

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université de 08 Mai 45.Guelma
Faculté des Sciences et de l'Ingénieur

Mémoire de Magister



76

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Magister en productique



Thème

IDENTIFICATION DE L'USURE D'UN OUTIL DE TOURNAGE PAR ANALYSE VIBRATOIRE

Présenté par

BABOURI MOHAMED KHEMISSI

Devant le jury :

Président :	Fatmi Louendi	Pr. Université de Guelma
Rapporteur :	Ouelaa Nouredine	Pr. Université de Guelma
Examineurs :	Tebbikh Hicham	Pr. Université de Guelma
	Yallese M^{ed} Athmane	M.C.A. Université de Guelma
	Djamaa M^{ed} Cherif	M.C.A. Université de Guelma
Invité :	Djebala Abderrazek	M.C.B. Université de Guelma

Année 2009

Remerciements

Je tiens à remercier vivement mon encadreur Professeur OUELAA Nouredine de l'Université 08 Mai 45 de Guelma pour son aide précieuse ainsi que ces conseils, sa patience et la disponibilité qu'il m'a accordée pendant la réalisation de ce travail.

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

De plus, mes sincères remerciements vont à monsieur le professeur FATMI Louendi de l'Université de Guelma pour avoir accepté de présider le jury. Ma profonde gratitude va aussi au Professeur Tebbikh Hicham, Dr. Yallese M^{ed} Athmane et Dr. DJAMAA Mohamed Cheril de l'Université de Guelma, pour l'attention qu'ils ont porté à mon travail et pour avoir accepté d'examiner ce travail de magister.

Je tiens également à remercier tous les collègues et enseignants et à l'ensemble du personnel du département de génie mécanique. Mes remerciements vont aussi à tous les membres du Laboratoire de Mécanique et structures de l'Université 08 Mai 45 de Guelma. Enfin tous mes collègues de travail de la direction des mines et de l'industrie.

ملخص المذكرة

إن مراقبة طرق التشغيل قد أصبحت تلعب دورا جد مهم لتقليل مدة تعطيل الآلة إلى جانب تجنب ظهور بعض الظواهر غير المتوقعة مثل التآكل المفرط أو إنكسار الأداة. في هذه الدراسة نستعمل منهجية عددية وتجريبية تسمحان بالكشف عن تآكل الأداة على أساس معطيات قوى القطع و الاهتزازات. الإشارات المقاسة تمت معالجتها في عدة ميادين للتحليل الاهتزازي .

انتهى العمل إلى دراسة مهمة بين هاته الطرق الزمنية منها والترددية وكذا التحليل المتعدد السلالم بالموجات في المجال الزمني. مكن التحليل من دراسة تأثيرات عوامل القطع, تغيرات الإشارات الساكنة و المتحركة ومدى حساسية المؤثرات الرقمية بالنسبة لمغيرات تآكل الأداة. أما التحليل الترددي فقد مكن من تبيان مدى أهمية أطيف إشارات التسارع وقوى القطع في عوامل قطع مختلفة وحساسيتها لتغيرات حالة الأداة وكذا الزيادة في مستويات التآكل. من جهة أخرى التغيرات المعتبرة لقمة الذروة و الترددات الموافقة لها.

اقترح التحليل المعدد السلالم بالموجات كأداة عملية لمعالجة الإشارات المتحصل عليها . الهدف من هاته الطريقة هو إثبات من جهة مدى التحسن في حساسية المؤشرات الرقمية ومن جهة أخرى إمكانية كشف وتقييم تآكل الأداة أو أيضا استنباط الضرر القوي المفاجئ لهذا الأخير.

الكلمات المفتاحية : تآكل الأداة, قوى القطع, إشارات الاهتزازات , الخراطة, المؤشرات الرقمية, التحليل الترددي, التحليل المتعدد السلالم بالموجات, المراقبة على المباشر, التحليل الاهتزازي.

Résumé

La surveillance des processus d'usinage joue un rôle très important dans la minimisation des durées de pannes des machines et l'empêchement de l'apparition de certains phénomènes non désirés tels que l'usure excessive ou la rupture de l'outil. Dans cette étude, nous utilisons une méthodologie numérique et expérimentale basée sur les données des efforts de coupe et des signatures vibratoires permettant l'identification de l'usure de l'outil. Les signaux recueillis sont ensuite traités dans différents domaines d'analyse vibratoire.

Le travail a abouti à une comparaison intéressante entre les méthodes temporelles, fréquentielles et l'analyse multirésolution en ondelettes. En temporel, l'analyse a permis d'étudier les effets des conditions de coupe, de la variation des signaux statiques et dynamiques et de la sensibilité des indicateurs scalaires sur la variation de l'usure de l'outil. L'analyse fréquentielle a permis de montrer l'importance des spectres des signaux d'accélération et de l'effort de coupe pour différentes conditions de coupe. Leur sensibilité aux changements de l'état de l'outil ainsi que l'augmentation des niveaux de l'usure a également été mise en évidence. D'autre part, les variations significatives d'amplitude et les fréquences correspondantes semblent elles aussi d'une importance capitale.

L'analyse multirésolution en ondelettes a été proposée comme un outil pratique de traitement des signaux obtenus. Le but de cette méthode est de montrer, d'une part, l'amélioration de la sensibilité des indicateurs scalaires et d'autre part, l'identification et l'estimation de l'usure de l'outil ce qui permet de déceler, d'une manière précoce, l'endommagement brutal de ce dernier.

Mots-clés : Usure d'outil, Effort de coupe, Signatures des vibrations, Tournage, Indicateurs scalaires, Analyse fréquentielle, Analyse multirésolution en ondelettes, Surveillance en ligne, Analyse vibratoire.

Abstract

The monitoring of machining processes plays a very significant role in the minimization of machines failures durations and the prevention of the appearance of certain undesirable phenomena such excessive wear or the tool rupture. In this study we use a numerical and experimental methodology allowing the identification of the tool wear, based on vibratory data and cutting forces. The collected signals are processed in various fields of vibration analysis.

This work leads to an interesting comparison between temporal, frequential and wavelet multiresolution analyses. In time domain, the analysis allows studying the effects of the cutting conditions, the variation of the static and dynamic signals and the sensitivity of the scalar indicators on the tool wear variation. The frequential analysis shows the importance of the acceleration signals and cutting forces spectra for different cutting conditions. Their sensitivity to the tool state changes and the increase of wear levels has also been studied. On another hand, the amplitudes variations and the corresponding frequencies seems more important.

The wavelet multiresolution analysis was proposed as a practical tool for the process of the collected signals. The objective of this method is to prove, on one hand, the improvement of the scalar indicators sensitivity and on the other hand, the identification and the estimate of the tool wear allowing early detection of its brutal damage.

Keywords : Tool wear, Cutting forces, Vibration signatures, Turning, Scalar indicators, Frequential analysis, Wavelet multiresolution analysis, On line monitoring, Vibration analysis.

Nomenclature

FFT	Transformée de Fourier rapide (<i>Fast Fourier Transform</i>)
N	Nombre d'échantillons du signal
a	Paramètre d'échelle
b	Paramètre de translation
A_i	Approximations
CA_i	Coefficients d'approximation
CD_i	Coefficients de détail
FC	Facteur de crête
RMS	La valeur efficace du signal
WT	Transformée en ondelettes (<i>Wavelet Transform</i>)
CWT	Transformée en ondelettes continue (<i>Continuous Wavelets Transform</i>)
D_i	Détails
dbN	Ondelettes de Daubechies d'ordre N
DWT	Transformée en ondelettes discrète (<i>Discrete Wavelet Transform</i>)
F_{\max}	Fréquence maximale
F_e	Fréquence d'échantillonnage
K_u	Kurtosis
M2 et M4	Moments statistiques d'ordre 2 et 4
n	Nombre de niveaux
s(t)	Signal
\tilde{S}	Valeur moyenne
T	Temps
$\psi(t)$	Ondelette mère
ψ^*	Conjuguée de ψ
EA	Emission Acoustique
Fc	Force de coupe
SV	Signatures vibratoires

Nomenclature

CD	Contrainte et déformation
CP	Courant, Puissance
RN	Réseaux de neurones
CNC	Machine à commande numérique
MEF	Méthode des Eléments Finis
TCMS	Système de supervision des états d'outils (<i>Tool Condition Monitoring System</i>)
S_{crete}	L'amplitude crête
S_B	Troisième moment statistique de distribution (<i>skew</i>)
K_B	Quatrième moment statistique de distribution
TFI	Transformée de Fourier inverse
STFT	Transformée de Fourier à court terme (<i>Short Term Fourier Transform</i>)
WFT	Transformée de Fourier a fenêtre (<i>Windowed Fourier Transform</i>)
L	Filtres passe-bas
H	Filtres passe-haut
LR et HR	Filtres de reconstruction
F_r	Fréquence de résonance
AMRO	Analyse multirésolution en ondelettes
a_p	Profondeur de passe (mm)
f	Avance (mm/tr)
F_a	Effort axial (N)
F_r	Effort radial (N)
F_z	Effort tangentiel (N)
F_R	Effort résultant (N)
KT	Profondeur du cratère (mm)
VB	Usure en dépouille (mm)
VN	Usure en entaille (mm)
V_c	Vitesse de coupe m/min
COM	Couple outil matière
GMDH	Group Method of Data Handling
TD	Tournage dur

Table des illustrations

Chapitre I

Figure I. 1 : Composantes de la force de coupe sur un point d'un outil pendant L'opération de tournage.....	04
---	----

Chapitre II

Figure II.1 : Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur crête	19
Figure II.2: Transformation du Fourier.....	20
Figure II.3 : Transformée de Fourier à court terme (STFT)	24
Figure II.4 : Ondelette	24
Figure II.5 : Transformée en ondelette (WT)	26
Figure II.6 : Transformée de Fourier.....	27
Figure II.7 : La transformée en ondelette.....	28
Figure II.8 : Échelle et fréquence.....	29
Figure II.9 : L'approximation et le détail.....	30
Figure II.10 : Décomposition en cascade pour n=3.....	31
Figure II.11 : L'arbre de décomposition d'un signal.....	32
Figure II.12 : Les différentes familles de Daubechies.....	35

Chapitre III

Figure III.1: Tour à charioter SN40.....	37
Figure III.2 : Dimensions et géométrie des éprouvettes utilisées : a) Géométrie des éprouvettes, B) Photos des éprouvettes utilisées.....	38
Tableau III.1: Composition chimique de l'acier Z200Cr12.....	39
Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques du porte outil	39
Figure III.3 : Description de la nuance S40T	40
Figure III.4 : Plaquette de coupe utilisée	40
Figure III.5 : Dispositif utilise pour mesure l'accélération : a) Analyseur de Vibration, b) Accéléromètre	42
Figure III.6 : Microscope de mesure de l'usure frontale	42
Figure III.7 : Dispositif de mesure de l'usure en cratère.....	43

Figure III.8 : Rugosimètre surfest 301	43
Tableau III.3 : Les éléments constitutifs du banc d'essais et le matériel de mesure	44
Figure III.9 : Chaîne de mesure des efforts de coupe et d'accélération.....	45
Figure III.10 : Architecture expérimental	46
Tableau III.4 : Plan d'expériences	47
Tableau III.5 : Fréquences propres du système	48
Tableau III.6 : Fréquences propres de la pièce	49
Figure III.11: Les Spectres des fréquences propres du système pour deux sensibilités du marteau de choc	49
Figure III.12 : Les Spectres des fréquences propres de la pièce – broche	50

Chapitre IV

Figure IV.1 : Evolution de VB en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 0.5 \text{ mm}$ et $f = 0.12 \text{ mm/tr}$	54
Figure IV.2 : Evolution de KT en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 0.5 \text{ mm}$ et $f = 0.12 \text{ mm/tr}$	54
Figure IV.3 : Evolution de VB en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 1 \text{ mm}$ et $f = 0.12 \text{ mm/tr}$	55
Figure IV.4: Evolution de KT en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 1 \text{ mm}$ et $f = 0.12 \text{ mm/tr}$	55
Figure IV.5 : Profils des 3 composants de l'effort de coupe mesurés sur le palier 5 pour $V_c=190\text{m/min}$, $a_p=1\text{mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	56
Figure IV.6 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=100 \text{ m/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	57
Figure IV.7 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=135\text{m/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	57
Figure IV.8 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=190\text{m/min}$, $a_p=0.5\text{mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	57
Figure IV.9 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=100 \text{ m/min}$, $a_p=1 \text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	58
Figure IV.10 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=135 \text{ m/min}$, $a_p=1 \text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	58

Table des illustrations

Figure IV.11 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=190\text{m/min}$, $a_p=1\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	58
Figure IV.12: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe	60
Figure IV.13: Evolution de la rugosité (R_a , R_t , R_z) en fonction du temps pour différente V_c pour $a_p = 0.5\text{ mm}$ et $f = 0.12\text{ mm/tr}$	61
Figure IV.14: Evolution de la rugosité (R_a , R_t , R_z) en fonction du temps pour différente V_c pour $a_p = 1\text{ mm}$ et $f = 0.12\text{ mm/tr}$	61
Figure IV.15: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour différentes vitesse de coupe	62
Figure IV.16 : Force statique en fonction d'usure en dépouille $V_c=100\text{ m/min}$, $a_p=0.5\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	64
Figure IV.17 : Force statique en fonction de l'usure en dépouille $V_c=135\text{ m/min}$, $a_p=0.5\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	65
Figure IV.18: Force statique en fonction de l'usure en dépouille $V_c=190\text{ m/min}$, $a_p=0.5\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	65
Figure IV.19: Force statique en fonction de l'usure en dépouille $V_c=100\text{m/min}$, $a_p=1\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	66
Figure IV.20 : Force statique en fonction de l'usure en dépouille $V_c=135\text{ m/min}$, $a_p=1\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	66
Figure IV.21: Force statique en fonction de l'usure en dépouille $V_c=190\text{ m/min}$, $a_p=1\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr}$	67
Figure IV.22 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 100\text{ m/min}$, $a_p = 0.5\text{ mm}$, $f = 0.12\text{ mm/tr}$	68
Figure IV.23 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 135\text{ m/min}$, $a_p = 0.5\text{ mm}$, $f = 0.12\text{ mm/tr}$	69
Figure IV.24 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 190\text{ m/min}$, $a_p = 0.5\text{ mm}$, $f = 0.12\text{ mm/tr}$	70
Figure IV.25 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 100\text{ m/min}$, $a_p = 1\text{ mm}$ et $f = 0.12\text{ mm/tr}$	71
Figure IV.26 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 135\text{ m/min}$, $a_p = 1\text{ mm}$ et $f = 0.12\text{ mm/tr}$	72

Figure IV.27 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	72
Figure IV.28 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différentes accélérations. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	74

Chapitre V

Tableau V.1 : Usure en dépouille VB et en cratère KT en fonction des paramètres de coupe V_c et f	76
Figure V.1 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.	78
Figure V.2 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	78
Figure V.3 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	79
Figure V.4 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	79
Figure V.5 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	79
Figure V.6 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	80
Figure V.7 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	80
Figure V.8 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	80
Figure V.9 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	81
Figure V.10 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	81
Figure V.11 : a) Signale mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1) ($V_c = 100$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 0.5$ mm)	83
Figure V.12 : a) Signale mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1)	

($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	84
Figure V.13 : a) Signale mesuré (F_r), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1)	
($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	85
Figure V.14 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y). ($V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	87
Figure V.15 : les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort axiale (F_x). ($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	87
Figure V.16 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y). ($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	88
Figure V.17 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort axiale (F_x). ($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	88
Figure V.18 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y). ($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm)	89
Figure V.19 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y). ($V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	89
Figure V.20 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y). ($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	90
Figure V.21 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort axiale (F_x). ($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	90
Figure V.22 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radiale (F_y). ($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	91

Table des illustrations

Figure V.23 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort tangentielle (FZ). ($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	91
Figure V.24 : a) Signale mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1). ($V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	92
Figure V.25 : a) Signale mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1). ($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	93
Figure V.26 : a) Signale mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1). ($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm)	94
Figure V.27 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c=100$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr	96
Figure V.28 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c=135$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr	96
Figure V.29 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c=190$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr	97
Figure V.30 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c=100$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr	97
Figure V.31 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c=135$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr	98
Figure V.32 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c=190$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr	98
Figure V.33 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c=100$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr	100
Figure V.34 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c=135$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr	100
Figure V.35 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c=190$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr	101
Figure V.36 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c=100$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr	101

Table des illustrations

Figure V.37 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	102
Figure V.38 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr	102
Figure V.39 : Différents détails et approximations issus de l'analyse multirésolution en ondelettes du signal mesure (accélération radiale). $V_c = 190$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 0.5$ mm	103
Figure V.40 : (a) Signaux d'accélération (accélérations radiales), (b) Signaux reconstruits (D3), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit	106
Figure V.41 : (a) Signaux d'accélération (accélérations tangentielles), (b) Signaux reconstruits (D3), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit	107
Figure V.42 : a) Signale mesuré (accélération tangentielle), b) Signal reconstruit (D3), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D3). ($V_c = 190$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 1$ mm)	108

TABLES DES MATIERES

Introduction générale	01
 Chapitre I : Bibliographie sur les méthodes d'évaluation de l'usure des outils de coupe	 03
I.1. Introduction	03
I.2. Forces de coupe	03
I.3. Signatures vibratoires	09
I.4. L'émission acoustique (EA)	11
I.5. Autres méthodes et différents types de sondes utilisées	12
I.5.1. Les mesures de contraintes et de déformations	12
I.5.2. La mesure du courant et la puissance du moteur	12
I.6. Fusion de sondes	13
I.7. Position du problème	14
I.8. Conclusion	14
 Chapitre II : Surveillance de l'usure des outils de coupe par les méthodes temporelles et fréquentielles	 15
II.1. Introduction	15
II.2. Surveillance des outils de coupe	15
II.2.1. Traitement des signaux	16
II.2.2. Identification de l'usure d'outil	16
II.3. Analyse statistique	17
II.3.1. La valeur efficace du signal (RMS) et valeur crête	17
II.3.2. Kurtosis	17
II.3.3. Facteur de crête	18
II.4. Analyse spectrale	19
II.4.1. Transformée de Fourier	20

II.4.2. Transformation de Fourier rapide (FFT)	21
II.4.2.1. Signaux discrets	21
II.4.2.2. Numérisation (Echantillonnage)	22
II.5. Représentations Temps – Fréquence	22
II.5.1. Transformée de Fourier à court terme (STFT)	23
II.5.2. Les ondelettes	24
II.5.2.1. Qu'est-ce que c'est une ondelette ?	24
II.5.2.2. Introduction de l'ondelette	25
II.5.2.3. Débruitage	26
II.5.2.4. Transformée en ondelettes	27
II.5.2.5. La Transformée en ondelettes continue (CWT)	27
II.5.2.6. La relation entre échelle et fréquence	29
II.5.2.7. La transformée en ondelette discret (DWT)	29
II.5.2.8. Approximation et détail	30
II.5.3. Multirésolution en ondelettes (AMRO)	30
II.5.3.1. Choix optimal du nombre de niveaux	33
II.5.3.2. Choix du vecteur optimal de la décomposition	34
II.5.3.3. Choix optimal d'une famille d'ondelettes	34
II.6. Analyse d'enveloppe	35
II.7. Conclusion	36
Chapitre III : Matériels utilisés et plan expérimental	37
III.1. Introduction	37
III.2. Matériels utilisés	37
III.2.1. Machine outil	37
III.2.2. Matière à usiner	38
III.2.3. Outil de coupe utilisé	39
III.2.4. Appareillages de mesure	40
III.2.4.1. Mesure des efforts de coupe	40
III.2.4.2. Mesure des accélérations	41
III.2.4.3. Mesure de l'usure frontale	42
III.2.4.4. Mesure de l'usure en cratère.....	43

III.2.4.5. Mesure de la rugosité	43
III.2.5. Banc d'essais	44
III.3. Plan expérimental	46
III.4. Conclusion	51
 Chapitre IV : Surveillance de l'usure des outils de coupe par les indicateurs scalaires	 52
IV.1. Introduction	52
IV.2. Résultats de l'impact des conditions de coupe sur l'usure et de la rugosité	52
IV.2.1 Evolution de l'usure en fonction du temps et de la vitesse de coupe	52
IV.2.2. Micrographies de l'usure VB et KT	56
IV.2.3. Evolution de la rugosité en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe	50
IV.2.4. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille	59
IV.3. Exploitation des signaux mesurés	63
IV.3.1. Force statique	63
IV.3.2. Force dynamique.....	63
IV.4. Evolution de la force statique en fonction de VB	64
IV.4.1. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure	67
IV.4.2. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure (cas des signaux des efforts de coupe)	67
IV.4.3. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure (cas des signaux d'accélération).....	73
IV.5. Conclusion du chapitre	74
 Chapitre V : Identification de l'usure des outils de coupe par les méthodes fréquentielle et multirésolution en ondelettes	 76
V.1. Introduction	76
V.2. Signaux des efforts de coupe	76
V.2.1. Analyse fréquentielle	76
V.2.2. Analyse multirésolution en ondelettes	81

V.2.2.1. Application détaillée de l'AMRO pour trois exemples des signaux (trois vitesses de coupe).....	82
V.2.2.2. Application de l'AMRO aux spectres des composantes des efforts de coupe	85
V.2.2.3. Mise en évidence du phénomène de broutage	92
V.3. Signaux des signatures de vibration (l'accélération)	94
V.3.1. Analyse fréquentielle	94
V.3.1.1. Signaux d'accélération radiale	94
V.3.1.2. Signaux d'accélération tangentielle	99
V.3.2. Analyse multirésolution en ondelettes	103
V.3.2.1. Application de l'AMRO aux signaux d'accélération	103
V.3.2.2. Cas d'une usure catastrophique de l'outil de coupe (Phénomène de broutage établi)	108
V.4. Conclusion du chapitre	109
Conclusion générale	111
Références bibliographiques	114
Annexes	117

Introduction générale

L'usure de l'outil de coupe représente l'un des facteurs majeurs le plus déterminant quant à la maximisation de la production et à la garantie de la qualité des produits manufacturés. En effet, l'usure de l'outil découle des sollicitations sévères que subit le tranchant à l'interface outil copeau. Celles-ci sont d'abord de nature physique mais aussi mécanique. Il s'agit de contraintes permanentes ou cycliques et d'actions de frottement en surface.

La dégradation de l'état de l'outil affecte aussi bien la qualité des surfaces usinées, les tolérances géométriques imposées, la tenue de l'outil dans le temps et engendre des efforts élevés qui ont pour effet d'augmenter la puissance de coupe et l'énergie consommée. En outre, une des conséquences graves d'une usure non contrôlée et brutale est l'arrêt du processus de coupe, affecte d'éventuelles casses de l'outil et une usure prématurée des organes mobiles de la machine outil et par voie de conséquence une baisse de la productivité et de la qualité des produits.

Ainsi la surveillance du processus de coupe est rendu nécessaire et fait appel à des méthodes de supervision des états d'outil très robustes et fiables. Ces méthodes sont basées le plus souvent sur la mesure des efforts de coupe, les signatures vibratoires et l'émission acoustique.

A cet effet, une technique rapide et fiable de traitement des signaux est très nécessaire et indispensable pour identifier l'usure de l'outil de coupe dans le processus d'usinage. Un système de surveillance on-line doit tenir compte de la nature complexe du processus de coupe, telle que le changement des paramètres de coupe, de l'hétérogénéité du matériau de la pièce et du matériau d'outil utilisé.

Dans notre travail, nous envisageons d'identifier et d'estimer l'usure des outils de coupe dans l'opération de tournage, en utilisant des techniques très efficaces basées sur le traitement des signaux des efforts de coupe et d'accélération avec diverses méthodologies, y compris, FFT et l'ondelette.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres, le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique illustrant un état de l'art détaillé sur les méthodes d'évaluation de l'usure des outils de coupe, à savoir les méthodes basées sur la mesure des efforts de coupe, les signatures vibratoires et autres méthodes.

Nous présentons dans le deuxième chapitre, une synthèse du formalisme mathématique des différentes méthodes d'analyse des signaux mesurés tels que : l'analyse statistique basée sur les indicateurs scalaires (kurtosis, facteur de crête, RMS,...), l'analyse spectrale, à savoir la transformée de Fourier rapide (FFT), la transformée en ondelettes (WT), en particulier l'analyse multirésolution (AMRO) qui permet de faire un débruitage des signaux mesurés.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les équipements utilisés pour la réalisation des expériences, ainsi que le plan expérimental. Pour mieux comprendre le système outil pièce machine, nous présentons dans ce chapitre les résultats des vibrations libres, dans le but d'identification des fréquences propre de ce système.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats des mesures, tels que les efforts de coupe, l'accélération en fonction de l'usure et la rugosité. On présente aussi la variation de la force statique calculée à partir des signaux dynamiques en fonction de l'usure. Nous présentons aussi dans ce chapitre la variation des indicateurs scalaires (analyse statistique des signaux mesurés) en fonction de l'usure en dépouille de l'outil.

Le cinquième chapitre représente la contribution principale de notre travail à l'étude du phénomène d'usure. Nous proposons de suivre l'évolution de l'usure en dépouille de l'outil de coupe par l'utilisation des techniques fiables et pratiques, telle que l'analyse fréquentielle, l'analyse multirésolution en ondelettes et l'analyse d'enveloppe.

Une conclusion générale et des perspectives d'amélioration de ce présent travail parachèvent ce mémoire.

Chapitre I

Bibliographie sur les méthodes d'évaluation de l'usure des outils de coupe

I.1. Introduction

La surveillance des outils de coupe a une grande signification dans les processus d'usinage moderne. Pour prévoir un éventuel endommagement de la pièce et de la machine outil, des techniques fiables de surveillance sont nécessaires pour fournir une réponse rapide en cas de dépassement de la limite d'usure imposée ou bien une rupture brutale de l'outil de coupe.

Certaines techniques qui ont été proposées s'appuient sur les méthodes de mesures directes, pendant que les méthodes de surveillance indirecte sont majoritairement utilisées. Les méthodes directes sont celles qui mesurent directement l'usure de l'outil par des méthodes optiques et radiométriques. Les méthodes indirectes mesurent d'autres facteurs qui sont la cause de l'usure d'outil. Les mesures les plus fréquemment utilisées dans l'environnement de l'usinage industriel sont :

- Les efforts de coupe.
- Les signaux vibratoires (signal d'accélération).
- L'émission acoustique (AE).
- D'autres méthodes font appel aux lois de la physique : l'analyse des déformations et des contraintes mécaniques, la mesure du courant électrique et de la puissance du moteur.

I.2. Forces de coupe

La variation de la force de coupe peut être corrélée à l'usure des outils. Dans la pratique, l'application et l'interprétation de ce paramètre a été exploité diversement aussi bien pour l'étude des caractéristiques dynamiques du signal de forces de coupe que pour l'interprétation de sa relation avec des niveaux d'usure des outils de coupe du fait que la force augmente considérablement lorsque l'usure de l'outil augmente.

Les TCMS basés sur les mesures des forces de coupe existants fonctionnent typiquement indépendamment des niveaux absolus de force en mesurant le changement relatif de la force qui se produit pendant qu'un outil neuf s'use ou quand il

se casse. L'expérience a montré que les trois composantes de la force de coupe (figure I.1) répondent différemment aux diverses formes d'usure se produisant sur l'outil [Dim'00].

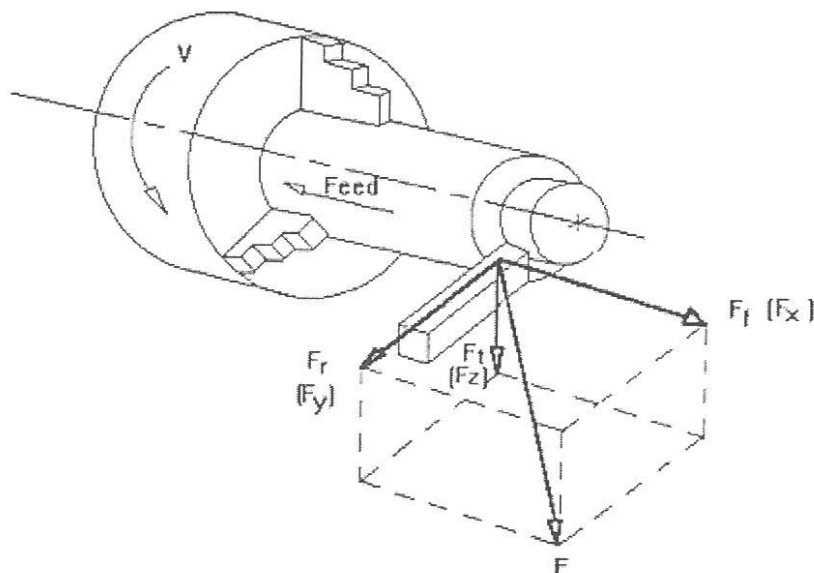


Figure I. 1 : Composantes de la force de coupe sur un point d'un outil pendant
L'opération de tournage

Dimla [Dim'00] a entrepris une recherche expérimentale étendue et raffinée sur le développement d'un système de surveillance en ligne de l'usure des outils pour des opérations de tournage en utilisant des mesures des efforts de coupe associées avec des signatures vibratoires. Un banc d'essai expérimental se composé d'un tour avec un dynamomètre a été employé pour extraire des signaux des efforts de coupe. Des essais de coupe discontinus ont été conduits en utilisant des plaquettes de type P15 et P25 pour usiner un acier allié de type E24. La longueur de la bande d'usure en dépouille VB, de déformation plastique et d'entaille ont été mesurées. Les composantes statiques et dynamiques prélevées de la force de coupe ont été extraites à savoir, composantes moyennes et respectivement vibratoires et analysées dans les deux domaines temporel et fréquentiel dans lesquels des caractéristiques sensibles à l'usure d'outil ont été identifiées. Le domaine temporel a permis d'établir la nature et le niveau du changement de la magnitude de la force statique tandis que l'analyse fréquentielle a permis de montrer la réponse de la signature de la force dynamique aux conditions de coupe aussi bien que l'augmentation des niveaux d'usure. La progression graduelle de l'usure d'outil a été bien observée dans le domaine fréquentiel, pendant que certaines fréquences ont reflété les changements dynamiques

de force. Globalement, l'usure en dépouille et l'usure par déformation plastique ont été retenues comme indicateurs plus significatifs que l'usure en entaille.

Poulachon, Moisan et Jawahir [Pou'01] ont proposé un modèle sous une forme généralisée du modèle de Taylor permettant la prévision de la tenue de l'outil en fonction de coupe et de la dureté de la pièce. Une observation notable de cette recherche est que l'usure en dépouille de l'outil de coupe a un grand impact sur la qualité des pièces usinées. A cet effet, ils ont effectué des essais d'usinage pour étudier la force de coupe et la progression de la rugosité de surface avec l'utilisation de PCBN revêtu par TIN et un outil non revêtu. Après l'analyse, ils ont conclu que le mécanisme principal d'usure des outils de PCBN est l'abrasion par les particules dures de la pièce et l'abrasion de l'outil de coupe dépend de la nature des carbures, de la taille, de leur répartition. En outre, l'utilisation du revêtement TIN améliore l'usure de l'outil et sa tenue.

Weihong, Weigno, Obikawa et Shirakashi [Wei'05] ont conçu un algorithme rapide de transformée par ondelettes basé sur une paire du filtre de miroir de quadrature (QMF). Le dispositif est composé d'une jauge de contraintes coincée sur l'outil de coupe, le signal de force de coupe prélevée et rassemblé par un analyseur de Hitachi FFT, en employant une arête avec une usure en dépouille rectifiée artificiellement. Des essais, au nombre de 1620, ont été effectués à des vitesses de coupe, d'avance et profondeur de coupe, pour des valeurs d'usure variables. Ils ont constaté deux fréquences principales : le premier mode lié à la fréquence naturelle de l'outil dans la direction d'avance et le second mode lié à la fréquence de torsion de l'outil. L'analyse de Fourier a montré qu'il y a une augmentation de la force de coupe en fonction de l'usure d'outil progressive. Dans l'analyse en ondelette, ils ont présenté un dispositif variable des coefficients d'ondelette $d(j,k)$, représentant le multirésolution des signaux de force d'avance pour les mêmes conditions de coupe. Les résultats ont montré les corrélations entre les variations des coefficients d'ondelettes et l'usure d'outil progressive pour différentes profondeurs de coupe et vitesses de coupe. Après le calcul, ils ont conclu que la transformée par ondelette est rapide de 7.2 fois que la transformée de Fourier.

Choi, Kwon et Chu [Cho'99] ont combiné l'émission acoustique et les efforts de coupe dans leur exploration pour développer un TCMS en temps réel pour des opérations de tournage. Les données enregistrées ont été analysées à l'aide

d'algorithme spécifique. Ce qui a permis de mettre en évidence l'apparition d'un grand éclat d'EA, correspondant à la rupture d'outil.

Qian et Hossan [Qia'07] ont développé une simulation numérique avec logiciel basé sur la méthode des éléments fini (FEA), de l'usinage orthogonal des vitesses élevées pour étudier le procédé de finition de TD en fonction de la vitesse de coupe, avance, la géométrie de coupe, et la dureté de la pièce. Ils ont étudié les relations entre la force de coupe et la force d'avance avec les différents paramètres standard de la coupe. L'analyse a conclu que la force de coupe est la plus grande composante en TD. Les résultats des simulations sont comparés aux résultats expérimentaux rapportés dans la littérature, ils ont prouvé son efficacité.

Ghasempoor, Jeswiest et Moore [Gha'99] ont employé une combinaison statique et dynamique des réseaux de neurone avec l'apprentissage en ligne et hors ligne de la force de coupe employée en tant que signaux de diagnostic. Les essais ont été réalisés en temps réel avec différentes conditions de coupe. Cependant, l'exactitude de la prévision d'usure n'était pas la même pour chacune des trois composants d'usure. Les prévisions d'usure en cratère étaient moins précises en raison des effets d'opposition des composants d'usure en cratère et l'usure en dépouille sur des composantes de force de coupe. Ils ont effectué un programme pour l'exécution du système d'évaluation d'usure en ligne. Ce programme contrôle l'acquisition des données et la formation en ligne des réseaux de neurones NN2. Les résultats ont montré que l'usure en cratère est le mode dominant de l'usure en raison de la forme de copeau.

Cemal, Yahya [Cem'05] l'installation expérimentale développée dans cette recherche se compose d'un dynamomètre, un ordinateur individuel avec un logiciel C++ développé dans l'environnement Windows et une pièce en acier AISI 1050, des outils en carbure de Tungstène revêtu et non revêtu de type OIN P25. Des mesures des forces de coupe et le calcul de valeur de sortie pour indiquer l'usure de l'outil avec un système d'alarme. Les résultats expérimentaux ont prouvé que seulement les variations de la force de coupe diminuent uniformément quand l'outil se casse, seulement les variations de la force de coupe sont considérées, l'augmentation de l'effort de coupe due à l'usure en dépouille jusqu'à la casse, le taux d'augmentation de l'effort de coupe est calculé 28% pour (WC) et 38% pour (TIC+AL₂O₃+TIN). A cet effet, le but de cette recherche est de développer un système de surveillance en temps réel de détection de l'endommagement brutal des outils de coupe.

Devillez, Schneider, Dominiak, Dudzinski et Larrouquere [Dev'07] ont effectué des essais de coupe sur un tour à commande numérique équipé d'un ordinateur avec dynamomètre de type KISTLER 9121B permettant de mesurer la force de coupe et la force d'avance. Un microscope à balayage électronique est utilisé pour observer les modes d'usure pendant l'usinage à sec de Inconel 718 avec des outils de carbure revêtu. Le mécanisme d'usure développé pendant les essais est observé sur la face de l'outil de coupe et en dépouille de plaquette revêtue qui mesurée. Ce qui résiste très bien aux conditions de coupe. Ils ont conclu qu'il existait une forte corrélation entre l'évolution de la force de coupe et l'usure de l'outil de coupe. En outre, la puissance de la broche augmente de manière significative à la fin de la tenue de l'outil et l'usure abrasive en dépouille est clairement évident sur le nez d'outil plus un écaillage de l'arête de coupe important était montré.

Dans le travail de Jae-seobkwak [Jae'06], emploie la décomposition discrète de l'ondelette pour détecter la rupture de l'outil basé sur l'utilisation du signal de force de coupe considéré comme la plus sensible à l'usure de l'outil. Il a proposé une méthode de débruitage qui est plus efficace que FFT. Des essais de coupe ont été effectués sur un matériau de type SM45C sans traitement thermique en utilisant une forme spéciale de la pièce pour augmenter la force de coupe à chaque étape pendant le processus de coupe. Les résultats de la décomposition de l'ondelette du premier au quatrième niveau ont montré que les signaux des forces de coupe étaient clairs. Au début de défaillance de l'outil, les coefficients d'approximation du signal de force de coupe ont augmenté soudainement et il pourrait observer dans les coefficients de détail que le phénomène de vibration de broutement s'est produit juste avant la rupture de l'outil.

Jemielniak et Otman [Jem'98] ont employé un algorithme de traitement statistique pour identifier quelques caractéristiques, telle que la racine carrée moyenne RMS, le Skew (S_B) et le Kurtosis (K_B) du signal d'EA dans la détection de l'endommagement brutal des outils de coupe. Des mesures des efforts de coupe enregistrées simultanément ont été employées comme signaux de référence pour indiquer le moment ou la défaillance s'est produite réellement. L'inspection des résultats d'essai a montré que le Skew et le Kurtosis peuvent être de meilleurs indicateurs de défaillance brutale de l'outil que les valeurs du RMS.

Yahya et Camal cakir [Yah'05] ont employé l'analyse par éléments finis (FEA) des outils de coupe lors d'une opération de tournage dur basée sur les variations des forces de coupe issues de l'usinage d'une pièce AISI 01 (60HRC) avec une plaquette de coupe de WC non revêtu de type DNMG 150608. Les résultats de l'analyse en

statistique ont aidé de découvrir les régions où les valeurs des contraintes et de déplacement sont maximums. Ces régions servent à déterminer les zones les plus critiques. En outre, les fréquences et la forme des modes des structures d'outil de coupe avec les déplacements relatifs maximum dans ces régions sont déterminées par l'analyse modale qui sont importants dans la conception d'un modèle. Ceci peut également être un point essentiel pour l'analyse de la réponse harmonique. Les réponses 'pic' et les trois premières formes de modes sont identifiées plus les fréquences qui sont employées pour déterminer les forces critiques. Les déplacements et les contraintes obtenus à partir de l'analyse harmonique sont évalués avec les sollicitations du matériau. Après analyse des résultats, ils ont constaté que le déplacement maximum surgit au deuxième mode et à la fréquence normale de 13,835 Hz. Cependant, la fréquence normale qui est la cause de la rupture de l'outil est de 22,150 Hz.

Tahmi [Tha'06] a proposé une approche méthodologique pour l'optimisation d'une configuration d'un réseau de neurones, adaptée à la surveillance en ligne de l'usure des outils de coupe dans une opération de tournage. Une application pratique a été implémentée sous Matlab et permet d'introduire les signaux des efforts de coupe issus d'un usinage d'une pièce en acier allié (E24) avec une plaquette de type P25. Les résultats des simulations obtenus mettent bien en évidence les performances techniques de la méthode proposée avec notamment un taux de réussite de 92,83%. En outre, l'utilisation des efforts de coupe comme paramètre d'entrée aux réseaux de neurones afin de prédire l'usure d'outil de coupe a prouvé son efficacité.

Blum et Inasaki [Blu'90] ont effectué des essais de coupe expérimentaux pour déterminer entre autres, l'influence de l'usure en dépouille sur la génération des signaux d'EA. Ils étaient particulièrement intéressés par l'utilisation du mode d'EA, un paramètre décrivant les caractéristiques du processus de coupe. Ils ont entrepris des expériences dont l'EA et les forces de coupe ont été enregistrées pour des outils neufs. L'analyse a permis d'étudier les effets des conditions de coupe sur les caractéristiques d'EA et l'usure en dépouille de l'outil. L'inspection des graphes obtenus du mode de l'EA et efforts de coupe en fonction de l'usure en dépouille pour différentes vitesses de coupe a montré l'existence d'une corrélation entre le mode de l'EA et l'usure en dépouille. Une bonne corrélation a été obtenue avec les forces de coupe car leurs pentes étaient sensiblement plus faibles, comparées au mode de l'EA dont les pentes étaient approximativement linéaires. Ceci se traduit par la sensibilité de

la longueur de la bande d'usure en dépouille par rapport au mode de l'EA. Cependant, ils ont conclu que l'extraction d'une telle information du signal de l'EA était difficile.

I.3. Signatures vibratoires

Les vibrations sont générées par des variations cycliques des composantes dynamiques des forces de coupe. Habituellement, ces mouvements vibratoires commencent comme de petits broutements responsables des dentelures sur la surface finie et des irrégularités d'épaisseur du copeau puis progressent, ce qui est venu pour se nommer généralement 'vibration'. Les vibrations mécaniques résultent généralement des mouvements périodiques des ondes. Suivant la nature du signal vibratoire résultant du processus de coupe, on distingue plusieurs types de vibration à savoir, mouvement libre, forcé, périodique et aléatoire. Il est difficile de réaliser une mesure directe des vibrations. Par conséquent, des paramètres relatifs tels que, le taux auquel les forces dynamiques changent par unité de temps, sont mesurés.

Liang, Kwon et Chiou [Lia'04] présentent une recherche systématique sur l'évaluation analytique de l'effet de l'usure en dépouille de l'outil de coupe sur la stabilité d'usinage dans une opération de tournage basée sur l'analyse de la bande de fréquence (RMS) des signaux d'accélération et de la force de coupe. Des essais expérimentaux ont été réalisés, en quatre séries, avec un outil neuf et trois outils usés de différentes longueurs d'usure en dépouille ont été étudiés. A travers leur recherche, ils ont mis une simulation complète de l'évolution de l'usure pour la comparer avec les essais expérimentaux. Les résultats indiquent une bonne concordance entre les données expérimentales et la prévision théorique.

Chelladurai, Jain et Vyas [Che'07] ont créé ou employé l'usure en dépouille artificielle avec le procédé d'usinage de décharge électrique (EDM) pour développer un système de surveillance de l'état de l'outil de coupe lors d'une opération de tournage basée sur les données de vibrations et les jauges de contraintes. Ils ont utilisé des plaquettes de carbure revêtu avec et sans usure pour usiner l'acier de type EN-8. Les données acquises ont été utilisées pour développer un modèle artificiel de réseaux de neurone et un modèle empirique par l'analyse de la variance (ANOVA) pour examiner le niveau de signification c-à-d déterminer les paramètres d'entrée les plus significatifs (V_c , f , a_p). L'allure des accélérations en fonction des différents paramètres a montré que la variation de l'usure de l'outil a augmenté avec l'augmentation de la profondeur de coupe et du taux d'avance. La variation du niveau de contrainte est également basse jusqu'à un niveau d'usure en dépouille de 0,3 mm, cela est dû à la petite

variation de la force de coupe. En outre, l'erreur croissante entre les résultats expérimentaux de régression est due aux erreurs de mesure dans les sondes à la fréquence de rotation élevée. L'analyse dans le domaine de fréquence a été effectuée par des réseaux de neurones (ANN), elle est assez bonne pour classer l'usure en dépouille à différents niveaux.

Scheffer et Heyns [Sch'01] ont proposé une stratégie de surveillance (TCMS), de l'usure des outils en diamant qui sont employés pour la fabrication de pistons d'aluminium, basée sur des mesures simultanées de vibrations et de contraintes. En utilisant des techniques sophistiquées de traitement des signaux. Les données du processus d'usinage ont été enregistrées avec deux sondes piézo-électriques de contrainte et un accéléromètre. Chaque canal est couplé à un analyseur DSPT siglab et un grand nombre de paramètres indicatifs de l'usure d'outil ont été automatiquement extraits des différentes parties des signaux originaux. Ces paramètres incluent le domaine du temps et de fréquence avec un paramètre extrait à partir de l'analyse de paquet d'ondelette. En outre, ils ont appliqué une approche des coefficients de corrélation pour choisir automatiquement les meilleurs dispositifs indicatifs de l'usure progressive de l'outil de diamant. Un autre dispositif (SOM) a été utilisé pour former et examiner un réseau de neurone. Les résultats ont montré une approche correcte 100% de la classification des données d'usure des outils.

Arnaud et Daniel [Arn'07] ont développé un logiciel permettant d'optimiser les conditions de coupe, de limiter le nombre d'essais et la surveillance du processus d'usinage. Ce logiciel est basé sur des modèles et des données expérimentaux qui ont été obtenues à partir des essais de coupe d'un tube en acier de type 42GrM04. En utilisant un tour CNC de type Ramo RTN30 et un outil spécial équipé d'une plaquette de cermet non revêtu. Ils ont proposé un système de mesure des déplacements, basé sur le principe de sonde de courant. Ils ont constaté trois signaux typiques : un signal stable défini par une amplitude proche de zéro et une surface usinée sans ondulation, un signal quasi instable qui présente une augmentation de l'amplitude après certaines périodes avec une surface usinée faiblement ondulée et un signal instable qui présente une amplitude très grande, le copeau est discontinu et la surface usinée est ondulée. Pour déterminer la limite entre les secteurs stables et instables dans l'espace (v_c , w), ils ont proposé une méthode de classification brouillée. En outre, un algorithme de traitement des signaux a été employé pour déterminer si un essai est stable ou instable.

La corrélation entre les signaux de vibrations et les forces de coupe détermine la nature dynamique du processus de coupe, rendant l'utilisation de ces paramètres du processus attrayantes dans le développement des TCMS. Le comportement statique est régi seulement par les forces et le moment (ou la torsion du support de l'outil). D'autre part, le comportement dynamique s'identifie par les vibrations et certains aspects de la force de coupe dynamique [Dim'00].

I.4. L'émission acoustique (EA)

Le signal de l'émission acoustique peut être divisé en deux types différents, signal continu et signal transitoire. Le premier est associé au cisaillement dans la zone primaire de l'usure, par contre le second résulte de la rupture du copeau ou bien de l'outil de coupe [Xia'02].

Moriwaki et Tobito [Mor'90] ont proposé une méthode basée sur la mesure et l'analyse des signaux d'EA. Le principe fondamental derrière leur méthode, conçue pour l'évaluation de la durée de vie d'outil était tel que, pendant la progression de l'usure de l'outil, le matériau d'outil change d'une sous-couche à une autre et émet des signaux d'EA qui pourraient être exploités pour déterminer la durée de vie de l'outil. Un banc d'essai expérimental a été installé et des essais ont été effectués là-dessus. L'EA et l'usure de d'outil (usure en dépouille et en cratère) ont été mesurées ainsi que la rugosité de la surface. Les valeurs du RMS d'EA enregistrées et les valeurs de l'usure (initiale, moyenne et tertiaire) ont été représentées graphiquement sur la même échelle uniquement pour la comparaison. L'inspection des graphes a montré une forte corrélation de l'amplitude du RMS de l'usure d'outil avec la progression de l'usure. D'autres analyses pour extraire les caractéristiques statistiques (moyenne, variance et RMS) ont été effectuées et représentées sur des graphes pour la totalité du cycle de coupe. La variance était plus sensible à l'usure de l'outil, car elle représente la plus grande amplitude dans la phase finale de la durée de vie de l'outil. Les données enregistrées ont été appliquées à un système de reconnaissance de formes. Ainsi, en mesurant l'EA émise par les plaquettes de l'outil de coupe, il était possible d'identifier et de prédire la durée de vie de l'outil.

Xiaozhi et Beizhi [Xia'07] ont proposé l'analyse en ondelette sur des signaux d'EA qui contiennent l'information potentiellement valable pour la surveillance de l'état de l'outil de coupe. Les signaux filtrés ont été prélevés à 4 MHz à l'aide d'un oscillographe de mémoire numérique relié à un PC. Tous les essais ont été traités et

analysés avec le logiciel Matlab. Les expériences ont prouvé que la norme des coefficients des signaux de l'outil neuf est beaucoup plus stable que celle de l'outil usé et peut être utilisé comme un critère de surveillance de l'état de l'outil de coupe.

Xiaoli [Xia'02] a employé l'AE comme technique pour des études quantitatives des processus de fabrication des outils. Il a proposé diverses méthodologies comme FFT, l'ondelette, transformée de gabor,...ect. Le contenu principal inclu est : l'évaluation de condition de l'usure de l'outil, y compris la classification de modèle, de méthodologie de GMDH, classificateur brouillé, réseau de neurone et fusion de sonde.

I.5. Autres méthodes et différents types de sondes utilisées

D'autres variétés de sondes ont été utilisées dans divers systèmes de surveillance en ligne de l'usure d'outil. Ces méthodes se résument principalement aux méthodes :

- Basées sur la mesure des contraintes et des déformations,
- De mesure du courant et puissance du moteur,

I.5.1. Les mesures de contraintes et des déformations

Zhou, Andersson et Ståhl [ZHO'95] ont proposé de surveiller les contraintes agissant sur le tranchant de l'outil pendant le processus d'usinage afin de prédire la rupture brutale de l'outil. Cependant, en raison des difficultés de la mesure des contraintes, une évaluation en ligne des contraintes basées sur la mesure des forces de coupe et des conditions de coupe a été utilisée pour remédier à ces problèmes. Ils ont conçu et mis en application un TCMS en temps réel basé sur un système informatique faisant appel à une unité d'acquisition de données permettant de déduire les contraintes à partir des forces de coupe mesurées. En surveillant le "facteur risque" défini comme un rapport entre les contraintes instantanées, les auteurs ont conclu qu'il était possible de prédire la rupture brutale des outils de coupe.

I.5.2. La mesure du courant et de la puissance du moteur

Xiaoli, Shen et Zhejun [Xia'99] ont employé un algorithme de détection de rupture d'outil. La combinaison de l'EA et les signaux de courant d'alimentation électrique avec un système de surveillance de rupture d'outil, dans le perçage en temps réel basé sur DWT, sont été employés pour analyser des signaux. Les résultats des expériences montre la fiabilité de la combinaison de 98,5% et les bonnes

possibilités de surveillance en temps réel de la méthodologie proposée pour détecter la rupture d'outil. En outre, l'exactitude de la classification entre l'état normal et l'état de rupture de l'outil.

La puissance, les forces de coupe, le couple et le courant sont tous des paramètres reliés entre eux, et dépendent entièrement l'un de l'autre. Il suffit donc de mesurer un de ces paramètres pour surveiller l'usure des outils coupants [Dim'00].

I.6. Fusion de sondes

Les sondes utilisées pour la surveillance des processus de coupe sont généralement conçues pour mesurer un paramètre désiré (par exemple, accéléromètres), et sont alors corrélées avec le paramètre d'intérêt (par exemple, signatures de vibration). La mesure d'un tel paramètre n'exclut pas la présence d'un bruit. Si le rapport "signal-bruit" est grand, alors la mesure rapporte une corrélation significative à la quantité mesurée. Une approche prometteuse dans des applications de type TCMS, utilise plusieurs signaux de sonde à partir de différentes sources pour détecter le même paramètre généralement nommé "fusion de sonde" [Dim'00].

La fusion de sonde permet d'atteindre les objectifs suivants :

- Augmenter la richesse en information du niveau d'usure contenue dans chaque signal.
- Augmenter la fiabilité du processus de surveillance, car la perte de sensibilité dans un signal peut être compensée par d'autres capteurs.

L'utilisation d'un seul signal dans le développement d'un TCMS n'identifie pas la complexité et la nature diverse du processus de coupe et de tels modèles de TCMS sont souvent moins robustes, incertains et généralement incapables de concevoir un système TCMS "complet" pour identifier l'usure ou la rupture brutale de l'outil. L'extraction de plusieurs caractéristiques à partir d'un seul signal simple ne constitue pas l'approche à multisondes.

IL est toutefois difficile d'établir une décision sur le signal de sonde et la durée de son emploi dans un TCMS. En outre, des précautions doivent être prises pour s'assurer que l'appareil de mesure du signal choisi ne perturbe pas ou n'interfère pas avec le processus d'usinage, et que l'instrumentation utilisée convient bien pour son utilisation dans un tel environnement.

I.7. Position du problème

La qualité de la pièce produite en usinage dépend principalement de l'état de l'outil de coupe utilisé. Ce dernier est exposé à l'endommagement au cours de l'opération d'usinage. A cet effet, l'usure des outils de coupe est un facteur important dans l'efficacité de production et de fabrication. Dans ce contexte, notre travail vise à identifier l'usure d'outil porte dans un premier temps sur la mesure des efforts de coupe et les signatures de vibrations de l'outil de coupe en fonction des paramètres du régime de coupe et dans un deuxième temps consiste à traiter ces signaux mesurés en utilisant des approches temporelles, fréquentielles et multirésolution en ondelettes. L'objectif de ces analyses est de pouvoir identifier et estimer l'usure de l'outil et de prévoir la rupture de son arrête de coupe, dans la mesure du possible.

I.8. Conclusion du chapitre

La synthèse des paramètres d'entrée, utilisés dans la conception des systèmes de supervision des états d'outils ont été étudiées, à savoir, force de coupe, signatures vibrations et autres mesures. En clair, les forces et les vibrations (accélérations) ont été considérées comme les paramètres les plus fréquemment utilisés. Ce chapitre contient donc une étude bibliographique sur les différentes méthodes de détection de l'usure des outils de coupe, une attention particulière est réservée à la force de coupe.

A travers cet aperçu, nous avons constaté également que la mise en application de la plupart des systèmes de supervision des états d'outils développés était difficile. Par contre, il est possible de développer un système capable de surveiller en ligne l'état d'un outil (usure, rupture) à partir d'expériences en identifiant leurs endommagements et leurs ruptures brutales.

Chapitre II

Surveillance de l'usure des outils de coupe par les méthodes temporelles et fréquentielles

II.1. Introduction

L'usure de l'outil est un phénomène complexe qui se produit durant les différentes phases du processus de coupe et cela de diverses manières. Généralement, l'usure des outils de coupe est considérée comme étant un des facteurs primordiaux qui affecte les processus d'usinage. La surveillance de l'état d'outil permet aux opérateurs de maximiser le produit et d'améliorer la qualité de celui-ci. Donc une technique rapide et fiable de traitement des signaux est très nécessaire et importante pour un système de surveillance du processus d'usinage.

Dans le cas d'une surveillance vibratoire dans le domaine temporel, des études ont montré le grand apport des indicateurs scalaires, tels que le kurtosis, le facteur de crête et la valeur efficace (RMS). A cause des effets de masque, dont les origines sont diverses, les impacts dûs aux défauts sont noyés dans les perturbations provenant du bruit de fond et d'autres constituants de la machine qui viennent polluer le signal et rendent la détection difficile, voire impossible. Les indicateurs scalaires étant limités, plusieurs méthodes de débruitage ont été proposées pour améliorer leur sensibilité. L'analyse spectrale basée sur la transformée de Fourier était depuis longtemps l'outil le plus utilisé pour le traitement des signaux émis par les systèmes mécaniques. Lors de la transformation au domaine fréquentiel, l'information du temps est perdue. Pour remédier à cet inconvénient, une nouvelle technique de traitement s'est généralisée ces dernières années bien qu'elle ait vu le jour au début du siècle. La méthode des ondelettes est sans doute un outil très efficace, elle permet une analyse adaptée à la fréquence du signal, ceci entraîne naturellement un gain dans la rapidité de traitement et dans la masse de données à conserver.

II.2. Surveillance des outils de coupe

Le dispositif de surveillance de l'outil de coupe prélève un signal représentatif de l'état de l'outil, le traitement de ce signal et la détection d'éventuelle anomalie. Ce fait dès que l'outil n'est plus dans les limites géométriques préalablement définies, ces limites se caractérisent par deux familles principales de défauts :

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

Plusieurs techniques de détection en surveillance ont été développées. Parmi ces méthodes, on cite les plus couramment utilisées dans un environnement d'usinage industriel : force de coupe, signatures vibratoires, l'émission acoustique (AE).

A cet effet, un dispositif de traitement et de mesure du signal est très nécessaire et important pour un système de surveillance en ligne des outils de coupe. Ce traitement est en fonction du capteur et de la qualité du signal prélevé.

II.2.1. Traitement des signaux

Le traitement des signaux est la discipline technique qui s'appuie sur les enseignements de la théorie du signal et de l'information, de l'informatique et de la physique appliquée. IL a comme objectif l'élaboration ou l'interprétation des signaux porteurs d'informations.

L'observation (mesure) des phénomènes physiques se fait à l'aide de signaux, dont la nature est complexe et peut être masquée par des perturbations indésirables (bruit de fond, parasites).

L'extraction des informations utiles incorporées dans ces signaux (par analyse, filtrage, détection, identification) et la présentation des résultats sous une forme appropriée à l'homme ou à la machine constitue l'une des tâches essentielles au traitement des signaux.

II.2.2. Identification de l'usure d'outil

Ce processus est d'une importance primordiale pour un système de surveillance en ligne, celui-ci permet de capter les signaux à partir d'un accéléromètre afin d'être employés par un système d'information discriminante (traitement des signaux avec le code MATLAB) pour prédire l'état de l'outil. La tâche d'identification s'effectue habituellement à l'étape de traitement des données préliminaires, effectuée à travers l'application de l'analyse statistique (RMS, Valeur crête, Energie, Kurtosis, Puissance, ...) et d'une analyse détaillée du signal (FFT ou par ondelettes).

