

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

**BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY**  
**UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA**



**جامعة باجي مختار - عنابة**

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de génie mécanique

**MEMOIRE**

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

# **Diagnostic des états de surface par analyse vibratoire dans les procédés d'usinage**

OPTION

**Construction mécanique**

Par

**CHOUIKHI NADJETTE**

Directeur de mémoire : **M.C BOUCHELAGHEM Abdelaziz**

**Devant le jury:**

Pr : A . HAIAHEM  
M.C : R . ADJABI  
M.C : S . MEKHILEF

Président	U. Badji Mokhtar	Annaba
Examineur	U. Badji Mokhtar	Annaba
Examineur	U. Badji Mokhtar	Annaba

**Annaba 2008**

**Liste des abréviations**

**Table des figures**

**Liste des tableaux**

**INTRODUCTION**

**1. USINAGE.**

1.1. Introduction .....	2
1.1. a. Définition de l'usinage .....	2
1.1. b. Définition du tournage .....	2
1.2. Outils de coupe .....	3
1.2.1. Géométrie de l'outil de coupe .....	3
1.2.2.1. Éléments de l'outil .....	3
1.2.2.2. Angles de l'outil de coupe .....	4
1.2.3. Matériaux de l'outil .....	5
1.2.3. 1. Les aciers rapides .....	5
1.2.3.2. Les carbures cémentés .....	5
1.2.3.3. Les cermets .....	6
1.2.3.4. Les céramiques .....	6
1.2.3.5. Les nitrures de bore cubique (CBN) .....	6
1.2.3.6. Diamant polycristallin (PCD) .....	6
1.3. Paramètres de coupe .....	6
1.3.1. Vitesse de coupe .....	7
1.3.2. Vitesse d'avance .....	7
1.3.3. Profondeur de passe .....	7
1.4. Conclusion .....	8

**2. RUGOSITE DE SURFACE**

2.1. Introduction .....	9
2.2. Définition .....	9
2.3. Défaut de surface .....	9
2.3.1. Ordre 1 .....	9
2.3.2. Ordre 2 .....	10
2.3.3. Ordre 3 .....	11
2.3.4. Ordre 4 .....	12

2.4.	Définition des différents types de lignes .....	12
2.4.1.	Longueur de base, d'évaluation .....	12
2.4.2.	Lignes de référence .....	13
2.4.2.1.	La ligne moyenne arithmétique .....	13
2.4.2.2.	La ligne des moindres carrés .....	13
2.4.2.3.	La ligne enveloppe supérieur .....	13
2.4.2.4.	La ligne enveloppe inférieure .....	13
2.5.	Critère de rugosité .....	14
2.6.	Modélisation des états de surfaces usinées .....	15
2.6.1.	Modèle mathématique de la rugosité des surfaces usinées par enlèvement de matière .....	15
2.6.1.1.	Caractère réel de la rugosité obtenue .....	15
2.6.1.2.	Valeurs extrêmes de la fonction .....	15
2.6.1.3.	Méthodologie de recherche théorique .....	17
2.7.	Influences des vibrations sur l'état de surface .....	19
2.8.	Estimation de la rugosité moyenne par le comportement vibratoire de l'outil de coupe.....	20
2.9.	Conclusion .....	24

### 3. VIBRATIONS

3.1.	Introduction .....	25
3.2.	Définition .....	25
3.3.	Les vibrations périodiques .....	25
3.4.	Les vibrations transitoires .....	26
3.5.	Les vibrations aléatoires .....	27
3.6.	Caractéristiques des vibrations .....	27
3.6.1.	Amplitude des vibrations .....	27
3.6.2.	Fréquence des vibrations .....	28
3.7.	Appareils de mesure des vibrations .....	28
3.7.1.	Définition .....	28
3.7.2.	Capteurs de vibrations .....	29
3.7.2.1.	Capteurs de déplacement .....	29
3.7.2.2.	Capteurs de vitesse .....	29



4.3.5. Module d'alimentation .....	59
4.3.6. Application « Mécasim .....	60

## **5. PLAN DES EXPERIENCES**

5.1. Définition .....	61
5.2. Expériences préliminaires .....	62
5.3. Résultats expérimentaux des rugosités mesurées de surfaces et des accélérations vibratoires enregistrés .....	62

## **6. RESULTATS, ANALYSE ET TRAITEMENT**

6.1. Résultats des spectres vibratoires et des FFT enregistrés pour différents régimes de coupe expérimentés .....	64
6.2. Modélisation de la rugosité de surface et de l'accélération vibratoire .....	72
6.3. Interpolation au sens des moindres carrés .....	76
6.3.1. Méthode des moindres carrés .....	76
6.4. Applications de la méthode des moindres carrés .....	78
6.5. Vérification de résultats .....	80
6.5.1. Vérification du Polynôme.....	80
6.5.2. Applications du polynôme obtenu .....	81

## **CONCLUSION GENERALE**

### **Références bibliographiques**

### **Annexe I**

### **Annexe II**

### **Annexe III**

# LISTE DES ABREVIATIONS

- M - Point de l'arête de l'outil de coupe.  
 $\vec{V}$  - Vecteur du sens de coupe.  
 $\vec{f}$  - Vecteur du sens d'avance.  
Pb - Plan de base, surface d'appui de l'outil.  
Pr - Plan de référence.  
Pf - Plan de travail conventionnel.  
Ps - Plan d'arête principale de l'outil.  
 $\gamma$  - Angle de coupe orthogonal (degré)  
 $\beta$  - Angle de taillant orthogonal (degré)  
 $\alpha$  - Angle de dépouille orthogonal (degré)  
 $K_r$  - Angle de direction d'arête (degré)  
 $\epsilon_r$  - Angle de bec (degré)  
 $\lambda$  - Angle d'inclinaison d'arête (degré)  
 $V_c$  - Vitesse de coupe (m/min)  
D - Diamètre de la pièce à usiner en (mm)  
n - Vitesse de rotation en (tr/min)  
 $\pi$  - Constante  
 $\omega$  - Période (s)  
f - Fréquence (Hertz)  
K - Constante de la raideur  
m - Masse (kg)  
 $r_e$  - Stries ou sillons dus au passage de l'outil  
l - Longueur de base  
L - Longueur d'évaluation  
 $R_a$  - Ecart moyen ( $\mu\text{m}$ )  
 $R_{\text{max}}$  - Maximum de la hauteur des irrégularités  
 $R_t$  - Hauteur maximale du profil  
 $R_p$  - Hauteur maximale de saillie  
 $R_g$  - Rugosité théorique de génération  
 $R_0$  - Composante déterministe de rugosité  
 $\delta R$  - Composante aléatoire de rugosité  
 $\Delta R$  - Variation de rugosité  
 $R_M$  - Valeur maximale  
 $R_m$  - Valeur minimale  
 $\sigma$  - Ecart type  
 $[-t\sigma; +t\sigma]$  - Intervalle de confiance  
t - Variable de la répartition de STUDENT  
 $\tau$  - Temps de coupe  
c, m - Constantes dépend des conditions de coupe  
 $R_{ac}$  - Rugosité moyenne calculée  
 $W_r(t_i)$  - Déplacement résultant au temps  $t_i$ .  
 $W_{rm}$  - Déplacement résultant moyen.  
 $W_m$  - Déplacement moyen tangentiel.

$V_m$  - Déplacement moyen radial.  
 $U_m$  - Déplacement moyen axial.  
 $R_{am}$  - Rugosité moyenne mesurée  
 $n$  - Nombre des essais  
 $F_c$  - Effort de coupe  
 $K_a$  - Raideur de l'outil calculé analytiquement  
 $a$  - Accélération vibratoire ( $m/s^2$ )  
 $d$  - Déplacement (m)  
 $V_{eff}, V_{RMS}$  - Valeur efficace ou Valeur RMS  
 $x(n)$  - Signal temporel mesuré  
 $N_e$  - Nombre d'échantillons  
 $M_4$  - Moments statistiques d'ordre 4  
 $M_2$  - Moments statistiques d'ordre 2  
 $\bar{x}$  - Valeur moyenne des amplitudes  
 $X(f)$  - Transformée de Fourier  
 $t$  - Variable temps (s)  
 $X(k\Delta f)$  - Transformée de Fourier discrète rapide  
 $t_e$  - Période d'échantillonnage  
 $n$  - Numéro de l'échantillon  
 $k$  - Numéro de la ligne fréquentielle  
 $\Delta f$  - Intervalle entre deux raies fréquentielles  
 $DSP(f)$  - Densité spectrale de puissance  
 $DSP_p(f)$  - Densité spectrale de puissance pondérée  
 $x(k)$  - Signal discret à analyser  
 $f(k)$  - Fenêtre de pondération  
 $C[s(t)]$  - Cepstre de signal  $s(t)$   
 $VB_m$  - Usure en dépouille mesurée  
 $VB_p$  - Usure en dépouille prédite  
 $R_{0.02}$  - Limite élastique conventionnelle  
 $R_m$  - Contrainte maximale  
 $A\%$  - Allongement à la rupture  
 $a$  - Vitesse d'avance (mm/tr)  
 $p$  - Profondeur de passe (mm)  
 $Y$  - Réponse (rugosité et l'accélération)  
 $a_1, a_2, \dots, a_8$  - Coefficients du modèle  
 $X_{2,3}, X_{3,4}, X_{2,4}, X_{2,3,4}$  - Interactions des paramètres de coupe  
 $X_2$  - Vitesse de coupe  
 $X_3$  - Avance.  
 $X_4$  - Profondeur de passe  
 $[Y]$  - Matrice colonne de rugosité et de l'accélération  
 $[X]$  - Matrice d'expérience  
 $[a]$  - Matrice colonne des coefficients  
 $R^2$  - Coefficient de corrélation multiple  
 $SCE$  - Somme des carrés expliqués  
 $SCT$  - Somme des carrés totaux  
 $SCR$  - Somme des carrés résiduels

# TABLE DES FIGURES

- I.1 Opération de tournage
- I.2 Éléments de l'outil
- I.3 Éléments de référence
- I.4 Angles d'arête
- I.5 Procès de coupe
- I.6 Paramètres de coupe
  
- II.1 Ordre 1
- II.2 Ordre 2
- II.3 Ordre 3
- II.4 Ordre 4
- II.5 Longueur de base, d'évaluation
- II.6 Ligne moyenne arithmétique
- II.7 Ligne enveloppe supérieure et inférieure
- II.8 Ecart moyen
- II.9  $(R_{max}) ; (R_t) ; (R_p)$
- II.10 Variation de la rugosité
- II.11 Surfaces à modéliser
- II.12 Opération de rainurage avec un robot Tricept
- II.13 Défauts quantifiés pour un effort de 705 N
- II.14 Défauts quantifiés pour un effort de 2000 N
- II.15 Influence de la profondeur de passe sur la composante tangentielle de l'effort de coupe en fonction du temps.
- II.16 Influence de la profondeur de passe sur la composante axiale de l'effort de coupe en fonction du temps.
- II.17 Influence de la profondeur de passe sur la composante radiale de l'effort de coupe en fonction du temps.
- II.18 Profil de rugosité mesuré au début de la longueur usinée
- II.19 Profil de rugosité mesuré à la fin de la longueur usinée
- II.20 Le déplacement résultant pour  $p=1$  mm,  $f= 0.08$  mm/tr et  $n=355$  tr/min.
  
- III.1 Définition d'une vibration
- III.2 Vibrations périodiques
- III.3 Vibrations transitoires
- III.4 Vibrations aléatoires
- III.5 Capteur de mesure vibratoire
- III.6 Types de maintenance
- III.7 Capteur de vibration
- III.8 Evolution de la mesure globale prise sur le palier d'un moteur
- III.9 Densité spectrale de puissance



- III.10 Spectre enveloppe 0-100 KHz
- III.11 Déroulement d'une analyse vibratoire
- III.12 Système de diagnostic
- III.13 Résultats régime 4
- III.14 Simulation d'usinage et d'usure
- III.15 Usure par rapport au temps
- III.16 Usure par rapport à la vitesse de coupe
- III.17 Système de surveillance proposé de l'usure des outils de coupe
- III.18 Perceptron multicouches de type 6-7-1 utilisé pour le système de surveillance
- III.19 Usure mesurée VBm en fonction de l'usure prédite VBp (phase d'apprentissage)
- III.20 Usure mesurée VBm en fonction de l'usure prédite VBp (phase de test)
- III.21 Schéma de la chaîne d'acquisition
- III.22 Images issues d'un profilomètre optique : a) Plaquette neuve, b) Plaquette usée
- III.23 Evolution moyenne de la largeur de l'usure en dépouille en fonction de passes d'usinage pour les quatre groupes de plaquettes
- III.24 Concaténation des signaux sur toute la vie d'une plaquette de coupe
- III.25 Les spectrogrammes types obtenus pour : a) Essai 1, b) Essai 6 et c) Essai 11
- III.26 Les scalogrammes types obtenus pour : a) Essai 1, b) Essai 6 et c) Essai 11
- III.27 Allure de la réponse vibratoire
- III.28 Evolution de la variance en fonction des essais
- III.29 Evolution du Kurtosis en fonction des essais
- III.30 Evolution de Skewness en fonction des essais
- III.31 Évolution de la moyenne du signal en fonction des essais
- III.32 Allure type de l'évolution des spectres en fonction de l'accroissement de l'usure

- IV.1 Génération de vibrations
- IV.2 Schéma de diagnostic vibratoire
- IV.3 Accéléromètre AS-065
- IV.4 Module d'alimentation
- IV.5 Schéma électrique du module d'alimentation

## V.1 Approche statistique

- VI.1 (a) - Spectre 1
- VI.1 (b) - FFT 1
- VI.2 (a) - Spectre 2
- VI.2 (b) - FFT 2
- VI.3 (a) - Spectre 3
- VI.3 (b) - FFT 3
- VI.4 (a) - Spectre 4
- VI.4 (b) - FFT 4
- VI.5 (a) - Spectre 5
- VI.5 (b) - FFT 5
- VI.6 (a) - Spectre 6
- VI.6 (b) - FFT 6

- VI.7 (a) - Spectre 7
- VI.7 (b) - FFT 7
- VI.8 (a) - Spectre 8
- VI.8 (b) - FFT 8
- VI.9 Diagramme de Pareto (rugosité)
- VI.10 Diagramme de Pareto (accélération vibratoire)
- VI.11 Fonction de rugosité et accélération
- VI.12 Spectre reconstitué avec  $A = 143 \text{ mm/s}^2$
- VI.13 FFT du signal reconstitué

# LISTE DES TABLEAUX

II.1 Résultats récapitulatifs des essais pour  $f = 0.08$  mm/tr et  $N = 355$  tr/min.

III.1 Résultats du KPPV

IV.1 Pourcentage en masse des éléments d'additions

IV.2 Propriétés mécaniques

IV.3 Composition chimique de la plaquette P10

IV.4 Mode d'élaboration de la plaquette P10

IV.5 Analyse chimique de la plaquette P10

IV.6 Caractéristiques technique de la plaquette P10

IV.7 Données technique

IV.8 Propriétés de la machine outil

V.1 Matrice du plan factoriel complet  $2^3$

V.2 Valeurs de rugosité moyenne initiale

V.3 Valeurs de conditions de coupe

V.4 Matrice d'expérience

V.5 Valeurs de réponses

VI.1 Régime 1

VI.2 Régime 2

VI.3 Régime 3

VI.4 Régime 4

VI.5 Régime 5

VI.6 Régime 6

VI.7 Régime 7

VI.8 Régime 8

VI.9 Résultats des moindres carrés (rugosité et accélération)

# Introduction

A ce jour, l'enlèvement de matière par outil coupant occupe toujours une place prédominante parmi les procédés des mises en forme des matériaux. L'accroissement des performances des machines outils, des outils de coupe et des logiciels de CFAO a œuvré à garder ce procédé compétitif grâce aux gains de productivité et de qualité. D'innombrables travaux ont été menés dans ce sens et les remarquables avancées dans les matériaux. Les revêtements des outils coupants et les lubrifiants ont permis d'accroître considérablement les vitesses de coupe tout en améliorant la qualité de la surface usinée.

Cependant, l'utilisation rationnelle de cette technologie est encore fortement pénalisée par les lacunes dans la connaissance de la coupe, que ce soit au niveau mésoscopique où l'interaction fine entre l'outil et la pièce est étudiée (thermomécanique de la coupe, formation du copeau), aussi bien qu'au niveau macroscopique où l'étude porte plus sur la stabilité du procédé. Si bien que la coupe garde encore une grande part de mystère et exige de l'utilisateur un bon niveau de savoir faire et parfois d'empirisme pour exploiter au mieux les capacités des moyens de production. Aussi d'énormes efforts restent à réaliser dans le domaine de la surveillance du procédé de coupe et dans les méthodes de diagnostic de ses différents indicateurs de performance. [1]

Parmi les principales difficultés rencontrées, celles posées par les phénomènes vibratoires générés par la coupe occupent une place importante. Nous pouvons citer en premier le phénomène bien connu de broutement, dont les conditions d'apparition sont difficilement prévisibles et qui dégrade fortement la qualité de la surface usinée et accélère l'usure de certains éléments sensibles des moyens de production comme les outils de coupe ou les broches.

Néanmoins, dans le processus d'enlèvement de matière sur machines-outils l'apparition de vibrations est inévitable. Dès que l'amplitude dépasse les limites de la précision dimensionnelle et selon la forme des surfaces génératrices, le phénomène vibratoire est préjudiciable.

## 1. Usinage

### 1.1. Introduction

L'usinage par enlèvement de matière est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Leur principe est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

L'usinage a un coût : temps de travail, surépaisseur de matière à enlever, usure de la machine outil, consommables (outil, lubrifiant, courant électrique), coût du stock (la pièce en cours de fabrication est une dépense qui ne sera compensée qu'au moment de la vente, elle nécessite une surface supplémentaire d'atelier pour le stockage et le cheminement). On ne pratique donc que les usinages nécessaires. [2]

**1.1. a. Définition de l'usinage :** Le procédé d'usinage par enlèvement de copeaux se fait par action mécanique d'un outil coupant. La force appliquée induit la formation, d'un ou plusieurs copeaux. L'outil va mettre en forme la pièce usinée par passes successives. Cette opération d'usinage est réalisée sur une machine outil. [3]

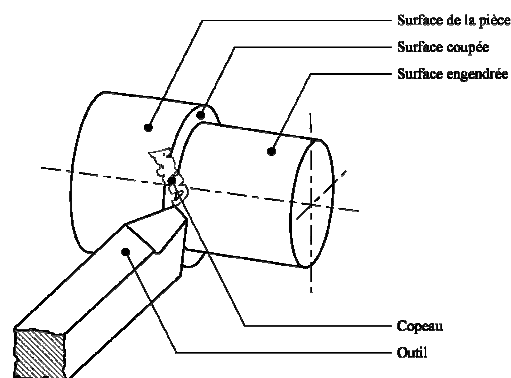
**1.1. b. Définition du tournage :** Le but du tournage est de réaliser des formes de révolution tels que cylindres, cônes, tores et autres formes de révolution complexes.

Le tournage est une technique de coupe un peu particulière dans le domaine de l'usinage car c'est la seule pour laquelle on a à la fois :

- une pièce mobile
- un outil à dent unique
- une coupe continue (la matière défile en continu sur la face de coupe de l'outil)

Ces spécificités font que cette technique, très simple, est la plus utilisée et la mieux indiquée pour les axes de recherche liés à la coupe : paramètres, critères de performance, outils, matériaux, durée de vie des outils,...etc.

Le principe du tournage est le suivant : la pièce est solidaire d'une broche tournante (donc elle tourne) et l'outil se déplace dans un plan. La trajectoire de l'outil dans son plan d'évolution donne la génératrice de la pièce de révolution. [4]



**Figure I.1 : Opération de tournage**

## 1.2. Outils de coupe

La conception des outils coupants est directement liée au matériau usiné, au type et la nature de l'opération (ébauche, finition). [5]

Les outils de coupe permettent d'enlever le copeau. La géométrie de l'outil influe directement sur les formes usinables de la pièce. [6]

### 1.2.1. Géométrie de l'outil de coupe

#### 1.2.2.1. Éléments de l'outil : Un outil de coupe comprend

- une partie active : partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps.
- un corps ou queue de l'outil : nécessaire à la mise en position et le maintien de l'outil sur le porte-outil.

La figure ci-dessous représente les éléments de l'outil de tournage

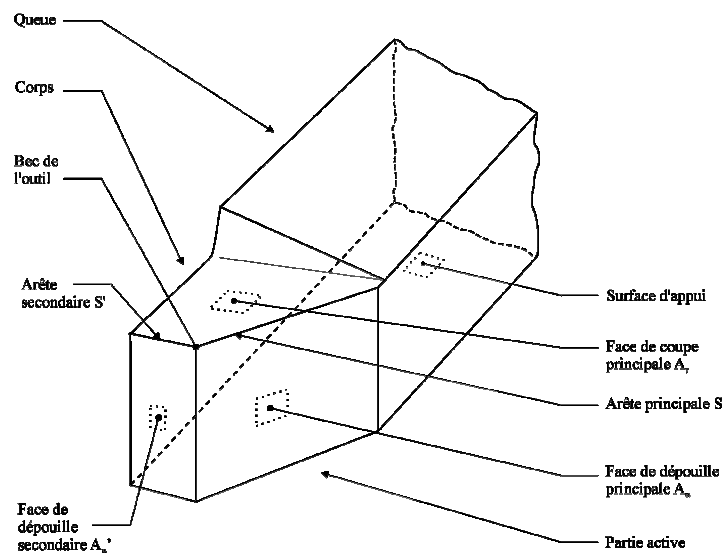
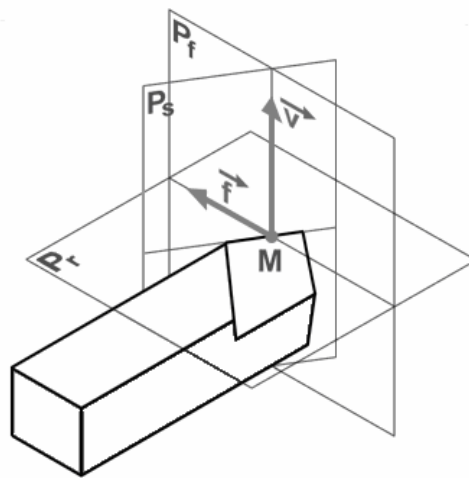


Figure I.2 : Éléments de l'outil

**1.2.2.2. Angles de l'outil :** Les angles d'arête de l'outil se définissent après avoir situé et repéré les éléments de référence suivants [7] :

- M : point considéré de l'arête.
- $\vec{V}$  : vecteur supposé du sens de coupe.
- $\vec{f}$  : vecteur supposé du sens d'avance.
- Pb : plan de base, surface d'appui de l'outil.
- Pr : plan de référence parallèle à Pb et contenant M et f.
- Pf : plan de travail conventionnel perpendiculaire à Pr et contenant M, V, f.
- Ps : plan d'arête principale de l'outil perpendiculaire à Pr et tangent à l'arête en M.



