi que quelques difficultés (interpolation, critère d'arrêt, ...etc.) rencontrées durant la mise en œuvre numérique de l'algorithme.

Chapitre III

Procédures expérimentales et caractérisation de l'usure

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents moyens technologiques utilisés pour la réalisation des expériences ainsi que la démarche expérimentale, les conditions de coupe et la description des différents résultats des essais d'usinage. En s'appuyant sur la corrélation entre les différents signaux acquis en usinage, on a pu obtenir des informations qui servent au suivi de l'évolution de l'usure de l'outil de coupe depuis sa première utilisation jusqu'à sa détérioration et la rugosité conséquente des surfaces de la pièce usinée. Les différentes campagnes d'essais d'usinage ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique et Structures (LMS), département de Génie Mécanique, Université de Guelma.

III.2. Matériels utilisés

III.2.1. Machine-outil

Les essais d'usinage ont été réalisés sans lubrification en utilisant un tour conventionnel de la société tchèque 'TOS TRENCIN' modèle SN 40C avec une puissance sur la broche de 6.6 Kw (figure III.1). Les fréquences de rotation disponibles sur la machine sont : 22.5; 45; 90; 125; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400 ; 2000 tr/min. Les avances disponibles sont : 0,08; 0,12; 0,16; 0,18; 0,20; 0,24 ;6.4 mm/tr.



Figure III.1. Tour parallèle modèle SN40.

III.2.2. Matériau utilisé

La matière de la pièce employée dans cette étude est l'acier AISI D3 (X200Cr12) à haute teneur en chrome. Cet acier est souvent utilisé pour la production des matrices, des poinçons de coupe et d'emboutissage, des profileurs de rouleaux, des mollettes et des peignes à rouler les filets suite à son excellent comportement à l'usure. Sa composition chimique est donnée comme suit : 2% C, 11.50% Cr, 0.30% Mn et 0.25% Si (tableau III.1). Les éprouvettes employées sont des barres rondes ayant 80 mm de diamètre et 400 mm de longueur (figure III -2).



Figure III.2. Photos des éprouvettes utilisées.

La composition chimique de l'acier X200Cr12 est représentée dans le tableau III.1

Éléments	Chrome (Cr)	Carbone (C)	Manganèse (Mn)	Silicium (Si)
Composition (%)	12,00 – 14,00	2,00 - 2,20	0,25 - 0,35	0,25 - 0,45

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier X200Cr12.

Cet acier possède les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Conductibilité thermique: 20 W/m.C°.
- Densité : 7.7 g/cm³.
- Module d'élasticité : 21.10 MPA.

III.2.3. Outil de coupe

Les plaquettes employées dans toute la recherche sont amovibles de forme carrée à fixation par trou central (figure III.3). Toutes les caractéristiques de cette plaquette de coupe sont regroupées dans le tableau III.2.



Figure III. 3. Plaquette de coupe utilisée.

Eléments de la désignation	Plaquette en carbure revêtu
Composition de revêtement	TiCN+AL ₂ O ₃ +TiN
Forme de la plaquette	Carrée
Désignation	SNMG
Taille de la plaquette	432
Brise-copeaux	MF
Grade	2015
Application	Finition
Matériau utilisé	Acier Inoxydable
Cercle Inscrit	1/2"
Epaisseur de la plaquette	0.1875"
Rayon du bec	0.0315"
Revêtu	MTCVD
Trou de Support	0.203"
Modèle De Support	Retenue de dessus et de trou
Angle de coupe	Négatif
Nombre d'arêtes	8
ISO	SNMG 12 04 08-MF 2015
ANSI	SNMG 432-MF 2015
Pour l'utilisation avec	DSKNL 12 4B, DSKNL 16 4D, DSKNR 12 4B, DSKNR 16 4D, DSRNL 12 4BM1, DSRNL 16 4DM1, DSRNL 20 4DM1, DSRNR 12 4BM1, DSRNR 16 4DM1, DSRNR 20 4DM1, DSSNL 12 4B, DSSNL 16 4D, DSSNR 12 4B, DSSNR 16 4D, A16T-DSKNL 4, A16T-DSKNR 4, A20T-DSKNL 4, A20T-DSKNR 4

Tableau III.2. Les caractéristiques relatives aux plaquettes utilisées.

Le revêtement de CVD des plaquettes (figure III.4) permet de déposer 3 couches différentes dont chacune offre des caractéristiques spécifiques au substrat de base. Le TiN assure une bonne résistance thermique et un bas coefficient de frottement, le TiCN pour améliorer la résistance à l'usure et la stabilité thermique et Al_2O_3 pour améliorer la dureté à haute température et la résistance à l'usure en cratère.

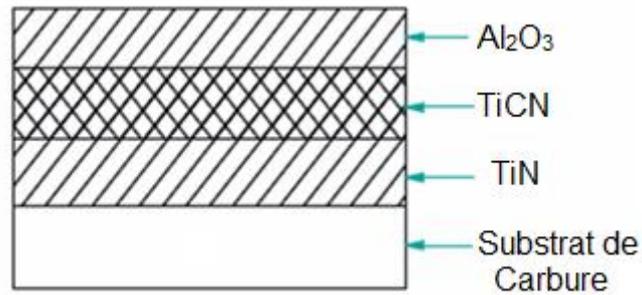


Figure III.4. Ordre de revêtement multicouche.

Les plaquettes sont montées sur un porte outil de référence PSDNN 25×25 M12 (figure III.5) dont les spécifications géométriques sont présentées au tableau III.3.[San'09].



Figure III.5. Porte outil utilisé.

Désignation	Marque	χ_r	λ	γ	α
PSDNN 25×25 M12 (ISO)	SANDVIK Coromant	75°	-6°	-6°	+6°

Tableau III.3. Caractéristiques géométriques du porte outil.

III.3. Dispositif expérimental d'usage

Avant la présentation des équipements de mesure et d'acquisition employés durant les différents essais d'usage, nous présentons une vue générale de la chaîne de mesures (figure III.6).

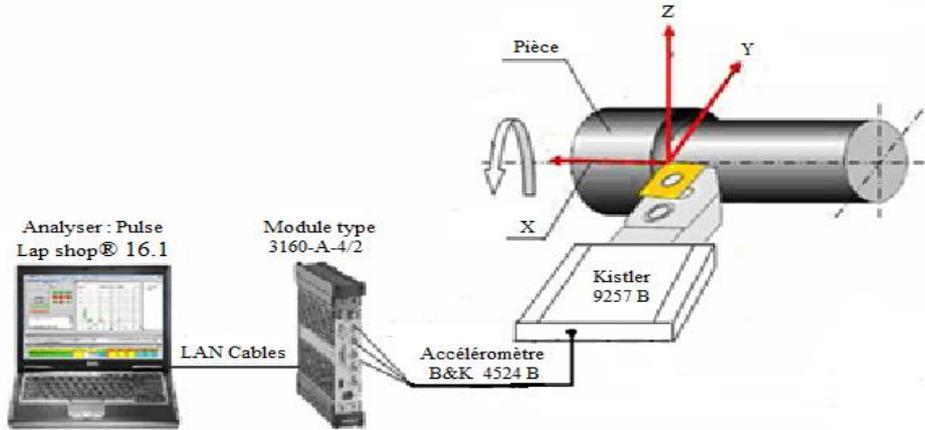


Figure III.6. Vue générale de l'installation expérimentale.

III.3.1. Acquisition des signaux vibratoires

Dans cette étude, l'acquisition de signaux vibratoires a été effectuée pendant l'usinage en utilisant un accéléromètre piézoélectrique triaxial Brüel & Kjaer du type 4524B placé 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). La bande de fréquence choisie varie entre (0 - 12800Hz) où chaque signal contient 16384 points. Les résultats de mesure ont été stockés directement sur le PC en utilisant le système d'acquisition de l'analyseur, piloté par le logiciel Pulse Lab shop® de Brüel & Kjaer (Figure III.7-8).

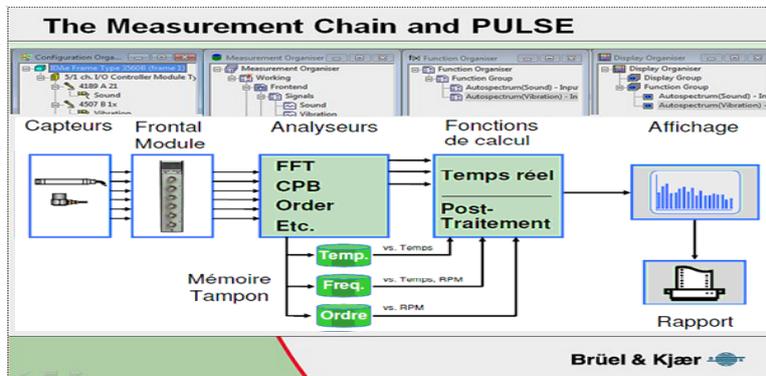


Figure III.7. Pulse Lab shop et la chaîne de mesure.

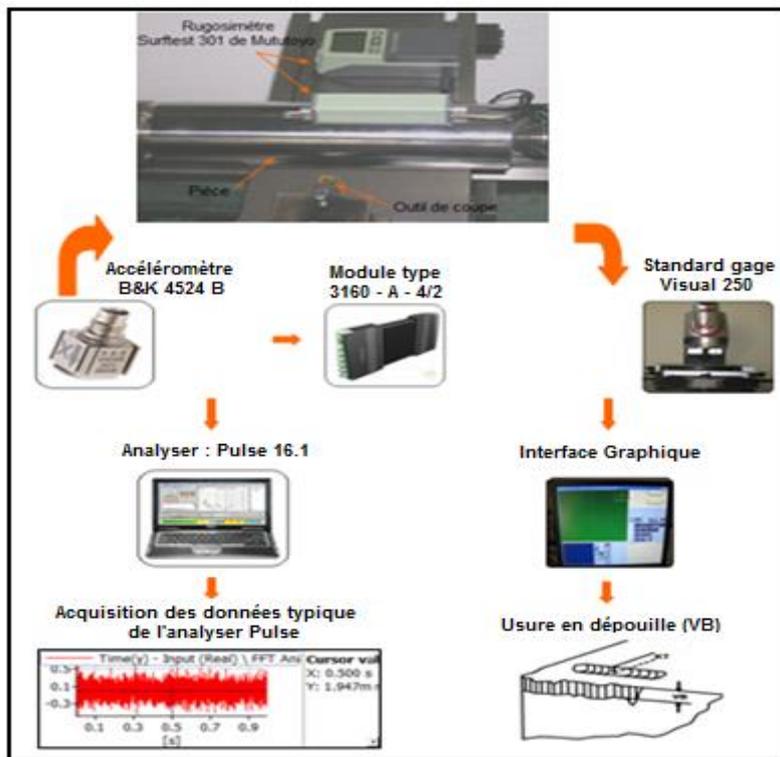


Figure III.8. Dispositif utilisé pour mesurer les signaux vibratoire et l'usure en dépouille (VB).

III.3.1.1. Analyse spectrale des fréquences caractéristiques

Avant la réalisation des essais d'usinage, nous avons déterminé d'abord les modes propres de l'outil de coupe dans les directions principales à l'aide d'un marteau d'impact instrumenté (figure III.9).

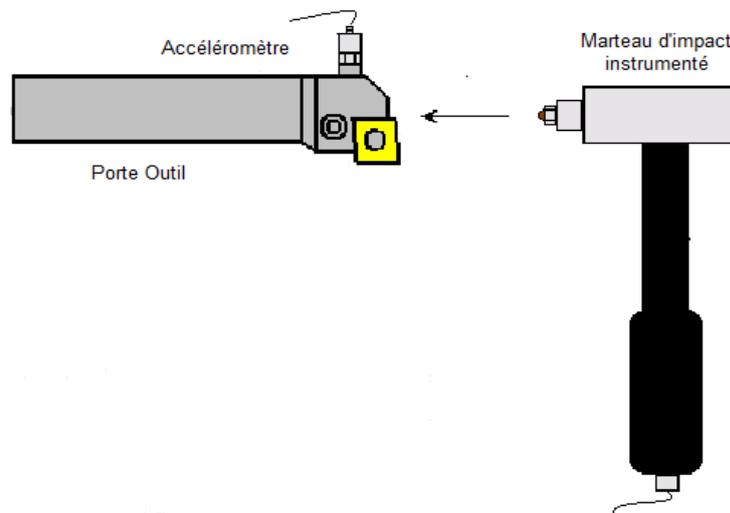


Figure III.9. Schéma du test modal.

Pour l'obtention des fréquences propres du système, l'outil est monté sur la machine dans les conditions expérimentales liées à l'usinage. Les impacts d'excitation ont été effectués suivant les directions perpendiculaires aux surfaces de l'outil.

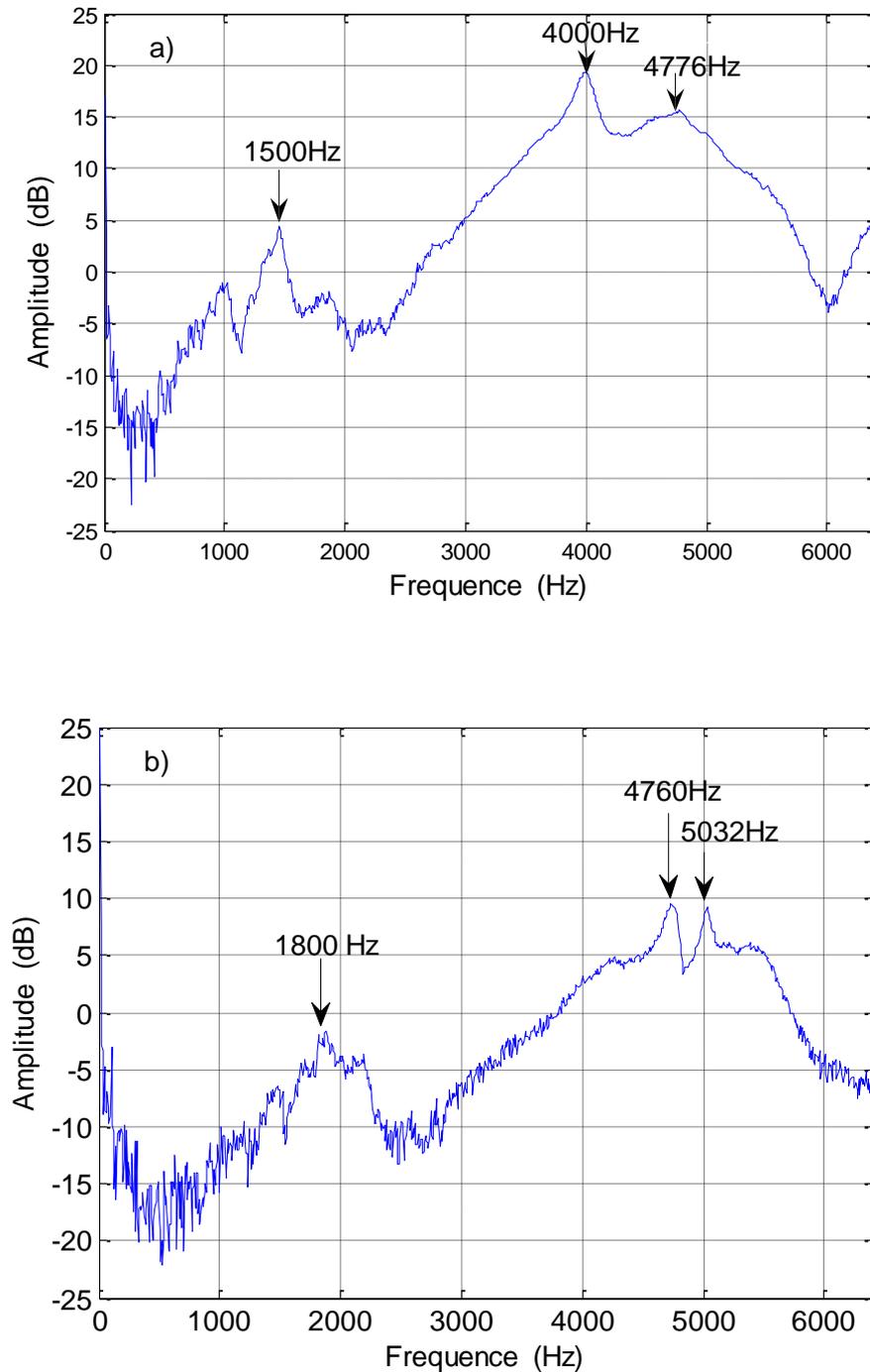


Figure III.10. Réponses fréquentielles de l'outil de coupe.

a) direction axiale et b) direction verticale.

Le comportement spectral des signaux mesurés a été étudié tout au long de la durée de vie des plaquettes par analyse fréquentielle. Sur la figure III.10, nous présentons respectivement, les réponses libres de l'outil selon les directions axiale et verticale. Nous distinguons les fréquences propres de l'outil représentés dans la bande fréquentielle (4000 ÷ 5100 Hz). Selon ces mesures, on note que le mode de flexion dans la direction axiale apparaît approximativement à 4100 Hz, le mode de torsion apparaît entre 4700 Hz et 4800 Hz dans les deux directions; axiale et tangentielle et le mode de flexion dans la direction tangentielle apparaît à 5032 Hz. Les résultats de cette démarche, permettent d'identifier les modes propres les plus significatifs de l'outil de coupe qui interviennent par la suite dans l'interprétation des résultats.

III.3.2. Mesures complémentaires

III.3.2.1. Mesure de l'usure en dépouille VB

Le développement de l'usure en dépouille sur la plaquette de coupe est mesuré après chaque essai, la plaquette de coupe est démontée du porte-outil, nettoyée puis placée sur la table du microscope optique du type Standard gage-visual 250 (figure III.11) ayant un agrandissement optique de 0,7x à 4,5x la taille réelle. Le logiciel Visual Gage permet à tout opérateur comme au métrologue de mesurer rapidement et précisément la plupart des éléments géométriques. Il se distingue par sa facilité d'utilisation, son interface graphique et sa flexibilité lors de la création des rapports de mesure.

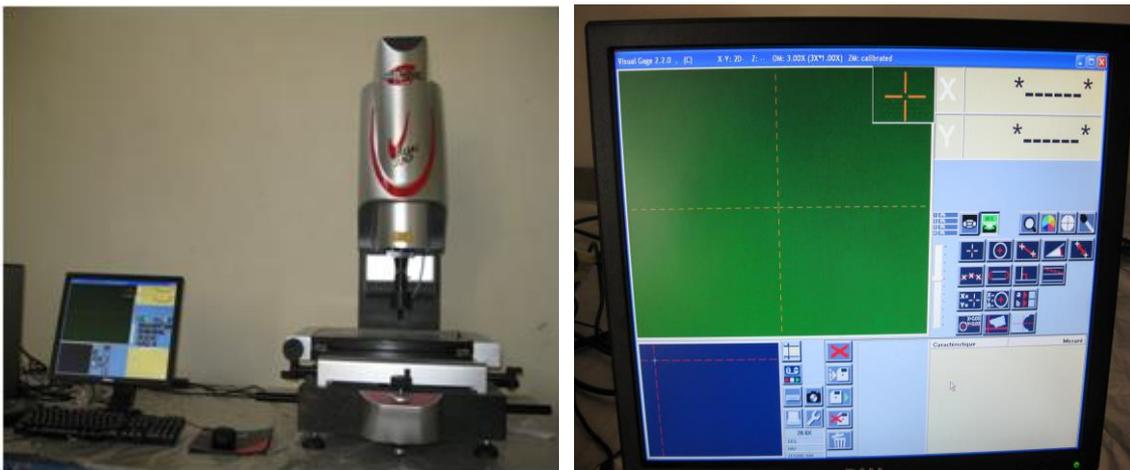


Figure III.11. Standard gage - Visual 250.

Le VISUAL 250 présente les caractéristiques suivantes :

- Etendue de mesure (X/Y) : 250 x 150 mm.
- Caméra CCD couleur, 752 x 582 pixels.
- Zoom indexable (0,7x à 4,5x).
- Eclairage diascoïque, LED verte
- Eclairage annulaire, LED blanche.
- Pointeur laser.
- Etalonnage : à 10 mm
- Température de référence : 20°C ±1°C.

La mesure s'effectue en plaçant la plaquette sur une table micrométrique à mouvements croisés. L'affichage digital sur l'interface graphique permet de localiser l'intersection de la face de coupe et de la face de dépouille de la plaquette, de prendre cette intersection comme ligne de référence à partir de laquelle l'usure en dépouille est évaluée.

III.3.2.2. Mesure de la profondeur du cratère

Le dispositif utilisé est un comparateur (figure III.12) équipé d'une touche à pointe vive, cette dernière suit le profil du cratère et sa profondeur sera indiquée sur le cadran digital du comparateur.



Figure III.12. Dispositif de mesure de l'usure en cratère.

III.3.2.3. Contrôle de la rugosité

Après chaque passe d'usinage, l'état surface de la pièce est caractérisé par la mesure des différents critères de rugosité (R_a , R_t et R_z) à l'aide d'un rugosimètre 2D du type surfest 301 de Mututoyo (figure III.13). Ce dernier est constitué d'une pointe de diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de $5\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. La longueur de palpation est de 4.0 mm avec une longueur de base de 0.8 mm. La plage de mesure des critères de rugosité R_a est de 0.05 à $40\mu\text{m}$ tandis que pour R_t et R_z , elles s'étendent entre 0.3 et $160\mu\text{m}$.

Les mesures sont répétées trois fois sur la surface de la pièce à trois lignes de référence placées à 120° au niveau des trois mors et selon la direction parallèle à l'avance de l'outil de coupe et la moyenne de ces valeurs est prise comme résultat final. Les résultats expérimentaux sont donnés dans le tableau III.4.

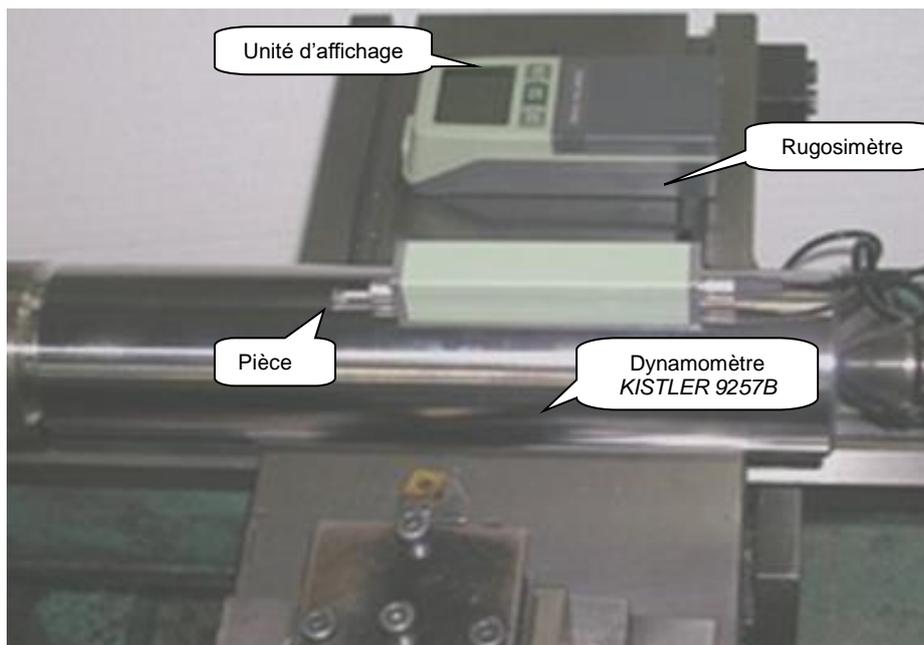


Figure III.13. Mesure de la rugosité sans démontage de la pièce.

III.4. Condition expérimentales et analyse des mesures complémentaires

Les essais sont effectués en tournage, sans lubrification. Lorsque l'usure en dépouille (VB) atteint ou dépasse la valeur de 0,3 mm, qui est synonyme de la fin de la durée de vie des plaquettes. Parmi les facteurs qui influent sur le système d'usinage,

on peut citer les éléments du régime de coupe (V_c , f et ap), la géométrie de la partie active de l'outil ($\chi_r, \gamma, \alpha \dots$), l'état de la machine, etc.

Dans ce travail, nous avons relevé différents paramètres à la fin de chaque passe (vibrations, usure, rugosités) afin d'évaluer les performances d'usinage selon les conditions de coupe.

III.4.1. Evolution de l'usure des plaquettes en fonction du temps

Trois campagnes expérimentales de 25 essais au total ont permis de prélever plusieurs valeurs de l'usure en dépouille des trois plaquettes étudiées, depuis l'état neuf jusqu'à la fin de la durée de vie. Les figures III.14-15 montrent l'évolution de l'usure en dépouille et l'usure en cratère (KT) en fonction du temps d'usinage pour les trois vitesses de coupe 250, 175 et 120m/min. D'après la bibliographie, l'évolution de l'usure est caractérisée par trois périodes principales : le rodage, la stabilisation de l'usure et l'accélération de l'usure.

Nous distinguons la phase de rodage qui correspond aux premières secondes de travail par la grande vitesse d'accroissement de l'usure par l'élimination des aspérités au niveau de l'arrête de coupe. En dépassant la période de rodage, l'usure évolue avec une vitesse relativement plus lente en devenant plus au moins linéaire. Cette phase de stabilisation se distingue par une grande résistance à l'usure. Au fur et à mesure que l'outil de coupe travaille, la température s'élève ce qui favorise l'apparition de la troisième phase caractérisée par l'accélération des mécanismes d'usure.

Les résultats relatifs à la variation de l'usure en dépouille VB en fonction du temps d'usinage sont présentés par la figure III.14. L'analyse de ces résultats montre que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure. Concernant l'usure en cratère (figure III.15), elle a également une tendance semblable à celle de l'usure en dépouille qui augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Comme l'allure de l'usure en cratère KT est relativement faible par rapport à celle de l'usure VB, cette dernière est considérée comme critère principal de la durée de vie de l'outil de coupe.

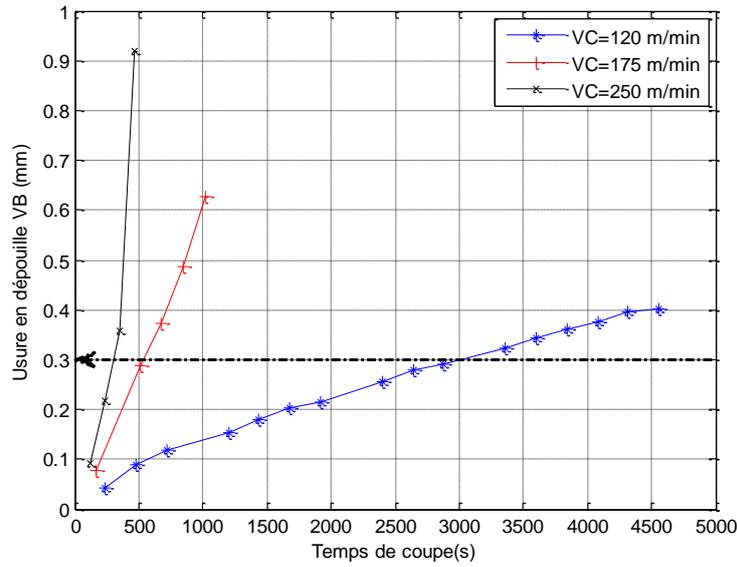


Figure III.14. Usure en dépouille (VB) en fonction du temps de coupe.

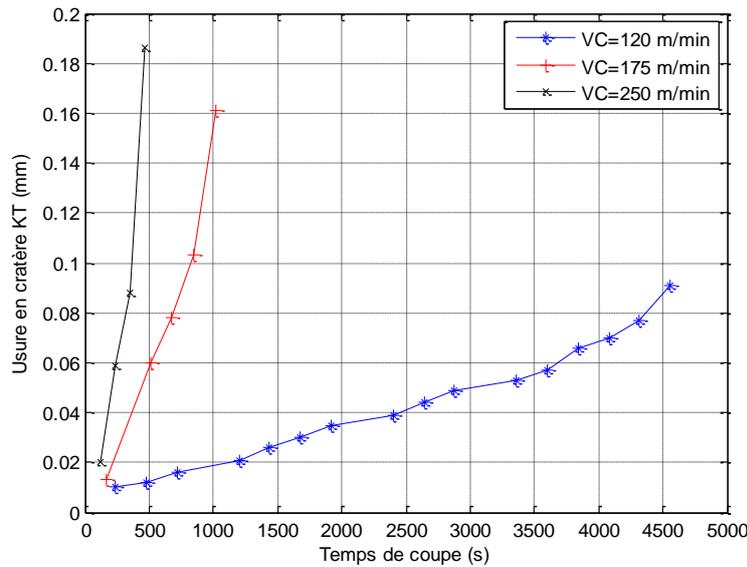


Figure III.15. Usure en cratère (KT) en fonction du temps de coupe.

III.4.2. Morphologie de l'usure des outils de coupe

Pendant les essais, la machine est arrêtée à intervalles de temps réguliers et l'usure en dépouille sur la plaquette est évaluée suivant la procédure recommandée par la Norme ISO 8688-1. La morphologie de l'usure en dépouille à différentes conditions de coupe est présentée dans les figures III.16-18. L'usure en dépouille est produite

probablement par les mécanismes d'abrasion, l'écaillage et la rupture catastrophique qui sont les principaux mécanismes d'usure observés pendant l'usinage.

A la vitesse de coupe 120 m/min, l'usure sur la surface en dépouille est régulière (figure III.16). En augmentant le temps d'usinage, l'usure en dépouille et en cratère croît régulièrement du premier essai jusqu'au dernier où l'usure en dépouille atteint 0.403 mm. A la fin de l'usinage, l'usure en dépouille devient irrégulière caractérisée par un effondrement de l'arête de coupe due à une usure combinée de l'usure en dépouille (VB) et l'usure en cratère (KT).

La figure III.17 montre la morphologie de l'usure en dépouille pour la vitesse de coupe 175 m/min. Au début, l'usure en dépouille des plaquettes se développe régulièrement avant de s'élargir avec le temps. On constate aussi à la fin de l'essai, des micros écaillages qui apparaissent au cours de l'usinage. L'usure en cratère (KT) évolue à un rythme beaucoup moins accentué que celui de l'usure en dépouille. Ce dernier est dû aux sollicitations-thermomécaniques sur la pointe de l'outil caractérisées par une forte abrasion à haute température de coupe provoquant une usure rapide de l'outil.

Les figures III.18 (a) et (b) présentent les modes de l'endommagement de l'arête de coupe qui augmente en fonction du temps mais qui reste inférieure à 0.3 mm. Par contre, la figure III.18 (c) présente l'usure en dépouille qui correspond à un point critique dans la vie d'outil de coupe et atteint une valeur de 0.359 mm avec une durée de vie atteinte 5.8 min. Ensuite on observe dans la figure III.18 (d) la formation des petites cannelures et un effondrement du bec de l'outil à la fin d'usinage après 8 min d'usinage où l'usure en dépouille et l'usure en cratère s'élargissent et devient irrégulière qui conduisent à la fin à une rupture catastrophique. L'usinage pendant ces états de coupe devient instable; il est accompagné de l'augmentation des vibrations, qui retourne usinant ensuite presque impossible et mené à limiter la plage de la vitesse de coupe.

Il est à noter, plus en travaillant à des vitesses de coupe élevées, plus les pressions exercées sur l'outil à l'interface copeau-outil et outil-pièce sont importantes en favorisant ainsi l'accélération de l'usure.