II.3. Analyse statistique

Rappelons, avant de parler de l'analyse statistique, qu'il est tout à fait possible dans le cadre d'une surveillance permanente par des indicateurs globaux, d'utiliser l'accélération, la vitesse ou encore le déplacement. D'autres paramètres ont été largement utilisés, tels que le RMS, la valeur crête ou encore l'énergie vibratoire.

Ces indicateurs associent à un signal vibratoire, observé le plus souvent sous sa forme temporelle sur une durée déterminée en relation avec la cinématique de l'installation, un nombre ou un scalaire. Plusieurs indicateurs sont utilisés dans le suivi vibratoire, on peut citer à cet effet ; la valeur efficace ou RMS, la valeur crête ou une combinaison de ces deux grandeurs représentée par le kurtosis et le facteur de crête [Dje'08].

II.3.1. Valeur efficace du signal (RMS) et valeur crête

L'approche la plus simple de l'utilisation des indicateurs scalaires consiste au calcul de la valeur efficace, appelée encore RMS. Pour un signal $S(t)$ le RMS est donné par :

$$\text{RMS} = S_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} (S_k)^2} \quad (1)$$

Avec N le nombre d'échantillons du signal.

La valeur crête est aussi très utilisée notamment dans le suivi vibratoire car une augmentation de cette grandeur, donc de l'énergie vibratoire, est signe d'une éventuelle dégradation.

Ces indicateurs sont proportionnels à l'amplitude du signal vibratoire donc caractérisent seulement sa puissance et non pas sa forme. La nécessité d'avoir des indicateurs sensibles à la forme du signal. A cet effet, le kurtosis et le facteur de crête sont les plus utilisés pour la détection des défauts mécaniques.

II.3.2. Kurtosis

Le kurtosis vient du mot grec kurtosis qui veut dire aplatissement ou convexité en anglais. Dans certaines définitions, on le qualifie même par une mesure de la gaussienne d'une distribution. Comme le kurtosis d'une distribution normale est égale

à trois, cette valeur est devenue une référence pour évaluer le degré d'aplatissement d'une distribution par rapport à celle normale.

Mathématiquement le kurtosis d'un signal $S(t)$ est considéré comme étant une normalisation du moment statistique d'ordre quatre, il est égale au rapport entre ce même moment et celui d'ordre deux au carrée, soit :

$$Ku = \frac{M_4 S(t)}{M_2^2 S(t)} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} (S_k - \tilde{S})^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} (S_k - \tilde{S})^2 \right)^2} \quad (2)$$

Où M_4 et M_2 représentent respectivement le moment statistique d'ordre quatre et d'ordre deux, appelés encore l'écart type, N le nombre d'échantillons du signal et \tilde{S} sa valeur moyenne donnée par :

$$\tilde{S} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} S_k \quad (3)$$

II.3.3. Facteur de crête

Le facteur de crête est lui aussi très utilisé pour la détection des défauts mais pas autant que le kurtosis dont la sensibilité a été qualifiée plus meilleure. Mathématiquement le facteur de crête d'un signal $S(t)$ correspond au rapport entre sa valeur crête et le RMS, de ce fait il est exprimé par :

$$FC = \frac{S_{Crete}}{S_{eff}} = \frac{\sup_{1 \leq k \leq N} |S_k|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (S_k)^2}} \quad (4)$$

Avec S_{crete} l'amplitude crête.

Le facteur crête comporte l'avantage de détecter les défauts avant la valeur efficace. Le rapport reste sensiblement constant et augmente lorsqu'une dégradation apparaît alors que la valeur crête croît pendant que la valeur efficace reste à peu près constante. Si le défaut croît, la valeur crête augmentera jusqu'à une valeur asymptotique et la valeur efficace, quant à elle, augmentera à son tour, rendant le facteur crête sensiblement égal à sa valeur de départ (fig.II.1).

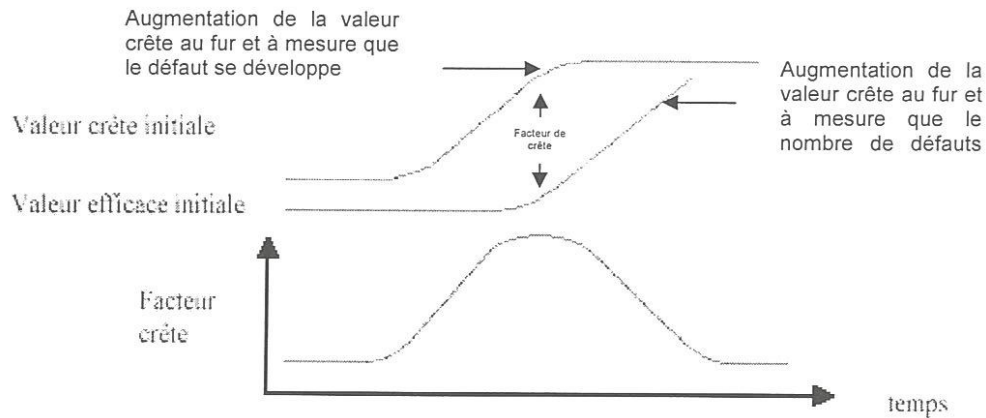


Figure II.1 : Evolution des valeurs crête, efficace et du facteur crête.

Un des travaux marquant sur l'utilisation de ces deux indicateurs est sans doute celui de Pachaud et Boulenger [Pac'98] qui les ont proposés pour l'analyse statistique des signaux vibratoires. En outre, plusieurs paramètres ont été largement utilisés, tels que l'énergie et la puissance. De ce fait ces deux nouveaux indicateurs seront égaux à :

$$E = \sum_{k=1}^{k=N} S_k^2 \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{k=N} S_k^2 \quad (6)$$

Ceci nous conduit à conclure que les indicateurs scalaires sont fonction du choix de ces mêmes paramètres. Six indicateurs scalaires seront utilisés à titre de comparaison : le RMS, le kurtosis, la valeur crête, le facteur crête, l'énergie et la puissance.

II.4. Analyse spectrale

Le signal mesuré est considéré comme une combinaison des réponses des composants constituant le système. Un signal quelconque $S(t)$ peut être décomposé en signaux sinusoïdaux élémentaires, l'analyse spectrale consiste à identifier la fréquence et l'amplitude de ces sinus, ce qui permet de tracer la représentation amplitude / fréquence de $S(t)$. Ainsi cette analyse permet de mettre en évidence les différentes périodicités dans le signal original. Pour obtenir le spectre $S(f)$ de $S(t)$, on applique la transformée de Fourier [Bre'02].

II.4.1. Transformée de Fourier

Comme l'indique son nom, la transformée de Fourier est une transformation : on passe d'une représentation d'un signal à une autre, elle permet donc à partir d'une représentation temporelle d'accéder à la représentation fréquentielle. Cette représentation fréquentielle est une image parmi d'autres possibles du phénomène étudié. La figure (II.2) montre la transformée de Fourier.



Figure II.2 : Transformation de Fourier [Mic' 01].

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

$$S(f) = TF \{s(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

Il est à noter que l'application inverse de la TF appelée transformée de Fourier inverse (TFI) permet le passage de la représentation fréquentielle à la représentation temporelle [Oua'93].

La TFI d'une distribution est alors définie par :

$$S(t) = TFI \{S(f)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{j2\pi ft} df \quad (8)$$

Dans le cas d'un signal physique, celui-ci est connu sur un temps de longueur finie et de façon discrète. Numériquement la transformée de Fourier discrète correspondante s'exprime :

$$S(k) = \sum_{j=1}^N s(j) w_N^{(j-1)(k-1)} \quad (9)$$

Avec $w_N = e^{(-2\pi i)/N}$

Elle est calculée à partir d'un signal discret de N points. Elle permet d'obtenir un vecteur de K point, K représentant la fréquence la plus haute, et étant égale à la fréquence de coupure du signal. La résolution en fréquence est de K/N pour une fréquence d'échantillonnage fixée. Plus le nombre de points du signal est grand, plus la résolution en fréquence est fine.

En règle générale, tous les signaux physiques remplissent les conditions nécessaires pour être traités par la transformée de Fourier. L'intérêt d'une telle décomposition est de pouvoir analyser ces signaux en fréquences et repérer ainsi leur contenu fréquentiel.

II.4.2. Transformation de Fourier rapide (FFT)

Comme citée précédemment, la transformée de Fourier permet d'obtenir le spectre d'un signal dépendant du temps : on passe d'une étude temporelle du signal à une étude fréquentielle de celui-ci avec sa transformée. Seulement, il existe une différence cruciale entre une fonction mathématique continue et un signal physique. L'information que nous avons d'un signal physique est nécessairement discrète, on ne peut en effet enregistrer celui-ci avec une fréquence infinie, en prenant tous les points. C'est cette discrétisation qui va permettre l'utilisation de la FFT. Cette transformée de Fourier rapide est un algorithme de calcul, une recette qui va permettre de minimiser le nombre d'opérations nécessaires pour l'établissement de la transformée de Fourier d'un signal discret [Dem'01].

En outre, la transformée de Fourier rapide sépare les fréquences paires des fréquences impaires lors du calcul d'une transformée de Fourier discrète pour diminuer le nombre d'opérations.

II.4.2.1. Signaux discrets

D'un point de vue mathématique, entre deux nombres de points réels quelconques, il existe une infinité non dénombrable de points. En outre, il faut bien

montrer la différence entre une fonction mathématique abstraite et un signal physique concret : il est impossible à un physicien de mesurer une infinité de points.

Lors de la mesure, un choix est donc fait : on ne mesure que certains points. Il y a donc une nette différence entre un signal physique et une fonction mathématique. Différence qui se marquera également dans le calcul de la transformée de Fourier discrète du signal.

II.4.2.2. Numérisation (Echantillonnage)

Le signal physique complet n'est pas étudié en pratique. En fait, seule la représentation numérique du signal est utilisée pour réaliser les calculs voulus. La numérisation du signal est une transformation discrète du signal physique considéré comme continu dans le sens mathématique du terme.

Le signal est donc vu comme une suite de points prenant des valeurs d'amplitudes différentes. En effet, cette numérisation du signal déforme sa nature et peut influencer sa signification [Jac'01].

L'analyse FFT est utilisée pour la description du signal temporelle dans le domaine fréquentiel avec une résolution fréquentielle constante sur une échelle linéaire de fréquence. L'aspect temps réel de l'analyse va dépendre de la vitesse des processeurs par rapport à la fréquence d'échantillonnage et le nombre de voies à traiter. Les paramètres suivants sont à retenir :

- **Fréquence d'échantillonnage** = F_e ou F_s , exprimée en Hz. Cadence à laquelle le signal est regardé par l'analyseur. $F_e = 1/\Delta t$, avec Δt = période ou intervalle d'échantillonnage en seconde (s).
- **Nombre de points temporels de calcul FFT** = N (1024 points par exemple). Nombre d'échantillons temporels utilisés dans le bloc mémoire pour l'algorithme FFT.
- **Résolution temporelle** = T . Exprimée en seconde (s). Longueur du signal nécessaire pour obtenir un spectre instantané ou longueur du bloc de calcul. $T = N \cdot \Delta t$.
- **Résolution fréquentielle** = B (Bandwidth) ou Δf . Exprimée en Hz. Résolution ou finesse d'analyse du spectre FFT. $\Delta F = 1/T = F_e/N$.

II.5. Représentations Temps – Fréquence

La limitation d'une analyse par la transformée de Fourier réside en réalité dans le fait qu'elle forme à choisir entre le temps et la fréquence ; on a soit une information

purement temporelle $S(t)$, soit purement fréquentielle $S(f)$, les deux représentations étant naturellement équivalentes en raison de l'unitarité de la transformation de Fourier. C'est la raison pour laquelle les analystes ont développé une méthode de représentation des signaux reposant sur deux paramètres : un paramètre a relatif à la fréquence et un paramètre b associé à la position temporelle. Si on souhaite de plus que la description soit linéaire, la représentation temps- fréquence d'un signal $S(t)$ sera donc de la forme :

$$s(x) \mapsto S(b, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{ba}(t) S(t) dt \quad (10)$$

Parmi les représentations possibles de ce genre, deux d'entre elles ont un intérêt particulier : la transformée de Fourier à fenêtre (*Windowed Fourier Transform - WFT*), parfois appelée "transformée de Fourier à court terme" (*Short Term Fourier Transform - STFT*), et la transformée en ondelettes (*Wavelet Transform - WT*). La différence entre les deux réside dans l'interprétation du paramètre a ; dans les deux cas, b agit simplement comme une translation temporelle [Jea'04].

II.5.1. Transformée de Fourier à court terme (STFT)

La transformée de Fourier est une représentation globale du signal. Elle ne permet pas d'analyser son comportement fréquentiel local, ni sa régularité locale. Dennis Gabor (1946) a adapté une extension de la transformée de Fourier qui consiste à multiplier la fonction à analyser $f(t)$ par une fonction $g(t)$ qui porte le nom de fenêtre.

Mathématiquement elle s'exprime par :

$$F_{fen}(\omega, s) = STFT(f(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g(t-s) e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

Cette transformation habituellement présentée dans le domaine temporel s'exprime également dans le domaine fréquentiel. La figure (II.3) montre la STFT.



Figure II.3 : Transformée de Fourier à court terme (STFT) [Mic'01].

La STFT fournit quelques informations au sujet de tous les deux domaines et à quelles fréquences un événement de signal se produit. Cependant vous pouvez seulement obtenir cette information avec la précision limitée ; et cette précision est déterminée par la taille de la fenêtre. Tandis que le compromis de STFT entre le temps et l'information de fréquence peut être utile, l'inconvénient est qu'une fois que vous choisissez une taille de fenêtre particulière pendant le temps, cette fenêtre est la même pour toutes les fréquences.

II.5.2. Les ondelettes

II.5.2.1. Qu'est-ce que c'est une ondelette ?

Une ondelette est une forme d'onde d'une durée limitée qui a une valeur moyenne zéro, ou les ondelettes sont des ondes localisées dans un temps court. La figure (II.4) montre l'ondelette.

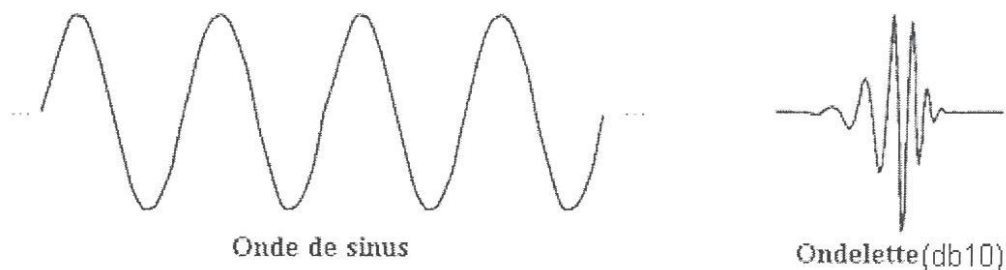


Figure II.4 : Ondelette

II.5.2.2. Introduction de l'ondelette

D'un point de vue historique, l'analyse d'ondelette est une nouvelle méthode, après la théorie de base de Joseph Fourier au dix-neuvième siècle. Fourier a créé les bases avec ses théories d'analyse de fréquence, qui se sont avérées énormément importantes et influentes.

L'attention des chercheurs a graduellement tourné de l'analyse basée fréquence à l'analyse basée échelle quand elle a commencé à apparaître clairement que les fluctuations moyennes de mesure d'une approche à différentes échelles pourraient prouver moins sensible au bruit.

La mention enregistrée de ce que nous appelons maintenant une " ondelette " semble avoir lieu en 1909, dans la thèse de Alfred Haar. On a la première fois proposé le concept des ondelettes sous sa forme théorique actuelle, Jean Morlet et l'équipe au Centre de théorie Physique à Marseille sous Alex Grossmann en France a proposé la première fois le concept des ondelettes sous sa forme théorique actuelle.

Les méthodes d'analyse d'ondelette ont été développées principalement par Y.Meyer et ses collègues, qui ont assuré la diffusion de ces méthodes. En 1980, J.Morlet proposa une nouvelle analyse pas différente de celle de gabor. Au lieu d'utiliser une fenêtre qu'on fait coulisser le long d'un signal, Morlet proposa d'utiliser des ondelettes qui sont des fonctions copies les unes des autres mais qui ne diffèrent que par leur taille. Cette technique possède le pouvoir de dilatation et de translation de la fonction analysante que la fenêtre ne possède pas. Un signal peut s'écrire alors sous forme d'une superposition de telles ondelettes décalées et dilatées. Les poids de ces ondelettes dans la décomposition (appelés coefficients d'ondelettes) forment la transformée en ondelettes.

L'analyse d'ondelette permet l'utilisation de long intervalle de temps là où nous voulons l'information de basse fréquence plus précise et des régions plus courte là où nous voulons l'information à haute fréquence. La figure (II.5) montre la transformée en ondelette.



Figure II.5 : Transformée en ondelette (WT)

Donc il faut noter que l'analyse de l'ondelette n'emploie pas à une région temps – fréquences mais plutôt à une région d'échelle – temps pour plus d'information sur le concept de l'échelle et du lieu entre l'échelle et la fréquence. En outre, la transformée en ondelette remplace les sinusoïdes de la transformée de Fourier par une famille de translations et de dilatations d'une même fonction appelée ondelette.

II.5.2.3. Débruitage

Les ondelettes fournissent une méthode assez simple pour extraire les signaux du bruit blanc (bruit existant à toutes les fréquences). La difficulté du débruitage réside dans le fait que le bruit peut aussi bien être de haute fréquence (analyses médicales), que de basse fréquence (bruit produit par un sous-marin), ou encore des deux natures à la fois (images bruitées). On transforme le signal en ondelettes, on élimine, à toutes les résolutions, les coefficients supérieurs à un certain seuil. Ensuite, on reconstruit le signal avec les coefficients restants. La réussite des ondelettes dans le domaine du débruitage peut s'expliquer comme suit : la transformation en ondelettes orthogonales (pas de redondance) comprime l'énergie du signal en un nombre assez restreint de gros coefficients. Cependant, elle ne peut pas "ranger" le bruit blanc. En effet, ce dernier est complètement désordonné, il ne peut donc se structurer dans les coefficients d'ondelettes, et ce, quel que soit le système de représentation. L'énergie du bruit est donc dispersée sur toute la transformée, et donne des coefficients petits. Il suffit donc d'éliminer ces petits coefficients, pour éliminer le bruit. Nous pouvons donc résumer ceci en disant que dans l'espace physique, le bruit masque le signal, dans l'espace des ondelettes, signal et bruit se dissocient.

II.5.2.4. Transformée en ondelettes

Une ondelette mère ψ est une fonction de base que l'on va traduire et dilater pour recouvrir le plan temps – fréquences et analyser le signal. L'ondelette doit être une fonction de moyenne nulle ; en d'autres termes, ψ doit être une onde. Ce qui

$$\text{s'écrit mathématiquement : } \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (12)$$

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

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (13)$$

II.5.2.5. La Transformée en ondelettes continue (CWT)

Pour bien comprendre la transformation en ondelette continue, on revient à considérer la transformation de Fourier. Le processus d'analyse de Fourier est Représenté par :

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (14)$$

Les résultats de la transformation sont des coefficients $S(\omega)$. Quand on multiplie ces coefficients par un sinuséide de fréquence ω on peut obtenir les composants de signal original. La figure (II.6) montre la transformée de fourier.

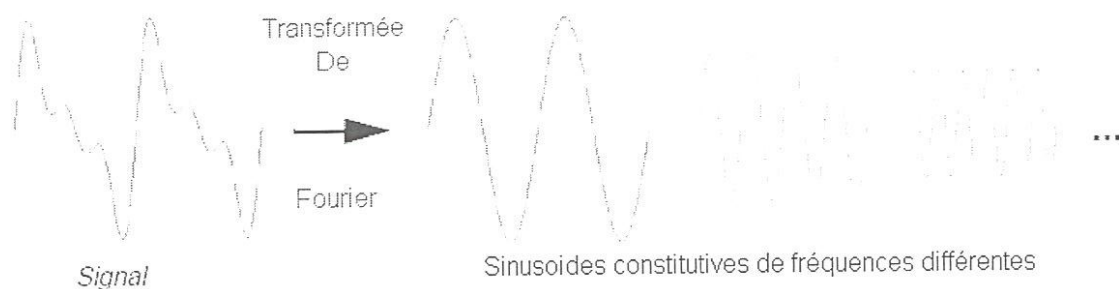


Figure II.6 : Transformée de Fourier.

De même, la transformée en ondelette continue (CWT) est défini comme suit :

$$C(\text{echelle}, \text{position}) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi(\text{echelle}, \text{position}, t) dt \quad (15)$$

Le résultat de CWT sont beaucoup de coefficients d'ondelette C , dont une fonction d'échelle et position. La multiplication de chaque coefficient convenablement par l'ondelette mesurée et translatée rapporte les ondelettes constituées du signal original. La figure (II.7) montre la transformée en ondelette.

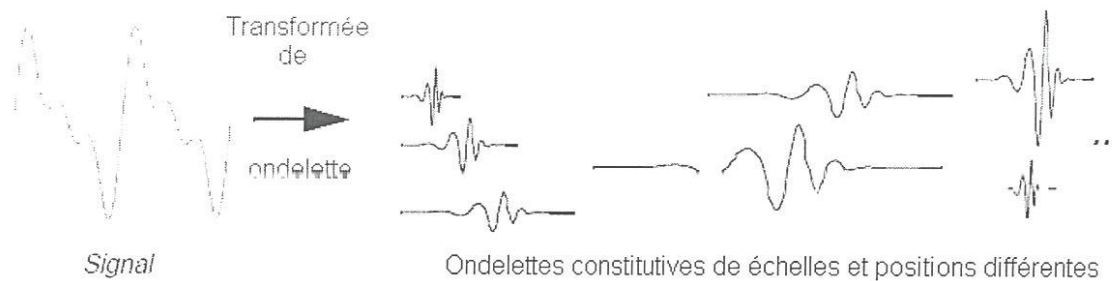


Figure II.7 : La transformée en ondelette.

En notant ψ^* la conjuguée de ψ la transformée en ondelette d'une fonction $s(t)$ est définie par :

$$CWT = S(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (16)$$

Cette transformée est dite continue, notée CWT (continuous wavelets transform). En pratique des algorithmes de calcul rapide existant dans plusieurs logiciels notamment Matlab.

Plus l'ondelette est étirée, plus la partie du signal est longue avec ce qu'il est comparé, et ainsi plus les dispositifs de signal étant sans bruits mesuré par les coefficient de l'ondelette.

II.5.2.6. La relation entre échelle et fréquence

Il y a une correspondance entre les échelles d'ondelettes et la fréquence comme indiquée par l'analyse d'ondelette (fig. II.8).



Figure II.8 : Échelle et fréquence.

- Basse échelle \Rightarrow ondelette compressée \Rightarrow changer détail rapidement \Rightarrow haute fréquence.
- Haute échelle \Rightarrow ondelette tirée \Rightarrow changer détail lentement \Rightarrow basse Fréquence.

II.5.2.7. La transformée en ondelette discret (DWT)

La transformée en ondelette continue ne peut être appliquée sur les signaux discrets. En plus, le calcul des coefficients à chaque échelle possible dans la transformée en ondelettes continue (CWT) et il peut générer trop de données. Donc, on peut choisir un sous ensemble des échelles et des positions par la transformée en ondelette discrète.

La transformée en ondelettes discrète (DWT) est une discrétisation de la transformée en ondelettes continue (CWT). En remplaçant respectivement a et b par 2^m et $n2^m$, avec m et n des entiers, son expression devient :

$$DWT(m, n) = 2^{\frac{-m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \psi^*(2^{-m}t - n) dt \quad (17)$$

Une version pratique de cette transformée, appelée analyse multirésolution en ondelettes (AMRO). L'avantage de cette analyse est double :

- Elle permet d'obtenir une décomposition temps fréquences d'un signal.
- Là où FFT nécessite $N \log_{10} N$ calculs, la multirésolution en nécessite $2N$ analyse.

II.5.2.8. Approximation et détail

Pour beaucoup de signaux, le contenu de basse fréquence est la pièce la plus importante, c'est ce qui donne au signal son identité. Le contenu à haute fréquence, d'autre part, nous donne la saveur ou la nuance. Par exemple, avec la voix humaine, si vous enlevez les composants à haute fréquence, les bruits de voix différents, mais vous pouvez comprendre ce qu'il a dit. Cependant, si vous enlevez assez des composants de basse fréquence.

Dans la transformation en ondelette, on dit souvent l'approximation et le détail. L'approximation est haute échelle, des composants de basses fréquences du signal. Les détails sont basses échelles, des composants de hautes fréquences. Le processus de filtrage est comme suivant : Le signal original S , traverse deux filtres complémentaires et émerge comme deux signaux. Donc, nous doublons les données que nous avons commencées. La figure (II.9) montre l'approximation et le détail.

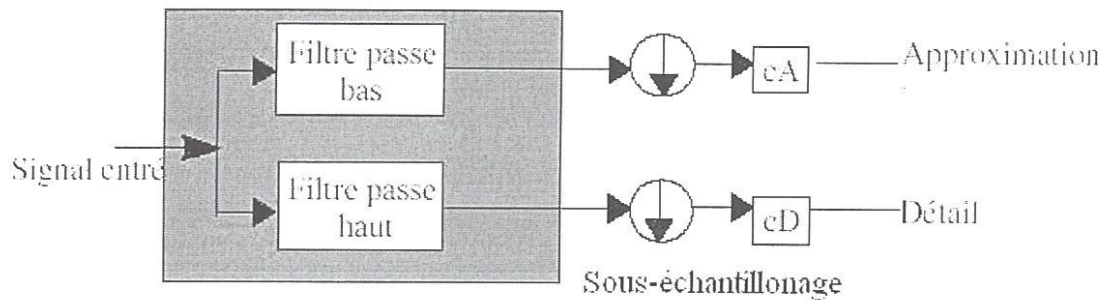


Figure II.9 : L'approximation et le détail.

II.5.3. Multirésolution en ondelettes (AMRO)

Les ondelettes permettent de représenter un signal, comme le font les fonctions cosinus dans l'analyse de Fourier. Elles autorisent une bonne localisation en temps et en fréquence, toute l'information se concentre sur très peu de coefficients. La décomposition se fait à partir d'un ensemble d'ondelettes de base obtenu à partir d'une ondelette 'mère' notée : $\psi(x)$. Cette base d'ondelette est obtenue par translations et

dilatation. L'analyse temps-fréquence par transformation d'un signal dans la base de Fourier est limitée (principe d'incertitude de Heisenberg). Il est impossible d'avoir une bonne localisation en temps et en fréquence, même en utilisant des méthodes à base de fenêtres glissantes à cause de la taille de la fenêtre d'analyse. L'AMR qui nous permet de s'affranchir de ces problèmes, le signal sera projeté sur des fonctions d'analyses pour toutes les résolutions 2^j qui composent le signal de longueur 2^j échantillons avec $j \in \mathbb{Z}$. En effet, comme nous le verrons par la suite, le signal d'approximation de résolution 2^j sera ensuite décomposé pour la construction du signal d'approximation et de détails de résolution $2^{-(j+1)}$. L'itération de ce processus conduit à un pavage temps-fréquence. L'analyse étant réversible sous certaines conditions, on peut reconstruire le niveau n d'approximation à partir des sous-bandes $n+1$. Après plusieurs itérations le signal original peut-être reconstruit. L'approximation d'une fonction à une résolution 2^j est déterminée par des moyennes locales sur 2^j échantillons [Luo'05].

L'analyse se fait à partir de dilatation et de translation de l'ondelette mère. Cette transformation décrit les détails d'un signal pour chaque niveau de résolution. Ces détails correspondent à la différence d'information entre deux niveaux de résolutions successives.

En 1989 ; un jeune mathématicien, Stéphane Mallat a eu l'idée de considérer l'analyse par ondelettes comme une décomposition du signal par une cascade de filtres, associant une paire de filtres à chaque niveau de résolution. La figure (II.10) représente un exemple de décomposition pour trois niveaux.

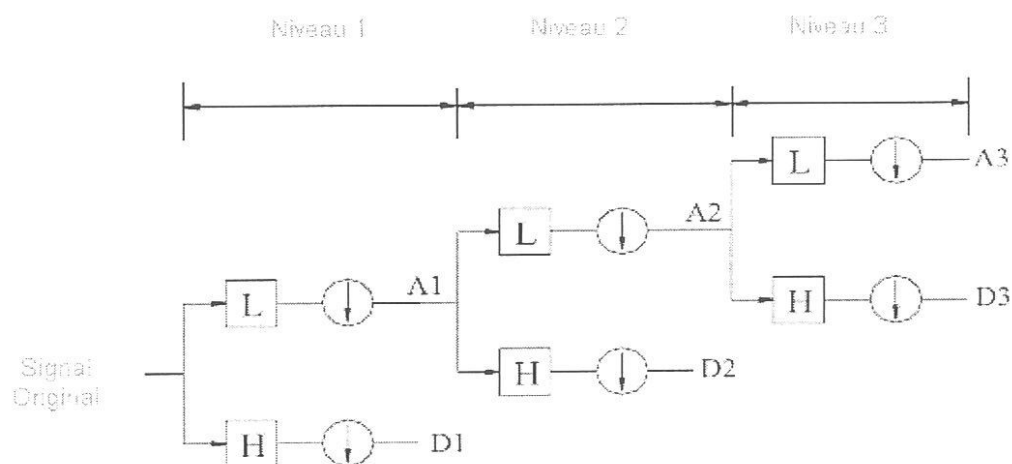


Figure II.10 : Décomposition en cascade pour $n=3$.

En général, la description du signal à cinq échelles différentes est suffisante pour décrire ce signal. La méthode est en accord avec le théorème d'échantillonnage : chaque fois qu'on double la fréquence, on double le nombre d'ondelettes qui échantillonnent le signal.

D'un point de vue pratique, cette méthode nécessite deux fonctions en plus du signal analysé. Une fonction appelée fonction d'échelle et une ondelette associée à cette fonction d'échelle.

A cette effet, elle consiste à faire passer le signal $S(t)$ dans deux filtres passe-bas (L) et passe-haut (H), deux vecteurs seront obtenus, CA_1 et CD_1 . Les éléments du vecteur CA_1 sont appelés coefficients d'approximations, ils correspondent aux plus basses fréquences du signal, tandis que les éléments du vecteur CD_1 sont appelés coefficients de détail, ils 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. La figure (II.11) représente l'arbre de décomposition de l'ondelette d'un signal.

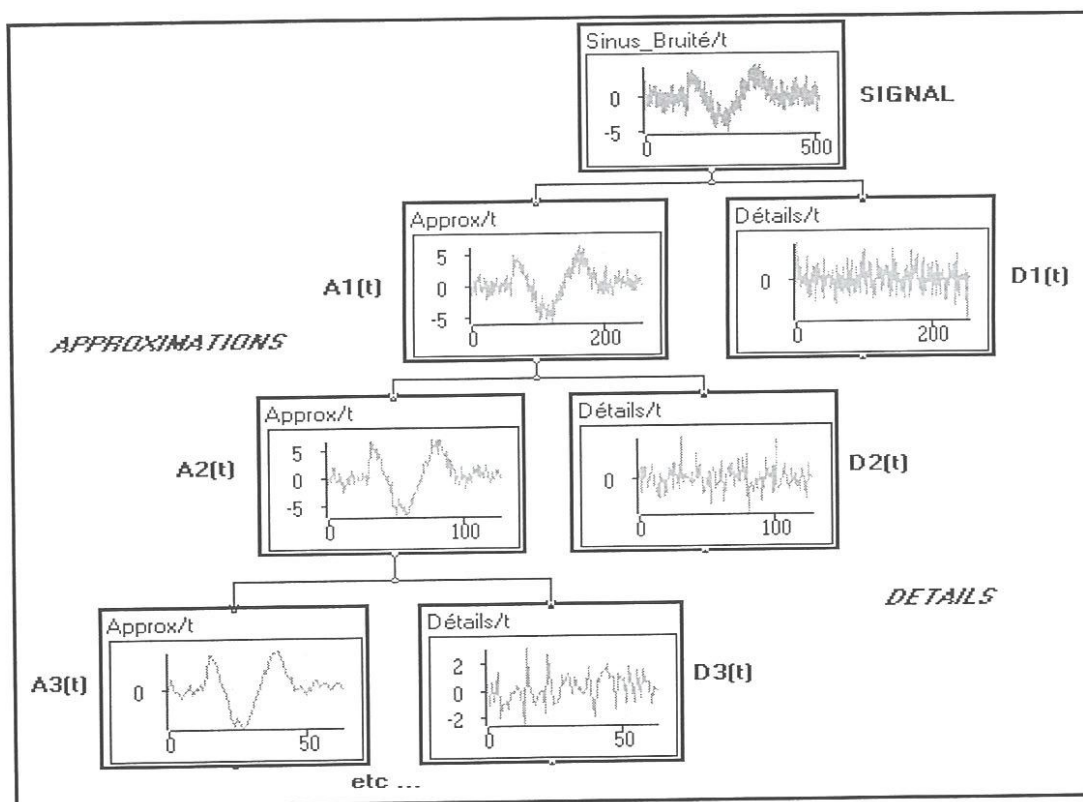


Figure II.11 : L'arbre de décomposition d'un signal.

L'application directe de AMRO est l'algorithme de Mallat. L'idée est de décomposer un signal S en sa moyenne A_1 (approximation) et en ses détails D_1 (détails).

On répète ensuite l'opération en prenant pour signal A_1 , puis A_2 ... On s'arrête quand on atteint la résolution souhaitée ou quand la décomposition n'est plus possible. Donc, le signal est cassé en plusieurs composants de basse résolution. C'est l'arbre de décomposition d'ondelette. L'autre partie est comment ces composants peuvent être assemblés dans le signal original sans perte d'information. Ce processus est appelé reconstruction ou synthèse.

Le processus de décomposition peut être répété n fois, avec n le nombre maximal de niveaux. 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 nouveaux à travers deux filtres de reconstruction (LR) et (HR). Deux vecteurs en résultent; A_j appelées approximations et D_j appelés détails, satisfaisant la relation:

$$\begin{aligned} A_{j-1} &= A_j + D_j \\ s &= A_j + \sum_{i \leq j} D_i \end{aligned} \quad (18)$$

Où i et j sont des entiers.

En outre, pour les spécialistes du traitement du signal, il n'existe que deux types de fonctions : le signal à analyser et le filtre qui l'analyse. Le filtre en cascade permet de visualiser chaque partie du signal avec une résolution adaptée à son échelle.

La contribution essentielle de ce travail est d'adapter la transformée en ondelettes discrète à l'identification de l'usure d'outil. Et ceci par le choix et l'optimisation de plusieurs paramètres influents : nombre optimal de niveaux, niveaux optimal, famille d'ondelettes.

II.5.3.1. Choix optimal du nombre des niveaux

En réalité beaucoup de chercheurs n'ont pas donné trop d'importance pour le choix du nombre de niveaux de la décomposition en ondelettes. La tactique utilisée était de prendre un nombre suffisamment grand pour ne pas perdre les informations utiles, d'un autre côté il ne faut pas le prendre si grand de telle sorte qu'on passe aux très basses fréquences et calculer donc des niveaux inutiles [Dje'08].

L'approche de ce choix est de ne conserver que les niveaux qui comprennent l'information. La fréquence maximale de l'approximation du niveau final $F_{MAX}(A_n)$ doit impérativement être égale ou supérieure à la fréquence d'usure de l'outil.

II.5.3.2. Choix du vecteur optimal de la décomposition

Le principe de ce choix est de permettre d'avoir un certain nombre de vecteurs constitués de détails, correspondant aux hautes fréquences et des approximations correspondant aux plus basses d'entre elles. Le vecteur optimal de la décomposition est, dans notre cas, celui qui permet l'identification de l'usure de l'outil avec la meilleure résolution possible, cela nous conduit à sélectionner celui le mieux filtré.

Dans beaucoup d'applications les auteurs étaient obligés de visualiser tous les vecteurs calculés et d'en déduire par la suite celui le mieux filtré. En outre d'autres chercheurs utiliseront le carré de l'énergie des coefficients d'ondelettes pour choisir le vecteur optimal issu de la décomposition par paquet d'ondelettes. Ce vecteur sera donc le détail ou l'approximation ayant le plus grand kurtosis.

II.5.3.3. Choix optimal d'une famille d'ondelettes

Plusieurs familles des ondelettes qui se sont avérées particulièrement utiles sont incluses dans la littérature. Telles que : Haar, Daubechies, Biorthogonal, coiflets, symlets, Morlet, Chapeau mexicain, Meyer. Les ondelettes sont choisies surtout en fonction du type d'analyse voulu et de leur régularité. Après avoir éliminer les familles inadaptées pour l'algorithme rapide de l'AMRO, notre choix s'est porté sur la famille des Daubechies (dbN), c'est parce que l'ondelette des Daubechies est simple et compact.

En outre, la famille des Daubechies semble mieux adaptée pour une telle analyse [Jae'05],[Wei'05],[Xia'07], mais le problème reste dans le choix de l'ondelette elle-même. La figure (II.12) montre les différentes familles de Daubechies.

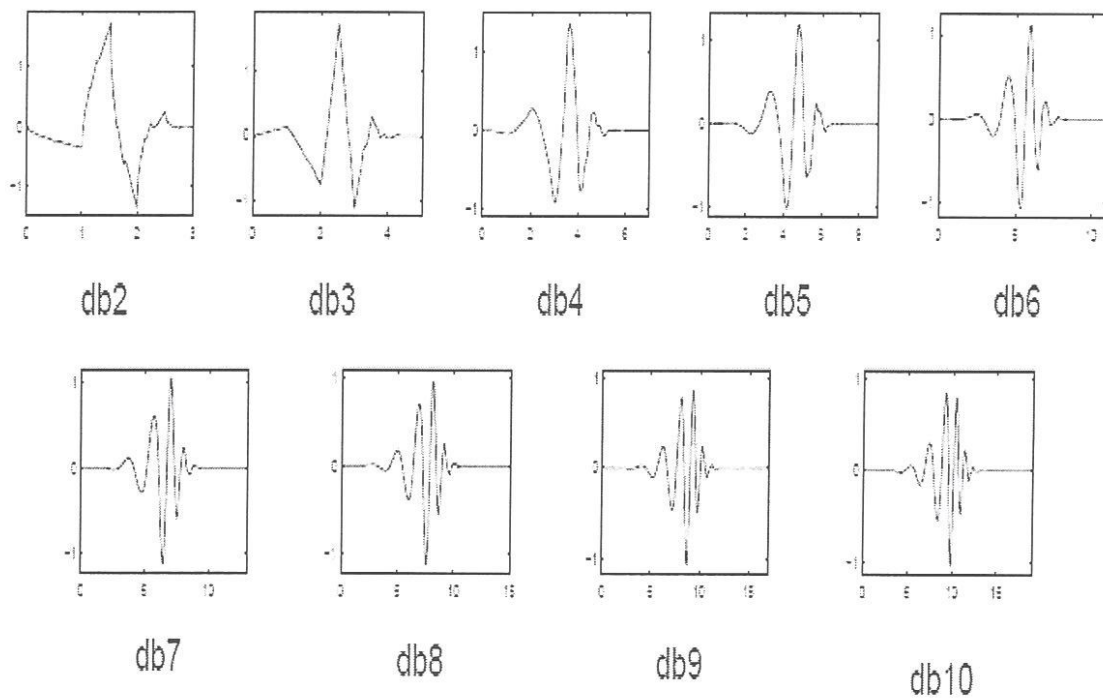


Figure II.12 : Les différentes familles de Daubechies.

II.6. Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est l'une des techniques de traitement de signal les plus performantes, dont les fondements remontent aux travaux de MacFadden qui lui a donné le nom de High Frequency Résonance Technique (H.F.R.T). Cette méthode consiste à filtrer le signal mesuré. Le signal filtré est ensuite traité par la transformée de Hilbert.

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

$$\begin{aligned}\tilde{s}(t) &= H(s(t)) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \\ \tilde{s}(t) &= s(t) * \frac{1}{\pi t}\end{aligned}\tag{19}$$

Le signal obtenu est souvent appelé enveloppe à partir de laquelle on peut calculer un spectre afin d'aboutir au spectre d'enveloppe.

Le spectre du signal enveloppe sera un spectre de raies si l'excitation est impulsionnelle périodique, ou un spectre de bruit si l'excitation est impulsionnelle aléatoire (usure, défaut...etc.).

II.7. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été consacré à une synthèse mathématique sur les différentes méthodes d'analyse, en premier lieu, l'analyse statistique comme le Kurtosis, valeur crête, facteur de crête, qui est en réalité un outil efficace, rapide et surtout simple pour une utilisation pratique. Dans le domaine de la mesure du bruit et des vibrations, on peut aussi s'intéresser à la valeur efficace (RMS) ou à la puissance d'un signal. En deuxième lieu, la transformée de Fourier est une des méthodes la plus utilisée aujourd'hui pour représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel. Cette représentation fréquentielle est une image parmi d'autres possibles du phénomène étudié.

A cet effet, nous proposons d'utiliser un nouveau moyen de traitement de signal. La transformée en ondelettes et l'analyse multirésolution (AMRO) en particulier, grâce à ses fabuleuses propriétés, permettra à notre avis le débruitage des signaux mesurés qui sont affectés par l'hétérogénéité de la structure du matériau de la pièce ; aussi que par la géométrie de l'outil de coupe et les conditions de coupe.

Chapitre III

Matériels utilisés et plan expérimental

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des moyens exploités dans la réalisation des expériences, afin de caractériser le comportement du couple (outil/pièce). Cela va consister en une présentation des différents équipements mis en œuvre pour la mesure des efforts de coupe et l'accélération en temps réel, qui servent au suivi de l'évolution de l'usure de l'outil de coupe. En outre, nous présentons la procédure expérimentale utilisée pour la planification et les conditions de réalisation des essais.

III.2. Matériels utilisés

III.2.1. Machine outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un tour à charioter et à fileter fabriqué par la société tchèque "TOS TRENCIN " modèle SN40 de puissance 6.6 kw sur la broche (fig.III.1). Les nombres de tours disponibles sur la machines comprennent entre 22.5 et 2000 tr/min. les avances disponibles sont : 0.08 ; 0.11 ;.....,6.4 mm/tr.

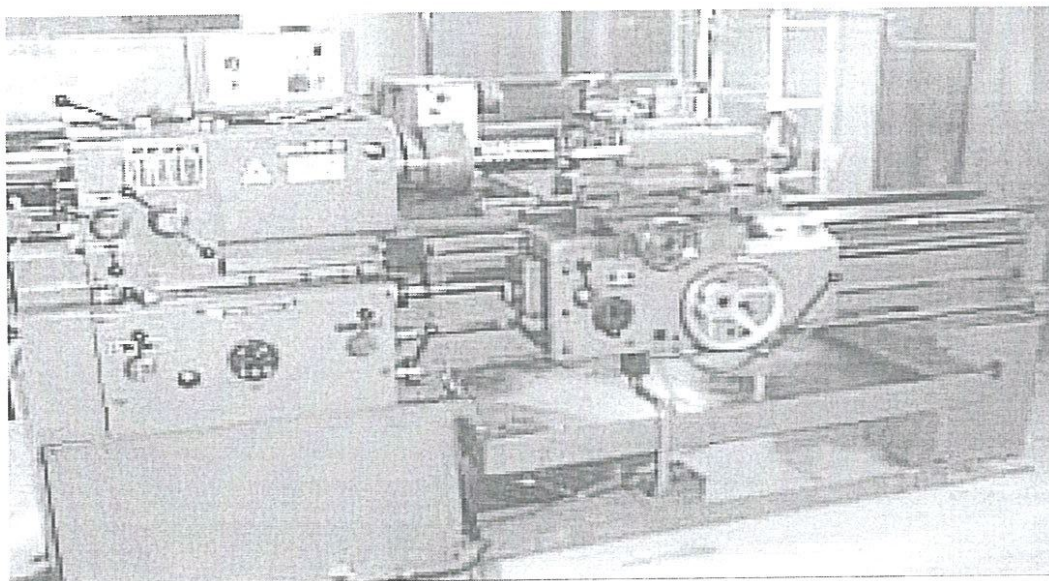


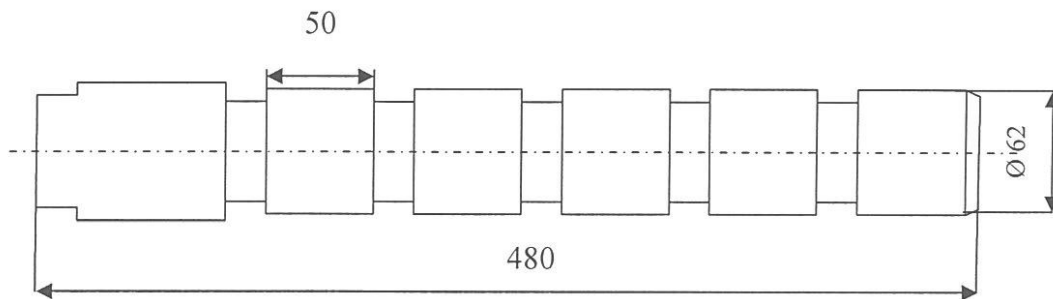
Figure III.1: Tour à charioter SN40.

III.2.2. Matière à usiner

L'acier utilisé dans notre expérience est le X200Cr12 (selon afnor Z200Cr12) c'est un acier à outil à haute teneur en chrome. Il a une excellente résistance à l'usure. Il est utilisé surtout pour la fabrication des matrices et poinçons de découpage et d'emboutissage, outils de découpe, instrument de mesure ...etc.

Pour les essais nous avons préparé des éprouvettes de diamètre $\varnothing 62$ mm et de longueur $L = 480$ mm. La figure (III.2) montre les dimensions et la géométrie des éprouvettes.

a)



b)

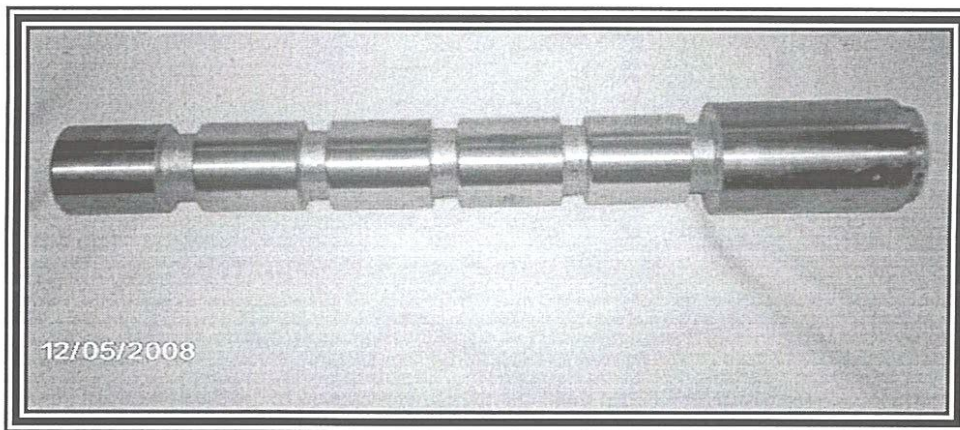


Figure III.2 : Dimensions et géométrie des éprouvettes utilisées.

a) Géométrie des éprouvettes. b) Photos des éprouvettes utilisées.

Les caractéristiques mécaniques et la composition chimique du matériau utilisé sont :

- caractéristiques mécaniques et physiques :

- Densité : 7,7 Kg/m³.
- Module d'élasticité : 21,10 MPa.
- Conductibilité thermique : 20 W/m.C°.

➤ composition chimique : la composition chimique de l'acier Z200Cr12 est présentée dans le tableau (III.1).

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

Tableau III.1: Composition chimique de l'acier Z200Cr12.

III.2.3. Outil de coupe utilisée

➤ Porte outil

Pour la réalisation des essais, nous avons utilisé un porte outil dont la plaquette amovible est fermement serré au moyen d'un fort élément de serrage. Une cale support en carbure, rectifié protège la plaquette utilisée en garantissant un contact entre la plaquette et la cale support.

Les caractéristiques géométriques du porte outil sont données sur le tableau (III.2).

Porte outil	χ_r°	α°	γ°	λ°	Section (mm ²)
CSBNR2525M12	75	6	-6	-6	25×25

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques du porte outil.

➤ Plaquettes

Les plaquettes utilisées sont amovibles de forme carrée (fig.III.4) à fixation par bride. Les informations relatives aux plaquettes de coupe sont données dans la figure (III.3).

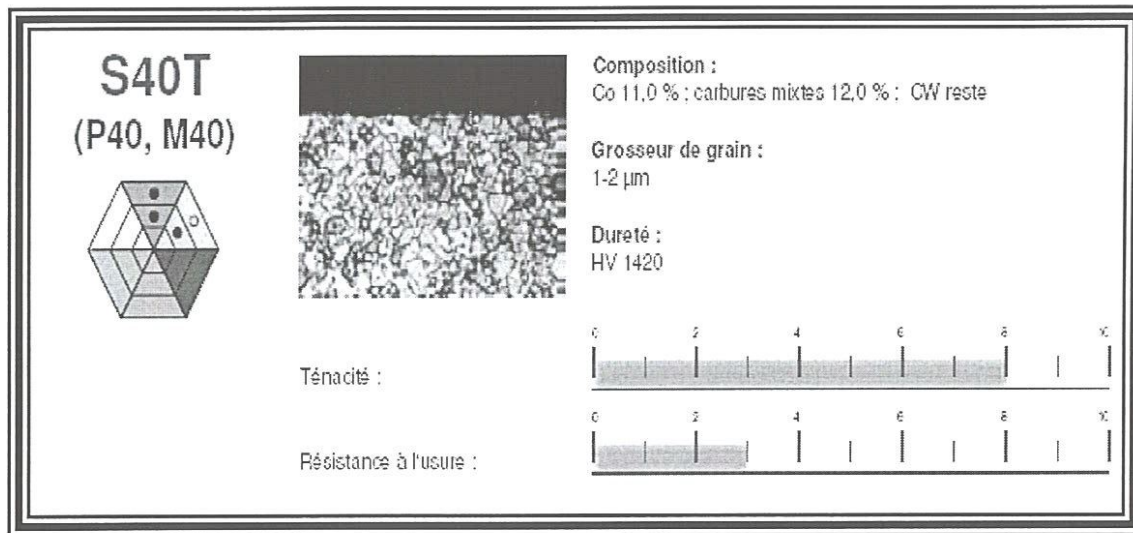


Figure III.3 : Description de la nuance S40T.

➤ S40T est un carbure non revêtu spécial pour un emploi à des vitesses de coupe inférieures à 80 m/min sur des aciers, même dans des conditions de stabilité défavorables.

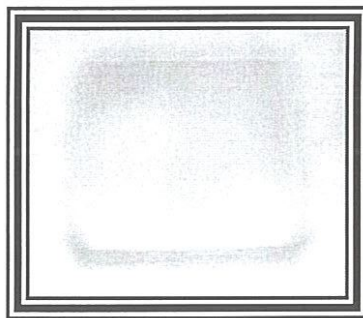


Figure III.4 : Plaquette de coupe utilisée.

III.2.4. Appareillages de mesure

III.2.4.1. Mesure des efforts de coupe

Les composantes de l'effort de coupe sont mesurées par un dispositif moderne dynamomètre (KISTLER), qui permet d'enregistrer l'intensité des effort de coupe en temps réel selon les trois directions principales de coupe. Ce dispositif comporte

plusieurs éléments dont on en cite : la plate forme, l'amplificateur de signaux, PC avec un logiciel de traitement de signal est utilisé pour exploiter les résultats et enfin un traceur pour tracer les courbes.

Le principe de la mesure est basé sur le phénomène piézoélectrique. L'outil est monté sur la plate forme, par contre les efforts occasionnés par la coupe sont transmis à travers le porte outil aux capteurs. En outre, la plate forme représente l'élément le plus intervenant lors de la mesure. Cette dernière est constituée de quatre capteurs en quartz à 3 éléments, qui sont assemblés sous haute précontraintes, entre une plaque de base et une plaque de recouvrement, formant un dynamomètre qui peut mesurer trois composantes en même temps. Un isolement thermique spécial est installé dans la plaque supérieure qui rend le dynamomètre largement insensible aux influences de température. Les forces agissantes sur la plaque lors de la coupe sont converties en charges électriques qui sont amplifiées par l'amplificateur de charge puis transmises à un PC grâce à la carte d'acquisition installée spécialement sur l'unité centrale. Un logiciel de traitement (DYNOWARE) qui permet l'affichage et l'enregistrement des trois composantes de l'effort de coupe produites lors du processus de tournage. Ces forces sont exprimées en trois composantes :

- F_x : Force axiale.
- F_y : Force radiale.
- F_z : Force tangentielle.

III.2.4.2. Mesure des accélérations

Les accélérations sont mesurées par :

➤ Un analyseur des signaux Bicanale (B & K 2035) qui a la possibilité de mémoriser 801 points de fréquence et 2048 points en temps. Donc, l'analyseur de spectres est l'outil de base de traitement du signal à des fins de diagnostic.

➤ Un accéléromètre piézoélectrique de type " BK4384 " dont la fréquence de résonance est de 35 KHZ. Il possède une très bonne linéarité et une large bande passante. Un capteur monodirectionnel est fixé par aimant ou goujon sur la paroi d'un bâti mesurera ces accélérations. En outre, la fixation du capteur sur la partie périphérique de l'outil de coupe peut avoir une réelle influence sur la qualité du signal recueilli.

Cette fixation joue un rôle important sur le résultat des mesures. La figure (III.5) montre une photo du matériel utilisé.

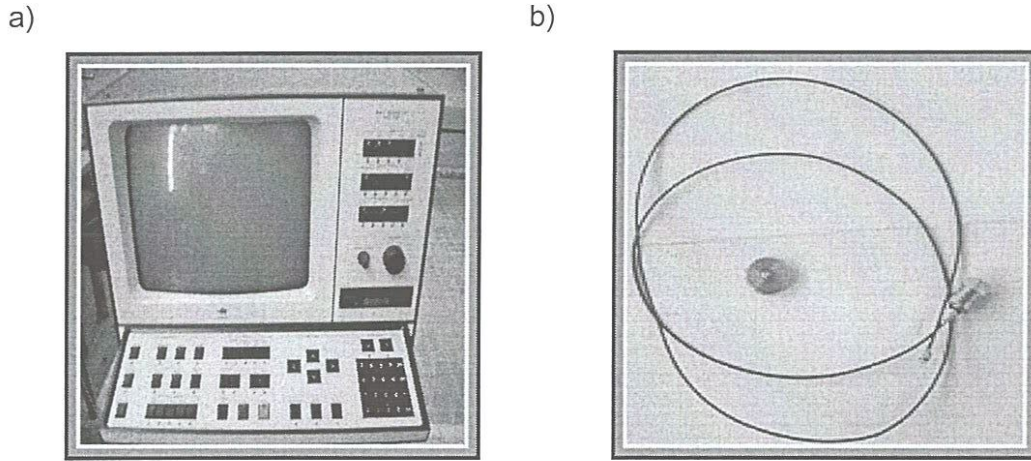


Figure III.5 : Dispositif utilisé pour mesurer l'accélération

a) Analyseur de vibration b) Accéléromètre.

III.2.4.3. Mesure de l'usure frontale

Pour mesurer l'usure de l'outil, nous avons utilisé un microscope optique HUND type WAD (fig.III.6). Ce dernier sert à mesurer les grandeurs de l'usure sur la surface en dépouille principale et la surface en dépouille auxiliaire. La plaquette est placée sous l'objectif du microscope sur une table à mouvements croisés, équipé de deux tambours ayant une précision de 0.001 mm.

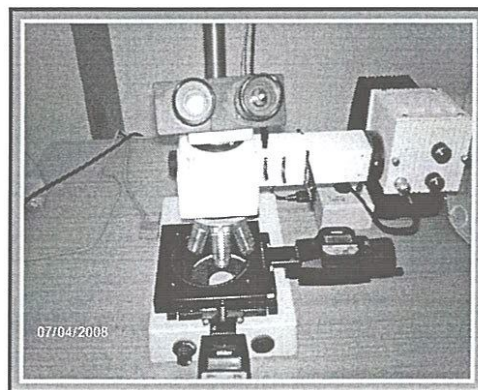


Figure III.6 : Microscope de mesure de l'usure frontale.

III.2.4.4. Mesure de l'usure en cratère

Le dispositif utilisé est un comparateur équipé d'une touche à pointe vive qui suit le profil du cratère et sa profondeur sera indiquée sur le cadran digital (Fig.III.7).

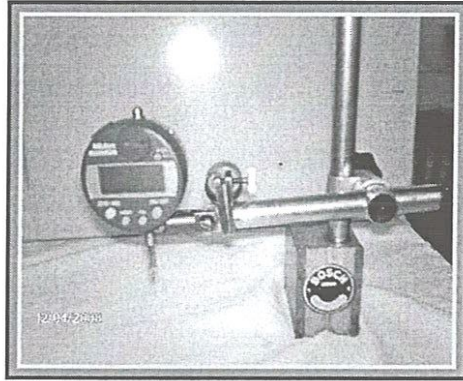


Figure III.7 : Dispositif de mesure de l'usure en cratère.