**Figure I.3 : Eléments de référence**

Après avoir étudié les éléments de référence, on peut définir les différents angles de l'outil coupant qui sont :

- **Angle de coupe orthogonal ( $\gamma$ ) :** il est mesuré entre le plan de référence (Pr) et la face de coupe, sa principale influence est la formation et le dégagement du copeau.
- **Angle de taillant orthogonal ( $\beta$ ) :** il est mesuré entre la face de coupe et la face de dépouille, sa principale influence est la résistance de la partie active de l'outil.
- **Angle de dépouille orthogonal ( $\alpha$ ) :** il est mesuré entre le plan d'arête principale de l'outil (Ps) et la face de dépouille, sa principale influence est d'éviter le frottement de l'outil sur les surfaces usinées.
- **Angle de direction d'arête ( $K_r$ ) :** il est mesuré entre le plan d'arête principale de l'outil (Ps) et le plan de travail conventionnel (Pf) dans le plan de référence (Pr).
- **Angle de bec ( $\epsilon_r$ ) :** il est mesuré entre le plan d'arête principale de l'outil (Ps) et le plan d'arête secondaire (Ps') dans le plan de référence (Pr).
- **Angle d'inclinaison d'arête ( $\lambda$ ) :** il est mesuré entre l'arête de coupe et le plan de référence (Pr). [7]

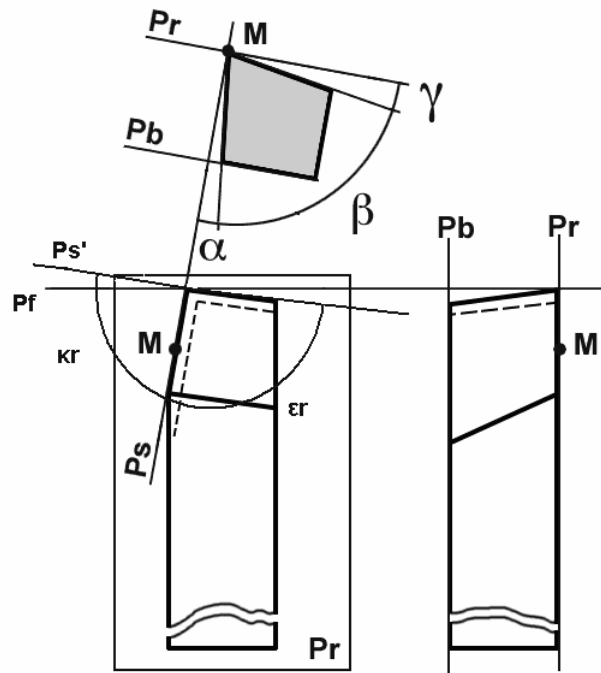


Figure I.4 : angles d'arête

**1.2.3. Matériaux d'outils :** La sélection d'un outil de coupe ne peut pas être faite de manière absolue en choisissant le meilleur outil disponible, car cet outil n'existe malheureusement pas. Il faut effectuer la sélection selon plusieurs critères dont les coûts d'usinage, le type d'opération, la géométrie et le matériau de la pièce à usiner, la rigidité du montage, le fini de surface requis, la machine-outil utilisée ainsi que le type de parcours programmé. [8]

Jusqu'à nos jours, les matériaux d'outils utilisés essentiellement sont les aciers rapides, les carbures, les céramiques et le CBN.

**1.2.3. 1. Les aciers rapides :** sont des aciers fortement alliés, ils possèdent une très grande ténacité et une dureté très élevée, grâce à de fortes teneurs en éléments carburigènes (tungstène, molybdène, vanadium et chrome) [7]. Ils offrent des arêtes très tranchantes, ce qui permet la réalisation d'usinage sans bavures. Les aciers rapides présentent également l'avantage d'avoir une haute limite élastique ainsi qu'une résistance à la rupture et à la fatigue élevée. Pour améliorer leur dureté à chaud, le cobalt peut être également ajouté (5 à 10 %).

**1.2.3.2. Les carbures cémentés :** le carbure cémenté est un produit de la métallurgie des poudres. Il est constitué de particules dures et résistantes à l'usure appelées carbures et agglomérées au moyen d'un liant métallique. Ces particules sont principalement des carbures de tungstène, de titane, de tantale et de niobium, liées en général avec du cobalt.



Le carbure cémenté à base de carbure de tungstène (WC) est, sans conteste, le matériau d'outils de coupe le plus versatile. Il présente une dureté à chaud qui lui permet d'être utilisé à des températures avoisinant les 1200°C. Sa ténacité et sa dureté peuvent être modifiées selon sa composition et il présente une rigidité élevée.

L'ajout de carbure additionnel (TiC, TaC, NbC) permet de diminuer l'usure en cratère qui survient lors de l'usinage de l'acier avec des outils en WC-Co. Il est donc important de choisir le bon carbure pour le matériau utilisé afin d'obtenir une durée de vie acceptable de l'outil. [8]

**1.2.3.3. Les cermets :** Le nom cermet provient de (céramique / métal) car il s'agit d'un matériau constitué de particules de céramiques (les carbures de titane) dans un liant métallique qui est le cobalt. Comparativement aux carbures cémentés, les cermets possèdent une ténacité faible, ce qui les rend particulièrement sensibles aux chocs mécaniques et thermiques. Les cermets présentent une plus grande dureté à chaud que les carbures, donc une résistance plus élevée aux fortes températures, ce qui permet souvent d'augmenter les vitesses de coupe, d'obtenir une meilleure durée de vie, ainsi que la génération d'un fini de surface de qualité plus élevée.

**1.2.3.4. Les céramiques :** les céramiques sont principalement composées d'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$  (même matériau que le papier à poncer) ou de nitrure de silice ( $Si_3N_4$ ). Les outils en céramique offrent une dureté à chaud très élevée, ils peuvent être utilisés à des vitesses de coupe très élevées. Leurs ténacités sont très faibles, inférieures à celles des cermets, ils sont extrêmement sensibles aux conditions d'entrée dans la matière, ce qui exige de préparer la géométrie de la pièce afin d'assurer une entrée en matière graduelle, ce qui augmente les coûts. Ils sont donc principalement utilisés en tournage et pour des productions importantes.

**1.2.3.5. Les nitrures de bore cubique (CBN) :** le CBN possède une dureté extrêmement élevée, dépassée seulement par le diamant. Sa dureté à chaud est excellente et il peut être utilisé jusqu'à 2000°C, il possède une excellente résistance à l'usure par abrasion et est relativement fragile, mais toutefois moins que les céramiques. [9]

**1.2.3.6. Diamant polycristallin (PCD) :** Le PCD est un diamant synthétique qui possède une dureté qui approche celle du diamant naturel. Ce matériau est très dispendieux et ses applications sont limitées à l'usinage des matériaux non ferreux, le PCD possède une faible dureté à chaud, limitée à 600°C.

### 1.3. Paramètres de coupe

Les paramètres de coupe sont, d'une part, des valeurs qui caractérisent les déplacements de l'outil et de la pièce usinée (paramètres de coupe cinématiques) et, d'autre part, les valeurs des surépaisseurs d'usinage et des dimensions de coupe (paramètres de coupe géométriques). Les conditions de coupe sont une notion plus large qui inclut les paramètres géométriques et cinématiques de coupe en plus d'autres facteurs qui influencent l'usinage tels que le matériau usiné, le matériau et la géométrie de l'outil, le type de machine, la puissance de la machine et le type de l'opération.

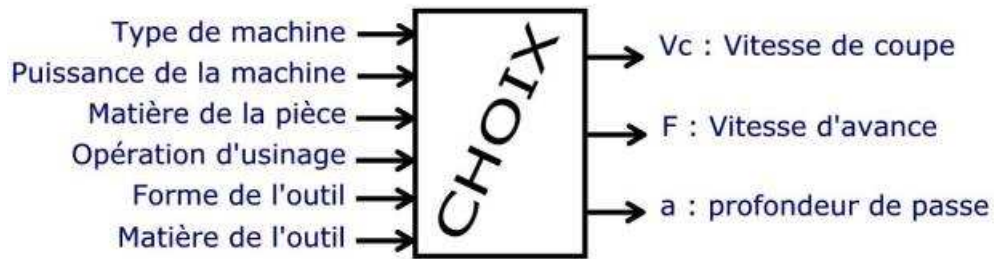


Figure I.5 : procès de coupe

**1.3.1. Vitesse de coupe :** dans le cas du tournage, la vitesse de coupe constitue la grandeur cinématique de base du couple outil / pièce, elle correspond au déplacement (en mètres) effectué par un point de la pièce pendant une minute.

La formule de calcul de la vitesse de coupe est donnée par la relation suivante :

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \text{ [m/min]}$$

D : diamètre de la pièce à usiner en (mm)

n : vitesse de rotation en (tr/min)

**1.3.2. Vitesse d'avance :** est la vitesse de déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage. C'est cette trajectoire qu'il faut suivre afin que l'outil usine la forme souhaitée. Elle est exprimée en [mm/min].

**1.3.3. Profondeur de passe :** la profondeur de passe est le volume de la matière enlevée qui dépend de l'engagement de l'outil dans la pièce. Elle est exprimée en [mm].

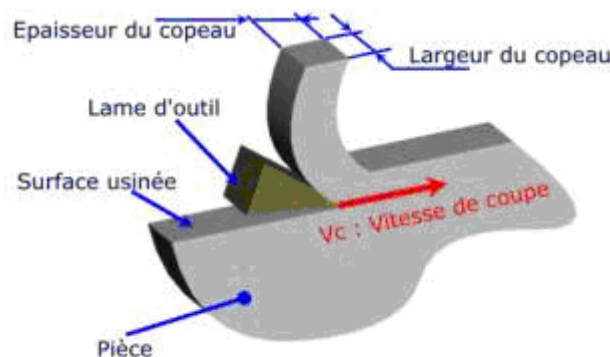


Figure I.6 : Paramètres de coupe

**1.4. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons rappelé les grands principes de l'usinage et particulièrement le tournage, avec ses outils et les matériaux d'outils.

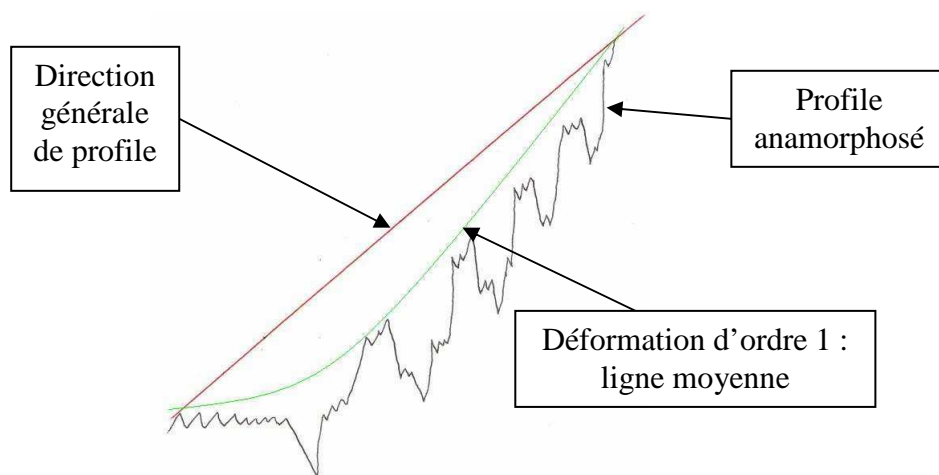
## 2. Rugosité de surface

**2.1. Introduction :** La rugosité des surfaces des pièces usinées par tournage joue un très grand rôle sur la qualité du produit fini. Notre étude consiste à développer des modèles basés sur des expériences pour la prédiction de la rugosité. Beaucoup de paramètres influent sur la rugosité d'une façon directe ou indirecte, tels que les paramètres du régime de coupe (l'avance par tour, la vitesse de rotation, la profondeur de passe) et les efforts de coupe générés aux contacts outil - pièce. L'influence des vibrations sur le processus de coupe et leur utilisation dans la prédiction des états de surface est le principal objet de notre étude.

**2.2. Définition :** la rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique [2]. Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, à la rigidité du montage et de la machine, à la formation des copeaux, aux efforts de coupe,...etc. On sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur le fonctionnement et la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions : guidage, étanchéité,...etc. Plus la qualité d'une surface est proche de la perfection, plus elle est difficile à obtenir et plus son coût est élevé. Des surfaces inutilement précises causent des pertes économiques qui peuvent être considérables. [11]

**2.3. Défauts de surface :** Pour caractériser l'état de surface, il existe 4 ordres [11] :

**2.3.1. Ordre 1 :** écart de forme ou de position (ligne moyenne), il est représenté par la ligne moyenne.



**Figure II.1 : Ordre 1**

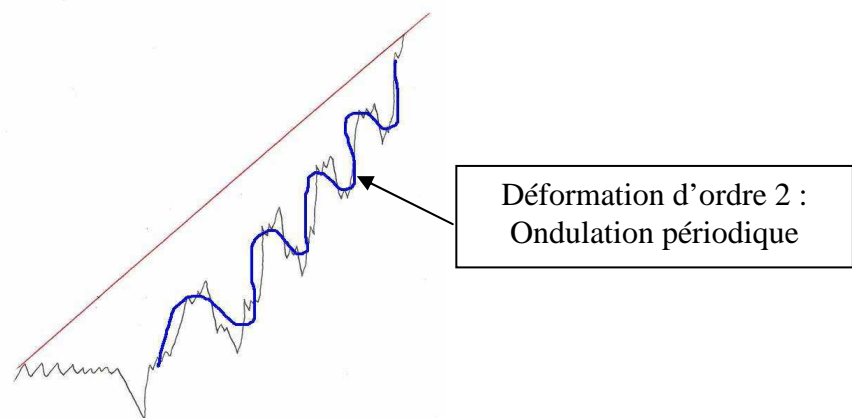
Les différents types de défauts représentés par l'ordre 1 sont :

- Les défauts de planéité.
- Les défauts de rectitude.
- Les défauts de circularité.

Les causes de ces défauts sont :

- La déformation de la pièce avant usinage dans son système d'ablocage
- La déformation de la pièce au cours de l'usinage due à l'effort exercé par l'outil sur la pièce ou due à la mauvaise inclinaison de l'outil.
- La déformation de la pièce après démontage (contraintes internes (ex : température))
- La déformation de l'outil machine due à l'action de la pièce sur l'outil.
- Les défauts au niveau des guidages.

**2.3.2. Ordre 2** : ondulations périodiques ; l'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 1.



**Figure II.2 : Ordre 2**

Les causes de ces défauts sont :

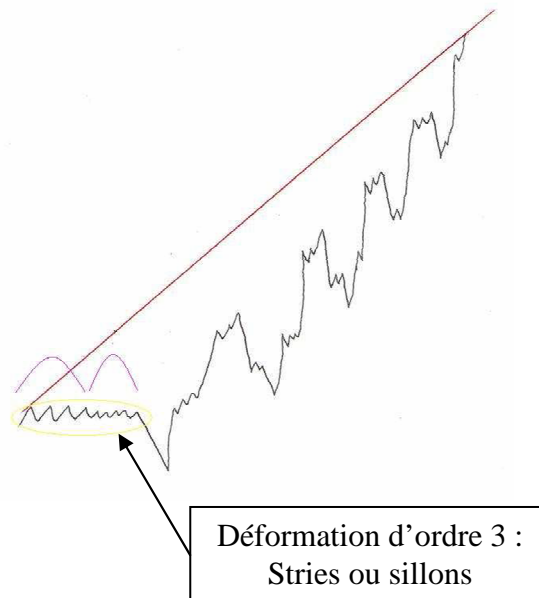
- Les phénomènes vibratoires basse fréquence :

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{II-1})$$

Ces phénomènes se traduisent par un manque de rigidité au niveau de :

- La pièce, dû à un mauvais équilibrage du montage sur le porte pièce.
- L'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple.
- La machine.

### 2.3.3. Ordre 3 : stries ou sillons :



**Figure II.3 : Ordre 3**

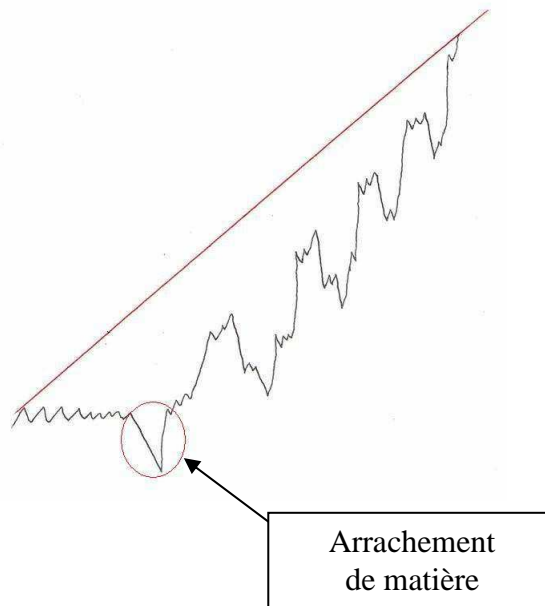
L'influence de ces défauts a lieu au niveau de :

- L'étanchéité : Statique (pas de mouvement entre les pièces).  
Dynamique (mouvement entre deux pièces).
- Les frottements fluides.
- Les problèmes de revêtement (peinture...).

Les causes de ces défauts sont :

- Les phénomènes vibratoires haute fréquence.
- Les stries ou sillons dus au passage de l'outil ( $r_\epsilon$ ).

**2.3.4. Ordre 4** : arrachement de matière ; l'influence de ces défauts est le même que pour l'ordre 3.



**Figure II.4 : Ordre 4**

Les causes de ces défauts sont :

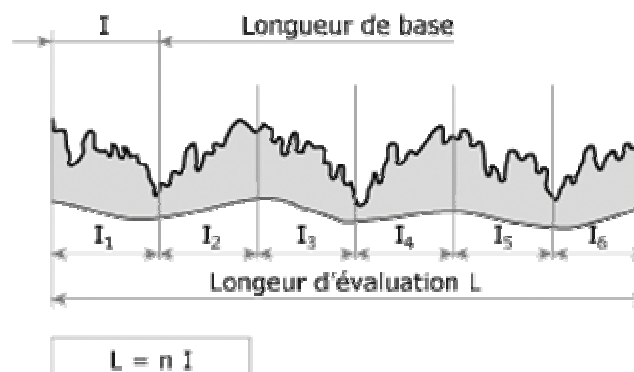
- le mauvais affûtage de l'outil.
- chocs de l'outil sur la pièce (au montage par exemple).
- empreintes du système de serrage.

## 2.4. Définition des différents types de lignes

### 2.4.1. Longueur de base, d'évaluation

La longueur de base est définie par l'outil de mesure (notée  $l$ )

La longueur d'évaluation est la longueur totale à mesurer (notée  $L$ )



**Figure II.5 : Longueur de base, d'évaluation**

### 2.4.2. Lignes de référence

Ce sont les lignes à partir desquelles les paramètres du profil sont déterminés.

- Les lignes moyennes : moyenne arithmétique, moyenne des moindres carrés.
- Les lignes enveloppes : enveloppe supérieure, enveloppe inférieure.

**2.4.2.1. La ligne moyenne arithmétique :** C'est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (L), la somme des aires entre elle et le profil soit égale de part et d'autre.

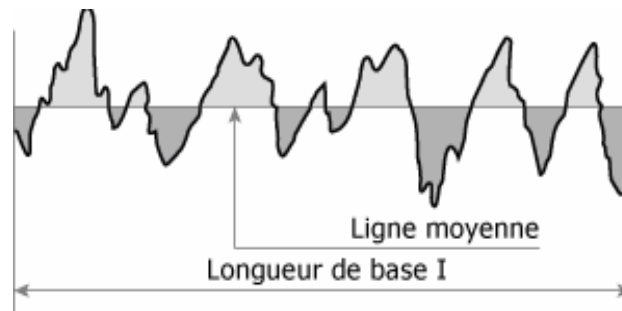


Figure II.6 : Ligne moyenne arithmétique

**2.4.2.2. La ligne des moindres carrés :** est la ligne de référence qui a la forme du profil géométrique et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (L), la somme des carrés des écarts entre elle et le profil soit minimale de part et d'autre.

**2.4.2.3. La ligne enveloppe supérieure :** est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus hauts des saillies locales du profil.

**2.4.2.4. La ligne enveloppe inférieure :** est la somme des segments de droite qui joignent les points les plus bas des creux locaux du profil.

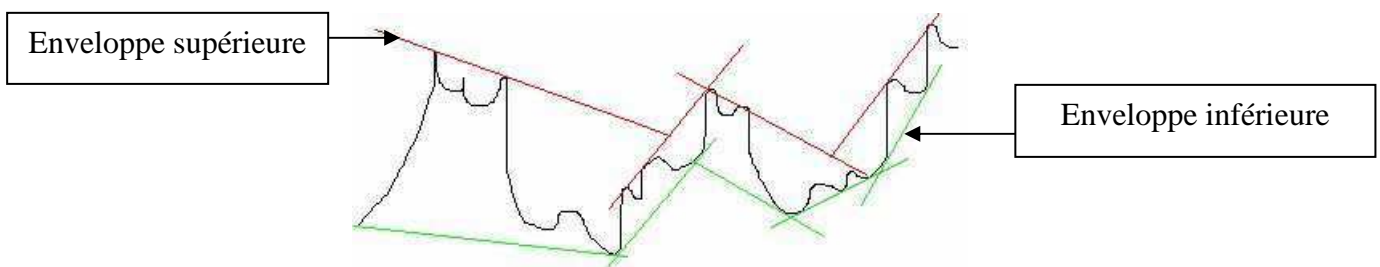
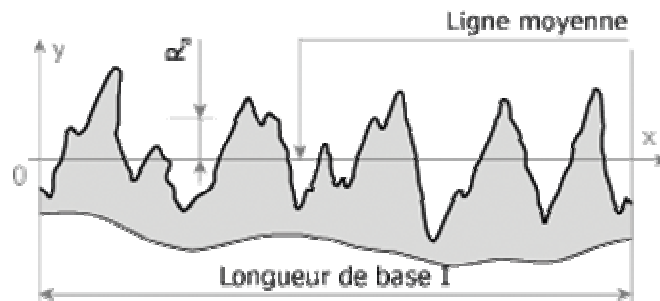


Figure II.7 : Ligne enveloppe supérieure et inférieure



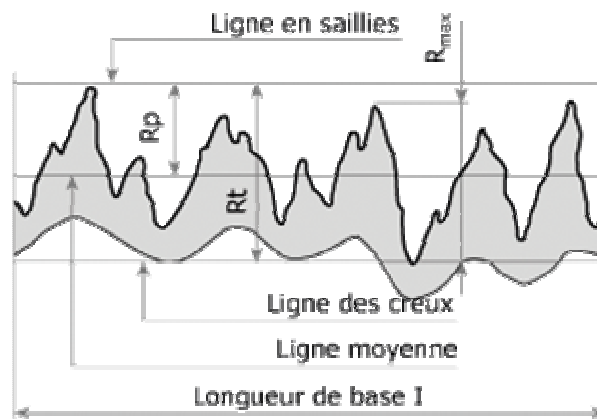
**2.5. Critères de rugosité [13] :** un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité.