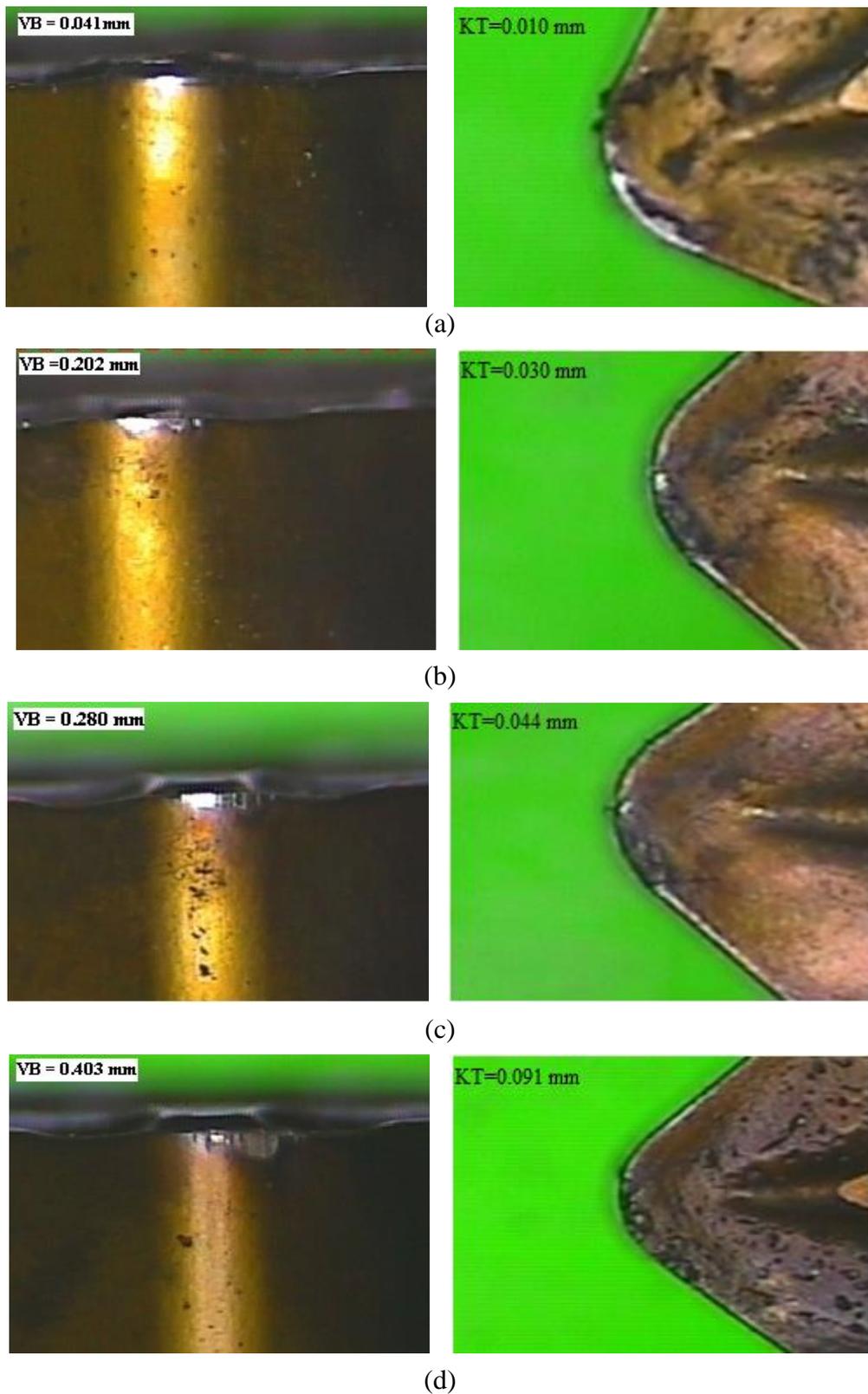


Figure III.16. Images 2-D de l'évolution de l'usure en dépouille et en cratère à $V_c = 120 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$ et $f = 0.12 \text{ mm/tr.}$ (a) à 4 min, (b) à 28 min, (c) à 40 min, (d) à 76 min

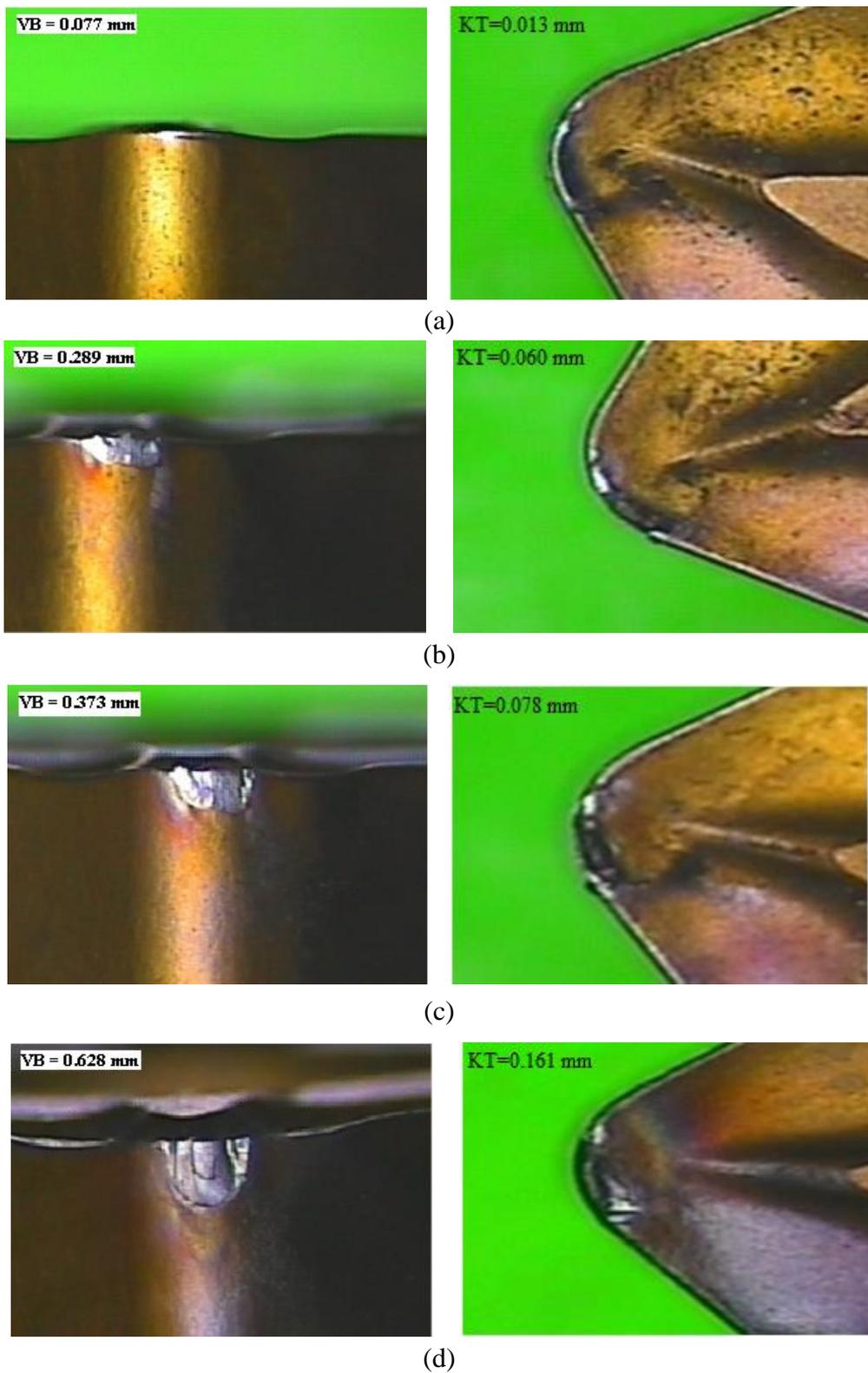


Figure III.17. Images 2-D de l'usure en dépouille et en cratère à $V_c = 175$ m/min, $a_p = 0.2$ mm et $f = 0.12$ mm/tr. (a) à 2.81 min, (b) à 8.45 min, (c) à 11.26 min, (d) à 16.90 min

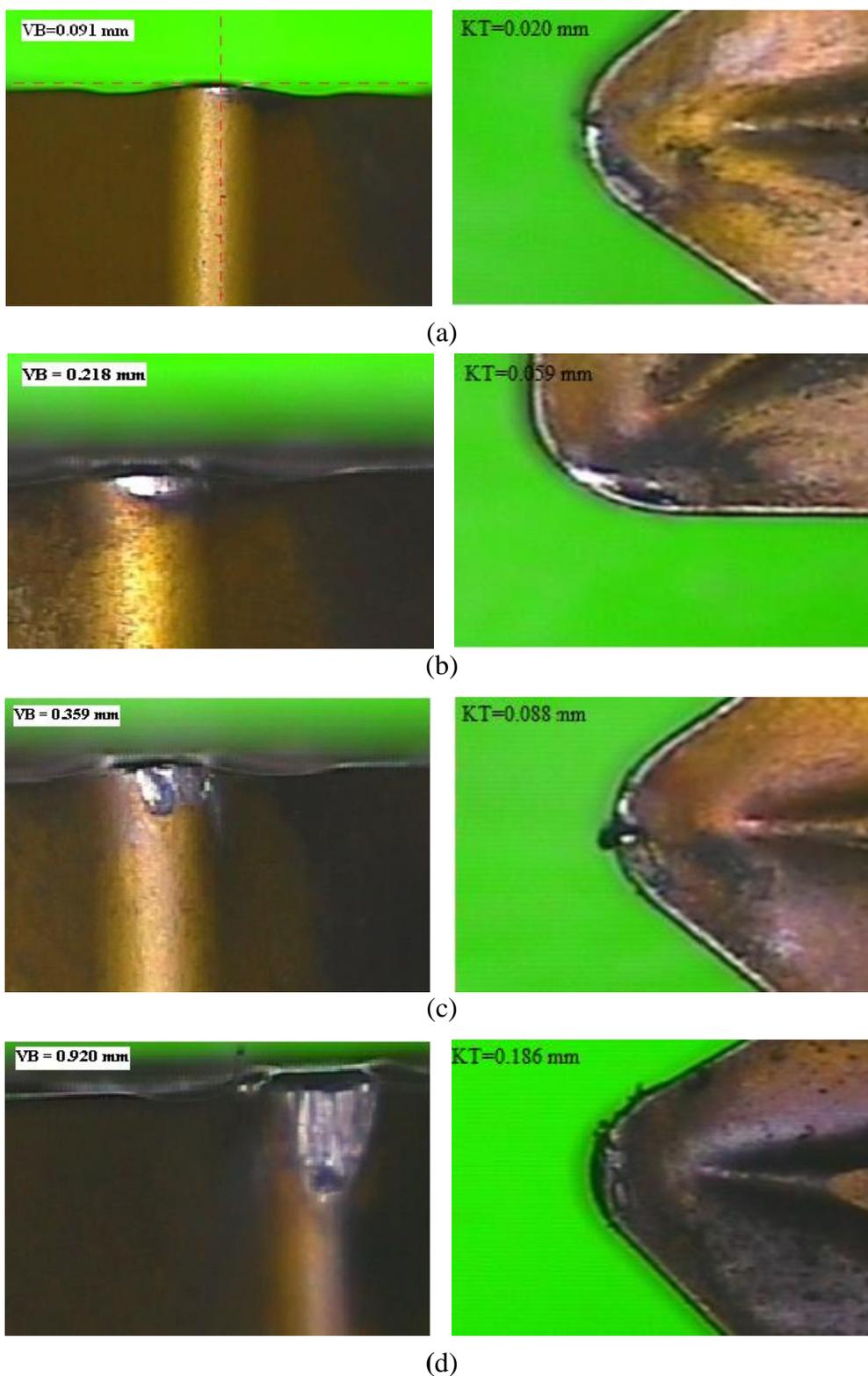


Figure III.18. Images 2-D de l'usure en dépouille et en cratère à $V_c = 250\text{ m/min}$, $a_p = 0.2\text{ mm}$ et $f = 0.12\text{ mm/tr.}$ (a) à 1.93 min, (b) à 3.86 min, (c) à 5.80 min, (d) à 7.73 min

III.4.3. Etat de surfaces usinées

Cette partie concerne l'étude de la rugosité après usinage. En effet, à la fin de chaque essai, des mesures de rugosité ont été réalisées afin d'analyser l'effet de l'usure sur l'état des surfaces usinées sous différentes conditions de coupe.

L'analyse des résultats de la rugosité en fonction de l'usure (figures III.19-21) montre que l'augmentation de l'usure en dépouille entraîne une dégradation de la qualité de la surface usinée. Dans ce contexte, tant que l'usure en dépouille ne dépasse pas la valeur admissible ($VB = 0.3 \text{ mm}$), la rugosité (Ra) évolue très lentement et l'état de la surface demeure acceptable. Au-delà de cette valeur, la rugosité subit une augmentation brusque.

Pour la vitesse de coupe de 120 m/min , On constate que la rugosité de surface est étroitement liée à l'usure. L'effet de ce dernier est important jusqu'à atteindre une valeur VB de 0.403 mm car la rugosité augmente de $Ra = 0.50 \text{ }\mu\text{m}$ à $Ra = 3.62 \text{ }\mu\text{m}$. Ensuite on observe que l'effet de l'usure sur la rugosité produisent des valeurs élevées jusqu'à $VB=0.292 \text{ mm}$, à partir de laquelle l'effet devient catastrophique et après 75 minutes de l'usinage, l'outil de coupe subit une dégradation rapide de l'usure en dépouille avec une rugosité correspondante de $Rt = 17.01 \text{ }\mu\text{m}$ et $Rz = 16.15 \text{ }\mu\text{m}$. Sachant qu'une usure évoluée de l'outil peut, non seulement influencer la rugosité de surface, mais aussi la précision dimensionnelle.

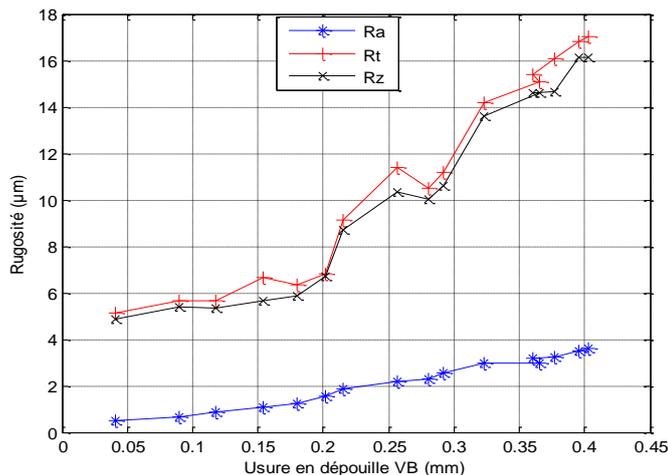


Figure III.19. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille

$V_c = 120 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

Des observations semblables sont valides à une vitesse plus élevée de 175 m/min, La rugosité Ra reste moins que 1µm après 3 minutes d'usinage. Mais comme l'usure se manifeste rapidement ($VB = 0.628$ mm), la rugosité atteint rapidement des valeurs excessives ($Ra = 5.23$ µm) après 17 minutes d'usinage.

Pour la vitesse de coupe de 250 m/min, les mêmes remarques sont valables Après 7 minutes d'usinage, les sollicitations thermomécaniques augmentent sur l'arrête tranchante de l'outil de coupe qui subit une dégradation rapide de l'usure en dépouille (0.920 mm) et la rugosité attient rapidement des valeurs très élevées ($Ra= 7.90$ µm).

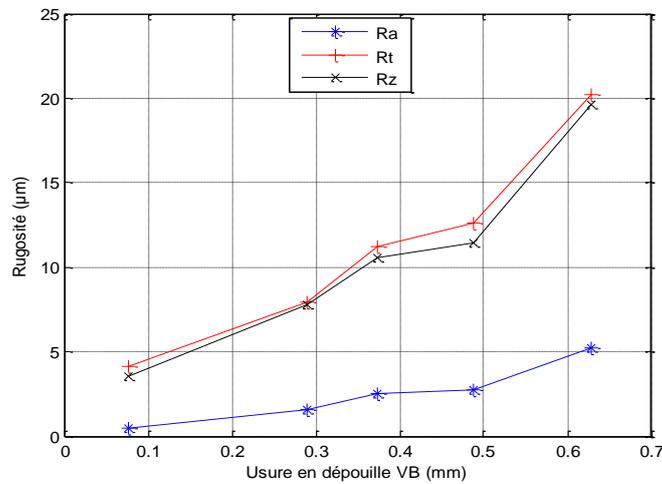


Figure III.20. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c = 175$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

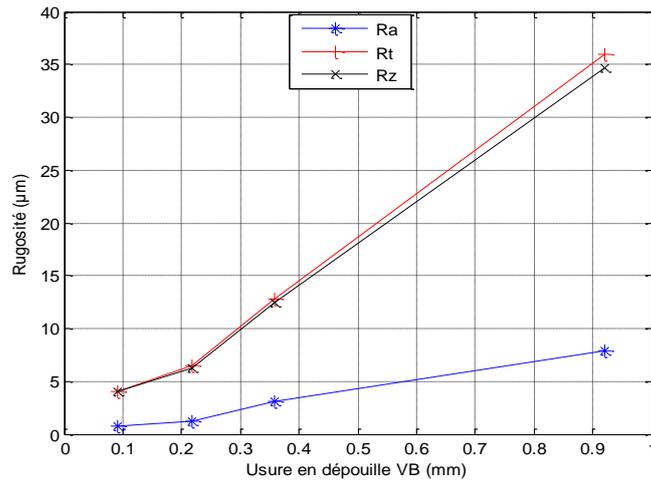


Figure III.21. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c = 250$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

Les conditions de coupe et les résultats des différents essais sont regroupés dans le tableau III.4.

Essai N°	Temps d'usinage cumulé	Usure en dépouille	Usure en cratère	Rugosité		
	t (S)	VB (mm)	KT (mm)	R _a (μm)	R _t (μm)	R _z (μm)
V _c = 120 m/min, a _p = 0.2 mm, f = 0.12 mm/tr						
1	240	0.041	0.010	0.50	5.15	4.87
2	480	0.090	0.012	0.66	5.66	5.42
3	720	0.118	0.016	0.87	5.67	5.33
4	1200	0.154	0.021	1.08	6.66	5.67
5	1440	0.180	0.026	1.25	6.35	5.87
6	1680	0.202	0.030	1.56	6.79	6.70
7	1920	0.215	0.035	1.87	9.14	8.73
8	2400	0.257	0.039	2.20	11.38	10.34
9	2640	0.280	0.044	2.27	10.48	10.04
10	2880	0.292	0.049	2.55	11.16	10.62
11	3360	0.323	0.053	2.97	14.18	13.62
12	3600	0.345	0.057	2.99	15.09	14.59
13	3840	0.360	0.066	3.20	15.40	14.61
14	4080	0.377	0.070	3.26	16.09	14.67
15	4320	0.396	0.077	3.51	16.81	16.12
16	4560	0.403	0.091	3.62	17.01	16.15
V _c = 175 m/min, a _p = 0.2 mm, f = 0.12 mm/tr						
1	169	0.077	0.013	0.48	4.12	3.52
2	507	0.289	0.060	1.54	7.96	7.82
3	676	0.373	0.078	2.49	11.21	10.53
4	845	0.488	0.103	2.76	12.61	11.46
5	1014	0.628	0.161	5.23	20.19	19.63
V _c = 250 m/min, a _p = 0.2 mm, f = 0.12 mm/tr						
1	116	0.091	0.020	0.80	4.01	4.00
2	232	0.218	0.059	1.21	6.45	6.24
3	348	0.359	0.088	3.06	12.82	12.50
4	464	0.920	0.186	7.90	35.99	34.62

Tableau III.4. Résultats des essais selon le plan expérimental proposé.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des moyens exploités pour réalisation des expériences ainsi que le protocole expérimental adopté. Une planification des conditions de réalisation des expériences a été établie afin d'évaluer les performances de l'outil de coupe et de caractériser son usure. La chaîne de mesure permet l'acquisition des signaux vibratoires, l'usure en dépouille, l'usure en cratère et la rugosité des surfaces usinées. Trois conclusions principales peuvent être tirées de ce chapitre :

- L'usure en dépouille est principalement due à l'abrasion, L'écaillage et la rupture catastrophique sont les principaux mécanismes d'usure observés pendant l'usinage.
- L'évolution de l'usure lors de l'usinage varie largement en fonction des caractéristiques physiques et mécaniques du couple outil-matière. En effet, elle se caractérise par une allure croissante en fonction du temps d'usinage.
- Les vitesses de coupe élevées ont une influence capitale sur l'usure en dépouille (VB) et en cratère (KT). Par ailleurs, l'effondrement du bec de l'outil est causé par l'usure combinée (VB) et (KT). Cependant, l'usure en dépouille mérite une attention particulière puisqu'elle affecte l'état de surface des pièces usinées et leur précision dimensionnelle.

Chapitre IV

Analyse statistique et prédiction de la transition de la durée de vie de l'outil

IV.1. Introduction

L'analyse vibratoire vise à identifier l'évolution de l'état de l'outil de coupe durant sa vie en particulier la transition de la phase de stabilisation à la phase d'accélération de l'usure. Ainsi, le contrôle direct de l'usure en dépouille (VB) de la plaquette étudiée a révélé un comportement différencié vis-à-vis de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe. A cet effet, la qualité des pièces usinées dépend directement du degré de l'usure. Pour ces raisons, il est nécessaire de développer un système de surveillance de l'usure des outils de coupe en se servant des signaux vibratoires traités en temps réel par les méthodes les plus adéquates afin de prédire leur durée de vie optimale.

Plusieurs auteurs ont concentré leurs efforts sur la détection de la rupture de l'outil de coupe qui est habituellement indiqué par un changement brusque des tendances des paramètres mesurés dont les valeurs dépassent un seuil prédéfini. Ravindra et al [Rav'97] ont développé une méthode pour détecter l'usure en dépouille grâce à l'étude de la valeur efficace et du spectre des signaux acoustiques. Cette équipe a montré que la valeur efficace du signal acoustique diminue dans la phase de rodage de l'outil, reste stable dans la phase de l'usure normale et augmente significativement dans la phase de l'usure rapide. Dilma et al [Dim'98] ont réalisé plusieurs travaux qui mettent en évidence le lien entre les vibrations émises en usinage et le degré de l'usure de l'outil. Ils exposent également quelques résultats obtenus lors de l'analyse des vibrations issues du tournage. Dans une étude récente [Bab'14], une méthode de surveillance basée sur l'analyse temporelle et fréquentielle des signaux vibratoires afin d'identifier l'usure de l'outil de coupe est proposée. Les résultats obtenus confirment l'efficacité de ces techniques prometteuses pour le contrôle de l'usure en dépouille d'un outil de tournage.

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse statistique qui repose sur l'analyse temporelle, fréquentielle et l'analyse multirésolution en ondelettes.

IV.2. Durée de vie des outils de coupe

Tous les outils de coupe s'usent au fur et à mesure de leur utilisation. La durée de vie représente le temps productif durant lequel l'arête de coupe garde son pouvoir de coupe afin de fournir des résultats acceptables compte tenu des paramètres spécifiques de rugosité et de précision dimensionnelle [Rmi'07].

Plusieurs travaux ont permis d'établir des modèles mathématiques permettant le calcul de la durée de vie des outils de coupe en fonction des paramètres de coupe. Taylor était le premier chercheur qui a proposé en 1907 un modèle mathématique reliant la durée effective de coupe d'un outil aux paramètres de coupe. Ce modèle, jugé suffisamment représentatif, est habituellement employé pour évaluer la durée de vie des outils de coupe [Kio'08]. En 1950, Gilbert a proposé la généralisation du modèle du Taylor en tenant compte de la géométrie de l'outil de coupe, l'avance et profondeur de passe. Koning-Deperieux, en 1969, a proposé un modèle de type exponentiel qui permet une représentation correcte de la loi d'usure en accord avec les courbes expérimentales.

Dans la pratique, l'usure en dépouille VB est le moyen le plus utilisé pour évaluer la durée de vie de l'outil de coupe. Son évolution en fonction du temps d'usinage passe par trois phases : période de rodage, usure normale et usure accélérée, voir figure IV.1.

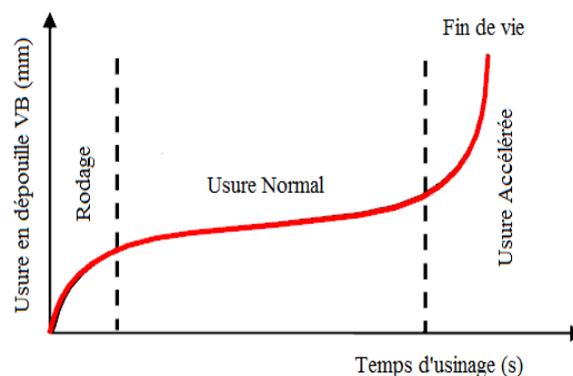


Figure IV.1. Usure de l'outil.

Le dispositif de la surveillance des outils de coupe doit permettre la mesure d'un signal représentatif de l'état de l'outil, le traitement de ce signal et la détection de

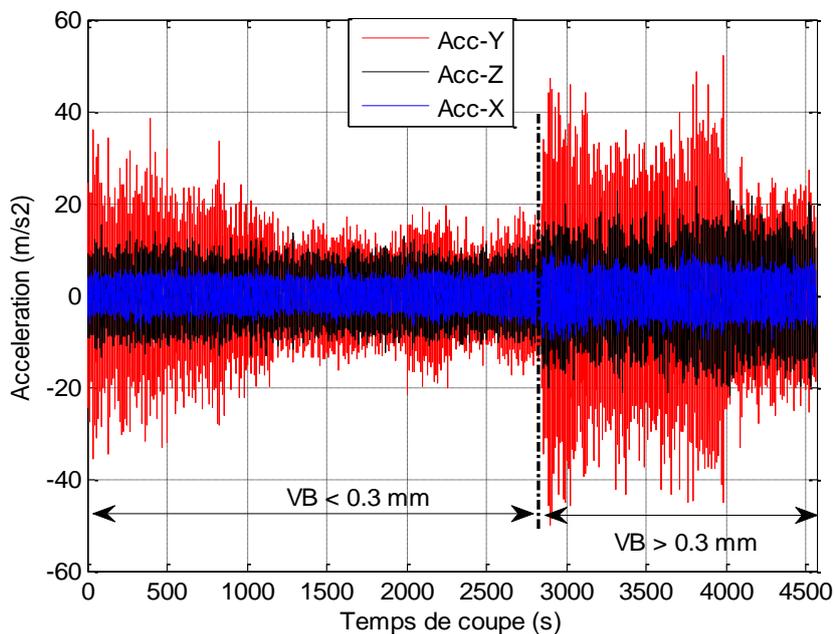
l'anomalie possible. L'extraction de l'information utile intégrée dans les signaux mesurés est effectuée par analyse ou par filtrage et doit permettre l'identification de la transition de la durée de vie des outils de coupe.

IV.3. Analyse dans le domaine temporel

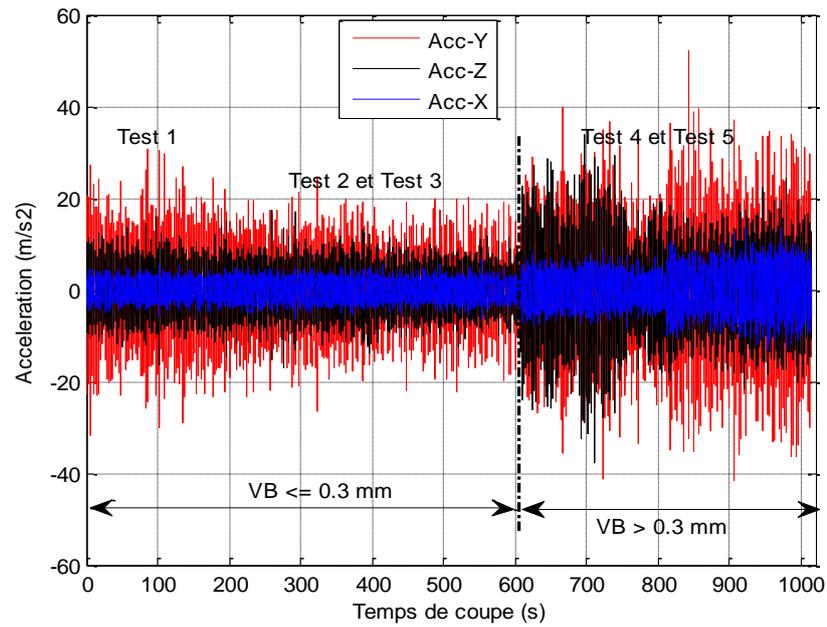
IV.3.1. Signaux vibratoires et caractérisation de l'usure

L'exploitation des signaux vibratoires acquis au cours de l'usinage permet de suivre l'évolution de l'usure de l'outil de coupe. 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 au changement de l'état de la plaquette.

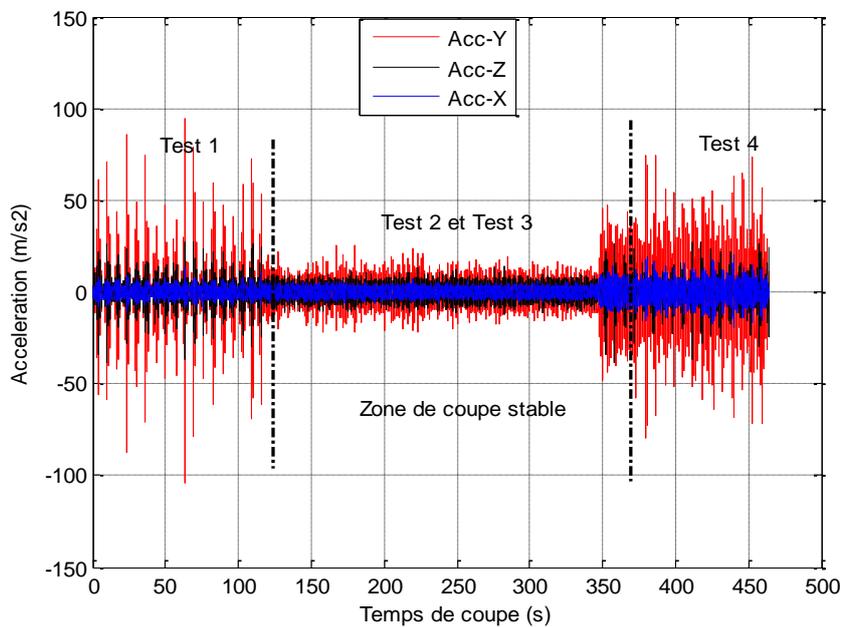
Dans un premier temps, la concaténation des signaux vibratoires d'accélérations acquis selon les directions : radiale (Y), tangentielle (Z) et axiale (X) durant une campagne d'essais est présenté sur la figure IV.2.



(a) $V_c = 120$ m/min.



(b) $V_c = 175$ m/min.



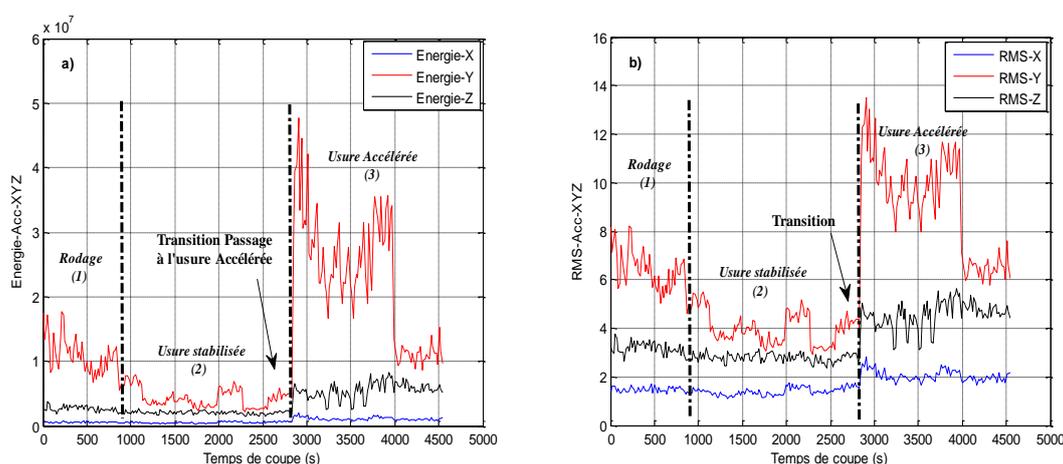
(c) $V_c = 250$ m/min

Figure IV.2. Concaténation des signaux mesurés.

Sur la figure IV.2.(a) nous montrons à titre d'exemple une concaténation des signaux vibratoires d'accélérations sur toute la durée de vie de l'outil de coupe. Seize séries de réponses vibratoires ont été mesurées. Chaque série est constituée par un certain nombre d'enregistrements correspondant à la durée de vie de la plaquette de coupe utilisée. D'après l'allure de ces réponses nous observons que nous avons trois principales phases de la vie d'outil de coupe: rodage, stabilisation de l'usure et de l'accélération de l'usure de l'outil où le taux d'usure augmente jusqu'à ce que le vieillissement rapide de l'outil se produise.

IV.3.2. Analyse statistique de l'usure

Nous avons calculé les indicateurs scalaires de l'énergie (E), la valeur efficace du signal (RMS) et la puissance moyenne (P_{moy}) associés aux signaux vibratoires acquis durant la vie de l'outil selon les trois directions (x, y, z). L'évaluation de ces paramètres statistiques a été effectuée par un balayage de signaux au moyen d'une fenêtre glissante dont la taille est de 1024 échantillons. L'évaluation s'effectue dès la première utilisation de l'outil jusqu'à sa dernière utilisation. L'évolution des indicateurs scalaires de l'énergie, la puissance moyenne et le RMS en fonction du temps de coupe suivant les trois directions est montrée dans les figures IV.3-5.



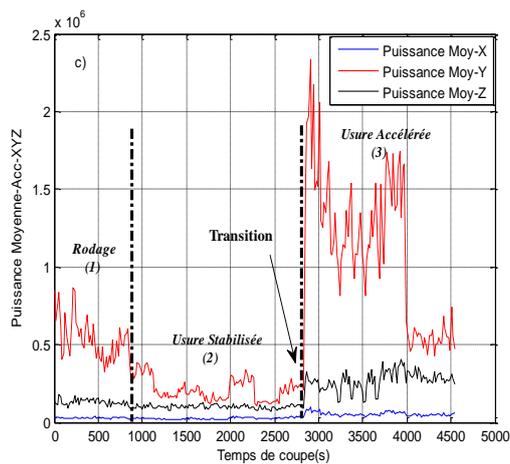


Figure IV.3. Evolution des indicateurs scalaires en fonction du temps de coupe suivant les directions X, Y et Z : $V_c = 120$ m/min.

a) Energie b) RMS c) Puissance Moyenne.