III.2.4.5. Mesure de la rugosité

Le dispositif utilisé est un rugosimètre surftest 301 (Mitutoyo), équipé d'une imprimante de profil de rugosité (fig.III.8). Le rugosimètre est constituée d'une pointe en diamant avec un rayon de pointe de $5\text{ }\mu\text{m}$ se déplaçant linéairement sur la surface mesurée.

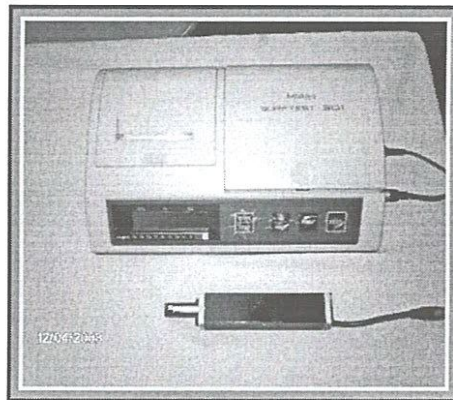


Figure III.8 : Rugosimètre surftest 301.

III.2.5. Banc d'essais

Les figures III.9 à III.10 montre le matériel de mesure et l'architecture expérimental utilisée. Les éléments constitutifs du banc d'essais et le matériel de mesure sont résumés dans le tableau (III.3).

Elément	Caractéristiques techniques	Marque de type
Accéléromètre	Sensibilité : 0.99 PC/ms^{-2}	Brueel & Kjaer 4384
Analyseur des vibrations	Bande de fréquence : 0 à 25.6 KHz. Nombre d'échantillons : 2048.	Brueel & Kjaer 2035
Tour	Puissance 6.6Kw sur la broche	Modèle SN40
Microscope	Précision : 0.001mm	HUND type WAD
Rugosimètre	Critères de rugosité : 0.05 à $40 \mu\text{m}$ pour Ra 0.3 à $160 \mu\text{m}$ pour Rt et Rz.	Surftest 301 (Mitutoyo)
Amplificateur	Multi canaux ; destiné à la mesure des efforts de coupe	5001 KIAGS WISS
PC	Puissant, carte d'acquisition	/
Plate forme	Quatre capteurs en quartz à 3 éléments	KISTLER modèle 9257B

Tableau III.3 : Les éléments constitutifs du banc d'essais et le matériel de mesure

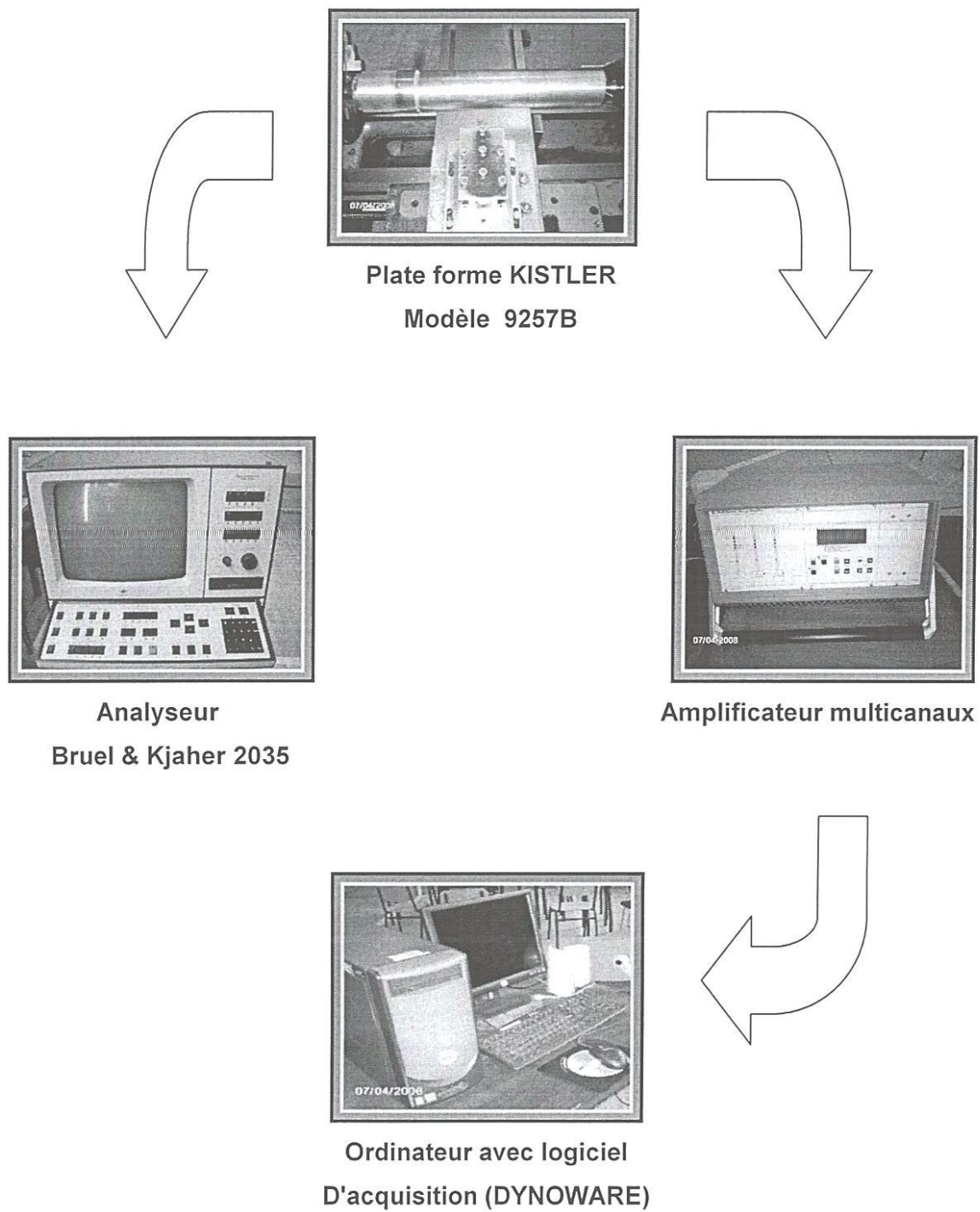


Figure III.9 : Chaîne de mesure des efforts de coupe et d'accélération.

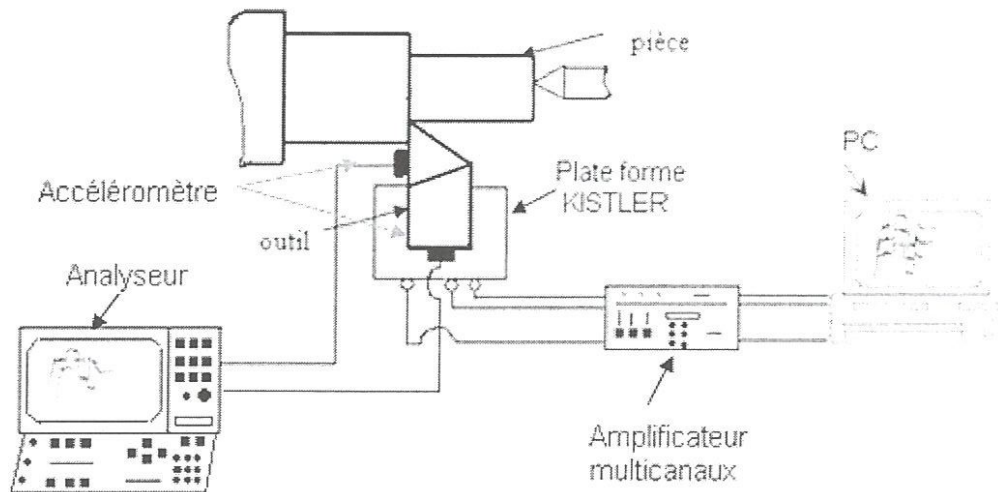


Figure III.10 : Architecture expérimental.

III.3. Plan expérimental

Un plan d'expériences est une planification des essais à effectuer, de façon à obtenir des résultats. La Figure (III.9) présente l'installation de la chaîne de mesure des efforts de coupe et d'accélérations, après que les signaux entrants soient amplifiés, des signaux analogiques ont été convertis en numérique, et les signaux numériques (trois composants des forces de coupe et deux signaux d'accélération) étaient échantillonnés et analysés grâce au logiciel Matlab installé spécialement sur un ordinateur individuel.

A cet effet les essais effectués ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques en acier Z200Cr12 de diamètre 62 mm et de longueur 480 mm, sans traitement thermique avec des conditions de coupe sec. Chaque essai a été interrompu après prescrit l'intervalle de temps pour prendre des mesures d'usure en dépouille et en cratère.

Aussi bien que les facteurs qui influent sur le processus d'usinage, on peut citer, les éléments du régime de coupe (V_C , f , a_P), la géométrie de la partie active de l'outil, ainsi que les conditions de travail.

L'acquisition des efforts de coupe et d'accélération ont été réalisés d'après les conditions de coupe suivante :

- Profondeur de passe (a_P) : (0.5, 1) mm.
- Vitesse de coupe (V_C) : (100, 135, 190) m/ min.
- L'avance (f) : (0.12) mm/ tr.

Suivant le plan d'expérience indiqué dans le tableau (III.4), une série d'essais a été réalisé pour différentes combinaisons des éléments du régime de coupe.

N°	Usure (mm)		Rugosité (μm)			Forces statique (N)		
	VB	KT	R_a	R_t	R_z	x	y	z
$V_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$								
1	0.086	0.012	0.50	2.50	2.00	113.80	227.21	222.78
2	0.131	0.020	0.70	4.20	3.10	112.89	225.23	223.45
3	0.200	0.024	1.30	6.70	5.10	115.50	210.02	226.64
4	0.225	0.031	1.32	7.00	5.20	120.26	210.29	226.95
5	0.261	0.041	1.34	8.30	5.60	147.76	232.85	269.04
$V_c = 135 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$								
6	0.221	0.023	0.45	2.30	1.80	141.78	269.22	271.85
7	0.321	0.034	0.61	3.80	2.70	143.65	274.25	290.14
8	0.425	0.046	1.15	6.40	4.80	151.41	295.48	328.14
9	0.502	0.061	1.45	7.60	5.70	166.42	323.64	357.39
10	0.601	0.081	1.71	7.93	6.30	158.63	286.83	322.74
$V_c = 190 \text{ m/min}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$								
11	0.401	0.039	0.41	1.90	1.40	138.53	264.00	274.28
12	0.501	0.053	0.68	4.20	3.00	133.63	280.12	273.78
13	0.561	0.107	1.35	7.00	5.30	124.74	287.55	285.30
14	0.821	0.168	1.52	7.91	6.20	147.46	358.91	341.77
15	1.112	0.184	1.82	9.13	6.89	145.93	378.24	361.34
$V_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$								
16	0.123	0.015	0.57	2.73	2.30	277.65	311.71	413.04
17	0.200	0.020	0.72	4.50	3.30	328.34	343.93	334.34
18	0.248	0.030	1.70	7.50	6.30	363.18	372.55	501.75
19	0.286	0.044	1.76	7.40	5.60	405.31	400.10	594.75
20	0.340	0.071	1.89	9.50	6.76	405.76	399.33	586.49
$V_c = 135 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$								
21	0.301	0.048	0.51	2.50	2.10	333.38	480.72	523.77
22	0.460	0.054	0.65	4.30	3.20	329.35	364.22	534.78
23	0.555	0.074	1.80	7.80	6.80	353.71	387.47	568.43
24	0.603	0.084	2.10	9.20	6.70	336.80	373.22	547.14
25	0.700	0.097	2.40	10.09	9.50	389.35	443.06	621.10
$V_c = 190 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$								
26	0.500	0.074	0.45	2.31	1.70	281.13	323.54	464.10
27	0.617	0.110	0.72	4.60	3.90	288.18	337.68	531.01
28	0.662	0.150	1.85	8.30	7.20	290.39	357.39	535.48
29	0.999	0.205	2.50	10.00	7.30	311.81	396.15	560.31
30	1.502	0.239	3.00	11.87	10.55	358.61	473.04	523.74

Tableau III.4 : Plan d'expériences.

Dans notre étude, plusieurs points apparaissant importants à traiter et analyser pour étudier l'évolution des paramètres suivants :

- Evolution de l'usure du matériau de coupe.

- Evolution des efforts de coupe en fonction des paramètres de coupe et de l'usure en dépouille.
- Evolution de l'effort statique et d'accélération en fonction d'usure en dépouille.
- Evolution des indicateurs scalaires en fonction d'usure.
- Evolution de l'accélération en fonction des paramètres de coupe.
- Evolution de la rugosité en fonction des paramètres de coupe et de l'usure en dépouille.

Avant d'entamer le plan expérimental, nous avons réalisé une série de mesures dans différents points localisés sur la partie périphérique de l'outil de coupe et la pièce (fig.III.10). Le but de ces mesures est de déterminer les fréquences propres du système. La connaissance de ces fréquences propres nous permet de mieux analyser les résultats de mesures obtenues par la suite.

A cet effet nous avons sept points de mesures situés de la manière suivante :

- 1- Sur la partie périphérique de l'outil de coupe, un point dans la direction axiale et un point dans la direction verticale.

- Dans la direction axiale de l'outil figure III.11 (a) et (b), on constate l'apparition de deux pics, le premier entre (4000 et 4064 Hz) et le deuxième entre (4776 et 4840 Hz) pour deux sensibilités du capteur de force du marteau de choc.

- Dans la direction verticale de l'outil, les fréquences propres du premier mode entre (4723 et 4760 Hz) et le deuxième à 5032 pour les deux sensibilités du capteur.

D'après les mesures, on constate l'apparition en premier lieu du mode de la direction axiale à environ 4064 Hz, le deuxième pic est le mode de torsion qui apparaît à environ 4760 Hz dans les deux directions axiale et tangentielle. Le troisième pic correspond au premier mode dans la direction tangentielle, il apparaît à 5032 Hz.

Direction de la mesure	axiale	verticale	axiale	verticale
Sensibilité du marteau de choc et de l'accéléromètre	4 Pc/N	0.98 Pc/N	0.98 Pc/N	4 Pc/N
Fréquences propres du système (Hz)	1008,1456, 1872,4000, 4776	1016, 1480, 1880, 2192, 4723, 5032	968,1472, 2000,2888, 4064,4840	1864,4760, 5032

Tableau III.5 : Fréquences propres du système.

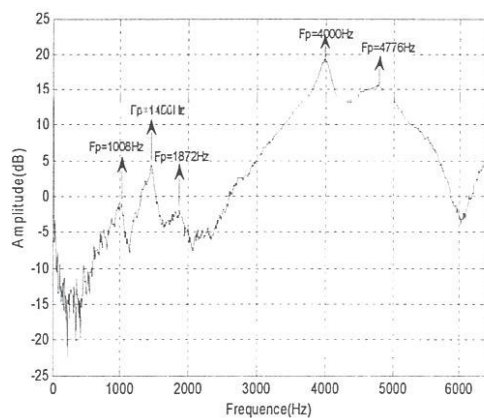
La différence entre les fréquences propres dans les deux directions et dûes à la différence de rigidité dans les deux directions.

2- sur la pièce (fig.III.12).

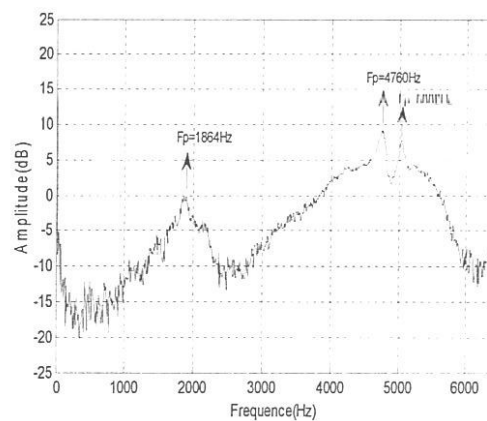
Les points de mesures	P2	P3	P4
Fréquences propres de la pièce (Hz)	208, 384 , 912, 2864, 4688, 10640	208, 384 , 2816, 2816, 4656, 7824	208, 384 , 736, 1936, 4752, 11152

Tableau III.6 : Fréquences propres de la pièce.

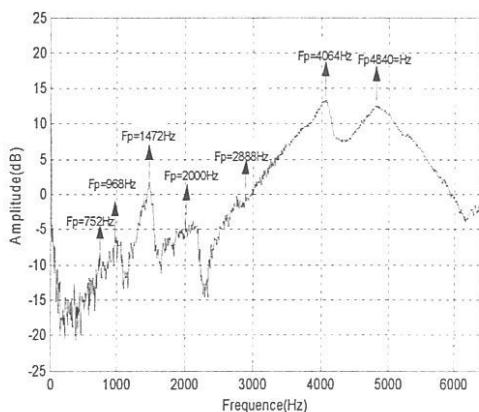
L'analyse des résultats des mesures des fréquences propres de la pièce et de l'outil de coupe présenté dans le tableau (III.5) et (III.6), montre la présence de plusieurs fréquences qui apparaissent dans les différents points de mesures telle que : 208 Hz, 384 Hz, 968 Hz, 1456 Hz, 2816 Hz, 4656 Hz, ...



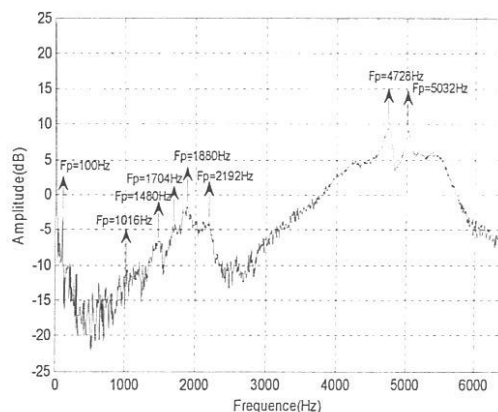
(a) Direction axiale de l'outil (4 Pc/N)



(b) Direction verticale de l'outil (4 Pc/N)



(c) Direction axiale de l'outil (0.98 Pc/N)



(d) Direction verticale de l'outil (0.98 Pc/N)

Figure III.11: Les Spectres des fréquences propres du système pour deux sensibilités du marteau de choc.

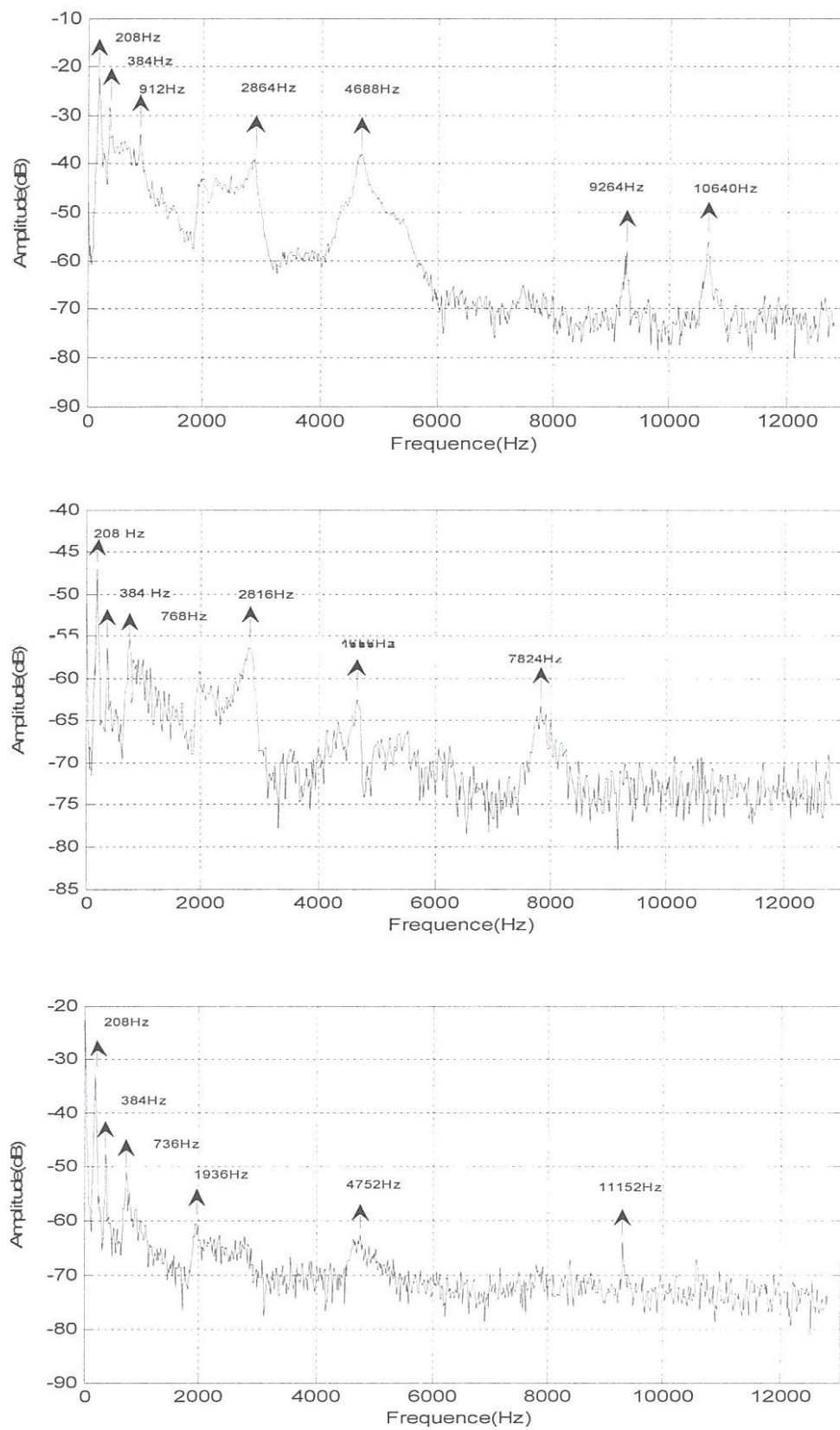


Figure III.12 : Les Spectres des fréquences propres de la pièce – broche.

III.4. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été destiné à la présentation du matériel utilisé pour la mesure des composantes des effort de coupe et l'accélération ainsi que la méthodologie des essais suivant les conditions de coupe, tels que la profondeur de passe, la vitesse de coupe et la vitesse d'avance selon la méthode unifactorielle.

Le chapitre suivant sera donc consacré à la présentation et la discussion des résultats expérimentaux obtenus, ainsi que ceux obtenus après le traitement des signaux mesurés.

Chapitre IV

Surveillance de l'usure des outils de coupe par les indicateurs scalaires

IV.1. Introduction

L'exécution d'un système de surveillance bien guidé de l'état d'un outil de coupe est primordiale aux opérations d'usinage dont l'environnement change de manière imprévisible.

L'objectif principal de cette étude est de trouver des indicateurs de supervision des états d'outils basés sur des méthodes expérimentales et analytiques, en utilisant les trois composantes de l'effort de coupe (statique et dynamiques) et la mesure des signatures vibrations.

Les outils de coupe s'usent parce que les surfaces d'usure (face de coupe et de dépouille) de l'outil doivent supporter des charges élevées et parce que le copeau et la pièce appliquent ces chargements lors des mouvements relatifs sévères par rapport aux surfaces d'usure. Donc, pour enlever de la matière la pièce, ces mouvements et ces forces sont utiles pour déterminer quand un outil doit être changé. Malheureusement, il y a de nombreuses variables, à considérer, il n'est donc pas surprenant que l'identification et l'expertise de l'usure des outils soient difficiles.

Dans ce chapitre, nous présentons dans un premier temps les résultats de l'évolution des différentes formes d'usure (VB, KT) et rugosité (R_a , R_t , R_z) en fonction des conditions de coupe. Avec la morphologie de l'usure sur les surfaces en dépouille et en cratère au cours du temps pour différentes conditions de coupe. Dans un deuxième temps, nous présentons les résultats de l'analyse des signaux (force de coupe, accélération) en utilisant des méthodes de surveillance de l'état d'outil de coupe (méthodes temporelles,...).

IV.2. Résultats de l'impact des conditions de coupe sur l'usure et la rugosité

IV.2.1 Evolution de l'usure en fonction du temps et la vitesse de coupe

Les figures IV.1 à IV.4, montrent l'évolution de l'usure en dépouille (VB) et l'usure en cratère (KT) pour trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min en fonction du

temps d'usinage et pour deux profondeurs de passe $a_p = 0.5$ et 1 mm et une vitesse d'avance $f = 0.12$ mm/tr. D'après l'étude bibliographique, l'évolution de l'usure est caractérisée par trois périodes principales, la première se distingue par l'usure intensive, appelée souvent " usure initiale ou rodage ", la deuxième est connue par " l'usure normale " et se distingue par une grande résistance à l'usure, la troisième période apparaît à fur et à mesure que l'outil travail, ou la température à l'interface outil/pièce et outil/copeau s'élève ce qui favorise l'apparition de la troisième période qui conduit à l'accélération des mécanismes d'usure.

L'analyse de ces résultats montre que la vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure. Les figures IV.1 et IV.2 montrent l'évolution d'usure en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe et pour une profondeur de passe $a_p=0.5$ mm. On remarque que l'augmentation de la vitesse de coupe provoque une évolution plus rapide de l'usure en dépouille et en cratère, comme le montre la figure IV.1, ou la tenue de l'outil chute de 350 (s) pour $V_c = 100$ m/min jusqu'à 140 (s) pour $V_c = 135$ m/min, et atteint 50 (s) seulement à la vitesse de coupe $V_c = 190$ m/min. La droite $[VB] = 0.5$ mm correspond à la valeur de l'usure admissible, à partir de l'intersection de cette droite avec les courbes d'usure, on peut déterminer les tenues de l'outil pour chaque vitesse de coupe. L'usure en cratère a également une tendance semblable à celle d'usure en dépouille qui augmente avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

Les courbes des figures IV.3 et IV.4 montrent que l'augmentation de la profondeur de passe provoque un recule des tenues pour les mêmes vitesses de coupe. L'augmentation de a_p de 0.5 mm à 1 mm provoque une augmentation d'usure de 0.086 mm à 0.128 mm, observant ainsi une différence de la tenue de l'ordre de 40 (s). Le même phénomène est observé avec les différentes vitesses de coupe 60 (s) pour $V_c = 135$ m/min et 25 (s) pour une $V_c = 190$ m/min. Donc la diminution de la profondeur de passe permet de gagner des temps d'usinage.

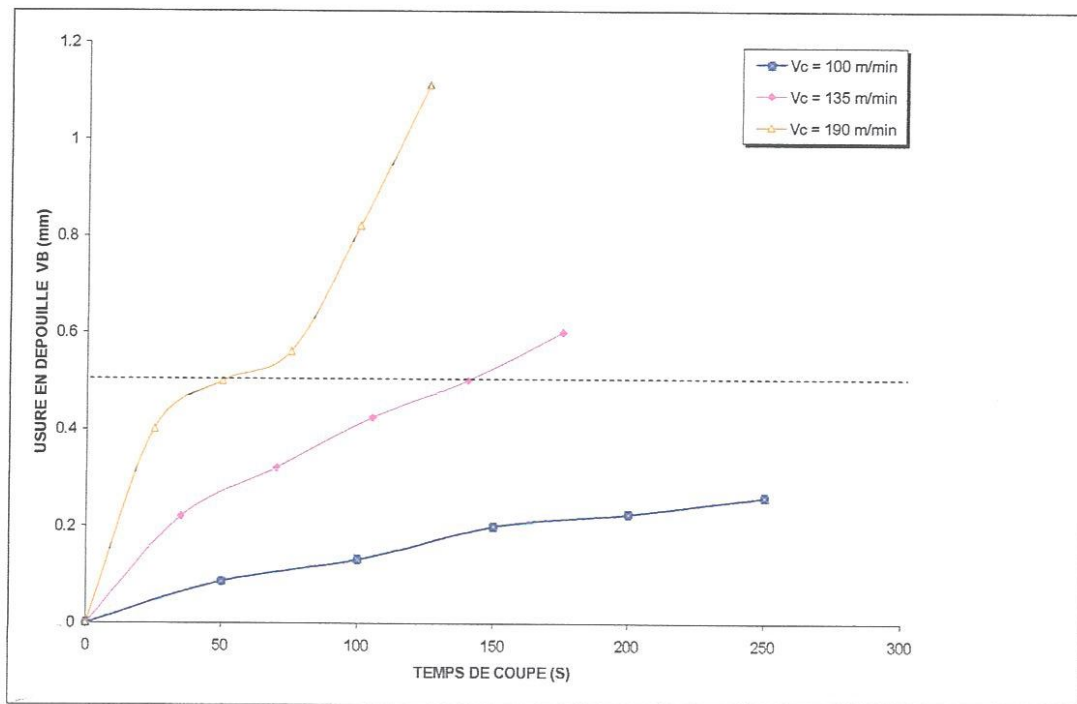


Figure IV.1 : Evolution de VB en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

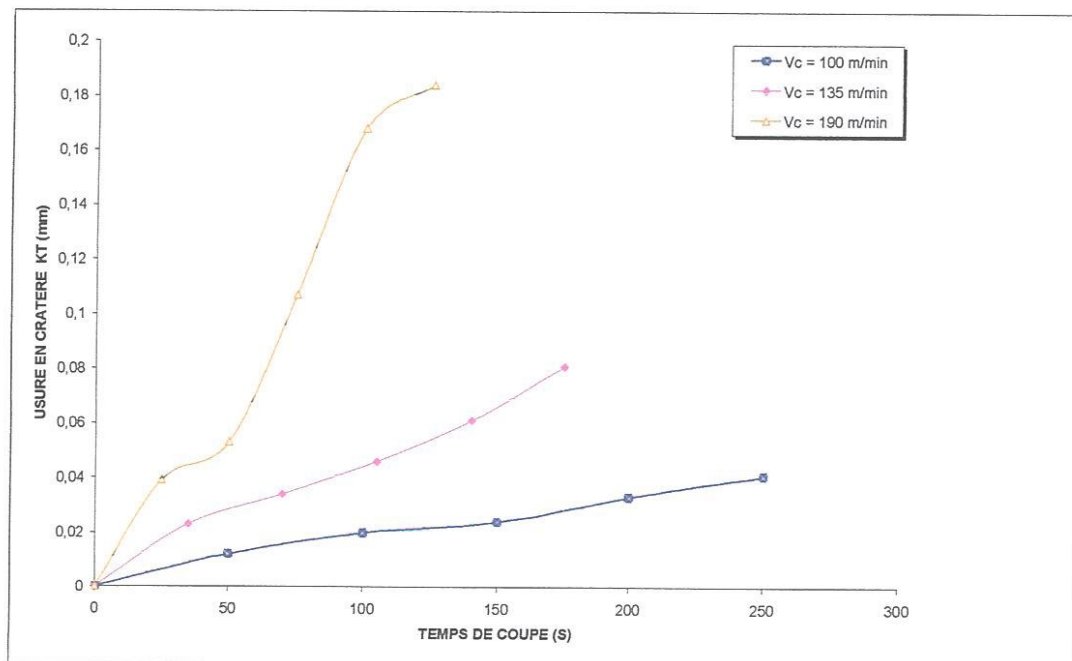


Figure IV.2 : Evolution de KT en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

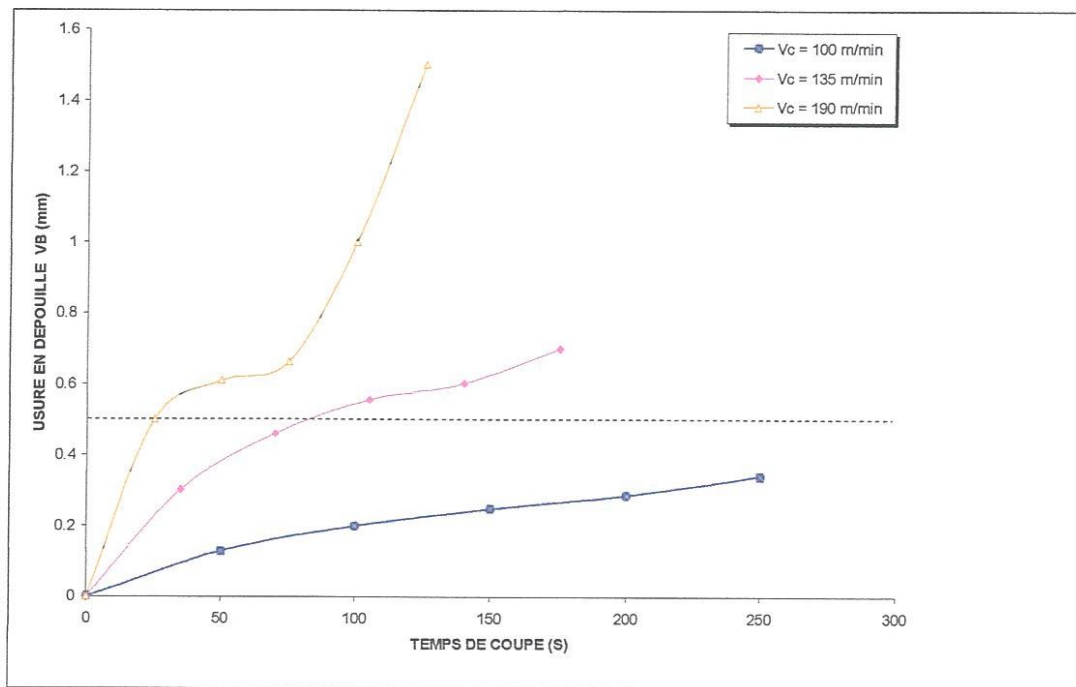


Figure IV.3 : Evolution de VB en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

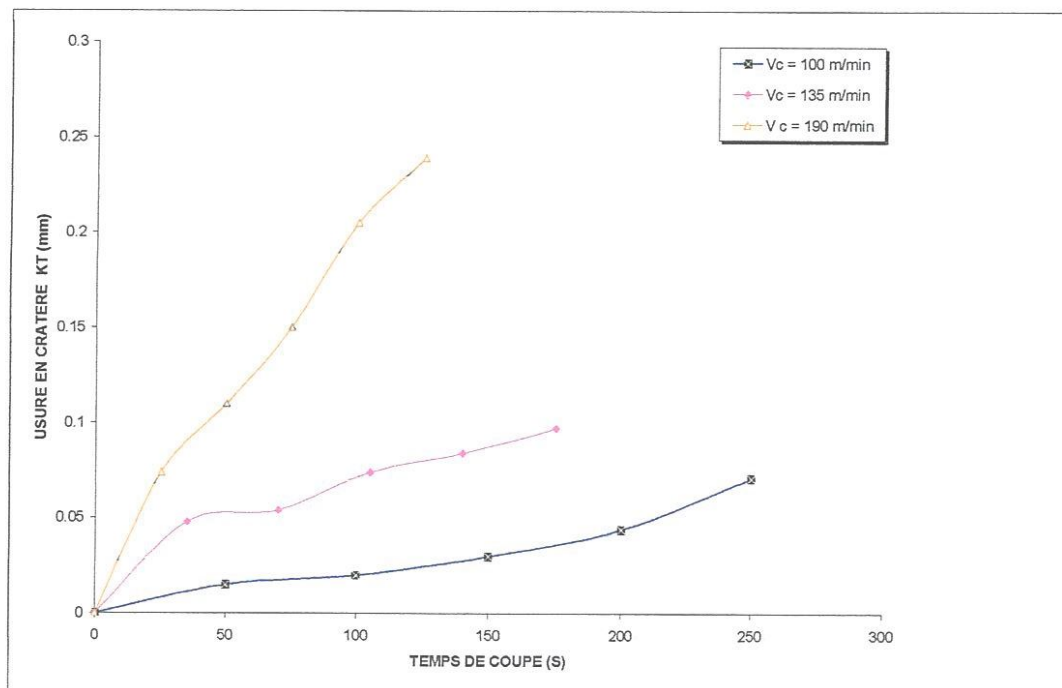


Figure IV.4: Evolution de KT en fonction du temps et de la vitesse de coupe pour $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

IV.2.2. Micrographies de l'usure VB et KT

Sur les figures IV.6 à IV.8, sont présentées les micrographies de l'usure en dépouille et en cratère au début et à la fin de l'usinage (sur le palier 1 et 5) pour trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min, pour $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr. On constate que :

- Les observations de l'endommagement de l'arête de coupe, pour la vitesse 100 m/min lors de l'usinage de l'acier Z200Cr12 par une plaquette en carbure non revêtu S40T montrent l'apparition d'usure irrégulière sur la face en dépouille qui augmente en fonction du temps mais elle reste inférieure à 0.3 mm. L'usure en cratère se manifeste par une petite cuvette sur la face d'attaque figure IV.6.
- Pour une vitesse de coupe 135 m/min, on constate une usure qui évolue à un rythme accéléré et atteint la valeur admissible [$VB=0.5$ mm] au bout de 140 s.
- Pour la vitesse de coupe 190 m/min, les sollicitations mécaniques et thermiques s'amplifient d'un palier à un autre et conduisent à une usure rapide (VB et KT) figure IV.8. Au début du cinquième palier l'évolution de l'usure conduit à l'effondrement de l'arête de l'outil de coupe (voir figure IV.5), suivi d'une diminution des efforts de coupe due à la diminution de la profondeur de passe provoquée par le recul de l'arête de coupe par rapport à la pièce usinée, voir figure IV.11.

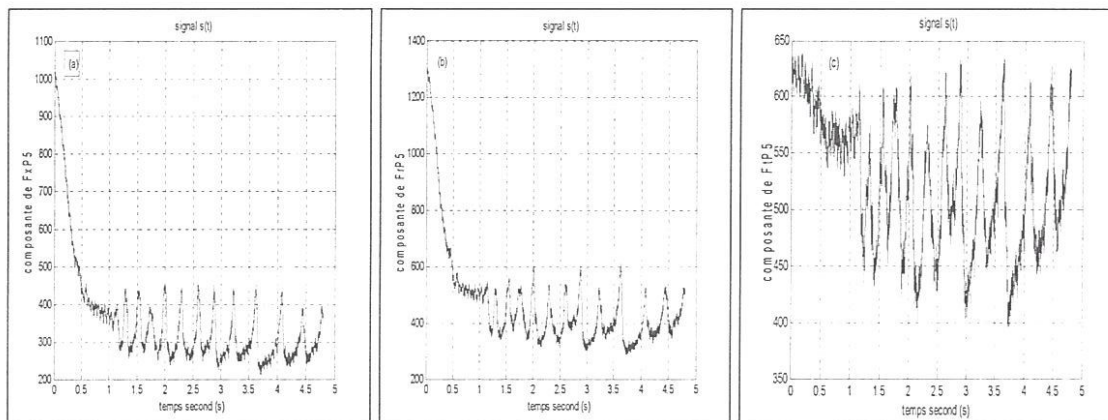


Figure IV.5 : Profils des 3 composants de l'effort de coupe mesurés sur le palier 5 pour $V_c=190$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

- Durant le suivi du mode de l'endommagement de l'outil de coupe aux vitesses de coupe (100, 135, 190) m/min et pour une profondeur de passe $a_p=1$ mm,

(figure IV.9, IV.10, IV.11), on remarque que l'effet de (a_p) est moins important que celui de la vitesse de coupe.

- L'évolution d'usure mérite par conséquent une attention particulière puisqu'elle affecte l'état de surface et la précision dimensionnelle de la pièce. A cet effet l'analyse des résultats d'usure montre que l'influence de la vitesse de coupe est significative. En effet l'augmentation de cette dernière entraîne une nette diminution de la tenue de l'outil de coupe. L'usinage durant ces conditions de coupe devient instable, il s'accompagne d'augmentation des vibrations, ce qui rend l'usinage par la suite presque impossible et conduit à limiter la plage des vitesses de coupe.

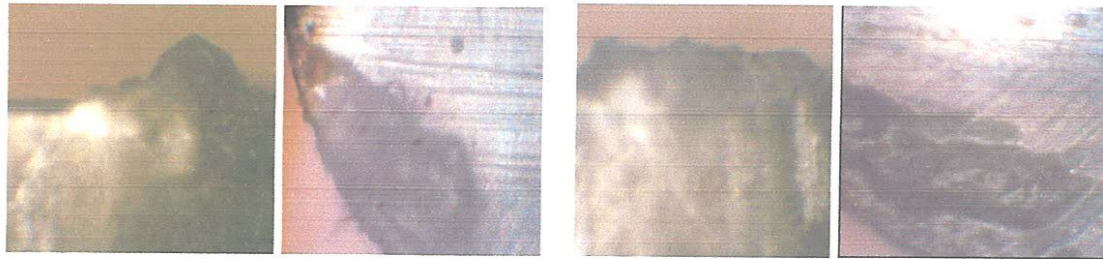


Figure IV.6 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=100$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

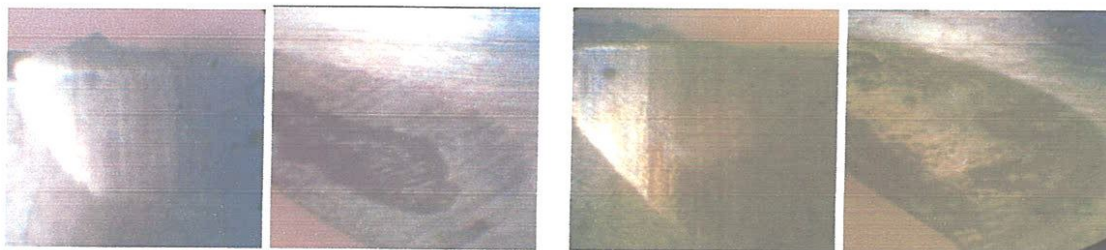


Figure IV.7 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=135$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

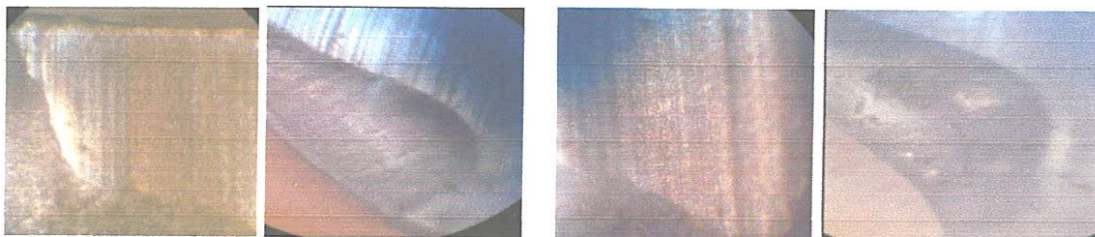


Figure IV.8 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=190$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr.



Figure IV.9 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=100$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

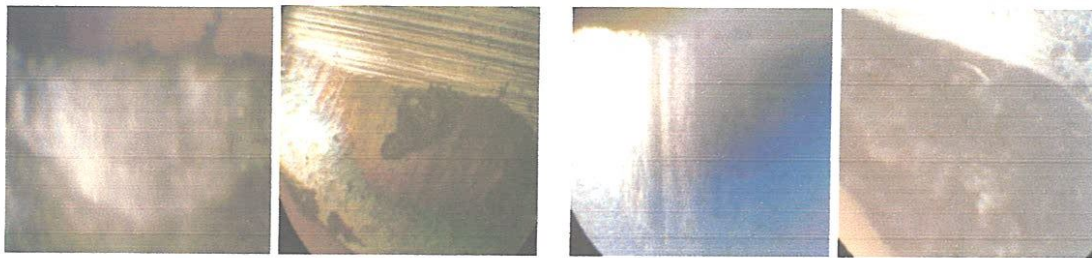


Figure IV.10 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=135$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

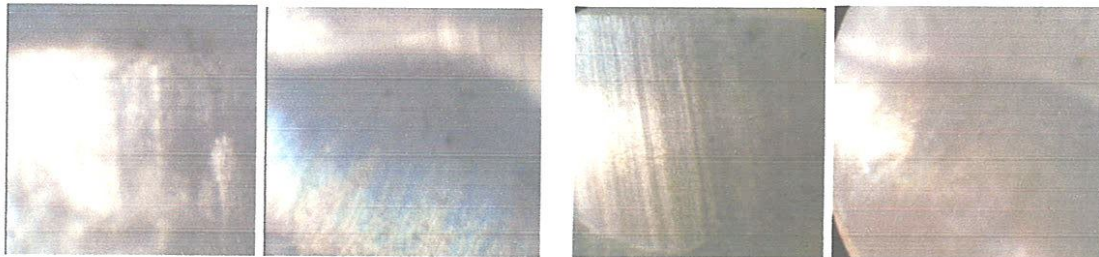


Figure IV.11 : Micrographies de l'usure VB et KT au début et à la fin de l'usinage $V_c=190$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

IV.2.3. Evolution de la rugosité en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe

Nous présentons sur les figures (IV.12) l'évolution de la rugosité en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe. On constate que :

- Pour une vitesse de coupe $V_c = 100$ m/min la rugosité atteint les valeurs de $R_a = 0.5 \mu\text{m}$, $R_t = 2.5 \mu\text{m}$ et $R_z = 2 \mu\text{m}$ au bout de 25 s d'usinage (palier 1) les valeurs évoluent avec le temps pour atteindre les valeurs de $R_a = 1.34 \mu\text{m}$, $R_t = 8.3 \mu\text{m}$ et $R_z = 5.6 \mu\text{m}$ pour $t = 225$ s (palier 5).

- Pour les deux autres vitesses 135 et 190 m/min, on constate une amélioration de la rugosité sur le palier 1, 2 mais cette amélioration se dégrade sur les autres paliers (4 et 5) ceci est dû à l'augmentation significative de l'usure sur ces deux derniers paliers.

- Pour $V_c = 190$ m/min la rugosité s'améliore par rapport à celle obtenue avec $V_c = 135$ m/min juste pour une période plus courte de temps. Pour cette vitesse, l'effet d'usure sera plus significatif que celui pour $V_c = 190$ m/min. A cet effet, on remarque ainsi une dégradation plus rapide de l'état de surface.

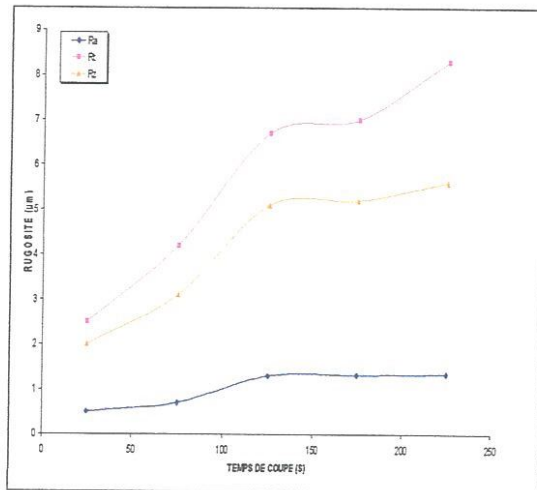
- D'après les résultats présentés sur la figure (IV.14), on remarque que l'augmentation de la profondeur de passe augmente la rugosité des surfaces. En effet pour $t = 25$ (s) la rugosité (R_a) augmente de $0.07 \mu\text{m}$. Cette différence devient plus grande avec l'augmentation du temps à cause de l'effet de la profondeur de passe sur l'usure d'outil. Mais pour (R_t , R_z) on remarque les mêmes tendances surtout aux temps de coupe élevés. Par conséquent au contraire de la vitesse de coupe, la profondeur de passe augmente la rugosité, mais avec un effet moins significatif que la vitesse de coupe surtout pour des temps d'usinage relativement longs.

IV.2.4. Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille

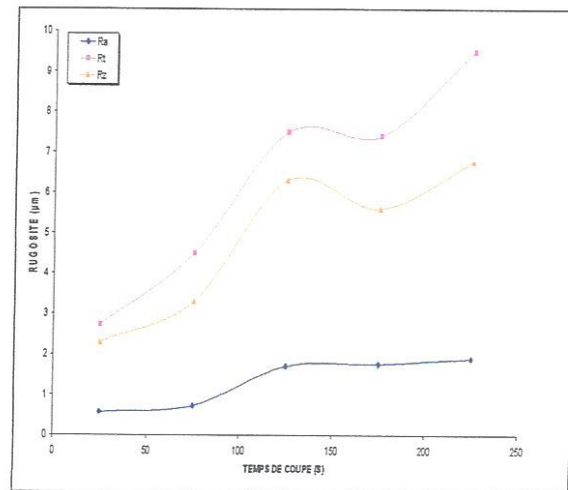
Les résultats des essais de l'étude de l'influence de l'usure de l'outil de coupe sur l'état de surface de l'acier Z200Cr12 à différentes vitesses sont représentés sur les figures (IV.15). L'analyse des résultats de la rugosité en fonction de l'usure montre que l'augmentation de l'usure en dépouille VB, entraîne une dégradation de la qualité de la surface usinée.

A cet effet, il faut préciser à ce niveau que, tant que l'usure irrégulière ne dépasse pas la valeur admissible [$VB = 0.5$ mm], la rugosité (R_a) évolue très lentement et l'état de la surface demeure acceptable. Au-delà de cette valeur, la rugosité subit une augmentation brusque.

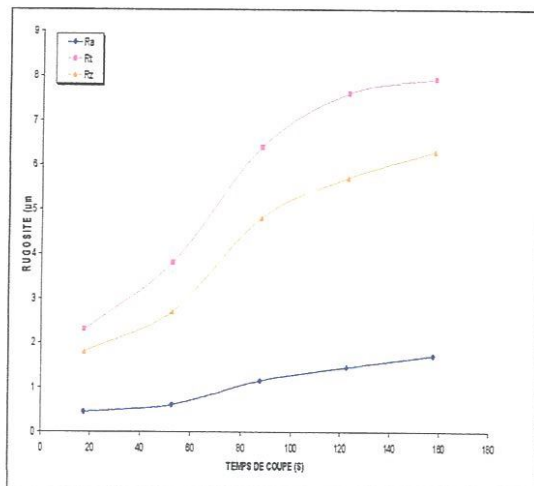
Dans l'ensemble, pour les vitesses de coupe 100 et 135 m/min, on constate une augmentation rapide de la rugosité avec l'augmentation de l'usure du palier 1 à 3, mais cette augmentation se dégrade sur les autres paliers. D'autre part, il est constaté que pour la vitesse élevée ($V_c = 190$ m/min), la dégradation de la surface usinée est trop rapide au-delà du critère d'usure admissible avec des valeurs de $R_t > 11 \mu\text{m}$. Ces résultats démontrent aussi que le choix du critère d'usure admissible est bien adapté pour décrire de manière appropriée la durée de vie de l'outil.



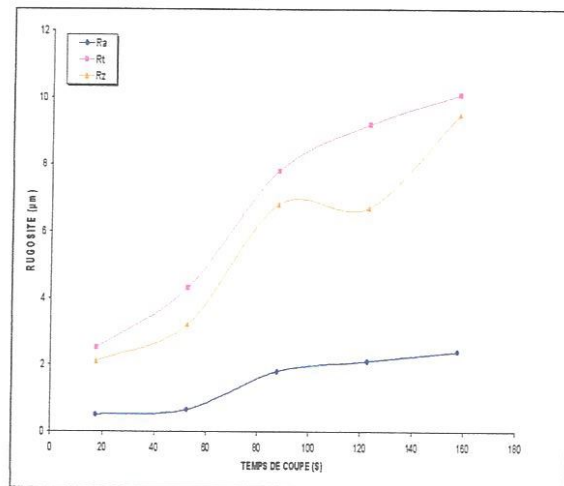
a) $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr



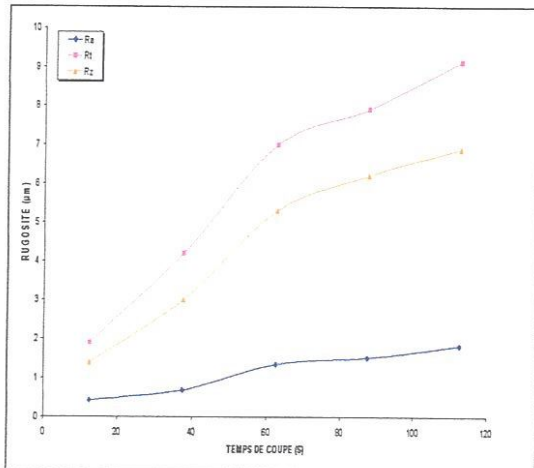
d) $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.12$ mm/tr



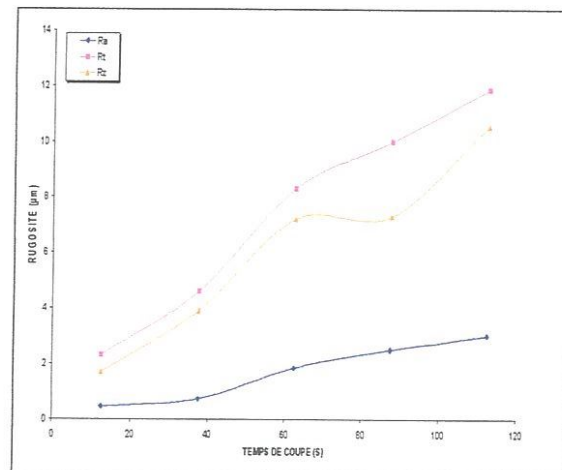
b) $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr



e) $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.12$ mm/tr



c) $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr



f) $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.12$ mm/tr

Figure IV.12: Evolution de la rugosité en fonction du temps pour différentes vitesses de coupe.