- Ecart moyen ( $R_a$ ) : c'est le critère le plus utilisé, ( $R_a$ ) est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts entre les pics et les creux. Elle est exprimée en micromètre ( $\mu\text{m}$ )



**Figure II.8 : Ecart moyen**

- Maximum de la hauteur des irrégularités ( $R_{\text{max}}$ )
- Hauteur maximale du profil ( $R_t$ )
- Hauteur maximale de saillie ( $R_p$ )



**Figure II.9 : ( $R_{\text{max}}$ ) ; ( $R_t$ ) ; ( $R_p$ )**

## 2.6. Modélisation des états de surfaces usinées :

### 2.6.1. Modèle mathématique de la rugosité des surfaces usinées par enlèvement de matière [14] :

Si les usinages des pièces étaient obtenus avec des systèmes technologiques idéaux (dans lesquels il n'existe pas d'erreurs d'usinage), la rugosité des surfaces serait déterminée par les paramètres géométriques de l'outil et les paramètres cinématiques du processus de génération. Cette hypothèse appliquée au profil de la pièce usinée met en évidence la rugosité théorique de génération ( $R_g$ ).

Mais les usinages ont lieu dans les systèmes technologiques réels, qui font inévitablement intervenir des erreurs d'usinage et la rugosité obtenue diffère de la rugosité théorique.

#### 2.6.1.1. Caractère réel de la rugosité obtenue

On peut considérer que la rugosité  $R$  des surfaces usinées par enlèvement de matière ( $R_a, R_z, R_t$ ) a un caractère stochastique, sa loi de variation présente deux composantes :

- Une composante déterministe :  $R_0 = R_g + \Delta R$  (II-2)

- Une composante aléatoire :  $\delta R$

$$R = R_0 + \delta R \quad (\text{II-3})$$

La composante déterministe  $R_0$  de la fonction  $R$  est connue ou déterminée par l'expérimentation. Elle est le résultat de l'influence des facteurs systématiques qui se manifestent pendant le processus d'usinage.

#### 2.6.1.2. Valeurs extrêmes de la fonction

La valeur maximale ( $R_M$ ) et respectivement la valeur minimale ( $R_m$ ) sont, à priori, imposées comme des limites de rugosité sur le dessin de définition de la pièce.

La variable aléatoire  $\delta R$ , engendrée par des erreurs aléatoires d'usinage, présente une répartition d'après la loi normale (Laplace Gauss). Cette répartition est centrée, de moyenne arithmétique nulle ( $\mu = 0$ ) et d'écart type  $\sigma$ .

$\delta R$  a un intervalle de confiance  $[-t\sigma; +t\sigma]$  pour une probabilité ( $P$ ), c'est-à-dire :

$$-t\sigma \leq \delta R \leq +t\sigma \quad (\text{II-4})$$

Où  $t$  est la variable de la répartition de STUDENT.

L'intervalle de confiance de la fonction  $R$ , pour un temps de coupe  $\tau$ , (Fig. II.10) est :

$$[R_g + \Delta R - t\sigma ; R_g + \Delta R + t\sigma] \quad (\text{II-5})$$

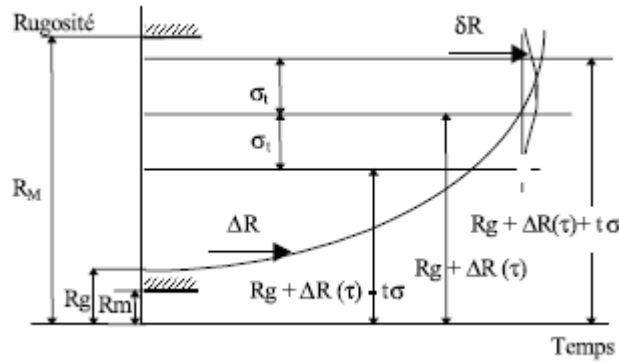


Figure II.10 : Variation de la rugosité.

Où

$$R_g + \Delta R(\tau) - t\sigma \leq R(\tau) \leq R_g + \Delta R(\tau) + t\sigma \quad (II-6)$$

D'après (II-3) on peut écrire :

$$R_0(\tau) - t\sigma \leq R(\tau) \leq R_0(\tau) + t\sigma \quad (II-7)$$

La relation précédente doit être satisfaite pour les valeurs extrêmes de la fonction R, (Fig. II 10). Ainsi on a les restrictions générales suivantes :

$$R_m \leq R_0(\tau) - t\sigma \leq R(\tau) \leq R_0(\tau) + t\sigma \leq R_M \quad (II-8)$$

La fonction  $R_0$  est en général une fonction du temps ayant dans un cycle d'usinage comme valeurs extrémales minimales ( $R_{0m}$ ) et maximales ( $R_{0M}$ ). Pour ne pas dépasser les limites de rugosité imposées, les restrictions (II-8) doivent être satisfaites aussi pour les valeurs extrémales de la fonction  $R_0$  :

$$R_m \leq R_{0m} - t\sigma \leq R \leq R_{0M} + t\sigma \leq R_M \quad (II-9)$$

A la limite, les inégalités (6) deviennent :

$$R_{0m} = R_m + t\sigma \text{ et } R_{0M} = R_M - t\sigma \quad (II-10)$$

Les dernières relations précisent les valeurs extrémales de la fonction  $R_0$  de manière à ne pas dépasser les limites de rugosités imposées (Fig. II 10).

La fonction  $R_0$  dépend des paramètres du régime de coupe et des paramètres géométriques de l'outil coupant ; ainsi, une des relations (II-10) ou les deux peuvent être utilisées pour établir les conditions de coupe assurant la rugosité imposée.

Si par exemple la fonction  $R_0$  est toujours croissante en fonction du temps d'usinage dans l'intervalle  $[R_{0m} ; R_{0M}]$  ; on peut utiliser la première relation de (II-10) pour déterminer les conditions de coupe ; la deuxième relation mise sous la forme (II-11), peut ensuite servir pour déterminer la durée de vie de l'outil en vue de respecter la rugosité imposée.

$$R_0(\tau) = R_M - t\sigma \quad (\text{II-11})$$

### 2.6.1.3. Méthodologie de recherche théorique

Les recherches concernant la rugosité ont mis en évidence que la loi de variation de la rugosité en fonction du temps d'usinage est de type polytropique [8] ; cette loi peut être exprimée par la relation suivante :

$$R = c \tau^m \quad (\text{II-12})$$

$\tau$  : représente le temps de coupe

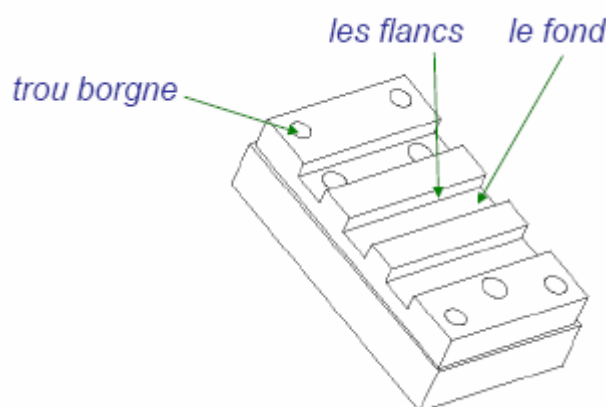
$c$  et  $m$  : sont des constantes qui dépendent des conditions de coupe utilisées lors de l'usinage.

Dans un système d'axe en coordonnées logarithmiques la relation (II-12) représente l'équation d'une droite dont  $m$  est la pente. L'ensemble des résultats est traité par la technique classique des moindres carrés.

On peut citer quelques types de modélisations en fonction de l'opération d'usinage [15] tel que :

- Le rainurage ou deux types de surfaces sont usinées : les flancs et le fond ; les défauts à quantifier dans ce genre d'opération sont le défaut de position et d'orientation de la rainure et le défaut de planéité des surfaces usinées.

- Le perçage : usinage d'un trou borgne, les défauts à quantifier dans ce cas sont la position et l'orientation de l'axe du perçage et le défaut de rectitude de celui-ci.



**Figure II.11 : Surfaces à modéliser**

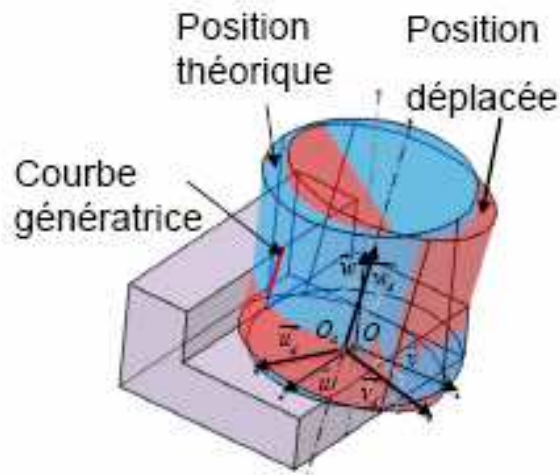


Figure II.12 : Opération de rainurage avec un robot Tricept

Génération des flancs : expression mathématique de la courbe génératrice à chaque instant

$$\overrightarrow{V}(M(\phi, k)) \cdot \overrightarrow{n}(\phi) = 0 \tag{II-13}$$

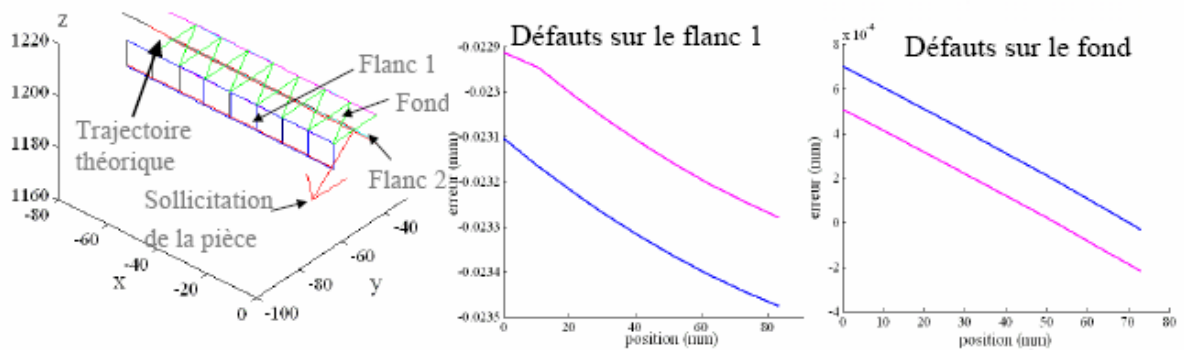


Figure II.13 : Défauts quantifiés pour un effort de 705 N

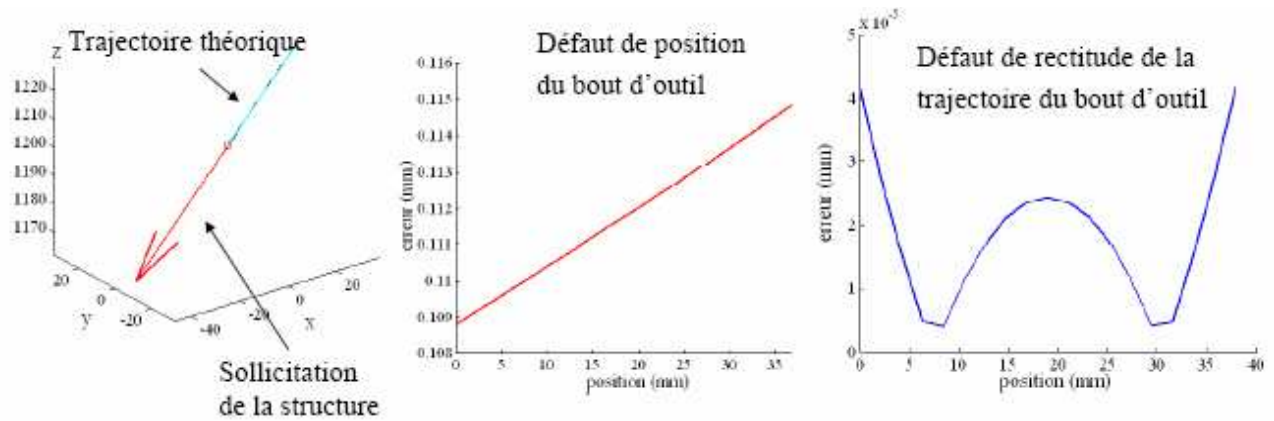


Figure II.14 : Défauts quantifiés pour un effort de 2000 N

## 2.7. Influences des vibrations sur l'état de surface :

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement, du système machine-outil - dispositif – outil - pièce (MODOP) dégradant la qualité de la surface usinée, accélèrent l'usure de l'outil et de la machine et provoquent le dérèglement de la machine et des montages. Un broutement important diminue la productivité et parfois rend même impossible tout travail sur une machine-outil. Il en existe deux types de vibrations qui influent directement sur l'état de surface, les vibrations forcées et les vibrations auto excitées (générées par le processus de la formation du copeau).

### a - Les vibrations forcées :

Ce genre apparaît sous l'effet des perturbations périodiques provoquées par :

- La variation des forces qui s'exercent sur le système, variation due à la coupe intermittente (tournage d'un arbre à rainure longitudinale par exemple) ou à une surépaisseur variable;
- Les forces centrifuges d'inertie due au manque d'équilibre des masses en rotation (ébauche, mandrin, poulies, rotors des moteurs électriques ...);
- Les chocs dus aux vibrations ou à la précision insuffisante des surfaces actives des pièces des organes de transmission (usure des pièces d'un mécanisme, manque de précision des engrenages), aux engagements et aux changements de régime brusques... [16].

**b - Les vibrations auto excitées :**

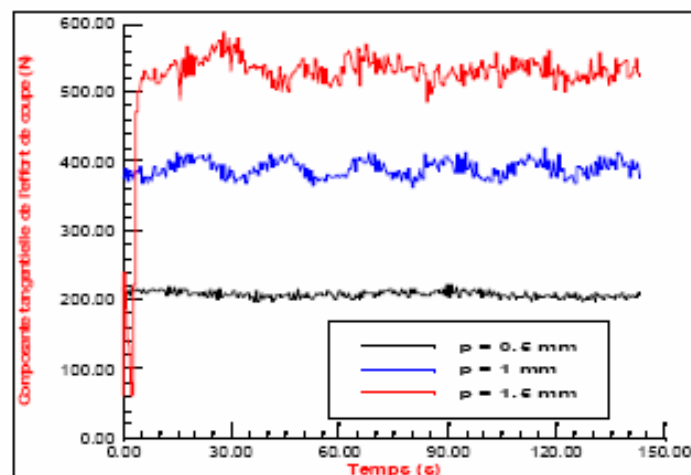
C'est un phénomène plus complexe et bien plus fréquent dans la coupe des métaux que le phénomène des vibrations forcées. Ses causes essentielles sont :

- La variation de la force de frottement du copeau glissant sur l'outil et de l'outil taillant l'ébauche;
- L'écroûissage irrégulier de la couche enlevée suivant son épaisseur;
- Les variations dimensionnelles de l'arête rapportée qui modifient, en cours d'usinage, l'angle de coupe et la surface de la section droite de la tranche cisailée.

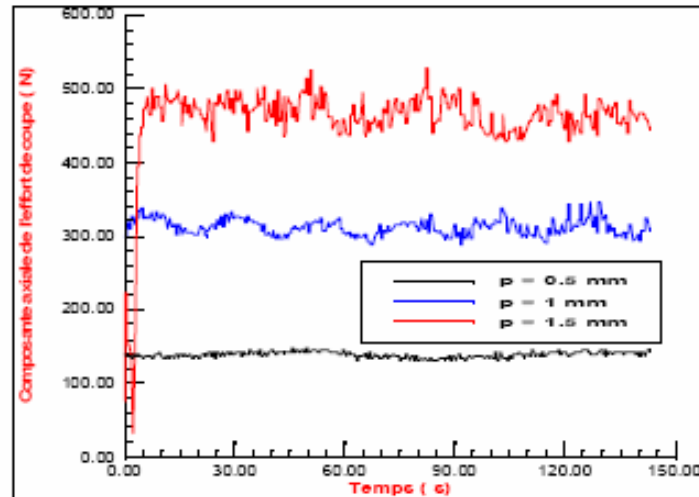
L'intensité des vibrations auto excitées est définie par le métal en oeuvre et ses propriétés mécaniques, les facteurs mécaniques d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil et la raideur du système machine – montage – outil - pièce [16].

**2.8. Estimation de la rugosité moyenne par le comportement vibratoire de l'outil de coupe [17]**

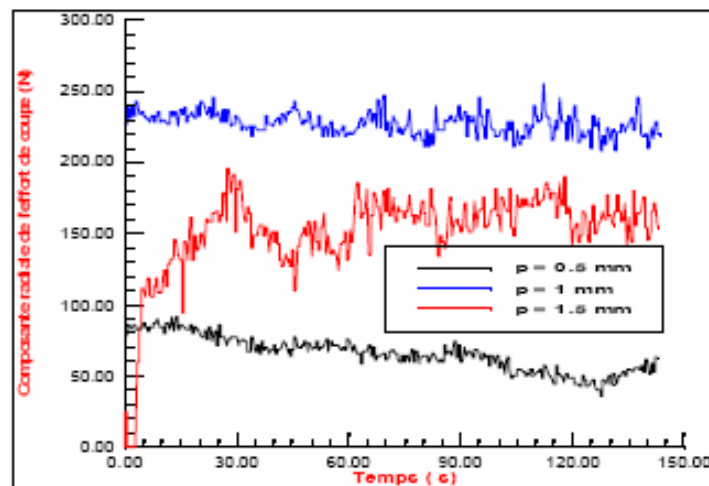
Cette étude, semi expérimentale, a été réalisée pour estimer la rugosité moyenne par le comportement vibratoire de l'outil de coupe lors d'une opération de chariotage. Elle a présenté une modélisation du comportement dynamique de l'outil de tournage. L'outil est modélisé par une poutre d'Euler encastree - libre, excitée par l'effort de coupe à son extrémité libre. Les équations de mouvement de l'outil sont basées sur le principe variationnel d'Hamilton et leurs résolutions s'effectuent par la méthode modale et l'intégrale de Duhamel. Les trois composantes de l'effort de coupe (tangentielle, axial, et radial), déterminées expérimentalement, permettent le calcul des déplacements du bec de l'outil (voir fig.II.15 à II.17).



**Figure II.15 : Influence de la profondeur de passe sur la composante tangentielle de l'effort de coupe en fonction du temps.**



**Figure II.16 : Influence de la profondeur de passe sur la composante axiale de l'effort de coupe en fonction du temps.**



**Figure II.17 : Influence de la profondeur de passe sur la composante radiale de l'effort de coupe en fonction du temps.**



- La comparaison de la rugosité moyenne calculée  $R_{ac}$  et la rugosité mesurée (voir fig. II.15 à II.17) montre une assez bonne concordance.

	$W_m$ $\mu m$	$V_m$ $\mu m$	$U_m$ $\mu m$	$W_{rm}$ $\mu m$	$R_{ac}$ $\mu m$	$R_{am}$ $\mu m$	Erreur en%
<b>Essai1 :</b> p=0.5mm	8.63	5.76	0.0231	10.38	1.77	1.87	5.64
<b>Essai2 :</b> p =1mm	16.12	12.89	0.0777	20.65	2.14	2.27	5.70
<b>Essai3 :</b> p=1.5mm	21.88	19.08	0.0503	29.53	3.44	3.68	6.91

**Tableau II.1 : Résultats récapitulatifs des essais pour  $f = 0.08$  mm/tr et  $N = 355$  tr/min.**

L'erreur ne dépasse pas les 7% dans le pire des cas ( $p=1.5$  mm), ce qui confirme la possibilité d'estimer la rugosité de la pièce usinée à partir du déplacement du bec de l'outil.

Ou :

$$R_{ac} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_r(t_i) - W_{rm}) \quad (\text{II-14})$$

$W_r(t_i)$  : le déplacement résultant au temps  $t_i$ .

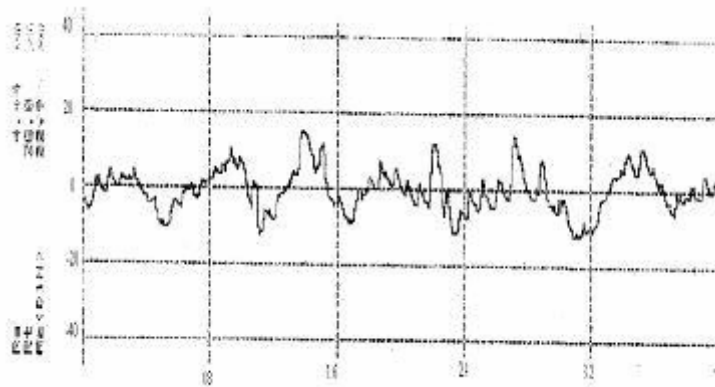
$W_{rm}$  : le déplacement résultant moyen.

$W_m$  : déplacement moyen tangentiel.

$V_m$  : déplacement moyen radial.

$U_m$  : déplacement moyen axial.

$R_{am}$  : rugosité moyenne mesurée



**Figure II.18 : Profil de rugosité mesuré au début de la longueur usinée**

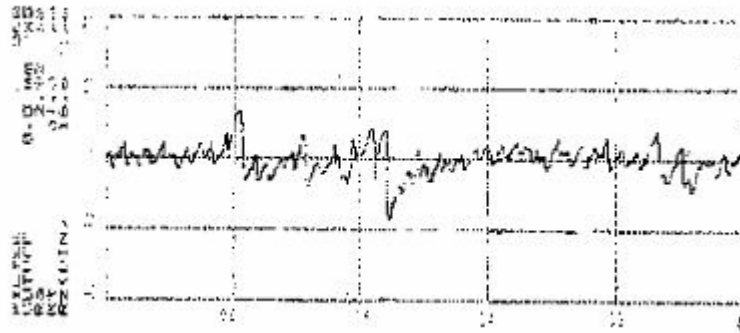


Figure II.19 : Profil de rugosité mesuré à la fin de la longueur usinée.