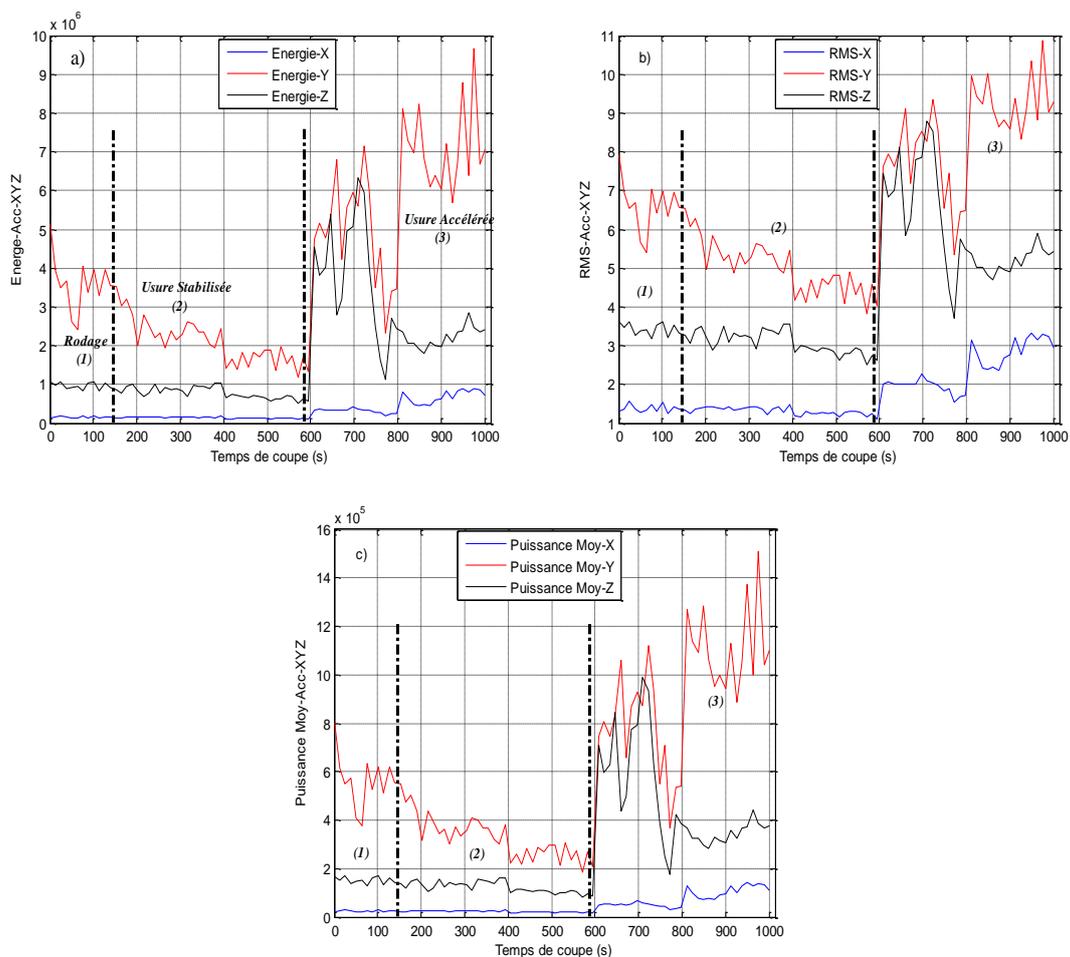


Figure IV.4. Evolution des indicateurs scalaires en fonction du temps de coupe suivant les directions X, Y et Z : $V_c = 175$ m/min.

a) Energie b) RMS c) Puissance Moyenne.

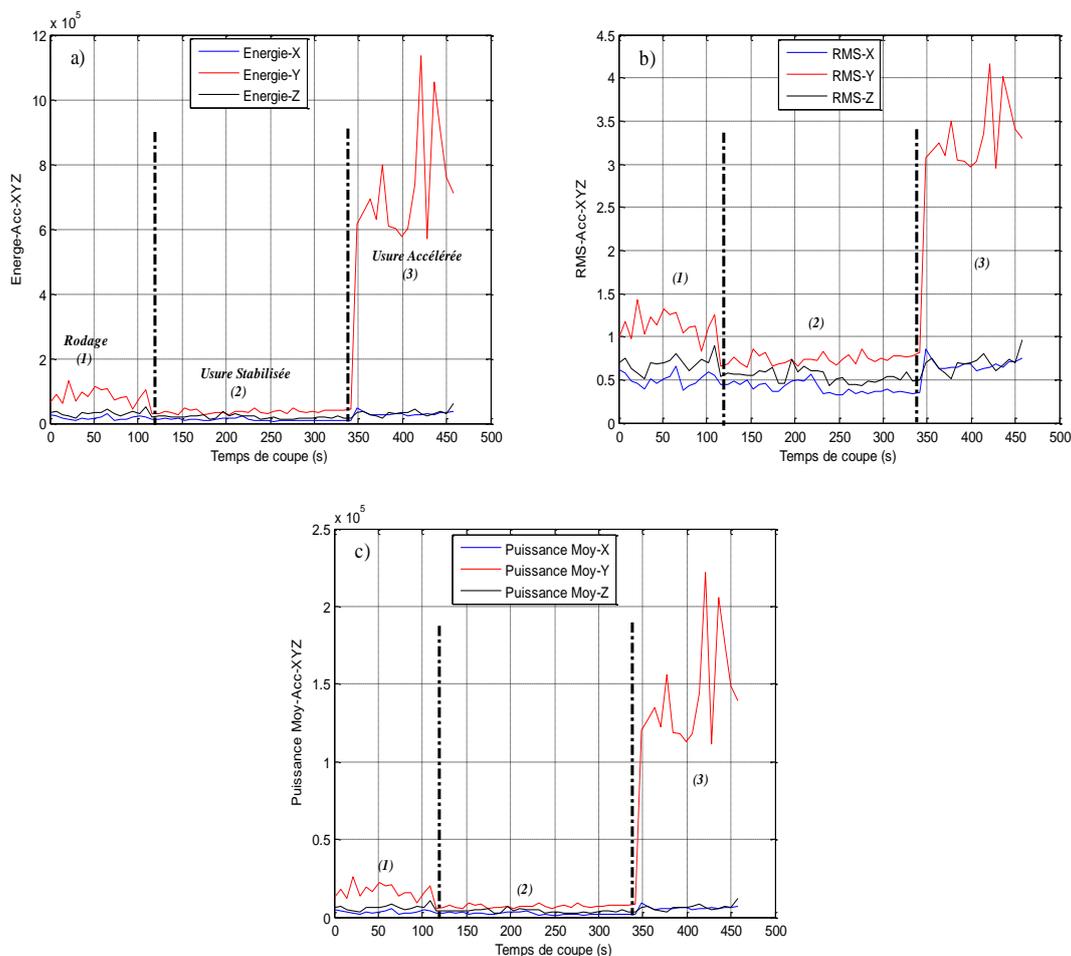


Figure IV.5. Evolution des indicateurs scalaires en fonction du temps de coupe suivant les directions X, Y et Z : $V_c = 250$ m/min.
 a) Energie b) RMS c) Puissance Moyenne.

Nous remarquons que l'évolution des trois indicateurs scalaires a presque la même allure selon les trois directions avec des différences de niveaux d'amplitude. A cet effet, le calcul de l'énergie, la puissance moyenne et le RMS selon les directions X, Y et Z donne des profils qui suivent bien le changement de l'état de l'outil de coupe au cours de l'usinage. Les allures des trois indicateurs présentent trois phases distinctes, en particulier celle qui correspond à la phase d'accélération de l'usure où les tendances des indicateurs scalaires changent de direction d'une façon rapide donnant lieu à des valeurs qui augmentent significativement avec le temps d'usinage.

Le profil des indicateurs scalaires est très significatif dans la direction radiale (Y) que celui des autres directions (X,Z). Cette constatation a été la même sur toutes les

acquisitions. De ces résultats, on conclut que l'analyse des signaux vibratoires, particulièrement dans la direction radiale, fournissent une surveillance efficace de l'usure de l'outil de coupe dans différents états.

Enfin, on peut dire que les indicateurs scalaires étudiés fournissent une surveillance efficace de l'usure de l'outil par la détection des trois phases de l'usure. Le passage à la troisième phase correspondant à l'usure accélérée, pour les vitesses de coupe 120 et 175 m/min, figure IV.3 et IV.4, se produit à la 48 min et 9 minutes, respectivement. Alors que pour la vitesse de coupe 250 m/min, figure IV.5, la transition se produit à la 5.8 minutes.

IV.4. Analyse spectrale des fréquences caractéristiques

L'analyse spectrale est certainement l'une des plus importantes techniques la plus utilisée dans l'industrie. A cet effet, le comportement spectral des signaux mesurés a été étudié tout au long des essais par analyse fréquentielle.

Les figures IV.6-8.a représentent les spectres d'accélération obtenus selon les trois directions durant l'essai 12, l'essai 5 et l'essai 4, respectivement. Nous distinguons les modes propres de l'outil qui apparaissent dans la bande de fréquence (3500 ÷ 5500 Hz) identique à celle identifiée par l'analyse modale d'après la figure III.10 présentée dans le chapitre précédent. Les amplitudes des fréquences propres de l'outil de la composante radiale sont très remarquables par rapport à la direction axiale et tangentielle. Ce qui est confirmé par les travaux réalisés en usinage dur où cette composante est toujours la plus dominante [Bou'11, Kha'12]. Par ailleurs, nous présentons, sur les figures IV.6-8.b, les spectres des signaux mesurés selon la direction radiale pour différents essais. On constate, après la période de rodage, une stabilité des amplitudes des fréquences propres de l'outil avec une augmentation progressive de l'usure. Lorsque l'usure dépasse sa valeur admissible, les amplitudes des fréquences propres augmentent brusquement.

Ces spectres couvrent toute la vie de l'outil de coupe depuis le premier essai jusqu'au dernier. Selon ces figures, nous distinguons les modes propres de l'outil représentés par les bandes fréquentielles : 1500 ÷ 2500 Hz, 3500 ÷ 5500 Hz. Ces deux bandes fréquentielles représentent les modes propres de l'ensemble du système d'usinage identifiés par l'analyse modale.

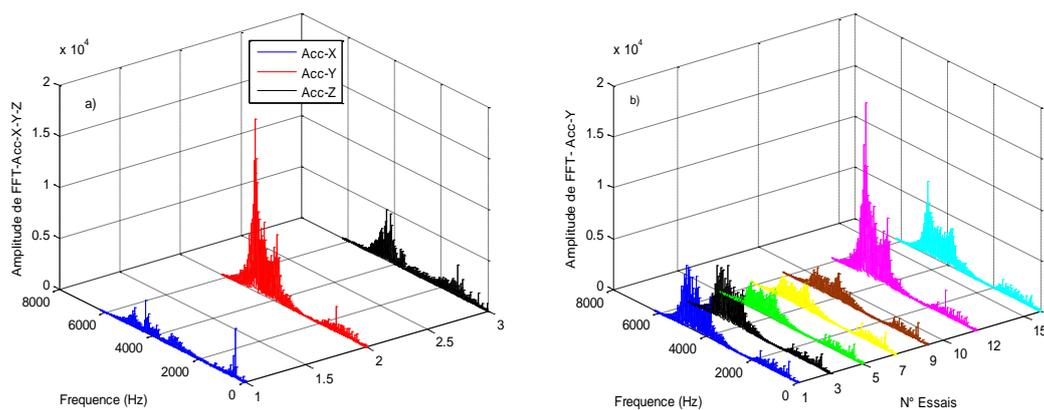


Figure IV.6. Spectres obtenus : a) essai 12, b) direction radiale
Pour $V_c = 120$ m/min.

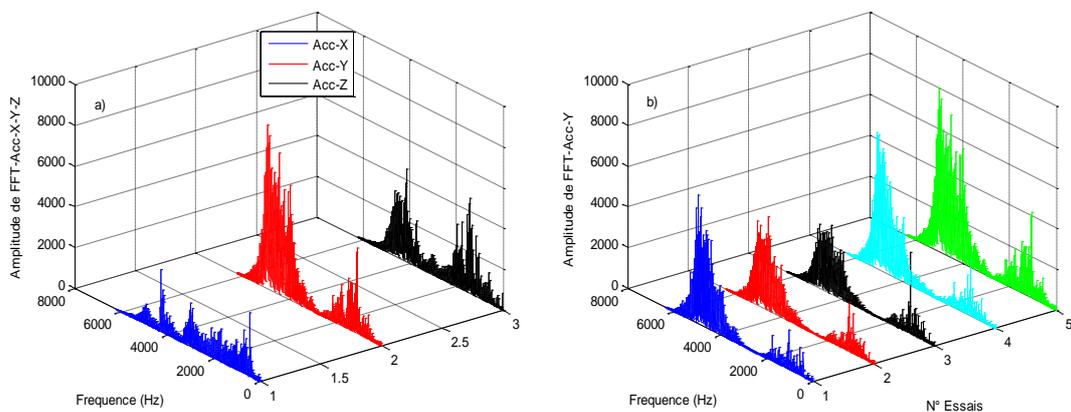


Figure IV.7. Spectres obtenus : a) essai 5, b) direction radiale
Pour $V_c = 175$ m/min.

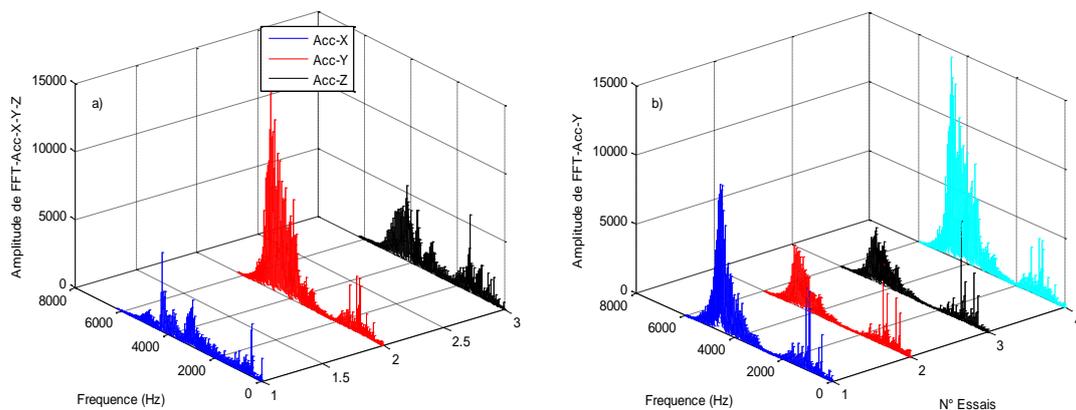


Figure IV.8. Spectres obtenus : a) essai 4, b) direction radiale
Pour $V_c = 250$ m/min.

Par ailleurs, on constate que les premiers modes propres de l'outil mentionnés dans les figures IV.6-8, ont une forte énergie spectrale, qui varie en fonction de l'apparition des trois phases d'usure. Dans la phase rodage, les amplitudes des fréquences propres de l'outil, sont très importantes, puis diminuent durant la phase de stabilisation de l'usure et dans la phase d'accélération de l'usure, elles augmentent à niveau. Cette analyse est valable pour les trois vitesses de coupe (Tableau IV.1) :

	Vc = 250 m/min	Vc = 175 m/min	Vc = 120 m/min
Phase de rodage	Essai N° 1	Essai N° 1	Essais N° 1,2
Phase de stabilisation	Essais N° 2,3	Essais N° 2,3	Essais N° 3 - 10
Phase d'accélération	Essai N° 4	Essais N° 4,5	Essais N° 11 - 16

Tableau IV.1. Répartition des essais sur les trois phases d'usure en fonction de la vitesse de coupe.

La caractérisation de l'évolution de ce niveau vibratoire en fonction de l'usure dépend directement dans la bande fréquentielle 3500 ÷ 5500 Hz qui peuvent être considérée comme un bon indicateur fréquentielle de l'état de l'outil de coupe.

En effet, les modes de défaillance potentiels sont caractérisés par les fréquences spécifiques, et ceux-ci sont détectés par la variation d'amplitude des signaux vibratoires à ces fréquences. Les signaux vibratoires mesuré depuis le premier essai jusqu'à la fin de la dure de vie de l'outil de coupe se manifestent en tant que étroites crête aux fréquences spécifiques.

IV.5. Prédiction de l'usure de l'outil par l'analyse en ondelettes

Lors de la transformation au domaine fréquentiel par l'FFT l'information du temps est perdue, on est ainsi incapable de définir quand un événement prend place. Dans cette application, le bruit et d'autres composants viennent polluer les profils des signaux vibratoires acquis. A cet effet, l'analyse en ondelettes a été proposée pour améliorer la sensibilité des indicateurs scalaires et la surveillance du processus de coupe en filtrant le bruit aléatoire et les autres composantes de la machine. Elle possède plusieurs propriétés qui la rendent très efficace pour le traitement des signaux acquis par son pouvoir de séparation entre les hautes fréquences du signal et les plus basses.

La figure IV.9 représente les différents détails et approximations obtenus à partir de la décomposition de l'accélération radiale (Y) par l'AMRO qui donne six niveaux. Dans notre cas, l'ondelette de Daubechies (db5) a été choisie puisqu'elle permet un filtrage optimal du signal mesuré. Les indicateurs scalaires (RMS et énergie), calculés pour les divers détails, prouvent que le signal reconstruit (D1) est beaucoup plus clair par rapport au signal original permettant ainsi d'avoir un meilleur résultat (figures IV.10-12) parce qu'il contient les fréquences propres de l'outil de coupe dans les différentes essais.

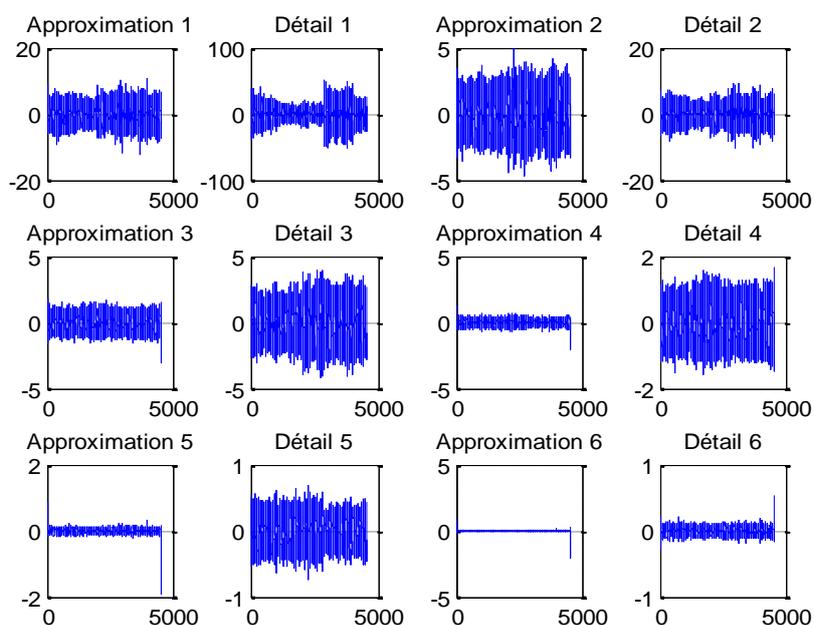
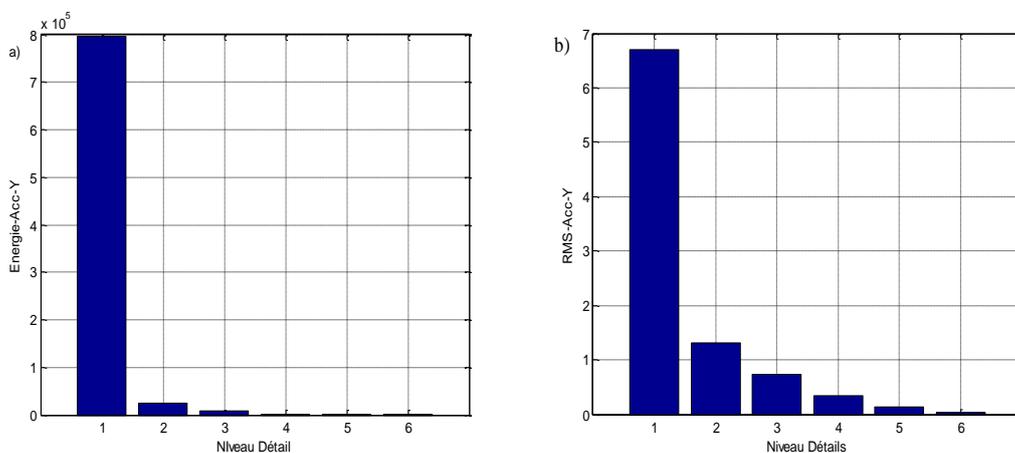
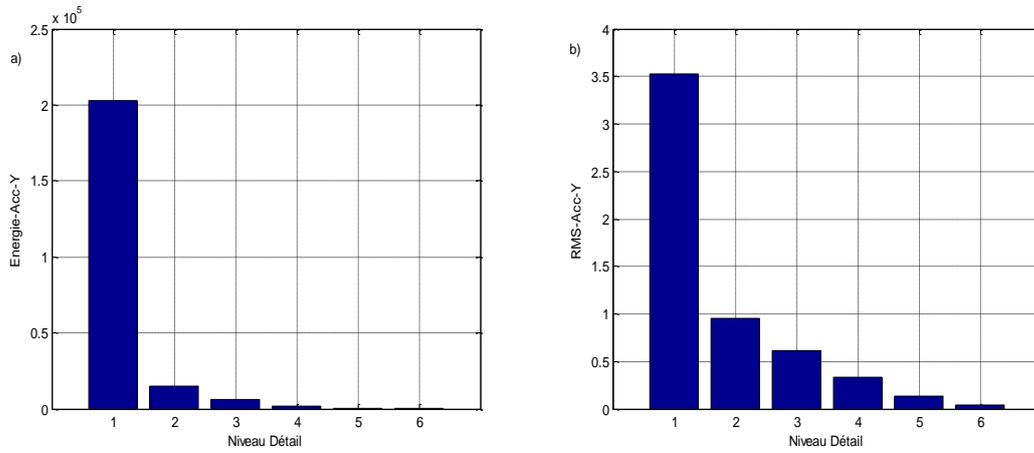


Figure IV.9. Différents détails et approximations issus de l'analyse multirésolution en ondelettes du signal mesuré (accélération radiale) pour $V_c = 120$ m/min.

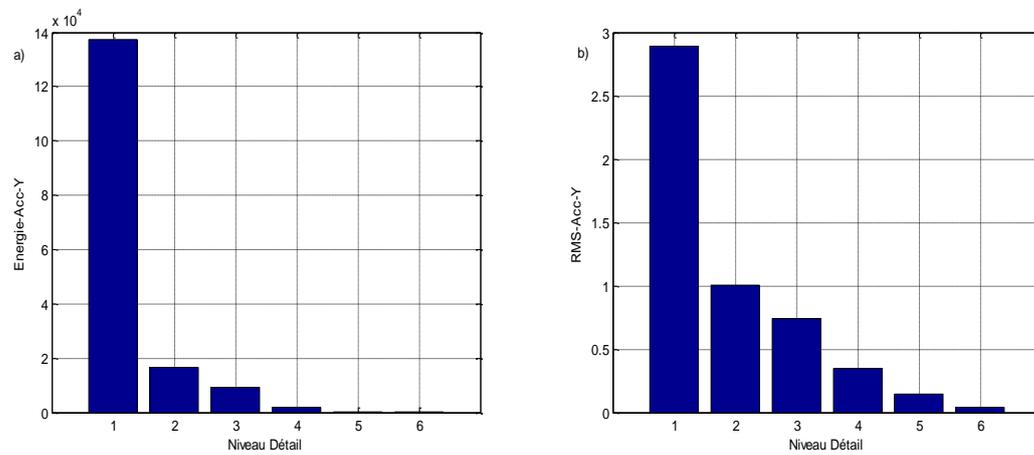
Essai 1



Essai 5



Essai 9



Essai 16

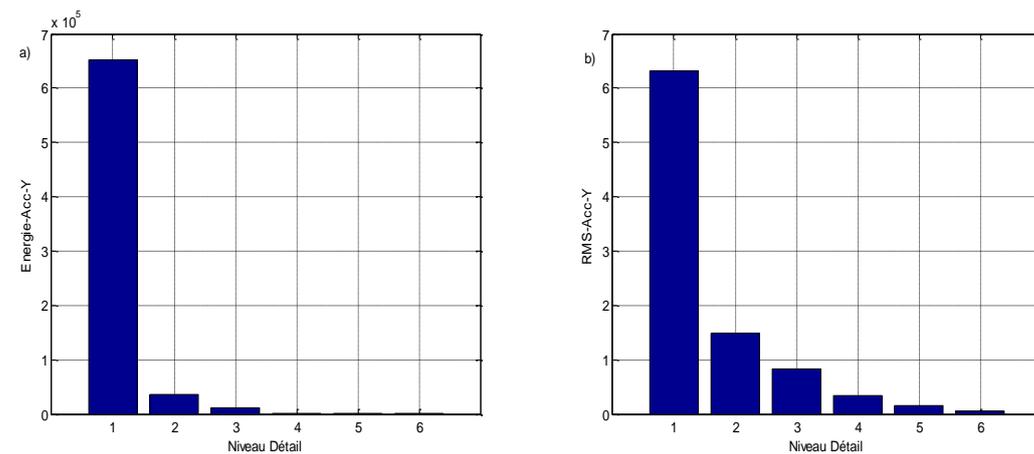
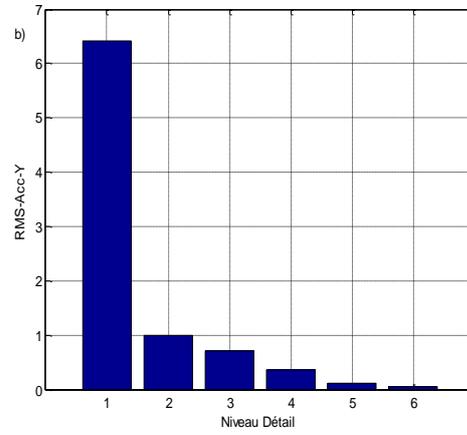
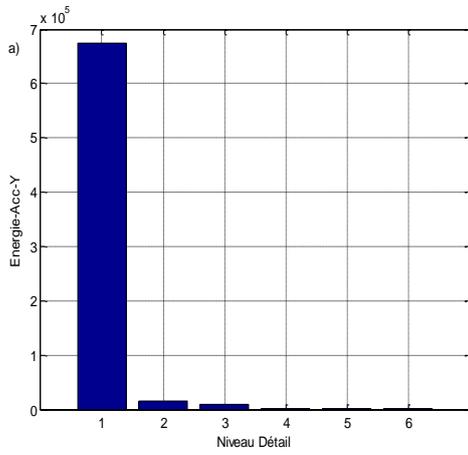
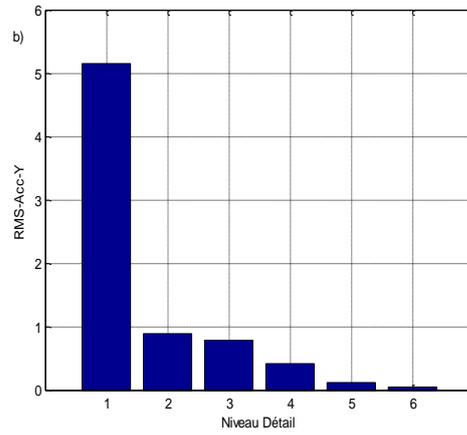
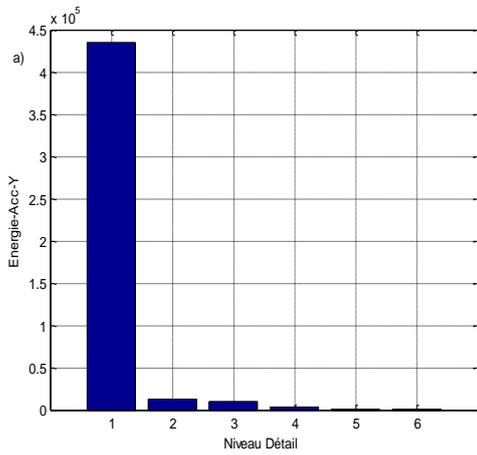


Figure IV.10. Evolution des indicateurs scalaires selon les différents détails pour les essais 1, 5, 9 et 16. a) Energie, b) RMS : $V_c = 120$ m/min.

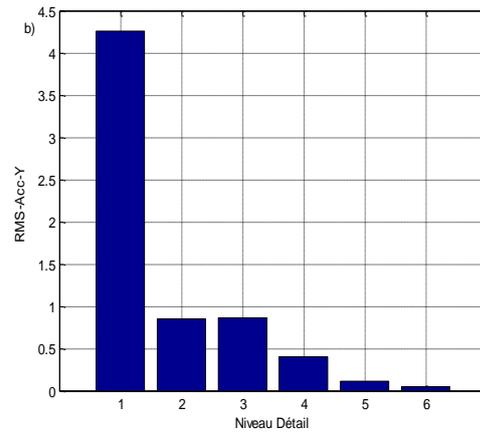
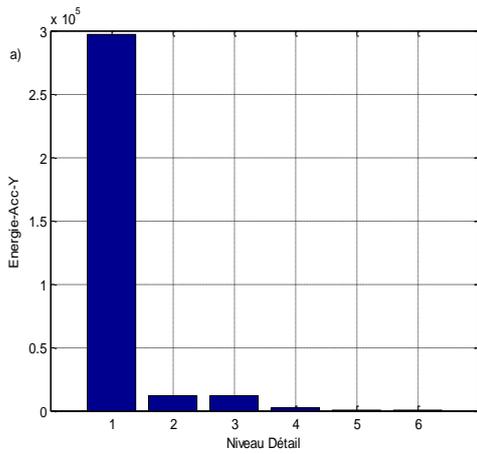
Essai 1



Essai 2



Essai 3



Essai 5

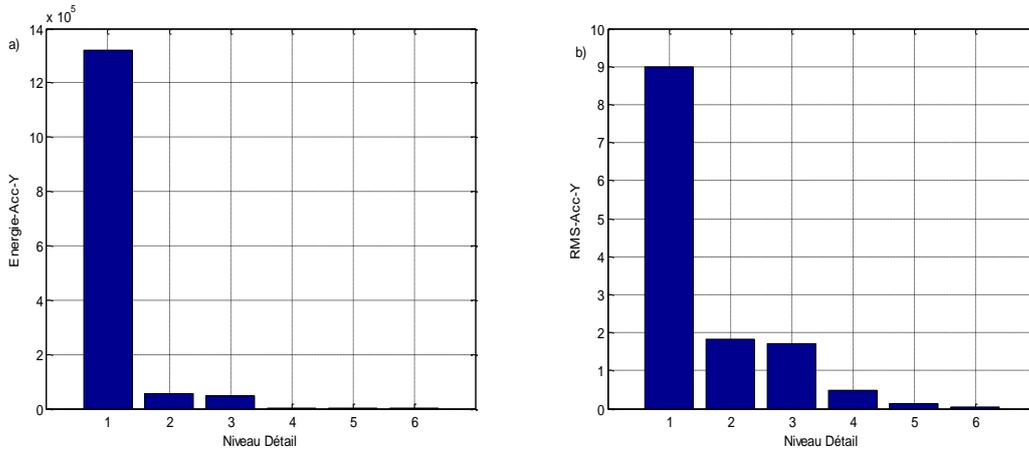
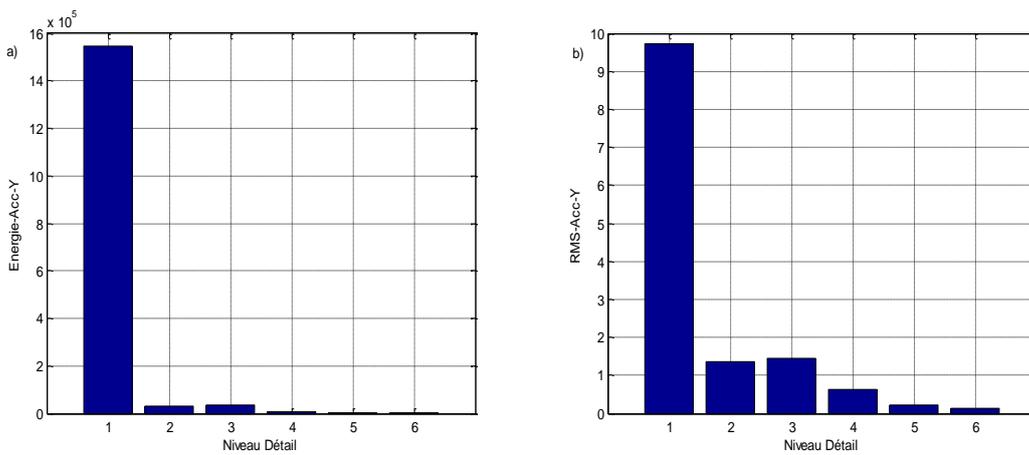
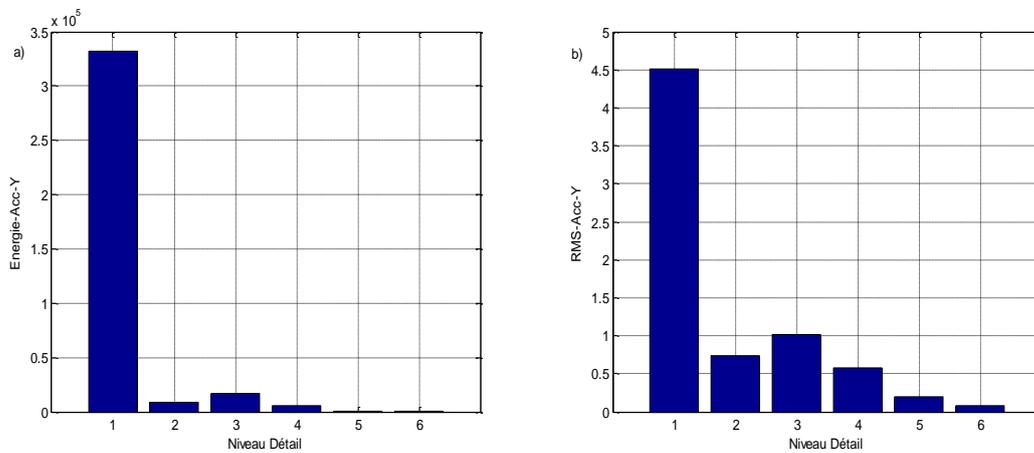


Figure IV.11. Evolution des indicateurs scalaires selon les différents détails pour les essais 1, 2, 3 et 5. a) Energie, b) RMS : $V_c = 175$ m/min.