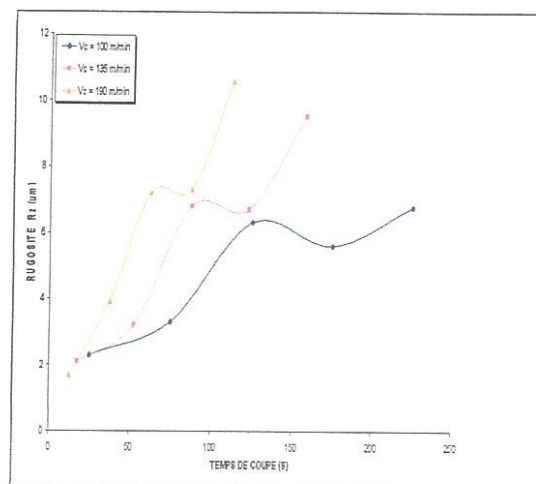
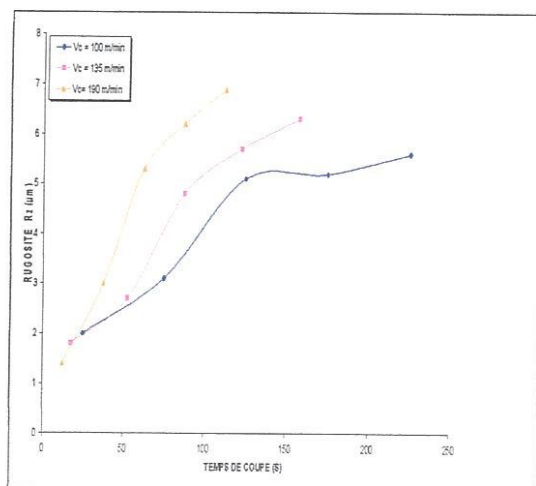
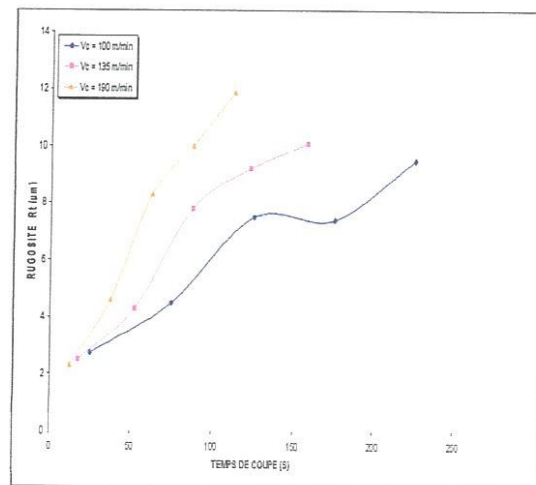
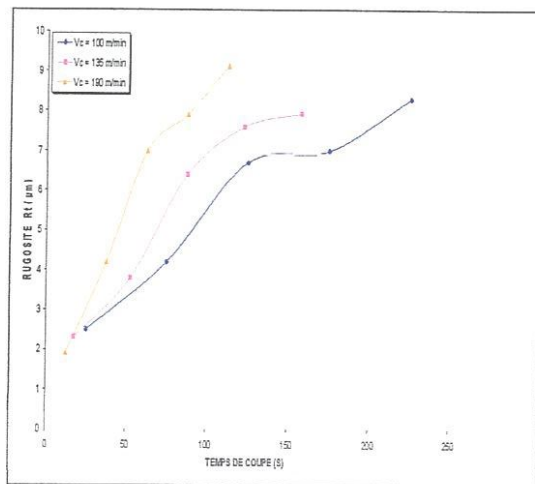
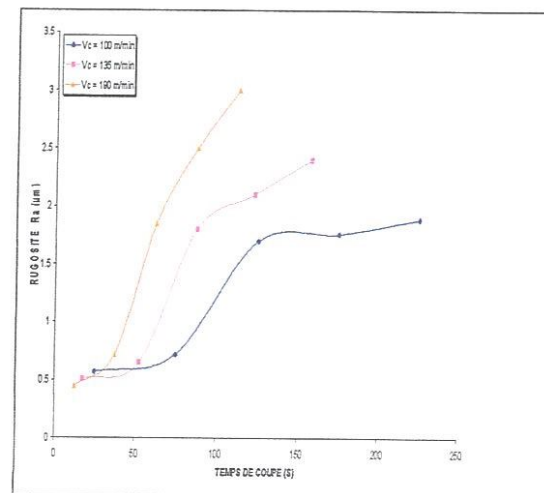
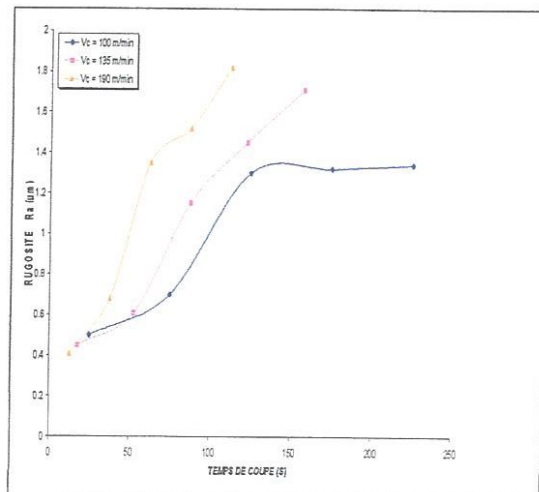
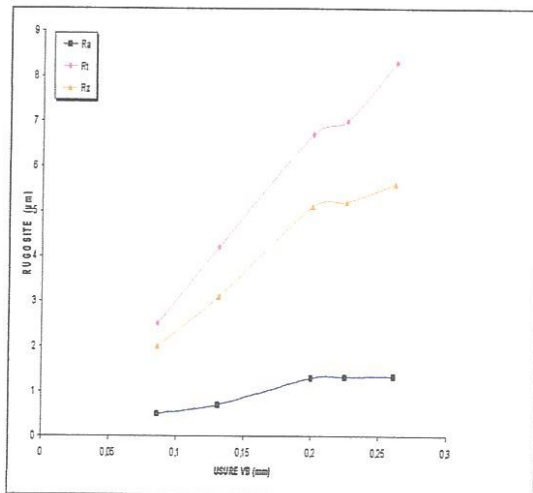
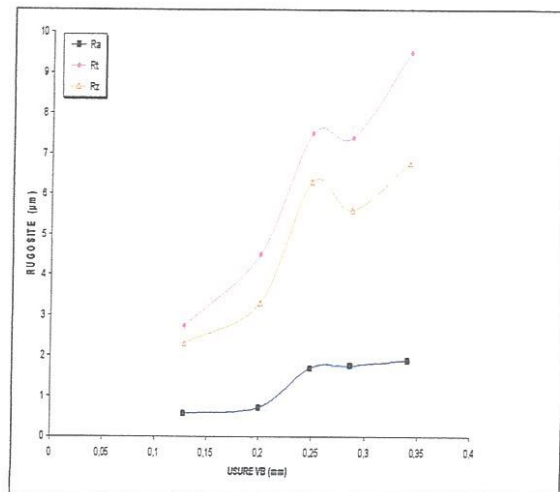


Figure IV.13: Evolution de la rugosité (R_a , R_t , R_z) en fonction du temps pour différentes V_c pour $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$

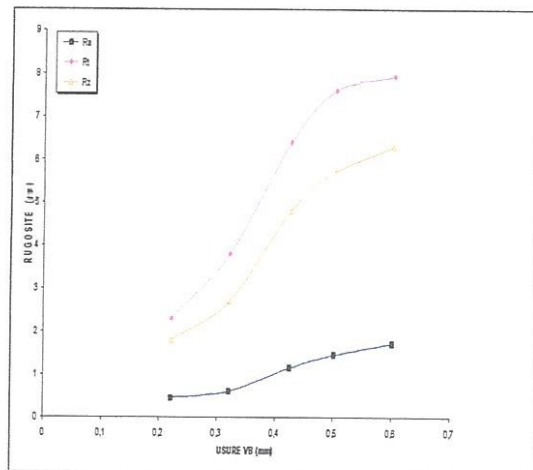
Figure IV.14: Evolution de la rugosité (R_a , R_t , R_z) en fonction du temps pour différentes V_c pour $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$



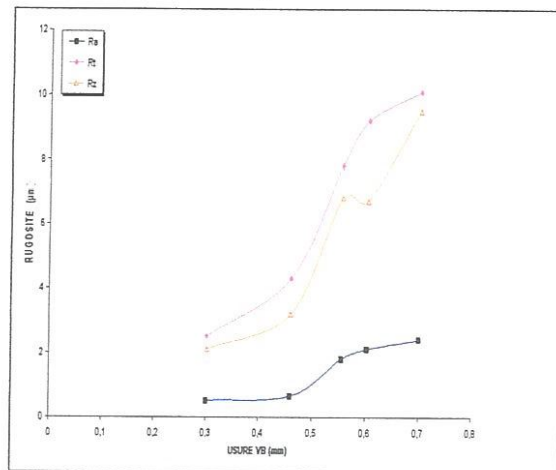
a) $V_c=100$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.12$ mm/tr



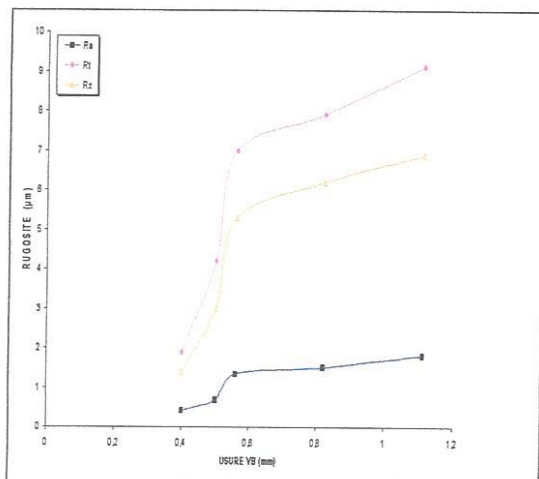
d) $V_c=100$ m/min, $a_p=1$ mm, $f=0.12$ mm/tr



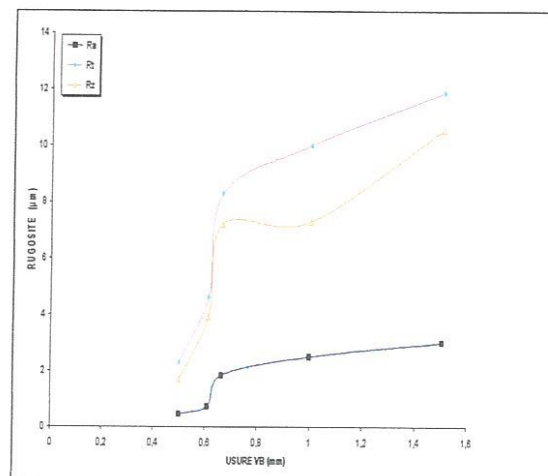
b) $V_c=135$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.12$ mm/tr



e) $V_c=135$ m/min, $a_p=1$ mm, $f=0.12$ mm/tr



c) $V_c=190$ m/min, $a_p=0.5$ mm, $f=0.12$ mm/tr



f) $V_c=190$ m/min, $a_p=1$ mm, $f=0.12$ mm/tr

Figure IV.15: Evolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille pour différentes vitesses de coupe.

IV.3. Exploitation des signaux mesurés

Pour chaque essai de coupe, une valeur de la force statique (moyenne) a été calculée à partir de la force de coupe prélevée, ainsi qu'une indication de la variation de la force dynamique. Les signaux de vibrations ont été pris directement comme valeurs enregistrées des signaux d'accélération du porte outil.

IV.3.1. Force statique

Les signaux du processus de coupe sont généralement non stationnaire en raison de la non linéarité du processus de coupe et de la non homogénéité de la pièce.

Cependant, dans la présente partie de l'étude, on suppose que le signal de force de coupe statique est stationnaire et indépendant du temps. Par conséquent, il suffit pour le caractériser d'employer la moyenne statistique. La moyenne statistique de l'effort de coupe prélevé a été choisie pour décrire la nature du comportement de la force statique puisque le signal a été assumé être stationnaire, et sa moyenne est donc restée constante durant l'opération de coupe.

Pour chaque essai de coupe, la composante de la force statique \tilde{F} a été calculée comme la valeur moyenne de la donnée prélevée F_i . Par conséquent, la variation statique de la valeur moyenne était incluse dans l'analyse suivante, et justifié par le procédé d'expérimentation, c'est-à-dire.

$$\tilde{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i(t_i) \quad (1)$$

IV.3.2. Force dynamique

La force statique étant connue pour chaque opération de coupe, la composante dynamique de la force variable pour chaque point de repère a pu être déterminée. Si $F_{d(i)}$ représentent la force dynamique et la force prélevée est F_i . $F_{d(i)}$ est déterminée par :

$$F_{d(i)} = F_i - \tilde{F} \quad (2)$$

Clairement la force dynamique et le signal d'accélération changent pendant que le temps de coupe progresse. Il était également évident que dans le domaine temporel,

les signaux ont montré des caractéristiques dynamiques et se sont comportés d'une façon aléatoire. Les données dynamiques ont été ainsi transformées du domaine temporel au fréquentiel par l'exécution d'un algorithme de FFT.

Les signaux de forces et d'accélérations mesurés sont traités et analysés en utilisant un programme que nous avons développé sous environnement Matlab.

IV.4. Evolution de la force statique en fonction de VB

Sur la base de la formule (1), nous avons calculé la force statique dans tous les cas de figures étudiés. Les résultats présentés sur les figures IV.16 à IV.21 pour les trois vitesses de coupe et les deux profondeurs de passe choisies, montrent que la force statique augmente légèrement avec l'usure en dépouille. Pour les deux premières vitesses (100 et 135 m/min). Alors que pour la vitesse 190 m/min sa variation devient importante, elle passe de 250 N pour $VB = 0.4$ mm à 355 N pour $VB > 1$ mm.

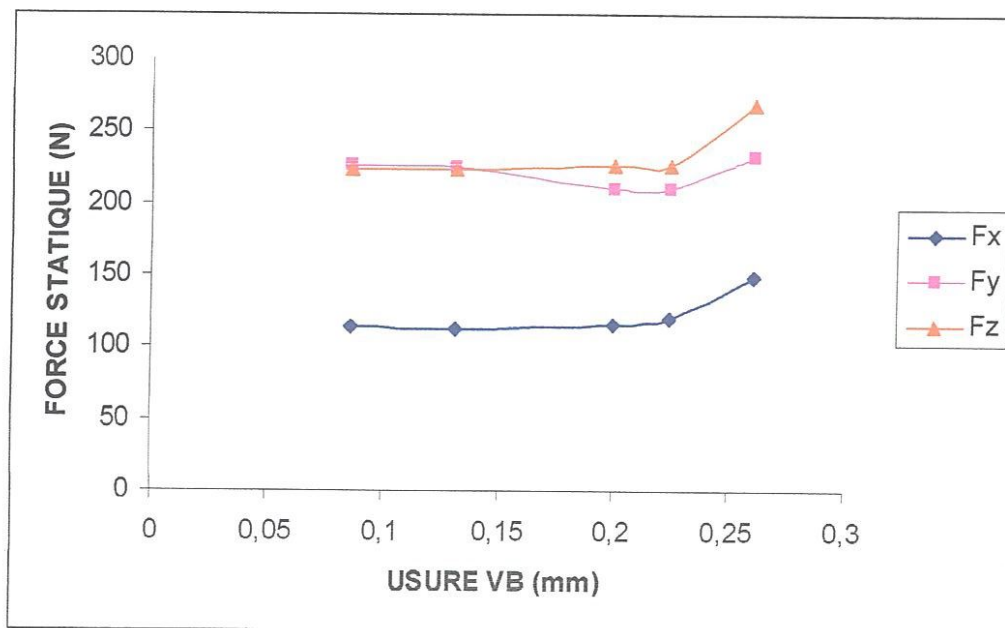


Figure IV.16 : Force statique en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c=100$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

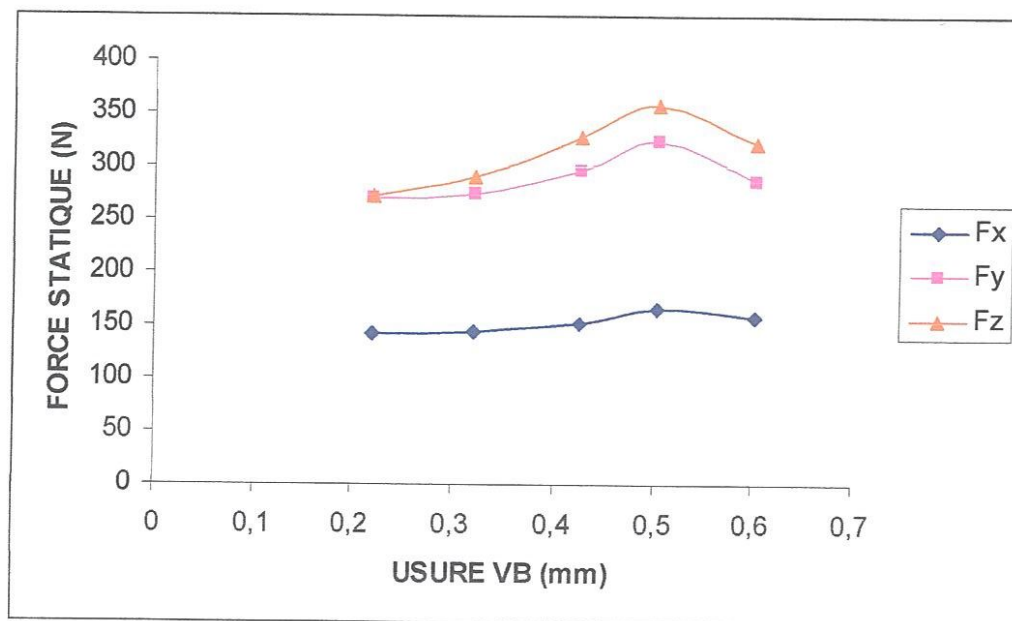


Figure IV.17 : Force statique en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c=135$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

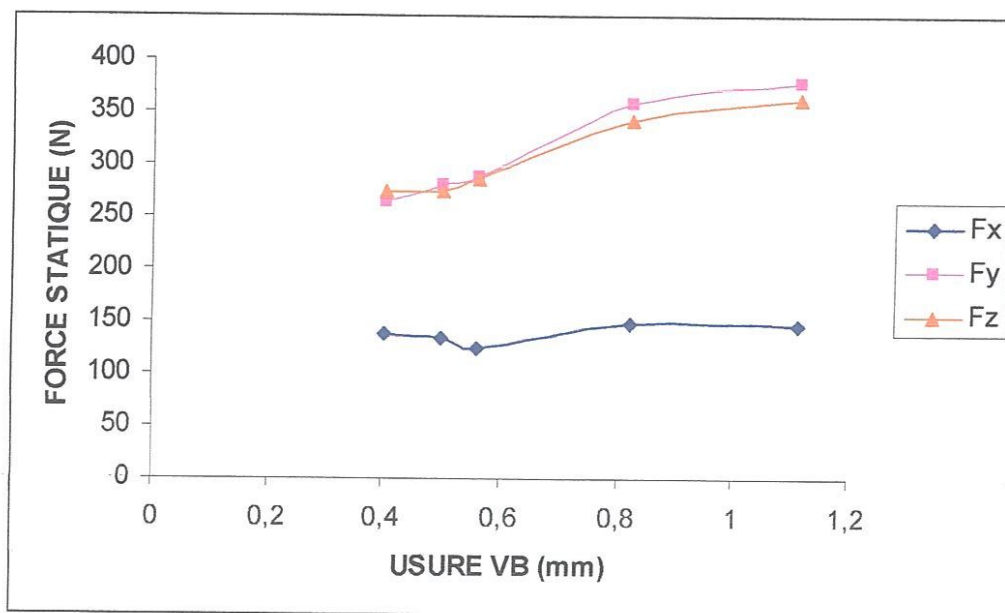


Figure IV.18: Force statique en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c=190$ m/min, $a_p=0.5$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

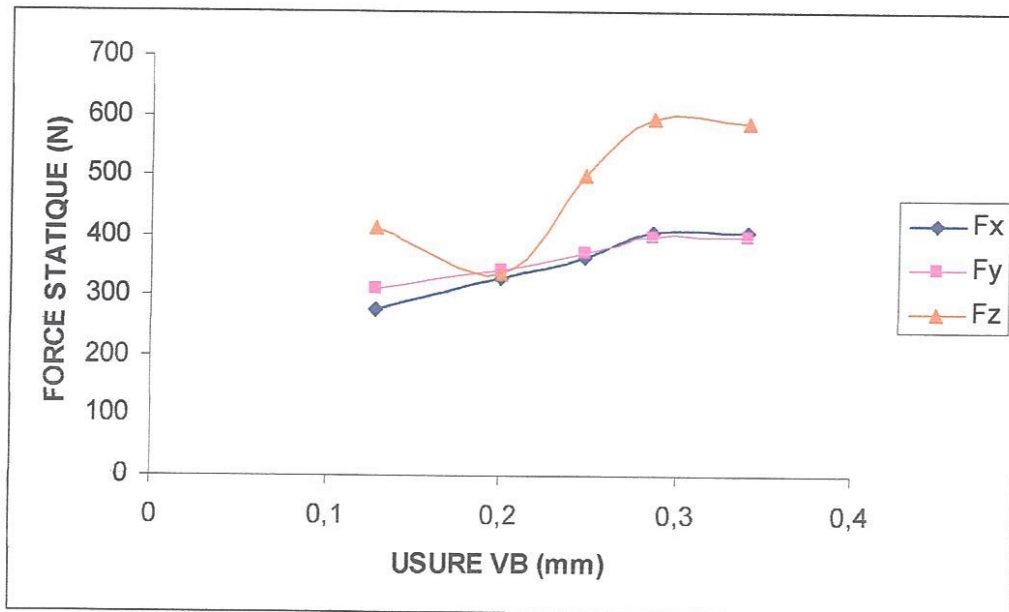


Figure IV.19: Force statique en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c=100\text{m/min}$, $a_p=1\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr.}$

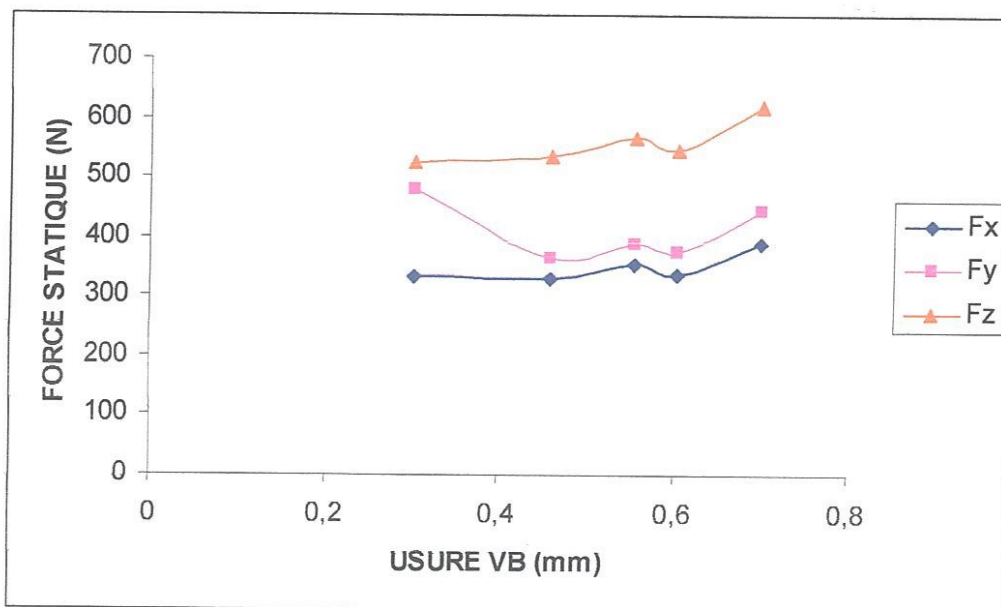


Figure IV.20 : Force statique en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c=135\text{ m/min}$, $a_p=1\text{ mm}$ et $f=0.12\text{mm/tr.}$

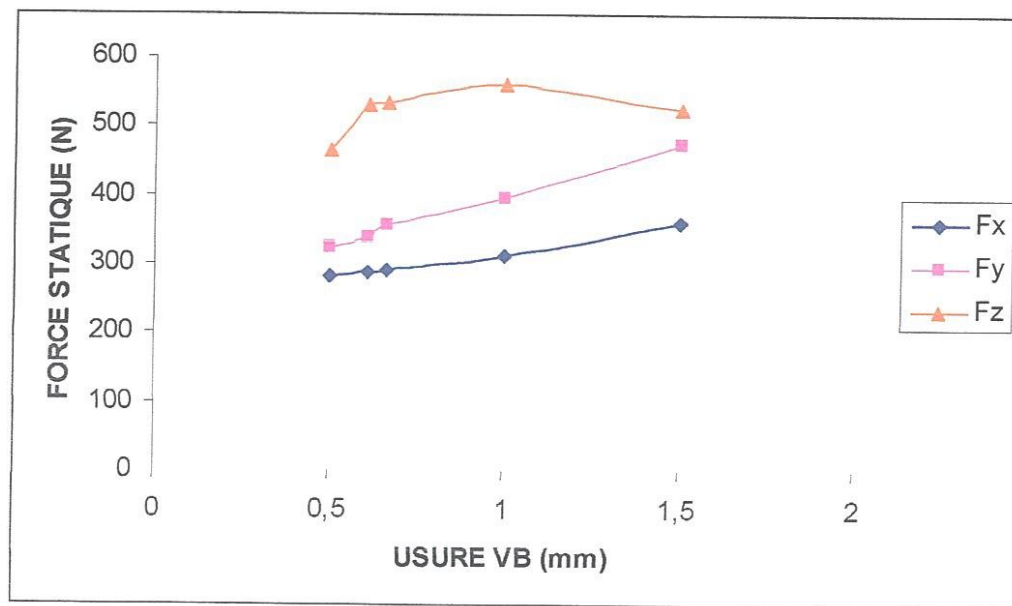


Figure IV.21: Force statique en fonction de l'usure en dépouille
 $V_c=190$ m/min, $a_p=1$ mm et $f=0.12$ mm/tr.

IV.4.1. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure

Le but principal de cette partie est de chercher un indicateur scalaire sensible à l'usure et qui peut nous renseigner sur l'évolution de cette dernière en temps réel, afin de l'utiliser dans une politique de surveillance de l'état de l'outil de coupe. A partir des signaux temporels mesurés (effort de coupe et accélération) délivré par les capteurs de mesures, nous avons choisi d'étudier la variation des indicateurs scalaires suivant : (RMS, valeur de crête, puissance, énergie,...), pour trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min et pour deux profondeurs de passe 0.5 et 1 mm.

IV.4.2. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure (cas des signaux des efforts de coupe)

L'analyse des figures IV.22 à IV.27 présentant l'évolution des indicateurs scalaires : RMS, valeur crête, énergie et la puissance des signaux des l'effort de coupe, montre que :

- Pour les vitesses 100 et 135 m/min (figures IV.22 à IV.23), l'amplitude de ces indicateurs augmente progressivement avec l'usure.

- Pour la vitesse 190 m/min (figure IV.24), l'amplitude des indicateurs augmente brusquement jusqu'à $VB = 0.5$ mm, au delà de cette valeurs la croissance devient progressive cela est dû à notre avis à la rupture du bec de l'outil.

- Pour la vitesse 100 m/min la variation des indicateurs pour la composante radiale est au-dessous des deux autres composante, pour la vitesse 135 m/min cette composante passe entre les deux autres composantes, alors que pour la vitesse 190 m/min la composante radiale passe au-dessus des deux autres composantes. La conclusion qu'on peut tirer de cette constatation c'est que la composante radiale est plus sensible à l'usure quand la vitesse de coupe augmente.

- On constate une augmentation significative des indicateurs scalaires avec l'augmentation de la vitesse de coupe.

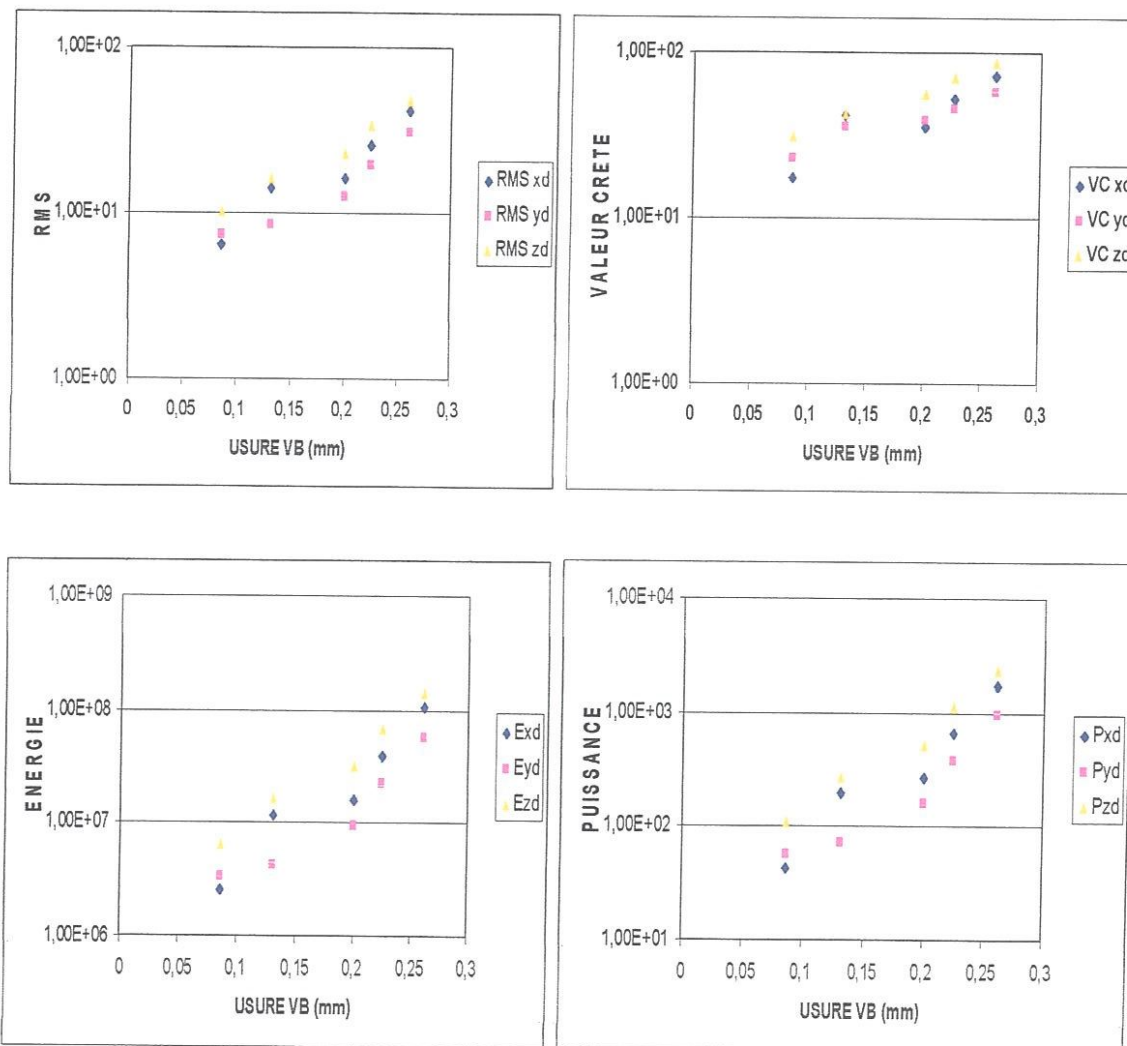


Figure IV.22 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

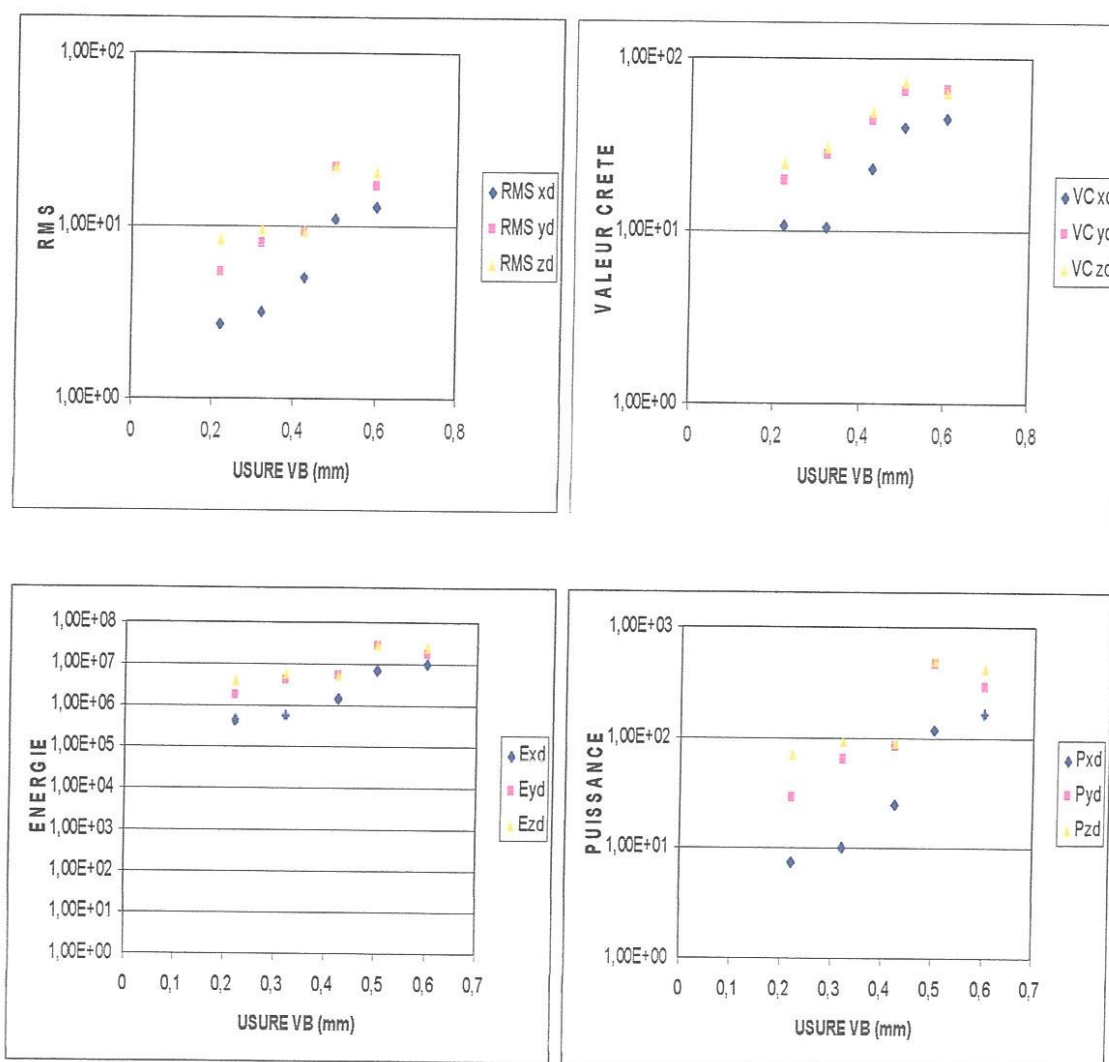
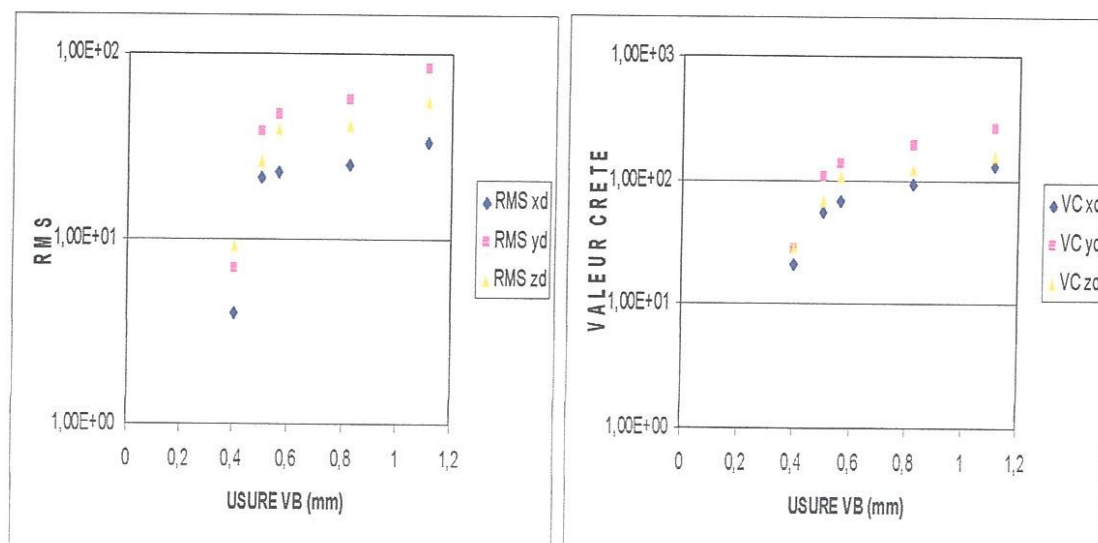


Figure IV.23 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.



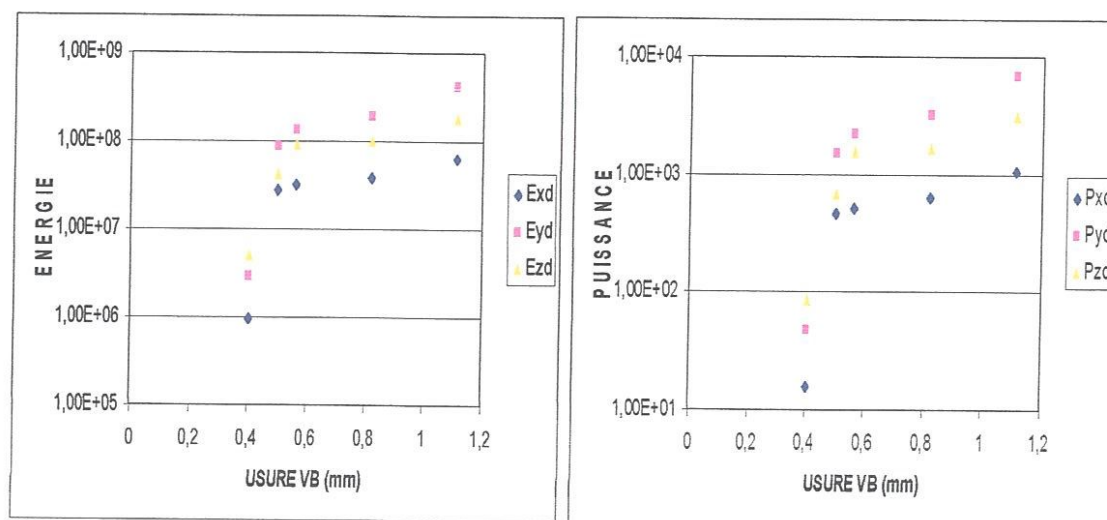


Figure IV.24 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

D'autre part, l'augmentation de la profondeur de passe (a_p) provoque par la suite une augmentation de l'usure en dépouille. En effet, l'augmentation de cette dernière influe directement sur les indicateurs scalaires, c'est-à-dire tous les indicateurs gardent presque la même tendance pour les trois vitesses.

Pour $V_c = 100$ m/min et $V_c = 135$ m/min, on constate que les indicateurs scalaires (RMS, V_c , E, P) du signal de l'effort de coupe évoluent progressivement en fonction de VB, alors que la vitesse 190 m/min entraîne une augmentation brusque de ces indicateurs, cela peut s'expliquer par la rupture de l'arrête de l'outil.

Donc il paraît évident de conclure que tous les indicateurs scalaires (RMS, V_c , E, P) des signaux de l'effort de coupe dynamique sont sensible à l'estimation de l'usure de l'outil de coupe

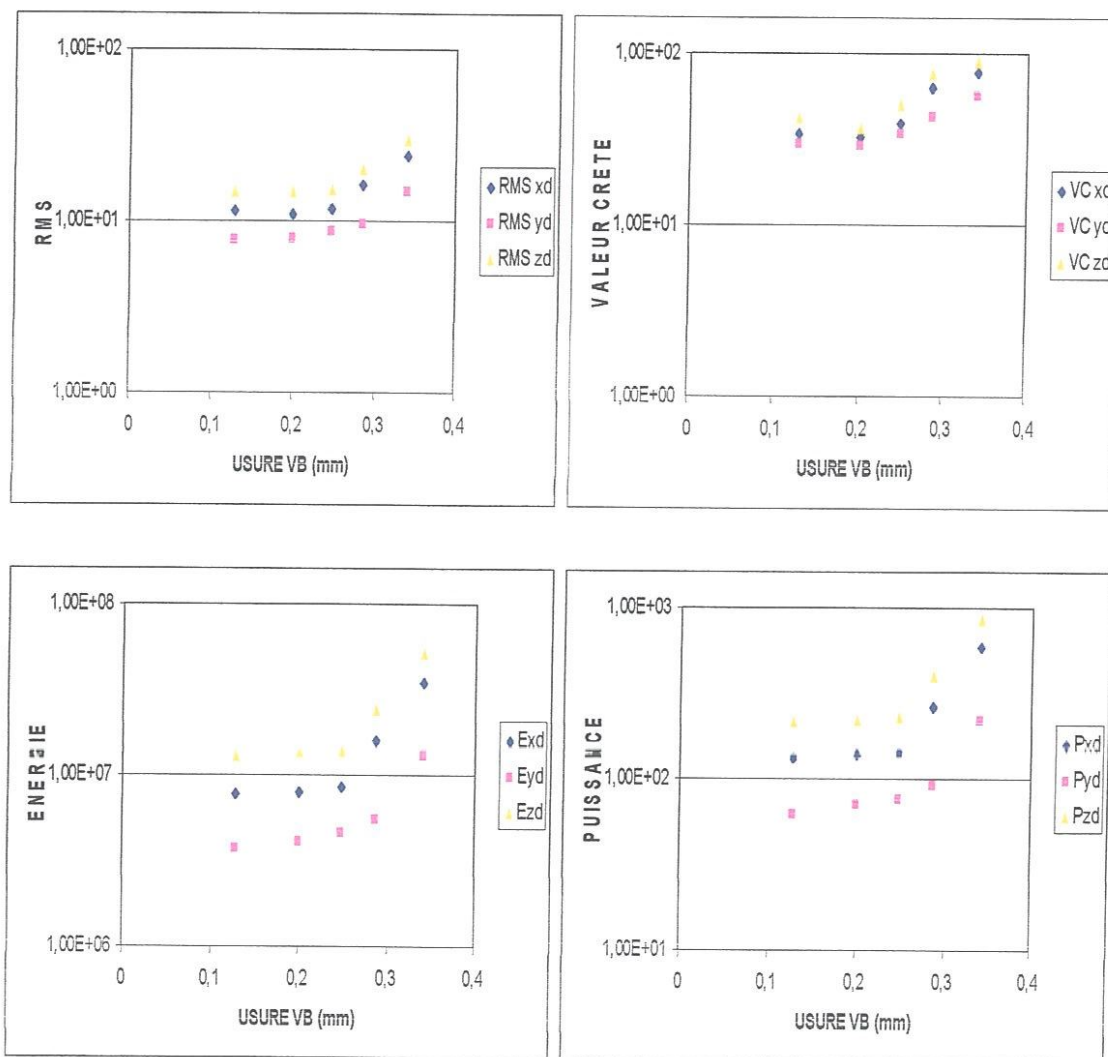
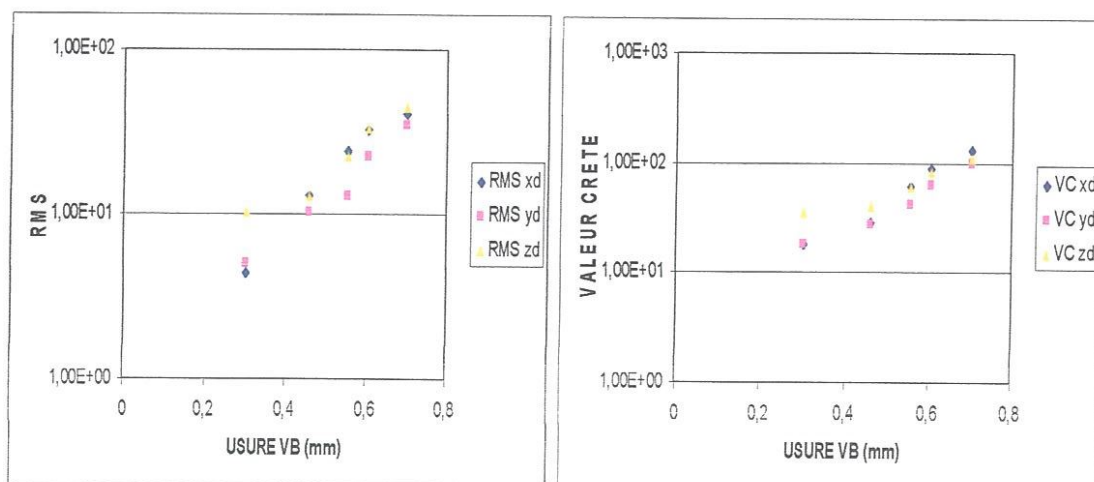


Figure IV.25 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.



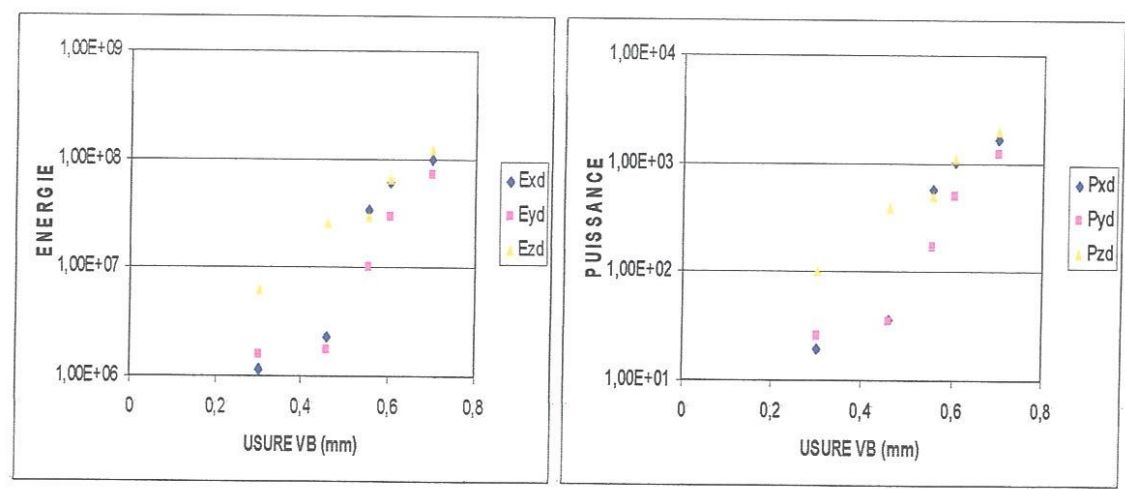


Figure IV.26 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

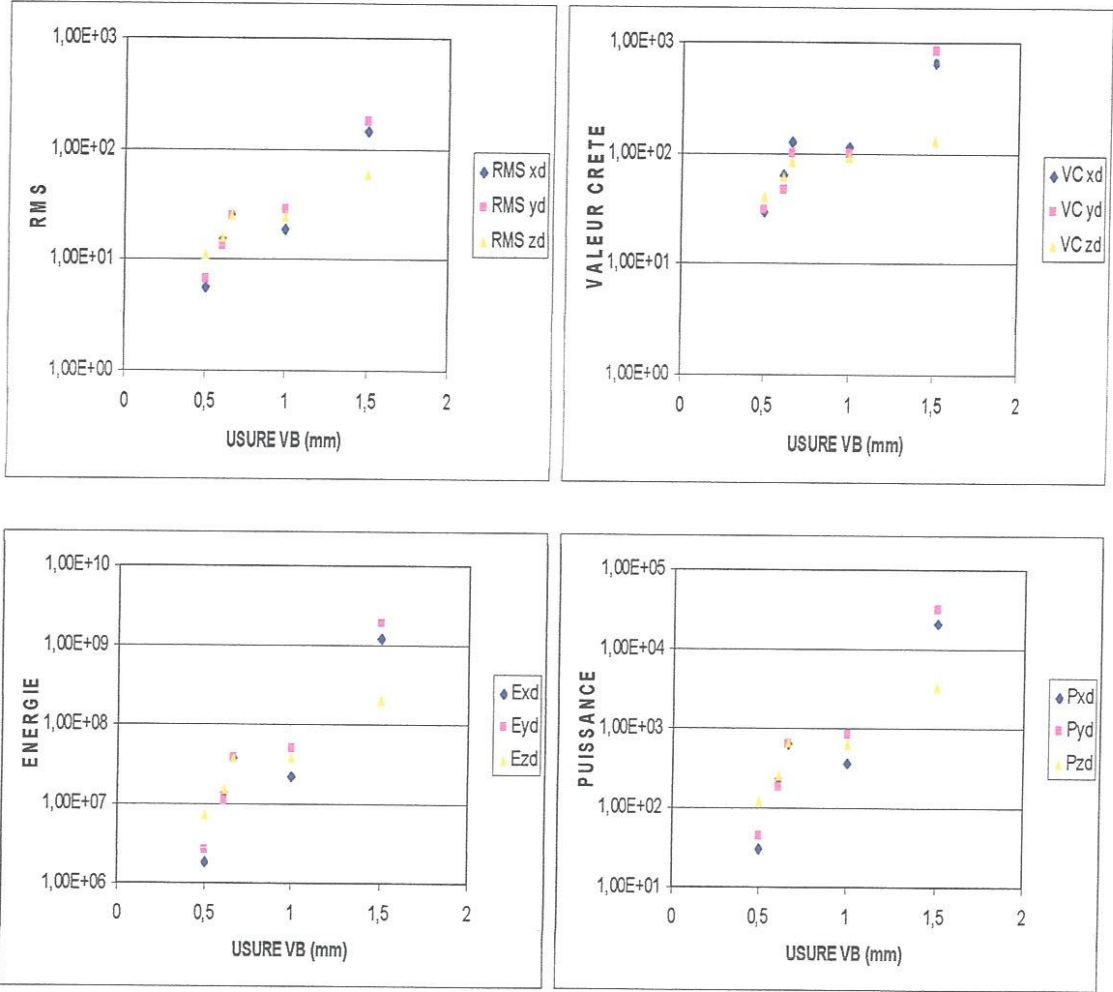


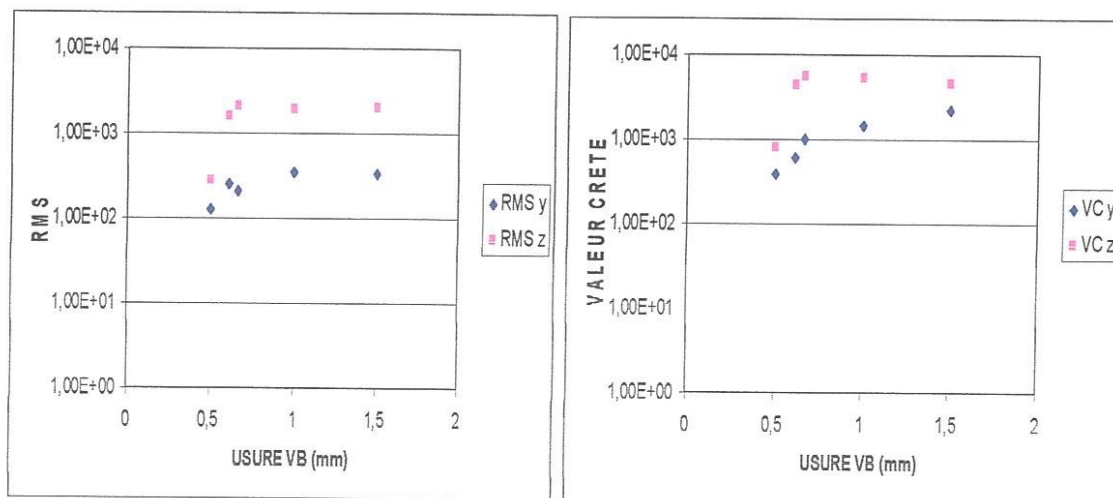
Figure IV.27 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différents efforts de coupe. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

IV.4.3. Evolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure (cas des signaux d'accélération)

Dans le souci de couvrir les phénomènes de haute fréquence, on est obligé de mesurer l'accélération de l'outil dans la direction tangentielle et radiale dans une durée très courte (quelques millisecondes). Comme les conditions de coupe choisies sont sévères, l'évolution de l'usure de l'outil est par conséquent rapide, donc le temps de mesure, ne nous permet pas de faire une mesure fiable permettant la détection d'une éventuelle évolution des indicateurs scalaires en fonction de l'usure. A l'exception pour la vitesse de 190 m/min qui est considérée comme une vitesse très importante ou l'usinage d'un palier dure 0.02 s représente environ le tiers du temps de mesure, ce qui a été suffisant pour avoir une certaine tendance des indicateurs scalaires en fonction de l'usure comparable à ceux de l'effort de coupe (fig. IV.24)

L'analyse de la figure (IV.28) montre :

- Une évolution brusque des différents indicateurs dans la première étape lors du passage de l'usure en dépouille de 0.5 à 0.65 mm.
- L'évolution des indicateurs devient pratiquement constante en fonction de l'usure (0.65 à 1.5 mm), cela est dû à la rupture du bec de l'outil que nous avons constaté et qui est montrée sur les photos (IV.11). La rupture du bec de l'outil provoque un recul de ce dernier par rapport à la pièce et par conséquent la puissance et l'énergie du signal se stabilise.



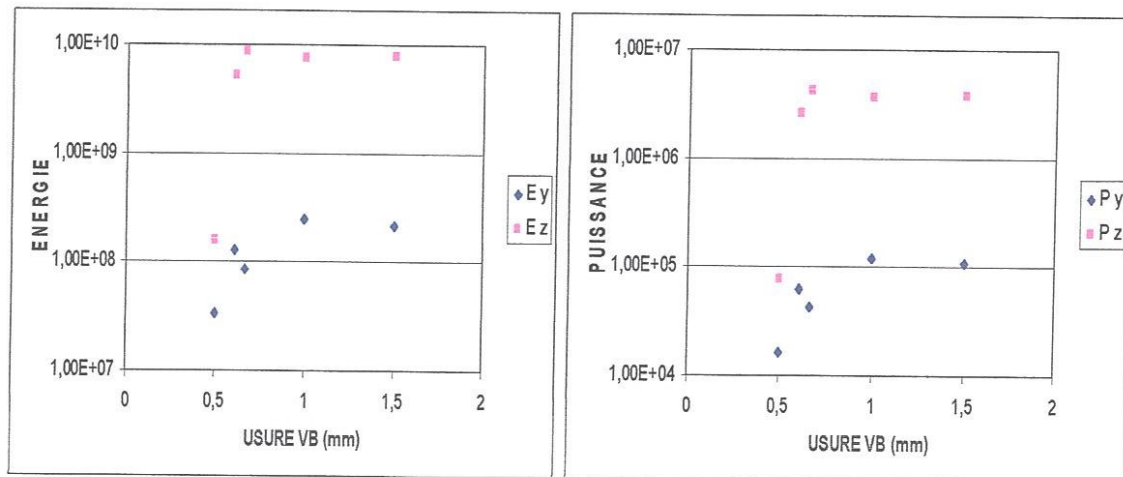


Figure IV.28 : Semi log des indicateurs scalaires en fonction de l'usure en dépouille pour différentes accélérations. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

IV.5. Conclusion du chapitre

Ce chapitre a été consacré dans un premier temps à la présentation des résultats de l'évolution de l'usure et la rugosité en fonction du temps et de la vitesse de coupe. Dans un deuxième temps, nous avons présenté l'analyse des signaux obtenus (force de coupe et les signatures de vibration) par la méthode temporelle.

L'analyse des résultats des essais réalisés dans ce chapitre débouche sur les conclusions suivantes :

- Lors de l'observation de l'endommagement de l'arête de carbure S40T, l'usure sur la face en dépouille est irrégulière.
- La vitesse de coupe a une influence capitale sur l'usure, l'augmentation de la vitesse de coupe provoque une évolution plus rapide de l'usure en dépouille ou en cratère et par conséquent une nette diminution de la tenue de l'outil de coupe.
- L'évolution de la rugosité en fonction de l'usure en dépouille montre que l'augmentation de l'usure en dépouille VB, entraîne une dégradation de la qualité de la surface usinée. A cet effet, il est constaté que pour les vitesses élevées, la dégradation de la surface usinée est trop rapide au-delà du critère d'usure admissible.

- Pour les trois vitesses de coupe étudiées, on a constaté une augmentation progressive de la force de coupe statique (des trois composantes de l'effort de coupe) avec l'augmentation de l'usure en dépouille.
- Plusieurs indicateurs scalaires ont été étudiés pour voir leurs sensibilités à l'usure de l'outil de coupe. Parmi ces indicateurs scalaires qui ont montré une sensibilité claire à l'usure, la valeur efficace (RMS), la valeur crête (VC), l'énergie (E) et la puissance (P) des signaux dynamiques de l'effort de coupe.
- Pour les deux vitesses de coupe 100 et 135 m/min, ces indicateurs sélectionnés augmentent d'une manière très remarquable avec l'augmentation de l'usure, jusqu'à l'usure admissible $VB = 0.5$ mm, au delà de cette valeur l'augmentation devient moins importante. Cette constatation apparaît beaucoup plus clairement pour la vitesse de coupe 190 m/min, où on constate une augmentation brusque de ces indicateurs pour $VB = 0.5$ à 0.6 mm, après cette phase ces derniers deviennent presque constants, ce que nous avons expliqué par la rupture du bec de l'outil (recul de l'arrête de coupe par rapport à la pièce usinée).
- Pour les signaux d'accélération, ces constatations sont moins évidentes sauf pour la vitesse de coupe 190 m/min où on obtient des résultats qui confirment parfaitement ceux de l'effort de coupe pour la même vitesse.

Dans le prochain chapitre nous présentons l'analyse spectrale (méthode fréquentielle) et par la suite nous proposons d'utiliser un nouveau moyen de traitement du signal, stable, puissant et moderne. L'analyse multirésolution en ondelettes, grâce à ces fabuleuses propriétés, permettra le filtrage du bruit et d'autres composantes parasites du signal.

Chapitre V

Identification de l'usure des outils de coupe par les méthodes fréquentielle et multirésolution en ondelettes

V.1. Introduction

Ce chapitre est destiné à la présentation et l'analyse des résultats des signaux expérimentaux obtenus à partir de l'utilisation des méthodes et techniques sophistiquées dans l'analyse vibratoire.

Hors de la transformation au domaine fréquentiel par l'FFT l'information du temps est perdue. Pour remédier à cet inconvénient, une nouvelle technique de traitement a été proposée comme outil fiable et pratique de traitements des signaux obtenus. La méthode des ondelettes en générale et celle multirésolution en particulier est sans doute un outil très efficace dans plusieurs domaines.

V.2. Signaux des efforts de coupe

V.2.1. Analyse fréquentielle

Vue les limites d'acquisition du système de mesure des efforts de coupe, nous avons mesuré ces derniers dans la bande de fréquence [0 – 5 KHz] et vue la complexité des phénomènes physiques qui se produisent à l'interaction outil-pièce-machine, nous avons choisi de faire une présentation tridimensionnelle (3D), des signaux et des spectres des efforts de coupe et d'accélération en fonction de l'usure en dépouille VB, afin de faciliter l'analyse de ces résultats.

Dans un première temps, nous présentons une synthèse des résultats sur le tableau V.1, où on voit la variation de l'usure d'un palier à un autre (1 à 5) en fonction des paramètres du régime de coupe.

Vc (m/min)	f (mm/tr)	ap (mm)	Usure VB (mm) dans les cinq paliers					Usure KT (mm) dans les cinq paliers				
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
100	0,12	0,5	0,086	0,131	0,2	0,225	0,261	0,012	0,02	0,024	0,031	0,041
		1	0,123	0,2	0,248	0,286	0,34	0,015	0,02	0,03	0,044	0,071
135		0,5	0,221	0,321	0,425	0,502	0,601	0,023	0,034	0,046	0,061	0,081
		1	0,301	0,46	0,555	0,603	0,7	0,048	0,054	0,074	0,084	0,097
190		0,5	0,401	0,501	0,561	0,821	1,112	0,039	0,053	0,107	0,168	0,184
		1	0,5	0,617	0,662	0,999	1,502	0,074	0,11	0,15	0,205	0,239

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

L'analyse des signaux et des spectres des efforts de coupe (figures V.1 à V.10) dans les trois directions axiale, radiale et tangentielle pour trois vitesses de coupe 100, 135 et 190 m/min et pour deux profondeurs de passe 0.5 et 1 mm montre :

- Les principaux pics qui apparaissent sur les différents spectres sont :
 - Un pic correspondant à la fréquence propre de la plate forme dans le plan x, y, qui apparaît entre 2800 Hz et 3100 Hz. Il est influencé par la vitesse de rotation.
 - Un deuxième pic apparaît entre 3800 et 3900 Hz correspondant au premier mode de flexion de l'outil dans sa direction axiale. En vibration libre ce mode apparaît à 4000 Hz, voir chapitre III.
- La composante radiale de l'effort de coupe fait apparaître d'une manière très claire la première fréquence propre axiale de l'outil, suivie de la composante axiale. Alors que la composante tangentielle reste bruitée et ne permet pas l'apparition de la fréquence propre surtout pour la profondeur de passe 0.5 mm.
- Une augmentation significative des amplitudes des signaux d'un palier à un autre avec l'augmentation de l'usure, surtout pour les vitesses 135 et 190 m/min.
- L'augmentation de la profondeur de passe ($a_p = 1$ mm) laisse apparaître en plus du premier mode axiale, le mode de torsion de l'outil surtout dans la composante radiale de l'effort, ce résultat est confirmé par [Wei'05].
- L'analyse des spectrales ne permet pas une apparition claire de l'usure de l'outil, à part un certain nombre de pic qui apparaissent à basse fréquence jusqu'à 2000 Hz qui peuvent être dûes au phénomène d'usure [Dim'00], ainsi que l'augmentation des amplitudes du pic correspondant à la fréquence de résonance de l'outil avec l'augmentation de l'usure VB.
- Apparition du phénomène de broutage pour la vitesse de coupe 190 m/min et une profondeur de passe 0.5 mm (figures V.3 à V.4) à partir du deuxième palier VB > 0.5 mm. Ce résultat va être validé par les mesures accélérométriques.
- Pour la profondeur de passe 1 mm, le phénomène de broutage apparaît à partir de la vitesse de coupe 135 m/min au troisième palier (VB > 0.5 mm) et dès le premier palier pour la vitesse de coupe 190 m/min (VB > 0.5 mm).