- La validation des résultats du déplacement résultant du bec de l'outil avec le déplacement calculé se fait par une comparaison entre le déplacement du bec de l'outil calculé par la formule (II-15) et son déplacement obtenu par la modélisation de l'outil de coupe.

$$W_r(t_i) = F_c(t_i) / K_a \quad (II-15)$$

$F_c$  : effort de coupe

$K_a$  : raideur de l'outil calculé analytiquement

Cette comparaison est présentée sur la fig.II.20, les deux courbes sont pratiquement confondues. Ce résultat, permet de calculer les déplacements avec une formule très simple au lieu d'utiliser une modélisation alourdie par le calcul numérique. Ce résultat est confirmé par plusieurs régimes de coupe.

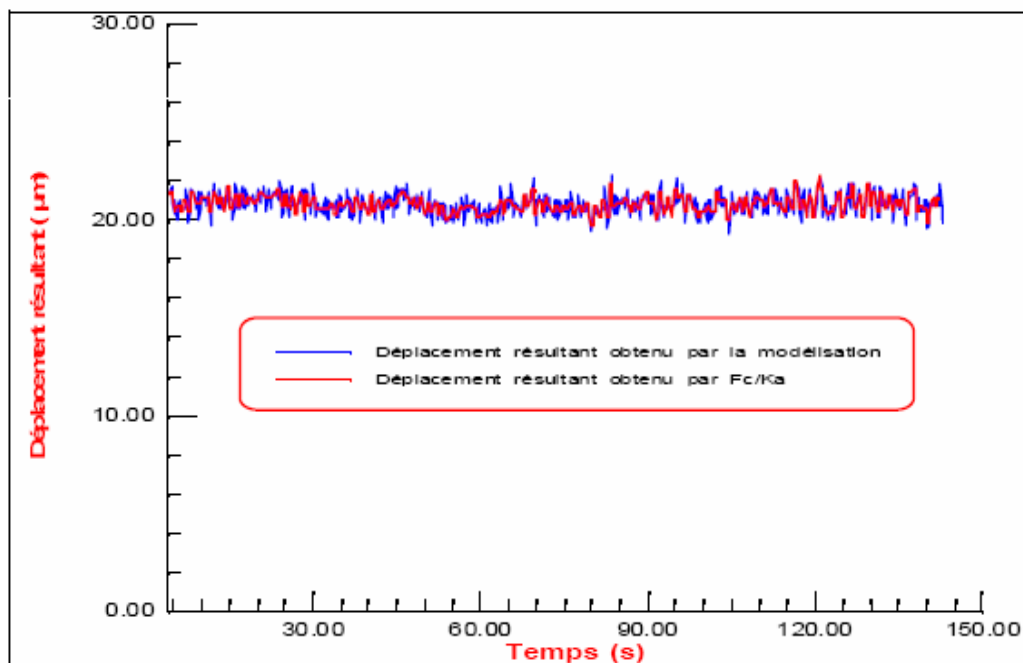


Figure II.20 : Le déplacement résultant pour  $p=1$  mm,  $f=0.08$  mm/tr et  $n=355$  tr/min.

**2.9. Conclusion**

On a présenté dans ce chapitre les états de surfaces usinées, les défauts des surfaces, les lignes et les critères de rugosité. Aussi, une bonne partie de ce chapitre a été réservée à la modélisation de l'état de surface usinée par enlèvement de matière avec des exemples de modélisation des rugosités de surface et même l'influence des vibrations mécaniques sur la rugosité de surface ont largement été présentée dans ce chapitre.

### 3. Vibrations

**3.1. Introduction :** L'étude des vibrations en usinage suscite, de nos jours, un fort intérêt en vue de maîtriser, soit la qualité des pièces usinées, soit l'aspect surveillance et contrôle. De tout temps, les phénomènes vibratoires ont été les principales causes de non qualité des pièces. Ainsi, des travaux de recherches se sont focalisés sur leur réduction, à défaut de pouvoir les supprimer totalement. Mieux encore, on essaie d'utiliser les résidus vibratoires à des fins de surveillance et de contrôle des procédés d'usinage. La compréhension des chercheurs sur ce sujet les amène à distinguer deux catégories de vibrations en usinage : vibrations externes et vibrations internes.

**3.2. Définition :** Les vibrations sont des mouvements oscillant autour d'une position moyenne d'équilibre. Le mouvement vibratoire (ou mouvement oscillatoire) est fondamental en physique, et peut être trouvé sous les formes les plus variées : mouvement d'un pendule ou d'un poids suspendu à un ressort, mouvement des atomes à l'intérieur d'un solide ou d'une molécule, ou encore déplacement des électrons dans une antenne émettrice ou réceptrice d'ondes électromagnétiques.

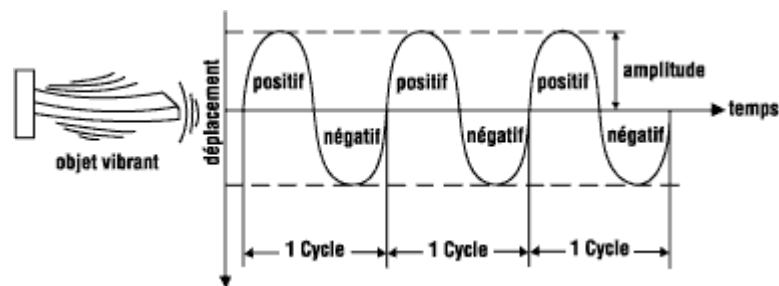


Figure III.1 : Définition d'une vibration

Le mouvement vibratoire peut être soit périodique, soit apériodique (transitoire ou aléatoire) [18]

**3.3. Les vibrations périodiques :** peuvent correspondre à un mouvement sinusoïdal pur comme celui d'un diapason ou, plus généralement, à un mouvement complexe périodique que l'on peut décomposer en une somme de mouvements sinusoïdaux élémentaires, plus faciles à analyser. Les mouvements sinusoïdaux élémentaires sont appelés composants harmoniques et leurs fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du mouvement étudié appelée fréquence fondamentale ou fréquence de l'harmonique d'ordre 1.

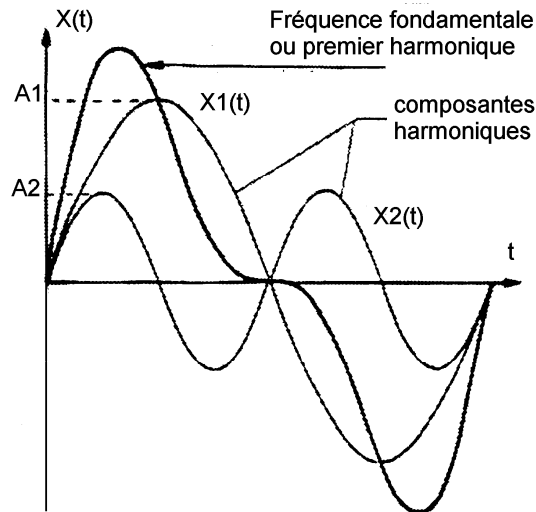


Figure III.2 : Vibrations périodiques

**3.4. Les vibrations transitoires :** elles sont générées par des forces discontinues (chocs) à l'image de la vibration provoquée par un marteau pilon. Elles peuvent présenter ou non un aspect oscillatoire revenant à une position d'équilibre après amortissement. Lorsqu'il existe des oscillations, comme pour une structure qui vibre après un choc et pour laquelle le coefficient d'amortissement est faible, on dit qu'il y a un amortissement sub-critique, et le mouvement est pseudopériodique. Si l'amortissement est très important, la structure revient à sa position d'équilibre sans oscillation, on dit alors que l'amortissement est sur critique et le mouvement est aperiodique.

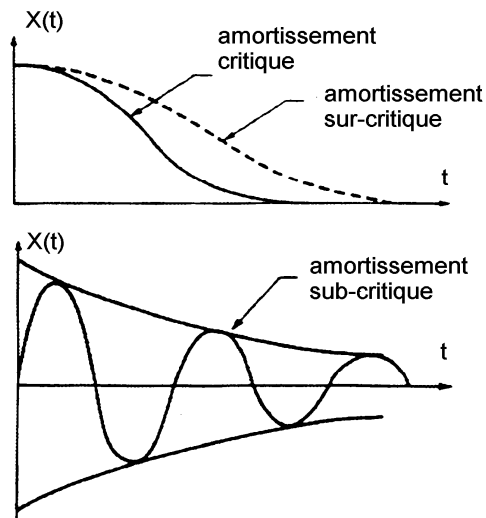


Figure III.3 : Vibrations transitoires

**3.5. Les vibrations aléatoires :** elles sont caractérisées par un mouvement oscillant aléatoire qui ne se produit pas identiquement à lui-même comme les mouvements périodiques ; à titre d'exemple, nous citons la vibration générée par le phénomène de cavitation sur une pompe. Les vibrations aléatoires ne peuvent être représentées mathématiquement que par une série de relations de probabilités car il faudrait théoriquement un temps infini pour les analyser, mais on peut considérer que la fonction aléatoire est une fonction périodique dont la périodicité est égale à l'infini et que cette fonction est constituée d'une infinité de fonctions sinusoïdales dont la fréquence varie de façon continue.

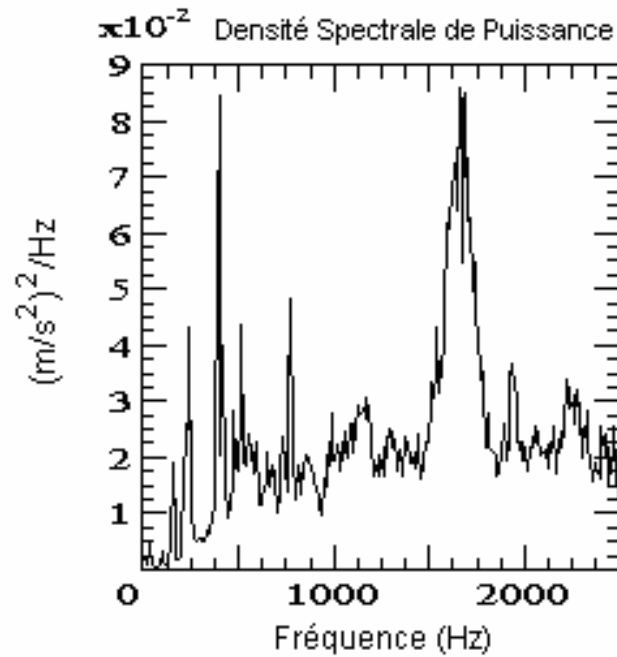


Figure III.4 : Vibrations aléatoires

### 3.6. Caractéristiques des vibrations

#### 3.6.1. L'amplitude des vibrations

Le déplacement oscillatoire d'un objet implique alternativement une vitesse dans un sens, suivie d'une vitesse dans l'autre sens. Cette variation de vitesse signifie que l'objet subit une accélération constante, d'abord dans un sens, puis dans le sens opposé. On peut quantifier l'amplitude vibratoire par le déplacement, la vitesse ou l'accélération. Pour des raisons pratiques, on mesure généralement l'accélération avec des accéléromètres [19].

L'unité d'accélération est le mètre par seconde au carré ( $m/s^2$ ). On peut exprimer l'amplitude d'une oscillation grâce à la distance entre les points extrêmes atteints par le mouvement (valeur crête à crête), ou par la distance entre un point central et l'élongation maximale (valeur de crête). On exprime souvent l'amplitude de la vibration par une valeur moyenne de l'accélération du mouvement oscillatoire, généralement la valeur efficace de l'accélération ( $m/s^2$  efficace).

Pour un mouvement sinusoïdal (fréquence unique), la valeur efficace correspond à la valeur de crête divisée par  $\sqrt{2}$ . Pour un mouvement sinusoïdal, l'accélération  $A$  (en  $\text{m/s}^2$ ) peut se calculer à partir de la fréquence  $f$  (en cycles par seconde) et du déplacement  $d$  (en mètres) :

$$A = (2\pi f)^2 d \quad (\text{III-1})$$

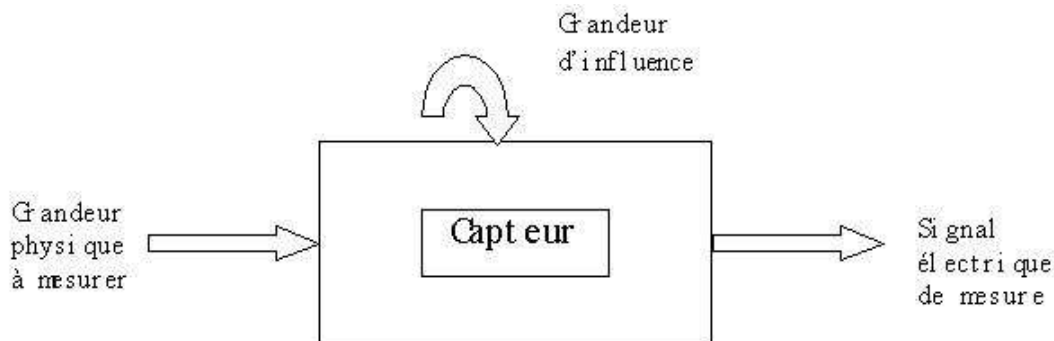
### 3.6.2. La fréquence des vibrations :

Un objet vibrant effectue un va-et-vient de part et d'autre de sa position fixe normale. Un cycle complet de vibration est produit lorsque l'objet se déplace d'une position extrême à l'autre position extrême, puis revient au point de départ. Le nombre de cycles effectués par un objet vibrant pendant une seconde est appelé fréquence. L'unité de fréquence est le hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde. [19]

### 3.7. Appareils de mesure des vibrations :

**3.7.1. Définition :** le capteur est un organe chargé de prélever une grandeur physique à mesurer et de la transformer en une grandeur exploitable.

- La grandeur physique à mesurer (mesurande) constitue le signal d'entrée (ou stimulus) du capteur.
- La grandeur exploitable étant de nature électrique constitue le signal de sortie (réponse) du capteur. Elle est une représentation de la grandeur à mesurer.



**Figure III.5 : Capteur de mesure vibratoire**

Le capteur est donc un organe de saisie d'informations, c'est le premier maillon de toute chaîne de mesure ou acquisition de données, de tout système d'asservissement, régulation, de tout dispositif de contrôle, surveillance, sécurité. [20]

**3.7.2. Capteurs de vibrations :** les trois grandeurs à mesurer en technique vibratoire sont : le déplacement, la vitesse, et l'accélération, qui peuvent être appréhendées par des systèmes très différents les uns des autres.

On distingue trois principes, les plus utilisés particulièrement :

- Déplacement : principe des courant de Foucault.
- Vitesse : principe électrodynamique.
- Accélération : principe piézoélectrique.

Ces capteurs ont le même but de transformer une vibration mécanique en un signal électrique, ils peuvent être actifs ou passifs.

Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, tandis que les capteurs passifs nécessitent une source d'énergie auxiliaire. [21]

**3.7.2.1. Capteurs de déplacement :** ces capteurs sont largement employés dans l'industrie, aussi bien dans le contrôle des positions et déplacements, par exemple dans les machines-outils, que dans les mesures de grandeurs physiques mesurables par les déplacements qu'elles imposent à des structures. On retrouve dans cette dernière catégorie, les mesures de force, de pression, de température, mais aussi, plus directement, la vitesse et l'accélération qui sont respectivement les dérivées première et seconde du déplacement.[22]

**3.7.2.2. Capteurs de vitesse :** la vitesse, si elle n'est pas déduite du déplacement ou de l'accélération, peut être mesurer à l'aide d'un tachymètre électromagnétique. Ce capteur est basé sur le principe suivant : un aimant se déplaçant dans une bobine induit dans celle-ci une force électromotrice proportionnelle à la vitesse de déplacement. Un tachymètre détecte la position angulaire d'un axe en fonction du temps et fournit ainsi sa vitesse angulaire (généralement exprimée en tr/min). [22]

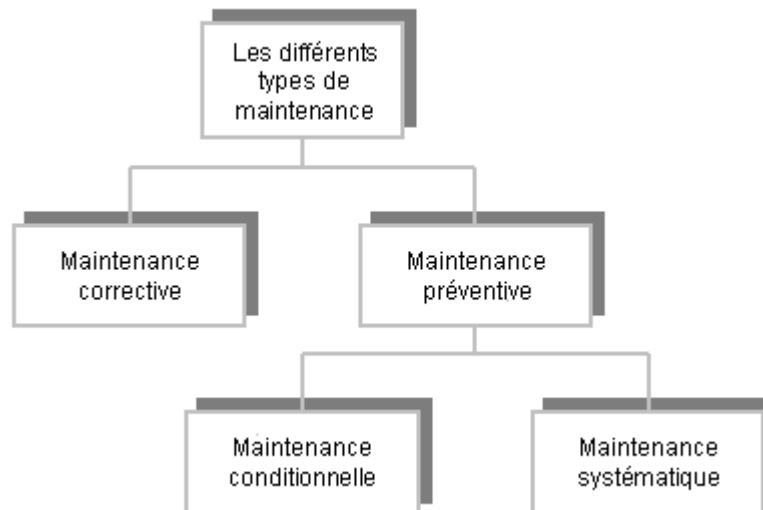
**3.7.2.3. Capteurs d'accélération :** c'est le type de capteur le plus employé lors des essais de vibration, il est possible de regrouper ces capteurs en trois grandes familles [22] :

- Les accéléromètres piézoélectriques.
- Les accéléromètres piézorésistifs.
- Les accéléromètres asservis.



### 3.8. Analyse vibratoire

L'analyse vibratoire est beaucoup plus pratiquée en maintenance conditionnelle qui est une maintenance basée sur l'anticipation des pannes et qui consiste à réparer la machine avant sa panne. Le diagramme suivant situe la maintenance conditionnelle parmi les différents types de maintenance [23]:



**Figure III.6 : Types de maintenance**

Parmi les techniques de maintenance préventive conditionnelle, l'analyse vibratoire est une technique de contrôle non destructif couramment utilisée pour diagnostiquer des défauts sur les machines tournantes. Elle s'applique, plus particulièrement, au contrôle des composants fragiles ou stratégiques d'un système, par exemple les roulements à billes, les engrenages ou les rotors.

L'analyse vibratoire permet de mettre en évidence un grand nombre de problèmes entraînant une usure donc une diminution de la durée de vie des éléments de machine : résonance de structure, balourd, mauvaise fixation des roulements, tension trop élevée des courroies, mauvais alignement d'une ligne d'arbre, usure et effondrement du bec d'outil, stabilité du process de coupe,...etc.

Les objectifs d'une telle démarche sont de réduire le nombre d'arrêts sur casses, de surveiller l'évolution des usures, de fiabiliser l'outil de production, d'augmenter son taux de disponibilité, et de mieux gérer le stock de pièces détachées, ...etc. A partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnement et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.

D'une manière générale, l'analyse vibratoire des systèmes est réalisée en trois étapes.[23]

### 3.8.1. Prise de mesures :

Elle s'effectue avec un accéléromètre (capteur mesurant l'accélération vibratoire) et un collecteur de données. Le capteur se place directement sur le bâti de la machine au niveau des paliers de la machine.



Figure III.7 : Capteur de vibration

**3.8.2. Paramètres mesurés :** Sur chaque point de mesure, deux paramètres sont mesurés :

- La valeur globale : chiffre proportionnel à l'énergie vibratoire émise (par exemple 1,22 mm/s). Très utile pour voir rapidement l'évolution dans le temps du comportement vibratoire de la machine, elle ne permet pas en revanche de détecter l'origine et l'importance du défaut.
- Le spectre : graphique amplitude / fréquence (Hz), il représente les diverses périodicités contenues dans le signal. Le spectre est à la base de tout diagnostic vibratoire car il permet de localiser et de définir l'importance du défaut.

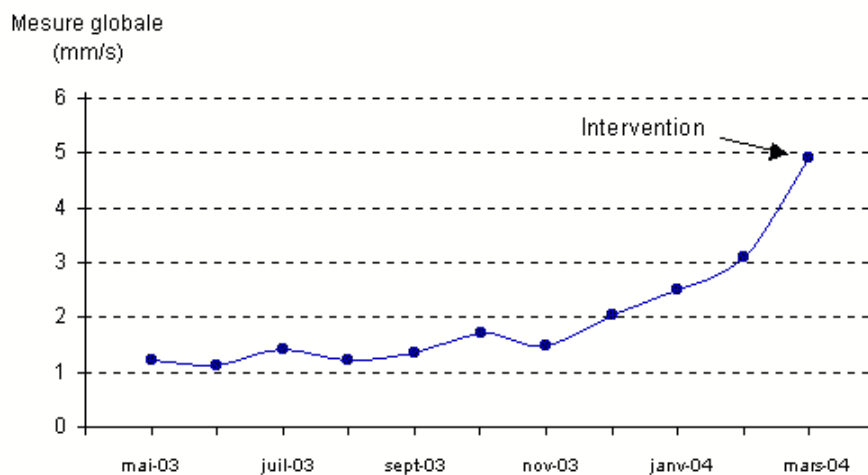


Figure III.8 : Evolution de la mesure globale prise sur le palier d'un moteur

A titre d'exemple et selon ce graphique, l'analyse spectrale a détecté la naissance d'un défaut d'écaillage de roulement et son développement de mai 2003 jusqu'à mars 2004, date où le changement du roulement a été préconisé.

### 3.8.3. Caractérisation du système :

Selon le mode d'examen réalisé, la caractérisation du système diffère par la représentation physique du phénomène qui sous tend le choix judicieux des descripteurs en traitement du signal. Ces descripteurs traduisent de manière directe ou indirecte l'état mécanique du système au moment de la mesure. [24]

### 3.8.4. Surveillance vibratoire :

- La surveillance vibratoire nécessite de procéder au choix préalable d'un certain nombre d'indicateurs. Un indicateur de surveillance est issu d'un paramètre ou d'une grandeur dont l'acquisition est faite le plus souvent possible en fonctionnement. Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine ou d'un matériel. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut. Les températures d'un palier, les bruits, les spectres ou les formes du courant d'alimentation d'un moteur sont autant d'indicateurs susceptibles de représenter l'état d'une machine par exemple et d'en suivre l'évolution dans le temps.
- La surveillance en fonctionnement consiste à observer en continu ou périodiquement des paramètres de fonctionnement qui caractérisent l'état du matériel. Elle est une composante essentielle de la maintenance des matériels et un outil de diagnostic. Elle permet :
  - d'alerter l'exploitant par une détection précoce des dégradations afin d'éviter les avaries graves du matériel.
  - de l'aider à optimiser la maintenance du matériel (notion de maintenance conditionnelle) et à optimiser l'exploitation (paramètres de production).
  - d'améliorer la connaissance du comportement des matériels et d'aider à la compréhension des processus de dégradation, par l'analyse des données de surveillance, des diagnostics réalisés, et leur consolidation dans un retour d'expérience.