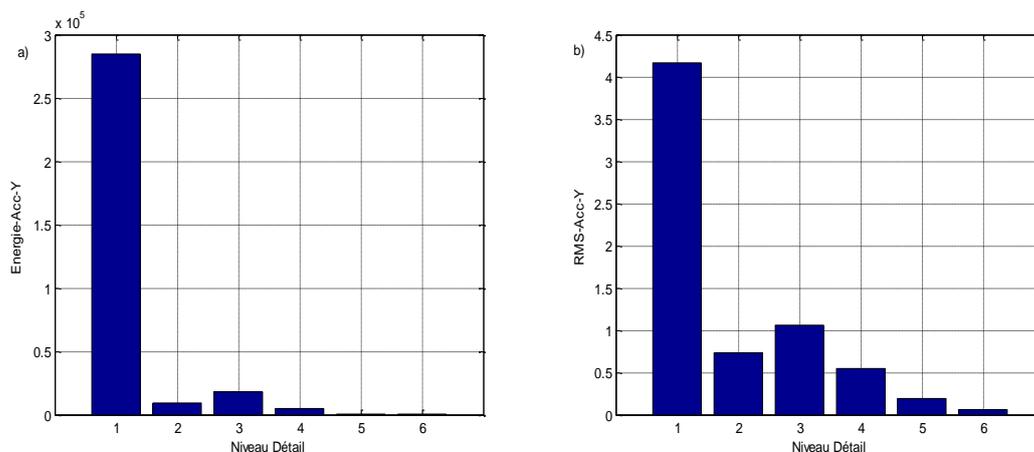
Essai 1



Essai 2



Essai 3



Essai 4

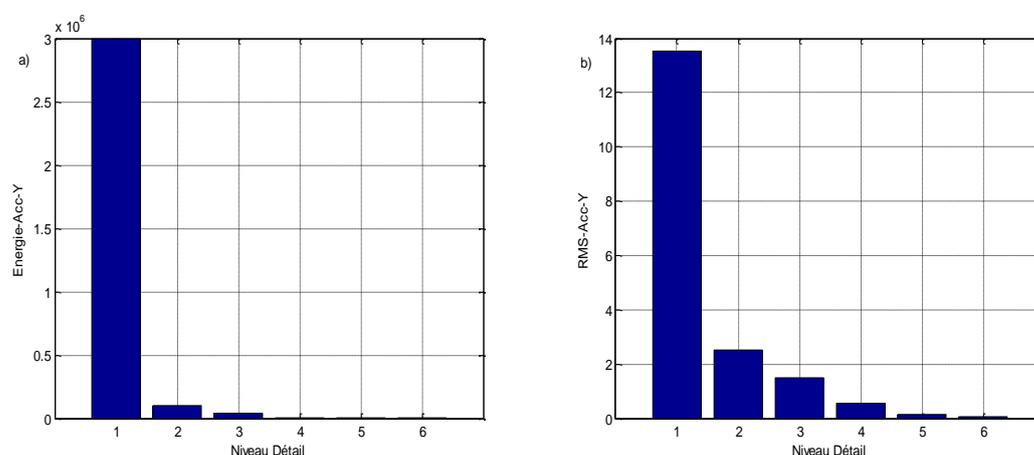


Figure IV.12. Evolution des indicateurs scalaires selon les différents détails pour les essais 1, 2, 3 et 4. a) Energie, b) RMS, $V_c = 250$ m/min.

L'application de l'analyse spectrale sur les signaux reconstruits par l'AMRO a pour objectif d'expliquer la variation des amplitudes de ces signaux d'une phase d'usure à une autre (figures IV.13-15). On constate que les amplitudes des spectres de l'accélération dans les différentes phases de l'usure dépendent directement des fréquences propres de l'outil. Les trois phases de l'usure sont bien éclairées par la variation d'amplitudes du spectre du signal reconstruit (D1). Dans la phase de rodage, le contact outil-pièce est très petit, d'où les amplitudes de vibration sont importantes suite à un faible amortissement de l'outil. Dans la phase de stabilisation de l'usure, la surface de contact outil-pièce devient plus grande et régulière qui amortit la vibration de l'outil de coupe en provoquant une diminution des amplitudes de ses fréquences

propres. La troisième phase correspond à l'usure accélérée, caractérisée par l'irrégularité de la surface de contact outil-pièce et par le changement de la géométrie du bec de l'outil. Ces modifications réduisent énormément le pouvoir coupant de l'outil et favorisent le contact pièce-outil, ce qui se traduit par une augmentation des amplitudes des vibrations de l'outil de coupe

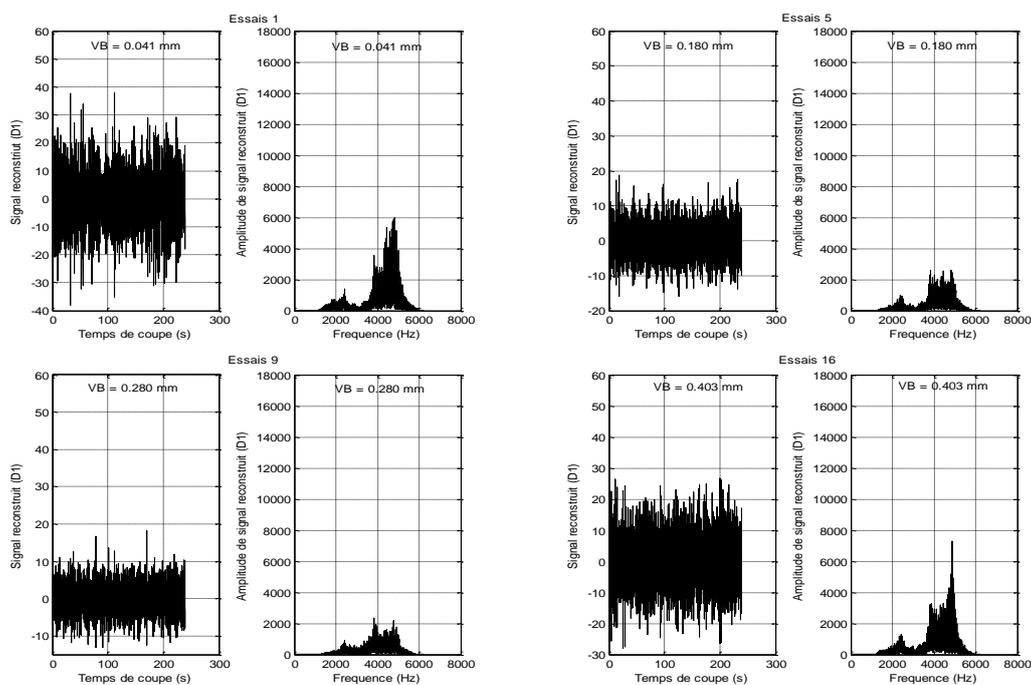
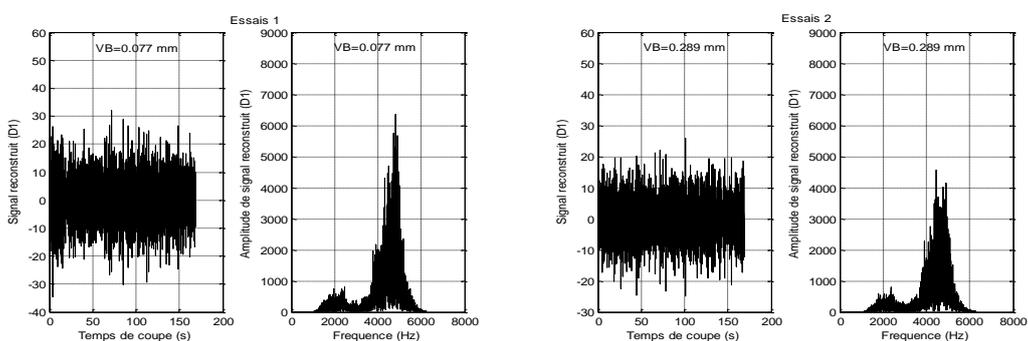


Figure IV.13. Signal reconstruit (D1) et son spectre pour différents essais. $V_c = 120$ m/min.



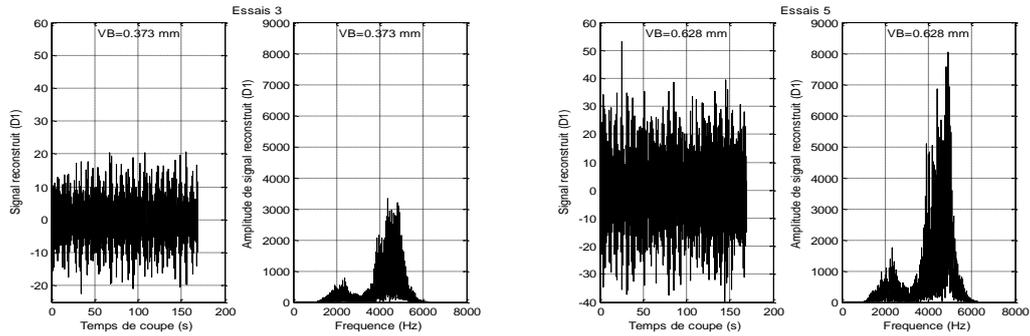


Figure IV.14. Signal reconstruit (D1) et son spectre pour différents essais. $V_c = 175$ m/min.

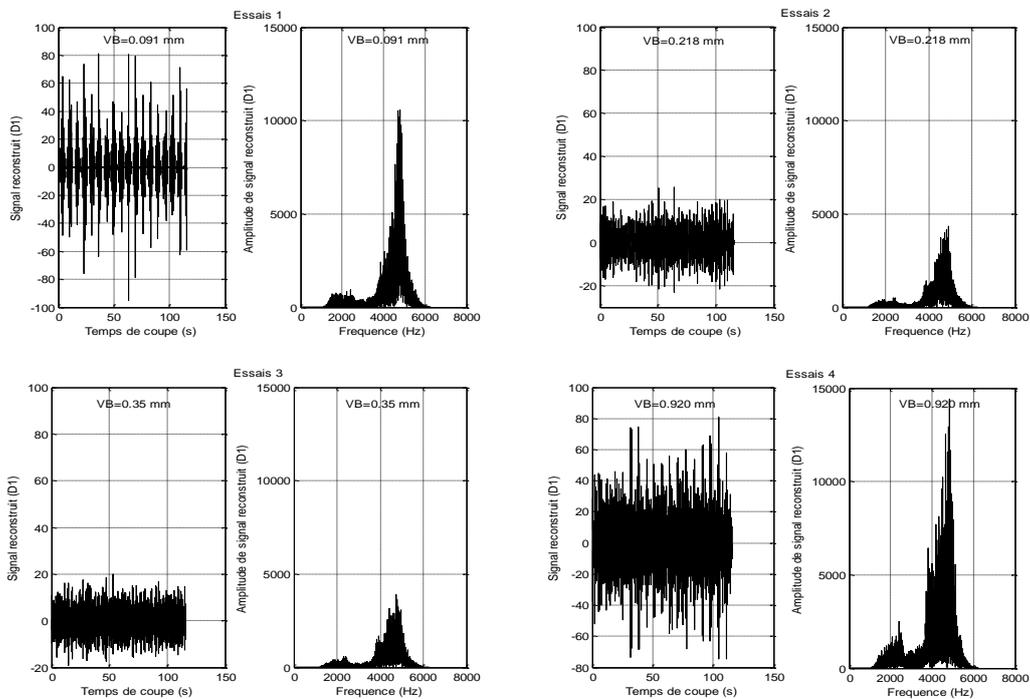


Figure IV.15. Signal reconstruit (D1) et son spectre pour différents essais. $V_c = 250$ m/min.

L'application de l'AMRO pour la décomposition des différents signaux d'accélération mesurés pour les différentes vitesses de coupe, montre que c'est les détails des signaux reconstruits (D1) qui contiennent les fréquences caractéristiques du système d'usinage (figures IV.13-15). Les fréquences propres de l'outil dans les différentes directions apparaissent dans la bande fréquentielle [3500 ÷ 5500 Hz] et les fréquences

propres de la plate forme apparaissant dans la bande [1500 ÷2500 Hz] qui sont identifiés par l'analyse modale (figure III.11).

L'analyse des spectres des détails D1 pour chaque vitesse de coupe, du premier test jusqu'au dernier, montre que :

- Les amplitudes vibratoires des signaux d'accélération reconstruits à partir du détail (D1) augmentent considérablement avec l'augmentation de la vitesse de coupe. Cette augmentation dépend des trois phases d'usure de l'outil de coupe. A titre d'exemple pour la vitesse de coupe $V_c=250$ m/min, nous pouvons constater que l'amplitude vibratoire du signal d'accélération de la première phase est très importante (± 100 m/s²), moins importante dans la deuxième phase (± 20 m/s²) puis elle augmente à nouveau dans la dernière phase et passe à (± 80 m/s²).
- Dans l'analyse spectrale, on constate que les amplitudes des spectres d'accélération reconstruits à partir des détails D1 dans les différentes phases d'usure dépendent directement des fréquences propres de l'outil caractérisée par l'augmentation de l'usure et l'irrégularité de la surface de contact (figure III.19.d).
- Toutefois, Il est possible de prédire la durée de vie des outils de coupe en développant un système de surveillance de l'usure basée sur l'analyse des fréquences propres de la plate forme KISTLER, ce qui rend la surveillance encore plus évidente.

IV.5.1. Indicateurs fréquentiels

Pour rendre la méthode de surveillance de l'usure des outils de coupe plus simple pour son application industrielle, nous proposons d'entamer des modifications sur un indicateur appelé niveau global, couramment utiliser pour les détecté des défauts de roulement et d'engrenage (You'15) pour le rendre applicable dans le cas de la prévision de la durée de vie de l'outil.

Vu que l'énergie vibratoire est concentrée autour de la bande où la fréquence propre existe, cet indicateur est calculé à partir des spectres des signaux reconstruits des détails (D1) dans la bande de fréquence qui couvre les fréquences propres de l'outil de coupe, par l'expression suivante :

$$NG = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{F_{min}}^{F_{max}} (N_i)^2} \quad (IV- 1)$$

Avec F_{min} et F_{max} les limites de la bande de fréquence de résonance de l'outil et N_i le nombre de lignes du spectre dans la même bande.

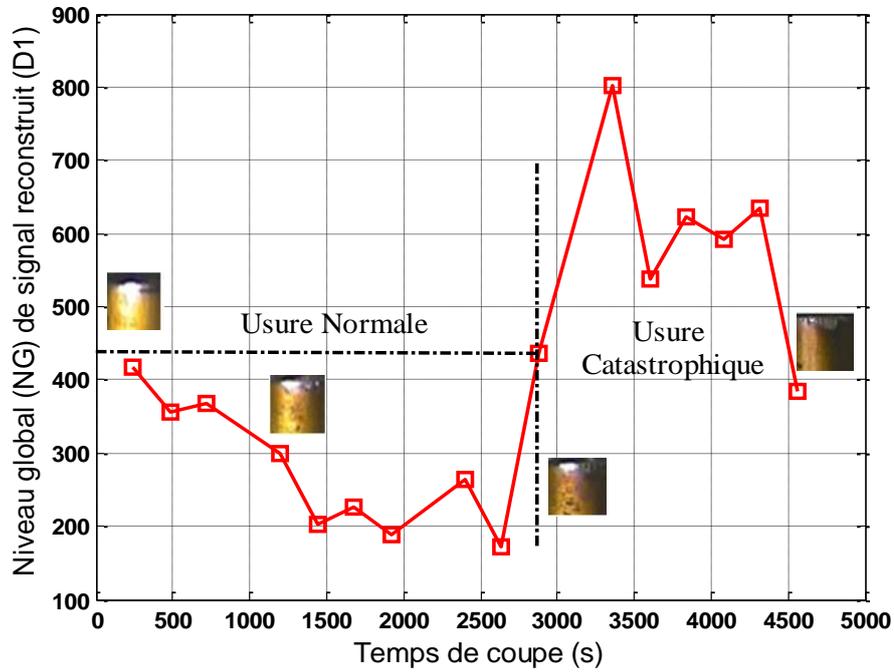


Figure IV.16. Niveau global du signal reconstruit (D1) pour $V_c = 120$ m/min.

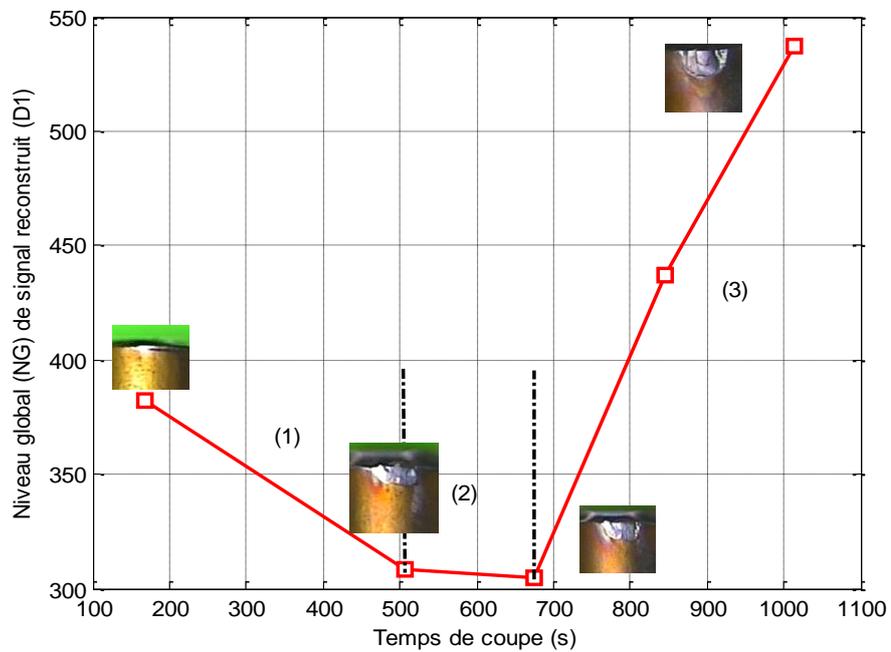


Figure IV.17. Niveau global du signal reconstruit (D1) pour $V_c = 175$ m/min.

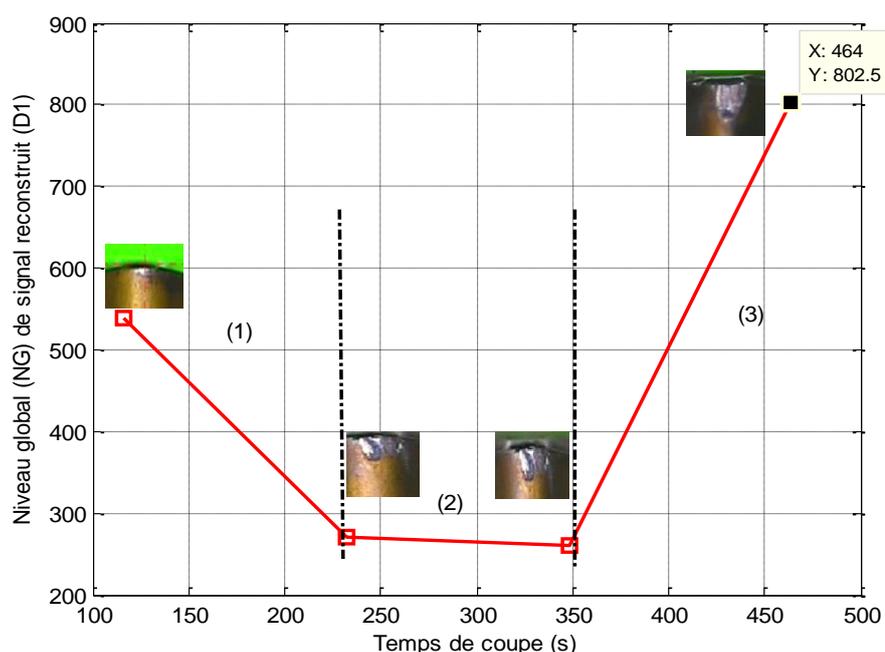


Figure IV.18. Niveau global du signal reconstruit (D1) pour $V_c = 250$ m/min.

En se basant sur les niveaux globaux des signaux reconstruits, représentés par les figures IV.16-18, on propose un critère de surveillance de l'usure des plaquettes de coupe. Ce critère est lié au dépassement du niveau global d'une valeur correspondante à celle de la période de rodage du fait qu'il confirme les résultats de l'analyse spectrale présentés ci-dessus.

Pour la vitesse 120 m/min (figure IV.16), le niveau global de la phase de stabilisation de l'usure varie entre 170 et 417 ($VB \approx 0.3$ mm). L'usure catastrophique est caractérisée par un niveau global qui croît rapidement vers des valeurs importantes avec une crête à 802 pour $VB = 0.323$ mm.

Pour la vitesse 175m/min (figure IV.17), on constate que cet indicateur fréquentiel fait apparaître clairement les trois phases d'usure. Le niveau global passe de 380 dans la phase de rodage à 304 dans la phase de stabilisation de l'usure ($VB = 0.373$ mm) avant d'augmenter dans la phase d'usure accélérée à 537 ($VB = 0.628$ mm).

Le niveau global (NG) permet aussi de localiser les trois phases d'usure pour une vitesse de coupe de 250 m/min (figure IV.18). La phase de rodage est observée durant l'essai 1 avec une valeur de niveau global très importante $NG = 540$ ($VB = 0.091$ mm). Durant la deuxième phase, le niveau global des essais 2 et 3 diminue sensiblement et reste presque constant avec une valeur de 260 ($VB = 0.359$ mm). Dans

la troisième phase, le niveau global augmente considérablement pour atteindre la valeur de 802 (VB=0.92 mm).

IV.6. Indicateurs spectraux

IV.6.1. Analyse des autospectres et de la morphologie de l'usure

Les autospectres correspondant à l'évolution de l'usure dans les trois séries d'expériences (figures IV.19-21) comportent deux bandes de fréquences caractéristiques. La première apparaît entre 1500 et 2500 Hz qui décrit les fréquences propres de la plate-forme Kistler et la seconde apparaît entre 3500 et 5500 Hz qui décrit les fréquences propres de l'outil de coupe. Les autospectres montrent d'une manière claire la variation des amplitudes des signaux mesures d'une phase d'usure à une autre autour des fréquences propres de l'outil de coupe.

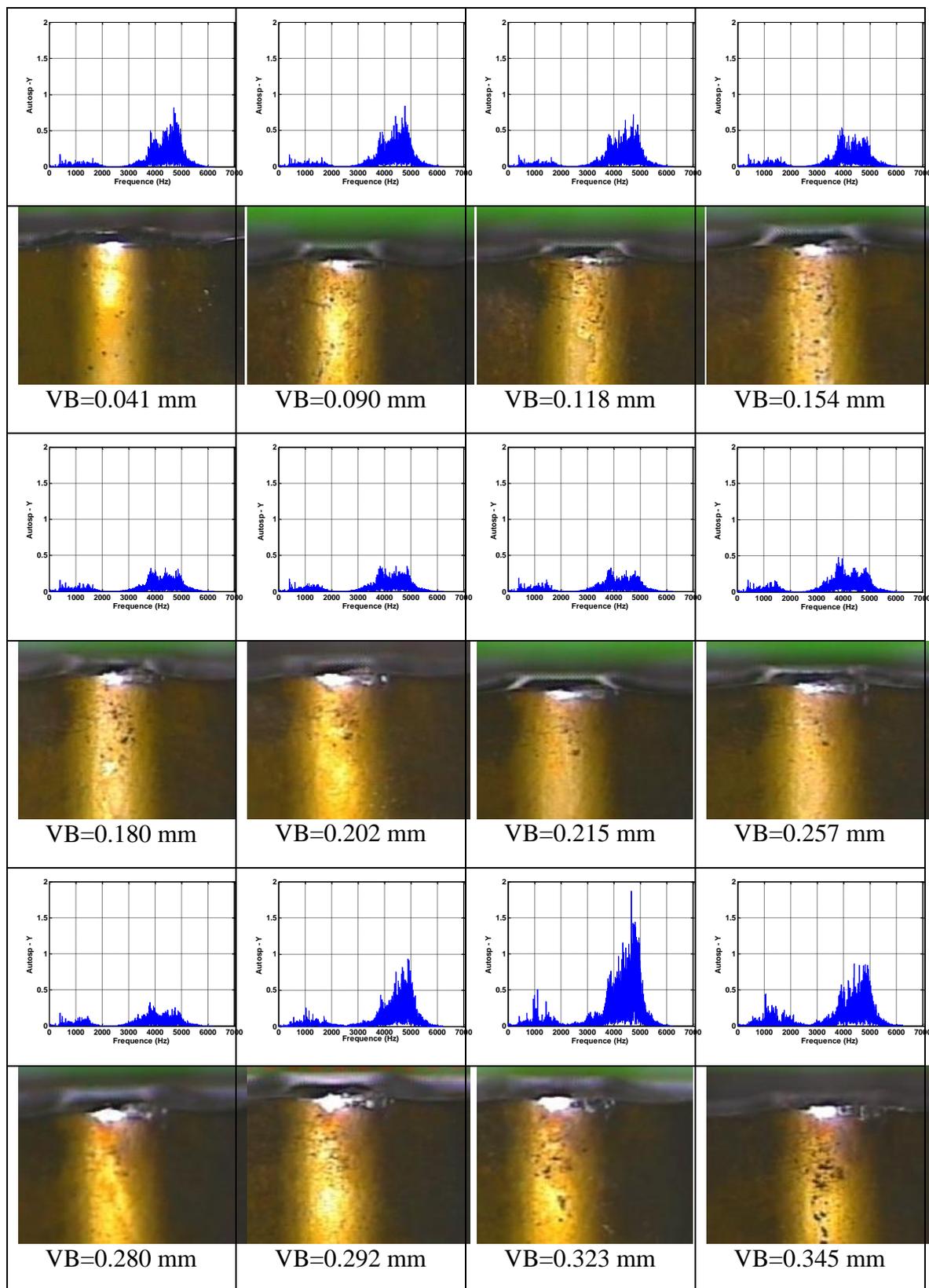
Les phases d'usure sont bien explicitées par cette variation d'amplitude, dans la phase de rodage, où la surface de contact outil-pièce est très faible presque ponctuelle, l'outil est dans une configuration presque encastré-libre, donc les amplitudes de vibrations sont importantes, dans la deuxième phase de stabilisation de l'usure la surface de contact outil-pièce devient plus importante et régulière, ce qui amorti les vibrations de l'outil où la rigidité de l'outil augmente et provoque une diminution des amplitudes des fréquences propres de l'outil de coupe, puis elle augmente à nouveau dans la dernière phase.

En examinant la morphologie des différentes plaquettes dans divers stade d'usure, on peut observer que l'endommagement des arêtes tranchantes augmente avec le temps. La figure IV.19 montre l'usure typique produite pendant ce processus de coupe à 120 m/min. L'usure en dépouille VB demeure moins de 0.3 mm après 2880 s de coupe (essai 10) mais les sollicitations mécaniques et thermiques mène à une rupture catastrophique du bec de l'outil à la fin de la série des essais (VB=0.403 mm).

Dans la figure IV.20, nous exposons les morphologies de l'usure en dépouille pour la vitesse de coupe 175 m/min. Au début, l'usure en dépouille se développe régulièrement jusqu'à 0.289 mm à 507 s avant d'augmenter avec le temps et atteint à une valeur de 0.620 mm au dernier essai à 1014 s.

La morphologie de l'usure en dépouille pour la vitesse de coupe 250 m/min (figure IV.21) se montre régulière jusqu'elle atteint une valeur de 0.359 mm après 348 s mais

elle devient irrégulière avec le temps conduisant à une rupture catastrophique (VB=0.920 mm) après 464 s.



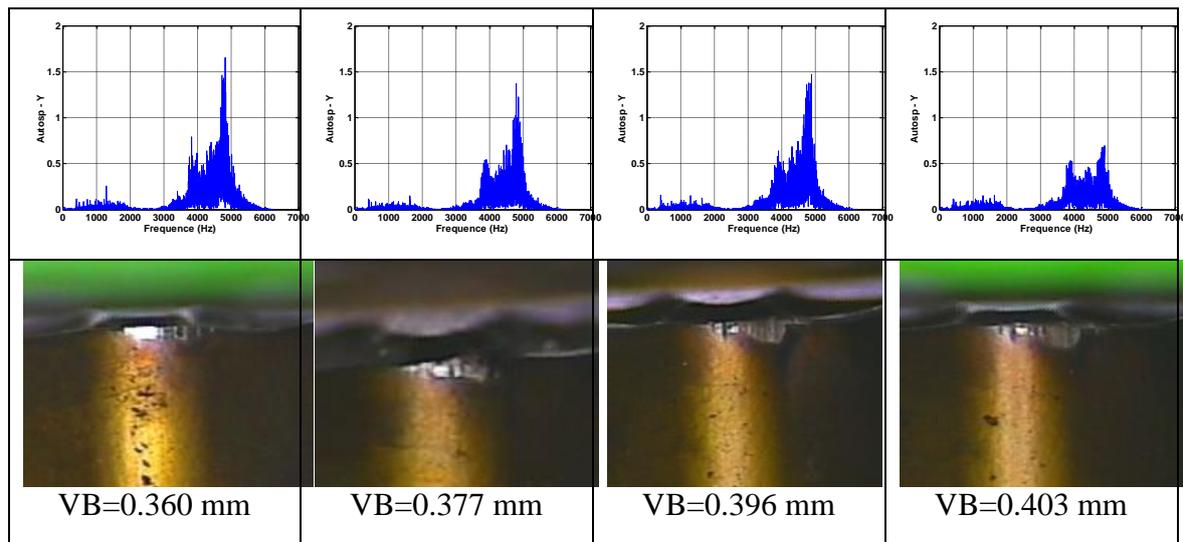


Figure IV.19. Autospectres des signaux mesurés dans la direction radiale pour différents usures en dépouille (VB). $V_c = 120$ m/min.

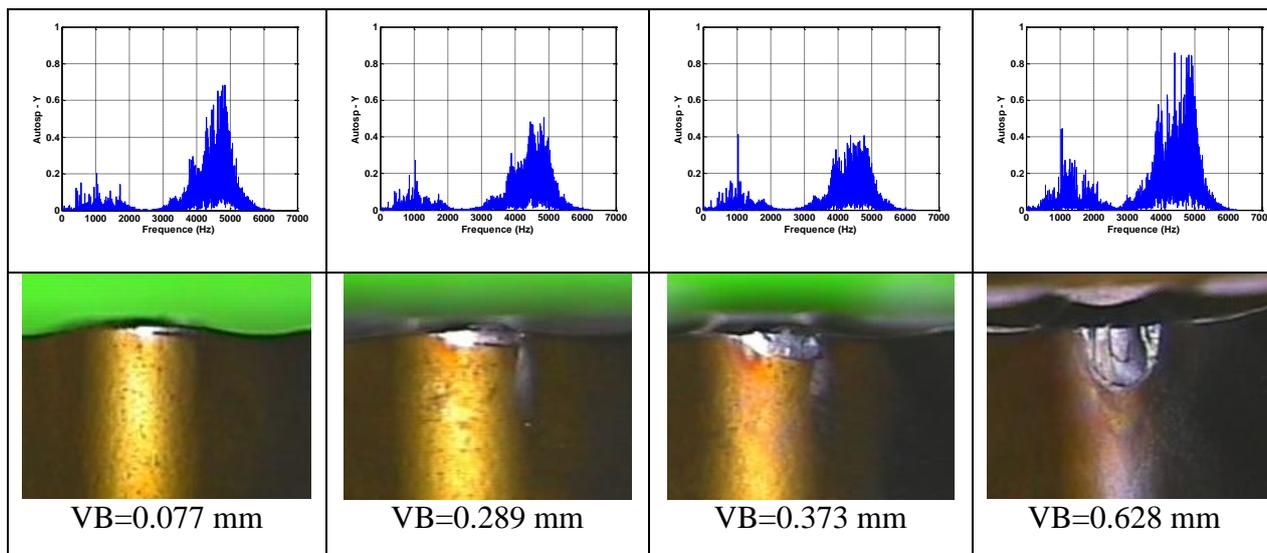


Figure IV.20. Autospectres des signaux mesurés dans la direction radiale pour différents usures en dépouille (VB). $V_c = 175$ m/min.

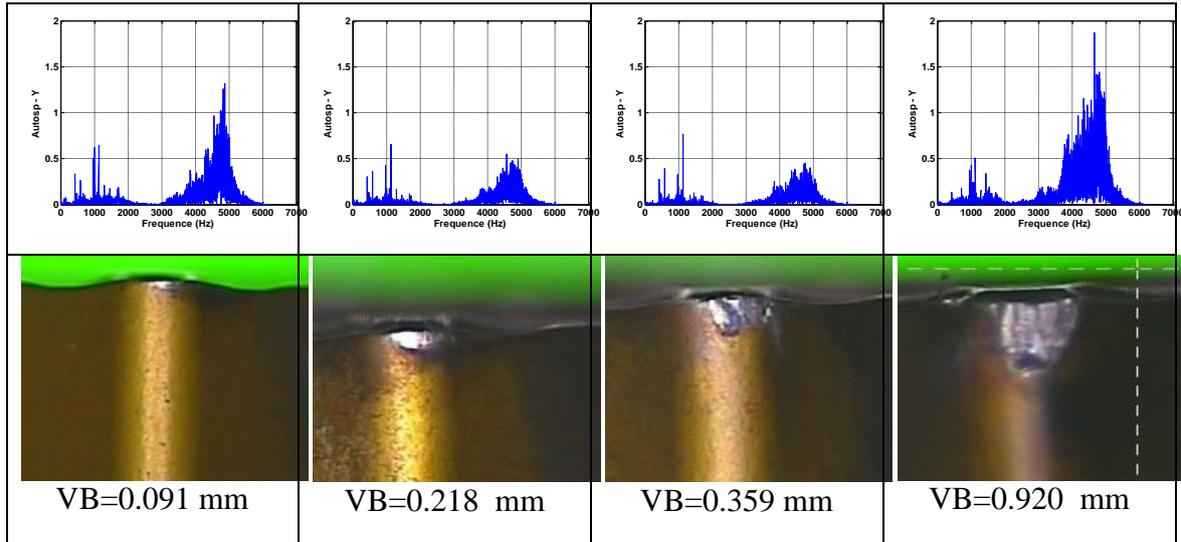


Figure IV.21. Autospectres des signaux mesurés dans la direction radiale pour différents usures en dépouille (VB). $V_c = 250$ m/min.

IV.6.2. Centre de gravité spectrale CGS

Dans l'esprit de faciliter l'application industrielle de la surveillance de l'état de l'outil de coupe, nous proposons l'application d'un nouvel indicateur spectral appelé centre de gravité spectrale qui est calculé à partir des autospectres des accélérations mesurées pour caractériser les trois phases de l'usure.