Comme pour la vitesse de coupe 190 m/min, les sollicitations mécaniques et thermiques s'amplifient d'un palier à un autre et conduisent à une usure rapide (VB et

KT). Au cinquième palier l'évolution de l'usure conduit à l'effondrement de l'arête de l'outil de coupe (figures V.9 à V.10), suivi d'une diminution des efforts de coupe due à la diminution de la profondeur de passe provoquée par le recul de l'arête de coupe par rapport à la pièce usinée [Cem'05]. La figure (V.10 b), montre une augmentation nette de l'amplitude du pic correspondant à la fréquence propre de l'outil avec l'augmentation de l'usure.

En conclusion, l'analyse des spectres ne permet pas un bon suivi de l'évolution de l'usure, parce que les signaux des efforts de coupe mesurés sont très bruités. Nous présentons dans la section suivante une méthode permettant le débruitage de ces signaux.

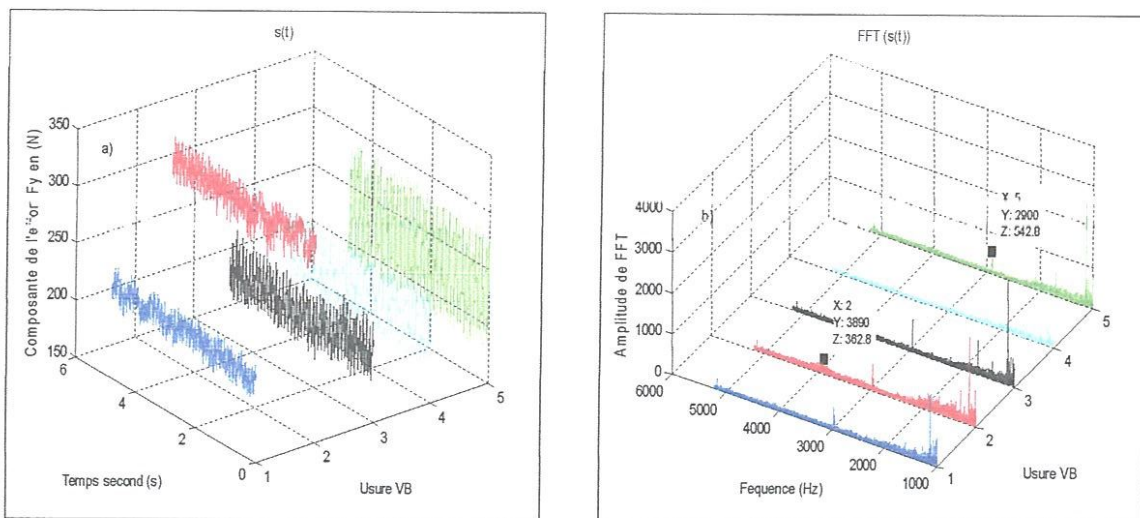


Figure V.1 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

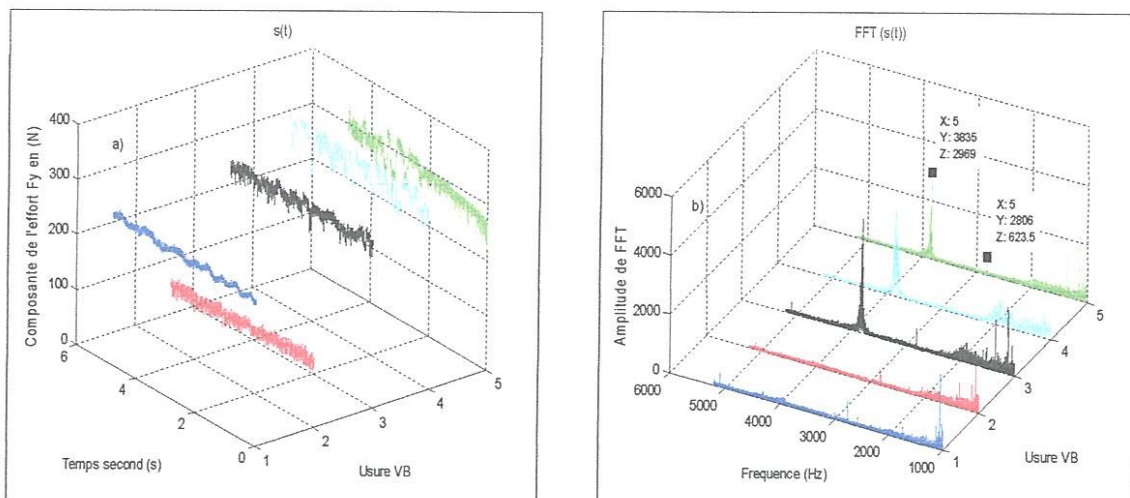


Figure V.2 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

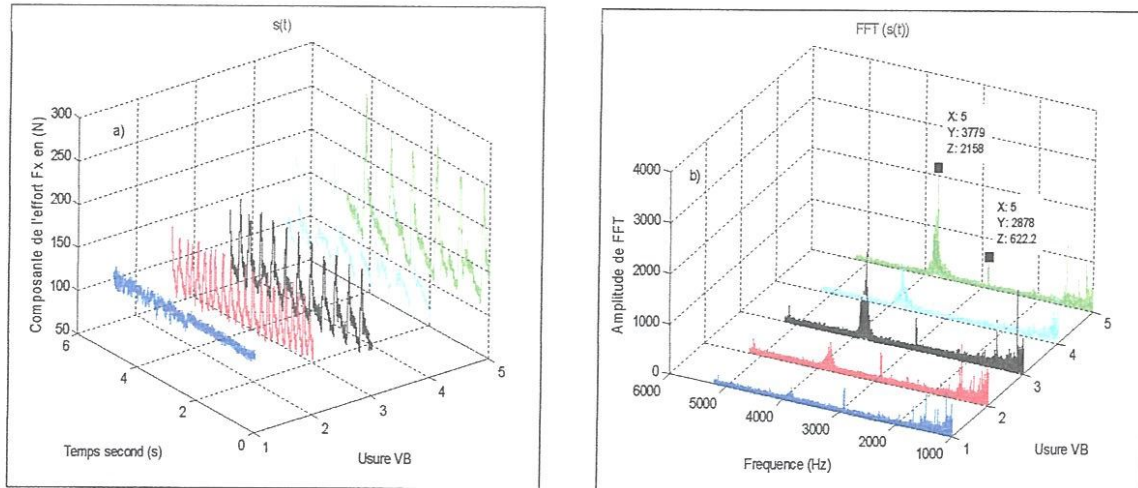


Figure V.3 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

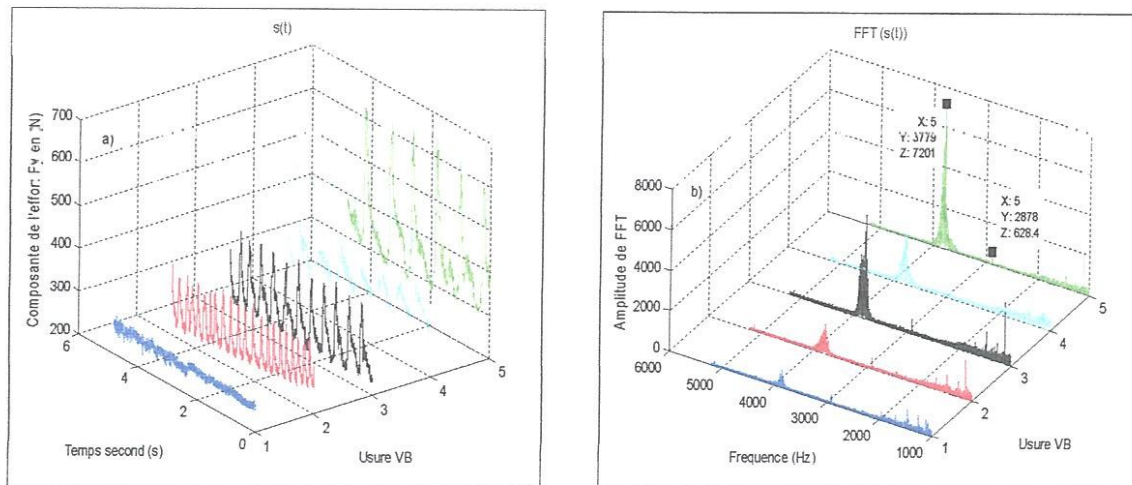


Figure V.4 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

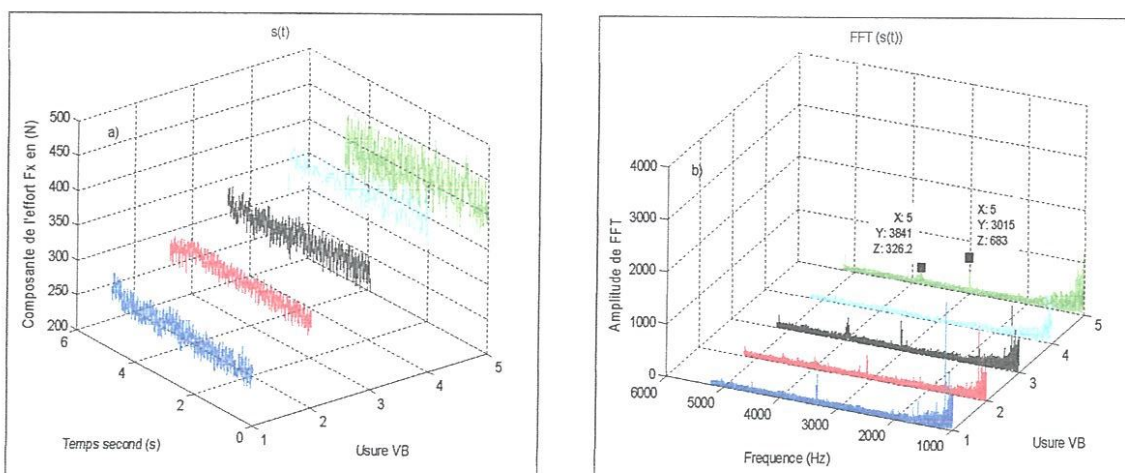


Figure V.5 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

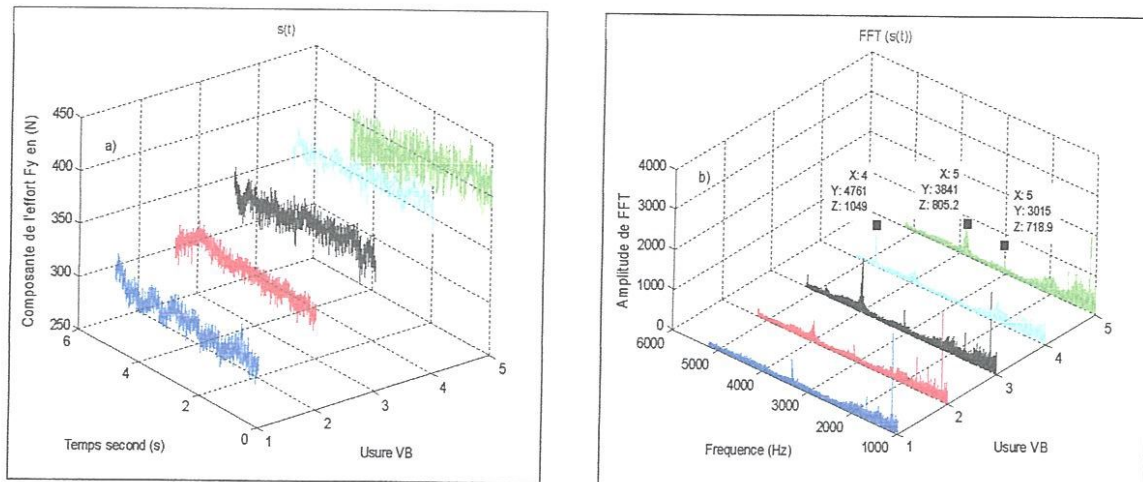


Figure V.6 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

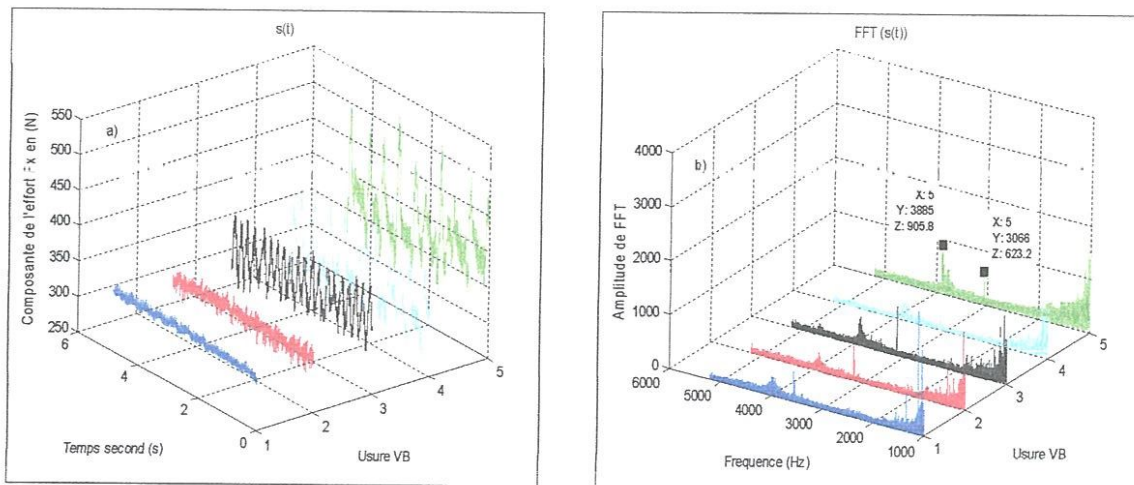


Figure V.7 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

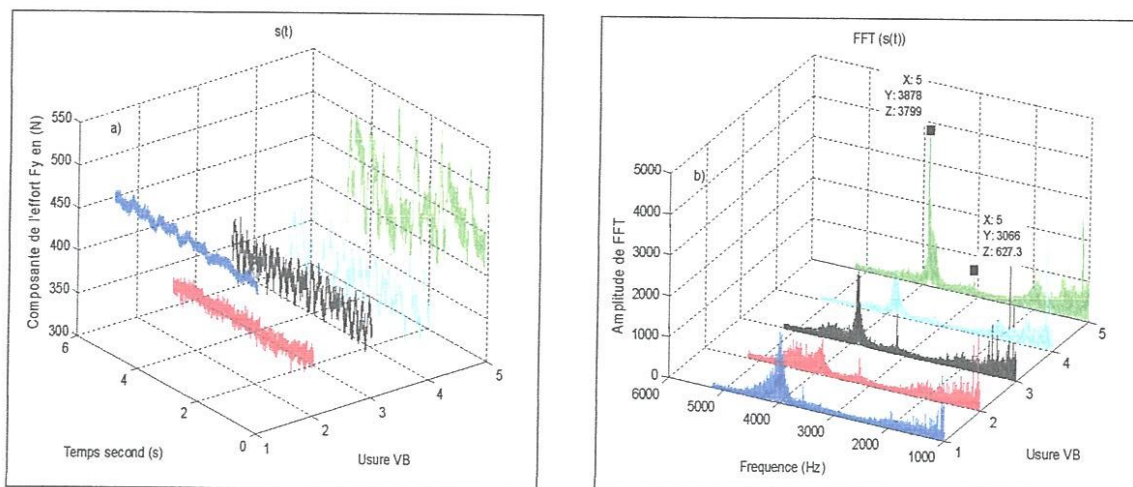


Figure V.8 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

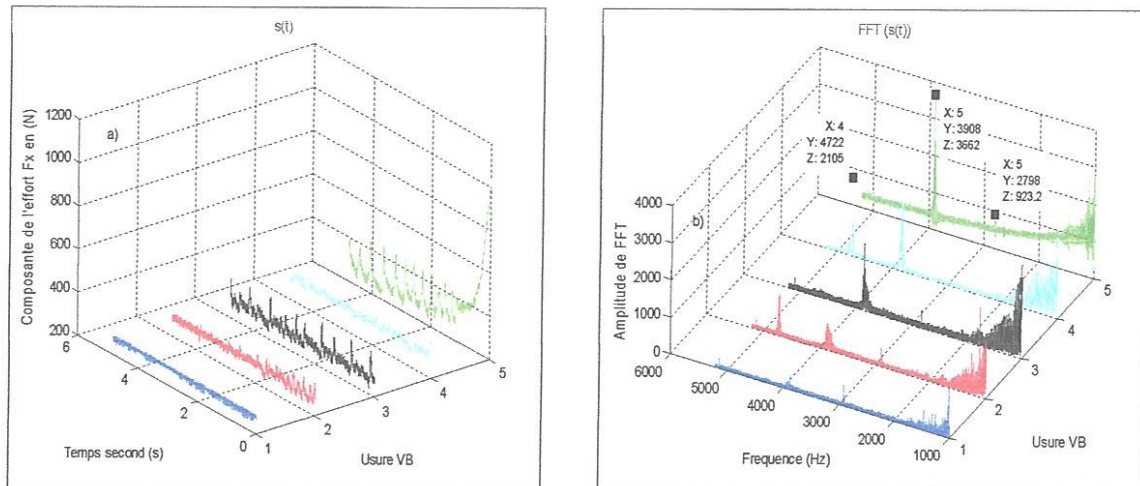


Figure V.9 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

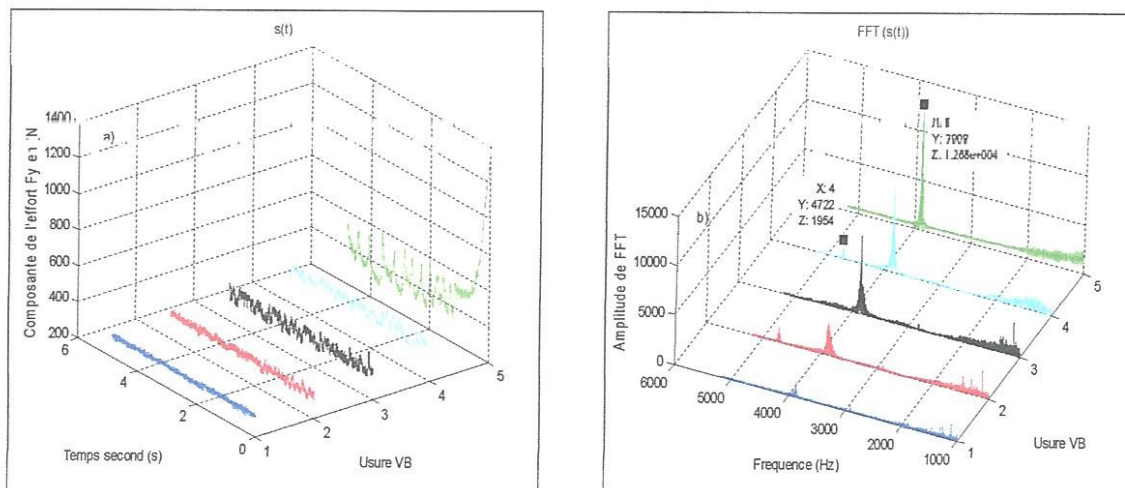


Figure V.10 : a) Signaux mesurés (F_y), b) Les spectres des efforts de coupe radiale (F_y) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

V.2.2. Analyse multirésolution en ondelettes

La transformée en ondelette est une nouvelle méthode relativement au traitement des signaux qui a été appliquée avec grand succès à la surveillance du processus d'usinage. Le succès de cette méthode est généralement attribué à la forme normale de l'ondelette, qui est plus descriptif de la plupart des processus normaux que la fonction sinus employée dans FFT.

L'analyse multirésolution en ondelettes a été proposée pour améliorer la sensibilité des indicateurs scalaires tel que le kurtosis en filtrant le bruit aléatoire et les autres composantes de la machine pour n'avoir uniquement que les signatures de variation de l'outil de coupe.

L'analyse comporte, en plus des décompositions en ondelette (détails et approximations) issus de l'AMRO du signal mesuré, l'analyse d'enveloppe du niveau de la décomposition en ondelette et son FFT.

Les profils des signaux des efforts de coupe mesurés sont très bruités à cause des conditions de coupe sévères. L'utilisation de L'AMRO revient à passer ces signaux sous un microscope et le filtrage en cascade permet de visualiser chaque partie du signal de l'effort de coupe.

Le but de l'analyse est de déterminer :

- L'emplacement des changements en fonction du temps ou de la position ;
- Le type de changement (une rupture du bec de l'outil, ou un changement brusque) ;
- L'amplitude du changement.

V.2.2.1. Application détaillée de l'AMRO pour trois exemples des signaux (trois vitesses de coupe)

Les figures V.11.a - V.13.a montrent les signaux de la composante radiale des efforts de coupe pour les trois vitesses de coupe étudiées. Pour la vitesse de coupe 100 m/min, on constate une évolution régulière de l'effort de coupe en fonction du temps, alors que pour la vitesse de coupe 135 m/min, commence l'apparitions de certaine perturbations, ces derniers devient établies pour la vitesse 190 m/min.

L'application de l'AMRO aux signaux mesurés permet d'obtenir un certain nombre d'approximation et de détails. L'analyse de ces derniers a montré que c'est le détail D1 qui comporte les informations nécessaires.

Nous présentons sur les figures V.11.b - V.13.b les signaux reconstruit du détail D1, pour les trois vitesses de coupe. Pour la vitesse 100 m/min (figure V.11.b) l'évolution de l'effort de coupe après filtrage reste très régulière. Pour la vitesse 135 m/min (figure V.12.b), on constate l'apparition claire d'une perturbation dans l'intervalle de temps (3.5 à 5 s), alors que pour la vitesse 190 m/min cette perturbation apparaît plutôt.

A partir des signaux reconstruits, on calcule les enveloppes (figures V.11.c - V.13.c) et leurs transformée de Fourier (figures V.11.d - V.13.d). On constate sur ces dernières figures une apparition très claire de deux pics le premier à environ 1500 Hz

et le deuxième à environ 4800 Hz, qui sont synonyme à notre avis à un phénomène d'usure établie $VB > 0.3$ mm. Cet avis est confirmé par la non apparition de ces deux pics sur la figure 11.d où l'usure en dépouille reste inférieure à 0.3 mm. La comparaison des amplitudes de ces deux pics pour les vitesses 135 m/min et 190 m/min (figure V.12.d et figure V.13.d) montre que leurs amplitudes augmente d'une manière très importante avec l'augmentation de l'usure en dépouille.

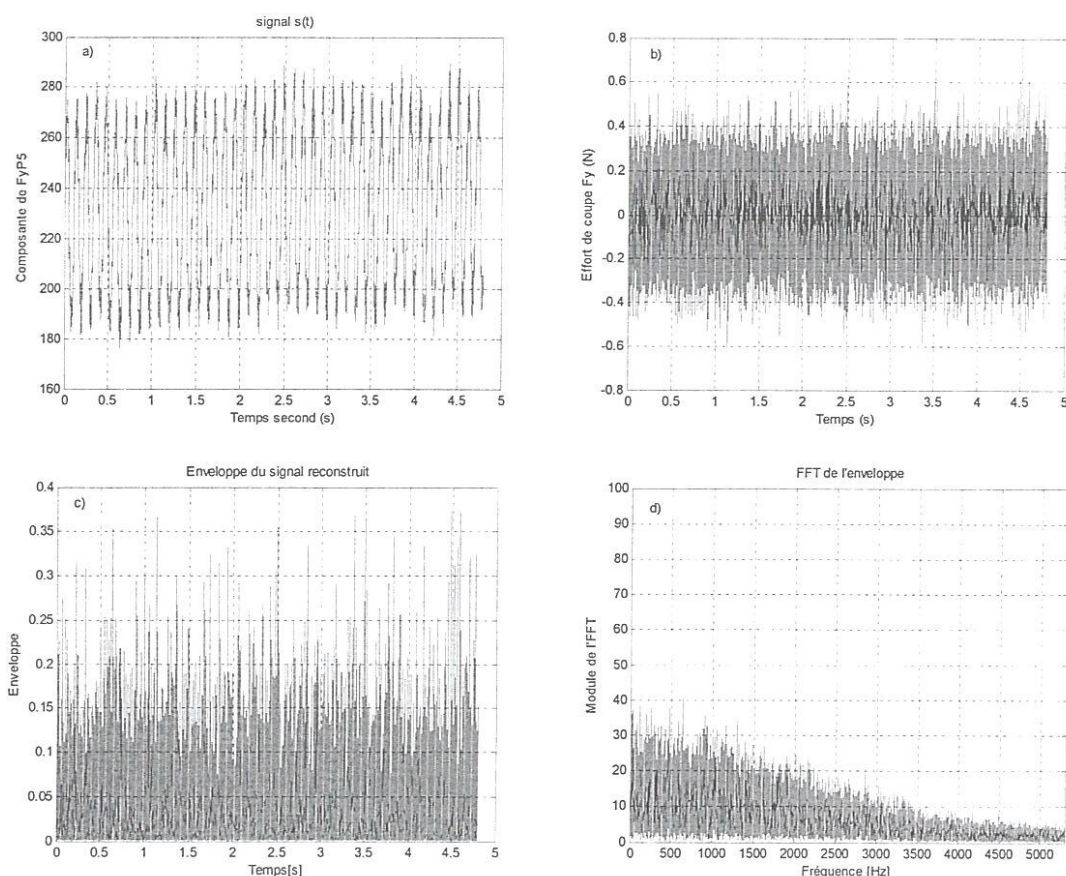
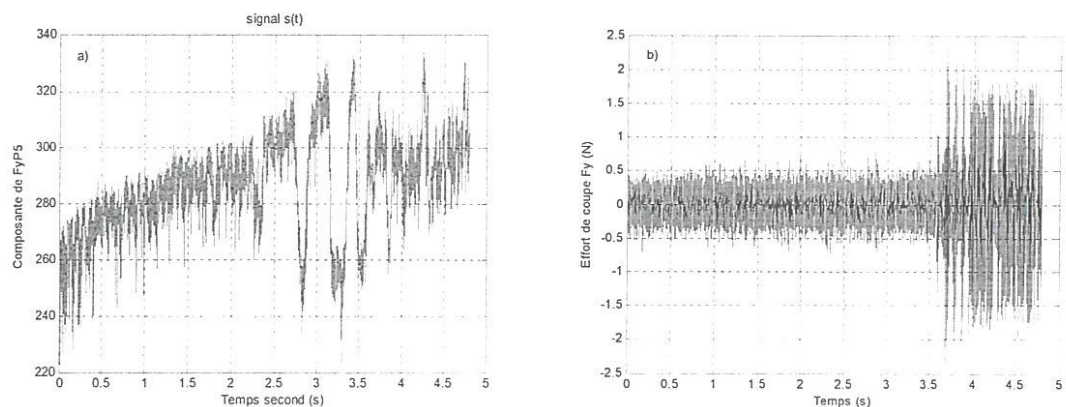


Figure V.11 : a) Signal mesuré (F_y), b) Signal reconstruit ($D1$), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit ($D1$).

($V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm).



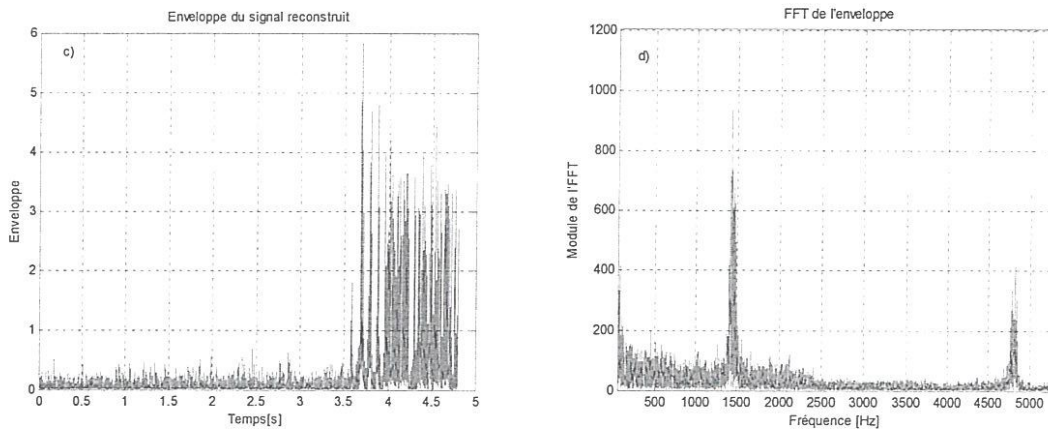
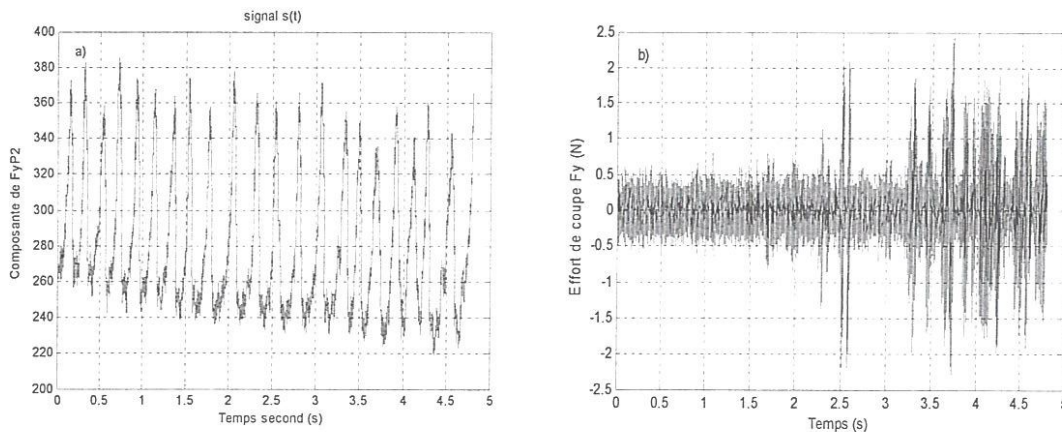


Figure V.12 : a) Signal mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1).

($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm).

Pour montrer la contribution de l'AMRO dans le filtrage des signaux mesurés, nous avons calculé les valeurs des deux indicateurs scalaires le kurtosis et le facteur de crête pour la vitesse 135 m/min. Les indicateurs scalaires ont été très distinctement améliorés. Le kurtosis passe de 3.253 à 9.0388, part contre le facteur de crête étant moins sensible passe de 5.884 à 6.718. Ce qui confirme que le kurtosis est plus sensible à l'usure que le facteur de crête avec un taux d'amélioration égale à 277 % pour le kurtosis.



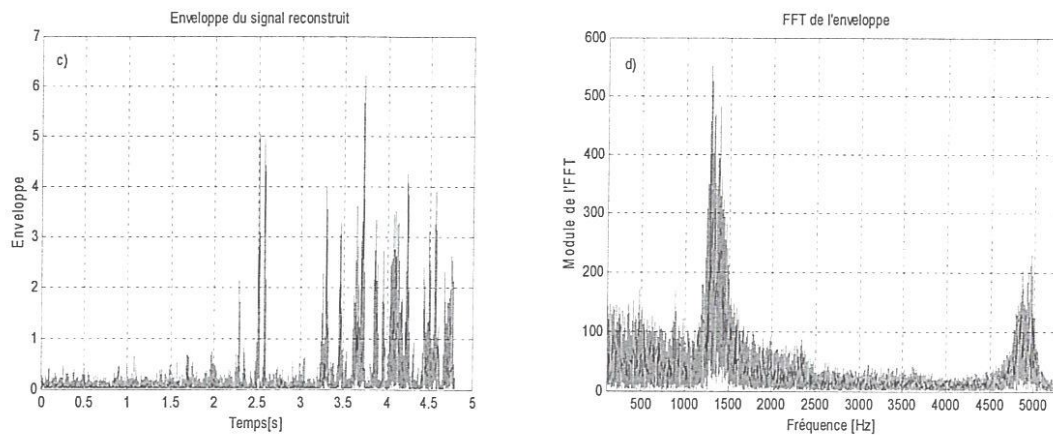


Figure V.13 : a) Signal mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1).

($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm).

V.2.2.2. Application de l'AMRO aux spectres des composantes des efforts de coupe

Nous présentons sur les figures V.14 à V.23 les spectres d'enveloppes de l'ondelette des signaux reconstruits des efforts de coupe (FFT de l'enveloppe du signal reconstruit D1) en fonction de l'usure en dépouille dans les trois directions, l'analyse de ces résultats montre:

- Les spectres d'enveloppe de l'ondelette de la composante tangentielle ne permettent pas l'apparition de l'usure de l'outil, voir annexe [B].
- L'usure apparaît beaucoup plus claire sur les spectres des signaux reconstruits (D1) pour la composante radiale, suivie de la composante axiale.
- L'application de l'AMRO pour le débruitage des signaux mesurés montre d'une part la disparition des deux pics correspondant aux fréquences propre de l'outil et de la plate forme et d'autre par l'apparition de deux nouveaux pics correspondant au phénomène d'usure comme nous l'avons montré dans le paragraphe précédent.

Notons que tous les signaux reconstruit sont extrait à partir du détail D1, le calcul des enveloppes de ces signaux reconstruit et par la suit les FFT des enveloppes montre :

- Le spectre d'enveloppe de la composante radiale de l'effort de coupe F_y pour la vitesse de coupe 100 m/min et une profondeur de passe 0.5 mm ne fait pas apparaître les deux pics d'usure parce que VB reste inférieur à 0.3 mm, figure V.14.

- Les deux composantes axiale et radiale de l'effort de coupe pour la vitesse de coupe 135 m/min et une profondeur de passe 0.5 mm, font apparaître les deux pics d'usure à partir du troisième palier où $VB \geq 0.3$ mm. On constate une diminution de l'amplitude de ces deux pics sur le palier 5 (figures V.15 et V.16), cela s'explique par la rupture du bec de l'outil (recul de l'arrêt de coupe par rapport à la pièce usinée) $VB > 0.6$ mm.

- Les deux composantes axiale et radiale de l'effort de coupe pour la vitesse de coupe 190 m/min et une profondeur de passe 0.5 mm, montrent l'existence très nette des deux pics d'usure à partir du premier palier où $VB > 0.3$ mm, figures V.17 et V.18

- L'augmentation de la vitesse de coupe et la profondeur de passe (a_p) provoque une évolution plus rapide de l'usure en dépouille. A cet effet, on constate que le niveau des amplitudes des pics augmente plusieurs fois avec l'augmentation de la vitesse de coupe surtout de 135 à 190 m/min. D'autre part, pour la vitesse de coupe $V_c = 135$ m/min, on remarque deux pics très clairement avec des amplitudes très élevées au 5^{ème} palier sur la composante radiale (figure V.20). L'augmentation de la vitesse de coupe à 190 m/min (figures V.21 à V.23) fait apparaître plusieurs pics sur les différentes composantes, qui montre que le phénomène de broutage est établi, usinage instable.

- L'analyse globale des ces résultats issus de l'application de l'AMRO montre qu'en peut suivre le phénomène d'usure par l'évolution des deux pics qui apparaissent dans les deux bandes de fréquence [1 – 2] KHz et [4.5 – 5] KHz. L'augmentation des amplitudes de ces deux pics est proportionnelle à l'usure en dépouille de l'outil. La composante la plus adéquate ou suivi de l'usure dans un système de surveillance c'est la composante radiale.

Pour élaborer un système de surveillance en ligne sur les machines afin de suivre l'évolution de l'usure de l'outil de coupe, nous recommandons d'utiliser la méthode multirésolution en ondelette qui permet de débruiter les signaux mesurés et fait apparaître d'une manière très clair deux pics dans la bande [1 – 2] KHz et [4.5 – 5] KHz qui sont proportionnel à l'évolution de l'usure. La composante radiale est la plus sensible à l'usure, on peut même installer un système d'alarme lié à l'apparition des deux pics d'usure qui sont synonyme de dépassement de l'usure en dépouille $VB \geq 0.3$ mm.

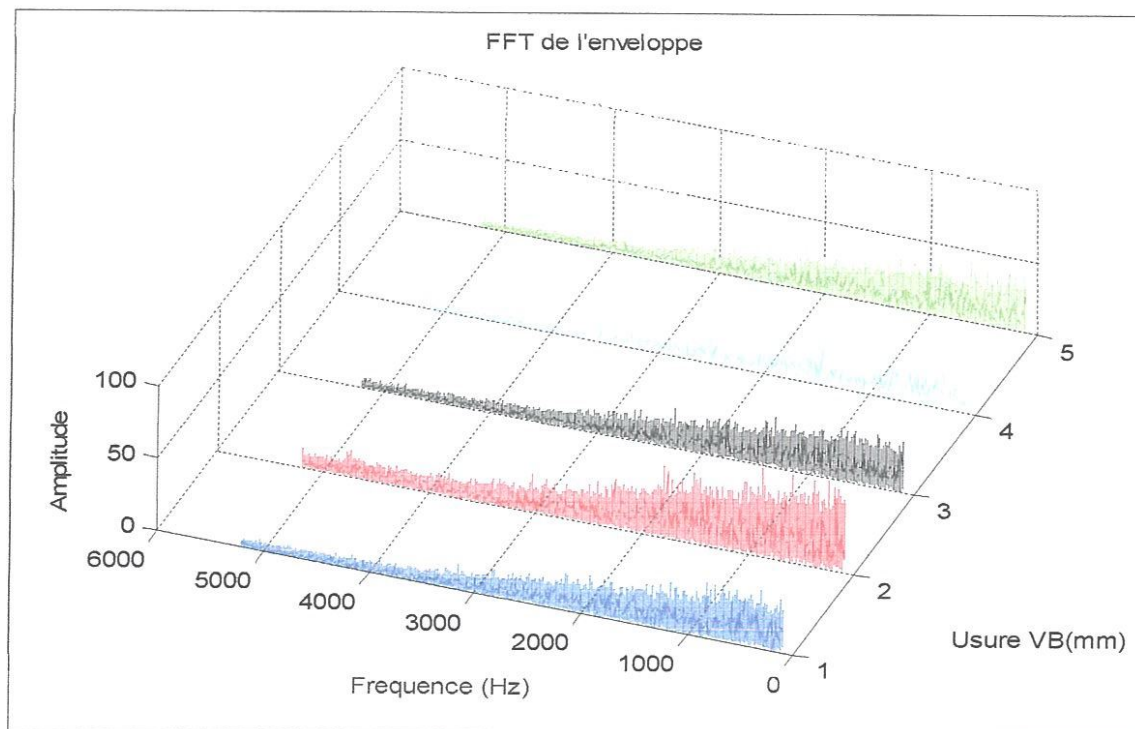


Figure V.14 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial (F_y).
($V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm).

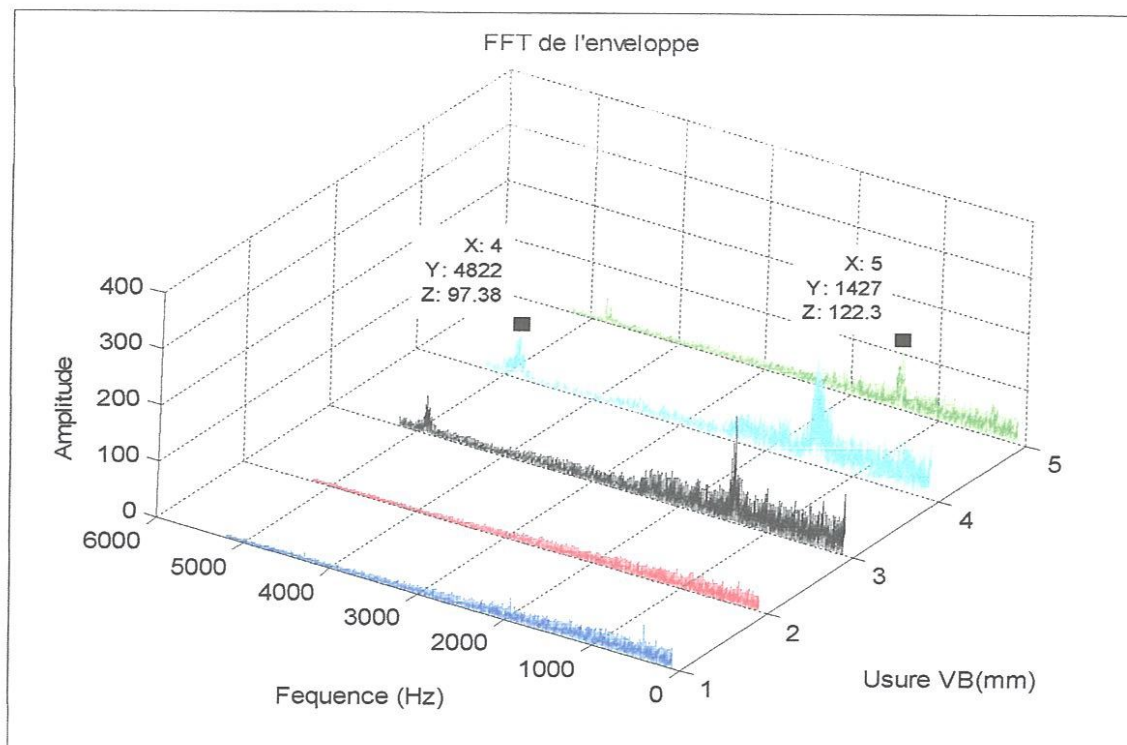


Figure V.15 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort axial (F_x).
($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm).

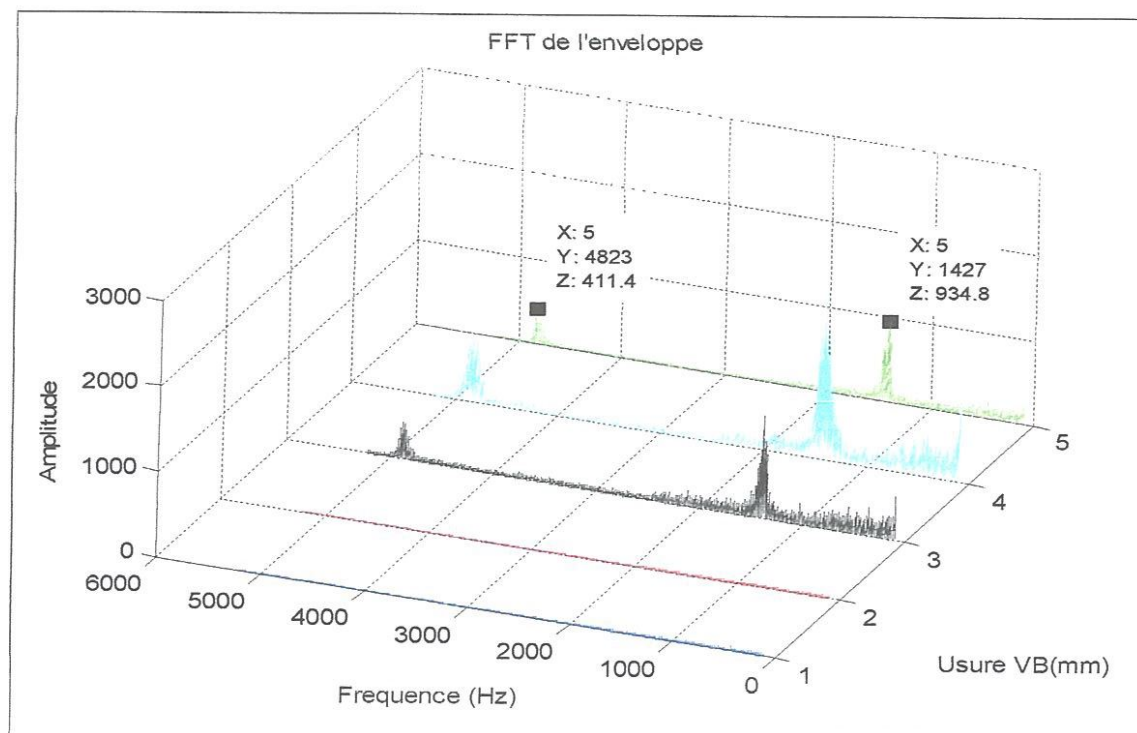


Figure V.16 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial (F_y).
($V_c=135\text{m/min}$, $f=0.12\text{ mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$).

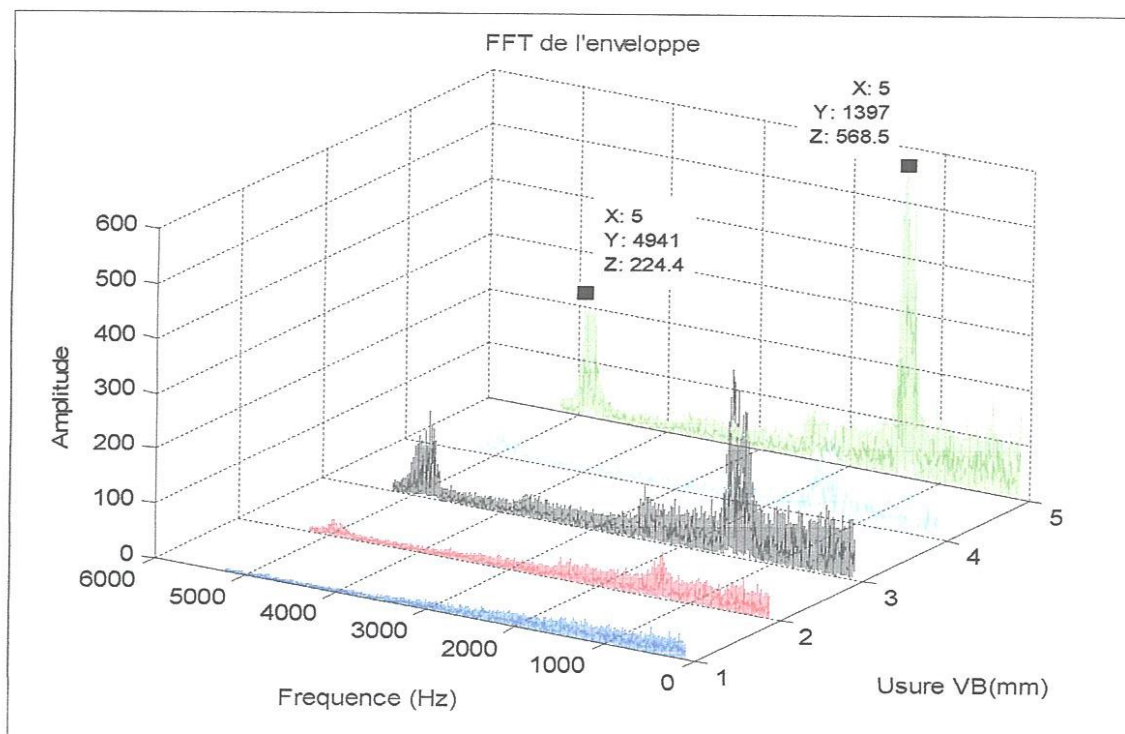


Figure V.17 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort axial (F_x).
($V_c=190\text{ m/min}$, $f=0.12\text{ mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$).

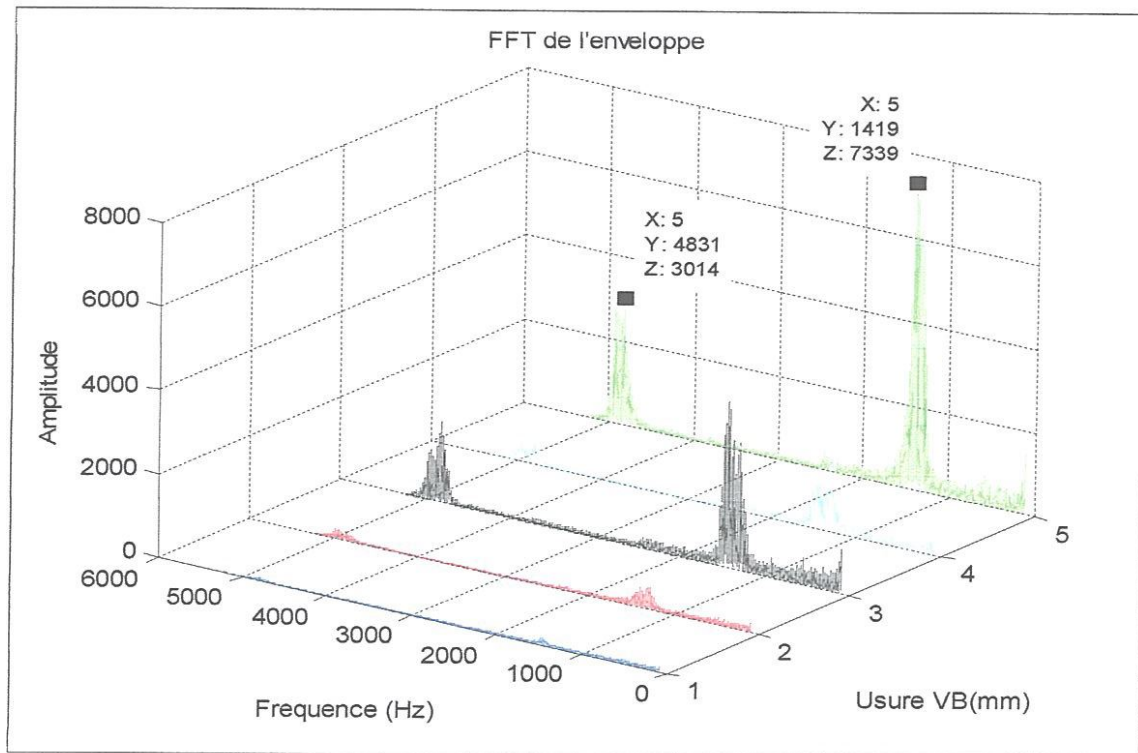


Figure V.18 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial (F_y).

($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm).

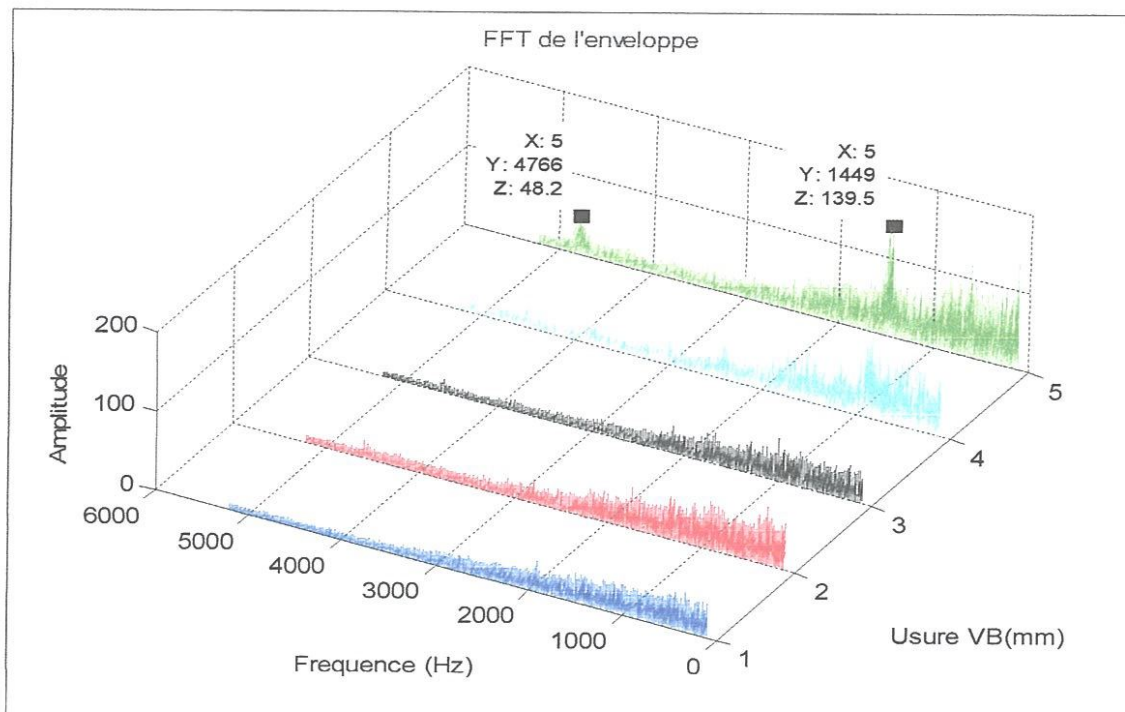


Figure V.19 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial (F_y).

($V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm).

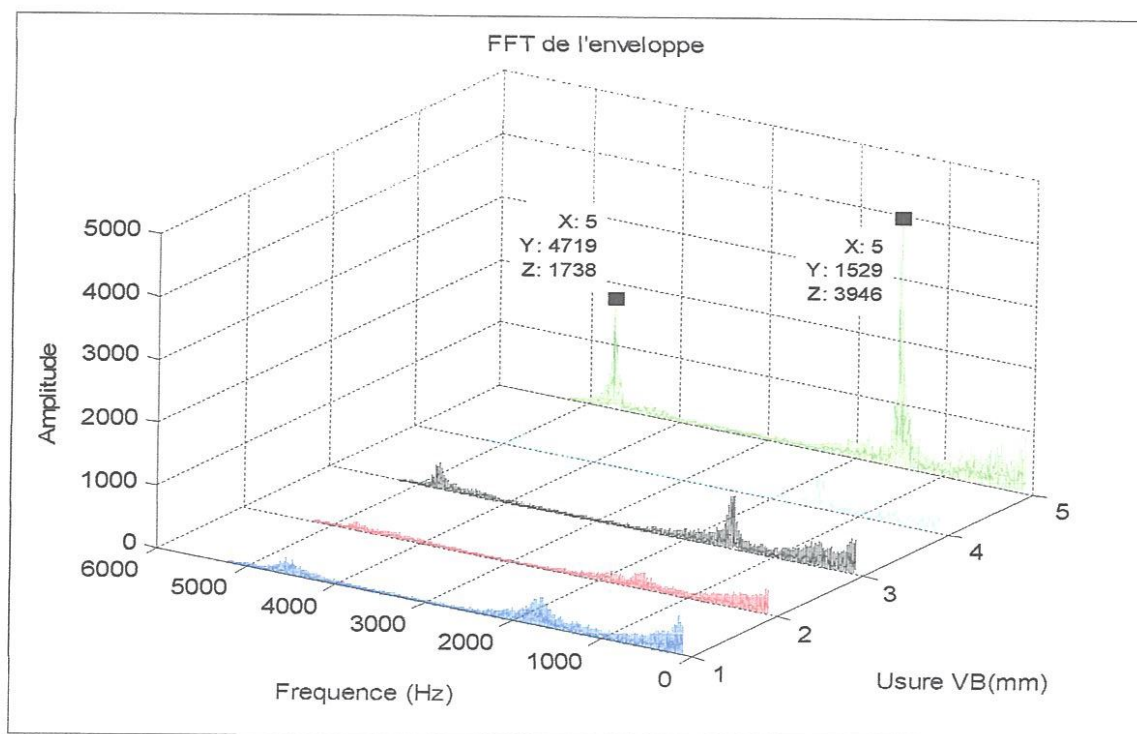


Figure V.20 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial (F_y).
($V_c=135\text{m/min}$, $f=0.12\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$).