La surveillance contribue à l'amélioration de la sûreté et de la disponibilité, ainsi qu'à la réduction des coûts de maintenance.

Ces gains sont de deux types :

- minimisation du coût des incidents (réparations, durée d'arrêt) grâce à une détection précoce des anomalies ;
- réduction des coûts de la maintenance par la connaissance de l'état du matériel en mettant en œuvre des techniques de surveillance et d'aide au diagnostic, ce qui permet d'espacer ou carrément de supprimer certains contrôles ou inspections à l'arrêt. [24]

Il existe deux types de suivi vibratoire qui sont [25] :

**3.8.4.1. Le suivi périodique** (off line) : il concerne l'évolution des paramètres vibratoires, souvent accompagné, dans le même temps, de la surveillance d'autres paramètres (analyse de lubrifiants, performances, appréciations sensorielles,...etc). Ceci permet de détecter l'apparition de défauts à évolution lente. La périodicité des relevés est variable (entre 2 semaines et 6 mois suivant l'importance et le coût des machines en cause). La fréquence peut être accélérée si les symptômes précoces le justifient.

**3.8.4.2. Le suivi continu** (on line) : il permet de suivre l'évolution de l'ensemble des paramètres. Il présente l'avantage de détecter des défauts à évolution rapide et d'assurer la sécurité des installations par déclenchement de la machine à l'approche d'un seuil réputé dangereux. Seules les défaillances de type explosif (perte brutale d'aubages de turbine ou de compresseur axial, par exemple) ne sont pas détectables de manière précoce, mais le déclenchement de la machine dès leur apparition peut limiter les dégâts consécutifs à ces défaillances.

### 3.8.5. Méthodes d'analyse des vibrations

Il existe différents outils d'analyse vibratoire permettant de détecter et de diagnostiquer l'apparition des défauts dans les machines, les roulements, ...etc. Elles sont généralement classées en deux grandes familles.

**3.8.5.1. Les méthodes temporelles** : Les méthodes temporelles sont basées sur l'analyse statistique du signal recueilli, elles s'appliquent à des machines simples et consistent à effectuer des mesures de vitesse dans des gammes de fréquences faibles et des mesures d'accélération dans des gammes de fréquences élevées. Le but est de minimiser l'influence des vibrations induites par la rotation des arbres. Cette méthode utilise des indicateurs scalaires qui permettent de suivre l'évolution d'une grandeur dérivant de la puissance ou de l'amplitude crête du signal. Sa valeur peut ne pas avoir de signification intrinsèque, mais c'est son évolution dans le temps qui est significative du défaut. [26]

#### 3.8.5.1.1. La valeur efficace ou valeur RMS (Root Mean Square)

C'est un indicateur scalaire « large bande » très utilisé bien qu'il présente des inconvénients. Il est sensible à l'effet de masque, c'est à dire qu'il peut s'avérer inefficace à l'apparition de certains défauts et il s'écrit sous forme discrétisée :

$$V_{\text{efficace}} = V_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2} \quad (\text{III-2})$$

Où  $x(n)$  est le signal temporel mesuré,  $N_e$  représente le nombre d'échantillons prélevés dans le signal.

Globalement, la valeur efficace ne détecte pas tous les défauts et donne une alarme tardive, ce qui représente un inconvénient majeur dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Son efficacité dépend de son bon paramétrage en terme de bandes de fréquences d'analyse liées à la structure même des machines. [27]

### 3.8.5.1.2. Les indicateurs crêtes

Contrairement à la valeur efficace de l'amplitude d'un signal, des indicateurs spécifiques comme le facteur crête ou le Kurtosis sont mieux adaptés pour représenter un signal induit par des forces impulsionnelles tels que les écaillages de roulements. Ces indicateurs sont issus des valeurs crêtes du signal temporel mesuré. Il est possible de distinguer principalement :

-Le facteur crête, défini comme étant le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace [27],

$$\text{Facteur crête} = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} = \frac{\sup |x(n)|}{\sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} [x(n)]^2}} \quad (\text{III-3})$$

-Le facteur K, défini comme étant le produit entre la valeur crête et la valeur efficace.

$$\text{Facteur K} = \text{valeur crête} \cdot \text{valeur efficace} = \sup |x(n)| \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)]^2} \quad (\text{III-4})$$

### 3.8.5.1.3. Le Kurtosis :

Le Kurtosis est le moment d'ordre 4 normé de la distribution statistique du signal. C'est un indicateur permettant de caractériser la nature impulsive d'un signal et la détection précoce d'un défaut.

$$\text{Kurtosis} = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^4}{\left[ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x(n) - \bar{x})^2 \right]^2} \quad (\text{III-5})$$

Où  $M_4$  et  $M_2$  sont les moments statistiques d'ordre 4 et d'ordre 2,  $x(n)$  est le signal temporel,  $\bar{x}$  est la valeur moyenne des amplitudes,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés dans le signal. Le principal avantage du Kurtosis réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de l'historique, et qu'il donne une valeur intrinsèque de l'état la machine, de matériel, de roulement, ...etc.

Il doit cependant être utilisé avec beaucoup de précaution, car il est très sensible aux chocs, ce qui oblige un emploi du Kurtosis dans un environnement peu complexe afin de ne pas commettre d'erreurs de diagnostic [26].

### 3.8.5.2. Les méthodes fréquentielles :

Les méthodes fréquentielles sont basées sur la transformée de Fourier. La connaissance des fréquences caractéristiques permet d'identifier et de localiser les défauts issus des composants mécaniques en analysant leur spectre. Elles sont souvent utilisées pour les machines complexes comportant beaucoup de composants mécaniques [26].

### 3.8.5.2.1. L'analyse en fréquence:

L'intérêt de cette analyse est donc d'éliminer les bruits qui perturbent la lecture du signal (climatique, par exemple) dont témoigne une courbe, et de distinguer les différents éléments qui interfèrent dans la composition de ce signal.

La transformation de Fourier est l'une des méthodes utilisées fréquemment en analyse spectrale [26].

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

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

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

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

$$X(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nt_e) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad (\text{III-7})$$

Où  $X(k\Delta f)$  est la transformée de Fourier discrète rapide,  $t_e$  est la période d'échantillonnage du signal temporel,  $n$  est le numéro de l'échantillon,  $k$  est le numéro de la ligne fréquentielle,  $\Delta f$  est l'intervalle entre deux raies fréquentielles,  $N$  est le nombre d'échantillons prélevés.

La formule de Parseval :

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} |x(n)|^2 = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} |X(f)|^2 df \quad (\text{III-8})$$

permet de rendre compte du fait que, le premier membre étant par définition l'énergie temporelle du signal,  $|X(f)|^2$  s'interprète comme la distribution de l'énergie le long de l'axe des fréquences. On appelle densité spectrale de puissance (DSP) ou spectre de puissance, le carré du module de la transformée de Fourier, rapportée au temps d'observation (III-9). Elle présente l'avantage d'être corrélée à la sévérité d'un défaut. Elle est la représentation fréquentielle (spectre de puissance) la plus utilisée dans le diagnostic vibratoire des éléments des machines tournantes, des roulements, des outils de coupe, etc.....

$$DSP(f) = \frac{|X(f)|^2}{d} \quad (\text{III-9})$$

Où  $DSP(f)$  est la densité spectrale de puissance,  $X(f)$  est la transformée de Fourier du signal,  $d$  est la durée d'observation.

La mesure n'étant réalisée que sur un échantillon de signal de durée finie, la précision se trouve limitée. Le spectre est constitué de raies élargies, entourées de lobes latéraux. Il faut

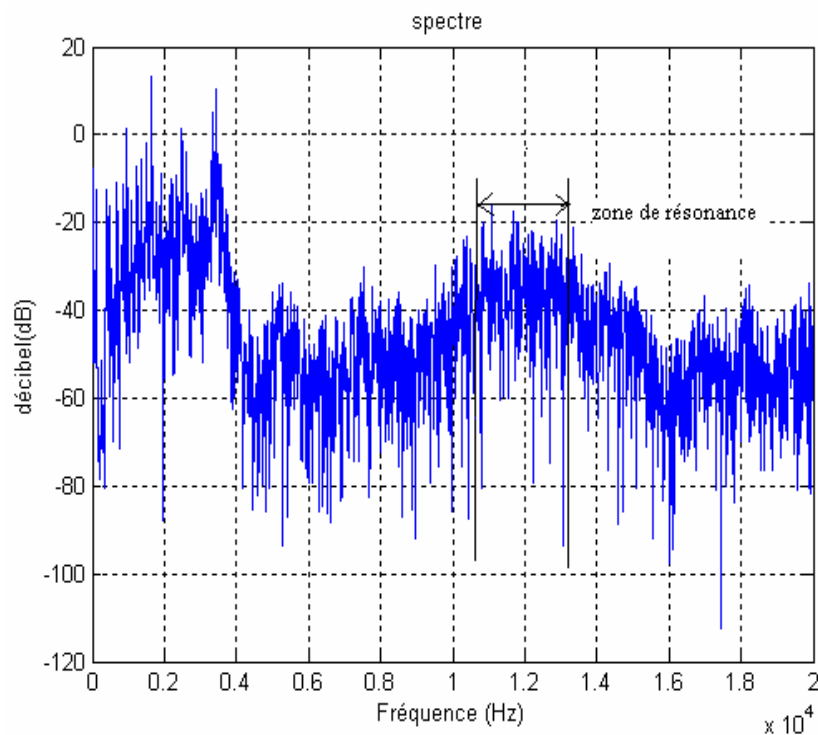
donc nécessairement introduire une fenêtre de pondération pour réduire l'effet des ondulations dues à la troncature du signal :

$$DSP_p(f) = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(k) - x(k).e^{-j2\pi fk} \right|^2 \quad (\text{III-10})$$

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

### 3.8.5.2.2. L'analyse d'enveloppe :

L'analyse d'enveloppe (HFRT) est une méthode qui permet de détecter des chocs périodiques à partir des résonances de structure [26].



**Figure III.9 : Densité spectrale de puissance**

Elle repose sur l'étude du signal enveloppe obtenu grâce à la transformée de Hilbert après filtrage dans une bande de fréquence centrée sur une ou plusieurs résonances de structure. Ainsi, il devient alors possible d'extraire des informations basses fréquences difficiles à détecter sur une porteuse haute fréquence comme la montre la figure ci-après.

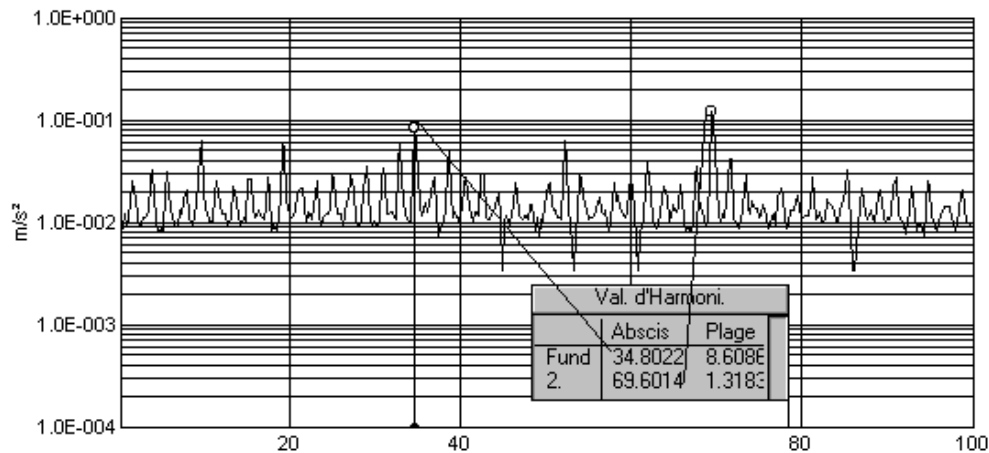


Figure III.10 : Spectre enveloppe 0-100 KHz

### 3.8.5.2.3. Le cepstre :

Le cepstre se définit comme la transformée de Fourier inverse du logarithme décimal de la transformée de Fourier :

$$C[s(t)] = TF^{-1} \log |TF[s(t)]|^2 \quad (\text{III-11})$$

Il a pour but d'identifier et de quantifier toutes les structures périodiques contenues dans le spectre. Il permet de définir des indicateurs adaptés à la détection précoce des défauts induisant, à des stades plus ou moins avancés, des énergies vibratoires que les indicateurs issus de techniques traditionnelles mettraient difficilement en évidence. Le cepstre et ses dérivées représentent les amplitudes des composantes dont les fréquences correspondent aux périodes de répétition des chocs induits par les défauts de la machine surveillée [26].

### 3.8.6. Diagnostic vibratoire

Diagnostic (du grec diagnosis : connaissance) - action d'identifier une maladie (un défaut, une anomalie) à partir d'une analyse méthodique des symptômes présentés par le malade (la machine).

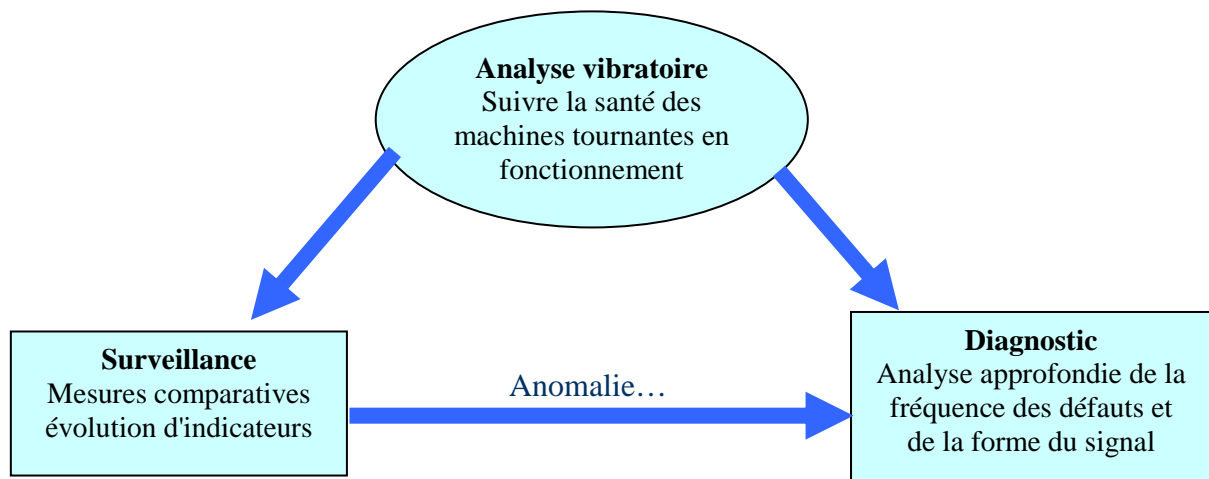
Formuler un diagnostic - c'est identifier des symptômes caractérisés par des indicateurs qualitatifs ou quantitatifs et les relier à des causes. Un diagnostic est en général engagé lorsque des signes jugés anormaux se manifestent. La finalité première de la surveillance est la détection la plus précoce possible de ces signes anormaux.

Un diagnostic peut aussi être demandé :

- pour confirmer un comportement normal et justifier, par exemple, le report d'une révision systématique ou d'un échange standard d'un organe, ou pour s'assurer du bon état vibratoire d'un équipement neuf ou révisé.
- pour connaître le comportement vibratoire d'une machine pour des conditions d'exploitation nouvelles (augmentation des vitesses de rotation...). [28]



Il met en oeuvre des outils mathématiquement plus élaborés. Il fait suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance et il permet de désigner l'élément de la machine défectueux. Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire. Le diagnostic fait appel à des connaissances approfondies en mécanique et une formation spécifique en analyse du signal. [29]



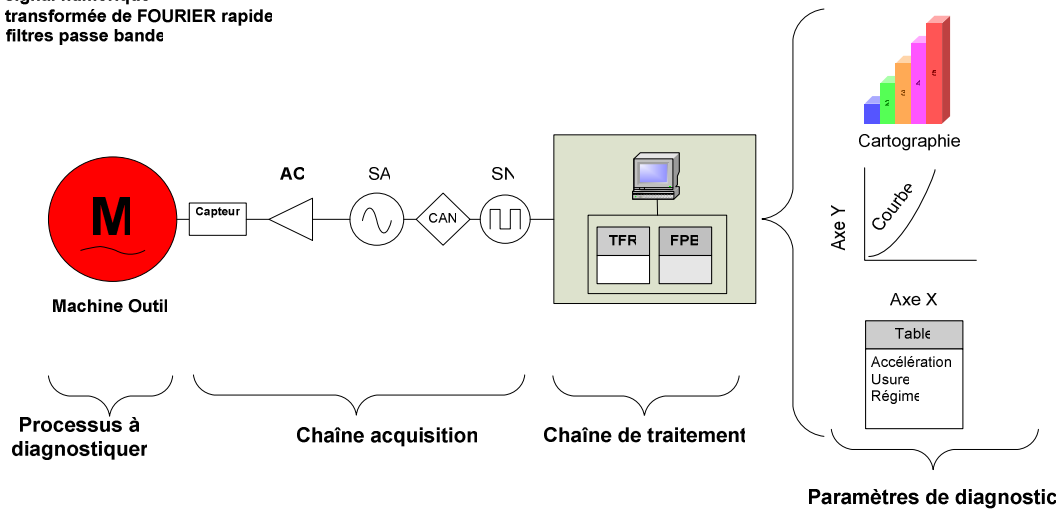
**Figure III.11 : Déroulement d'une analyse vibratoire**

#### **3.8.6.1. Diagnostic de l'usure par analyse vibratoire [30]**

C'est un travail qui a été réalisé par un étudiant en Ingénierat « Productique » du Département de Génie mécanique de l'Université de Annaba, cette étude a pour but d'établir une relation directe entre les vibrations et l'usure de l'outil coupant. Des expériences ont été effectuées pour une prise de mesures de l'usure et de l'accélération vibratoire qui a été enregistrée à l'aide d'une application ou logiciel dénommé « MECASIM » (acquisition, traitement, et modélisation des signaux), développé par cet étudiant.

Soit le système de diagnostic proposer :

AC : amplificateur de charge  
 SA : signal analogique  
 CAN : convertisseur analogique / numérique  
 SN : signal numérique  
 TFR : transformée de FOURIER rapide  
 FPB : filtres passe bande



**Figure III.12 : Système de diagnostic**

Les mesures de l'usure et de l'accélération sont utilisées pour modéliser ces deux phénomènes, et de voir l'influence des paramètres de régime de coupe sur les vibrations et l'usure.

Ces modèles sont :

- Modèle de l'usure :

$$hz = 0,213 - 0,008 Vc + 0,018 a + 0,002 p - 0,033 Vc. a + 0,002 Vc. p - 0,002 a. p - 0,033 Vc. a. p \quad (III-12)$$

- Modèle de l'accélération :

$$Acc = 12,408 - 6,498 Vc - 8,263. a + 7,048. p + 6,008 Vc. a - 9,003 Vc. p - 6,663 a. p + 7,423 Vc. a. p \quad (III-13)$$

La question qui s'est posée : comment intégrer une fonction caractérisée par des réponses discrètes (c'est-à-dire connue en certains points), dans un système de diagnostic actif ?

Pour répondre à cette question il y a eu approximation des réponses en partant des résultats obtenus.

Une interpolation au moyen de l'algorithme KPPV (K Plus Proche Voisin) a permis d'établir le système de diagnostic avec cette procédure :

- Premièrement, on organise les résultats dans un tableau, en y ajoutant la colonne des occurrences de toutes les classes.
- En deuxième étape, on divise la série de (**n**) mesures en [**n (n-1)**] parties.
- Ensuite, pour chacune des divisions précédentes, répéter cette boucle :

**Début**

*Pour chaque élément ( $y_i, x_i$ ) de l'ensemble des réponses faire*

*Calculer la distance  $D(y_i, x_i)$  entre  $y_i$  et  $x_i$*

**Fin pour**

*Dans les  $K$  points les plus proches de  $x_i$*

*Compter le nombre d'occurrences de chaque classe*

*Attribuer à  $x_i$  la classe qui apparaît le plus souvent*

**Fin**

Dans ce cas, **n = 24** mesures, donc il y a eu **24 x 23 = 552** nouveaux points approchés

Cette approche numérique a donné les résultats suivants :

N°	Réponse mesurée Y	Réponse calculée Y'	Ecarts (Y-Y')	Carré des écarts (Y-Y') <sup>2</sup>
1	0,20	0,250	-0,051	0,002601
2	0,16	0,190	-0,026	0,000676
3	0,10	0,097	0,003	0,000009
4	0,18	0,200	-0,023	0,000529
5	0,08	0,097	-0,017	0,000289
6	0,14	0,160	-0,018	0,000324
7	0,24	0,250	-0,011	0,000121
8	0,20	0,190	0,014	0,000196
9	0,14	0,130	0,014	0,000196
10	0,10	0,097	0,003	0,000009
11	0,16	0,150	0,005	0,000025
12	0,22	0,240	-0,022	0,000484
13	0,10	0,110	-0,011	0,000121
14	0,14	0,130	0,012	0,000144
15	0,04	0,049	-0,009	0,000081
16	0,26	0,240	0,018	0,000324
17	0,20	0,190	0,014	0,000196
18	0,13	0,090	0,033	0,001089
19	0,22	0,150	0,065	0,004225
20	0,30	0,240	0,058	0,003364
21	0,16	0,097	0,063	0,003969
22	0,16	0,250	-0,091	0,008281
23	0,08	0,097	-0,017	0,000289
24	0,12	0,190	-0,006	0,000036
	<b>Moyenne</b>	<b>0.16</b>		

**Tableau III.1 : Résultats du KPPV**

Après calculs, le coefficient de corrélation trouvé est  $R = 0.9993$  ( $R$  critique est défini à  $0.87$  pour cette méthode de résolution).