Le CGS 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.

L'expression du centre de gravité spectral est donnée par l'expression suivante [Kri'94]:

$$CGS = \frac{\sum_{i=1}^N f_i L_i}{\sum_{i=1}^N L_i} \quad (IV-2)$$

Avec : $f_i = i * f_e / 2N$, $1 \leq i \leq 8182$

f_e : Représente la fréquence d'échantillonnage.

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

Dans ce travail, on propose l'utilisation du CGS, calculé à partir de l'autospectre des signaux mesurés autour des fréquences propres les plus dominantes du système d'usinage, pour la surveillance de l'usure des outils de coupe. Comme le CGS dépend principalement du changement des amplitudes des fréquences propres de l'outil de coupe, l'idée est de trouver un rapport entre cet indicateur et l'usure.

La valeur du CGS varie inversement à la gravité du défaut [You'15]. Pour la détection des défauts de roulement, Kenzari [Ken'09] et Younes [You'15] montrent que la valeur des CGS diminue avec l'aggravation du défaut. Ce qui explique les jugements de dissimilitude pour les capteurs de roulement dans le cas d'un défaut simulé et vrai.

Ce critère est valable jusqu'à la fin de la phase de stabilisation. L'apparition de l'usure au stade accéléré conduit à une augmentation de l'énergie vibratoire qui se traduit par une perturbation de la balance spectrale.

Selon les figures IV.22-24, les valeurs de CGS couvrent la bande de fréquence [3700 – 4200 Hz] qui est celle des fréquences propres de l'outil de coupe mentionnées auparavant. La diminution de CGS résulte de l'aspect stable des vibrations produites par l'évolution régulière de l'usure. L'apparition de l'usure au stade accéléré conduit à une augmentation de l'énergie vibratoire qui se traduit par une perturbation de la balance spectrale. Comme la valeur du CGS varie inversement à la gravité du défaut.

Nous présentons, sur la figure IV.22, l'évolution du CGS en fonction du temps de coupe. Pendant la phase de stabilisation de l'usure, le CGS diminue de manière significative et atteint à une valeur minimale de 3729 Hz après de 2640 s de temps de coupe correspondant à une usure en dépouille $VB=0.28$ mm. Dès que l'usure commence à s'aggraver, le CGS change de direction et commence à prendre des valeurs plus grandes. Après un temps de coupe de 2880 s correspondant à $VB=0.292$ mm, le CGS atteint 4152 Hz puis un maximum de 4209 Hz pour redescendre à des valeurs inférieures à la fin des essais.

Le résultat du calcul du CGS présenté dans la figure IV.23 est semblable au résultat précédent. Le changement de direction du CGS à la fin de la phase de stabilisation de l'usure est bel et bien clair.

Le CGS, à la vitesse de coupe à 250 m/min (figure IV.24), fait apparaître clairement les trois phases de l'usure. Il augmente considérablement dès la fin de la phase stable de l'usure pour atteindre la valeur de 4162 Hz après 464 s de temps de coupe correspondant à une usure catastrophique $VB=0.92$ mm.

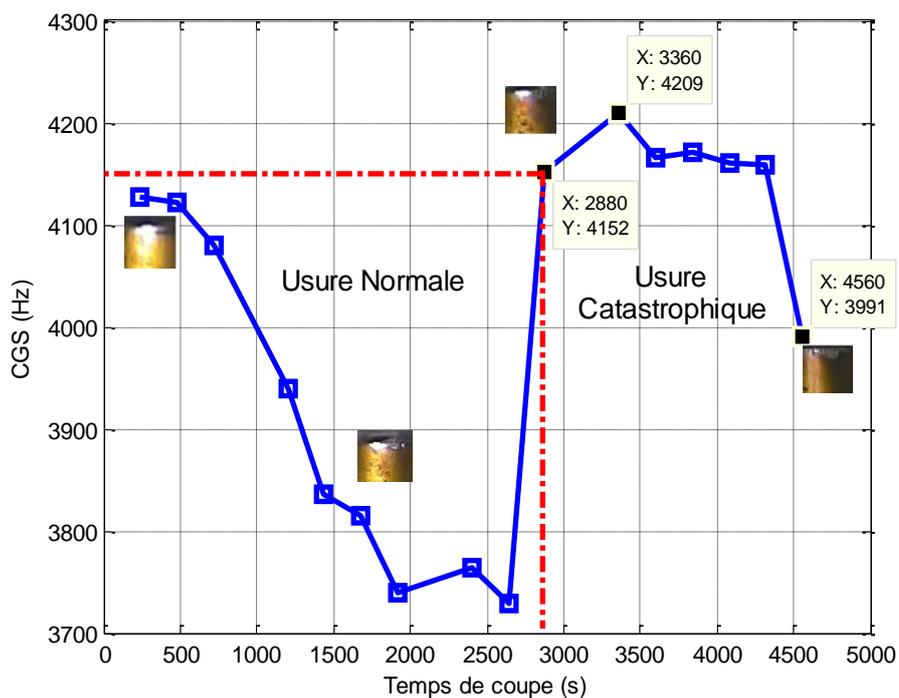


Figure IV.22. CGS de l'autospectre de la figure IV.19 en fonction du temps de coupe pour $V_c = 120$ m/min.

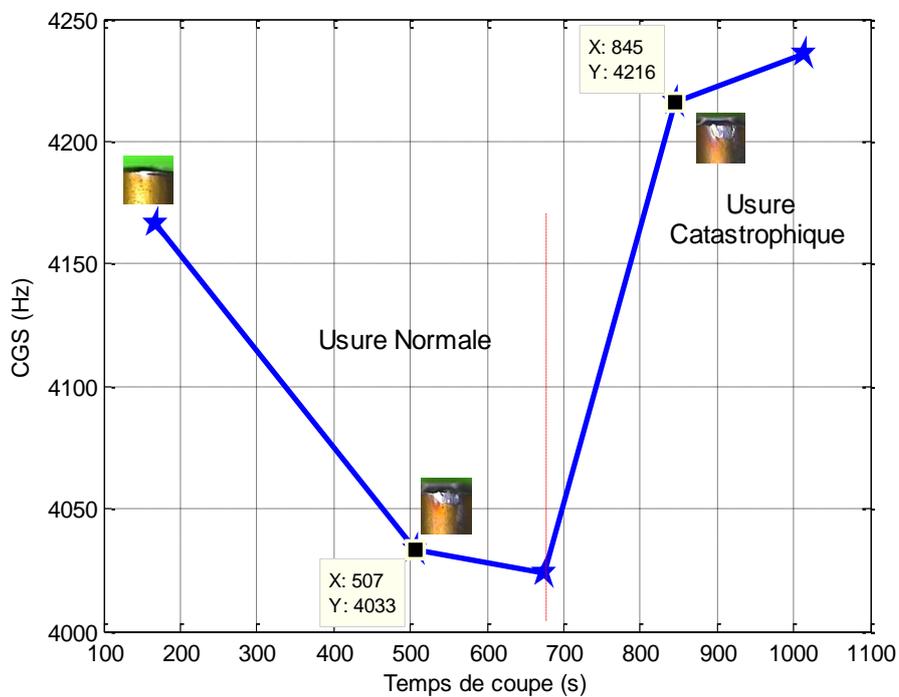


Figure IV.23. CGS de l'autospectre de la figure IV.20 en fonction de temps de coupe pour $V_c = 175$ m/min.

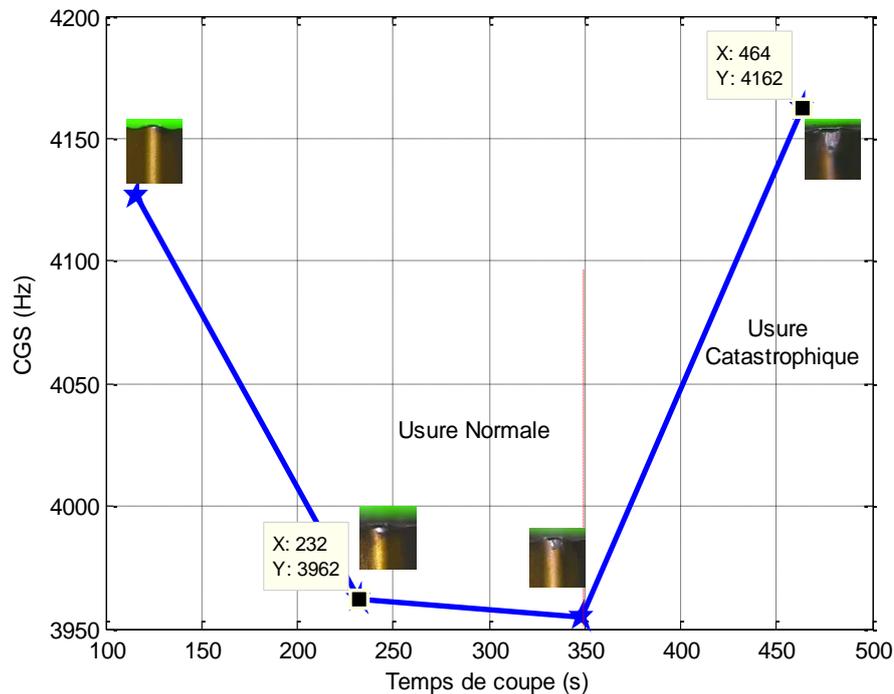


Figure IV.24. CGS de l'autospectre de la figure IV.21 en fonction du temps de coupe pour $V_c = 250$ m/min.

Partant du comportement du CGS qui a montré son pouvoir de prédire la transition de la phase de l'usure normale vers celle correspondant à l'usure catastrophique de l'outil de coupe, cet indicateur peut être intégré dans un système de surveillance industriel pour alerter l'utilisateur de la fin de la durée de vie de l'outil de coupe.

Comme la transition entre les deux phases ne se produit pas dans une durée trop courte, nous proposons comme critère de mise hors service de l'outil, une valeur de CGS juste au dessus de celle du premier CGS calculé quand l'outil de coupe est à l'état neuf. Ce critère n'est valable que pour des vitesses recommandées à l'usinage où l'évolution de l'usure se déroule dans un temps élargi permettant le calcul du CGS dans des intervalles rapprochés. C'est bien le cas de la vitesse 120 m/min où la tenue de l'outil est approximativement de 50 min. Or, pour les deux autres vitesses, les tenues de l'outil sont respectivement 9 min et 5 min. Ces vitesses sont donc non recommandées pour l'usinage de ce matériau avec cette plaquette.

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré au suivi de l'évolution de l'usure de l'outil de coupe par le traitement des signaux mesurés durant le processus de coupe dans différentes conditions de coupe. Plusieurs méthodes ont été utilisées : temporelles, fréquentielles ou temps-fréquence. Nous avons également proposé l'application de certains indicateurs temporels et fréquentiels pour le suivi de l'évolution de l'usure. Ces indicateurs, non conçu à priori pour cet objectif, ont une importance capitale s'ils seront exploités pour développer un système de surveillance en temps réel permettant ainsi d'augmenter la rentabilité de l'usinage.

Les premières conclusions qui peuvent être tirées sont comme suit :

- L'évolution des amplitudes des fréquences propres de l'outil de coupe décrit parfaitement l'état de sa dégradation et la bande contenant ces fréquences est la mieux qualifiée pour surveiller l'usure.
- Le grand apport de niveau global a montré son pouvoir de visualiser la transition vers la phase accélérée de l'usure des outils de coupe autour des fréquences caractéristiques.
- Le centre de gravité spectrale est proposé à l'application comme un deuxième indicateur pour mesurer les changements des amplitudes des fréquences propres de l'outil de coupe qui sont une conséquence de l'évolution de l'usure. L'utilisation du CGS peut être un moyen efficace qui permet de détecter la phase de l'usure accélérée conduisant à l'arrêt de l'usinage au moment approprié.

Enfin, les différents indicateurs proposés semblent être efficaces pour la surveillance vue leur sensibilité à la variation de l'usure. Reste à développer un système de surveillance de l'usure en se servant de la facilité de traitement des signaux vibratoires en temps réel pour prédire la durée de vie optimale des outils de coupe.

Chapitre V

Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

V.1. Introduction

Pendant plusieurs années, la transformée de Fourier a été dominante dans le domaine de l'analyse des signaux en raison de sa simplicité. Cependant, le signal inspecté doit être linéaire et temporellement stationnaire ; autrement dit, le spectre résultant aura un sens peu physique. Or, les signaux analysés en usinage sont souvent non stationnaires et non linéaires. La solution envisageable réside dans l'utilisation des méthodes temps-fréquence très adaptées pour ce type de signaux, parmi elles l'analyse en ondelettes est la plus évidente. En effet, les méthodes temps-fréquence donnent une vue local du signal et permettent une analyse fine des phénomènes transitoires, tandis que l'analyse spectrale donne une vue plutôt globale.

En effet la transformée en ondelettes est devenu un outil mathématique indispensable dans le traitement des signaux dans différents domaines. Les ondelettes forment donc une base solide pour analyser les signaux non-linéaires et non stationnaires. Cependant, beaucoup d'insuffisances ont été rapportées dans leur utilisation. Ces insuffisances peuvent rendre les résultats peu précis et difficiles à interpréter.

Les ondelettes, étant non-adaptatives, ont cependant leur propre inconvénient ; c'est le fait que les résultats de l'analyse dépendent du choix de la fonction de base de l'ondelette elle-même. La Décomposition en Modes Empiriques, ou EMD pour Empirical Mode Decomposition, est une nouvelle méthode pouvant résoudre le problème des limites de l'analyse en ondelettes citées auparavant. La Décomposition en Modes Empiriques (EMD) est donc une nouvelle méthode proposée comme étant le successeur légitime de l'analyse en l'ondelette. L'EMD est une décomposition individuelle et adaptative du signal, n'importe quel signal complexe peut être

décomposé en plusieurs fonctions de mode intrinsèque (IMF pour Intrinsic Mode Function) représentant les modes propres oscillants inclus dans le signal [Lei'13]. Ces fonctions peuvent déterminer toutes les fréquences instantanées du signal non-linéaire ou non stationnaire.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode hybride du traitement des signaux mesurés pendant le processus de coupe composée de l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO) et de l'EMD. L'AMRO est employée en tant que prétraitement pour décomposer le signal en un ensemble de signaux à bandes étroites. L'EMD est ensuite appliquée sur un signal filtré reconstruit à partir de l'AMRO. Le but de ce travail est d'étudier l'usure, d'identifier les transitions de la vie de l'outil de coupe, et enfin de permettre la détection précoce de son passage à la phase de l'usure rapide avant sa rupture totale. En vue de comparer la méthode hybride proposée avec celles déjà existantes, les signaux vibratoires mesurés pendant l'usinage sont traités par l'AMRO et l'EMD seules, puis par la méthode hybride proposée (AMRO/EMD).

V.2. Surveillance de l'usure des outils de coupe en utilisant une méthode hybride AMRO-EMD

Plusieurs chercheurs ont proposé la combinaison de plusieurs méthodes, d'une part pour les comparer, et d'autre part pour amalgamer les sources de l'information. Dans ce contexte, l'analyse multirésolution en ondelettes est d'abord employée comme un prétraitement du signal à analyser afin de le débruiter et d'avoir plusieurs sous-signaux de bandes étroites appelés détails et approximations (comme illustré dans le chapitre IV). La décomposition en modes empiriques est alors appliquée sur le signal filtré obtenu par l'analyse multirésolution en ondelettes (AMRO). L'approche suggérée est le fait que l'application de l'EMD sur un signal précédemment filtré par l'AMRO fournit de meilleurs résultats que son application sur le signal original. L'approche proposée est récapitulée comme montré dans l'organigramme la figure V.1.

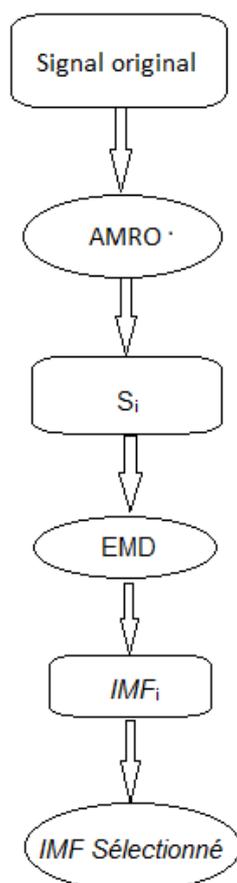


Figure V.1. Organigramme de la méthode hybride AMRO/EMD.

V.2.1. Choix du vecteur optimal obtenu par l'AMRO

En utilisant l'algorithme en cascade, le signal mesuré est décomposé par l'AMRO en plusieurs détails, correspondant aux hautes fréquences, et les approximations correspondant aux plus basses d'entre elles. En effet, les détails sont des signaux d'une bande étroite, la question qui se pose est quel est celui optimal. La figure V.2 représente un signal d'accélération et sa décomposition en utilisant l'AMRO à quatre niveaux. L'ondelette de Daubechies (db5) est utilisée en tant qu'ondelette analysante. En réalité, plusieurs travaux ont montré que cette famille d'ondelettes est mieux adaptée pour de telles analyses.

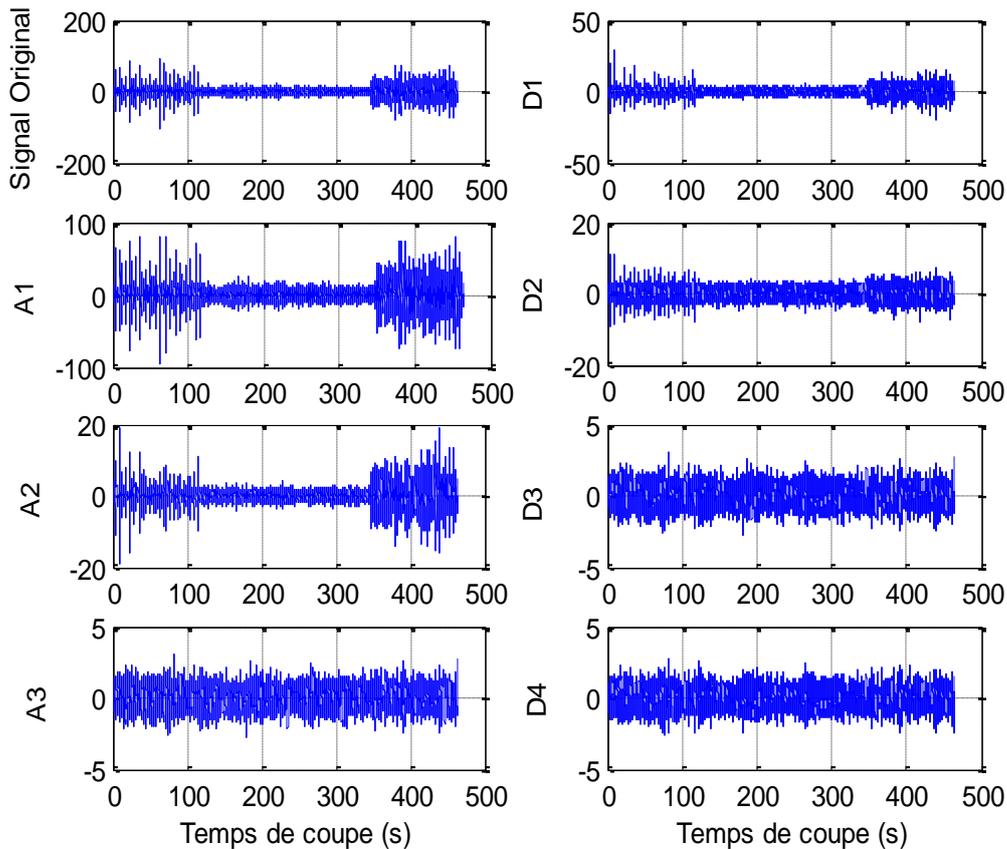


Figure V.2. Signal d'accélération et sa décomposition en utilisant l'AMRO.

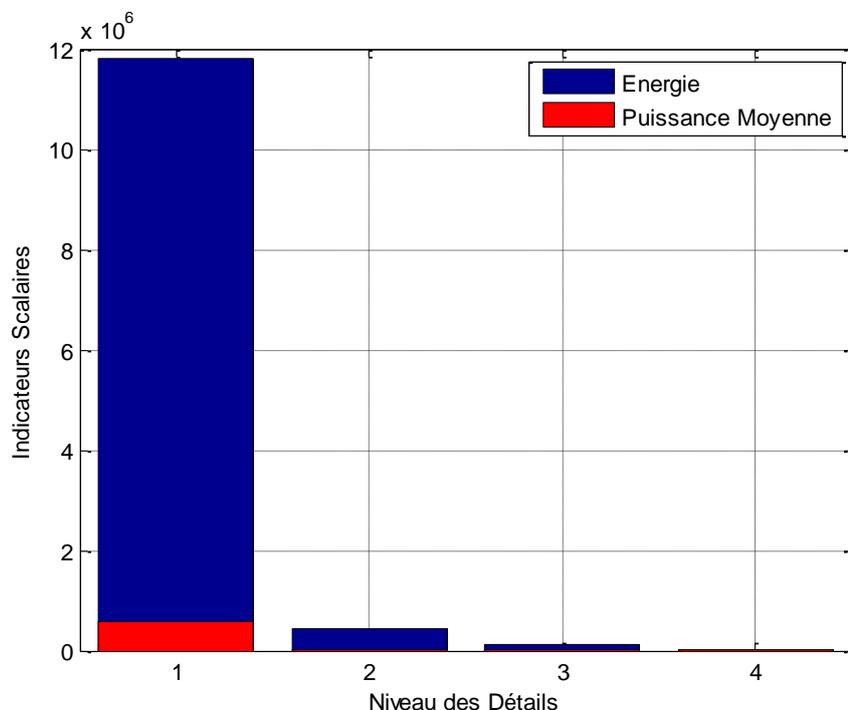
$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$$

La sélection du vecteur optimal de la décomposition dépend de la nature du signal analysé et du but de l'analyse elle-même. Dans le cas de la détection des défauts de roulements et d'engrenages par exemple, le kurtosis semble l'indicateur le plus approprié car ces défauts génèrent des chocs périodiques [Dje'08]. Dans d'autres applications on utilise l'énergie vibratoire, dans d'autres on prend en considération la bande fréquentielle des vecteurs de la décomposition. Dans notre cas, nous proposons d'utiliser deux indicateurs scalaires en tant que critères de sélection du vecteur optimal : la puissance moyenne et l'énergie vibratoire dont les expressions mathématiques ont été présentées au chapitre 2.

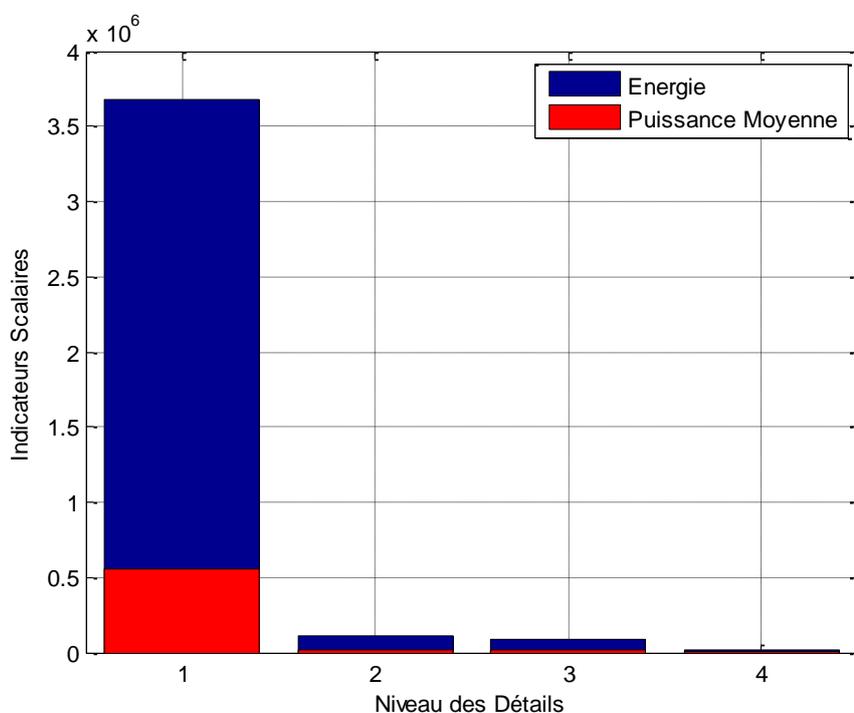
La puissance moyenne et l'énergie de chaque vecteur de la décomposition étant calculées, la figure V.3 montre les résultats obtenus pour les trois vitesses de coupe. Il est facile de noter que les valeurs les plus élevées sont obtenues pour le détail 1 (D1). Cela signifie que l'énergie vibratoire est concentrée dans ce détail. Pour cette raison on

Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

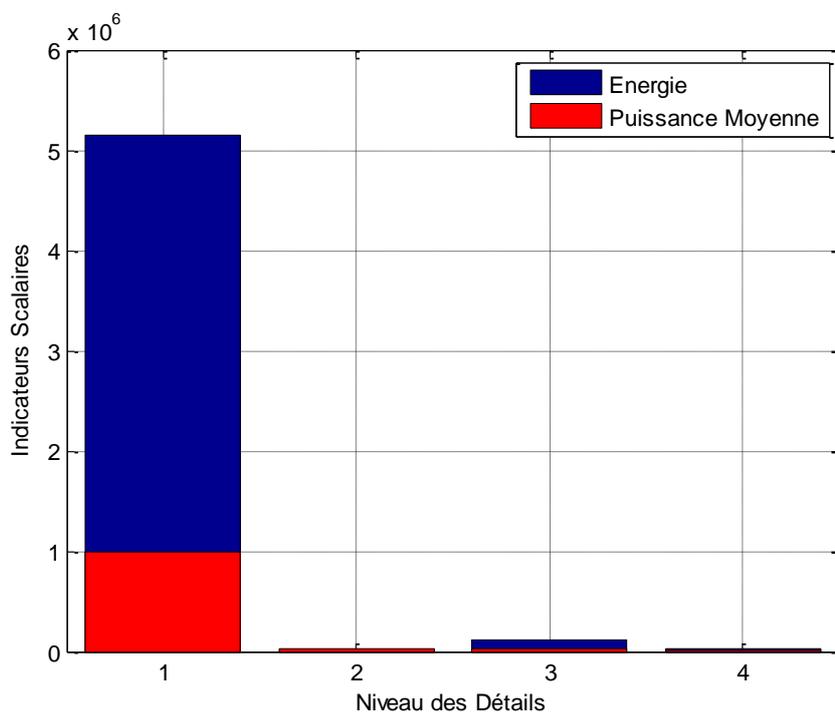
le considérera comme vecteur optimal de la décomposition, appelé signal reconstruit. Les mêmes résultats sont obtenus en utilisant d'autres indicateurs scalaires, comme le RMS et la valeur crête, ce qui confirme le résultat précédent.



$V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.



$V_c = 175$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.



$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$

Figure V.3. Puissance moyenne et énergie de chaque vecteur de décomposition.

D'autre part, la figure V.4 montre le spectre du détail (D1) considéré comme signal reconstruit. Le spectre prouve que sa bande de fréquence couvre le mode propre de l'outil de coupe apparaissant dans la bande [3500-5500] Hz (qui a été précédemment identifié par l'analyse modale). Dans nos investigations précédentes, nous avons montré que la fréquence propre de l'outil de coupe est la composante principale permettant la surveillance de l'usure de l'outil de coupe (le meilleur indicateur fréquentiel) [Bab'14].

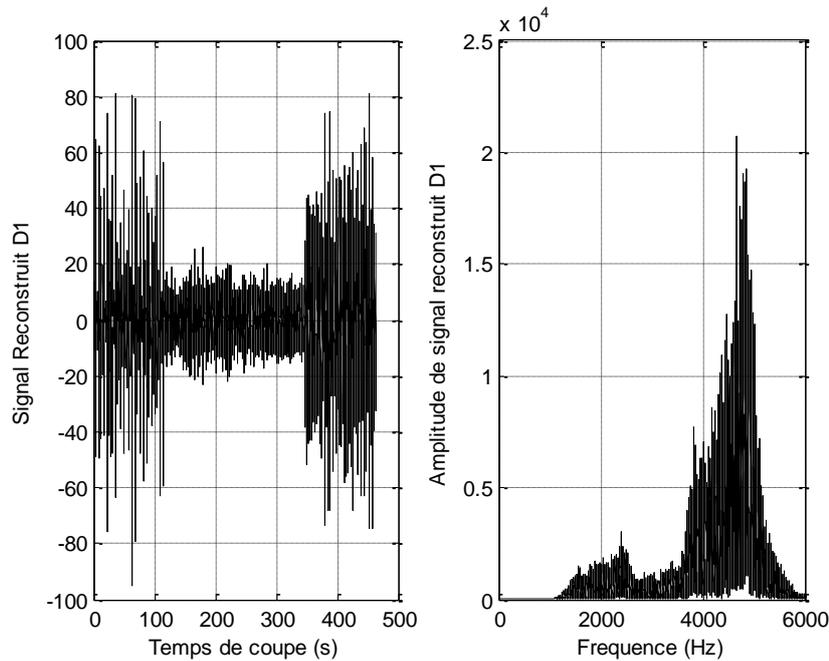


Figure V.4. Signal reconstruit et son spectre.

V.2.2. Choix de l'IMF optimal obtenu par l'EMD

Nous avons montré précédemment que l'EMD décompose le signal en plusieurs fonctions de mode intrinsèque (IMFs). En réalité, plusieurs travaux ont montré que seules les premières IMFs (généralement les trois premières) sont de vraies composantes et ont une bonne corrélation avec le signal, tandis que les autres sont des pseudo-composantes considérées comme composantes basses fréquences et ont par ce fait une faible corrélation avec le signal. Ces IMFs indésirables peuvent être enlevées en appliquant un procédé de sélection, qui maintient que les IMFs essentielles qui sont appropriées au signal inspecté.

Pour confirmer ceci, la même approche appliquée pour le choix optimal du vecteur de la décomposition en ondelette est employée ici. La figure V.5 montre un signal d'accélération et sa décomposition par l'EMD. Quinze IMFs sont obtenues en plus d'un résidu (juste les cinq premières IMFs ainsi que la dernière IMF sont présentées). En plus, la figure V.6 montre les spectres FFT des IMFs de la figure V.5. On confirme que l'IMF1 est la composante qui décrit bien le signal du fait que leurs spectres sont très similaires, donc il y a une bonne corrélation entre les deux, contrairement aux autres IMFs.

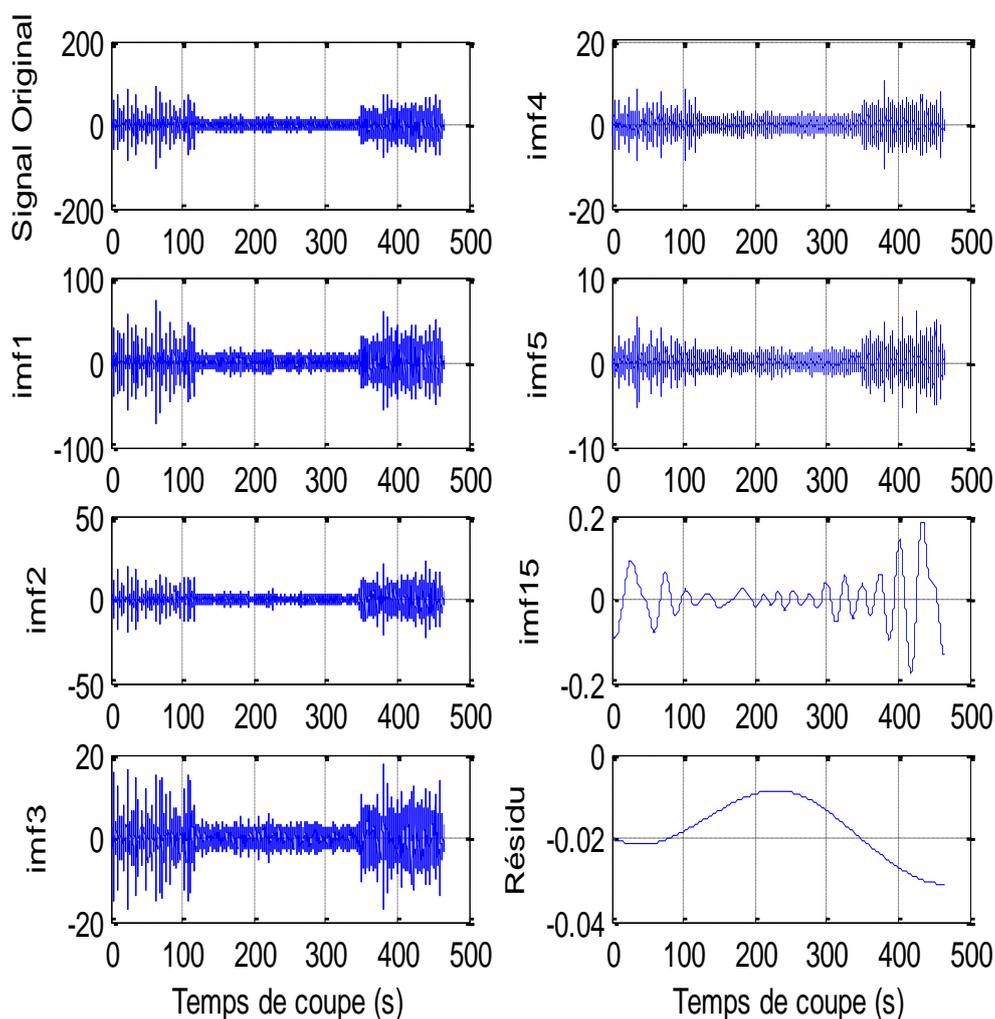


Figure V.5. Signal d'accélération et sa décomposition par la méthode EMD.