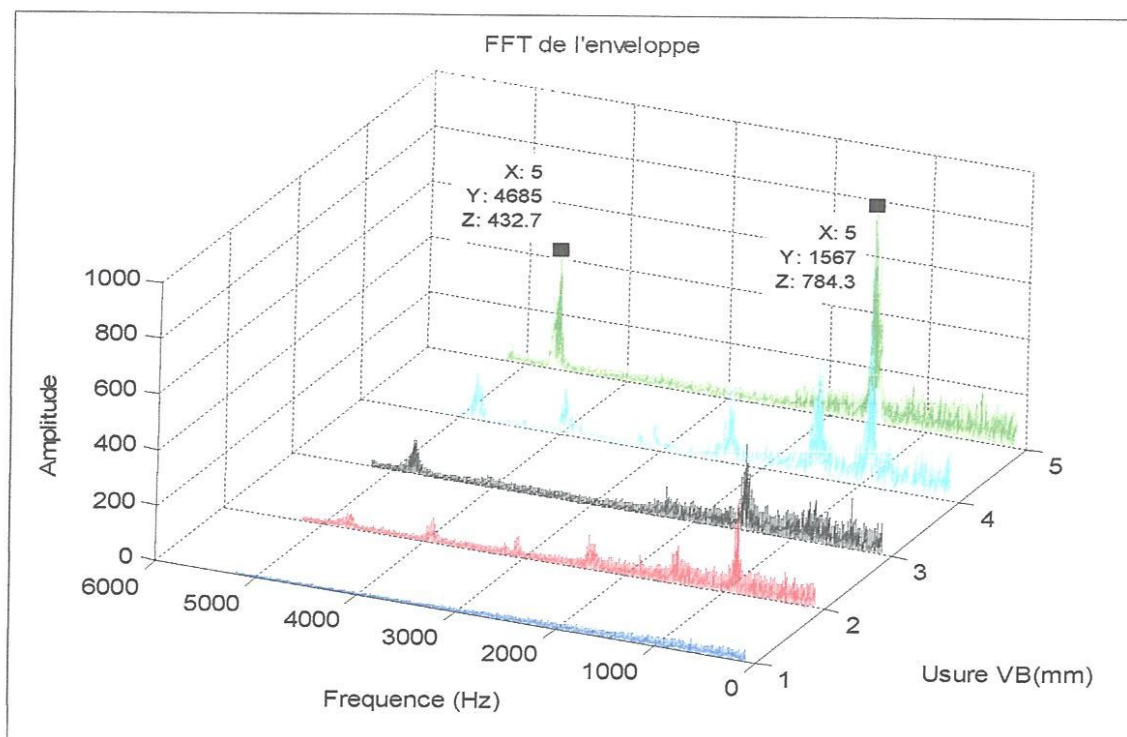


Figure V.21 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort axial (F_x).
($V_c=190\text{ m/min}$, $f=0.12\text{ mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$).

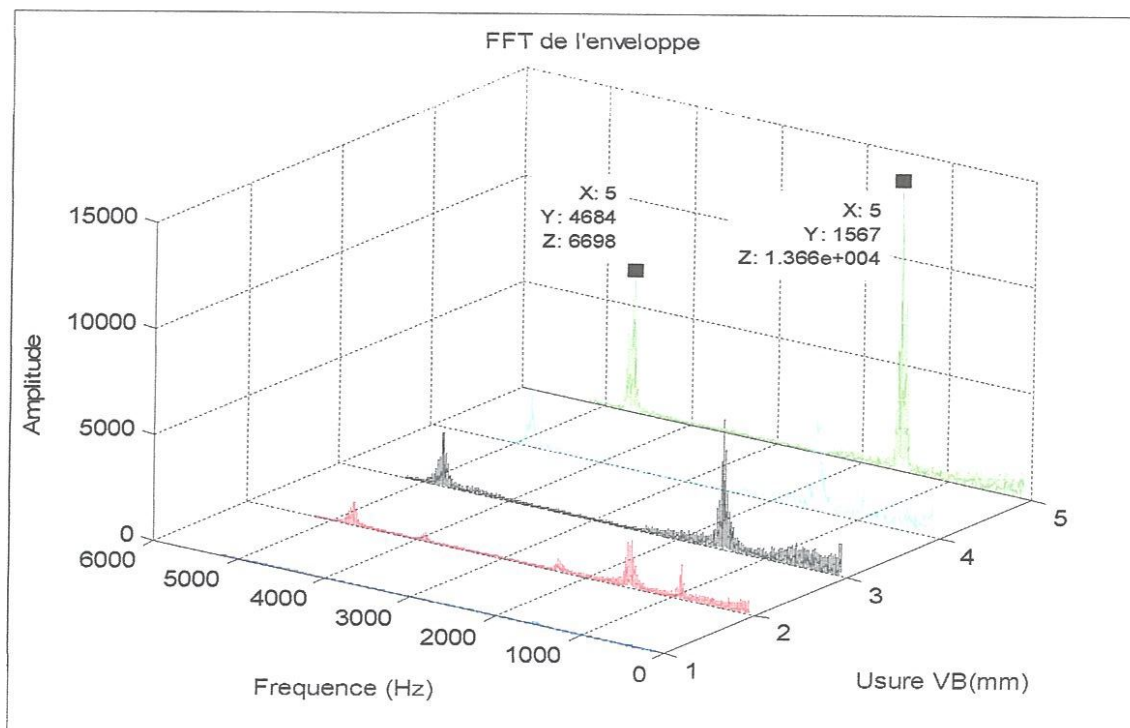


Figure V.22 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort radial (F_y).
($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm).

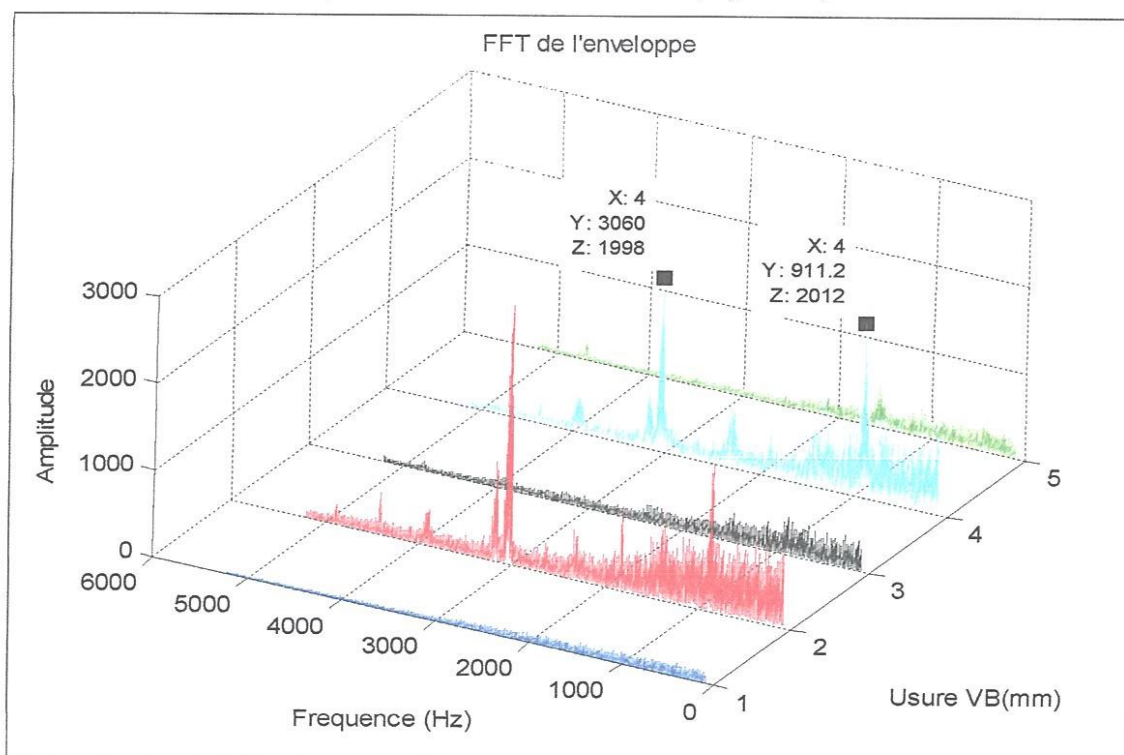


Figure V.23 : Les spectres d'enveloppes de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort tangentiel (F_z).
($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm).

V.2.2.3. Mise en évidence du phénomène de broutage

Nous avons montré dans le chapitre IV qu'avec l'augmentation de la vitesse de coupe, les sollicitations thermiques et mécaniques sur l'arête de coupe deviennent importantes ce qui conduit à une usure catastrophique qui provoque la rupture de l'arête de coupe.

Nous présentons sur les figures (V.24 à V.26) trois exemples de signaux de la composante de l'effort de coupe radial (F_y) traité par l'AMRO, nous donnerons respectivement le signal mesuré (F_y), l'enveloppe du signal reconstruit qui a été extrait à partir du détail 1 (D1) et le Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1) pour les trois vitesses de coupe et pour $a_p = 1$ mm.

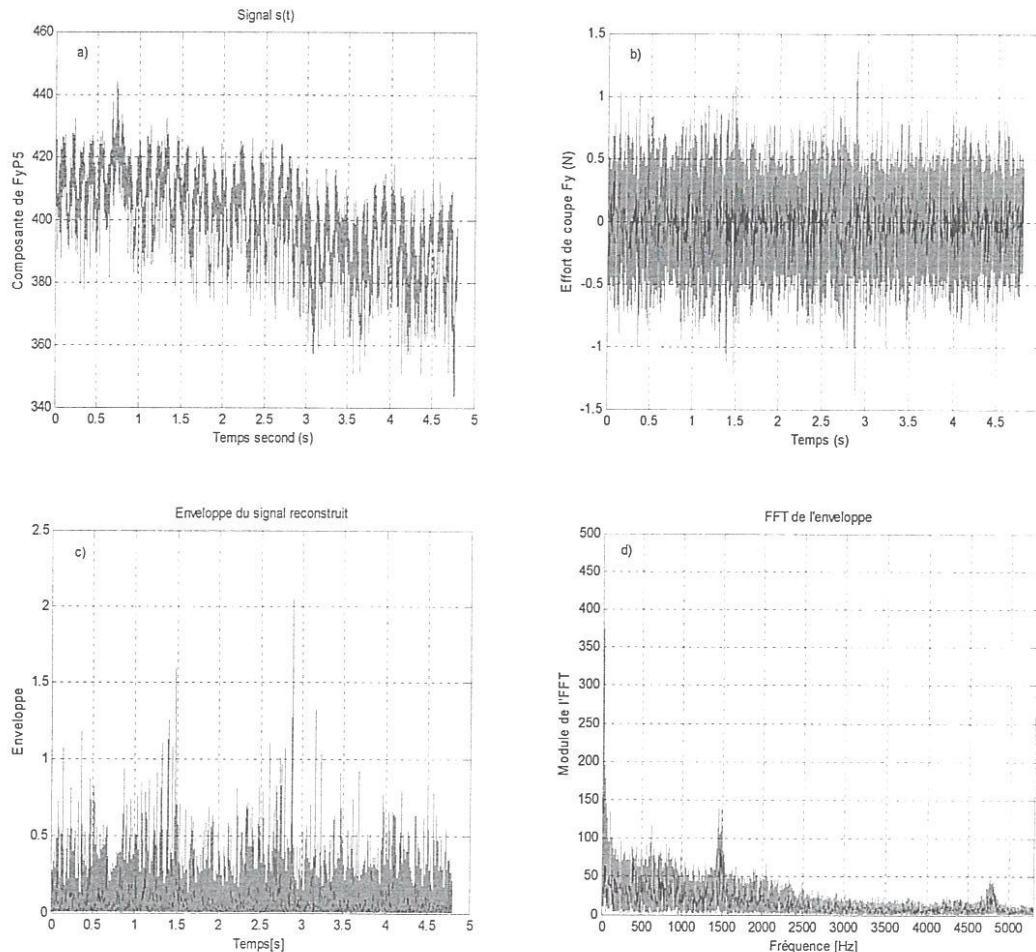


Figure V.24 : a) Signal mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1).

($V_c = 100$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 1$ mm).

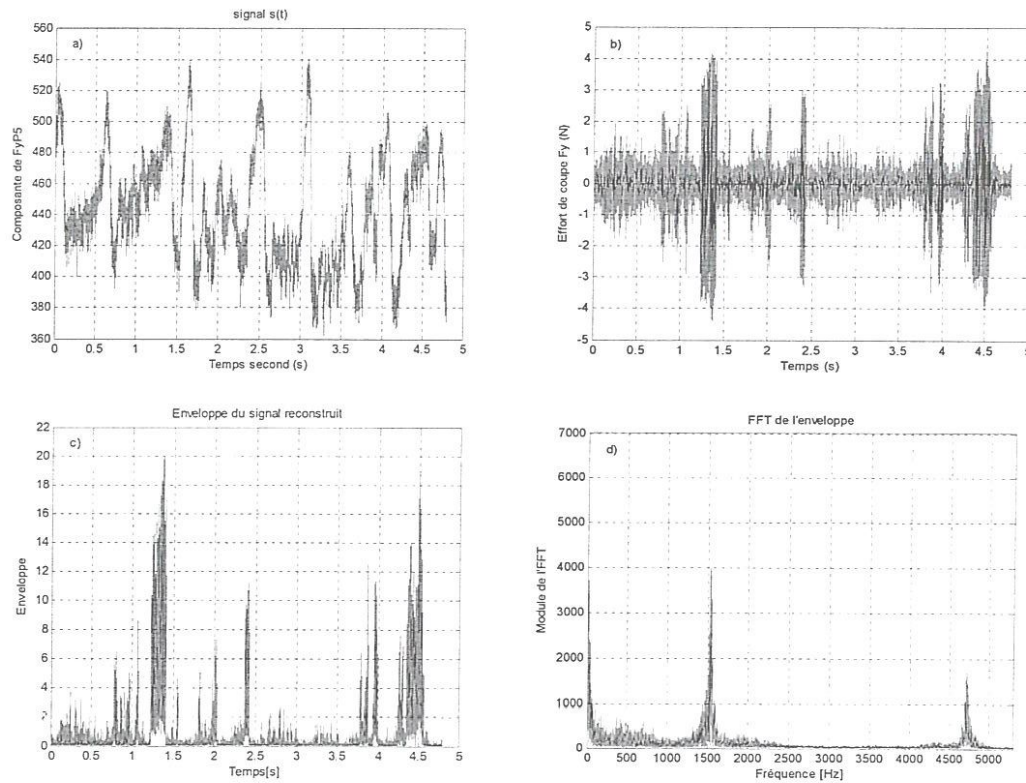
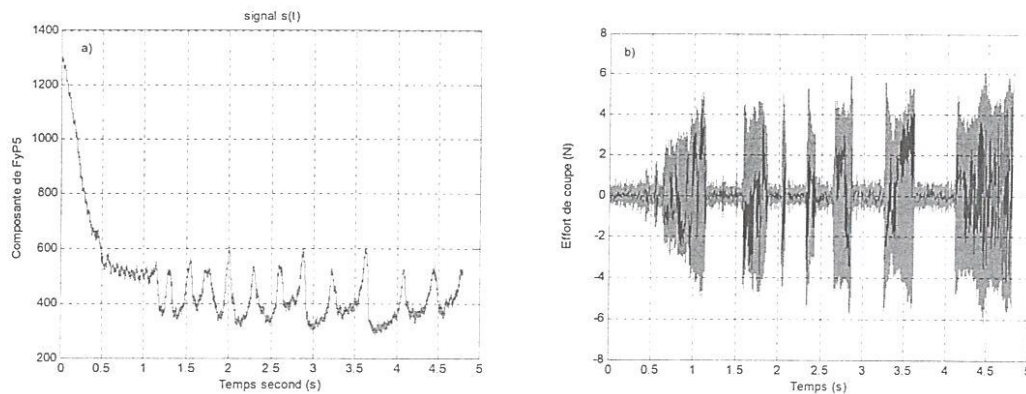


Figure V.25 : a) Signal mesuré (F_y), b) Signal reconstruit ($D1$), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit ($D1$).

($V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm).

La comparaison des signaux reconstruit du détail 1 pour les trois vitesses de coupe figures V.24.b, V.25.b et V.26.b, montre que pour la vitesse 100 m/min l'usinage est stable, aucune zone d'instabilité n'apparaît sur le signal, alors que pour la vitesse 135 m/min commence l'apparition de certaine zone d'instabilité de l'usinage et pour la vitesse 190 m/min l'usinage devient pratiquement instable.

L'amplitude des pics incriminés augmente d'environ 30 fois lorsque VB passe de 0.34 mm à 0.7 mm et de 4 fois lorsque VB passe de 0.7 mm à 1.5 mm.



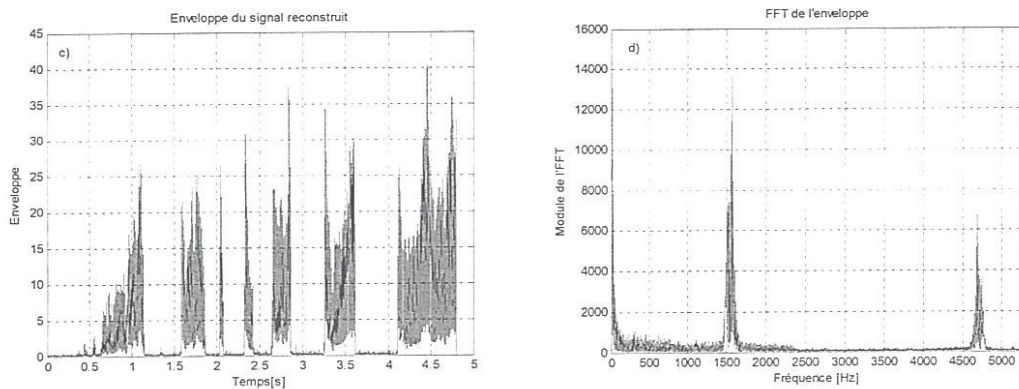


Figure V.26 : a) Signal mesuré (F_y), b) Signal reconstruit (D1), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1).

($V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm).

V.3. Signaux des signatures de vibration (l'accélération)

V.3.1. Analyse fréquentielle

Les figures V.27 à V.38 montrent les autospectres des signaux d'accélération délivrés par un accéléromètre fixé sur le support de l'outil dans la direction radiale et tangentielle. Signalons également que le choix de la bande de fréquence du signal mesuré [0 - 12.8] KHz est élevée pour que la détection donnera une bonne résolution fréquentielle. Les autospectres représentent l'intervalle d'usinage qui est enregistré depuis le premier palier de l'utilisation de la plaquette, jusqu'au cinquième palier (fin de l'usinage) suivant les paramètres du régime de coupe.

L'analyse globale des différents autospectres des deux composantes d'accélération radiale et tangentielle montre que le phénomène d'usure apparaît en dessous et/ou au dessus des fréquences fondamentales de l'outil, ainsi que sur ces derniers.

V.3.1.1. Signaux d'accélération radiale

L'analyse des autospectres des composantes d'accélération radiale (figure V.27 à V.32) montre que :

- Pour la vitesse 100 m/min (figure V.27) le phénomène d'usure n'apparaît ni en dessous ni au dessus de la fréquence propre de l'outil, vue que les valeurs de l'usure en dépouille restent inférieures à $VB < 0.3$ mm, l'amplitude des autospectres reste la même sur les différents paliers, elle n'est pas affecté par l'usure (environ -10 dB).

- D'après la figure (V.28), on observe que pour une usure VB inférieur à 0.30 mm le niveau de l'autospectre reste faible dans les deux bandes de fréquences [0-3000] et [6000-12800] Hz. Au troisième palier où VB dépasse 0.4 mm, on constate une augmentation du niveau dans les deux bandes de fréquence (environ 0 dB). Lorsque l'usure en dépouille dépasse 0.5 mm, on remarque que le phénomène d'usure est établi sur toute la bande fréquentielle étudiée [0-12.8] KHz, le niveau de l'autospectre est d'environ 15 dB.

- En effet pour une vitesse 190 m/min (figure V.29), l'usure apparaît à partir du premier palier avec une usure supérieure à 0.4 mm, le niveau de l'autospectre augmente jusqu'au palier 3 où VB égale à 0.561 mm, on constate l'apparition d'un grand nombre de pics, ces pics correspondent au phénomène de broutement qui provoque la rupture du bec d'outil, donc un recul de ce dernier par rapport à la pièce (diminution de la profondeur de passe) qui s'exprime par une diminution des niveaux des autospectres des accélérations en haute fréquence.

L'augmentation de la profondeur de passe provoque une augmentation du niveau des autospectres. Le niveau de l'autospectre est en dessous de 0 dB uniquement pour VB égale à 0.3 mm (figure V.30), pour les autres paliers où l'usure dépasse 0.4 mm le niveau augmente jusqu'à VB = 0.55 mm, puis il décroît suite à l'importance de l'usure, mais en général le niveau de l'amplitude reste supérieur à 0 dB. Avec l'augmentation de la vitesse (figure V.32) le niveau de l'autospectre augmente avec l'augmentation de l'usure sur toute la bande de fréquence étudiée, vue l'absence du phénomène de broutage. Il est par ailleurs important de noter l'apparition du mode propre de l'outil dans la direction tangentielle pour les trois vitesses.

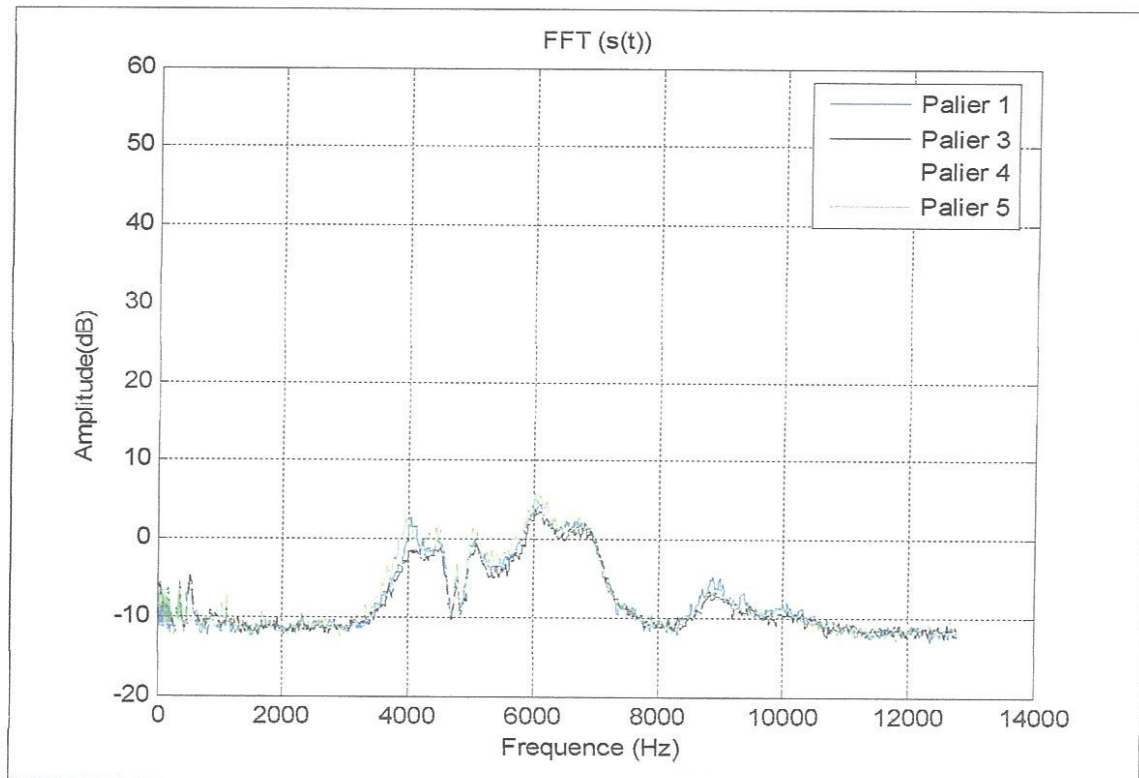


Figure V.27 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en
dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

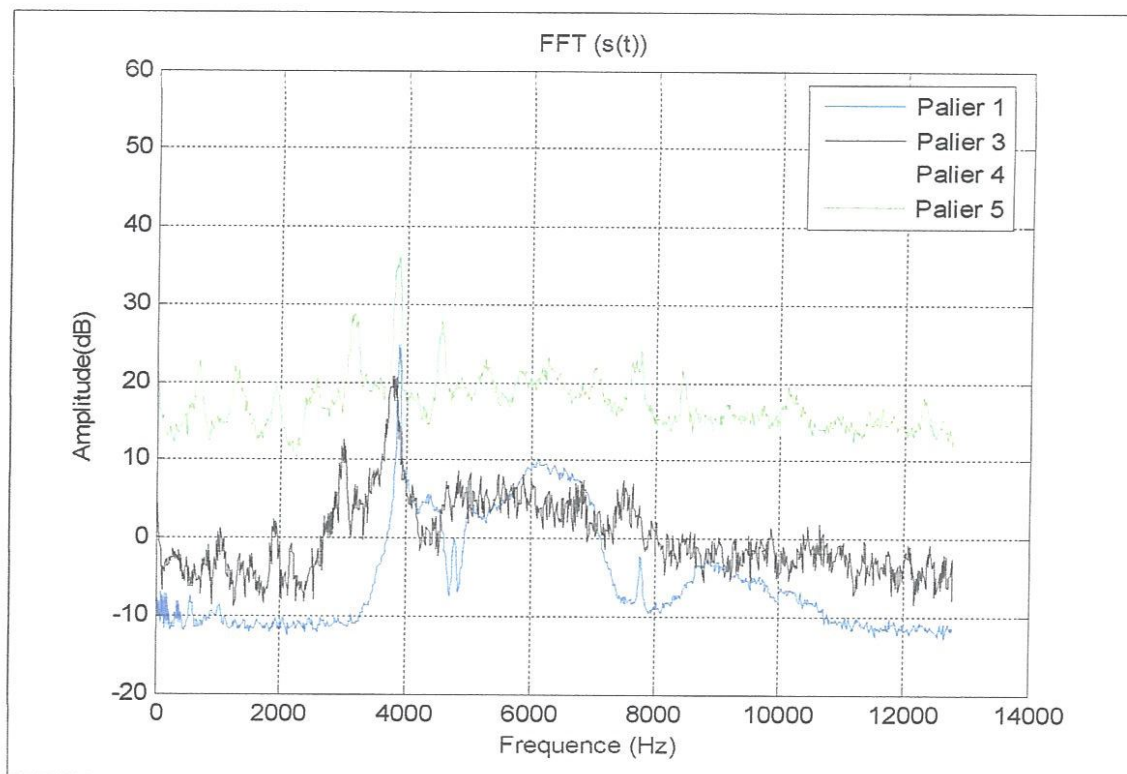


Figure V.28 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en
dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

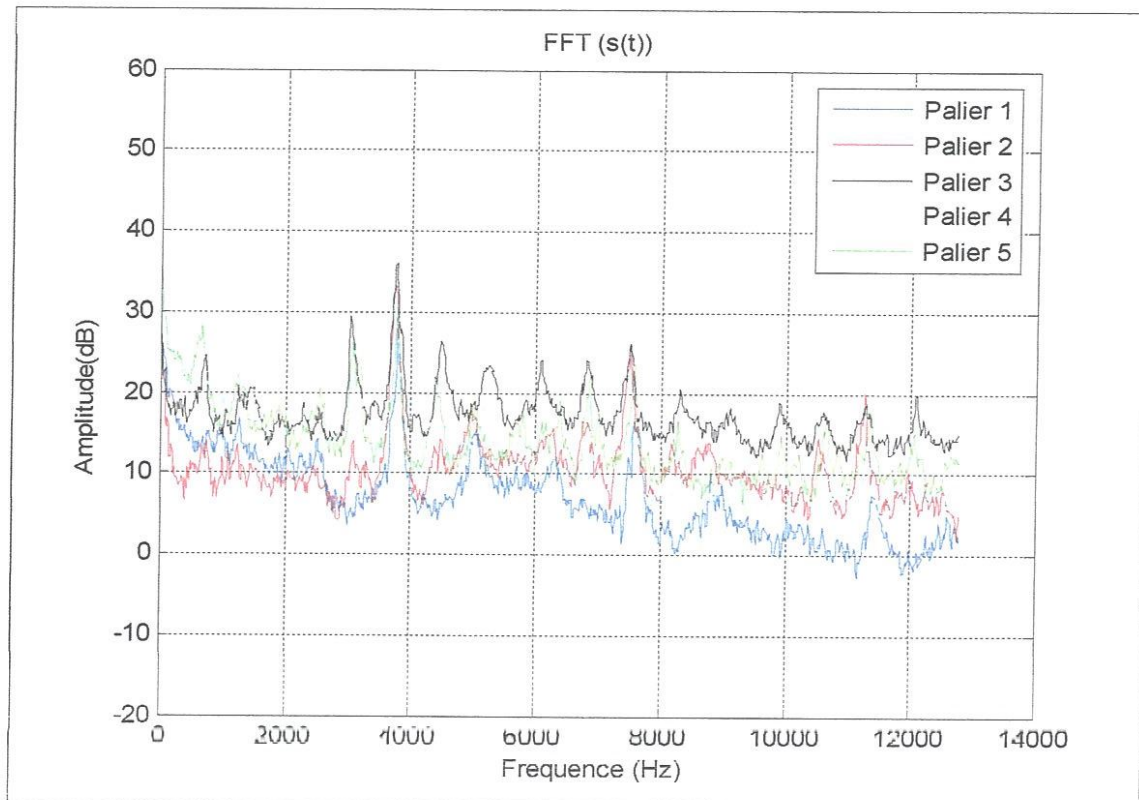


Figure V.29 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

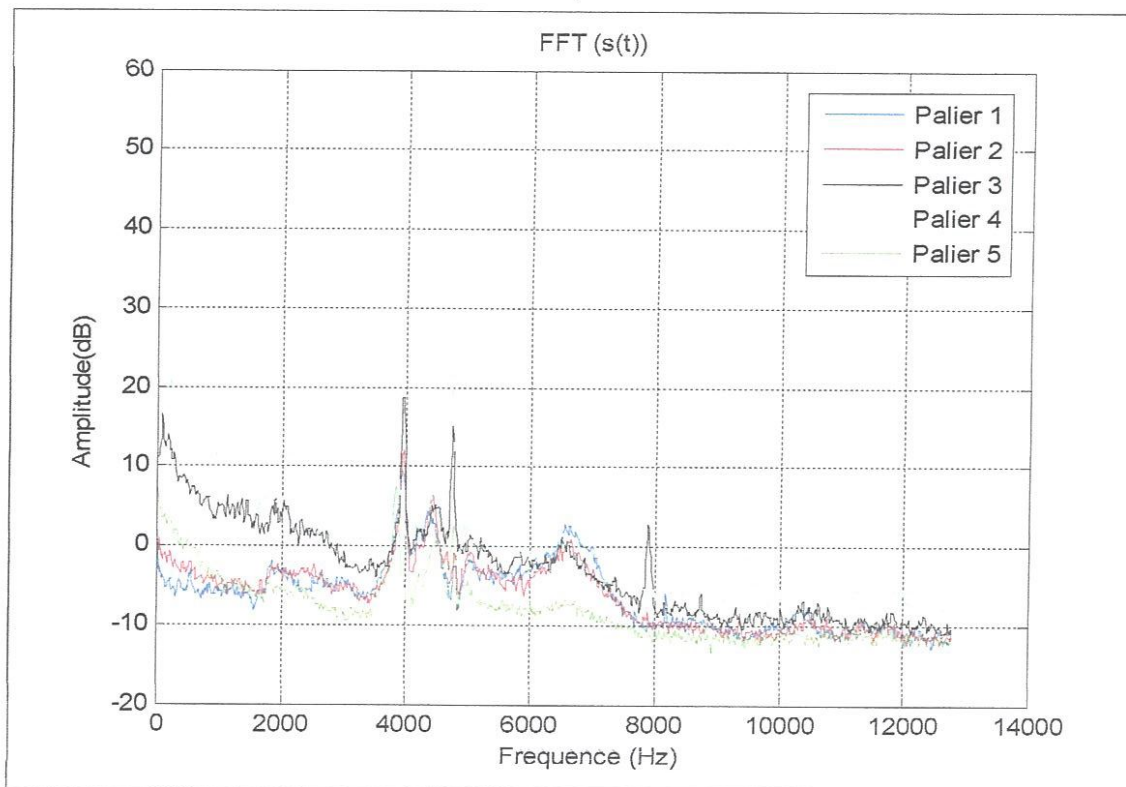


Figure V.30 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

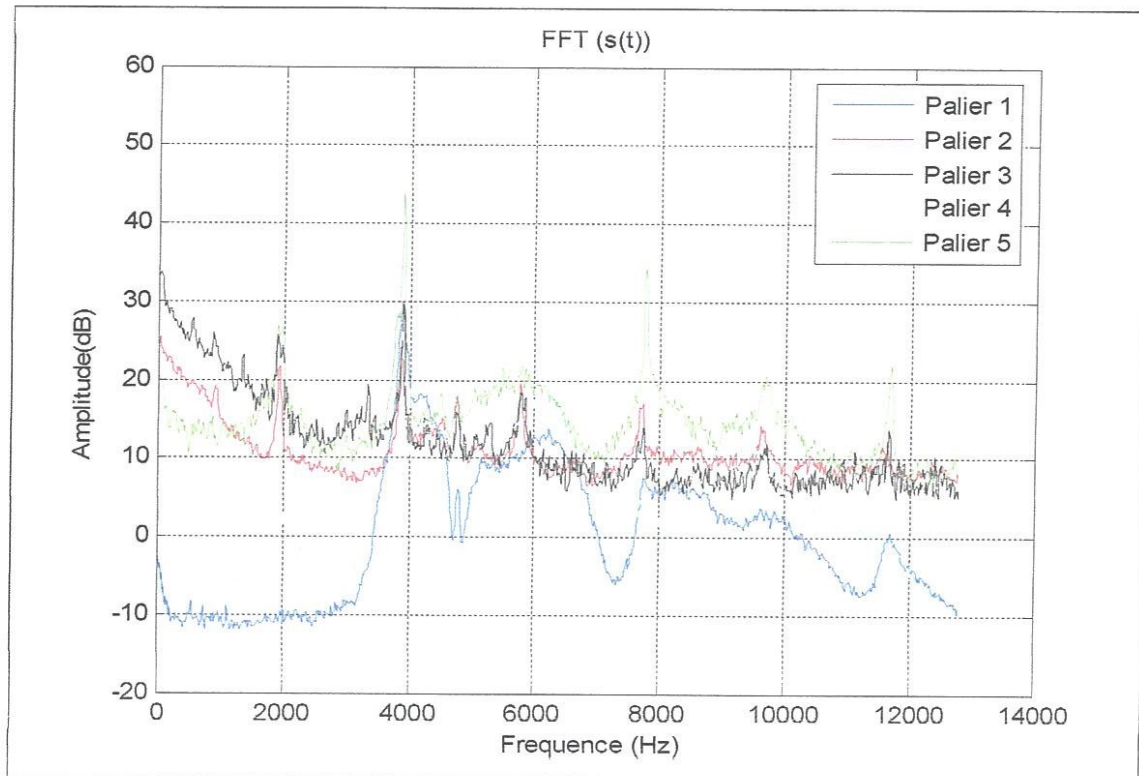


Figure V.31 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en
dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

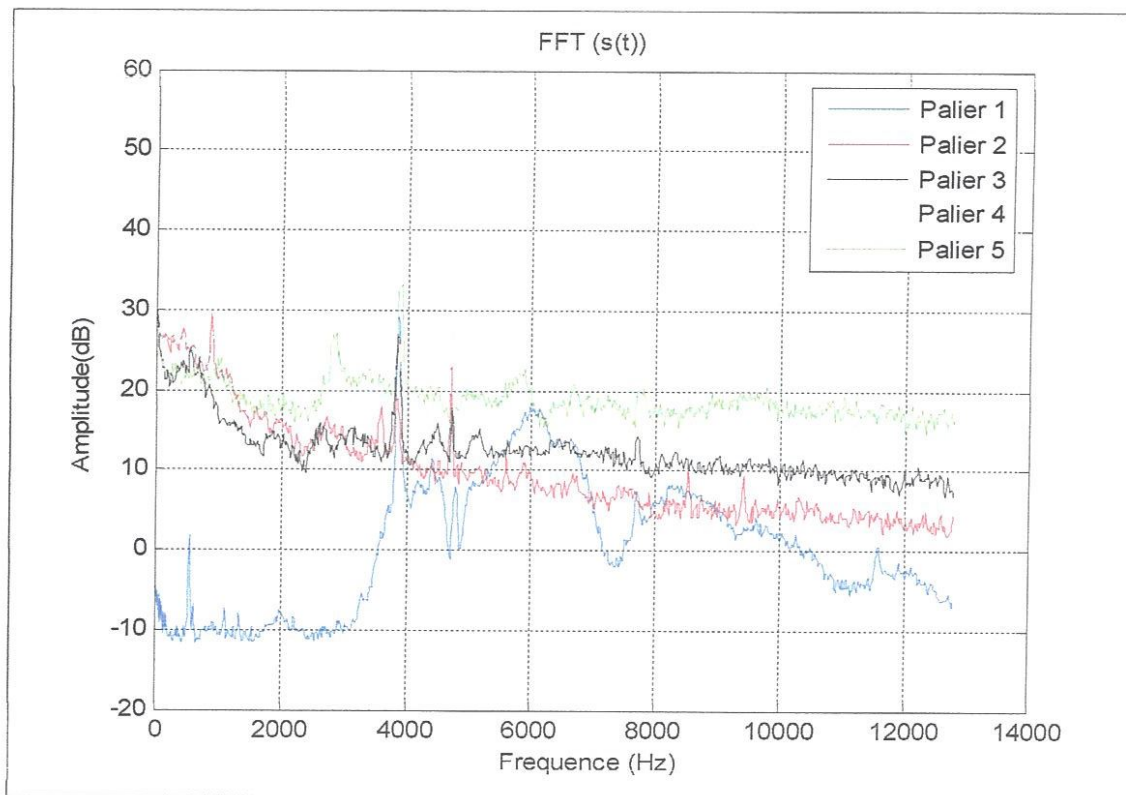


Figure V.32 : Les autospectres des accélérations dans la direction radiale – usures en
dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

V.3.1.2. Signaux d'accélération tangentielle

Nous présentons sur les figures V.33 à V.38 l'évolution des autospectres des accélérations dans la direction tangentielle en fonction de l'usure en dépouille. A cet effet, on remarque que :

- D'après les figures V.33 à V.34, on constate que pour une vitesse de 100 m/min la composante tangentielle de l'accélération ne fait pas apparaître le phénomène d'usure vu que l'usure en dépouille VB inférieure à 0.3 mm avec le fond de autospectre varie d'une façon très légère avec l'usure. Mais lorsqu'on augmente la vitesse à 135 m/min la composante tangentielle fait apparaître le phénomène d'usure par une augmentation du niveau de l'autospectre avec l'augmentation de l'usure. On constate aussi à partir du troisième palier commence l'apparition d'autres modes de l'outil de coupe et le niveau de l'autospectre reste faible en dessous des fréquences propres de l'outil (-10 dB).

- Pour une vitesse 190 m/min (figure V.35), on constate l'apparition des pics correspondant aux fréquences propres de l'outil dès le premier palier (condition d'usinage très sévère), avec une augmentation sur toute la bande de fréquence du niveau de l'autospectre avec l'augmentation de la vitesse de coupe et de l'usure. En dehors des pics des fréquences propres, on constate l'apparition sur le palier trois et cinq des pics qui peuvent correspondre à des ruptures du bec de l'outil.

- Lors de l'usinage, on constate que l'influence de la vitesse de coupe est plus importante que celle de la profondeur de passe. Sur la figure (V.36), on constate l'apparition des autres modes de l'outil en haute fréquence, le niveau de l'autospectre augmente automatiquement et on ne peut pas dire que cette augmentation est due à l'usure, donc on observe les basses fréquences dont ce cas le niveau reste faible inférieur à 0 dB dans la bande [0-2000] Hz, mais on constate l'apparition d'un pic sur le palier 4 correspondant à une rupture de l'outil, suivi d'une chute qui s'exprime par la suite sur le palier 5 par une chute du niveau de l'autospectre. D'autre part, sur la figure (V.37) nous pouvons remarquer qu'en dehors des pics correspondant aux fréquences propres de l'outil sur le palier 1 le niveau reste faible (-10 dB) dans la bande [0-2000] Hz, mais au dessus de la première fréquence propre le niveau est d'environ 0 dB correspondant à VB = 0.3 mm pour les autres paliers l'usure est pratiquement évidente sur toute la bande de fréquence étudiée VB supérieur à 0.45 mm. Par contre l'usure apparaît à partir deuxième palier due au phénomène de broutage (figure V.38) sur toute la bande de fréquence.

- Principalement sur la composante tangentielle, on constate l'apparition de deux fréquences propres : le premier mode lié à la fréquence naturelle de l'outil dans la direction axiale et le second lié au mode de torsion de l'outil [Wei'05].

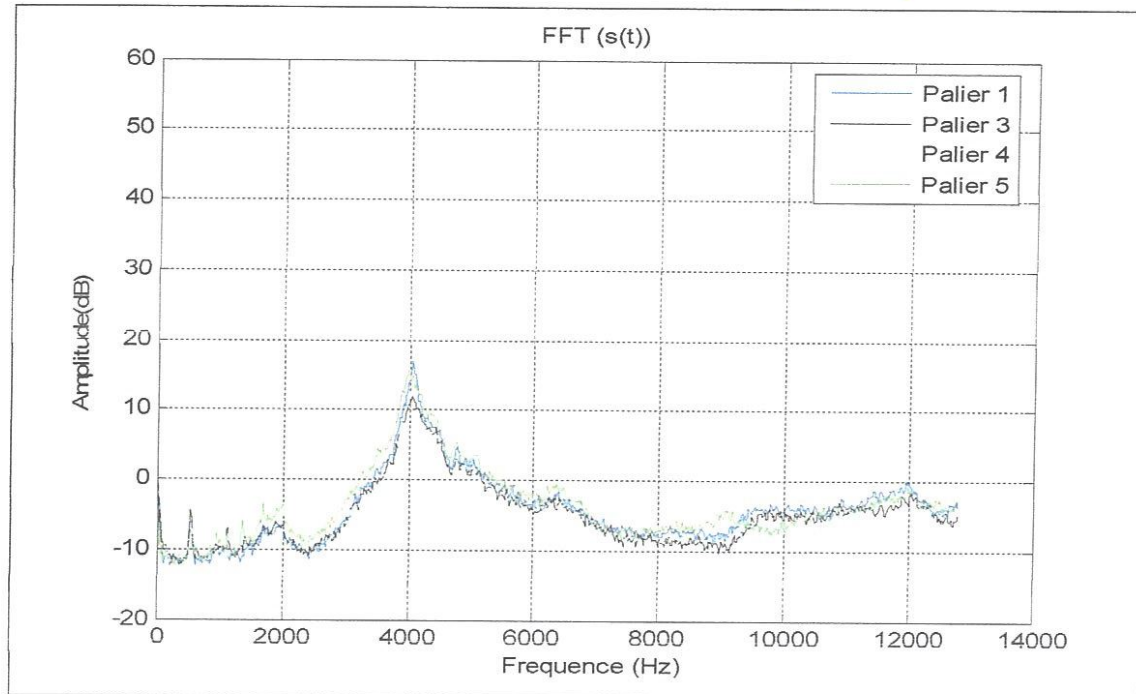


Figure V.33 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

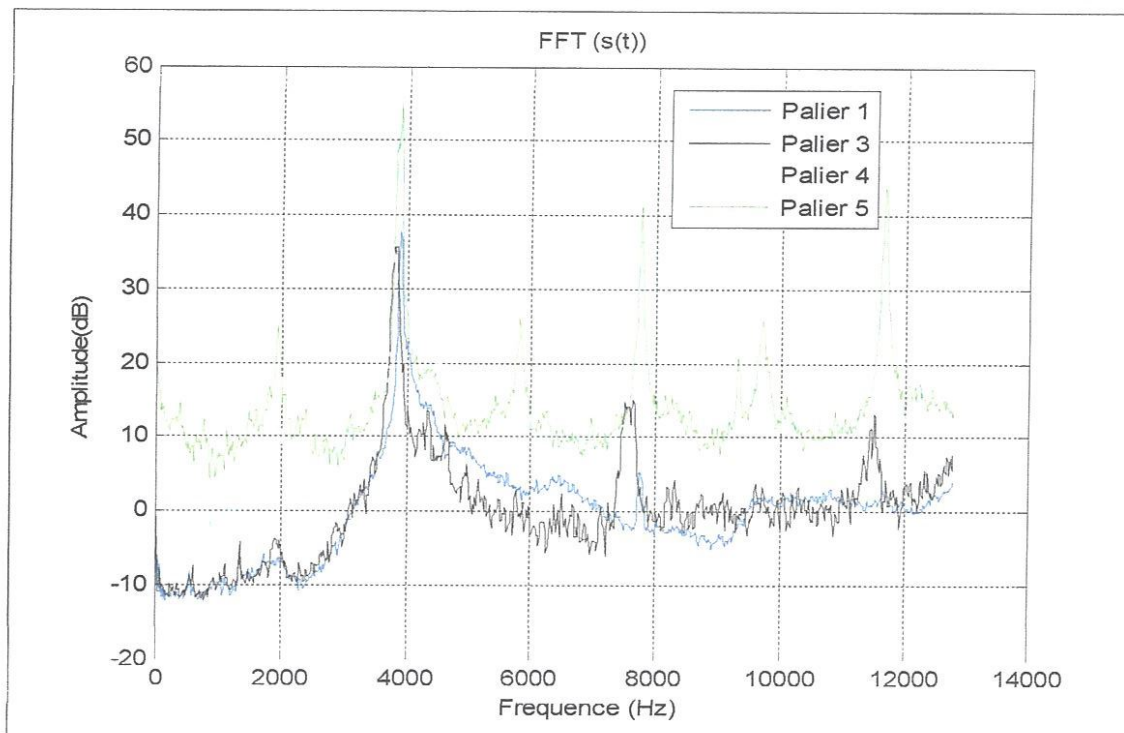


Figure V.34 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

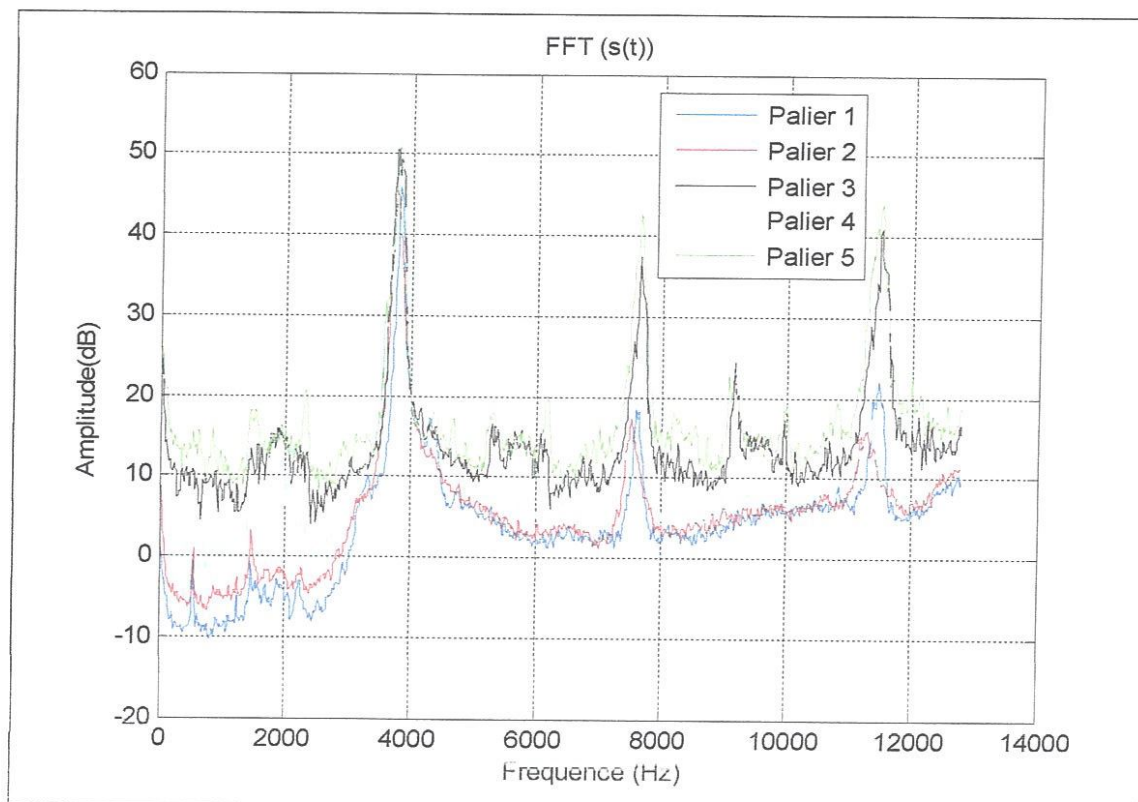


Figure V.35 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

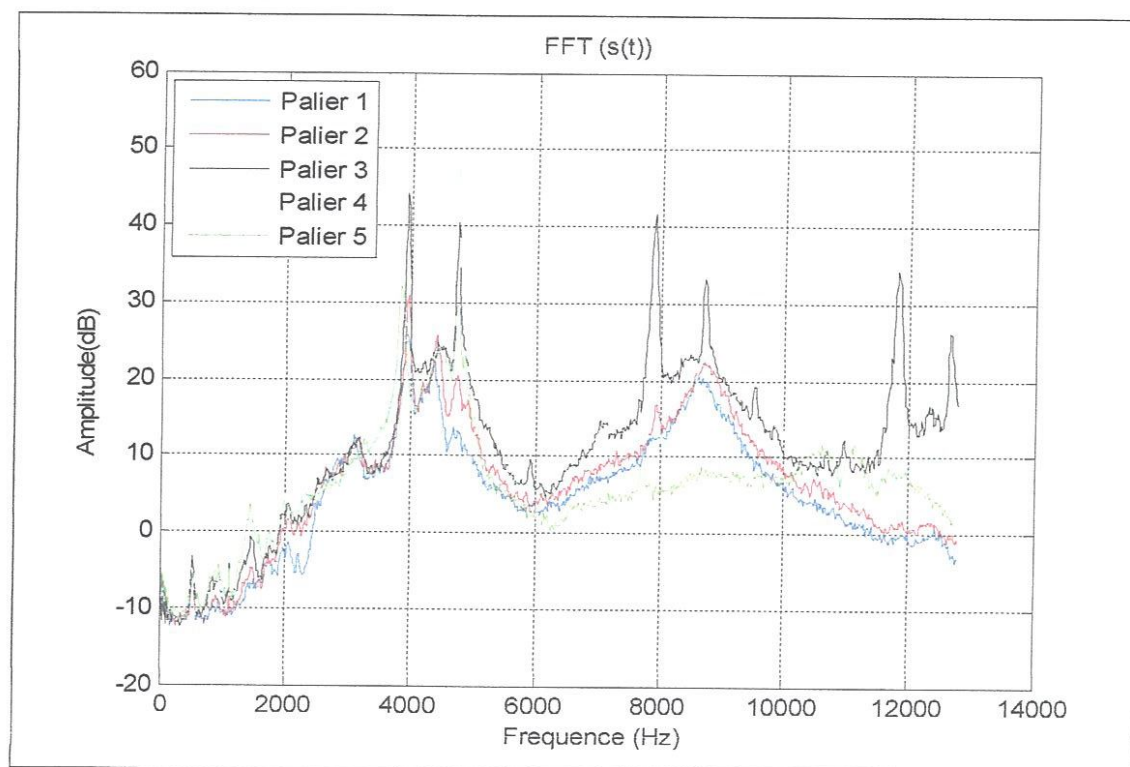


Figure V.36 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

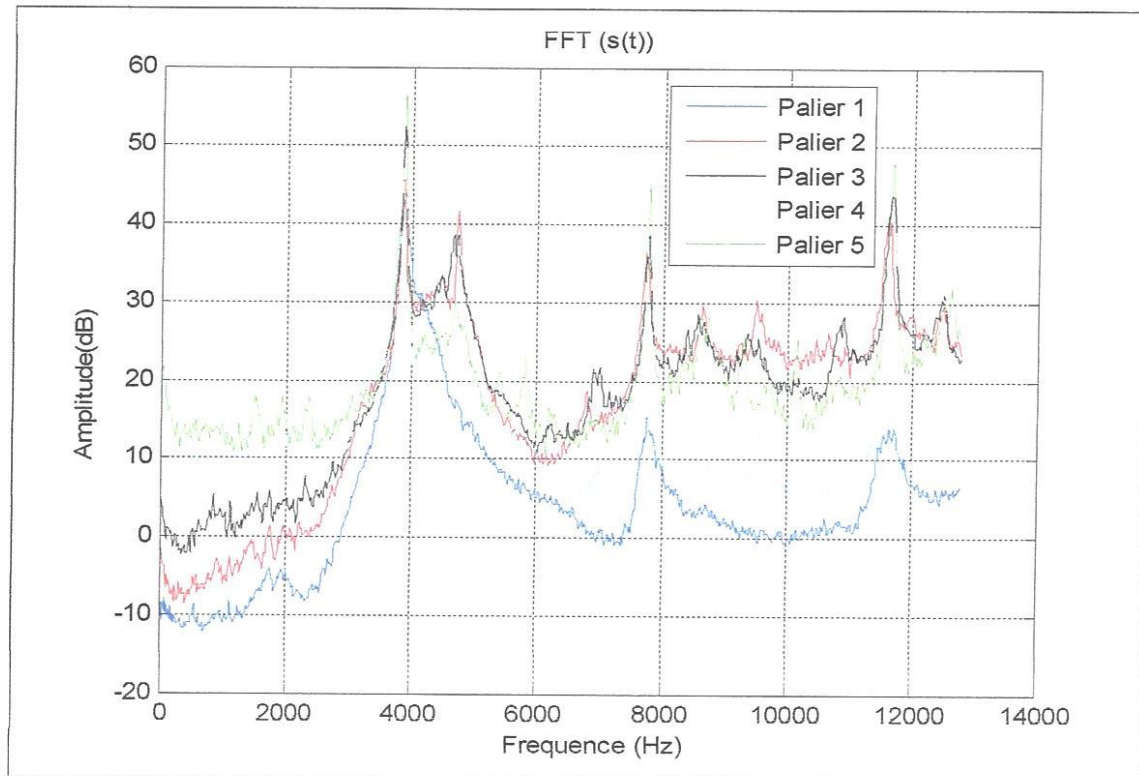


Figure V.37 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle –
usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

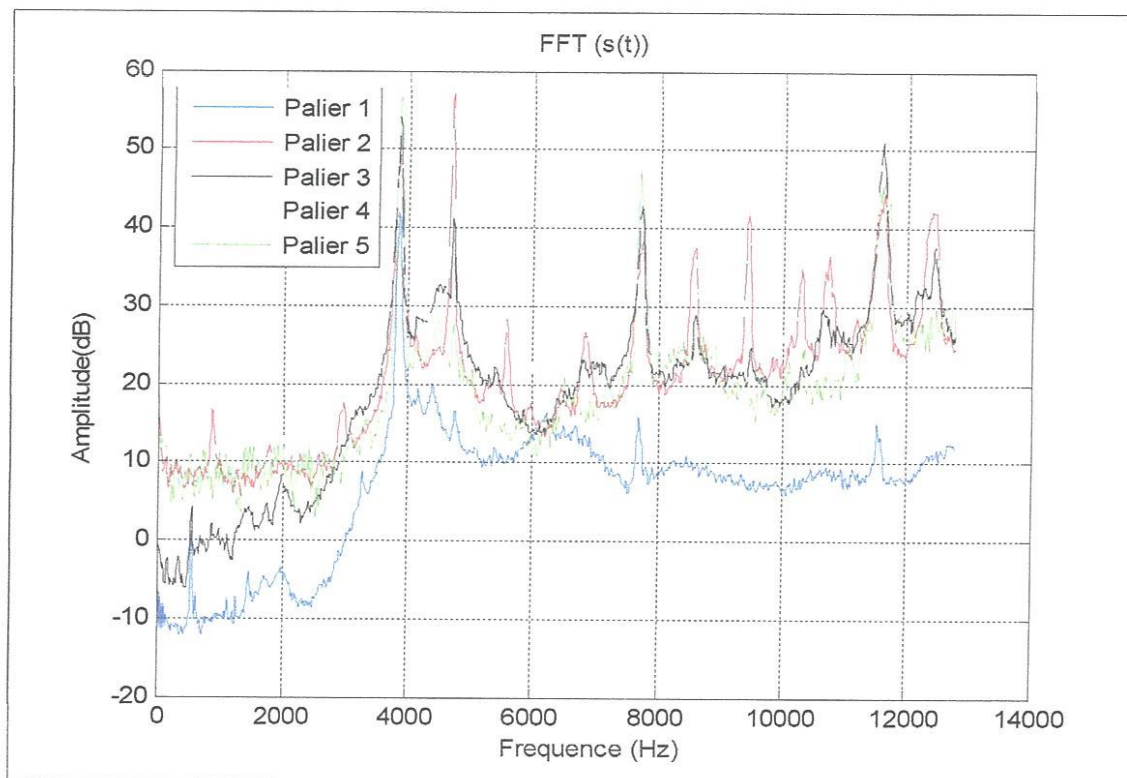


Figure V.38 : Les autospectres des accélérations dans la direction tangentielle –
usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

V.3.2. Analyse multirésolution en ondelettes

La figure (V.39) représente les différents détails et approximations issus de la décomposition en ondelettes de la composante de l'accélération radiale dès le début au sixième niveau.

Les accélérations seront étudiées à partir de leurs signaux mesurés, en utilisant la méthode de L'AMRO sur les différentes composantes de l'accélération soit dans la direction radiale ou dans la direction tangentielle. Afin d'analyser les résultats, nous présentons sur les différents figures en plus du signal mesuré, le signal reconstruit, l'enveloppe du signal et son transformé de Fourier.