La représentation des signaux ainsi que leurs transformées de Fourier pour chaque essai explique l'état de vibration par estimation de la zone de fréquence et de l'amplitude, et leurs droite de régression pour voire la relation entre l'usure et les vibrations. Ci-joint une représentation d'un seul essai (régime 4 :  $V_c = 120$  m/min  $a = 0.2$  mm/tr  $P = 1$  mm)

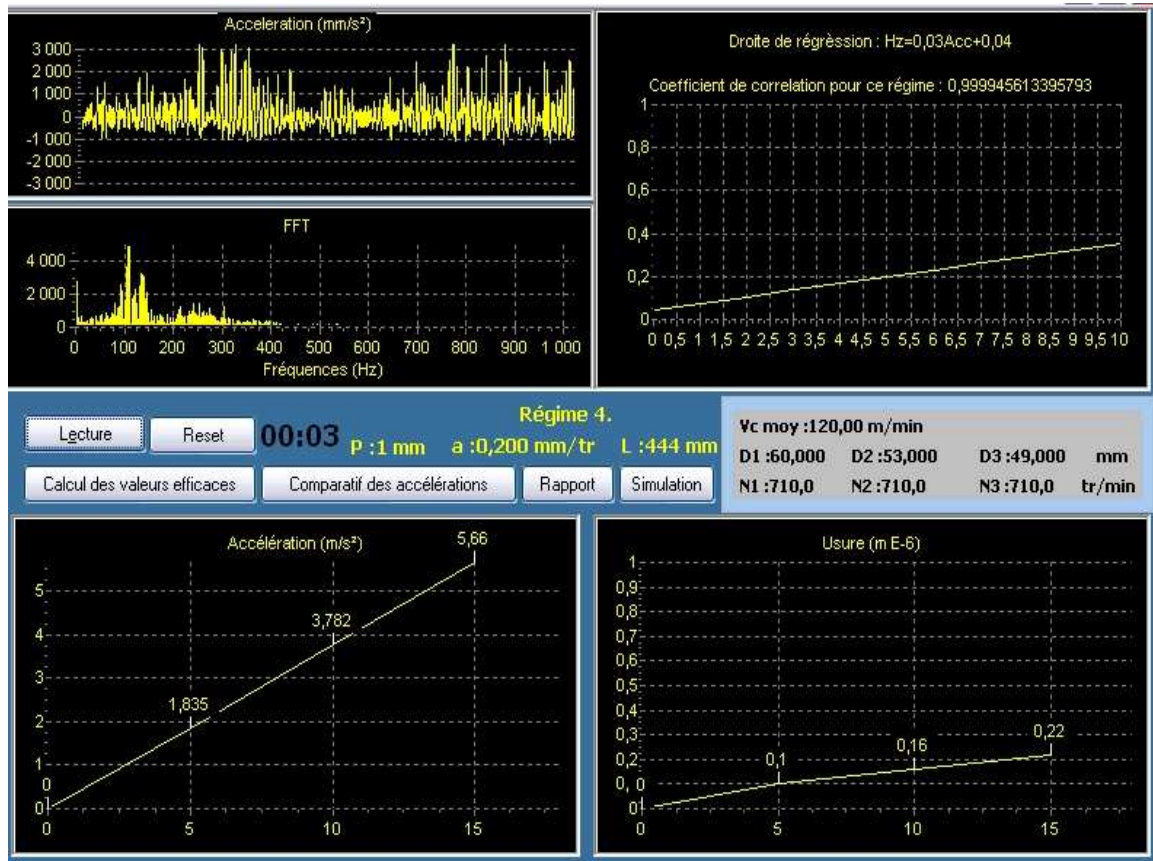


Figure III-13 : Résultats régime 4

Une simulation réalisée permet de visualiser l'état de l'usure en fonction de l'accélération vibratoire.

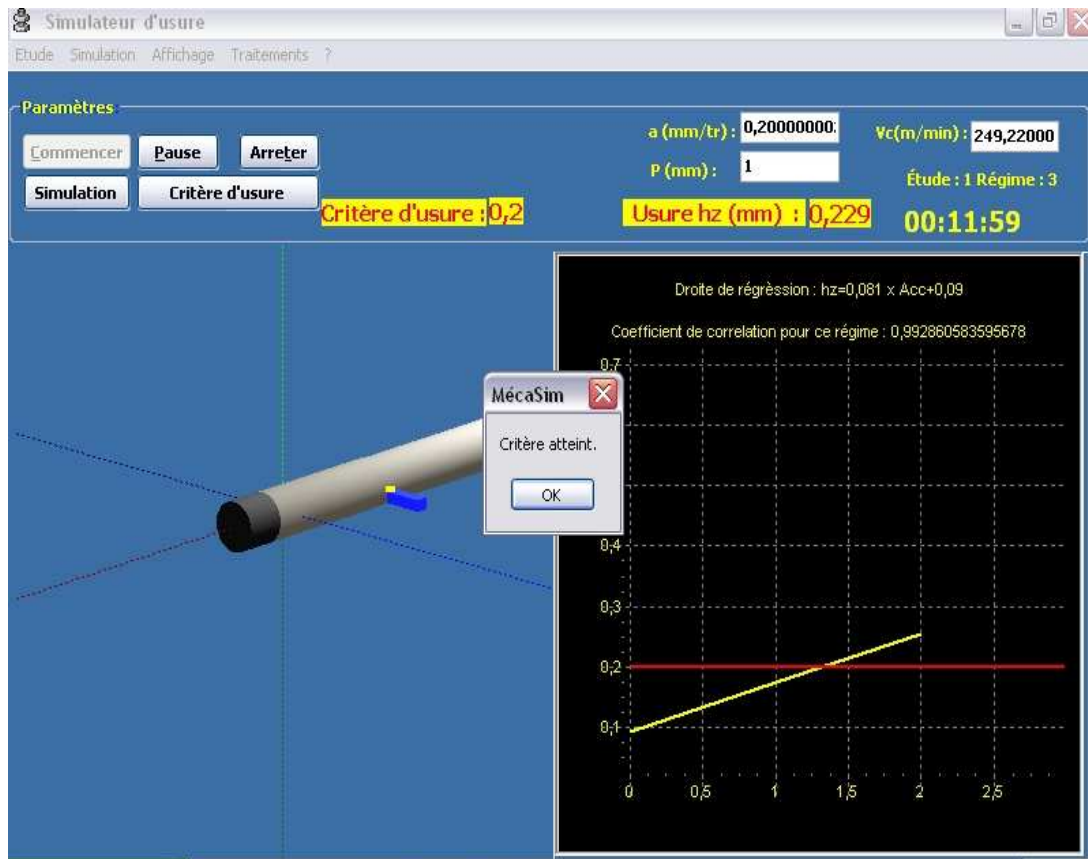


Figure III.14 : Simulation d'usinage et d'usure

Autres résultats donnés par le logiciel de diagnostic développé (MECASIM) : présentation des cartographies d'usure en fonction du temps et des paramètres du régime de coupe, comme par exemple :

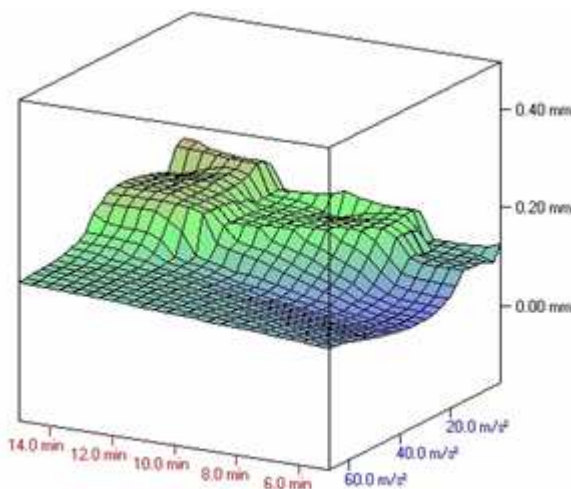


Figure III.15 : Usure par rapport au temps

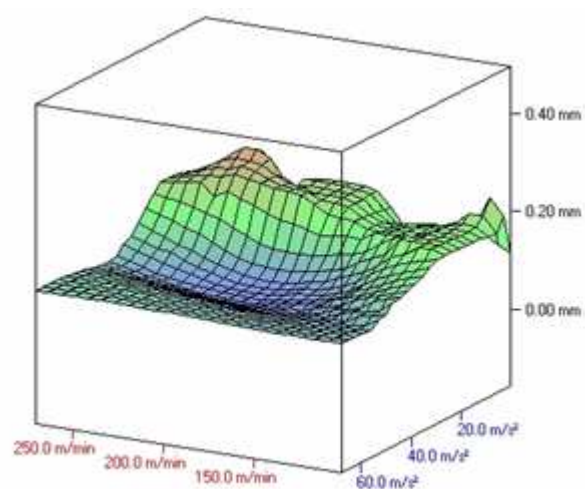


figure III.16 : Usure par rapport à la vitesse de coupe

L'analyse de ces figures a fait apparaître que la vitesse d'avance a une influence assez importante et inversement proportionnelle à l'usure.

Finalement, après tous les résultats de cette étude, la relation entre l'usure et les vibrations est inversement proportionnelle à cause d'une perte de matière dans le volume de contact engendré par l'intersection des surfaces à l'interface pièce – outil.

### Remarque

Ce travail a donné une idée sur la relation de l'usure avec les vibrations, cette relation s'est avérée inversement proportionnelle. C'est dans cette optique qu'on a réalisé notre étude de diagnostic vibratoire qui traite l'influence des vibrations sur la rugosité d'une surface usinée en tournage.

### **3.8.6.2. Surveillance en ligne des outils coupants du process d'usinage par les réseaux de neurone [31] :**

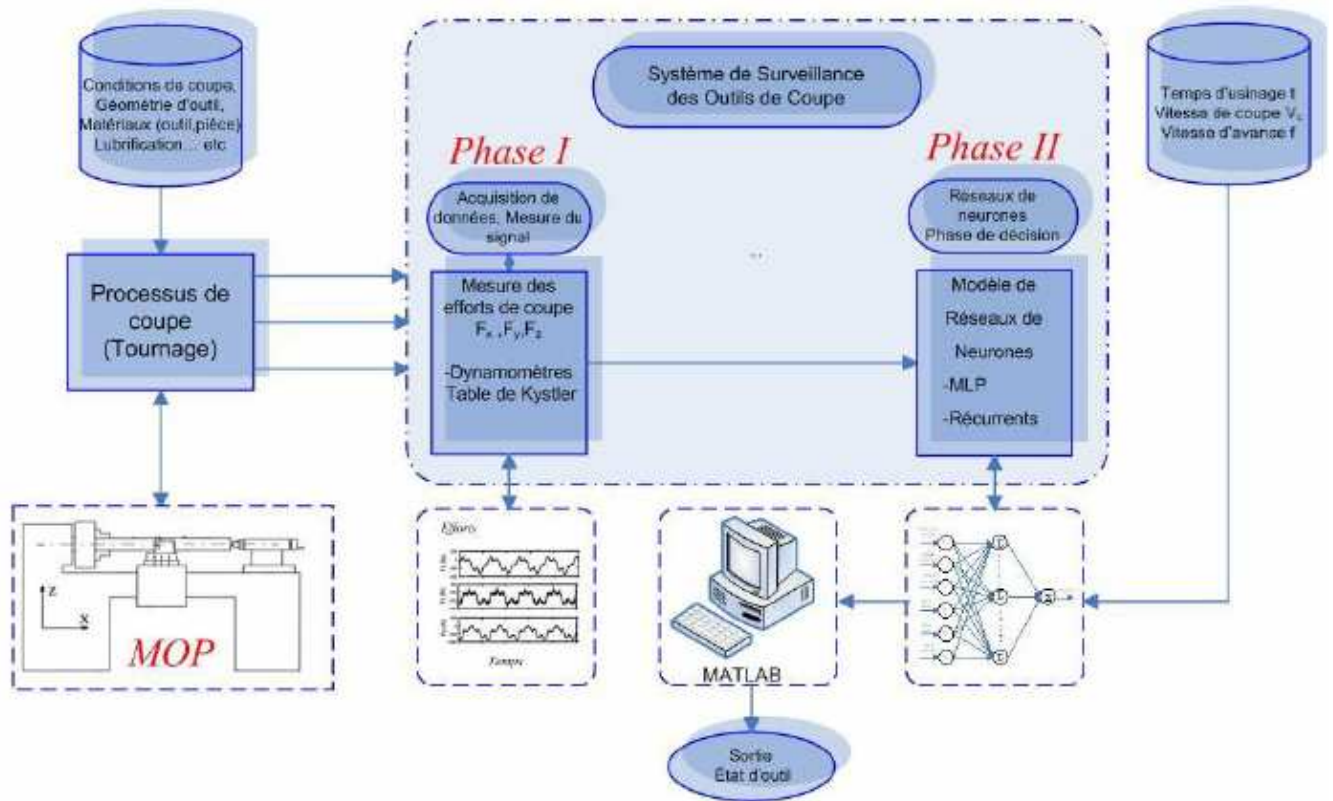
L'usure de l'outil de coupe peut être diagnostiquer ou surveiller par différentes techniques, et on a présenté une étude utilisant le diagnostic vibratoire, mais la surveillance en ligne pour le contrôle de l'usure des outils de coupe dans les processus de coupe est devenue une nécessité incontournable afin de compléter la chaîne d'automatisation des systèmes de production mécanique. Aussi, afin d'assurer cette tâche, plusieurs techniques fiables de contrôle, de supervision et de surveillance en ligne de l'usure d'outil de coupe ont été développées. Dans le but d'exploiter les données des signaux issus du processus de coupe, les industriels et chercheurs ont recours de plus en plus à l'application des réseaux de neurones. Une proposition d'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 pour des opérations de tournage réalisée par le groupe modélisation en mécanique et productique (LMMC). A cet effet, un système à base d'un algorithme d'optimisation d'une architecture d'un réseau de neurones a été développé. Ce système comporte deux phases principales :

La première phase est "*la phase d'acquisition* " de données, elle permet d'acquérir des données à partir du processus de coupe. Ces données sont sous forme de signaux, mesurés au cours d'une opération de tournage d'une pièce en acier allié (E24) avec un insert d'outil de type P25, les signaux utilisés, sont des signaux de forces de coupe (force axiale, radiale, et tangentielle)

La seconde phase "*phase de décision* " traite sur les réseaux de neurones. À travers le résultat obtenu par le réseau, ils déterminent l'état de l'outil de coupe, à savoir

Outil neuf : fonctionnement normal ;

Outil usé : fonctionnement anormal (déclenchement d'une alarme, changement d'outil,...)

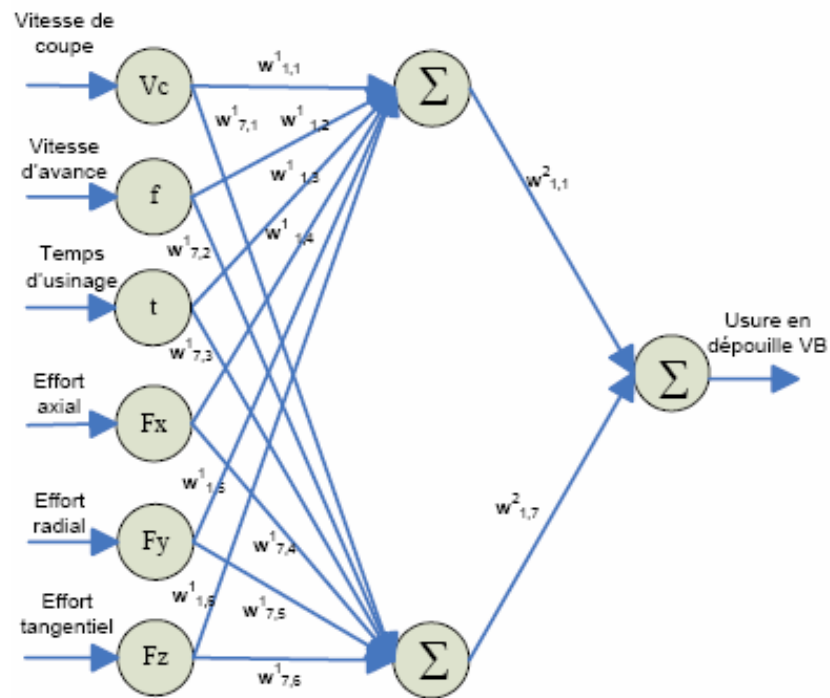


**Figure III.17 : Système de surveillance proposé de l'usure des outils de coupe**

Une application pratique a été implémentée sous Matlab et permet d'introduire les signaux des efforts de coupe pour alimenter un réseau de neurones feed-forward de type perceptron multi-couches avec rétro-propagation de gradient d'erreur, en vue de leur traitement par le réseau optimisé. Cette architecture est la plus utilisée actuellement en raison de la fiabilité de l'algorithme de mise en oeuvre. Cet algorithme se caractérise par une convergence d'apprentissage rapide et stable, ainsi que par la richesse des développements mathématiques qui lui ont été consacrées. Ce dernier a été alimenté avec les composantes de la force de coupe, les vitesses d'avance et de coupe ainsi que du temps d'usinage pour la prédiction de l'usure frontale au cours d'une opération de tournage. Plusieurs paramètres, à savoir :

- Neurones cachés : la performance du réseau de neurones étudié a présenté un comportement aléatoire en fonction du nombre de neurones cachés.
  - Taux d'apprentissage et momentum : ces deux paramètres affectent considérablement le choix d'une configuration optimale,
  - Poids d'initialisation : jouent un rôle très important dans le raffinement du réseau, la sélection de ceux-ci dépend entièrement du concepteur,
  - Fonctions d'activation : de type sigmoïde dans les couches cachées et celles de type linéaire dans la couche de sortie est fortement souhaitée,
- Ces paramètres ont été étudiés dans le but de perfectionner ce réseau.

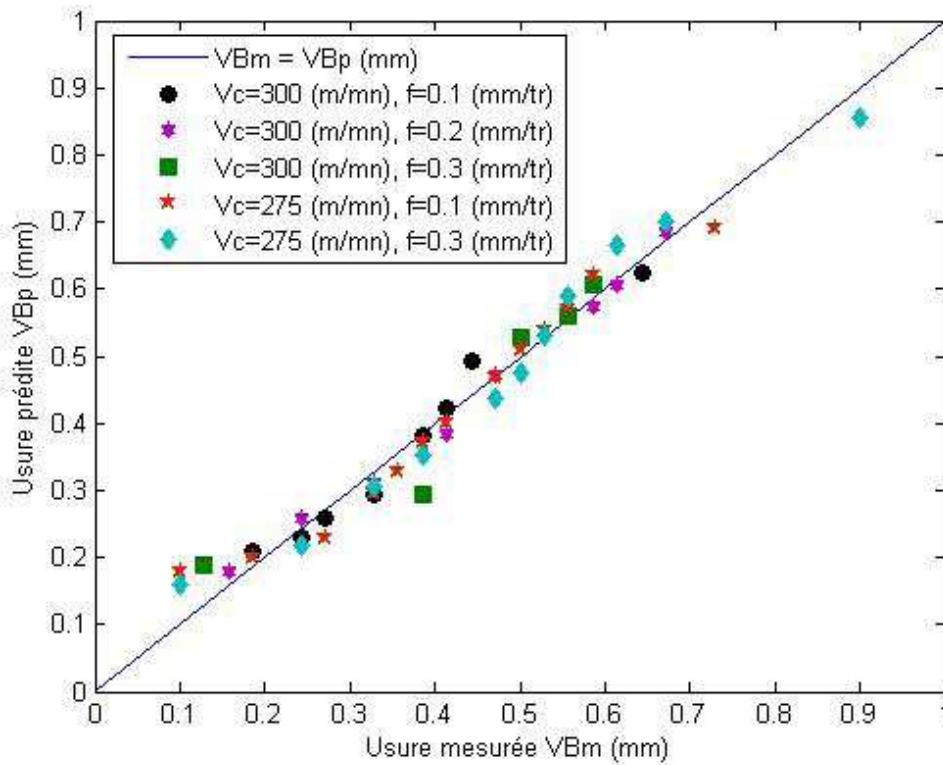




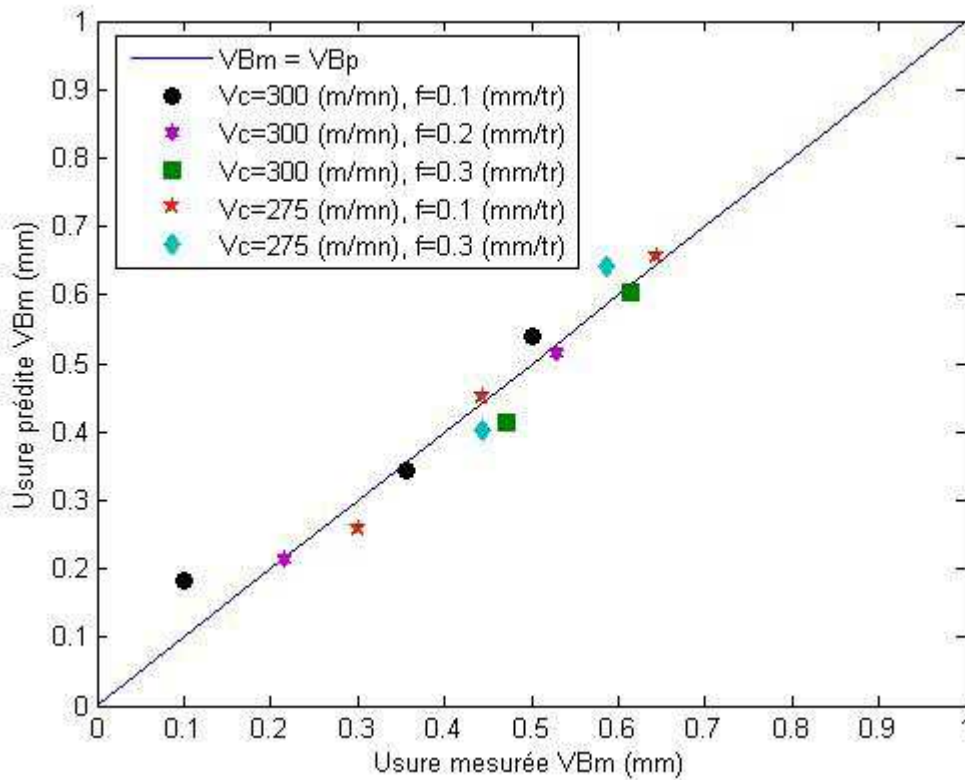
**Figure III.18 : Perceptron multicouches de type 6-7-1 utilisé pour le système de surveillance**

La prédiction de l'usure d'outil a atteint un pourcentage de 97.31% durant la phase d'apprentissage et un taux de réussite de 92.83% pour la phase de test. Il est très évident que ces résultats reflètent la fiabilité de l'algorithme développé, comme le montrent les figures ci-dessous.