$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$$

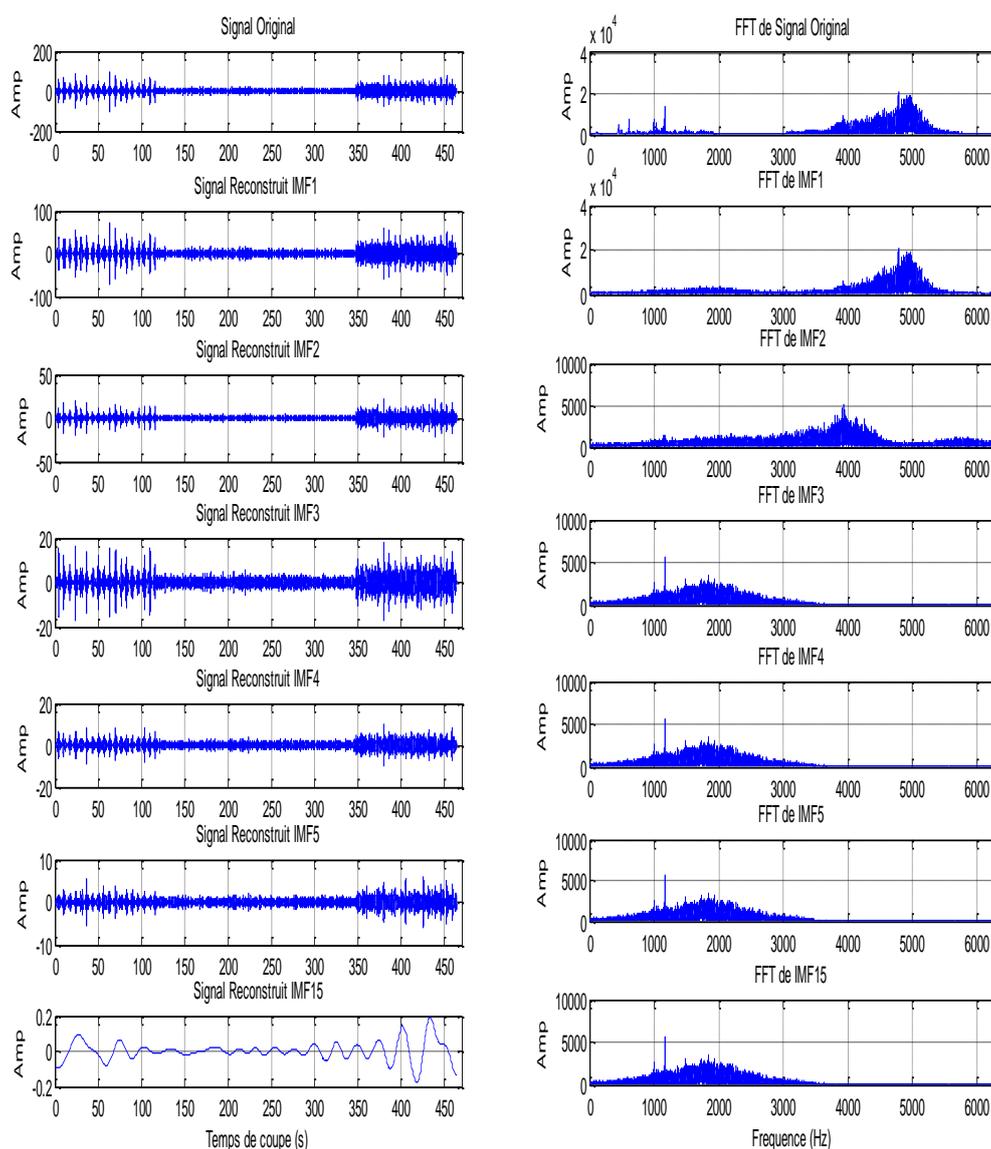
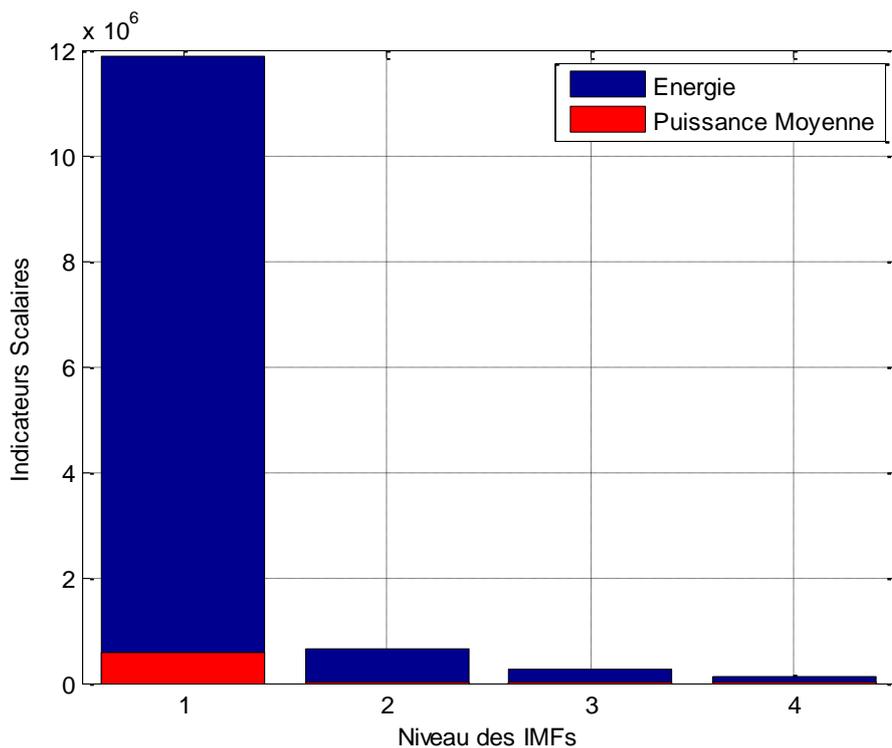


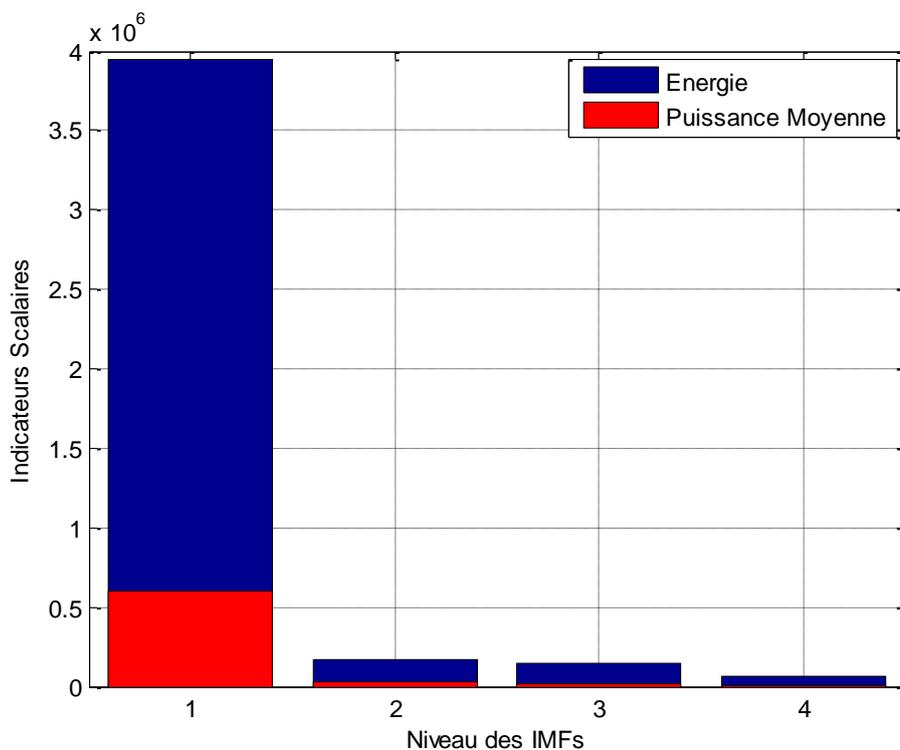
Figure V.6. IMFs et leurs spectres.

$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$$

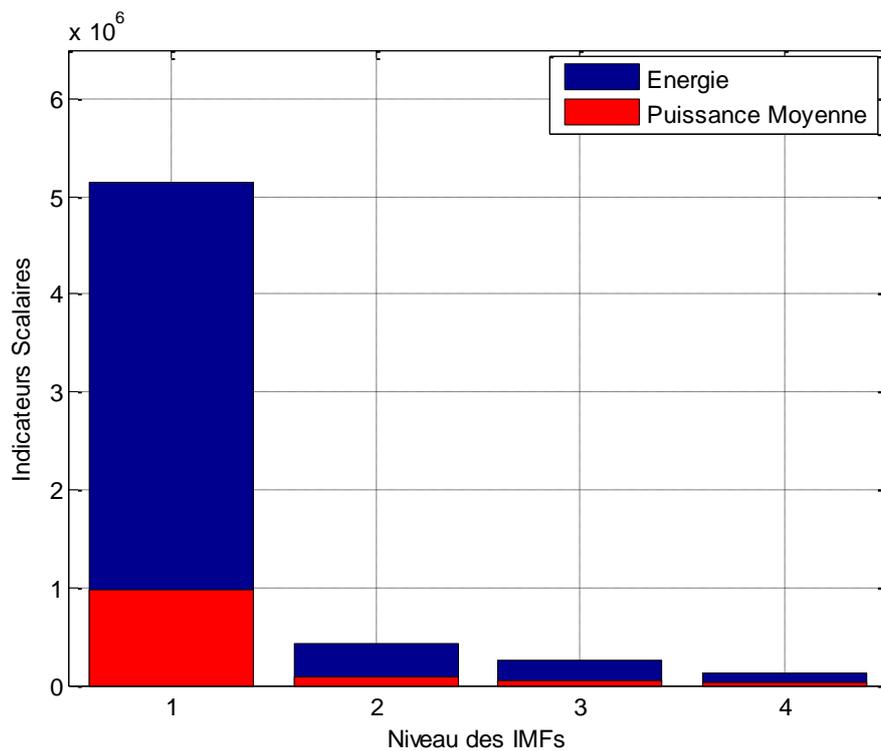
La figure V.7 montre l'énergie et la puissance moyenne calculées pour les quatre premières IMFs. On constate que l'IMF1 a les valeurs les plus élevées pour les trois vitesses de coupe considérées. Pour cette raison, on le considérera en tant qu'IMF optimale. Puisque l'IMF1 est une composante haute fréquence du signal et la plus représentative, son spectre couvre la fréquence propre de l'outil de coupe (figure V.8) précédemment identifiée par l'analyse modale et par le spectre du détail (D1) de l'AMRO.



$V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr



$V_c = 175$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.



$V_c = 250 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr.}$

Figure V.7. Energie et puissance moyenne des quatre premières IMFs.

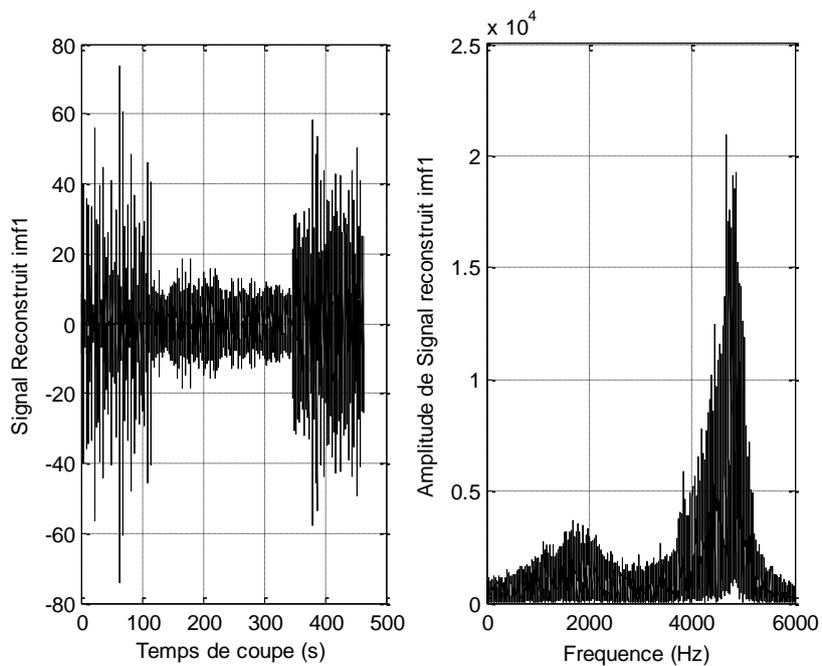
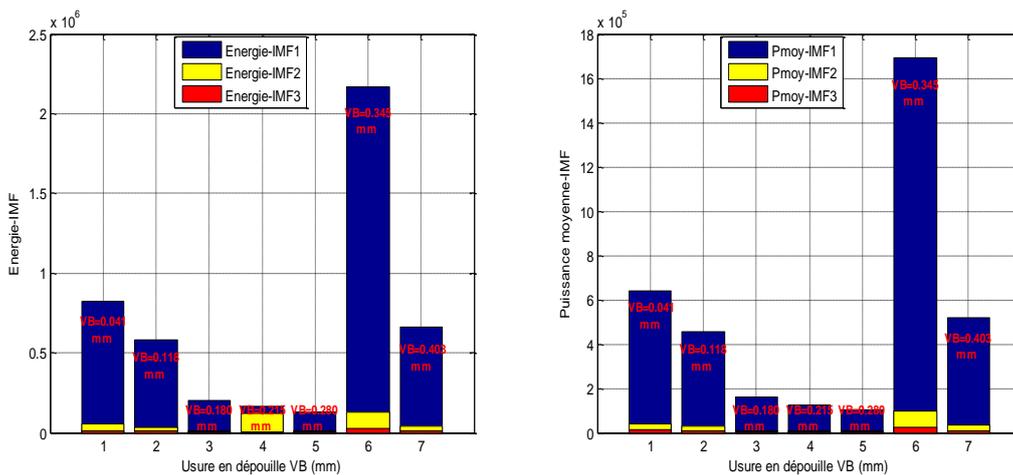


Figure V.8. IMF1 et son spectre.

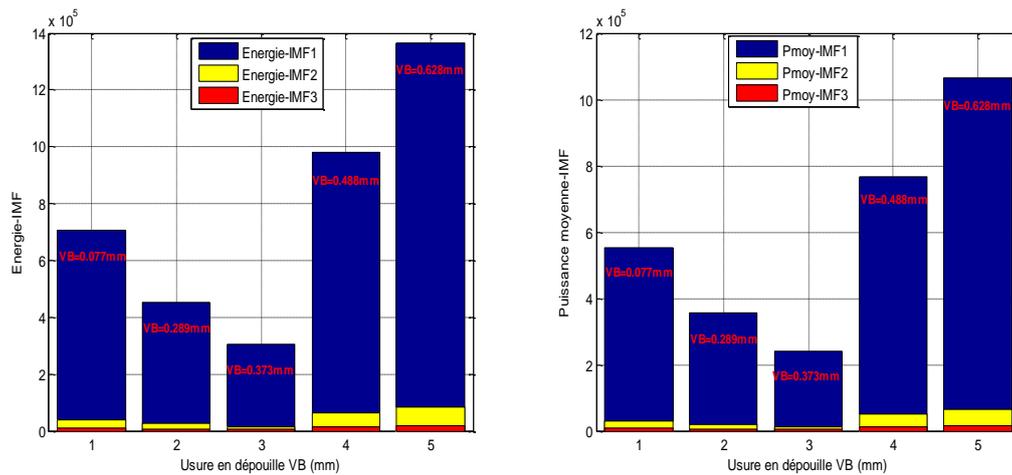
Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

Par ailleurs, il est intéressant de noter que la variation de l'énergie et de la puissance moyenne des IMFs en fonction de l'usure (VB) a exactement la même variation que celle de la théorie, les trois phases de l'usure sont clairement identifiées notamment pour l'IMF1 où on enregistre les plus grandes valeurs pour les trois vitesses de coupe considérées (figure V.9). Avec l'augmentation de la vitesse de coupe à 175 m/min, l'augmentation de l'usure en dépouille (VB) est confirmée. Pendant la phase de l'usure normale, l'énergie et la puissance moyenne de l'IMF1 diminuent de manière significative et atteignent respectivement $3.066E+005$ et $2.395E+005$. Cette phase est suivie d'une usure régulière ($VB_2=0.289$ mm) jusque à 12 minutes d'usinage. Dans la troisième phase, la progression de l'usure est très rapide jusqu'à l'échec de l'outil de coupe correspondant à une usure catastrophique ($VB_5=0.628$ mm) suivie d'une augmentation rapide de l'énergie et de la puissance moyenne de l'IMF1 ($E_1=1.364E+006$ et $P_{moy1}=1.066E+006$).

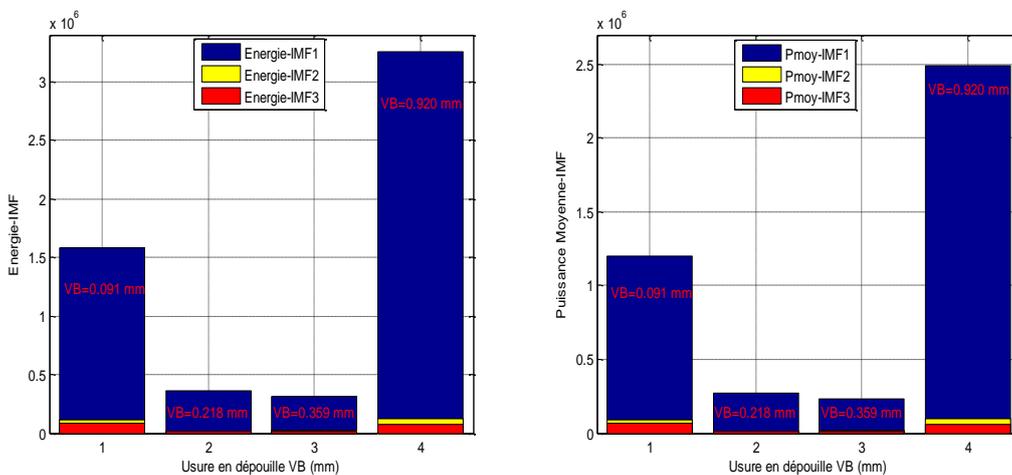
Pour la vitesse de coupe $V_c = 250$ m / min (figure V.9.C), on peut noter que dans la première phase, l'énergie est égale à $1.580E+06$ pour $VB = 0.091$ mm. Dans la deuxième phase de la stabilisation, elle diminue et reste presque constante et égale à $3.59E+05$ pour $VB = 0.359$ mm, avant d'augmenter encore une fois dans la dernière phase correspondant à l'usure accélérée et atteint $3.26E+06$ pour $VB = 0.92$ mm. Les mêmes résultats sont enregistrés pour la puissance moyenne.



(a) $V_c = 120$ m/min, $a_p = 0.2$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.



(b) $V_c = 175 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.



(c) $V_c = 250 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

Figure V.9. Variation de l'énergie et de la puissance moyenne en fonction des IMFs et l'usure en dépouille (VB).

Le tableau V.1 regroupe toutes les valeurs des indicateurs scalaires (énergie et puissance moyenne) pour les trois premières IMFs et pour les trois vitesses de coupe considérées. Le tableau confirme les résultats présentés dans la figure V.9, à savoir que c'est toujours l'IMF1 qui affiche les valeurs les plus importantes, et que la tendance de ces indicateurs pour cette même IMF résume les trois phases de la durée de vie de l'outil de coupe notamment les périodes de transition.

Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

Usure en dépouille VB (mm)	Indicateurs Scalaires					
	Energie			Puissance Moyenne		
	E ₁	E ₂	E ₃	P.Moy ₁	P.Moy ₂	P.Moy ₃
<i>V_c = 120 m/min; f = 0.12 mm/rev; a_p = 0.2 mm</i>						
VB ₁ =0.041	8.209E+005	5.252E+004	1.352E+004	6.413E+005	4.193E+004	1.056E+004
VB ₃ =0.118	5.836E+005	3.397E+004	8.343E+003	4.559E+005	2.654E+004	6.518E+003
VB ₅ =0.180	2.030E+005	1.076E+004	3.425E+003	1.586E+005	8.411E+003	2.676E+003
VB ₇ =0.215	1.609E+005	1.187E+005	2.794E+003	1.257E+005	9.277E+003	2.183E+003
VB ₉ =0.280	1.315E+005	1.186E+004	2.573E+003	1.027E+005	9.270E+003	2.010E+003
VB ₁₂ =0.365	2.166E+006	1.252E+005	2.753E+004	1.692E+006	9.786E+004	2.151E+004
VB ₁₆ =0.403	6.610E+005	4.057E+004	1.169E+004	5.164E+005	3.170E+004	9.138E+003
<i>V_c = 175 m/min; f = 0.12 mm/rev; a_p = 0.2 mm</i>						
VB ₁ =0.077	7.062E+005	3.721E+004	9.837E+003	5.517E+005	2.907E+004	7.685E+003
VB ₂ =0.289	4.537E+005	2.518E+004	5.799E+003	3.544E+005	1.967E+004	4.531E+003
VB ₃ =0.373	3.066E+005	1.514E+004	5.145E+003	2.395E+005	1.183E+004	4.019E+003
VB ₄ =0.488	9.807E+005	6.448E+004	1.576E+004	7.662E+005	5.037E+004	1.231E+004
VB ₅ =0.628	1.364E+006	8.218E+004	2.016E+004	1.066E+006	6.420E+004	1.575E+004
<i>V_c = 250 m/min; f = 0.12 mm/rev; a_p = 0.2 mm</i>						
VB ₁ =0.091	1.582E+006	1.188E+005	8.627E+004	1.208E+006	8.987E+004	6.577E+004
VB ₂ =0.218	3.594E+005	1.846E+004	1.916E+004	2.746E+005	1.403E+004	1.469E+004
VB ₃ =0.359	3.096E+005	2.134E+004	1.704E+004	2.365E+005	1.631E+004	1.302E+004
VB ₄ =0.920	3.268E+006	1.273E+005	7.748E+004	2.492E+006	9.715E+004	5.901E+004

Tableau V.1. Indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille (VB) pour les trois premières IMF.

V.2.3. Comparaison des résultats obtenus par l'approche hybride avec ceux obtenus par l'AMRO et l'EMD seules

Le but de cette section est de prouver l'efficacité de l'approche hybride proposée en comparant ses résultats avec ceux obtenus par l'AMRO ou l'EMD seules. A cet effet les tableaux V.2-4 représentent l'énergie et la puissance moyenne calculées pendant toute la durée de vie de l'outil de coupe pour une vitesse de coupe de 120 m/min, 175 m/min et de 250 m/min, respectivement. Ces indicateurs sont calculés pour le signal

Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

original, les signaux reconstruits de l'AMRO et de l'EMD, et de la méthode hybride proposée AMRO/EMD.

Pour la vitesse de coupe 120 m/min et 175 m/min (tableau V.2-3), l'AMRO et l'EMD donnent presque les mêmes résultats et qui demeurent non significatifs puisque les indicateurs scalaires n'ont pas été améliorés comparés à ceux du signal original. La méthode hybride proposée, quant à elle, permet une faible amélioration des indicateurs scalaires comparés à ceux du signal original et à ceux obtenus à partir de l'AMRO et de l'EMD seules.

Pour la vitesse de coupe 250 m/min (tableau V.4), les indicateurs scalaires ont été améliorés en utilisant l'AMRO et l'EMD, mais d'une manière significative en utilisant la méthode hybride proposée qui donne les résultats les plus élevés. On peut noter donc que l'application de la méthode proposée pour des vitesses de coupe élevées donne de meilleurs résultats.

Durée de vie (s)	Indicateurs scalaires							
	Signal original		AMRO		EMD		Système Hybride	
	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy
17.81	1.333E+7	6.507E+5	1.278E+7	6.241E+5	1.314E+7	6.416E+5	1.356E+7	6.623E+5
124.7	1.441E+7	7.037E+5	1.393E+7	6.803E+5	1.432E+7	6.994E+5	1.460E+7	7.127E+5
552.2	9.990E+6	4.881E+5	9.505E+6	4.641E+5	9.682E+6	4.728E+5	1.009E+7	4.929E+5
765.9	1.022E+7	4.990E+5	9.768E+6	4.770E+5	9.948E+6	4.857E+5	1.036E+7	5.059E+5
1051.0	7.893E+6	3.854E+5	7.292E+6	3.561E+5	7.258E+6	3.544E+5	7.920E+6	3.867E+5
1247.0	4.021E+6	1.963E+5	3.658E+6	1.786E+5	3.609E+6	1.762E+5	4.038E+6	1.972E+5
1639.0	4.777E+6	2.332E+5	4.258E+6	2.079E+5	4.123E+6	2.013E+5	4.769E+6	2.334E+5
2868.0	3.951E+7	1.929E+6	3.842E+7	1.876E+6	3.940E+7	1.924E+6	4.000E+7	1.953E+6
2939.0	4.456E+7	2.176E+6	4.356E+7	2.127E+6	4.522E+7	2.208E+6	4.544E+7	2.219E+6
2993.0	3.111E+7	1.519E+6	3.006E+7	1.468E+6	3.107E+7	1.517E+6	3.173E+7	1.549E+6
3064.0	2.894E+7	1.413E+6	2.817E+7	1.376E+6	2.921E+7	1.426E+6	2.944E+7	1.438E+6
3473.0	2.766E+7	1.351E+6	2.697E+7	1.317E+6	2.772E+7	1.353E+6	2.776E+7	1.355E+6
3616.0	2.455E+7	1.199E+6	2.387E+7	1.165E+6	2.457E+7	1.200E+6	2.480E+7	1.211E+6
3705.0	3.131E+7	1.529E+6	3.040E+7	1.484E+6	3.137E+7	1.532E+6	3.176E+7	1.551E+6
4275.0	1.150E+7	5.617E+5	1.086E+7	5.286E+5	1.093E+7	5.336E+5	1.152E+7	5.627E+5

Tableau V.2. Indicateurs scalaires pour Vc = 120 m/min.

Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

Durée de vie (s)	Indicateurs scalaires							
	Signal original		AMRO		EMD		Système Hybride	
	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy
12.68	3.945E+6	6.164E+5	3.787E+6	5.917E+5	3.947E+6	6.168E+5	4.131E+6	6.455E+5
38.03	3.671E+6	5.736E+5	3.548E+6	5.543E+5	3.676E+6	5.744E+5	3.809E+6	5.951E+5
76.06	4.046E+6	6.323E+5	3.905E+6	6.102E+5	3.999E+6	6.248E+5	4.174E+6	6.521E+5
126.8	3.961E+6	6.189E+5	3.829E+6	5.983E+5	3.974E+6	6.209E+5	4.140E+6	6.469E+5
177.5	3.214E+6	5.022E+5	3.075E+6	4.804E+5	3.186E+6	4.979E+5	3.326E+6	5.198E+5
215.5	2.789E+6	4.359E+5	2.634E+6	4.116E+5	2.701E+6	4.220E+5	2.850E+6	4.453E+5
316.9	2.608E+6	4.075E+5	2.450E+6	3.828E+5	2.553E+6	3.989E+5	2.668E+6	4.168E+5
393.0	2.449E+6	3.827E+5	2.323E+6	3.544E+5	2.376E+6	3.713E+5	2.495E+6	3.899E+5
532.4	1.964E+6	3.069E+5	1.822E+6	2.847E+5	1.857E+6	2.902E+5	1.965E+6	3.070E+5
608.4	4.764E+6	7.444E+5	4.595E+6	7.179E+5	4.765E+6	7.445E+5	4.934E+6	7.710E+5
659.2	6.797E+6	1.062E+6	6.597E+6	1.031E+6	6.914E+6	1.080E+6	7.111E+6	1.111E+6
722.5	7.163E+6	1.119E+6	6.930E+6	1.083E+6	7.174E+6	1.121E+6	7.459E+6	1.166E+6
773.2	2.337E+6	3.651E+5	2.206E+6	3.446E+5	2.284E+6	3.569E+5	2.366E+6	3.697E+5
874.6	6.105E+6	9.539E+5	5.777E+6	9.027E+5	5.874E+6	9.179E+6	6.239E+6	9.749E+5
887.3	6.394E+6	9.990E+5	6.033E+6	9.427E+5	6.148E+6	9.606E+5	6.479E+6	1.012E+6

Tableau V.3. Indicateurs scalaires pour Vc = 175 m/min.

Durée de vie (s)	Indicateurs scalaires							
	Signal original		AMRO		EMD		Système Hybride	
	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy	Energie	P.Moy
7.260	8.990E+4	1.715E+4	6.643E+6	1.267E+6	6.840E+6	1.305E+6	6.971E+6	1.330E+6
21.78	1.331E+4	2.538E+4	1.211E+7	2.309E+6	1.214E+7	2.316E+6	1.246E+7	2.377E+6
43.56	8.396E+4	1.601E+4	6.889E+6	1.314E+6	7.183E+6	1.370E+6	7.156E+6	1.365E+6
65.34	1.077E+6	2.054E+4	8.921E+6	1.702E+6	8.944E+6	1.706E+6	9.280E+6	1.770E+6
108.9	1.025E+5	1.955E+4	9.761E+6	1.862E+6	9.925E+6	1.893E+6	1.014E+7	1.935E+6
152.5	4.807E+4	9169	1.357E+6	2.589E+5	1.367E+6	2.607E+5	1.491E+6	2.844E+6
210.5	3.605E+4	6875	1.824E+6	3.479E+5	1.866E+6	3.559E+5	1.965E+6	3.749E+5
261.4	4.104E+4	7828	1.437E+6	2.740E+5	1.462E+6	2.789E+5	1.571E+6	2.996E+5
312.2	3.907E+4	7451	1.305E+6	2.488E+5	1.346E+6	2.567E+5	1.438E+6	2.743E+5
334.0	3.889E+4	7418	1.134E+6	2.163E+5	1.137E+6	2.169E+5	1.260E+6	2.404E+5
348.5	6.170E+5	1.177E+5	1.090E+7	2.078E+6	1.004E+7	1.914E+6	1.149E+7	2.191E+6
377.5	7.989E+5	1.524E+5	1.522E+7	2.902E+6	1.468E+7	2.799E+6	1.588E+7	3.029E+6
406.6	6.027E+5	1.149E+5	1.337E+7	2.551E+6	1.333E+7	2.543E+6	1.377E+7	2.626E+6
421.1	1.135E+6	2.165E+5	1.414E+7	2.696E+6	1.424E+7	2.716E+6	1.482E+7	2.826E+6
450.1	7.608E+5	1.451E+5	1.315E+7	2.507E+6	1.310E+7	2.498E+6	1.380E+7	2.633E+6

Tableau V.4. Indicateurs scalaires pour Vc = 250 m/min.

Chapitre V : Surveillance de l'évolution de l'usure de l'outil en utilisant une méthode hybride basée sur l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes et la Décomposition en Modes Empiriques

D'autre part, la figure V.10 montre l'évolution des indicateurs scalaires (énergie et puissance moyenne) du signal original et du signal reconstruit obtenus à partir de la méthode hybride proposée et ceci durant toute la durée de vie de l'outil de coupe. En plus de l'amélioration des valeurs des indicateurs scalaires assurée par la méthode hybride, les trois périodes de l'usure sont clairement montrées. Il est très facile de localiser la période de rodage jusqu'à 120 s d'usinage, la période de stabilisation de l'usure de 120 s à 340 s, et finalement la zone d'accélération de l'usure à partir de 340 s. Pour le signal original, la variation des mêmes indicateurs scalaires ne permet pas de localiser clairement les trois zones, particulièrement la transition de la zone de rodage à la stabilisation de l'usure qui semble être la même zone.

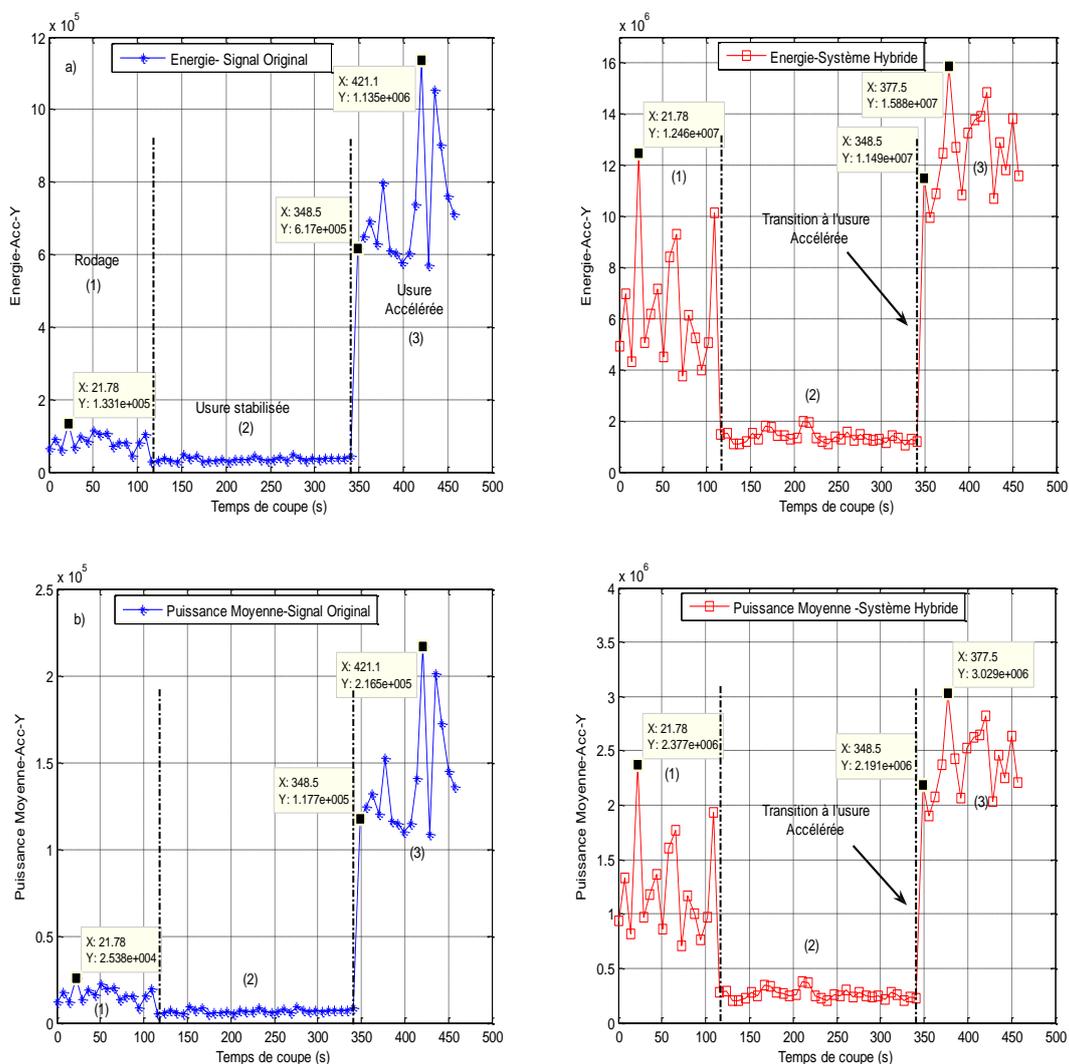


Figure V. 10. Evolution des indicateurs scalaires (énergie et puissance moyenne) du signal original et du signal reconstruit obtenus à partir de la méthode hybride proposée $V_c = 250 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$. a) Energie b) Puissance moyenne.