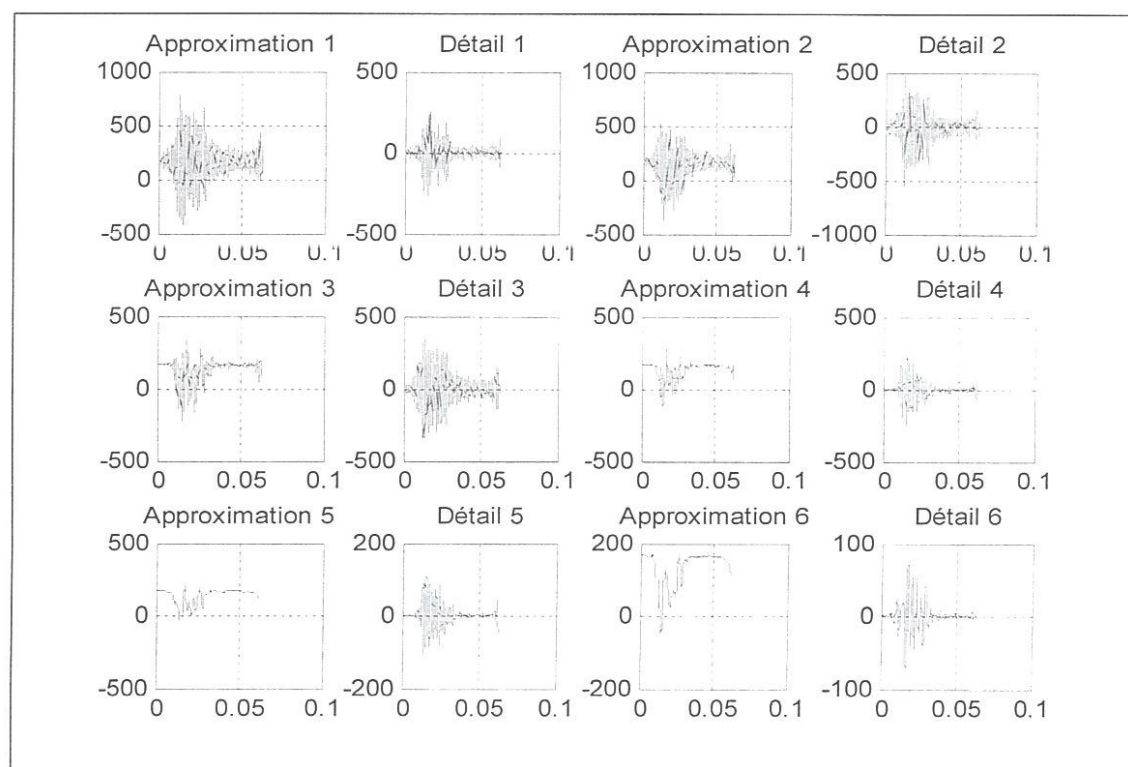


Figure V.39 : Différents détails et approximations issus de l'analyse multirésolution en ondelettes du signal mesure (accélération radiale).

$V_c=190\text{m/min}$, $f=0.12\text{mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$.

V.3.2.1. Application de l'AMRO aux signaux d'accélération

En réalité on peut constater d'après les figures V.40 et V.41 que la vitesse de coupe a une influence capitale sur la résolution du spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit. Les impacts sont d'autant plus clairs à des vitesses de coupe élevées (135 et 190 m/min) concernant les signaux reconstruits qui sont extraits à partir du détail 3 (D3) qui présente des changements brusques remarquables.

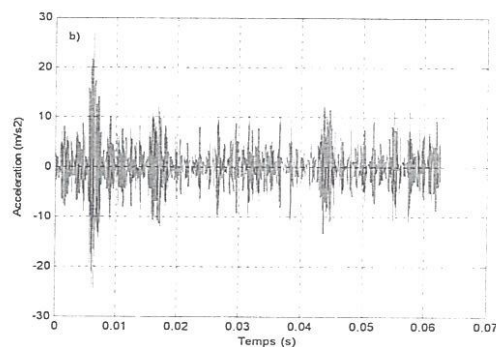
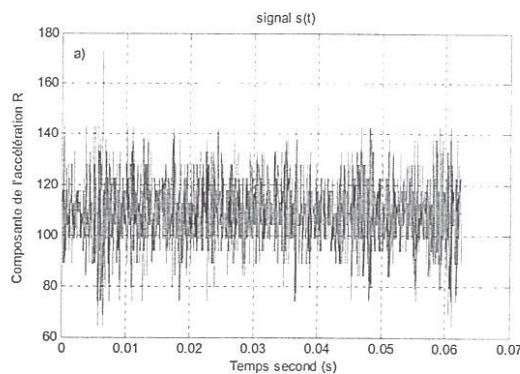
A cet effet, la fréquence d'apparition de ces changements pour les trois vitesses est présentée sur le spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit à basse fréquence. Pour les vitesses de coupe 135 m/min et 190 m/min apparaît clairement un pic à 480 Hz et 576 Hz respectivement sur la transformé de Fourier de l'enveloppe, les pics indiquent la présence du phénomène de broutage. Ce phénomène apparaît d'une manière beaucoup plus clair pour ces deux vitesses sur la composante tangentielle. Sur l'enveloppe du signal reconstruit, on voit clairement les zones d'instabilité d'usinage due à ce phénomène, en plus, sur le spectre de l'enveloppe apparaît les deux pics à 412 Hz et 576 Hz.

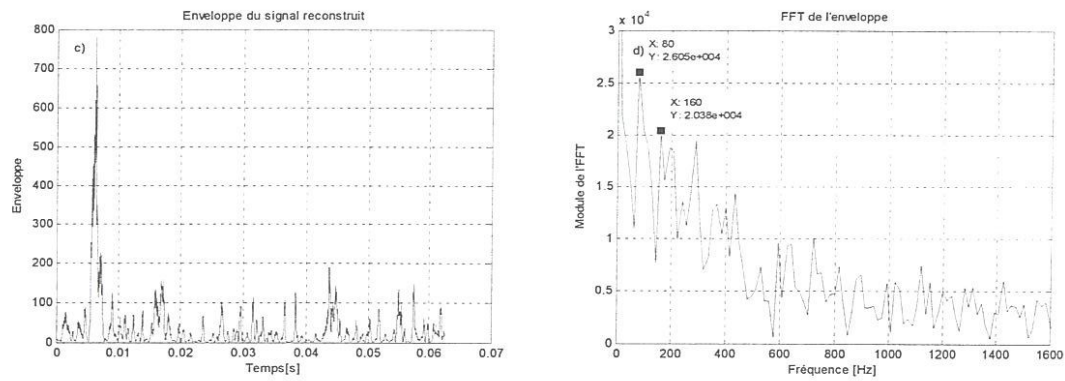
- Pour mettre en évidence le pouvoir de débruitage de l'AMRO, nous avons calculé le kurtosis et le facteur de crête avant et après l'AMRO. On constate que la sensibilité du kurtosis et de facteur de crête a été améliorée. Le kurtosis de signal d'accélération radiale passe de 6.1622 à 12.9635 pour une usure VB = 0.401 mm, tandis que le facteur de crête passe de 32.7944 à 71.8708 pour la même valeur de l'usure en dépouille.

- Les amplitudes des spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit augmentent avec l'augmentation de l'usure, de la vitesse de coupe et de la profondeur de passe.

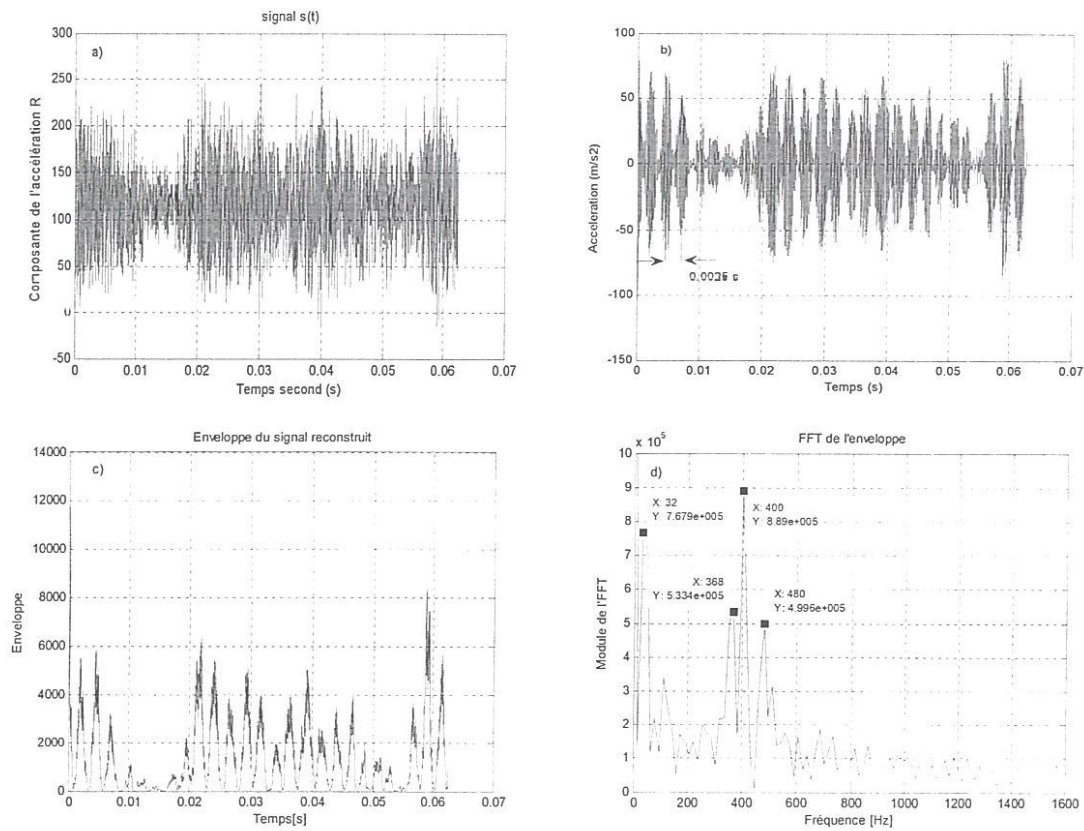
- Il est par ailleurs important de noter que la valeur crête des signaux reconstruit (accélération radiale) passe de 26.7592 m/s² pour une usure en dépouille VB=0.086 mm à 109.8105 m/s² pour VB = 0.221 mm et de 346.8968 m/s² pour VB = 0.401 mm. Notons également que les amplitudes de l'accélération radiale et tangentielle augmentent avec l'augmentation de l'usure en dépouille.

En conclusion, les résultats ont montré que le phénomène de broutage apparaît pour les deux vitesses de coupe 135 et 190 m/min sur les deux composantes d'accélération radiale et tangentielles et pour deux profondeur de passe 0.5 et 1 mm. Cependant, pour la vitesse de coupe 100 m/min ce phénomène est absent.

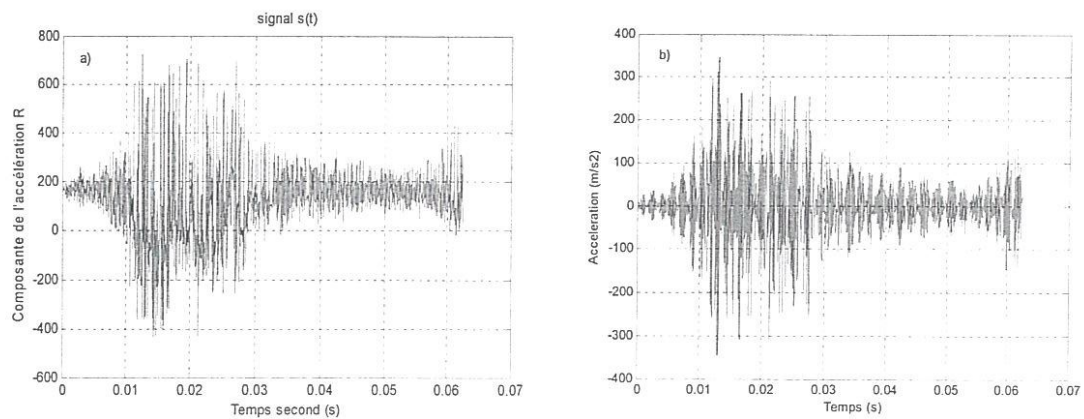


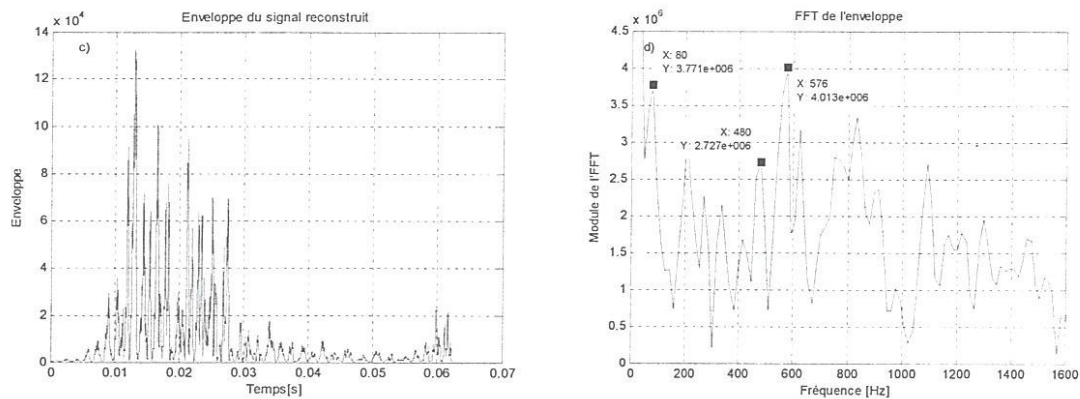


$V_c=100\text{m/min}$, $f=0.12\text{mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$, $VB = 0.086 \text{ mm}$.



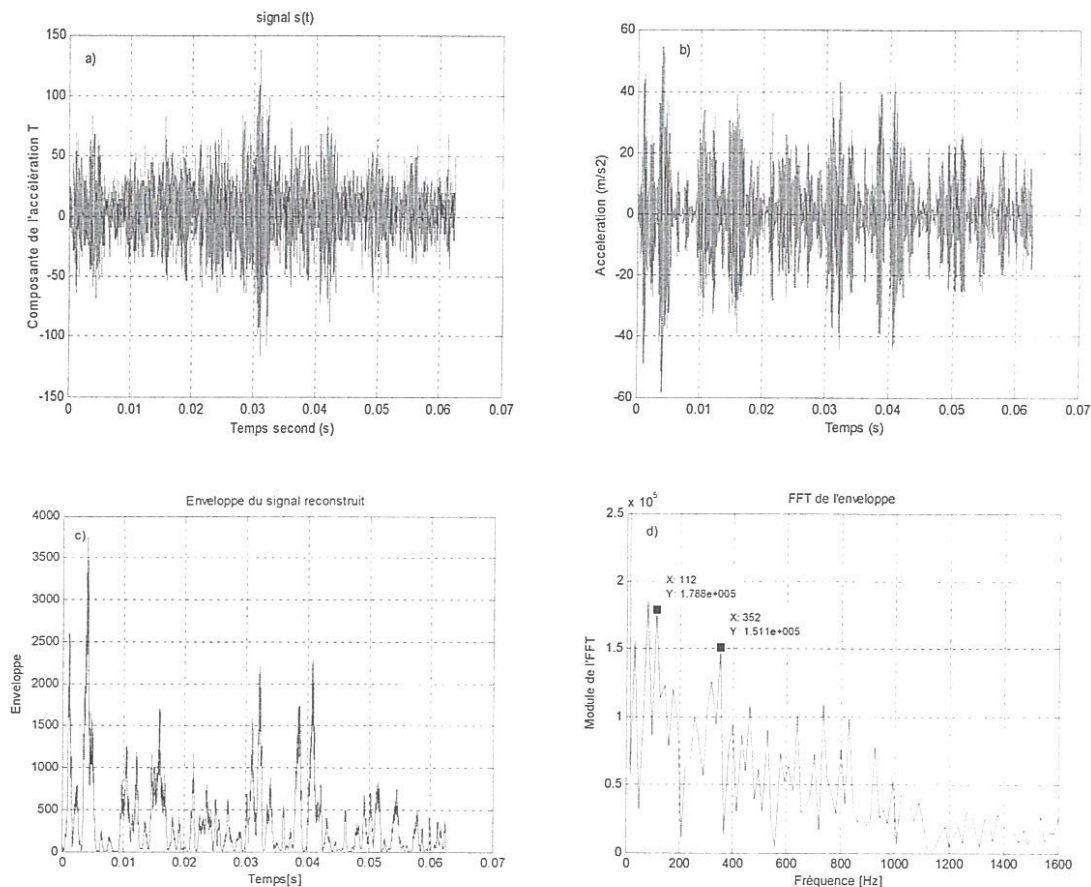
$V_c=135 \text{ m/min}$, $f=0.12 \text{ mm/tr}$, $a_p=0.5\text{mm}$, $VB = 0.221 \text{ mm}$.



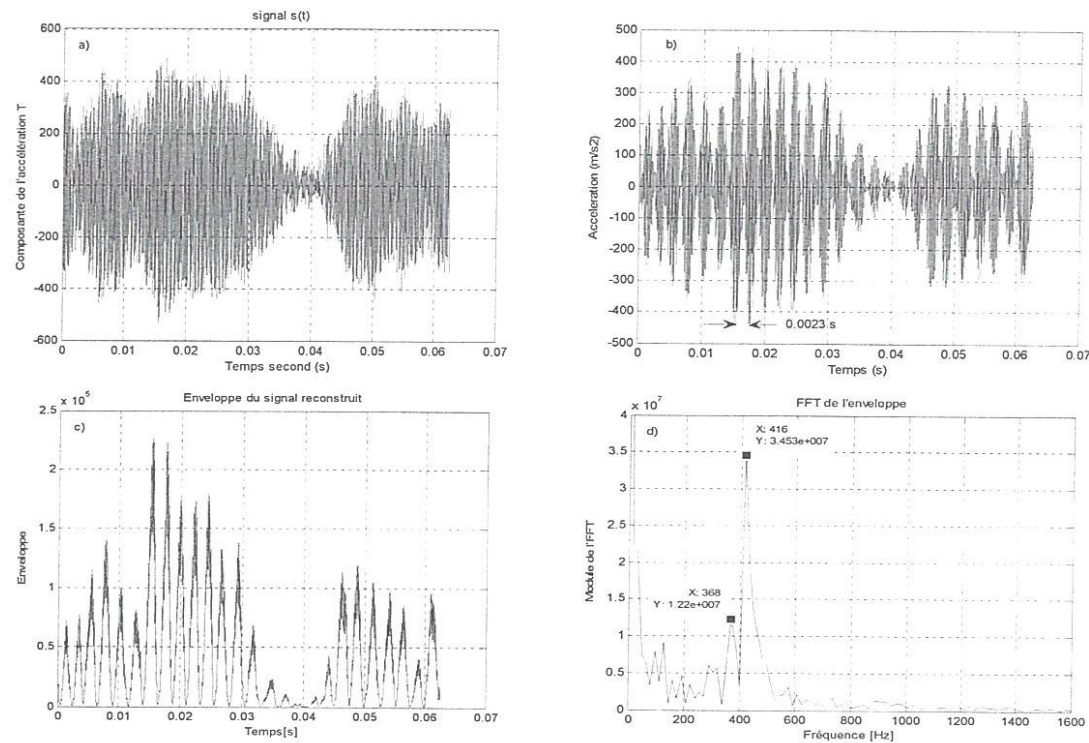


$V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm, $VB = 0.401$ mm.

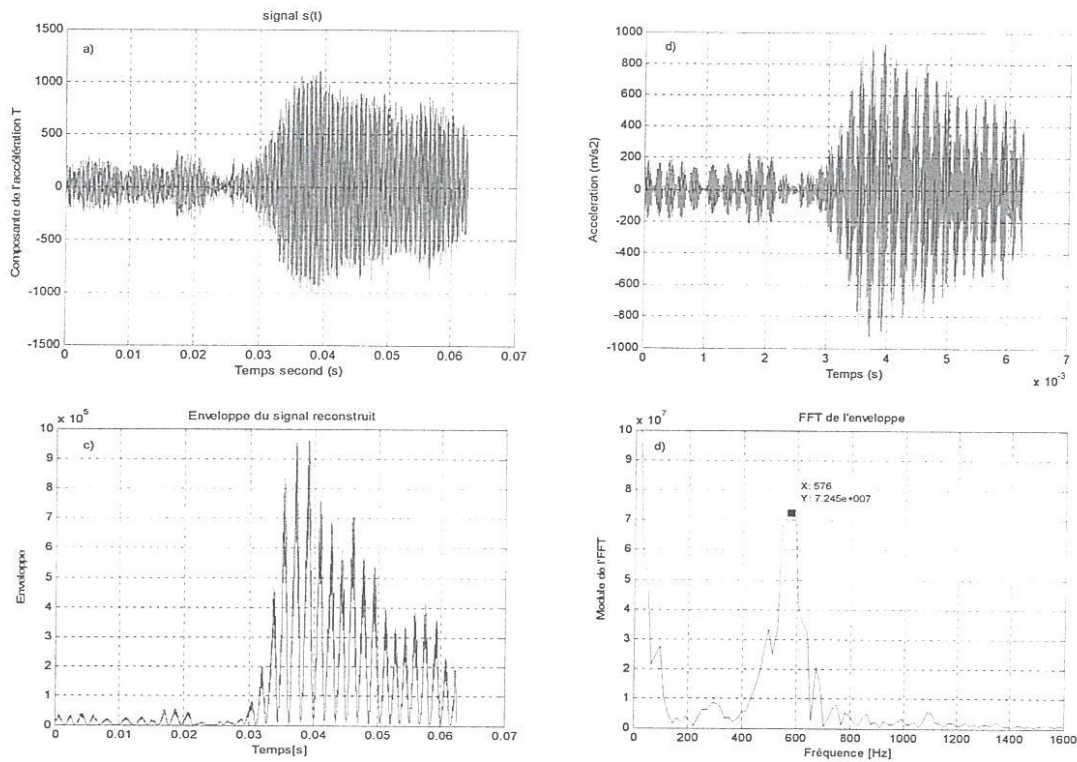
Figure V.40 : (a) Signaux d'accélération (accélérations radiales), (b) Signaux reconstruits (D3), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit.



$V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mm, $VB = 0.086$ mm.



$V_c = 135 \text{ m/min}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $VB = 0.221 \text{ mm}$.



$V_c = 190 \text{ m/min}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$, $a_p = 0.5 \text{ mm}$, $VB = 0.401 \text{ mm}$.

Figure V.41 : (a) Signaux d'accélération (accélérations tangentielles), (b) Signaux reconstruits (D3), (c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit.

V.3.2.2. Cas d'une usure catastrophique de l'outil de coupe (Phénomène de broutage établi)

L'accélération tangentielle est très alarmante, elle nous donne l'information sur l'existence des impacts soit sur le signal mesuré ou sur le spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (figure.V.42).

Les figures (V.42.a et b) montrent respectivement le signal mesuré (accélération tangentielle) et le signal reconstruit qui a été extrait à partir du détail 3 (D3) qui montre des changements brusques synonymie d'un usinage instable sur toute la période de mesure. D'après le spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D3) on peut constater clairement une périodicité de $\Delta t = 0.0022s$ correspondant à un pic fréquentielle de 480 Hz, qui apparaît clairement sur le spectre de l'enveloppe figure V.42.c. Dans ce cas le phénomène de broutage est établi sur toute la période d'usinage.

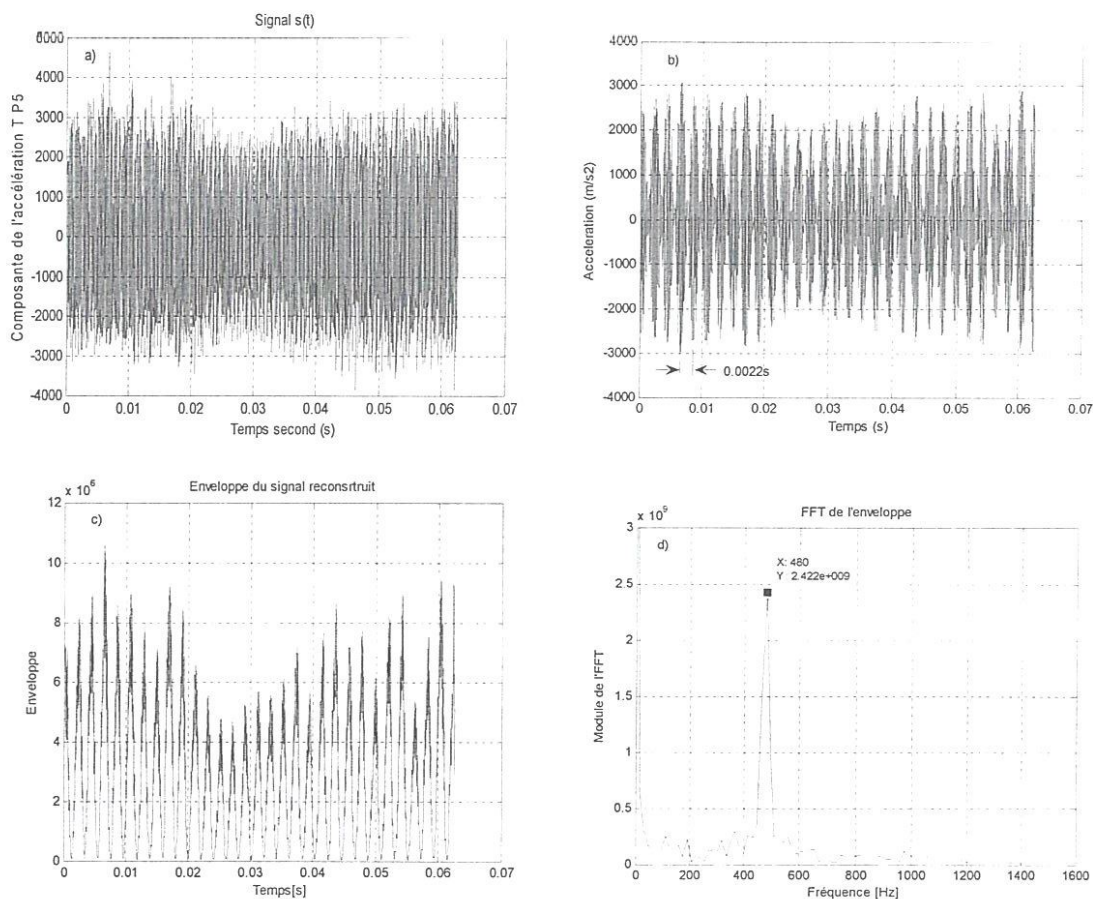


Figure V.42 : a) Signal mesuré (accélération tangentielle), b) Signal reconstruit (D3), c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectre d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D3). ($V_c=190\text{m/min}$, $f=0.12\text{mm/tr}$, $a_p=1\text{mm}$).

V.4. Conclusion du chapitre

Le nombre d'information utile qu'on peut tirer de ces résultats est très important, mais ça demande une nouvelle recherche bibliographique plus vaste que celle présentée au premier chapitre, afin de mieux comprendre tous les phénomènes qui se sont manifestés dans ces résultats. L'analyse présentée dans ce chapitre est une tentative de notre part pour extraire le maximum d'information nécessaire à l'établissement d'un système de surveillance ON LINE du phénomène d'usure, qui est indispensable à surveiller vu son importance dans le processus d'usinage.

Nous avons montré que l'analyse spectrale issue des signaux des efforts de coupe est limitée pour suivre l'évolution de l'usure, parce que les spectres sont très bruités surtout en basse fréquence, l'endroit propice à la détection de l'usure. La seule manière qui permet le suivi de l'usure par l'analyse spectrale c'est la variation des amplitudes de la première fréquence propre de l'outil dans sa direction axiale, qui augmente avec l'augmentation de l'usure, mais cela n'est pas suffisant pour établir un système de surveillance.

L'application de la multirésolution en ondelette (AMRO) aux signaux mesurés a montré son pouvoir de débruitage, elle a permis d'éliminer les fréquences de résonances du système et elle a fait apparaître deux pics le premier dans la bande [1 – 2] KHz et le deuxième dans la bande [4.5 – 5] KHz, qui sont très sensibles à l'usure. Leurs présences est synonyme d'une usure en dépouille d'environ 0.3 mm.

L'analyse des signaux d'accélération radiale et tangentielle à partir des autospectres permet aussi le suivi de l'usure de l'outil de coupe et confirme les résultats des efforts de coupe.

A partir de ces résultats, nous avons aussi mis en évidence le phénomène de broutage qui apparaît à basse fréquence.

A l'issue de ce chapitre, nous pouvons confirmer que notre objectif est atteint qui consiste à définir les indicateurs nécessaires à l'établissement d'un système de surveillance de l'usure des outils de coupe, qui sont :

- Mesure de la composante radiale de l'effort de coupe ;
- Utilisation de l'AMRO pour débruité le signal ;
- Calcul de l'enveloppe du signal reconstruit ;
- Calcul de l'FFT de l'enveloppe ;

- Vérification de l'existence ou non des deux pics d'usure qui apparaissent dans les bandes [1 – 2] KHz et [4.5 – 5] KHz.
 - Si les deux pics n'apparaissent pas, l'usure en dépouille est inférieure à 0.3 mm.
 - Si les deux pics apparaissent, c'est synonyme de dépassement de l'usure de la valeur 0.3 mm.
- Sur la base de l'apparition ou non des deux pics, on peut prévoir un système d'alarme.

Conclusion générale

La surveillance des processus d'usinage nécessite la mise en place d'un suivi efficace notamment que le suivi du phénomène d'usure qui est très complexe à suivre durant les différentes phases du processus d'usinage. Dans l'optique de réaliser un suivi efficace permettant l'identification de l'usure de l'outil, plusieurs grandeurs ont été mesurées telles que l'usure en dépouille de l'outil, la rugosité de la pièce usinée, les efforts de coupe dans les trois directions et les signatures vibratoires (accélération radiale et tangentielle).

Dans ce contexte, l'approche proposée dans ce mémoire consiste à déterminer plusieurs indicateurs de l'usure à l'image des fréquences caractéristiques, du niveau vibratoire et des changements brusques qui peuvent déceler l'endommagement brutal de l'outil de coupe. En utilisant des méthodes de supervision robuste et fiable pour fournir une réponse rapide en cas de dépassement de la limite d'usure imposée ou bien rupture brutal de l'outil de coupe. Afin d'évaluer l'usure à partir des signaux recueillis (efforts de coupe, accélération), la stratégie adoptée s'appuie en premier lieu sur une analyse temporelle qui consiste à suivre l'évolution de la rugosité, la variation de la force statique et la sensibilité des indicateurs scalaires en fonction de l'usure; en deuxième lieu l'analyse fréquentielle par la recherche de fréquence caractéristique du système usinant ou du phénomène d'usure et enfin nous avons renforcé le travail par l'analyse multirésolution en ondelettes (temps - fréquence).

Dans ce mémoire, nous avons présenté un travail consistant qui comporte certaines originalités qui peuvent aider à la compréhension et le suivi de l'évolution du phénomène de l'usure dans le processus d'usinage.

Afin d'arriver à un moyen optimal de suivi de l'usure lors de l'usinage, nous avons étudié plusieurs méthodes telles que, la méthode temporelle qui consiste à calculer des indicateurs scalaires pour voir leurs sensibilités à l'usure. Cette partie a donné des résultats intéressants, mais qui reste à notre avis un peu difficile à exploiter dans un système de surveillance ON LINE.

Par la suite, nous avons utilisé la méthode fréquentielle que nous l'avons appliqué aux signaux des forces de coupe et aux signaux d'accélération. L'étude a montré que l'utilisation de cette méthode par le calcul des spectres des signaux d'efforts, permet de suivre l'évolution de l'usure à partir de la variation des amplitudes de la fréquence de résonance de l'outil dans sa direction axiale, mais nous n'avons pas

pu quantifié l'usure par l'augmentation des amplitudes des pics, donc ce résultat qui est très intéressant reste aussi limité pour son utilisation dans un système de surveillance.

L'utilisation de la méthode fréquentielle sur les signaux d'accélération de l'outil dans les deux directions radiale et tangentielle par la mesure de l'autospectre du signal a permis de donner des indications très intéressantes. Nous avons constaté qu'en basse fréquence [0 – 2000Hz] les autospectres restent trop faibles (-10 dB) pour des usures en dépouille inférieur à 0.3 mm (l'autospectre reste insensible, pratiquement aucune variation dans son amplitude). L'amplitude de l'autospectres atteint 0 dB pour une usure de 0.3 mm. Au-delà de cette valeur d'usure l'amplitude de l'autospectre continue à augmenter avec l'augmentation de l'usure jusqu'à $VB = 0.5 \div 0.7$ mm puis on constate une décroissance de l'amplitude de l'autospectre qu'on peut expliquer par une rupture du bec de l'outil (recul du bec par rapport à la pièce où diminution de la profondeur de passe).

La grande difficulté rencontrée dans le suivi de l'usure par la mesure des accélérations est dans le compromis entre le temps de mesure et la fréquence maximale qui sont inversement proportionnel. C'est-à-dire si on veut couvrir une large bande de fréquence, il faut mesurer dans une période de temps très limitée ce qui ne nous permet pas de suivre l'évolution de l'usure ou la détection de la rupture durant la mesure. Ce facteur peut être résolu dans nos prochains travaux par le lancement de la mesure d'accélération à la fin du palier pour avoir un signal correspondant à l'usure mesurée. Donc, on peut dire que le suivi de l'usure par des mesures d'accélérations par l'intermédiaire de l'autospectre qui est donné directement par l'analyseur est possible et peut faire l'objet d'un critère de suivi dans un système de surveillance.

Nous nous sommes pas contenté de ces résultats, nous avons voulu chercher un indicateur d'usure très simple à utiliser dans un système de surveillance, pour cela nous avons choisi d'utiliser une troisième méthode d'analyse qui est la combinaison des deux premières méthodes c'est-à-dire une méthode temps - fréquence, cette méthode s'appelle la multirésolution en ondelette (AMRO) qui a un grand pouvoir de débruitage des signaux mesurés. Nous avons montré dans le chapitre V, que l'utilisation de cette méthode permet l'élimination des fréquences de résonance du système usinant et fait apparaître uniquement deux pics dans deux bandes de fréquences [1 – 2 KHz] et [4.5 – 5 KHz]. D'après l'analyse des résultats, nous avons montré que l'apparition de ces deux pics principalement sur la composante radiale de l'effort de coupe est synonyme d'une usure qui dépasse 0.3 mm et que leur amplitudes

augmente avec l'augmentation de l'usure et dans le cas de rupture du bec d'outil durant la mesure les amplitudes diminuent.

En conclusion, nous pouvons dire qu'à l'issu de ce dernier résultat, l'objectif de notre travail est atteint par la détermination des indicateurs nécessaires à l'établissement d'un système de surveillance de l'usure des outils de coupe, qui sont :

- Mesure de la composante radiale de l'effort de coupe ;
- Utilisation de l'AMRO pour débruité le signal ;
- Calcul de l'enveloppe du signal reconstruit ;
- Calcul de l'FFT de l'enveloppe ;
- Vérification de l'existence ou non des deux pics d'usure qui apparaissent dans les bandes [1 – 2] KHz et [4.5 – 5] KHz.

- Si les deux pics n'apparaissent pas, l'usure en dépouille est inférieure à 0.3 mm.
- Si les deux pics apparaissent, c'est synonyme de dépassement de l'usure de la valeur 0.3 mm.

- Sur la base de l'apparition ou non des deux pics, on peut prévoir un système d'alarme.

Parmi nos perspectives, il est intéressant de :

- ✓ Enrichir notre étude bibliographique dans ce domaine afin d'exploiter, au mieux les résultats présentés dans ce mémoire.
- ✓ Trouver un critère précis sur la base des autospectres d'accélération.
- ✓ Travailler sur d'autres méthodes permettant une meilleure identification de l'usure tels que les réseaux de neurones.

Références bibliographiques

- [Arn'07] Arnaud D., Daniel D., « Tool vibration detection with eddy current sensors in machining process and computation of stability lobes using fuzzy classifiers », *Mechanical systems and signal processing* 21 (2007) 441-456.
- [Blu'90] Blum T., Inasaki I., « A study on acoustic emission from the orthogonal cutting process », *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry* 112 (3) (1990) 203-211.
- [Bre'02] Breneur C., « Eléments de maintenance préventive de machines tournantes dans le cas de défauts combinés d'engrenages et de roulements », *INSA, Lyon, 2002*.
- [Cem'05] Cemal C.M., Yahya I., « Detecting tool breakage in turning aisi 1050 steel using coated and uncoated cutting tools », *Journal of Materials Processing Technology* 159 (2005) 191-198.
- [Che'07] Chelladurai H., Jain V.K., Vyas N.S., « Development of a cutting tool condition monitoring system for high speed turning operation by vibration and strain analysis », *Int J Adv Manuf Technol* Doi 10.1007/s00170-007-0986-Z.
- [Cho'99] Choi D., Kwon W.T., Chu C.N., « Real-time monitoring of tool fracture in turning using sensor fusion », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15 (5) (1999) 305-310.
- [Dem'01] Demaeyer J., Bebronne M., Forthomme S., « Les ondelettes », Université libre de bruxelles.
- [Dev'07] Devillez A., Schneider F., Dominiak S., Dudzinski D., Larrouquere D., « Cutting forces and wear in dry machining of inconel 718 with coated carbide tools », *Wear* 262 (2007) 931-942.
- [Dje'08] Djebala A., « Application de la transformée par ondelettes a l'étude et l'analyse vibratoire des systèmes mécaniques », thèse de doctorat, Université de badji mokhtar Annaba, 2008.
- [Dim'00] Dimla Snr D.E., « Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations A review of methods », *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (2000) 1073-1098.

- [Dim'00] Dimla Snr D.E., Lister P.M., « On-line metal cutting tool condition monitoring—I: Force and vibration analyses », *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 40 (5) (2000) 739–768.
- [Dor'89] Dornfeld D., Liang S., « Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission », *J. Eng. Ind. Trans. ASME* 111 (3) (1989) 199–205.
- [Gha'99] Ghasempour A., Jeswiet J., Moore T.N., « Real time implementation of on-line tool condition monitoring in turning », *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) 1883-1902.
- [Jac'01] Jacky D., Bruno B., « Analyse du signal (FFT et Filtrage numérique) & Analyse des systèmes », 01dB – stell MVI technologies group, 2001.
- [Jae'06] Jae-seob K., « Application of wavelet transform technique to detect tool failure in turning operations », *Int Adv Manuf Technol* (2006) 28 : 1078-1083.
- [Jea'04] Jean – pierre A., René P., « Traitement du signal et théorie de l'information », Notes du cours PHYS 2907, Année académique 2003 – 2004, Université catholique de Louvain.
- [Jem'98] Jemielniak K., Otman O., « Tool failure detection based on analysis of acoustic emission signals », *Journal of Material Processing Technology* 76 (1998) 192–197.
- [Luo'05] Luong Hong Viet., « Etude de la méthode de la transformation en ondelette et l'application à la compression des images », Rapport final de TIPE, 15 juillet 2005.
- [Lia'04] Liang S.Y., Kwon Y.K., Chiou R.Y., « Modelling the effect of flank wear on machining thrust stability », *Int J Adv Manuf Technol* (2004) 23 : 857-864.
- [Mic'01] Michel M., Yves M., Georges O., Jean – Michel P., « Wavelet Tool box », User's Guide version 2.1, COPYRIGHT 1997 – 2001, Math Works, Inc.
- [Mor'90] Moriwaki T., Tobito M., « A new approach to automatic detection of life of coated tool based on acoustic emission measurement », *ASME Trans. Journal of Engineering for Industry* 112 (3) (1990) 212–218.
- [Oua'93] Ouahabi A., « Fondements théoriques du traitement du signal », O.P.U., Alger, 1993.
- [Pac'98] Pachaud C., Boulenger A., « Diagnostic vibratoire en maintenance préventive », DUNOD, Paris, 1998.
- [Pou'01] Poulachon G., Moisan A., Jawahir I.S., « Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools », *Wear* 250 (2001) 576-586.

- [Rem'01] Remadna M., «le comportement du système usinant en tournage du. Application au cas d'un acier trempé usiné avec des plaquettes CBN », thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001.
- [Sch'01] Scheffer C., Heyns P.S., « Wear monitoring in turning operations using vibration and strain measurements », *Mechanical systems and signal processing* (2001) 15(6), 1185-1202.
- [Tah'06] Tahmi R., « Conception optimisée d'un réseau de neurones pour la surveillance en ligne de l'usure des outils coupants », *Mémoire de magister, Université de boumerdes*, 2006.
- [Wei'05] Weihong L., Xieguo G., Obikawa T., Shirakashi T., « A method of recognizing tool-wear states based on a fast algorithm of wavelet transform », *Journal of Materials Processing Technology* 170 (2005) 374-380.
- [Xia'99] Xiaoli L., Shen D., Zhejun Y., « Discrete wavelet transform for tool breakage monitoring », *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 39 (1999) 1935-1944.
- [Xia'02] Xiaoli Li., « A brief review: Acoustic emission method for tool wear monitoring during turning », *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42 (2002) 157–165.
- [Xia'07] Xiaozhi C., Beizhi L., « Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis », *Int J Adv Manuf Technol* (2007) 33 : 968-976.
- [Yah'05] Yahya I., Cemal cakir M., « Finite element analysis of cutting tools prior to fracture in hard turning operations », *Materials and design* 26 (2005) 105-112.
- [Zho'95] Zhou J.M., M. Andersson, Ståhl J.E., « A system for monitoring cutting tool spontaneous failure based on stress estimation », *Journal of Materials Processing Technology* 48 (1995) 231.
- [Qia'07] Qian L., Hossain M.R., « Effect on cutting force in turning hardened tool steels with cubic boron nitride inserts », *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 274-278.

Annexe A : Spectres et signaux des efforts de coupe - usures en dépouille

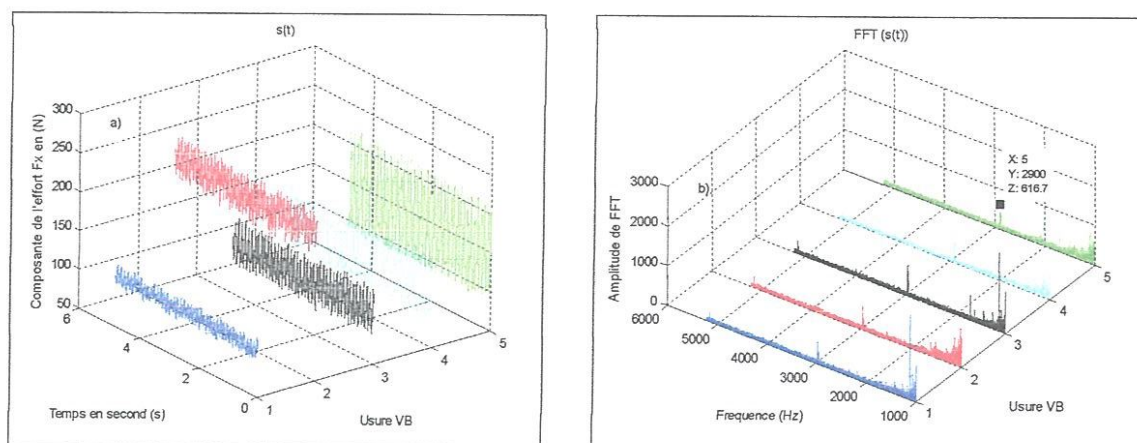


Figure A1 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

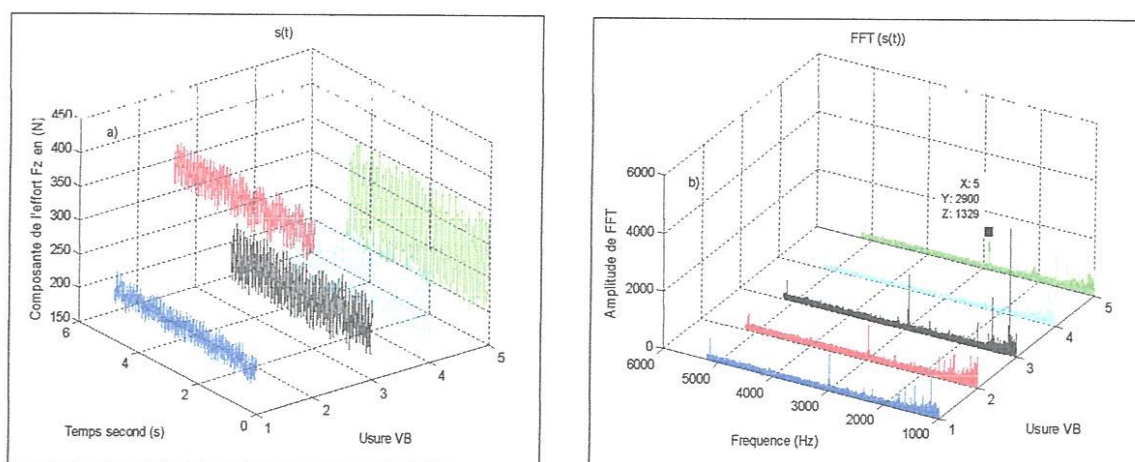


Figure A2 : a) Signaux mesurés (F_z), b) Les spectres des efforts de coupe tangentielle (F_z) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

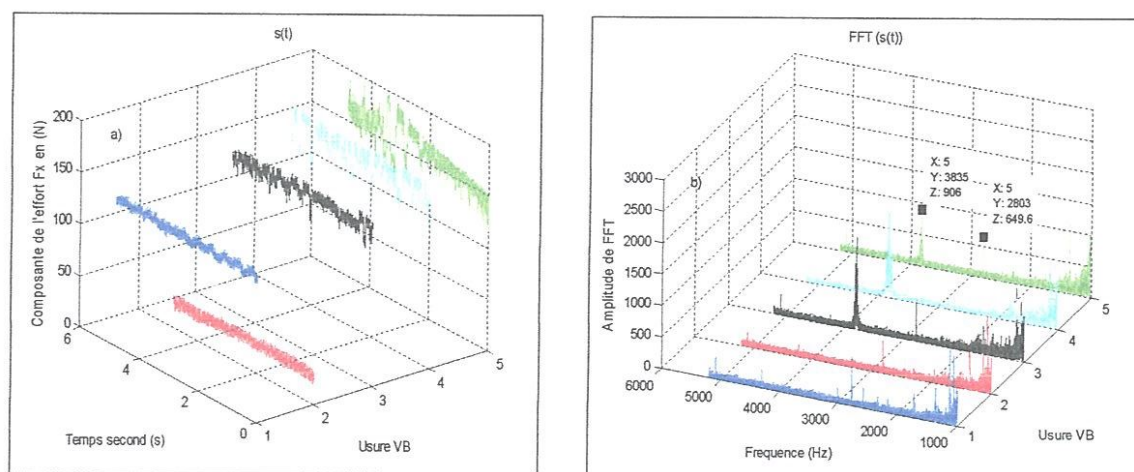


Figure A3 : a) Signaux mesurés (F_x), b) Les spectres des efforts de coupe axiale (F_x) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

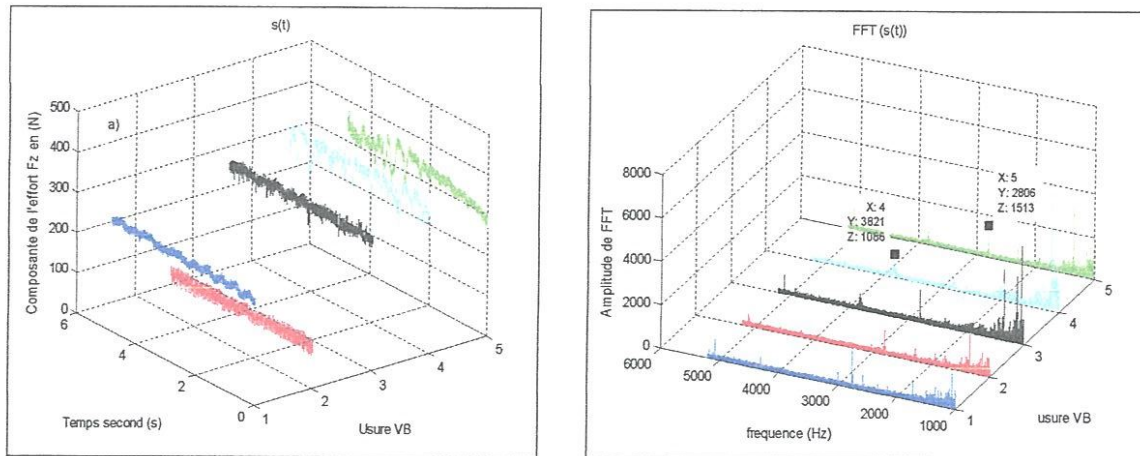


Figure A4 : a) Signaux mesurés (F_z), b) Les spectres des efforts de coupe tangentielle (F_z) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

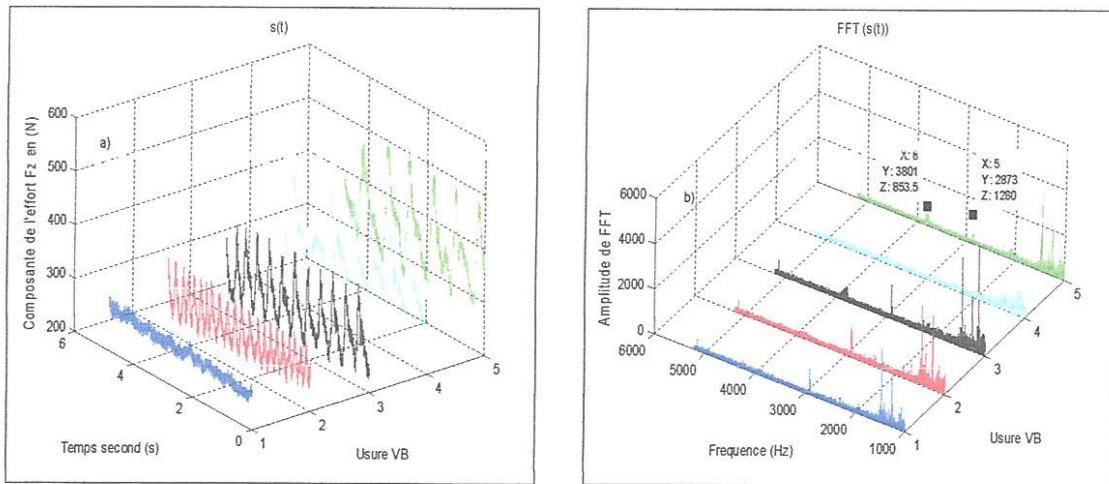


Figure A5 : a) Signaux mesurés (F_z), b) Les spectres des efforts de coupe tangentielle (F_z) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

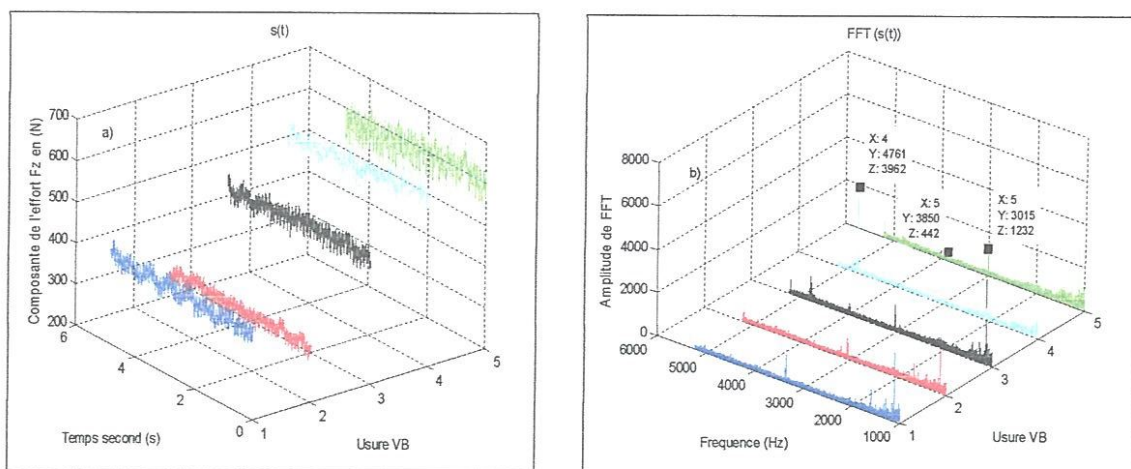


Figure A6 : a) Signaux mesurés (F_z), b) Les spectres des efforts de coupe tangentielle (F_z) – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

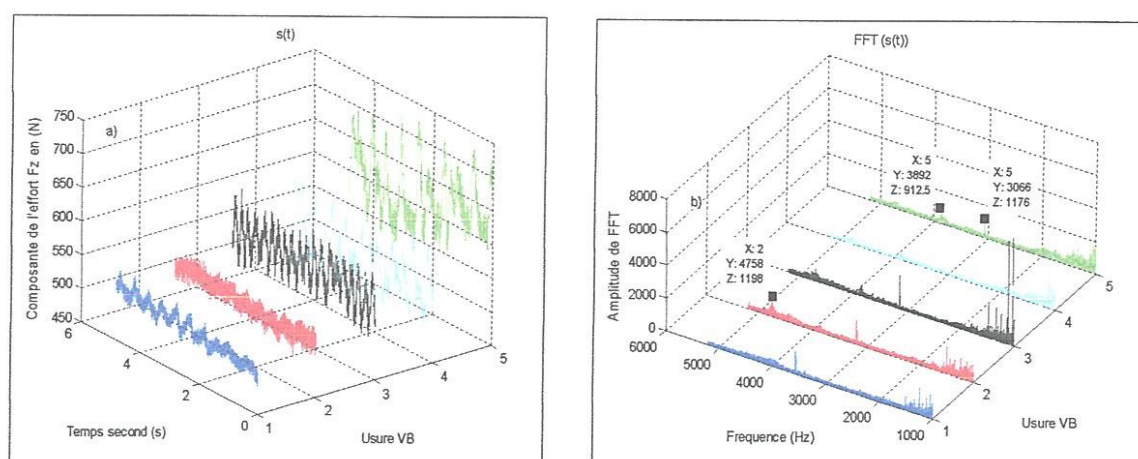


Figure A7 : a) Signaux mesurés (F_z), b) Les spectres des efforts de coupe tangentielle (F_z) – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

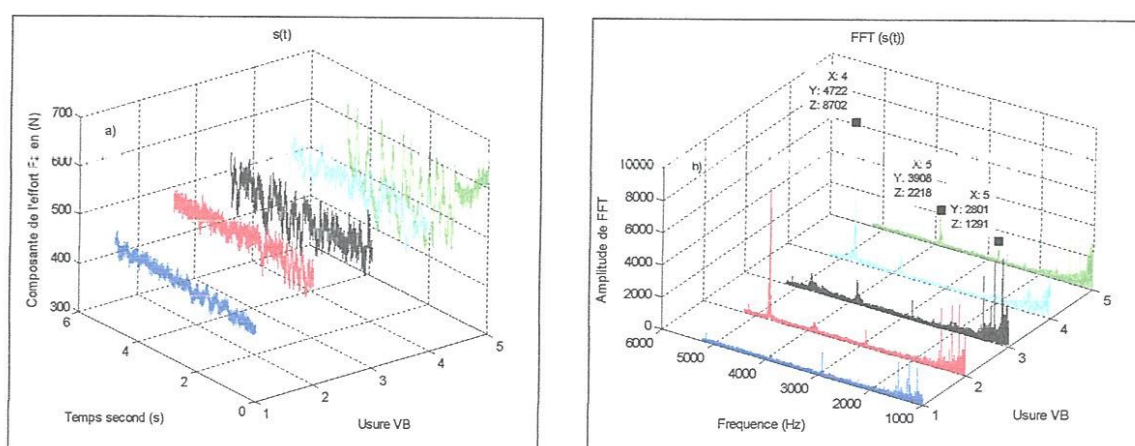


Figure A8 : a) Signaux mesurés (F_z), b) Les spectres des efforts de coupe tangentielle (F_z) – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm et $f = 0.12$ mm/tr.