**Figure III.19 : Usure mesurée VBm en fonction de l'usure prédite VBp (phase d'apprentissage)**



**Figure III.20 : Usure mesurée VBm en fonction de l'usure prédite VBp (phase de test)**

L'utilisation des efforts de coupe comme entrées aux réseaux de neurones afin de prédire l'usure d'outil de coupe a prouvé son efficacité. Ceci semble confirmer les relations établies entre les forces de coupe et l'usure des outils de coupe, à base de formules empiriques.

Le système a montré son efficacité, seulement il est limité aux opérations de tournage et pour un type d'insert bien défini, à savoir le P25. La géométrie de l'outil, sa nuance et celle de la pièce à usiner n'ont pas été prises en charge, le nombre élevé d'itérations nécessaire pour la phase d'apprentissage (52.400 itérations), le système mise en place n'a pas été testé en temps réel.

### 3.8.6.3. Analyse temps -fréquence appliquée aux signaux vibratoires relevés en tournage

C'est une étude proposée par [32], ce travail consiste à réaliser une analyse conjointe en temps et en fréquence sur les signaux vibratoires générés en usinage afin de déterminer l'usure des outils de coupe. Deux méthodes d'analyse sont proposées ici : la transformée de Fourier à court terme et la transformée en ondelettes. Cette technique d'analyse permet la détermination de plusieurs indicateurs d'usure (niveau vibratoire, détection d'événements brusques, fréquences caractéristiques, élargissement spectrale...etc).

La comparaison de ces deux méthodes du point de vue de leur capacité à suivre l'évolution du développement de l'usure sur les outils de coupe, et par rapport à leur mise en oeuvre numérique.

Ils ont utilisés trente plaquettes de coupe de même type DCLNL 2525M 12 portant une plaquette de carbure de tungstène revêtue CNMG 1204 125B OR2500 sur une fonte grise à graphite lamellaire (FGL 250). Ceci dans l'objectif d'étudier la répétabilité des résultats trouvés par analyse vibratoire et confirmés par un contrôle direct des plaquettes utilisées.

- Les signaux vibratoires générés en usinage ont été mesurés à l'aide d'un système d'acquisition, voir figure III.29.

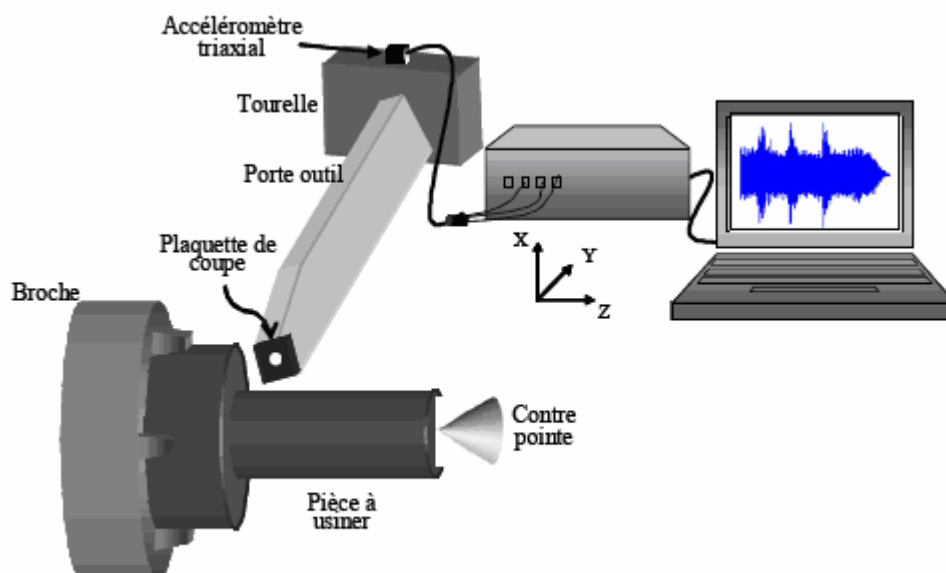
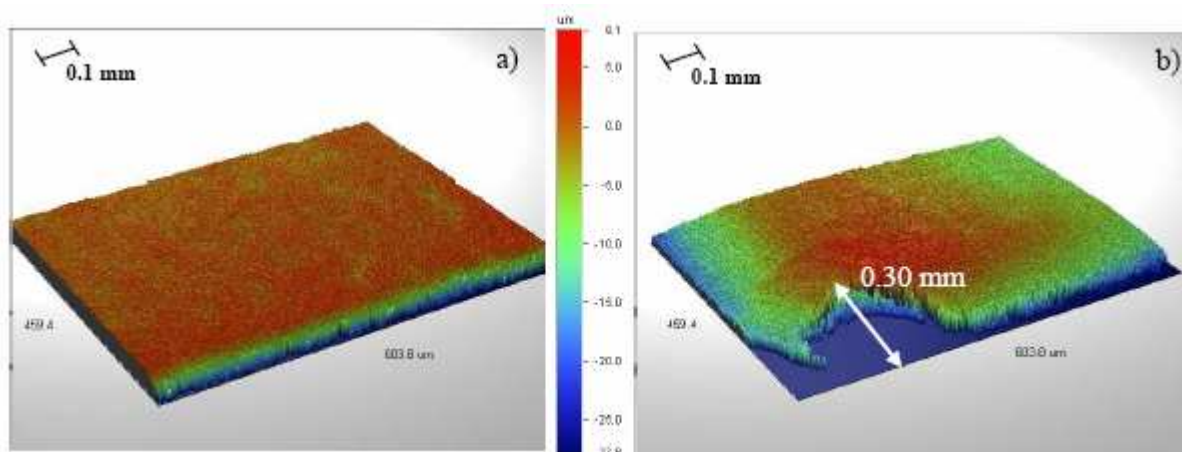


Figure III.21 : Schéma de la chaîne d'acquisition

- Un profilomètre interférométrique 3D Wyko-NT 1100 a été utilisé pour surveiller le développement progressif de la facette d'usure en dépouille après chaque passe d'usinage. Grâce à cet appareil, des images 3D de la surface d'usure ont été générées et finement analysées par ce procédé. Voici une représentation d'une plaquette à l'état neuf et la même plaquette à l'état usé (voir fig.III.29).

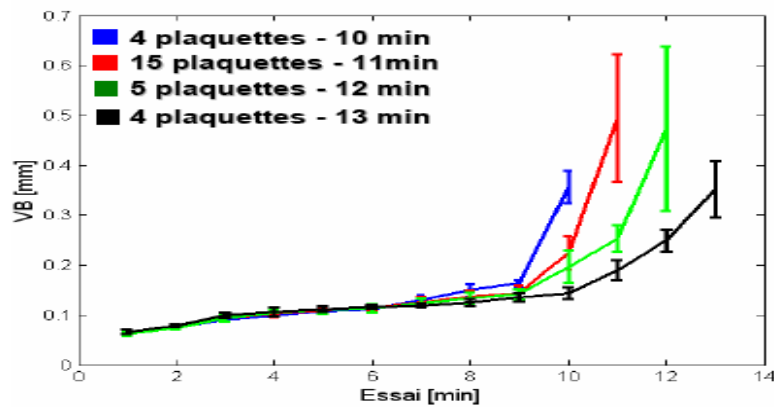
Les essais d'usinage ont été arrêtés lorsque la largeur de l'usure en dépouille VB atteint ou dépasse la valeur de 0.3 mm, synonyme de la fin de la vie de l'outil de coupe dans les conditions d'usinage ( $V_f = 0.18\text{mm/tr}$ ,  $a_p = 1.5\text{ mm}$ ,  $V_c = 340\text{ m/min}$ , sans lubrification, type de plaquette, type de machine)



**Figure III.22 : Images issues d'un profilomètre optique : a) Plaquette neuve, b) Plaquette usée**

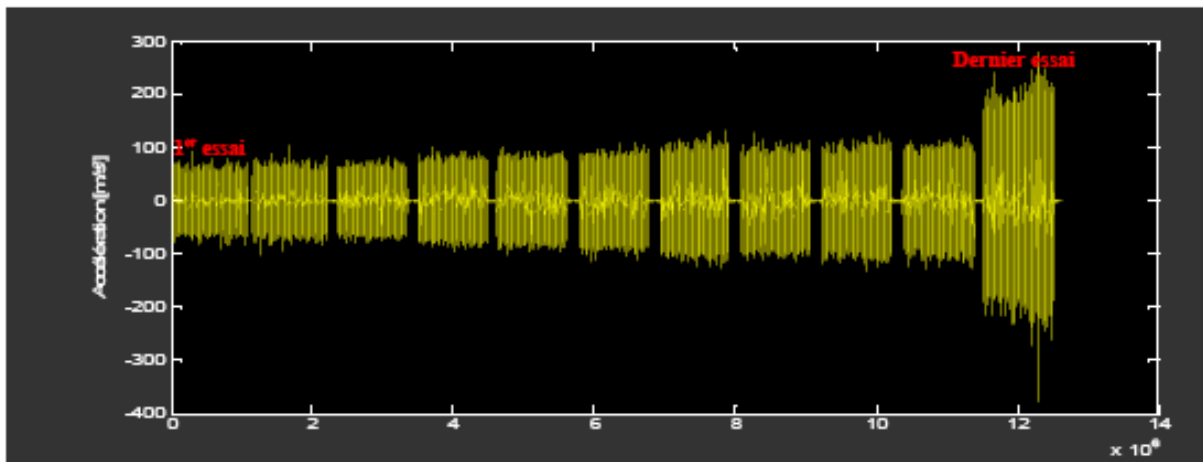
- Les trente plaquettes étudiées ont eu un comportement variable vis-à-vis de leur durée de vie et ont été classées en 4 groupes selon ce critère : (10 minutes, 11 minutes, 12 minutes et 13 minutes). Les courbes moyennes des évolutions de la largeur des usures en dépouille (VB) sont tracées en fonction de passes d'usinage pour chaque groupe de plaquettes (fig. III.30).

Ils distinguent, une phase de rodage dans les deux premiers essais, à partir du troisième essai, toutes les plaquettes entrent dans une phase de stabilisation en adoptant le même comportement jusqu'à l'essai 6, après cet essai, chaque groupe se détache pour tracer son propre comportement avant d'atteindre le passage à la phase d'accélération de l'usure. Ce point de passage change d'un groupe à l'autre et globalement il débute à partir de l'essai 9.



**Figure III.23 : Evolution moyenne de la largeur de l'usure en dépouille en fonction de passes d'usinage pour les quatre groupes de plaquettes.**

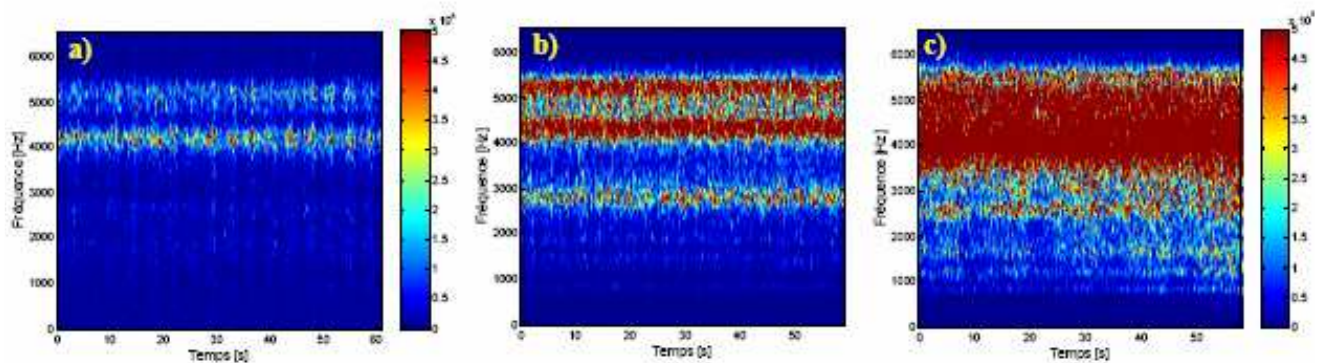
- Une allure type des réponses vibratoires acquises selon la direction X de la machine est présentée dans la figure ci-après.



**Figure III.24 : Concaténation des signaux sur toute la vie d'une plaquette de coupe**

Ces réponses ont été générées au cours d'un usinage en utilisant une plaquette depuis son état neuf jusqu'à sa destruction.

- L'analyse temps -fréquence est réalisée par le carré du module de la transformée de Fourier à court terme (Spectrogramme) représenté dans la figure III.25 ci-dessous.



**Figure III.25 : Les spectrogrammes types obtenus pour : a) Essai 1, b) Essai 6 et c) Essai**

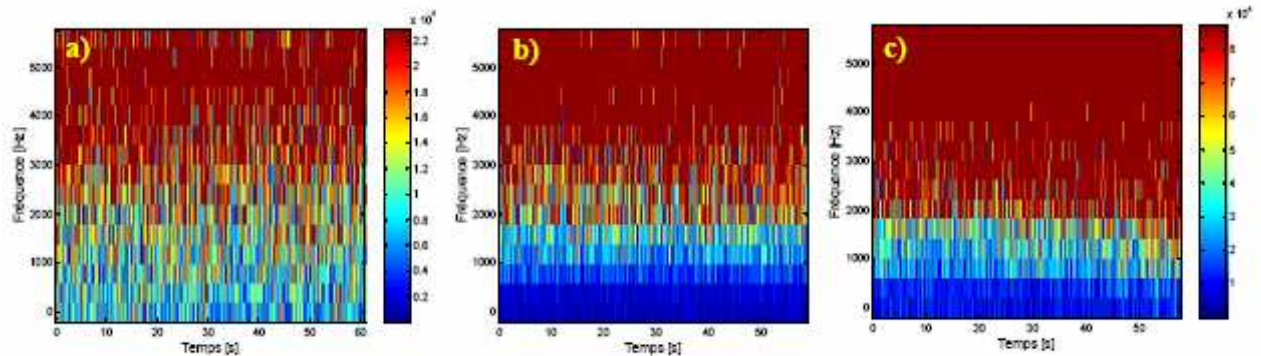
**11**

Ces spectrogrammes montrent deux bandes fréquentielles centrées au voisinage de 4200 et 5100 Hz correspondent aux fréquences propres de l'ensemble outil et porte-outil.

La fig.III.25 (c) présente une apparition d'une bande fréquentielle à 2800 Hz qui peut être interprétée comme un mode créé lors du contact matière - outil, et peut être un phénomène de l'élargissement spectral. Le niveau vibratoire des deux fréquences caractéristiques (4200 et 5100 Hz) ainsi que la fréquence à 2800 Hz augmente progressivement avec la détérioration de la plaquette de coupe utilisée.

- L'analyse en temps - échelle consiste à décomposer le signal sur une base de fonctions à support borné. Les fonctions de base se déduisent d'une ondelette mère par dilatation et/ou contraction, cette ondelette d'analyse est celle de Morlet, une mauvaise large bande fréquentielle entre 2000 et 5000 Hz apparaît.

Toutefois, il est à remarquer que la localisation de l'énergie vibratoire dans le plan temps fréquence est croissante en fonction de l'usure de l'outil de coupe.



**Figure III.26 : Les scalogrammes types obtenus pour : a) Essai 1, b) Essai 6 et c) Essai 11**

- La transformée de Fourier à court terme s'avère suffisante pour le suivi de développement de l'usure des outils de coupe en fonction de l'usinage.

Cette méthode permet une représentation plus lisible et suffisante : sa mise en oeuvre étant simple, et son temps de calcul étant réduit.

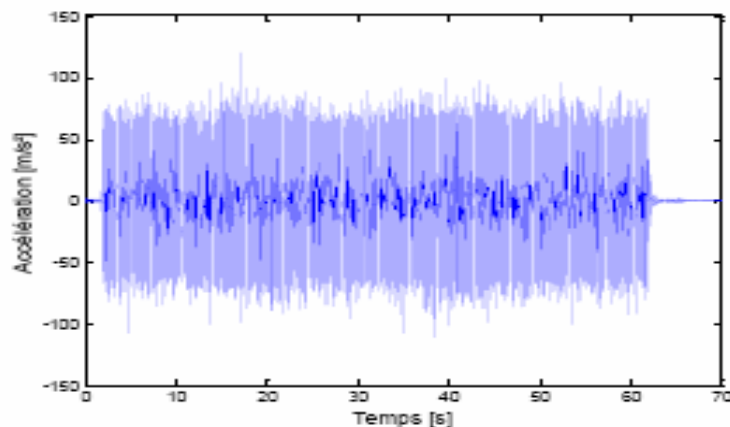
#### Remarque

Malgré que la transformation en ondelette soit une technique récente, une extension de la FFT, elle n'a pas donné de bons résultats pour cet exemple.

#### **3.8.6.4. Analyse des signaux vibratoires en utilisant des approches temporelles et fréquentielles [33]**

Cette analyse a pour but d'identifier l'influence de l'usure d'un outil coupant sur les vibrations produites lors d'un processus d'usinage, puis de déterminer quels paramètres extraits de ces signaux traduisent l'état de l'usinage.

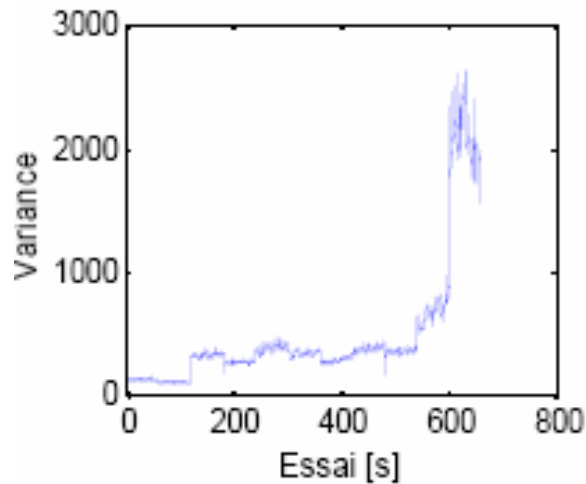
-L'analyse des réponses vibratoires acquises a été effectuée dans la zone utile des signaux d'usinage (zone comprise entre 4 et 64 secondes) de la fig. III.27 ci-dessous.



**Figure III.27 : Allure de la réponse vibratoire**

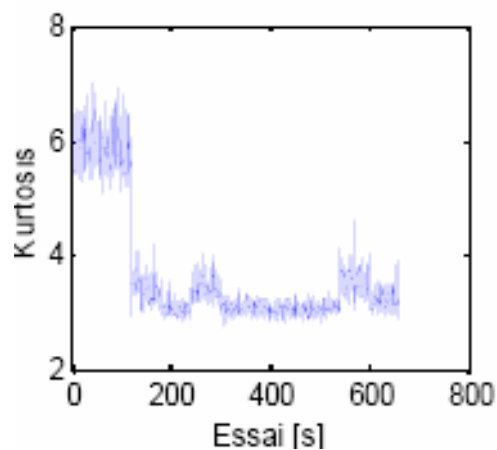
L'estimation des paramètres statistiques (moyenne, variance, skewness et kurtosis) a été réalisée par balayage des signaux avec une fenêtre glissante.

La variance augmente de façon significative à lorsque la plaquette de coupe se trouve dans la phase d'accélération de l'usure, c'est le début du vieillissement de la plaquette (fig.III.28).



**Figure III.28 : Evolution de la variance en fonction des essais**

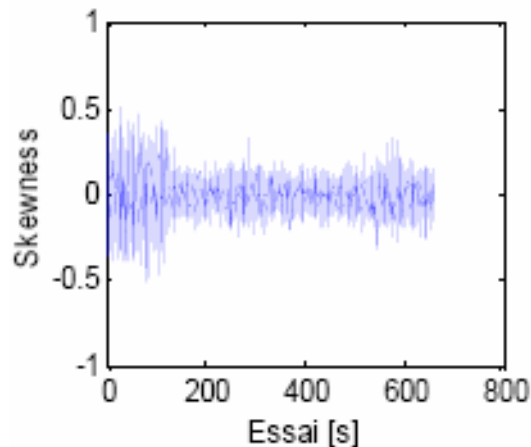
Le kurtosis varie entre 3 et 4, à l'exception des deux premières passes d'usinage (phase de rodage), voire (fig.III.29)



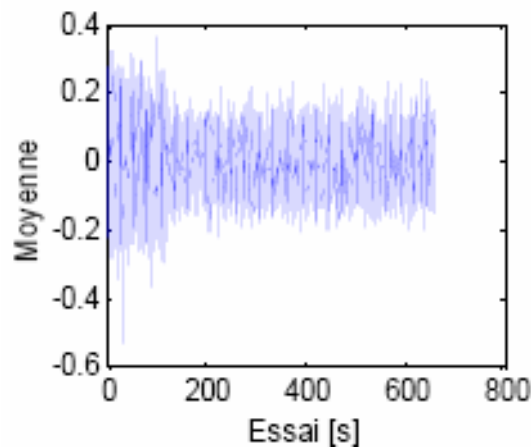
**Figure III.29 : Evolution du Kurtosis en fonction des essais**



Le calcul de Skewness, (fig.III.30) montre des valeurs non nulles, et présente la même allure que la moyenne du signal, (fig.III.31).



**Figure III.30 : Evolution de Skewness en fonction des essais**

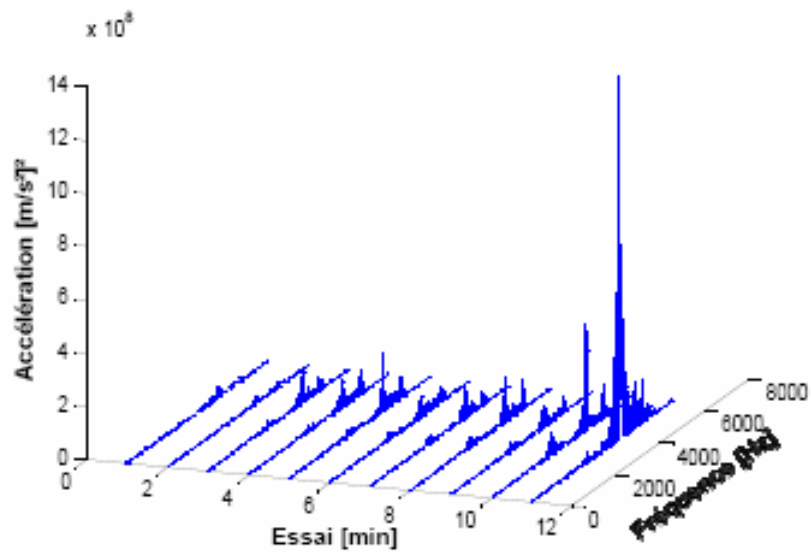


**Figure III.31 : Évolution de la moyenne du signal en fonction des essais**

En résumé de cette analyse temporelle, ces paramètres, hormis la variance, ne peuvent pas être retenus comme indicateurs de l'état de l'outil de coupe dans cette étude.