V.3. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la proposition d'une méthode hybride pour l'analyse des signaux mesurés durant le processus de coupe basée sur la combinaison de l'analyse multirésolution en ondelettes et la décomposition en mode empirique.

En utilisant l'énergie et la puissance moyenne, les deux composants de la méthode proposée, à savoir l'AMRO et l'EMD sont optimisés. Un choix optimal du vecteur de la décomposition de l'AMRO et du meilleur IMF résultant de l'EMD, a été fait. Les résultats prouvent que l'application de la méthode proposée améliorent d'une manière significative la sensibilité des indicateurs scalaires utilisés comparés à ceux du signal original et ceux obtenus à partir de l'AMRO et l'EMD seules. En plus, la variation des indicateurs scalaires des signaux obtenus à partir de la méthode proposée permettent de localiser clairement les trois phases de l'usure. Ces phases n'étaient pas évidentes à détecter dans le signal original.

Le temps de calcul de l'approche hybride AMRO/EMD dépend bien évidemment de la taille des signaux traités (nombre de points), mais ne requiert que quelques secondes comme pour le calcul d'une simple FFT ou d'un indicateur temporel. La mise en place de cette démarche dans un système on-line va nécessiter sûrement des moyens de calcul plus performants qu'un simple ordinateur de bureau ce qui rendra l'approche proposée encore plus pratique et rapide.

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail, l'application de plusieurs techniques de traitement des signaux des vibrations induites pendant l'opération de tournage de l'acier AISI D3, nous a permis de développer un système de surveillance efficace de l'usure de l'outil de coupe. La stratégie adoptée s'appuie principalement sur le contrôle direct de la plaquette en mesurant la largeur de l'usure en dépouille et l'état de surface de la pièce usinée, ainsi que l'acquisition et le traitement des signaux vibratoires générés lors de l'usinage et relevés selon les trois directions. L'objectif étant de déterminer des indicateurs de l'usure susceptibles de traduire l'état de l'outil de coupe durant sa vie : fréquences caractéristiques, niveau vibratoire, élargissement spectrale...etc.

L'évaluation de l'usure a été faite à partir du traitement et l'analyse des signaux par le biais de plusieurs méthodes, à savoir temporelles, fréquentielles ou temps-fréquence à l'image de l'Analyse Multi-Résolution en ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD). Les résultats expérimentaux sont très prometteurs en vue d'instaurer un système de surveillance en ligne de l'état des outils de coupe en milieu industriel.

Comme conclusions principales de nos investigations il est possible d'affirmer que:

- L'abrasion et l'écaillage, observés pendant l'usinage, sont les principaux mécanismes de l'usure en dépouille de l'outil de coupe.
- L'évolution des amplitudes vibratoires des fréquences propres de l'outil de coupe en fonction de sa dégradation a prouvé que la bande contenant ces fréquences [3500 ÷ 5500] Hz est la mieux qualifiée pour suivre son état et par conséquent identifier l'usure.
- Les indicateurs temporels et fréquentiels ont été utilisés pour le suivi de l'évolution de l'usure de l'outil de coupe. Ces indicateurs, mis à part leur simplicité, pourraient avoir une importance capitale s'ils seront exploités pour développer un système de surveillance en temps réel permettant ainsi d'augmenter la rentabilité de l'usinage.

- Le niveau global (NG), étant un indicateur fréquentiel, a prouvé son pouvoir de prédiction du point de transition de la phase de l'usure normale vers celle accélérée correspondant à l'usure catastrophique de l'outil de coupe.
- L'indicateur spectral « Centre de Gravité Spectrale » (CGS), calculé à partir des autospectres d'accélération, a montré également son efficacité dans le cadre d'un système de surveillance capable de fournir le moment de la transition à l'usure accélérée.
- Les signaux vibratoires mesurés durant le processus d'usinage sont dans la majorité des cas non stationnaires. Cette propriété a motivé le choix d'utiliser des méthodes temps-fréquence adaptées à ce type de signaux. Nous avons par ce fait choisi d'utiliser l'Analyse Multi-Résolution en ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD). Ces deux méthodes ont donné de bons résultats notamment en ce qui concerne l'amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires temporels.
- Une méthode hybride basée sur la combinaison de l'Analyse Multi-Résolution en Ondelettes (AMRO) et la Décomposition en Modes Empiriques (EMD) a été proposée en tant qu'outil robuste de filtrage, débruitage et de traitement des signaux mesurés. Destinée à la détection des transitions entre les trois phases de vie de l'outil de coupe, elle a donné de meilleurs résultats comparés à l'application de l'une ou l'autre des méthodes mentionnées seule.
- Enfin nous pouvons dire que les résultats présentés dans cette thèse sont issus de test off-line. C'est-à-dire après traitement des signaux recueillis pendant l'usinage. Cette démarche permet de tester et de vérifier la validité de l'approche proposée. Cette approche, une fois validée sur des tests off-line, pourrait être intégrée dans un système de surveillance on-line de l'usure des outils de coupe. C'est en quelque sorte l'exploitation d'un feedback issu de tests off-line pour la mise en place d'un système on-line.

Comme perspectives de cette étude nous envisageons de :

- Poursuivre le travail pour d'autres couples outils/matières et diverses opérations de tournage sous différentes conditions de coupe afin d'étudier l'influence des sources vibratoires générées en usinage.
- Améliorer les programmes utilisés de l'EMD avec la transformée de Hilbert – Huang (HHT) et son application dans l'analyse des signaux vibratoires.
- Intégration des réseaux de neurones dans nos travaux en vue de l'automatisation de la détection de l'usure de l'outil.
- Développer une méthode hybride (Neuro-ACP) de classification des différentes formes de l'usure de l'outil de coupe en usinage basé sur l'analyse en composante principale (ACP).
- Le couplage entre la thermomécanique du processus de coupe (thermographies) et le comportement vibratoire du système.
- Travailler sur la modélisation du système d'usinage et les aspects géométriques du contact matière-outil.

Références bibliographiques

- [Ant'06]** Antić A., Hodolic J., Sokovič M., Development of an intelligent system for tool wear monitoring applying neural networks. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol.14, N°1-2, pp.146-151 (2006).
- [Aye'10]** Ayenu-Prah A., Attoh-Okine N., A criterion for selecting relevant intrinsic mode functions in empirical mode decomposition, *Journal on Advances in Adaptive Data Analysis*, Vol.2, N°1, pp.1-24 (2010).
- [Bab'12]** Babouri M. K., Ouelaa N., Djebala A., Identification de l'évolution de l'usure d'un outil de tournage basée sur l'analyse des efforts de coupe et des vibrations. *Revue Synthèse*, N°24, pp.123-134 (2012).
- [Bab'14]** Babouri M. K., Ouelaa N., Djebala A., Temporal and frequential analysis of the tools wear evolution. *Mechanika*, Vol.20, N°2, pp.205-212 (2014).
- [Bar'99]** Barlier C., Poulet B., *Memothec: Génie Mécanique*, 2^{ème} édition, Casteilla (1999).
- [Bou'07]** Bourdim A., Bourdim M., Metalsi T.F., Hamou S., La vitesse de coupe et son influence sur le broutement. CPI'2007 5^{ème} Conférence Internationale. Conception et Production Intégrées, Rabat, Maroc, 22-24 octobre 2007.
- [Bou'11]** Bouacha K., Comportement du couple outil-matière lors de l'usinage des matériaux durs. Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 - Guelma, Algérie, (2011).
- [Cex'05]** Cexus J.C., Analyse des signaux non-stationnaires par Transformation de Huang, Opérateur de Teager-Kaiser, et Transformation de Huang-Teager (THT). Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, (2005).
- [Che'06]** Cheng J., Yu D., Yang Y., Research on the Intrinsic Mode Function (IMF) Criterion in EMD Method. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.20, pp.817-824 (2006).
- [Cro'08]** Crolet A., Contribution a l'étude de l'influence du comportement vibratoire du système 'pièce - outil - machine' sur la qualité de surface obtenue en tournage de superfinition. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (2008).
- [Dim'00]** Dimla Sr D.E., Lister P.M., On-line metal cutting tool condition monitoring. I: Force and vibration analyses. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.40, pp.739-768 (2000).

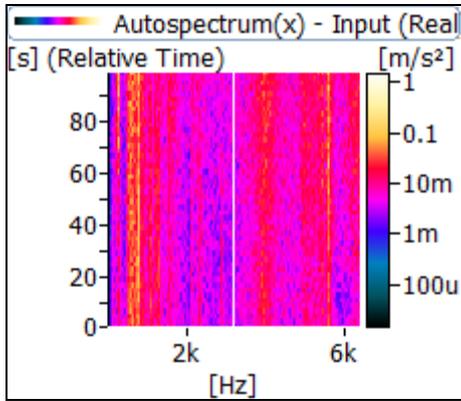
- [Dim'04]** Dimla Sr D.E., The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.155-156, pp.1708-1715 (2004).
- [Dim'98]** Dimla Sr D. E., Multivariate tool condition monitoring in a metal cutting operation using neural networks. PhD Thesis, School of Engineering and Built Environment, University of Wolverhampton, UK, (1998).
- [Dje'08]** Djebala A., Ouelaa N., Hamzaoui N., Detection of rolling bearing defects using discrete wavelet analysis. *Meccanica*, Vol.43, pp.339-348 (2008).
- [Dje'12]** Djebala A., Ouelaa N., Benchaabane C. et Laefer D.F., Application of the wavelet multiresolution analysis and Hilbert transform for the prediction of gear tooth defects. *Meccanica*, Vol.47, pp.1601-1612 (2012).
- [Du'07]** Du Q., Yang S., Application of the EMD method in the vibration analysis of ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.21, pp.2634-2644 (2007).
- [Eng'99]** Engin S.N., Gülez K., A wavelet transform artificial neural networks (WT-ANN) based rotating machinery fault diagnostics methodology. *Nonlinear Signal and Image Processing, NSIP*, pp.714-720 (1999).
- [Enr'09]** Enrique A., Rocio A., Joaquin B., Jonatan R., Use of contour signatures and classification methods to optimize the tool life in metal machining. *Estonian Journal of Engineering*, Vol.15, N°1, pp.3-12 (2009).
- [Fla'04]** Flandrin P., Rilling G., Gonçalves P., Empirical mode decomposition as a filter bank. *IEEE Signal Processing Letter*, Vol.11, N°2, PP.112-114 (2004).
- [Gao'08]** Gao Q., Duan C., Fan H., Meng Q., Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.22, pp.1072-1081 (2008).
- [Gra'98]** Gradisek J., Govekar E., Grabec I., Using coarse-grained entropy rate to detect chatter in cutting. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.214, N°5, pp.941–952 (1998).
- [Hua'98]** Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C., Liu H.H., The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol.454, pp.903-995 (1998).
- [Hua'03]** Huang N.E., Wu M.L.C., Long S.R., Shen S.S.P., Qu W., Gloersen P., Fan K.L., A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis; *The Royal Society of London Mathematical Physical and Engineering Sciences*, Vol.459, pp.2317-2345 (2003).

- [Jem'03]** Jemielniak K., Tool wear monitoring by means of artificial neural networks. International Journal for Manufacturing Science and Technology, Vol.4, N°1, pp.28-43 (2003).
- [Ken'09]** Kenzari M., Vibroacoustic diagnosis of gears defects: sound perception approach analysis. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France (2009).
- [Kha'12]** Khamel S., Ouelaa N., Bouacha K., Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool. Journal of Mechanical Science & Technology, Vol.26, pp.3605-3616 (2012).
- [Kio'08]** Kious M., Boudraa M., Ouahabi A. et Serra R., Influence of machining cycle of horizontal milling on the quality of cutting force measurement for the cutting tool wear monitoring. Production Engineering Research and Development, Vol.2, pp.443-449 (2008).
- [Kri'94]** Krimphoff J., Mcadams S., Winsberg S., Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique. Journal de Physique, Vol.5, N°C5, pp.525-528 (1994).
- [Lei'13]** Lei Y., Lin J., He Z., Zuo M. J., A review on empirical mode decomposition in fault diagnosis of rotating machinery. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 35, pp.108-126 (2013).
- [Lia'05]** Liang H., Lin Q., Chen J. D. Z., Application of the empirical mode decomposition to analysis of Esophageal Manometric Data in gastroesophageal reflux disease. IEEE, Vol.52, N°10, pp.1692-1701 (2005).
- [Lin'03]** Lin J. T., Bhattacharyya D., Kecman V., Multiple regression and neural networks analyses in composites machining. Composites and Technology, Vol.63, pp.539-548 (2003).
- [Loo'97]** Looney C., Pattern Recognition Using Neural Networks. Oxford University Press, New York, (1997).
- [Mar'01]** Martinet M., Analyse multirésolution en ondelettes du rayonnement acoustique des structures planes. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, (2001).
- [Mar'08]** Mardapittas A. S., Au. YHJ., Expert system for tool wear monitoring in blanking. Intelligent Fault Diagnosis – Part 1: Classification Based Technique (2008).
- [Mat'06]** Mathieu R., Surveillance d'usinage en fraisage de pièces complexes par un suivi de la broche. Thèse de doctorat, Université de Nantes, France (2006).
- [Mik'03]** Mikko M., Taito A., Erkki L., Paul H. A., Rolf H., Experimental set-up for study of chip formation in turning. Proceedings, XVII IMEKO World Congress, Dubrovnik, Croatia, June 22–27 (2003).

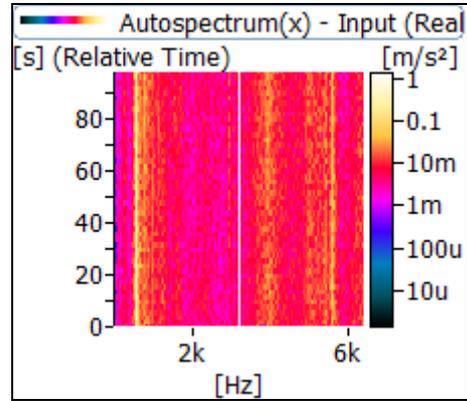
- [Ojh'05]** Ojha D. K., Dixit U. S. An economic and reliable tool life estimation procedure for turning. *International Journal Advanced of Manufacturing Technology* Vol.26, pp.726-732 (2005).
- [Ora'09]** Oraby S. E., Alaskari A. M., On the variability of tool wear and life at disparate operating parameters. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.49, (2009).
- [Oua'07]** Ouahabi A., Rmili W., Roger S., Analyse temps-fréquence appliquée aux signaux vibratoires relevés en tournage. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août 2007.
- [Pen'05]** Penga Z.K., Tsea P. W., Chub F.L., An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis. *Journal of Sound and Vibration*, Vol.286, pp.187-205 (2005).
- [Per'05]** Perrier V., Transformée en Ondelettes Continue Théorie, Applications à l'Imagerie Médicale. Institut National Polytechnique de Grenoble, Cours de l'Ecole Doctorale, Orsay, (2005).
- [Pra'01]** Prateepasen A., Au Y. H. J., Jones B. E., Acoustic emission and vibration for tool wear monitoring in single – point machining using belief network. *IEEE, Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary, May 21–23, 2001.*
- [Rav'97]** Ravindra H. V., Srinivasa Y. G. et Krishnamurthy R., Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear*, Vol.212, pp.78-84 (1997).
- [Ril'07]** Rilling G., Décompositions Modales Empiriques : Contributions à la théorie, l'algorithme et l'analyse de performances. Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Lyon, (2007).
- [Rmi'07]** Rmili W., Analyse vibratoire pour l'étude de l'usure des outils de coupe en tournage. Thèse de Doctorat, Université François Rabelais Tours, France, (2007).
- [Rmi'07]** Rmili W., Roger S., Ouahabi A., Contribution à l'étude de la surveillance de l'usure des outils de coupe en usinage. 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août 2007.
- [Rub'06]** Rubio E. M., Teti R., Baciú I. L., Advanced signal processing in acoustic emission monitoring systems for machining technology. Special session on ICME, Intelligent Production Machines and Systems – 2nd IPROMS Virtual International Conference, pp.189 – 192, 3-14 July 2006.
- [San'09]** SANDVIK Coromant, Catalogue Général, Outils de coupe Sandvik Coromant, Tournage – Fraisage – Perçage – Alésage - Attachements, (2009).

- [Sch'99]** Scheffer C., Monitoring of tool wear in turning operations using vibration measurements. Thèse de doctorat, Université de Pretoria, (1999).
- [Sil'00]** Silva R. G., Baker K. J., Wilcox S. J., Reuben R. L., The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.14, N°2, pp.287-298 (2000).
- [Sha'08]** Sharma, V.S., Sharma, S.K., Sharma, A.K., Cutting tool wear estimation for turning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.19, pp.99-108 (2008).
- [Tha'07]** Thamizhmani S., Kamarudin K., Rahim E. A., Saparudin A., Hassan S., Tool wear and surface roughness in turning AISI 8620 using coated ceramic tool. *Proceedings of the world Congress on Engineering*, Vol.2, WCE 2007, London, U.K, July 2-4, 2007.
- [Tug'02]** Tugrul Ö., Abhijit N., Prediction of flank wear by using back propagation neural network modeling when cutting hardened H-13 steel with chamfered and honed CBN tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.42, pp.287-297 (2002).
- [Tuğ'07]** Tuğrul Ö., Yiğit K., Lui F., Paulo Davim J., Modeling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.189, pp.192-198 (2007).
- [Wan'01]** Wang L., Mehrabi M. G., Kannatey Asibu Jr., Tool wear monitoring in reconfigurable machining systems through wavelet analysis. *NAMRI/SME Transactions*, Vol.29, pp.399–406 (2001).
- [Wan'03]** Wang H., Shao H., Chen M., Hu D., On-line tool breakage monitoring in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.139, pp.237-242 (2003).
- [Xua'07]** Xuan B., Xie Q., Peng S., EMD Sifting Based on Bandwidth. *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.14, N°8, pp.537-540 (2007).
- [Yeo'00]** Yeo S. H., Khoo L. P., Neo S. S., Tool condition monitoring using reflectance of chip surface and neural network. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.11, pp.507–514 (2000).
- [You'15]** Younes R., Hamzaoui N., Ouelaa N., Djebala A., Perceptual study of the evolution of gear defects. *Applied Acoustics*, Vol.99, pp.60-67 (2015).

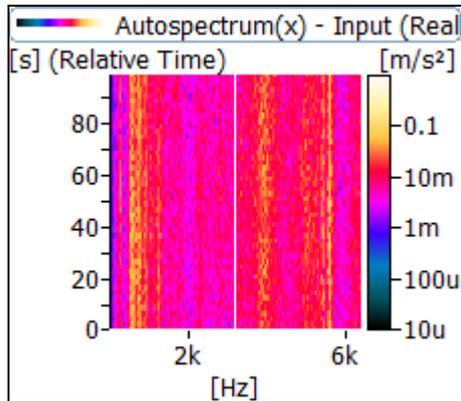
Sur les figures 1-8 nous représentons les contours des autospectres obtenus selon les directions : radiale (Y), tangentielle (Z) et axiale (X).



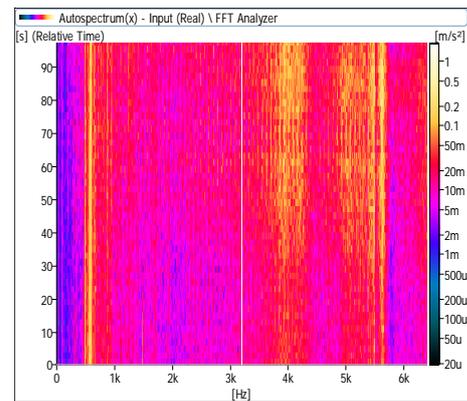
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0,091 mm.



b) Essai 2 : VB=0,218 mm.



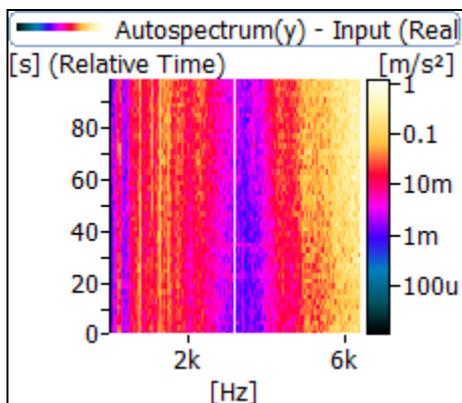
c) Essai 3 : VB=0.359 mm.



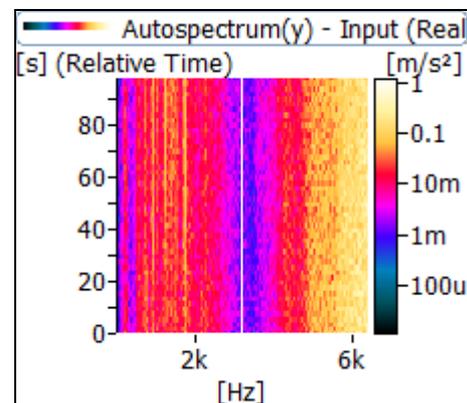
d) Essai 4 : Fin de vie de l'outil VB=0.920 mm.

Figure 1. Contour des Autospectres obtenus selon la direction axiale (X) ;

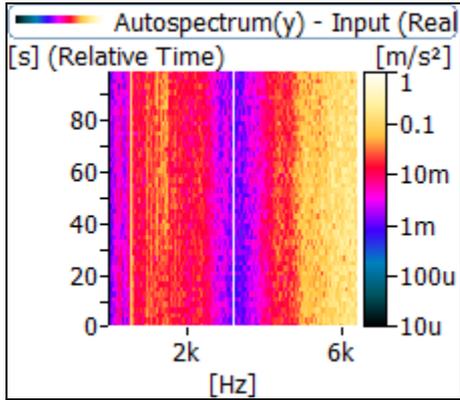
$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$



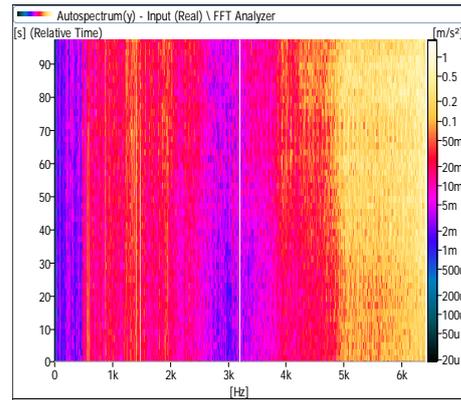
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0,091 mm.



b) Essai 2 : VB=0,218 mm.



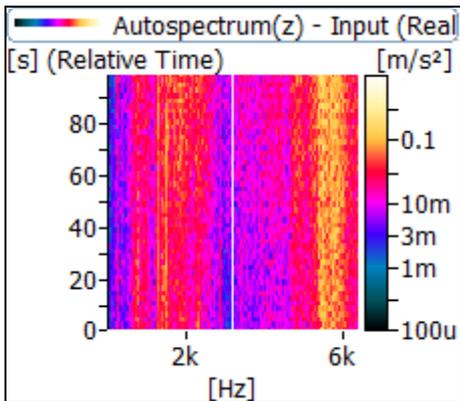
c) Essai 3 : VB=0.359 mm.



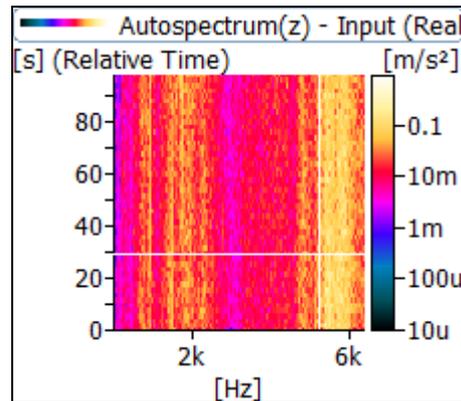
d) Essai 4 : Fin de vie de l'outil VB=0.920 mm.

Figure 2. Contour des Autospectres obtenus selon la direction radiale (Y) ;

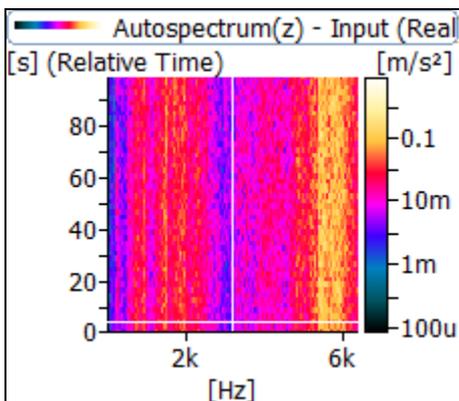
$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$



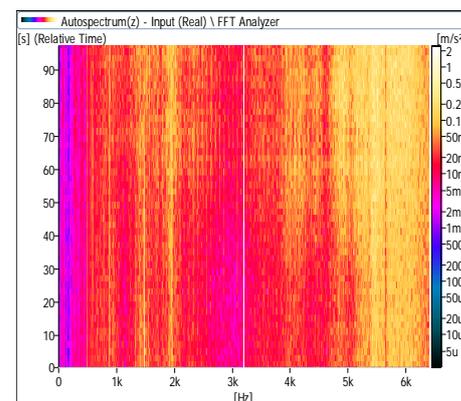
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0,091 mm.



b) Essai 2 : VB=0,218 mm.



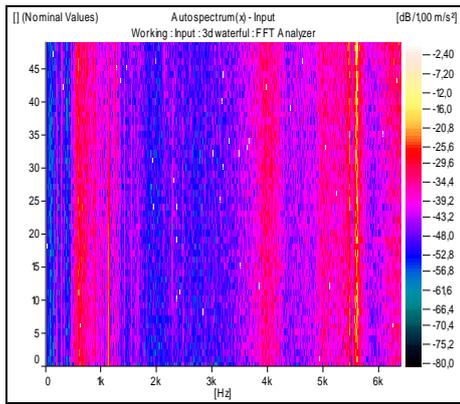
c) Essai 3 : VB=0.359 mm.



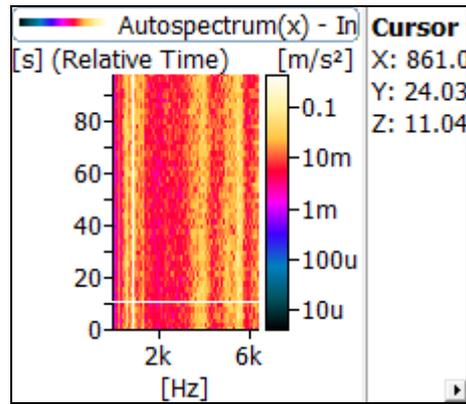
d) Essai 4 : Fin de vie de l'outil VB=0.920 mm.

Figure 3. Contour des Autospectres obtenus selon la direction radiale (Z) ;

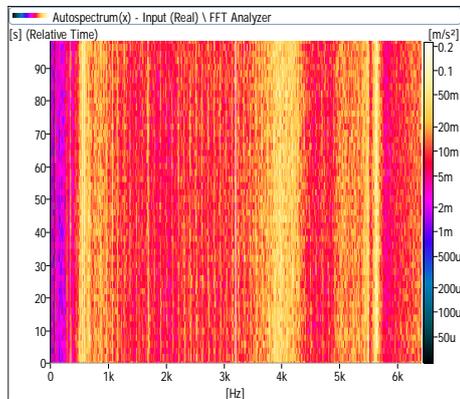
$$V_c = 250 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$



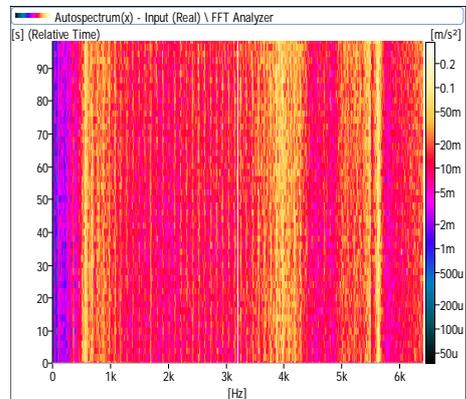
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0.077 mm



b) Essai 2 : VB=0.289 mm.



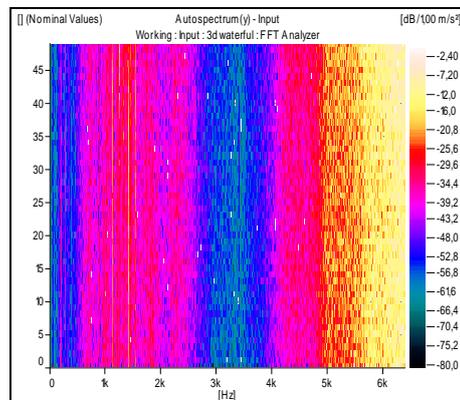
c) Essai 4 : VB=0.488 mm.



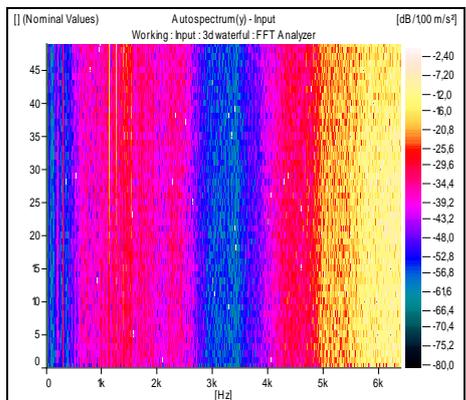
d) Essai 5 : Fin de vie de l'outil VB=0.628 mm.

Figure 4. Contour des Autospectres obtenus selon la direction axiale (X) ;

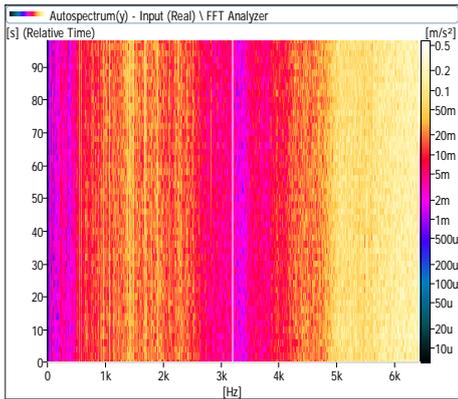
$$V_c = 175 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$



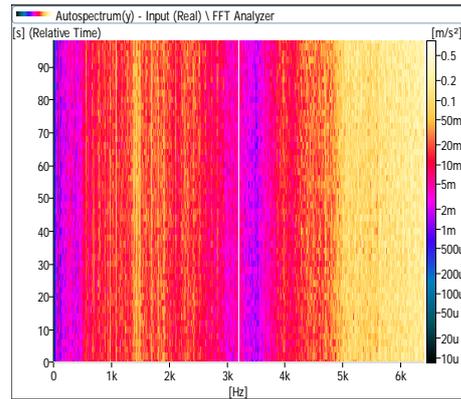
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0.077 mm



b) Essai 2 : VB=0.289 mm

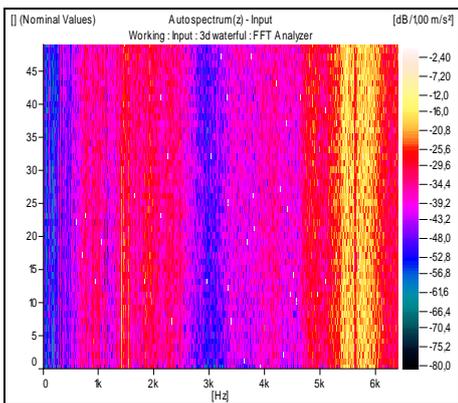


c) Essai 4 : VB=0.488 mm.

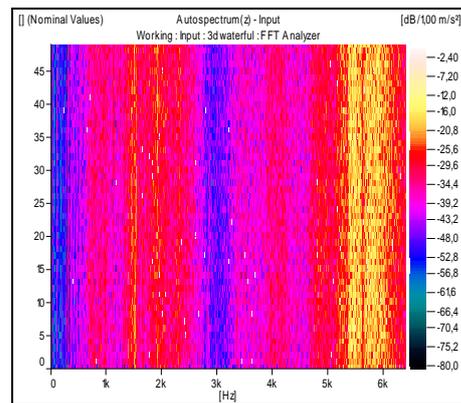


d) Essai 5 : Fin de vie de l'outil VB=0.628 mm.

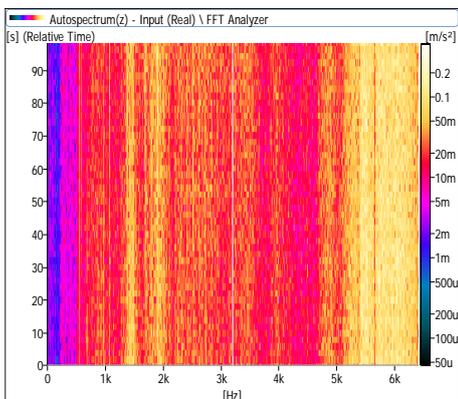
Figure 5. Contour des Autospectres obtenus selon la direction radiale (Y) ;
 $V_c = 175 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.