Annexe B : Résultats des spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit (D1) en fonction de l'usure en dépouille pour l'effort de coupe

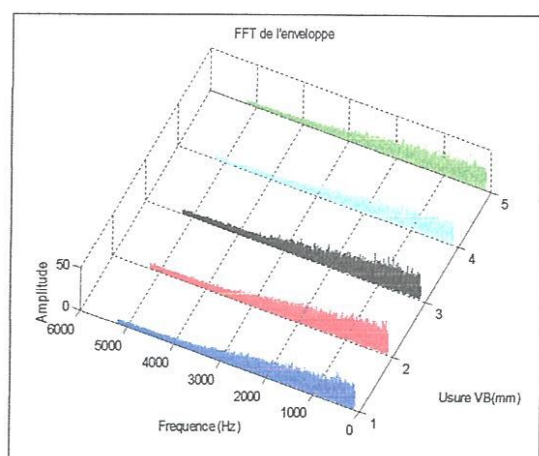


Fig. B1 : F_x , $V_c = 100$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 0.5$ mm

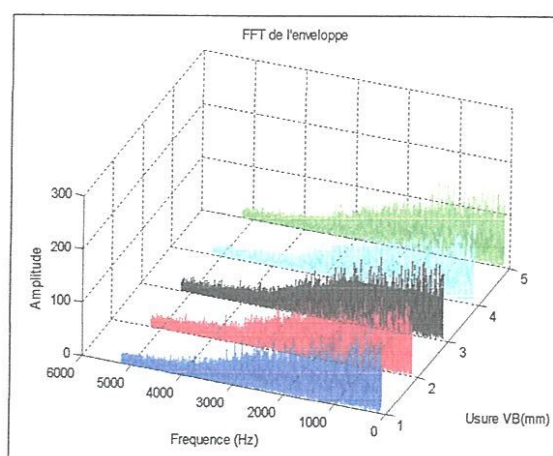
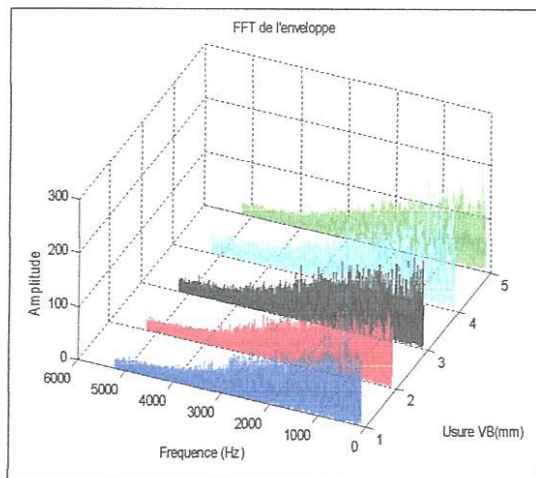
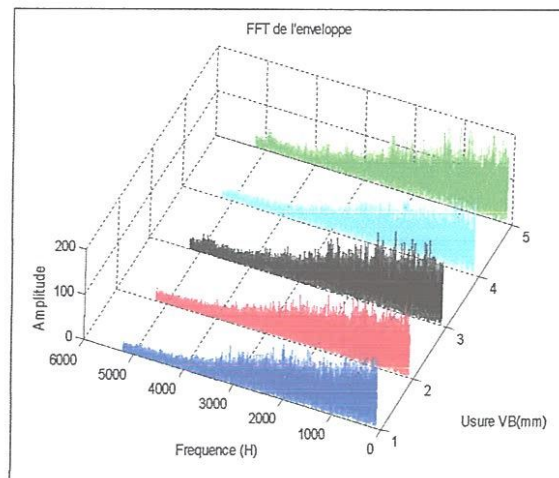
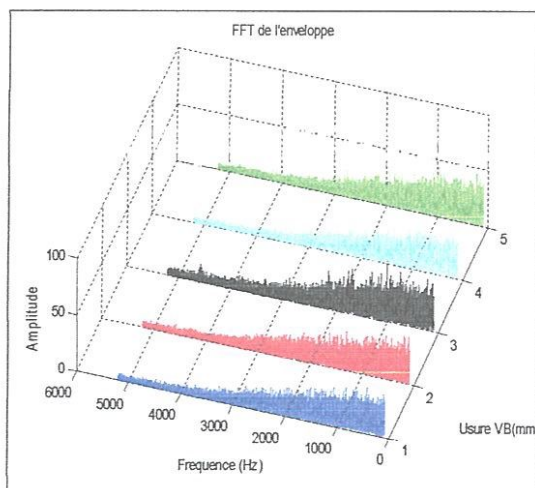
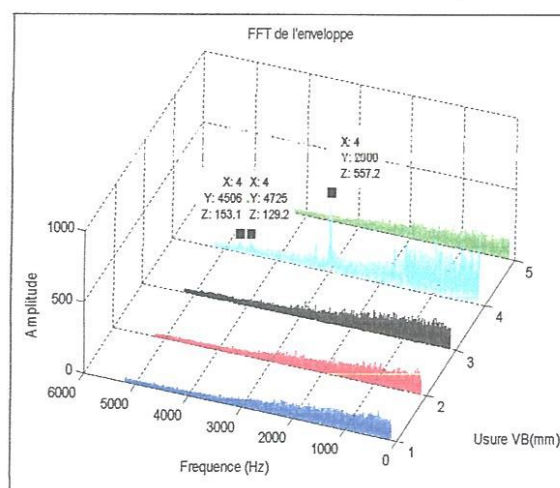
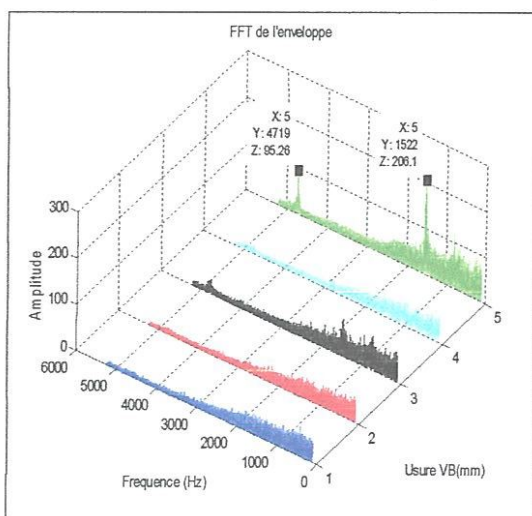
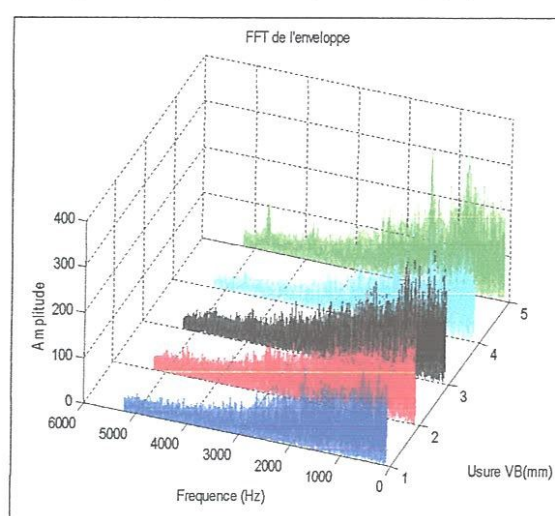


Fig. B2 : F_z , $V_c = 100$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 0.5$ mm

Fig. B3 : Fz, $V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mmFig. B4 : Fz, $V_c=190$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=0.5$ mmFig. B5 : Fx, $V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mmFig. B6 : Fz, $V_c=100$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mmFig. B7 : Fx, $V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mmFig. B8 : Fz, $V_c=135$ m/min, $f=0.12$ mm/tr, $a_p=1$ mm

Annexe C : Résultats des autospectres des accélérations dans la direction radiale (R)

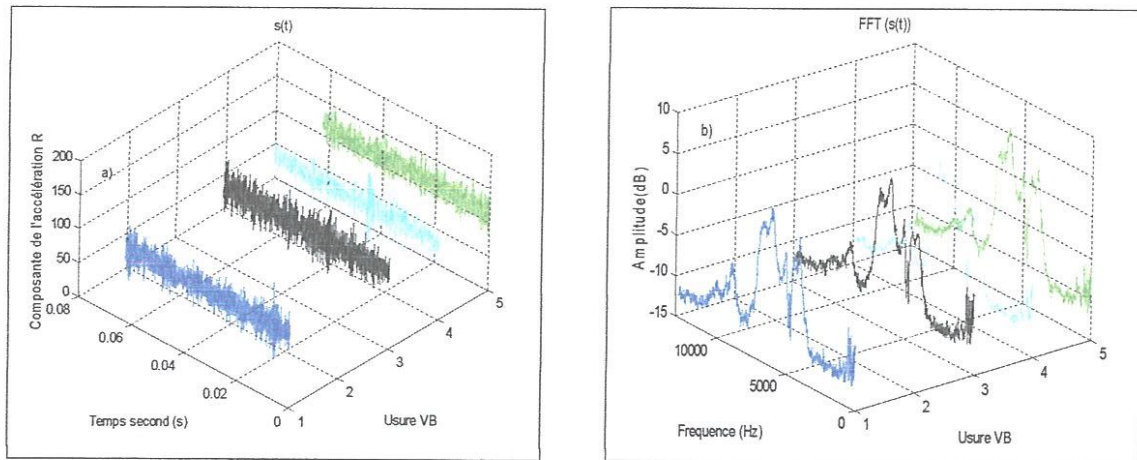


Figure C1 : a) Signaux mesurés (R), b) Les spectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

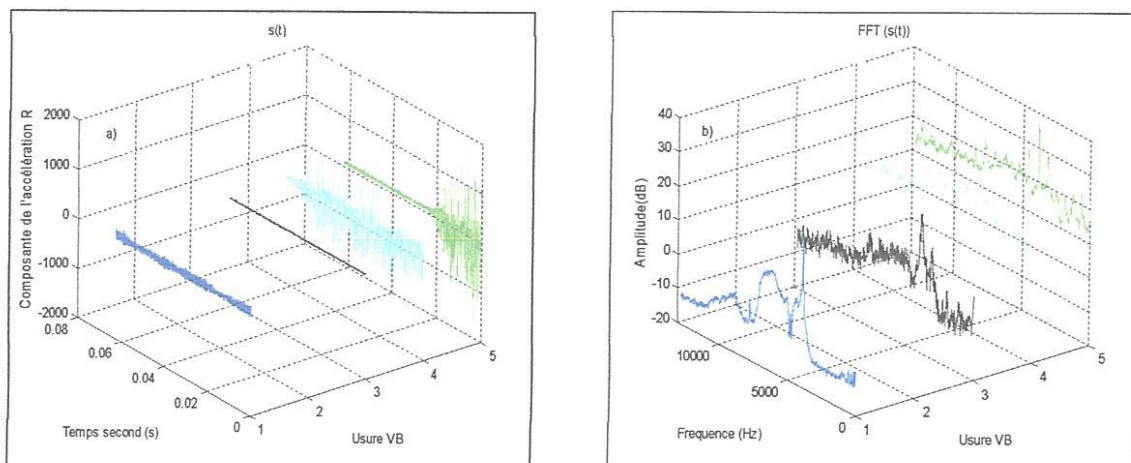


Figure C2 : a) Signaux mesurés (R), b) Les spectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

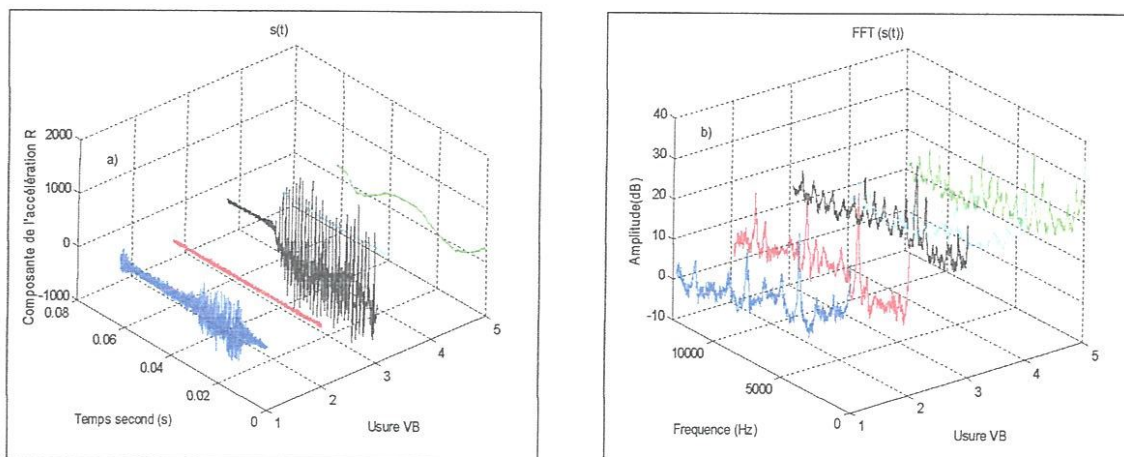


Figure C3 : a) Signaux mesurés (R), b) Les spectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

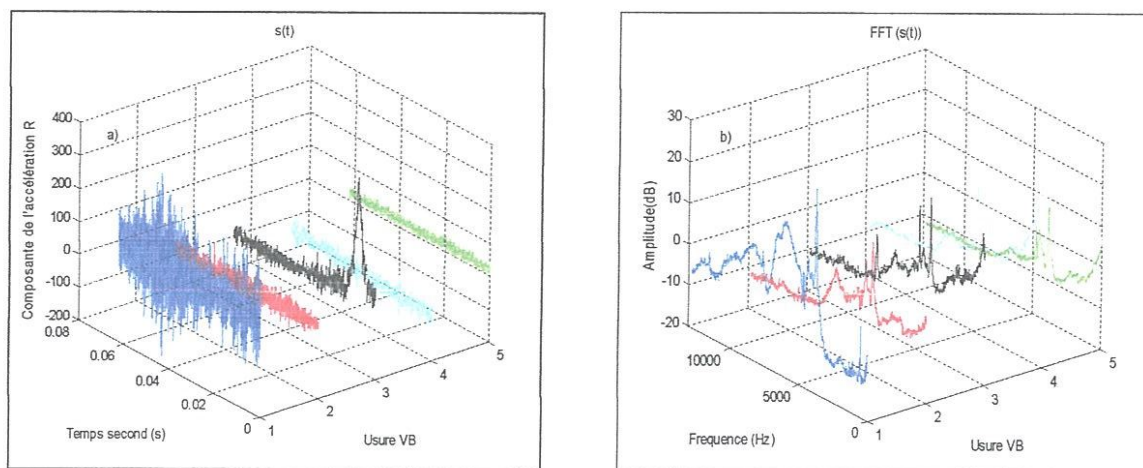


Figure C4 : a) Signaux mesurés (R), b) Les spectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

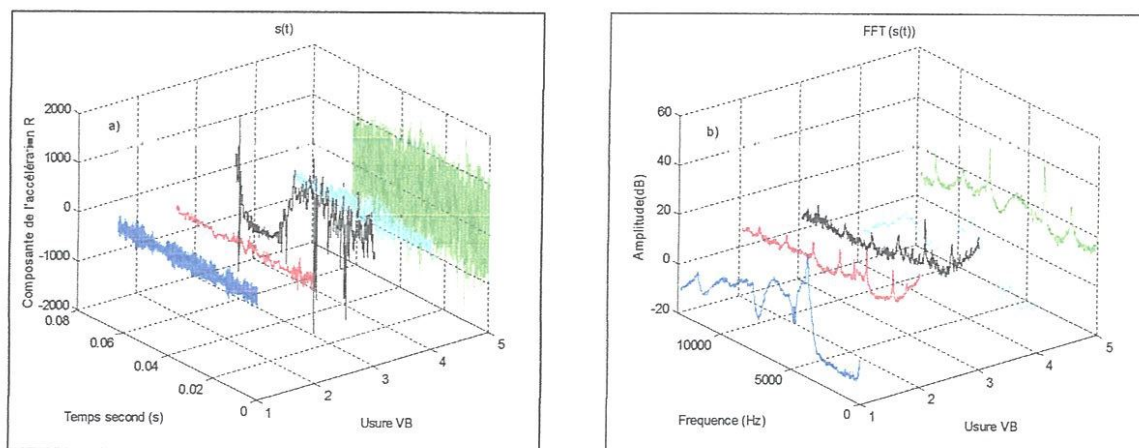


Figure C5 : a) Signaux mesurés (R), b) Les spectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

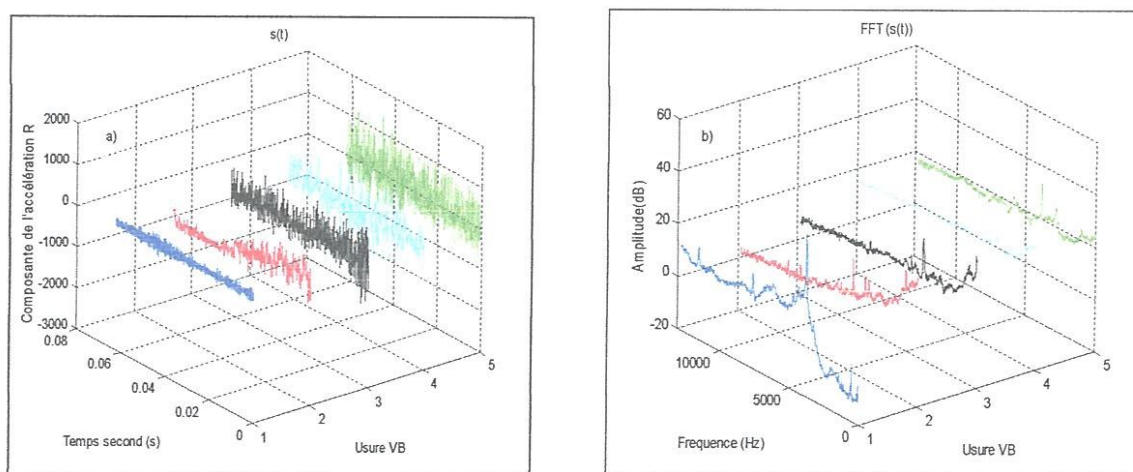


Figure C6 : a) Signaux mesurés (R), b) Les spectres des accélérations dans la direction radiale – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 1$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

Annexe D : Résultats des autospectres des accélérations dans la direction tangentielle (T)

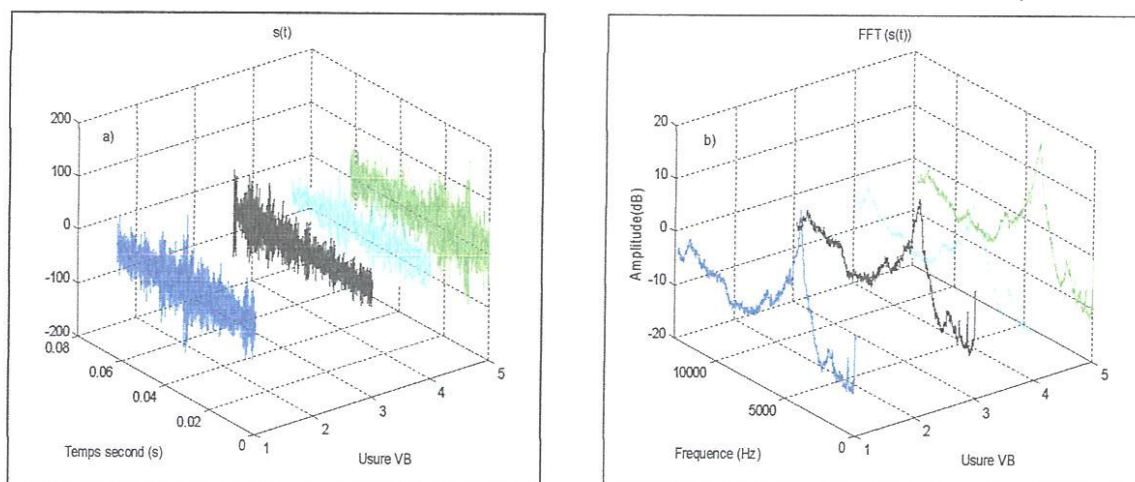


Figure D1: a) Signaux mesurés (T), b) Les spectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 100$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

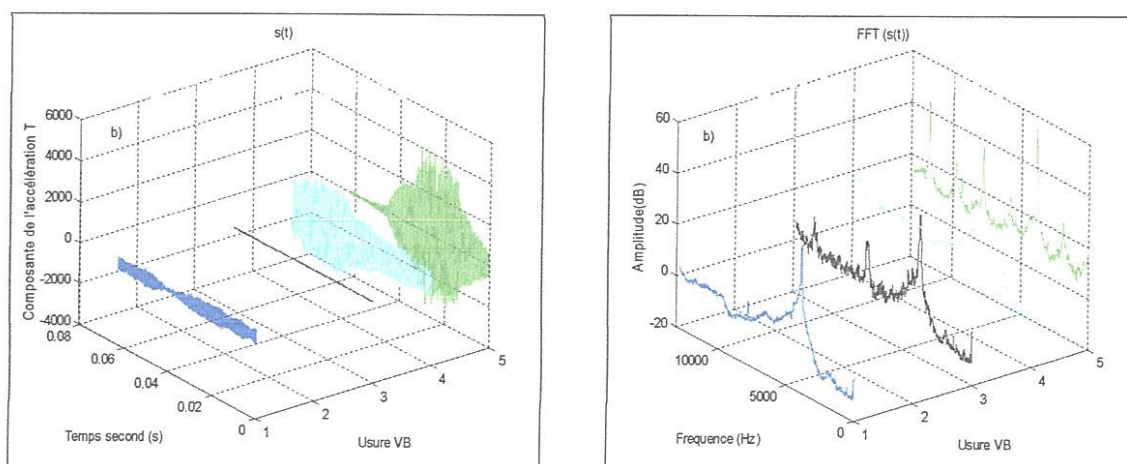


Figure D2 : a) Signaux mesurés (T), b) Les spectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 135$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

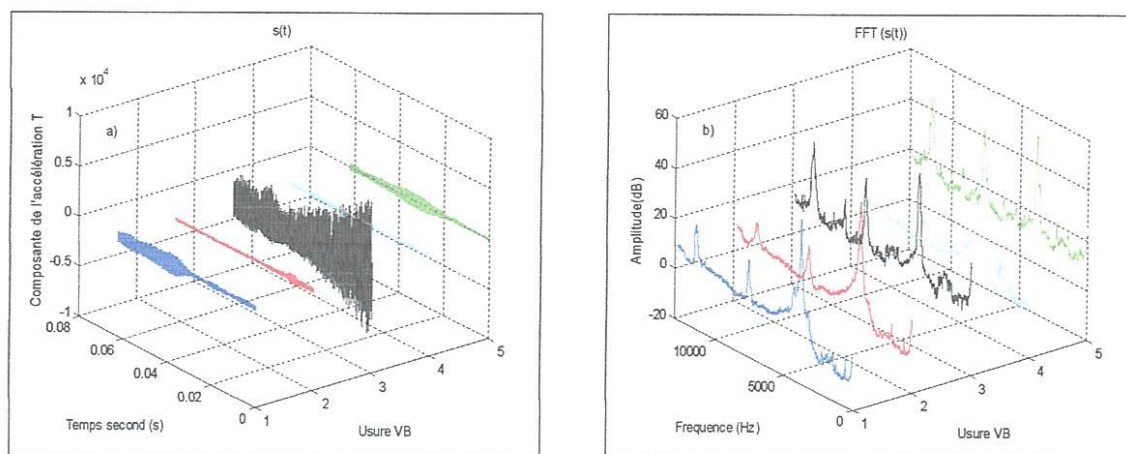


Figure D3 : a) Signaux mesurés (T), b) Les spectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 190$ m/min, $a_p = 0.5$ mm, $f = 0.12$ mm/tr.

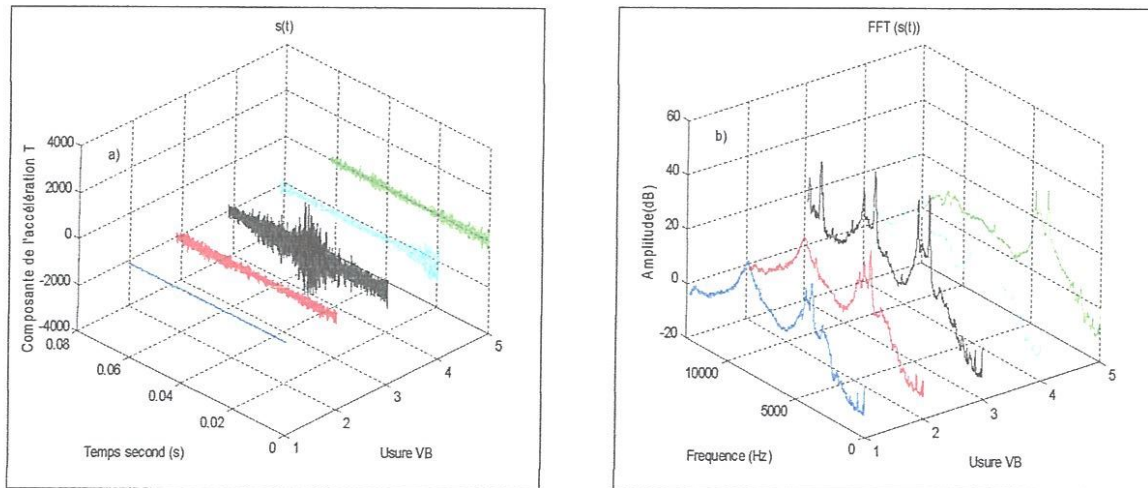


Figure D4 : a) Signaux mesurés (T), b) Les spectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 100 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

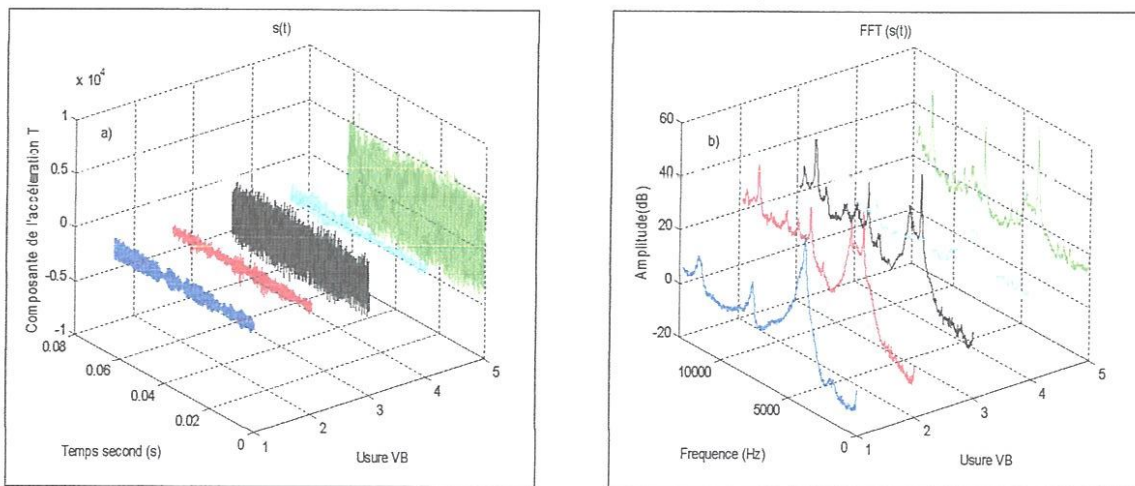


Figure D5 : a) Signaux mesurés (T), b) Les spectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 135 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

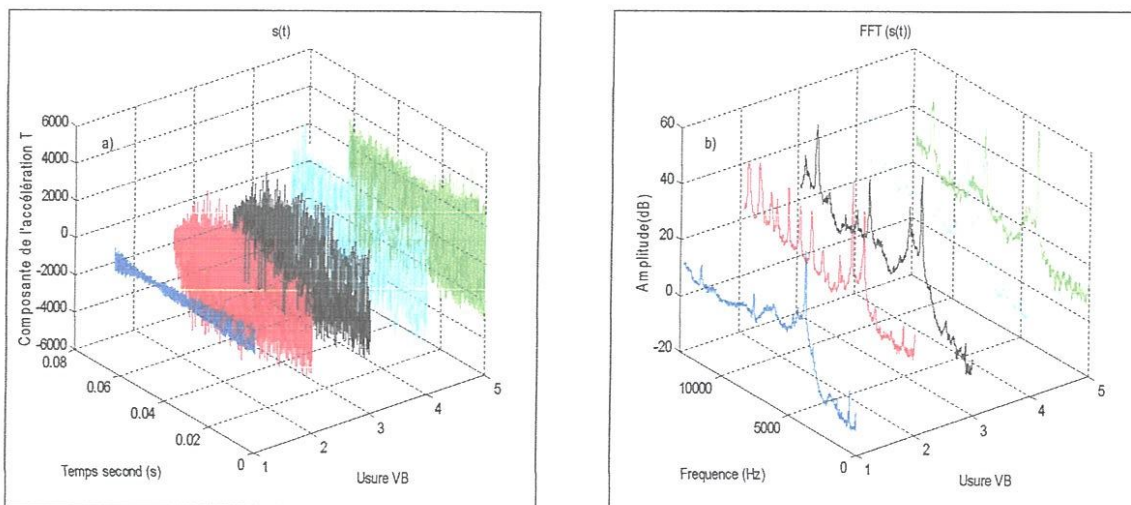
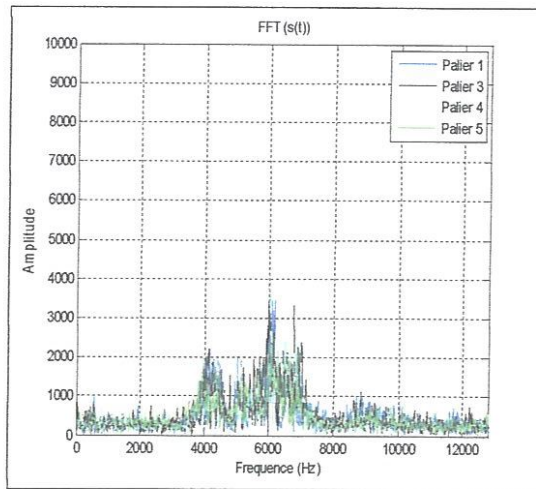
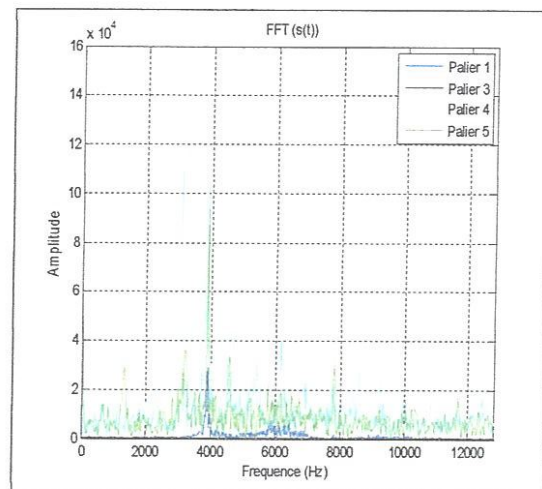


Figure D6 : a) Signaux mesurés (T), b) Les spectres des accélérations dans la direction tangentielle – usures en dépouille. $V_c = 190 \text{ m/min}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0.12 \text{ mm/tr}$.

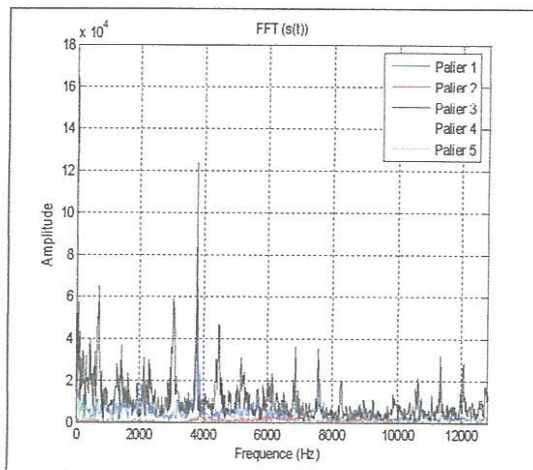
Annexe E : Résultats des spectres des accélérations dans la direction radiale (R)



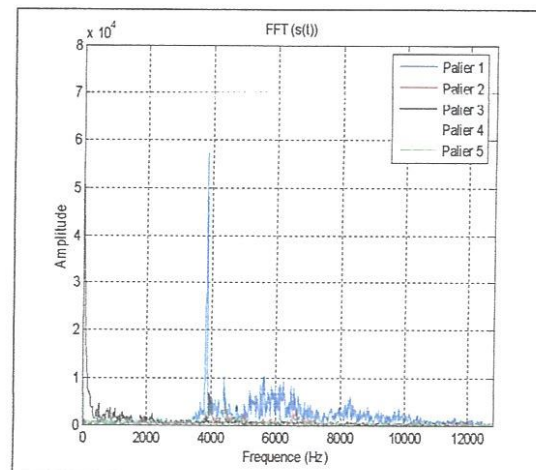
$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$



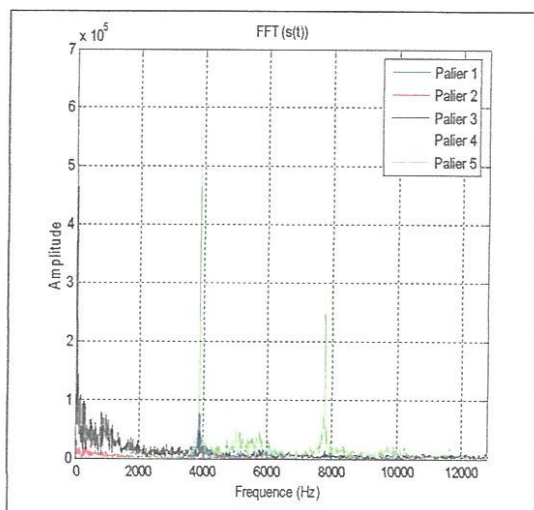
$V_c = 135 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$



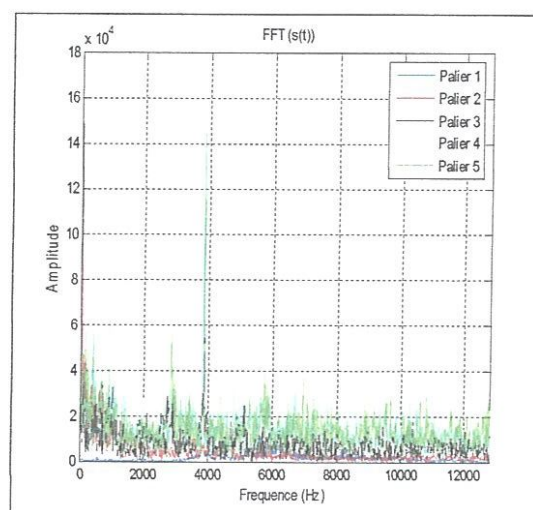
$V_c = 190 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$



$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$

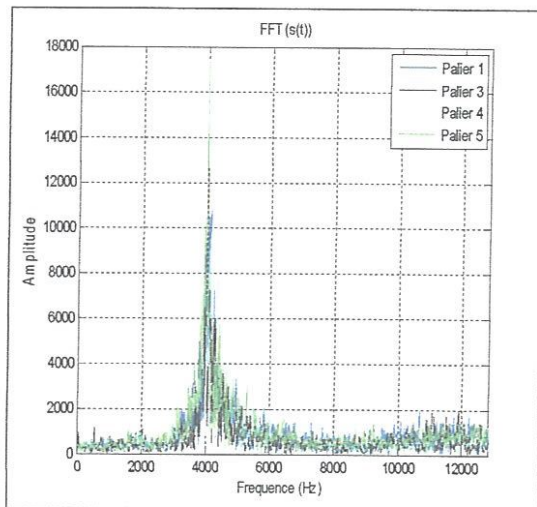


$V_c = 135 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$

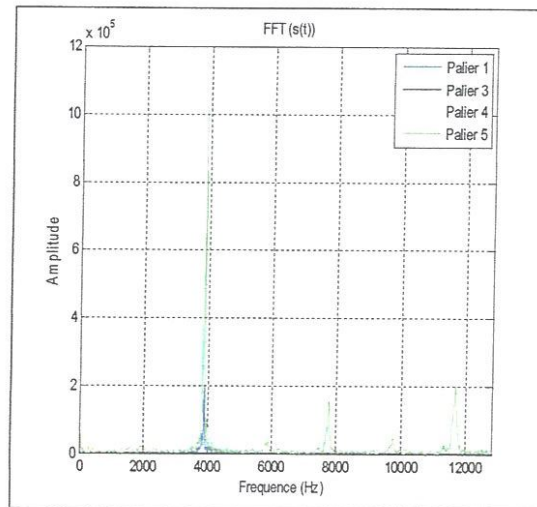


$V_c = 190 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$

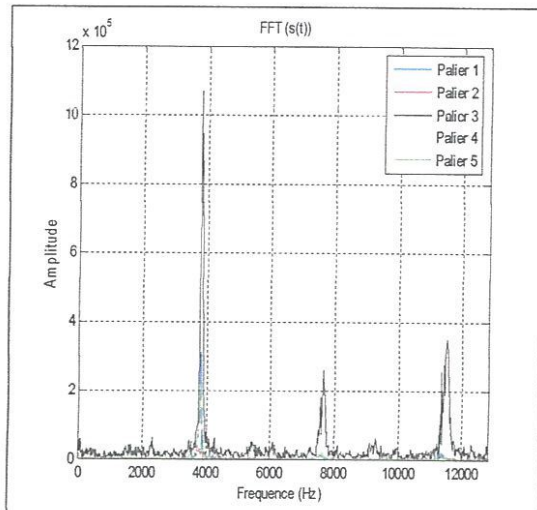
Annexe F : Résultats des spectres des accélérations dans la direction tangentielle (T)



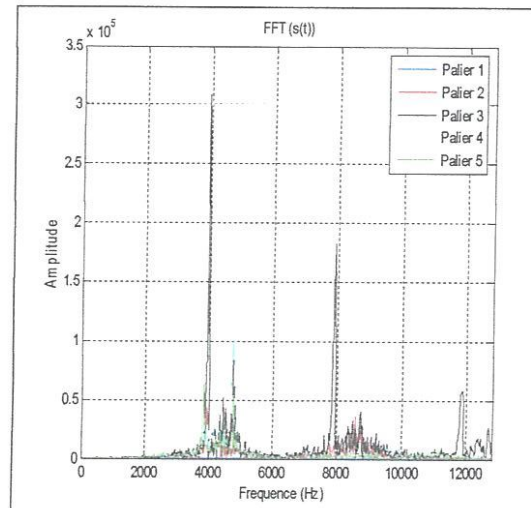
$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$



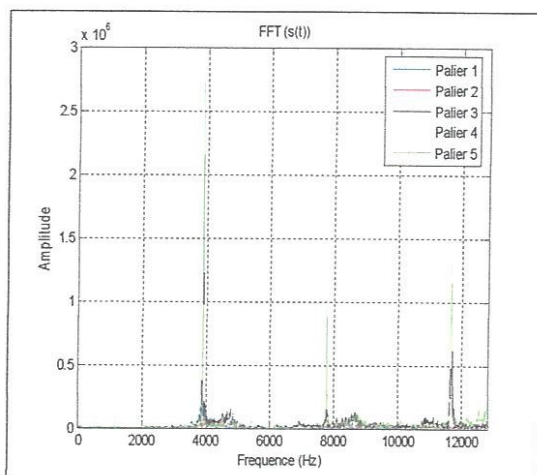
$V_c = 135 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$



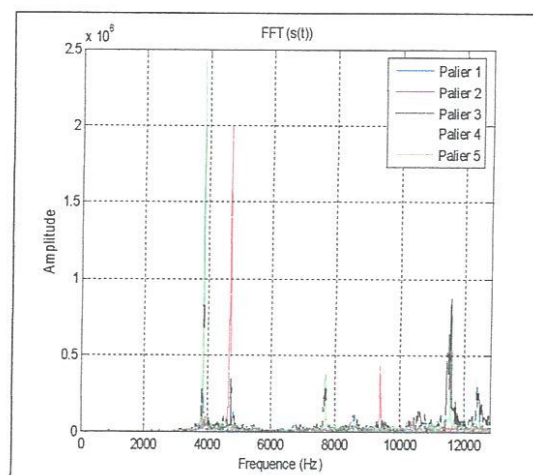
$V_c = 190 \text{ m/min}, a_p = 0.5 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$



$V_c = 100 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$

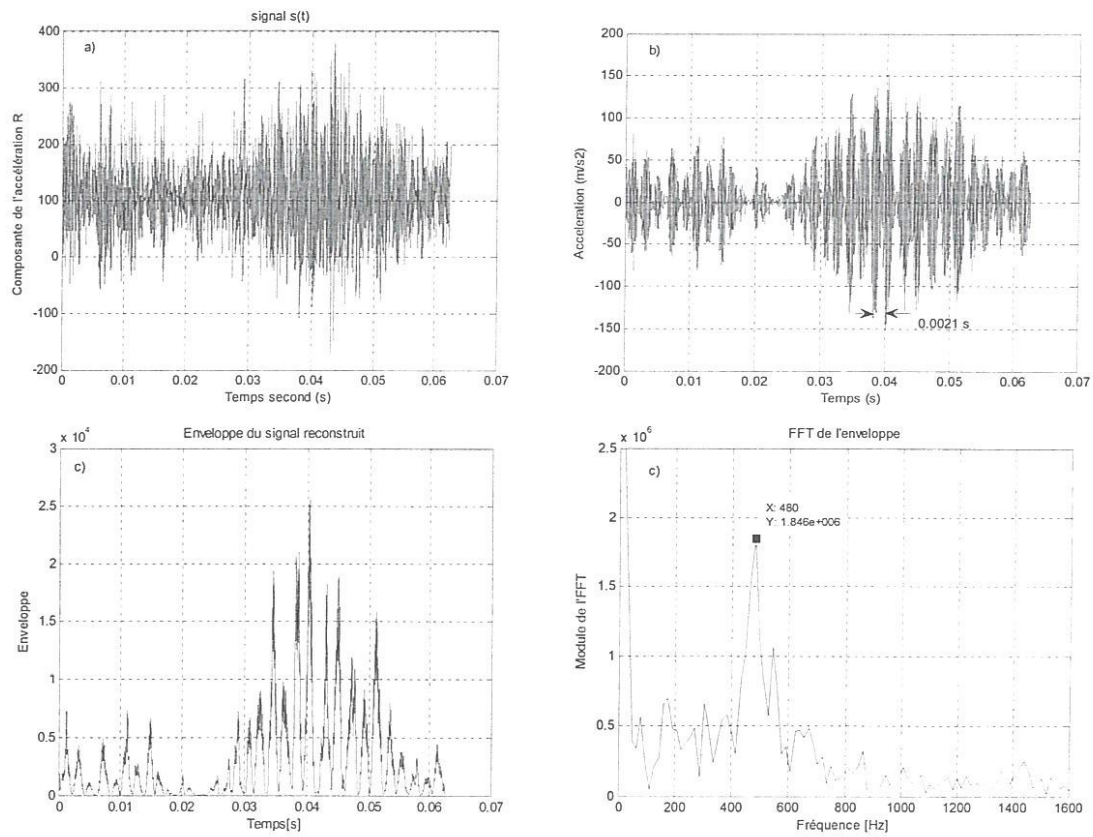


$V_c = 135 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$

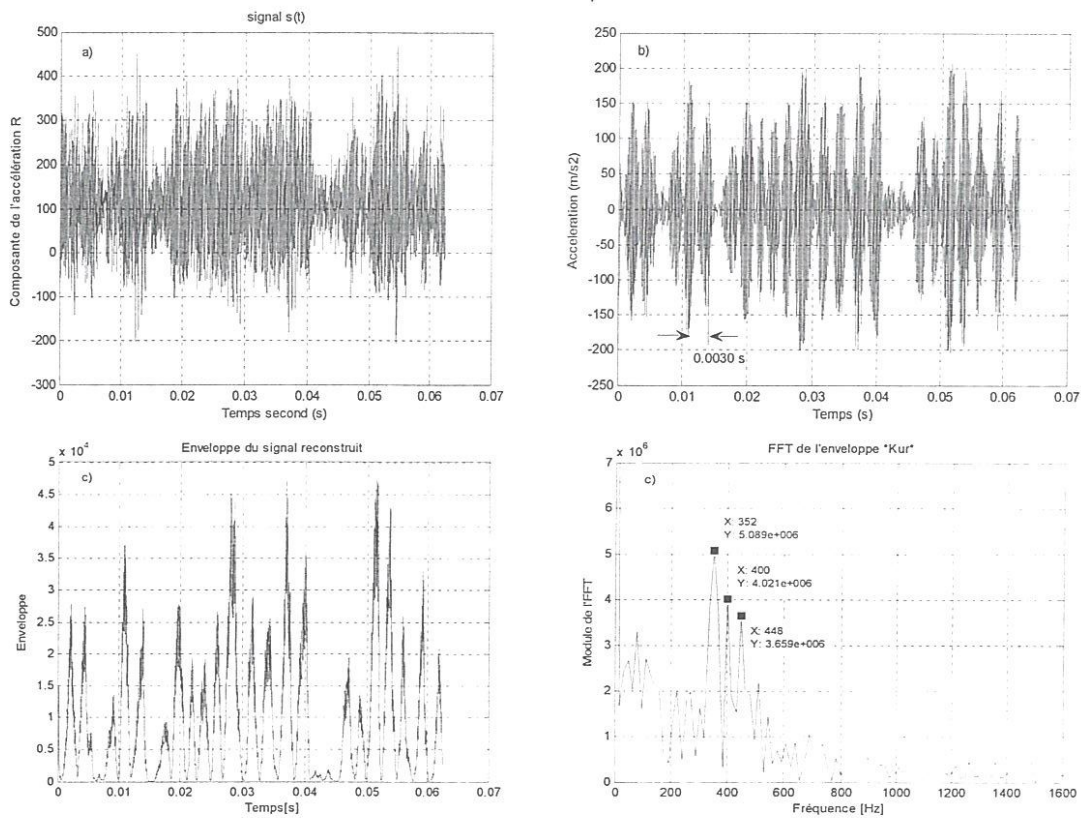


$V_c = 190 \text{ m/min}, a_p = 1 \text{ mm}, f = 0.12 \text{ mm/tr}$

Annexe G : Les spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit.



$V_c=100\text{m/min}$, $f=0.12\text{mm/tr}$, $a_p=1\text{ mm}$, $VB = 0.123\text{ mm}$



$V_c=135\text{ m/min}$, $f=0.12\text{ mm/tr}$, $a_p= 1\text{ mm}$, $VB = 0.301\text{ mm}$.

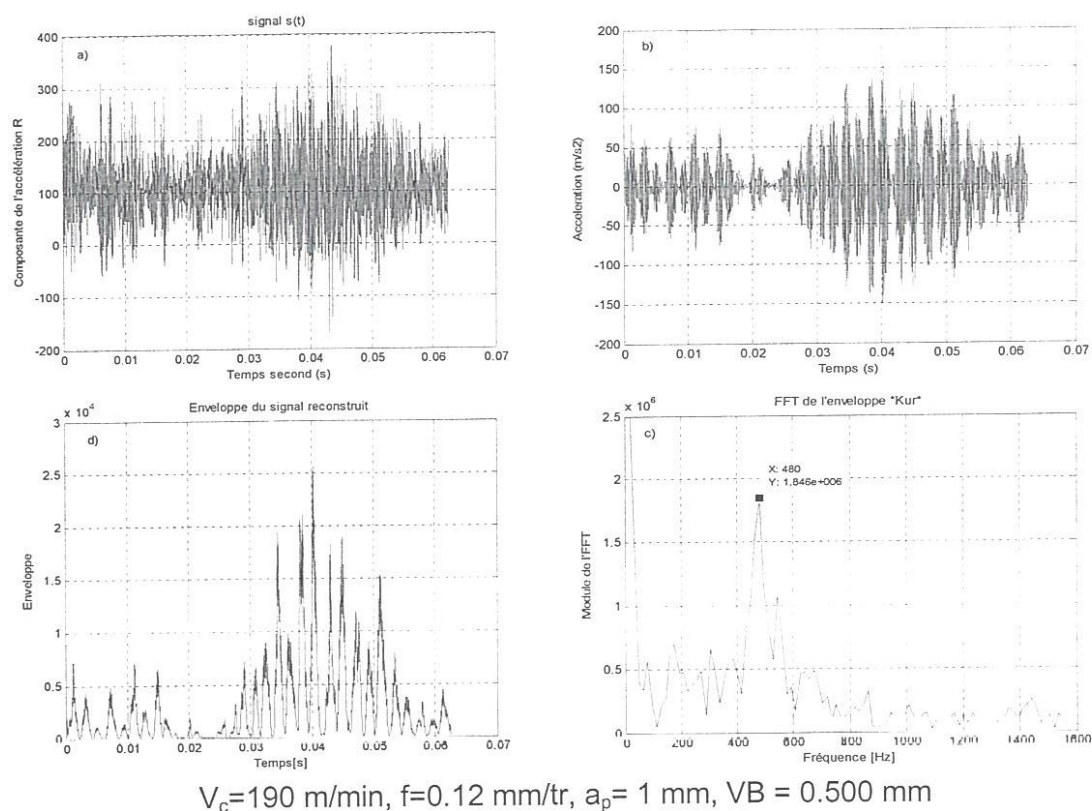
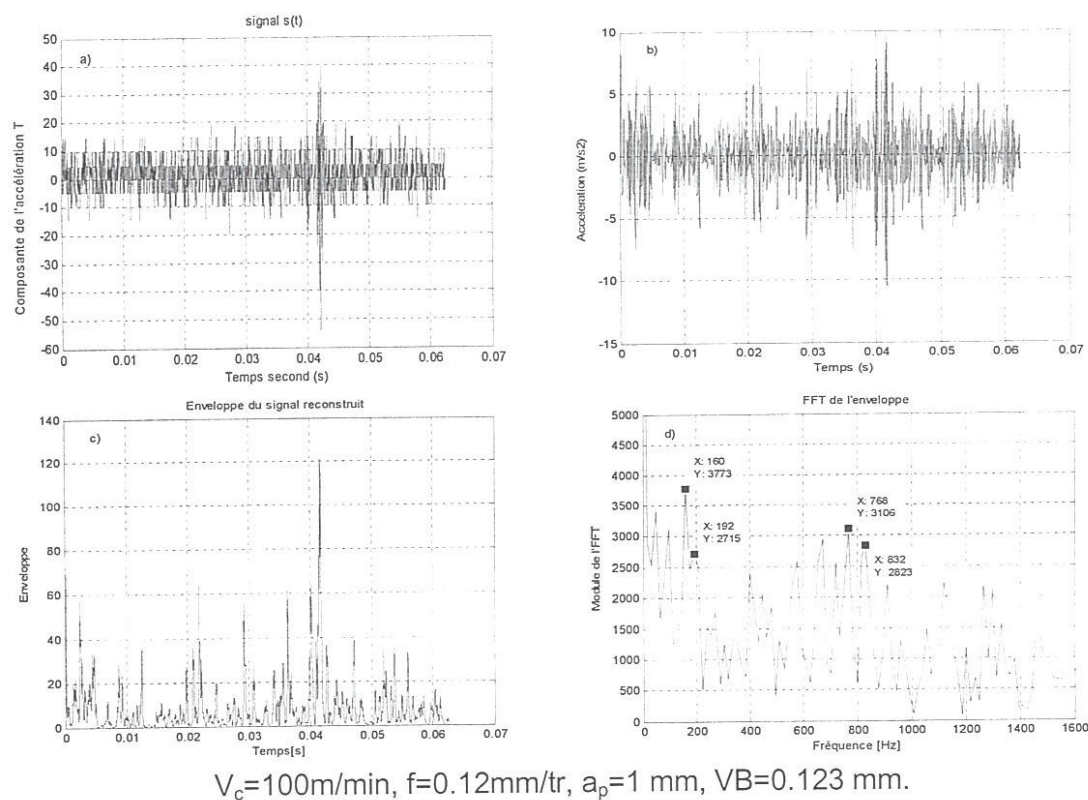
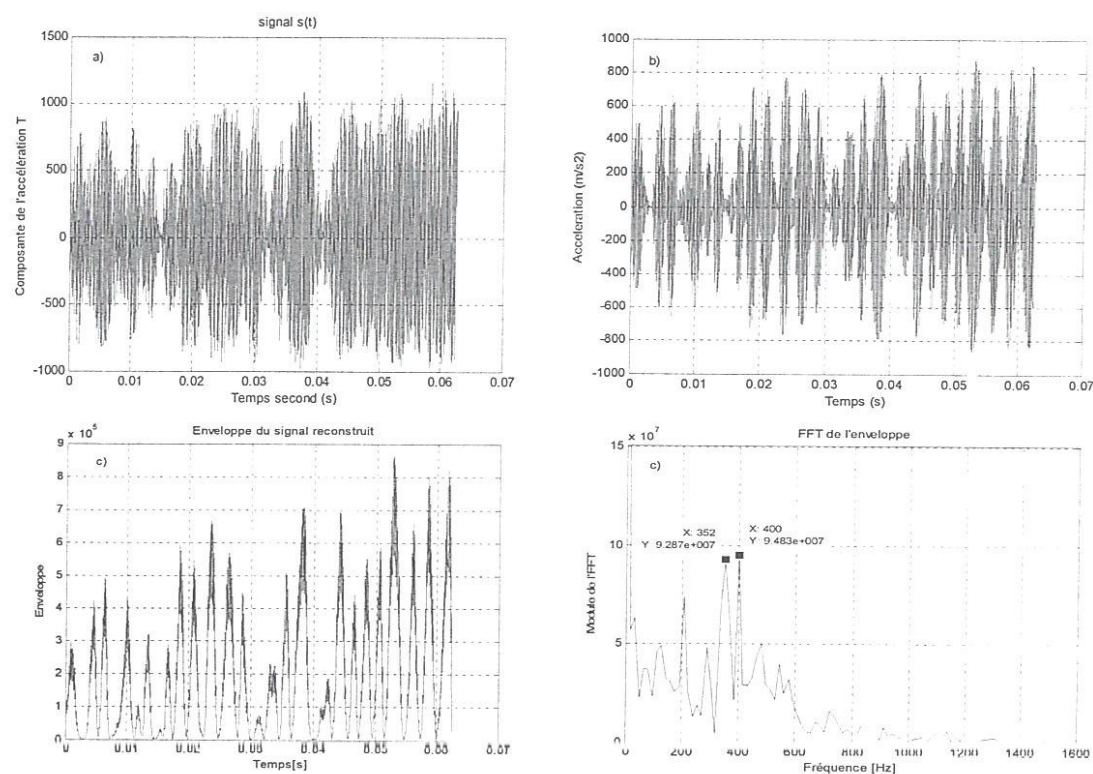
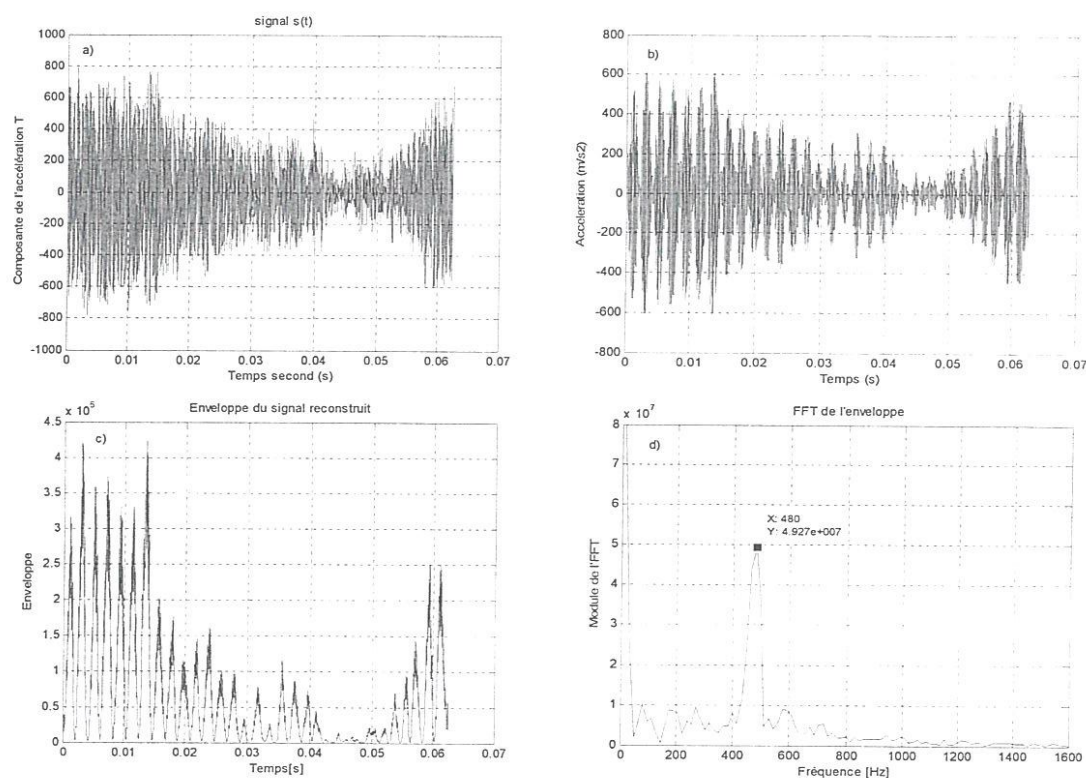


Figure G1 : (a) Signaux d'accélération (accélérations radiales), (b) Signaux reconstruits (D3), (c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit.





$V_c = 135$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 1$ mm, $VB = 0.301$ mm.



$V_c = 190$ m/min, $f = 0.12$ mm/tr, $a_p = 1$ mm, $VB = 0.500$ mm.

Figure G2 : (a) Signaux d'accélération (accélérations tangentielle), (b) Signaux reconstruits (D3), (c) Enveloppe du signal reconstruit et (d) Spectres d'enveloppe de l'ondelette du signal reconstruit.

Communications

- *Mohamed Khemissi BABOURI, Nouredine OUELAA , Chawki BENCHAAABANE , Abderrazek DJEBALA .*

« **IDENTIFICATION DE L'USURE DE L'OUTIL DE COUPE EN TOURNAGE** »
Communication à la 3^{ième} Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2009, Hammamat 16 -18 Mars 2009, Tunisie.

- *Mohamed Khemissi BABOURI, Nouredine OUELAA, Abderrazek DJEBALA*

« **SURVEILLANCE ET DIAGNOSTIC DE L'USURE DE L'OUTIL DE COUPE** »
Communication à la " 1st International conference on systems and processing information " ICSIP'09, Laboratoire d'automatique et informatique " LAIG", le 2-4 Mai 2009 Guelma, Algérie.