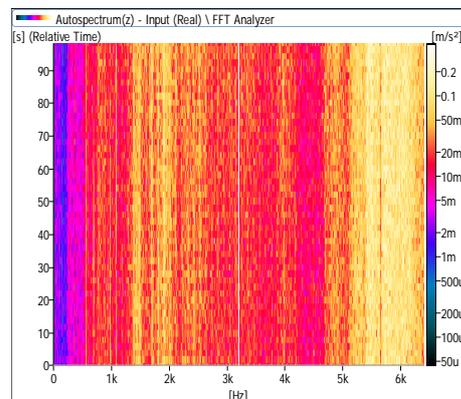
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0.077 mm



b) Essai 2 : VB=0.289 mm.

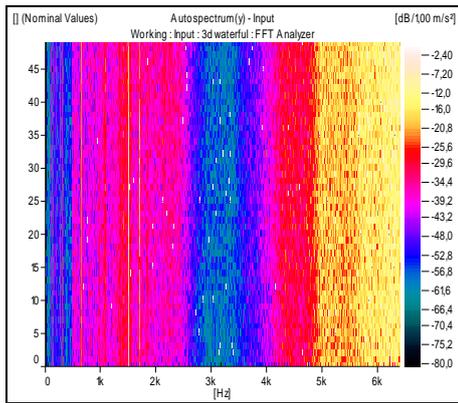


c) Essai 4 : VB=0.488 mm.

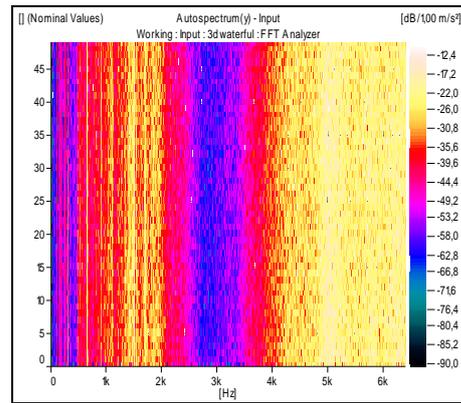


d) Essai 5 : Fin de vie de l'outil VB=0.628 mm.

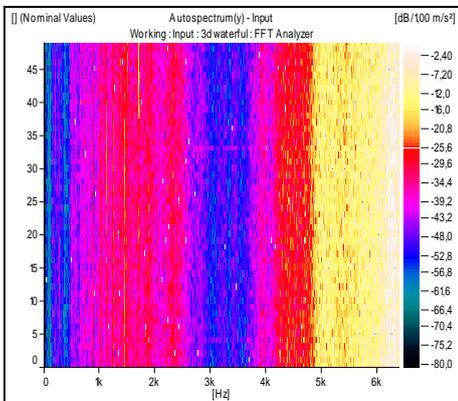
Figure 6. Contour des Autospectres obtenus selon la direction radiale (Z) ;
 $V_c = 175 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.



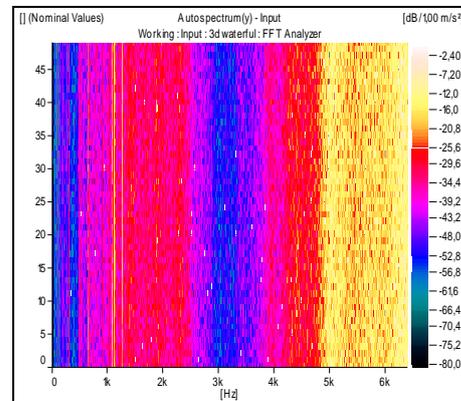
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0.041 mm.



b) Essai 9 : VB=0.280 mm.



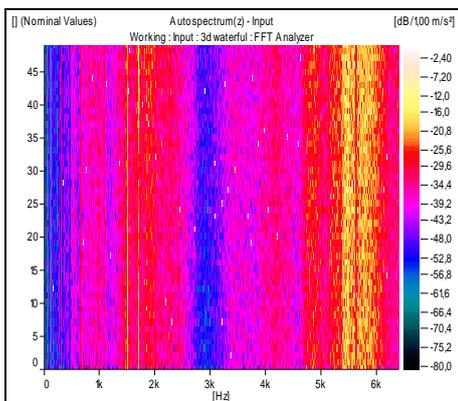
c) Essai 12 : VB= 0.345 mm.



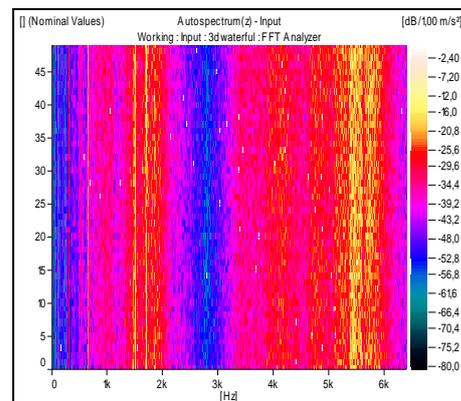
d) Essai 16 : Fin de vie de l'outil VB=0.403 mm.

Figure 7. Contour des Autospectres obtenus selon la direction radiale (Y) ;

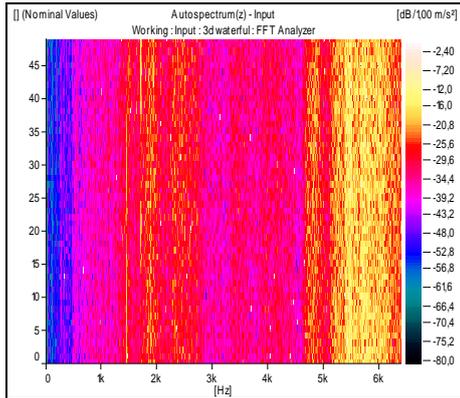
$$V_c = 120 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$



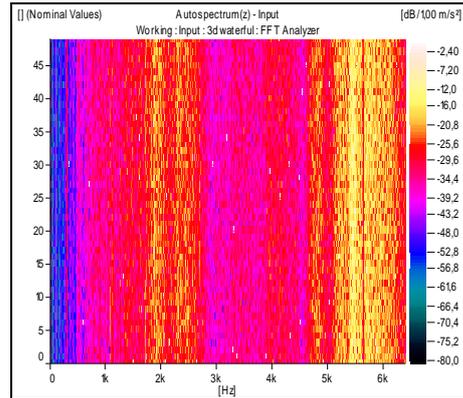
a) Essai 1 : 1^{er} utilisation de l'outil, VB=0.041 mm.



b) Essai 9 : VB=0.280 mm.



c) Essai 12 : $VB=0.345$ mm. .

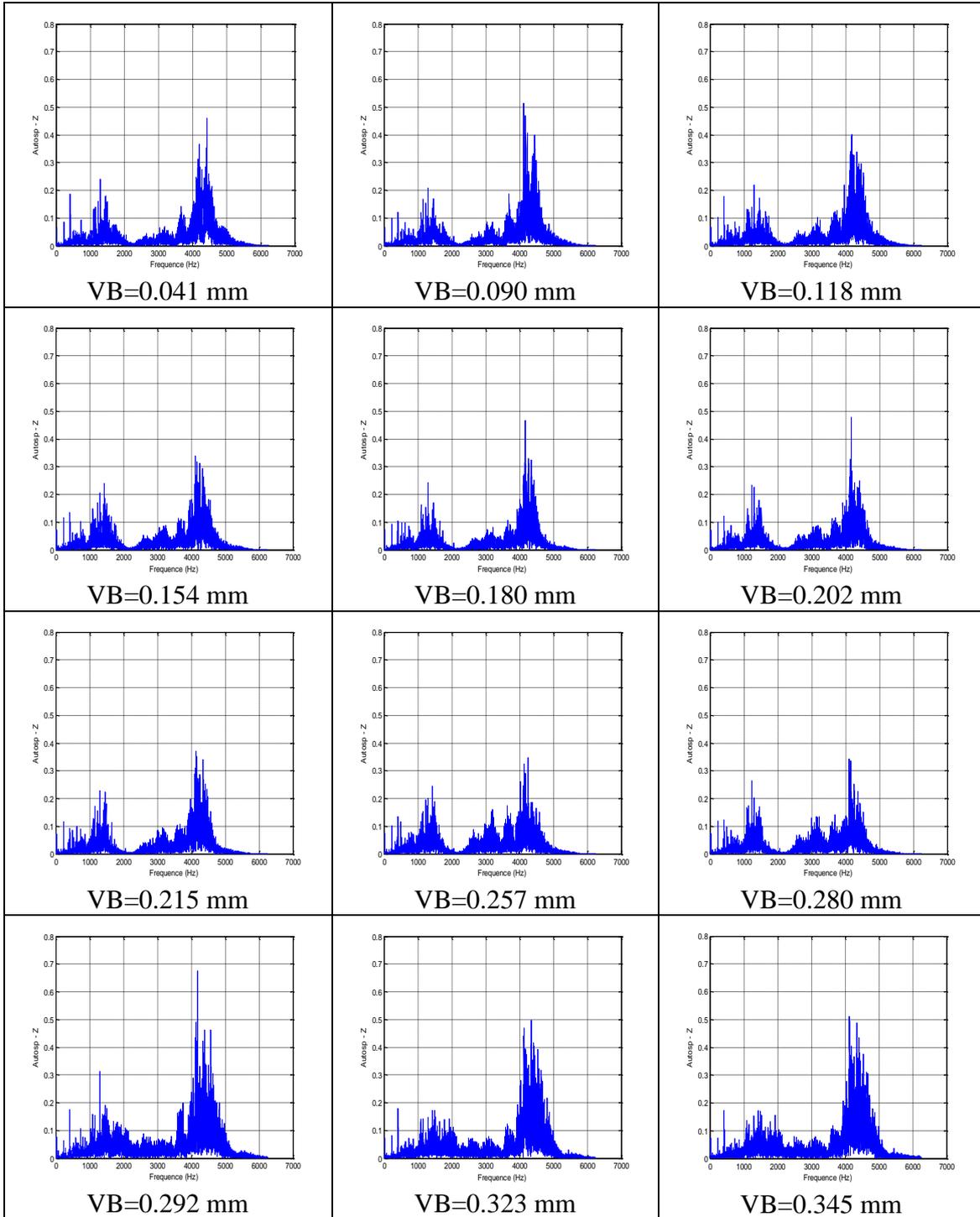


d) Essai 16 : Fin de vie de l'outil $VB=0.403$ mm.

Figure 8. Contour des Autospectres obtenus selon la direction radiale (Z) ;

$$V_c = 120 \text{ m/min}, a_p = 0.2 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr.}$$

Annexe II : Autospectres des signaux mesurés : Tangentielle (Z) et Axiale (X)



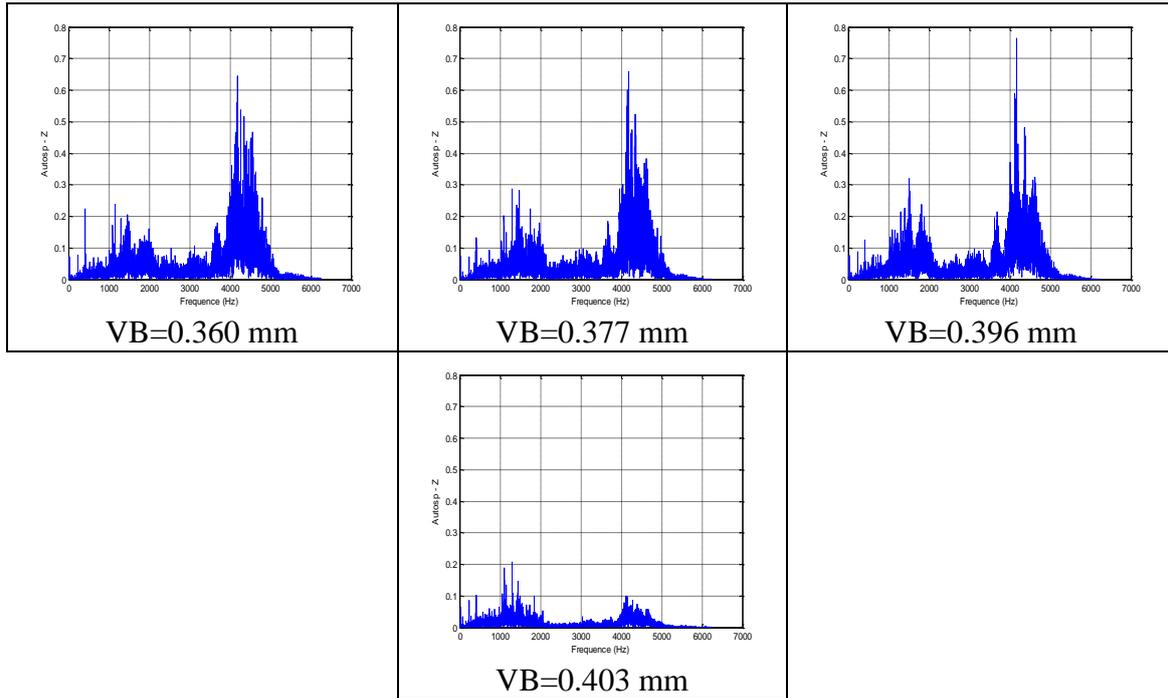


Figure 1. Les autospectres des signaux mesurés dans la direction tangentielle (Z) pour différents usures en dépouille (VB)

$V_c = 120 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr.}$

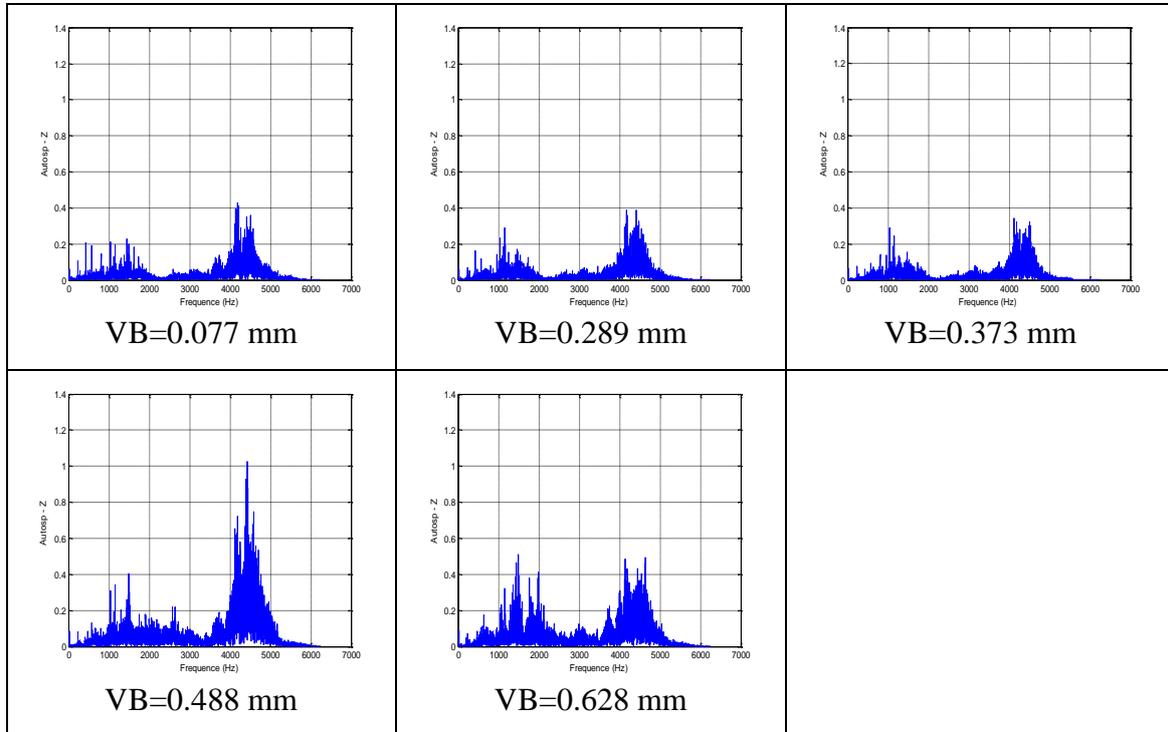


Figure 2. Les autospectres des signaux mesurés dans la direction tangentielle (Z) pour différents usures en dépouille (VB)

$V_c = 175 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr.}$

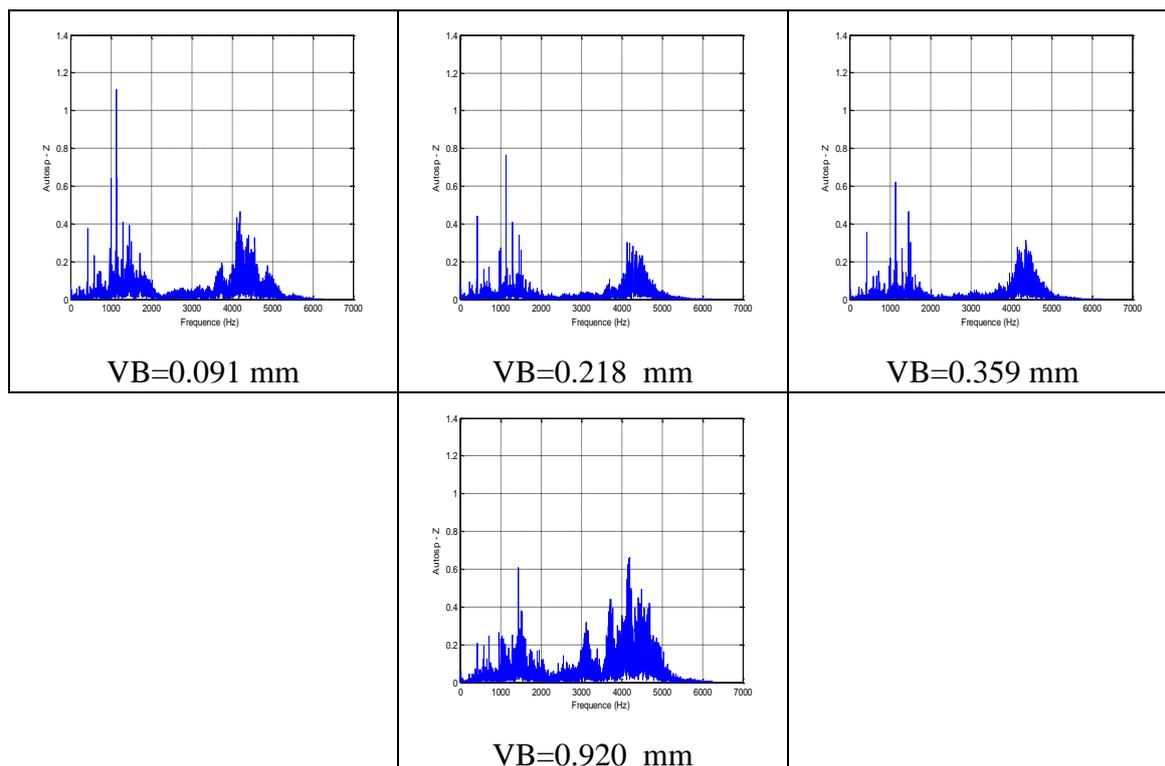
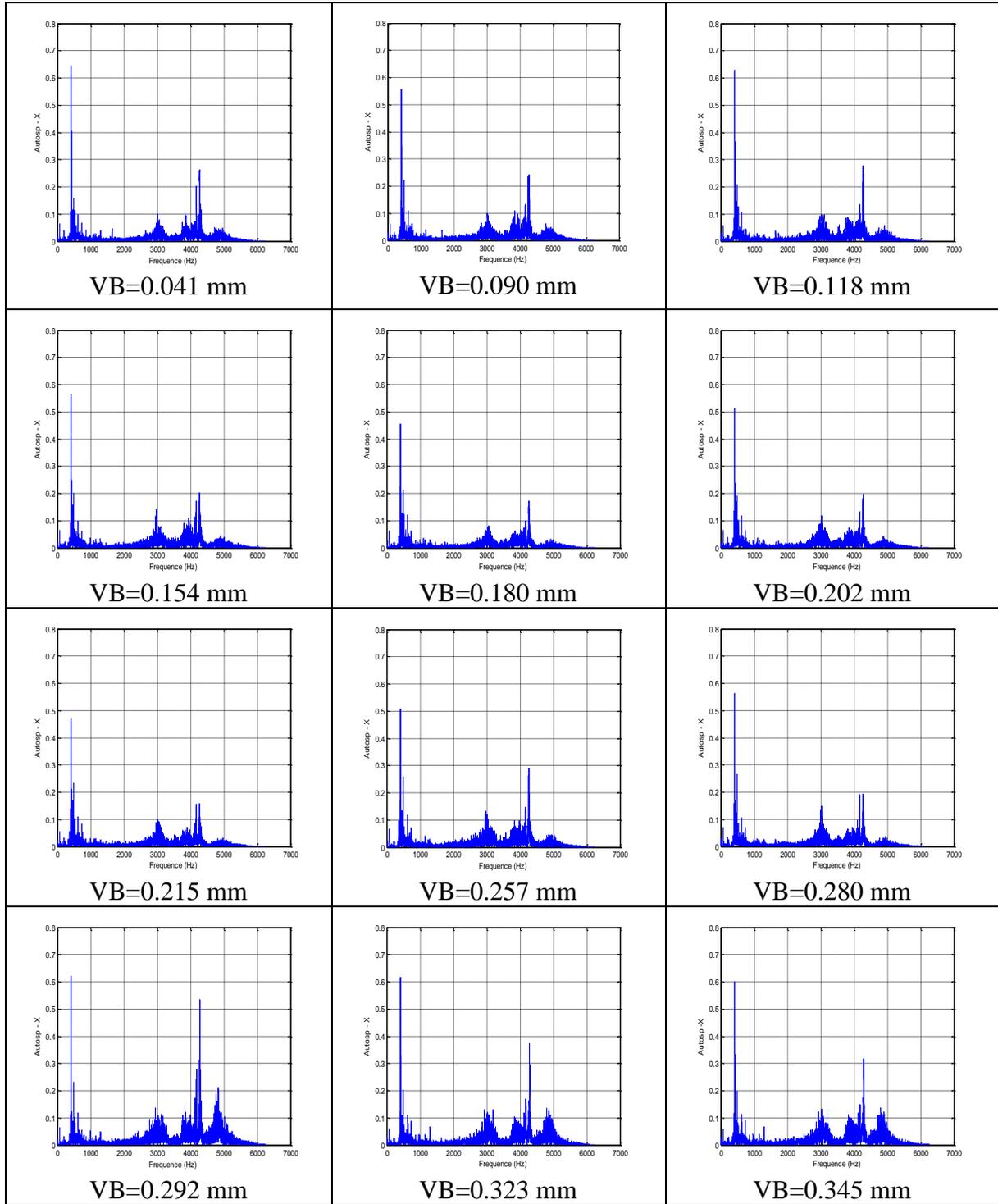


Figure 3. Les autospectres des signaux mesurés dans la direction tangentielle (Z) pour différents usures en dépouille (VB)

$V_c = 250 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

Annexe II : Autospectres des signaux mesurés : Tangentielle (Z) et Axiale (X)



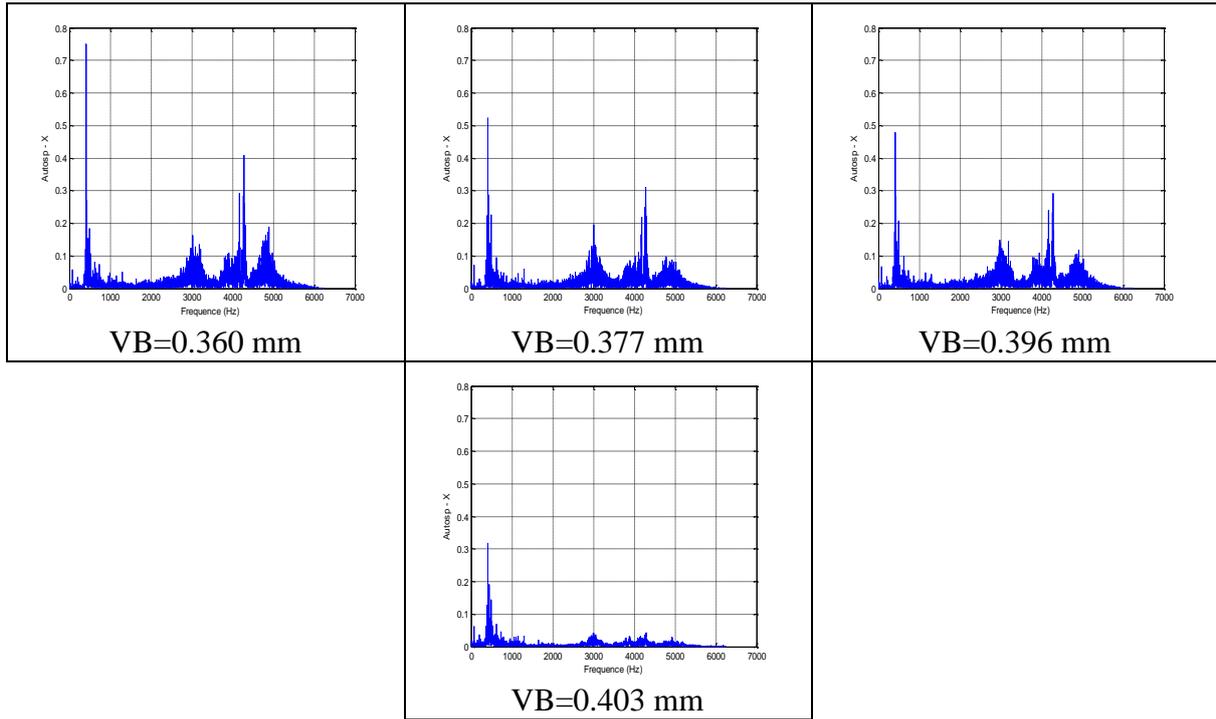


Figure 4. Les autospectres des signaux mesurés dans la direction axiale (X) pour différents usures en dépouille (VB)
 $V_c = 120 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

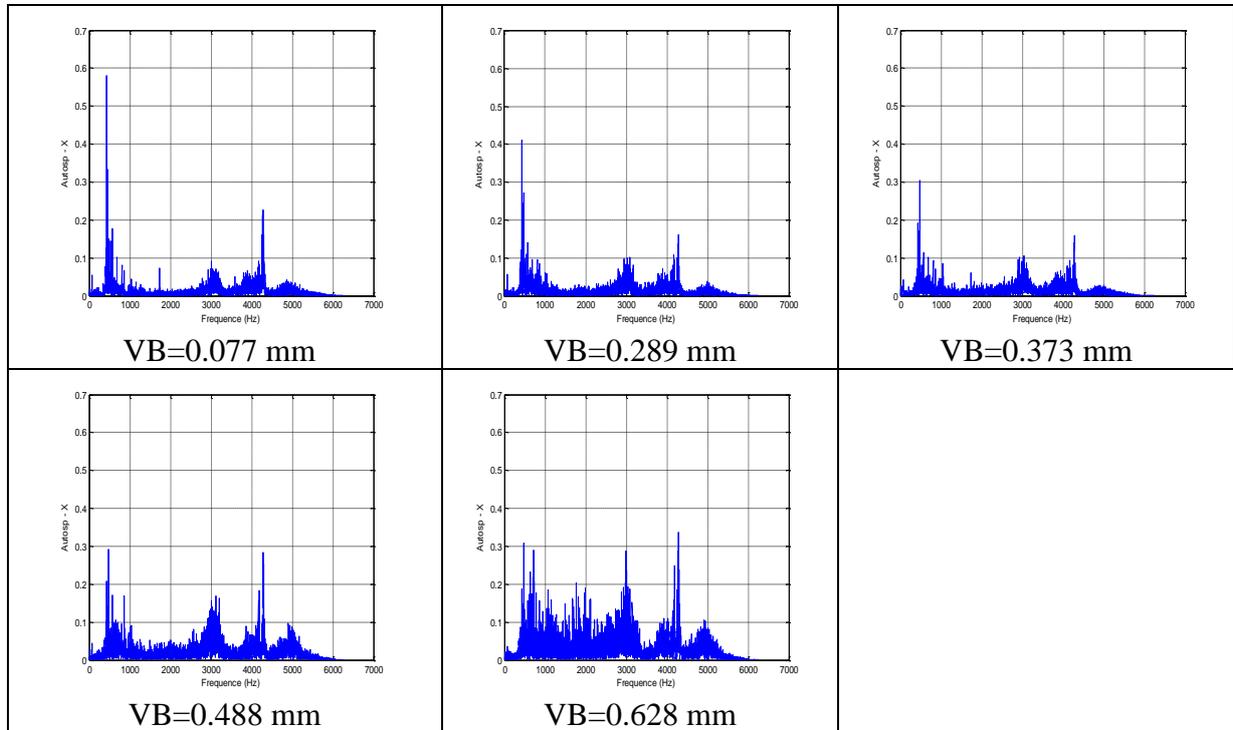


Figure 5. Les autospectres des signaux mesurés dans la direction axiale (X) pour différents usures en dépouille (VB)
 $V_c = 175 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

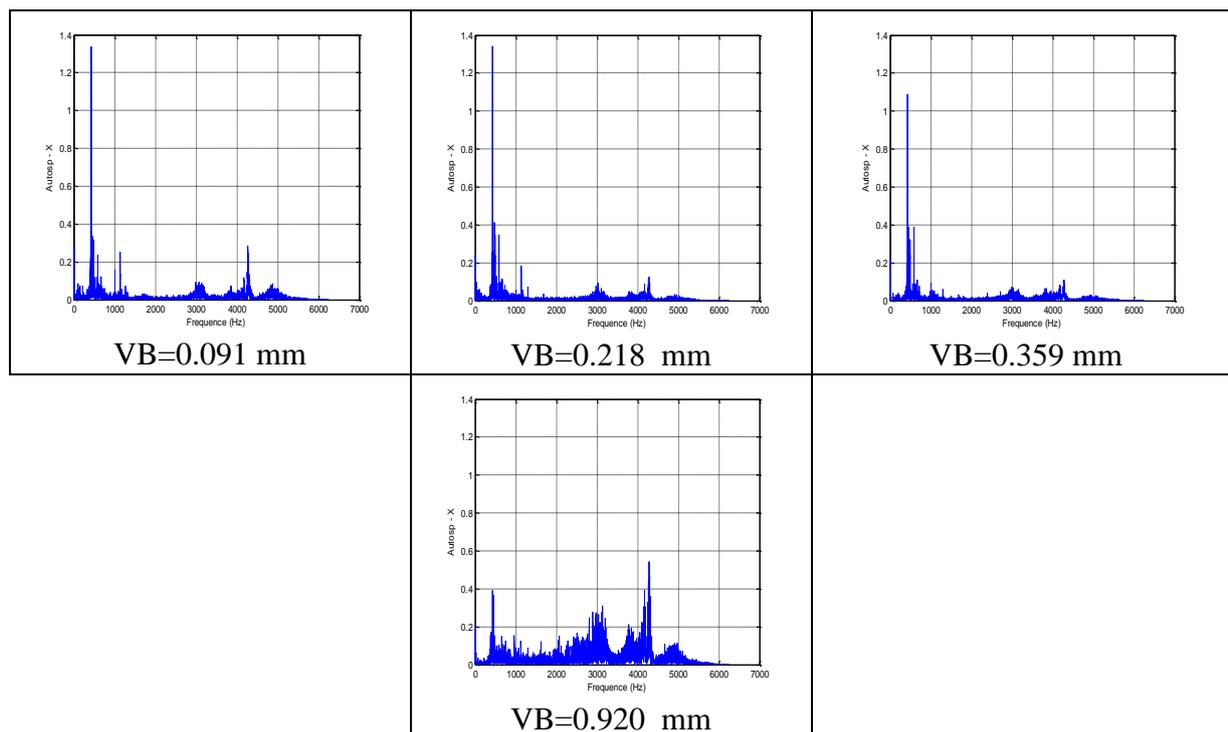


Figure 6. Les autospectres des signaux mesurés dans la direction axiale (X) pour différents usures en dépouille (VB)

$V_c = 250 \text{ m/min}$, $a_p = 0.2 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

Les travaux de cette thèse ont été présentés via plusieurs articles et communications internationales qui sont comme suit :

Publications internationales :

- 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, a été publié dans la revue « **International Journal of Advanced Manufacturing Technology, (Springer-Verlag London)**, 82 (2016) 2017–2028 : DOI 10.1007/s00170-015-7530-3 » *facteur d'impact 1.78.*

Auteurs : M.K. Babouri, N. Ouelaa, A. Djebala.

Publications Internationales avec acte édité :

- Prediction of Cutting Tool's Optimal Lifespan Based on the Scalar Indicators and the Wavelet Multi-Resolution Analysis, a été publié dans la revue « **Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering systems, Springer International Publishing Switzerland (2016)** ». ISSN 2195 – 4356, eBook ISBN 978-3-319-41468-3.

Auteurs : M.K. Babouri, N. Ouelaa, A. Djebala, M. C. Djamaa et S. Boucherit.

Communications :

- Participation au « Congrès Algérien de Mécanique » CAM2015 qui s'est tenu les 25-29 Octobre 2015 à El-Oued par la communication oral suivante : Prédiction de la durée de vie optimale des outils de coupe basée sur les indicateurs scalaires et l'analyse multirésolution en ondelettes.

Auteurs : M.K. Babouri, N. Ouelaa, A. Djebala, M. C. Djamaa et S. Boucherit.

- Participation au « Conférence Internationale de Mécanique et Matériaux » ICMM14 qui s'est tenu les 16-17 November 2014 à Sétif1 par la communication oral suivante : Contribution de la transition de l'état de l'outil par application de l'analyse décomposition en modes empiriques.

Auteurs : M.K. Babouri, N. Ouelaa, A. Djebala, M. C. Djamaa et S. Boucherit.