- L'analyse dans le domaine fréquentiel montre une évolution des spectres en fonction de l'accroissement de l'usure (fig.III.32), elle représente toute la durée de vie de l'outil de coupe depuis le premier essai (première utilisation de la plaquette), jusqu'au onzième essai (fin de la durée de vie de la plaquette), à partir de cette allure, la fréquence est au voisinage de 4000 Hz. Afin d'évaluer l'usure des plaquette de coupe à partir des signaux vibratoires, la stratégie adoptée s'appuie sur une analyse temporelle où des paramètres statistiques (la moyenne, la puissance, la variance, le skewness et le kurtosis) sont étudiés et sur une analyse fréquentielle (périodogrammes lissés et moyennés) à base de Fourier.

Cette identification renforcée par la corrélation des trois grandeurs physiques a permis l'extraction d'un nombre pertinents de descripteurs d'usure (notamment la variance, la puissance du signal et le niveau vibratoire pour une fréquence spécifique).



**Figure III.32 : Allure type de l'évolution des spectres en fonction de l'accroissement de l'usure**

### 3.9. Conclusion

Dans cette partie, nous avons rappelé les généralités concernant les vibrations mécaniques (théorie de la vibration, appareils de mesure), les méthodes d'analyse vibratoire et enfin quelques expériences et exemples de diagnostic et de surveillance par analyse vibratoire.



## 4. Problématique

### 4.1. Problème à étudier

Comme dans tous les procédés d'usinage, il existe sensiblement les mêmes phénomènes de vibrations en tournage.

- Les vibrations produites par les machines-outils traduisent les efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ces vibrations peuvent conduire à des ruptures inopinées en raison de la fatigue et de l'usure qu'elles engendrent. [34]

- Les vibrations des outils de coupe sont aussi un problème majeur dans le processus de coupe des métaux. Elles limitent sévèrement les performances des machines-outils sur le plan qualitatif qui apparaissent sous forme d'ondulation sur l'état de surface.

- De mauvais choix des conditions de coupe peuvent provoquer, lors de l'usinage, des vibrations de l'outil, se transmettant au porte-outil et à la machine. Ces vibrations constituent un obstacle majeur pour la recherche d'une plus grande productivité et d'une meilleure qualité des pièces réalisées. [35]

- Les vibrations à l'interface outil/copeau, lors de l'usinage sont principalement dues aux variations du frottement à l'interface, au contact sur la face en dépouille de l'outil et aux variations d'épaisseur et de largeur usinées. Ces dernières proviennent de la génération d'une surface ondulée lors de la passe précédente qui influence le comportement dynamique de l'ensemble outil/porte-outil lors de la passe suivante. [35]

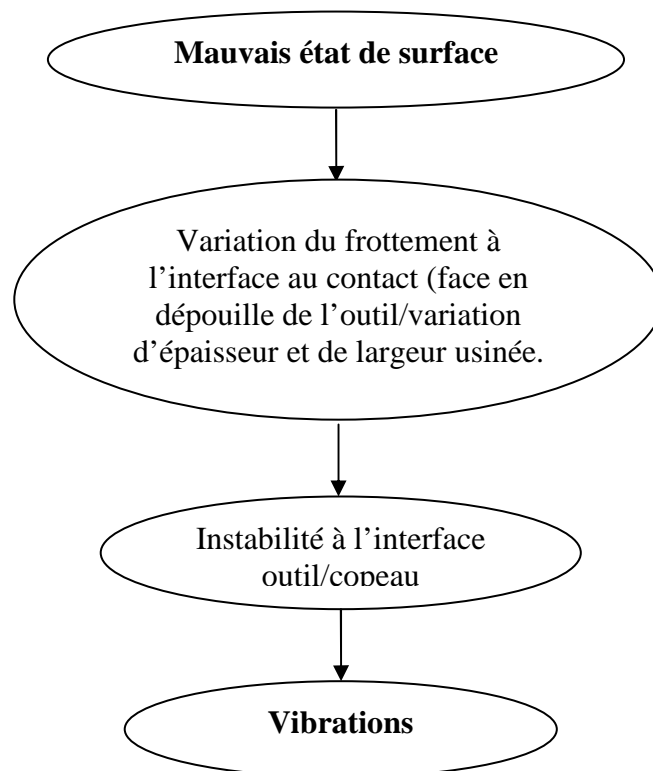


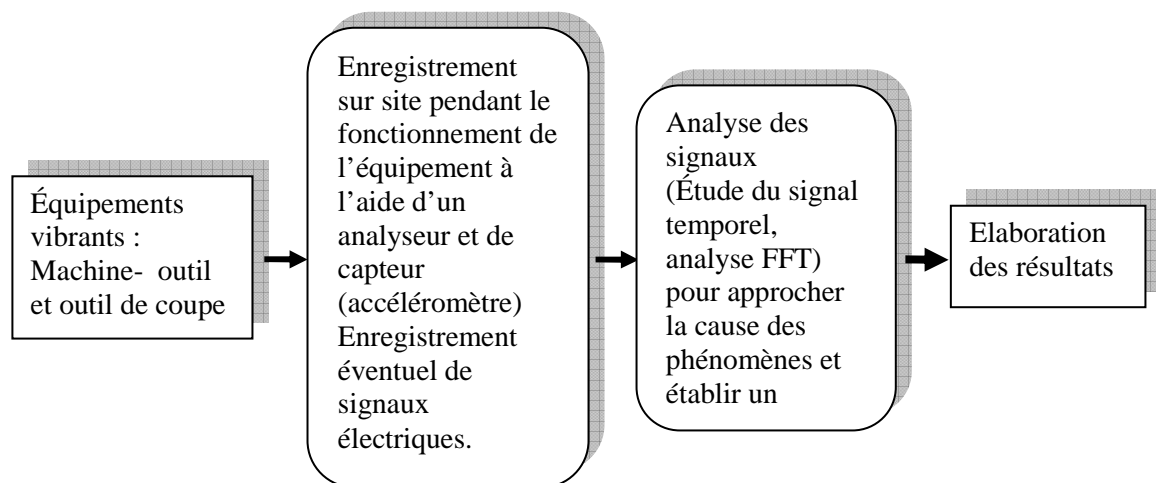
Figure IV.1 : Génération de vibrations

## 4.2. Objectifs

Notre travail a pour buts de :

- D'enregistrer et d'étudier les vibrations qui existent sur l'outil avec la variation des régimes de coupe.
- De modéliser la rugosité de surface et l'accélération vibratoire en fonction des paramètres de coupe.
- Etablir la loi qui lie les phénomènes vibratoires aux valeurs de rugosité des surfaces usinées en opération de tournage.
- Proposer un système de diagnostic en utilisant l'analyse vibratoire, ce système est composé d'une chaîne d'acquisition et d'un traitement statistique du signal.

**Schéma du diagnostic vibratoire proposé :**



**Figure IV.2 : Schéma de diagnostic vibratoire**

### 4.3. Données

#### 4.3.1. Matière de la pièce à usiner

Le matériau utilisé est un acier au carbone XC55, c'est un acier utilisé habituellement en construction mécanique, c'est-à-dire dans la fabrication des éléments de machines-outils tels les arbres, les bielles,...etc. Cet acier résiste bien à l'usure, il est souvent utilisé après traitements thermiques.

**Tableau IV.1 : Composition chimique de l'acier XC55.**

élément	C	Mn	P	S	Cu	Ni	Si
(%)	0,54	0,7	0,03	0,015	0,52	0,24	0,35

**Tableau IV.2 : Propriétés mécaniques de l'acier XC55.**

<b>R<sub>0.02</sub></b>	380MPa	Limite élastique conventionnelle
<b>R<sub>m</sub></b>	725MPa	Contrainte maximale
<b>A%</b>	15	Allongement à la rupture

#### Dimensions de la pièce

La pièce utilisée est un cylindre de longueur 300 mm et de diamètre 50 mm, divisée en huit paliers.

- Nombres de paliers : huit paliers.
- Longueur de palier : 20 mm.
- Gorge : (5 mm×5 mm) de longueur et de profondeur.

#### 4.3.2. Outil de coupe

L'outil de coupe utilisé est un outil à plaquette rapportée en carbure métallique non revêtu de nuance P10 (norme ISO).

Le carbure non revêtu est obtenu par frittage (métallurgie des poudres) de substance dure (carbure de tungstène, de titane, ...) et de substance liante (cobalt) qui confère sa ténacité à la plaquette. Ce carbure non revêtu est aujourd'hui utilisé dans des opérations spéciales, hors du domaine standard.

**Tableaux IV.3 : Composition chimique du carbure P10.**

Composition	Co	WC	(Ti-W)C
%	6.00	56.2	37.8

Autres éléments chimiques	Carbone totale (%)	Carbone libre (%)	Oxygène (%)	Titane (%)
%	7.4-8.0	≤0.3	≤0.8	11.7-12.5

**Tableau IV.4 : Conditions d'élaboration des plaquettes de type P10.**

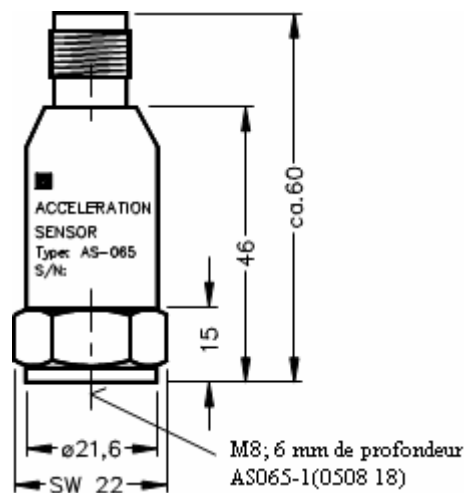
<b>Température de frittage (°C)</b>	1520
<b>Temps de broyage (heures)</b>	72
<b>Type de broyage</b>	Humide (Alcool)

**Tableau IV.5 : Caractéristiques techniques du carbure P10.**

<b>Dureté (HRA)</b>	91
<b>Densité (g/cm<sup>3</sup>)</b>	11,7
<b>Résistance à la rupture (N/mm<sup>2</sup>)</b>	1550
<b>Rétrécissement (%)</b>	1,22

#### 4.3.3. Capteur utilisé

Dans notre travail, on a utilisé un capteur de type accéléromètre piézo-électrique avec amplificateur de charge intégré SENSOR type : AS-065, S/N 0022FUUC, cet accéléromètre est utilisé pour la mesure de l'accélération vibratoire. Il peut être raccordé, par exemple, au collecteur - analyseur VIBROTEST 60. [37]

**Figure IV.1 : Accéléromètre AS-065**

**Tableau IV.6 : Caractéristiques techniques du capteur.**

<b>Facteur de transmission</b>	100 mV/g $\pm 5 \%$
<b>Plage de température de travail</b>	-50 °C.....120°C
<b>Plage de température de stockage</b>	-50 °C.....120°C
<b>Plage de mesure</b>	$\pm 80$ g ( $U_B = +24$ V...+30 V) $\pm 40$ g ( $U_B = +20$ V)
<b>Plage de fréquence</b>	3 Hz ...10 kHz ( $\pm 0,5$ dB) 1 Hz ... 15 kHz ( $\pm 3$ dB )
<b>Alimentation en courant constant <math>I_B</math></b>	4 mA (2 mA ... 10 mA )
<b>Tension d'alimentation <math>U_{max}</math></b>	+24 V (+18 V ... +30 V)
<b>Poids</b>	80 g
<b>Sensibilité au champ magnétique</b>	< 0,003 g/mT

**Principe de fonctionnement et de mesure du capteur**

Le capteur ou l'accéléromètre type AS065 fonctionne suivant le principe de compression piézo-électrique. Les disques piézo-céramiques avec une masse forment à l'intérieur du capteur un système d'amortissement précontraint à l'aide d'un ressort.

Lorsque des vibrations agissent sur ce système, la masse exerce une force alternante sur les disques céramiques, ce qui provoque des charges électriques par suite de l'effet piézo-électrique. Ces variations de charge sont proportionnelles à l'accélération. Un amplificateur de charge intégré permet de relever le signal de sortie à un niveau utile.

L'accéléromètre AS-065 est à monter à l'aide d'une goupille fileté jointe à la fourniture [37]

**4.3.4. Machine-outil :**

La machine-outil utilisée pour nos essais est le tour parallèle type SN 40C.

**Tableau IV.7 : Caractéristiques de la machine outil**

	Avance (mm/tr)	Vitesse de rotation (tr/min)	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Puissance (Kw)
Maximum	6,4	2000	500	1500	6,6
Minimum	0,05	22,4	-	-	-

### 4.3.5. Module d'alimentation

C'est un module d'alimentation standard de (24 à 30) V, il a été conçu et réalisé par l'étudiant en Ingénierat option Productique du Département Génie Mécanique de l'Université de Annaba. [30]

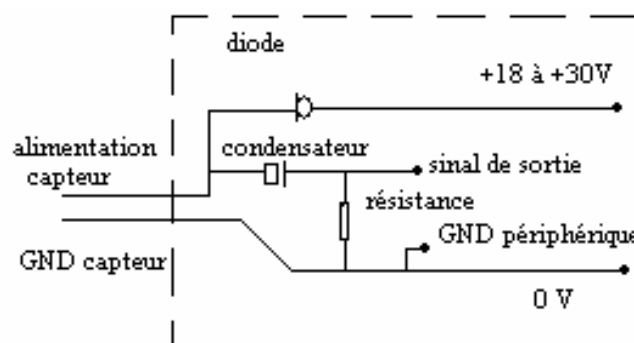


**Figure IV.2 : Photo du module d'alimentation.**

Il est composé de :

- Transformateur : 220 V ~ / 24 V ---, de [0 V et (+18 V à +30V)], son rôle est de fournir la tension nécessaire au système.
- Résistance :  $R= 200\text{ K}\Omega$ , elle tire le courant pour rendre la diode passante et de ce fait alimenter le capteur.
- Diode de (0,5 à 8) mA : elle évite le courant de passer dans le sens inverse (vers le PC).
- Condensateur : il récupère le signal et le renvoi vers la sortie.

Le module d'alimentation est monté suivant ce schéma :



**Figure IV.3 : Schéma de montage électrique du module d'alimentation.**

**4.3.6. Application « MécaSim » :**

« MécaSim », qui signifie : Simulation Mécanique, est un programme développé par cet étudiant en Ingénierat Productique de notre Département de Mécanique. Il contient plusieurs composantes logicielles de :

- Traitement numérique du signal.
- Affichage du signal et simulation graphique.
- Algorithme, traitement statistique, création de graphes et calculs matriciels (mathématiques).
- Gestion : des outils, matériaux, et machines outils.
- Sauvegarde des paramètres et résultats des essais (base de données).

**Remarque**

Nous avons donc utilisé cette application seulement pour l'enregistrement des spectres des vibrations ou signaux vibratoires durant les essais d'usinage aux différents régimes de coupe, c'est-à-dire la dernière composante de ce logiciel.

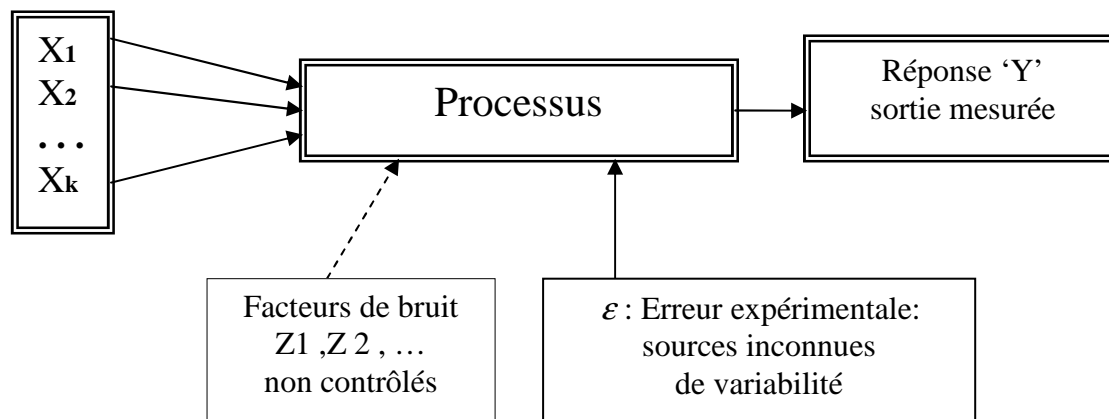
## 5. Plan d'expérience

**5.1. Définition :** l'étude d'un phénomène peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante :

On s'intéresse à une grandeur,  $Y$  que nous appellerons par la suite :réponse qui dépend d'un grand nombre de variables,  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , que nous appellerons par la suite facteurs.

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction  $f$  telle que  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ .

Une méthode classique d'étude consiste en la mesure de la réponse  $Y$  pour plusieurs valeurs  $X_i$  tout en laissant fixe la valeur des  $(n-1)$  autres variables. On itère alors cette méthode pour chacune des variables. [38] [39] [40]



**Figure V.1 : Schéma des paramètres liés au processus d'usinage**

Pour notre étude, nous avons utilisé un plan d'expérience factoriel complet de  $2^3$  [39], c'est à dire 8 essais, obtenu donc avec 2 niveaux de variations (un maxi et un mini) et 3 paramètres d'influence qui sont les paramètres du régime de coupe : vitesse, avance et profondeur de passe.

**Tableau V. 1 : Matrice du plan factoriel complet utilisé  $2^3$**

Matrice 8 essais								
	facteurs			effets				réponse
essais	A	B	C	AB	BC	AC	ABC	Y
1	-	-	-	+	+	+	-	$Y_1$
2	+	-	-	-	-	+	+	$Y_2$
3	-	+	-	-	+	-	+	$Y_3$
4	+	+	-	+	-	-	-	$Y_4$
5	-	-	+	+	-	-	+	$Y_5$
6	+	-	+	-	+	-	-	$Y_6$
7	-	+	+	-	-	+	-	$Y_7$
8	+	+	+	+	+	+	+	$Y_8$



-Propriétés de plan d'expérience [38] [39] [40] :

- facteurs varient à 2 modalités (- = min et + = max)
  - chaque colonne : 4 + et 4 -
- équilibre : les 4 paires (+ , + ) ( + , - ) ( - , + ) ( - , -), sont présentes dans 2 colonnes quelconques.
- possibilité d'exploiter la matrice avec 4 / 5 / 6 / 7 facteurs.

## 5.2. Expériences préliminaires

-on a fait des expériences préliminaires pour obtenir une rugosité de surface environ de (0,25 à 0,3)  $\mu\text{m}$ ,

-L'outil de coupe utilisé est un outil à plaquette en carbure métallique (carrée) non revêtue

-régime de coupe :

- vitesse de coupe  $V_c = 1400$  tr/min
- vitesse d'avance  $V_a = 0.05$  mm/min
- profondeur de passe  $P = 0.5$  mm

N° du palier	Rugosité moyenne
1	3.673
2	3.486
3	3.636
4	3.276
5	2.943
6	2.810
7	2.760
8	2.250

Après cette homogénéisation des états de surfaces, des chanfreins ont été aussi réalisés sur chaque palier afin de faciliter la pénétration et le premier contact outil - matière.

## 5.3. Résultats expérimentaux des rugosités mesurées de surfaces et des accélérations vibratoires enregistrées

**Tableau V. 3 : Limites des paramètres des régimes de coupe utilisés**

	V (tr/min)	a (mm/tr)	p (mm)
Min	1000	0,11	0,125
Max	1400	0,20	0,375

**Tableau V. 4 : Matrice des essais avec différents régimes de coupe aux paramètres pris dans les limites**

<b>Essais</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>a (mm/tr)</b>	<b>p (mm)</b>
1	179,07	0,11	0,125
2	250,69	0,11	0,125
3	179,07	0,20	0,125
4	250,69	0,20	0,125
5	179,07	0,11	0,375
6	250,69	0,11	0,375
7	179,07	0,20	0,375
8	250,69	0,20	0,375

**Tableau V. 5 : Rugosités et accélérations vibratoires moyennes obtenues ou Réponses**

<b>Numéro du palier</b>	<b>Rugosité moyenne finale (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Accélération moyenne (<math>\text{mm/s}^2</math>)</b>
1	3,343	143.7157
2	3,633	142.8406
3	3,660	142.7785
4	2,906	143.0949
5	2,743	142.7139
6	2,770	143.1995
7	2,773	143.1989
8	2,653	143.0006

## 6. Résultats, analyse et traitement

### 6.1. Résultats des spectres vibratoires et des FFT enregistrés pour différents régimes de coupe expérimentés :

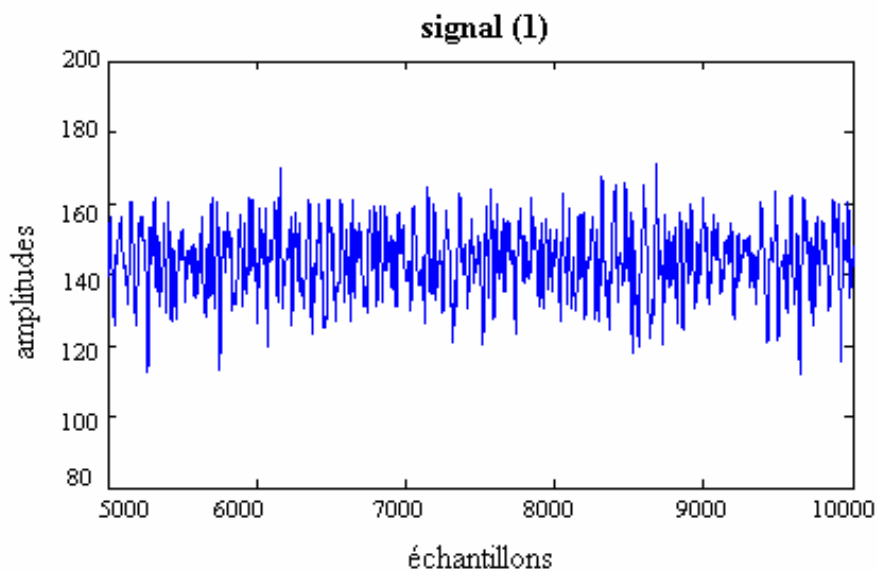
Nous présentons ici les spectres des vibrations enregistrés lors des opérations de chariotage réalisées sur les paliers de l'ébauche et leurs transformées de Fourier.

Il faut noter que tous les signaux ont été enregistrés dans l'intervalle [5000,10000] échantillons.

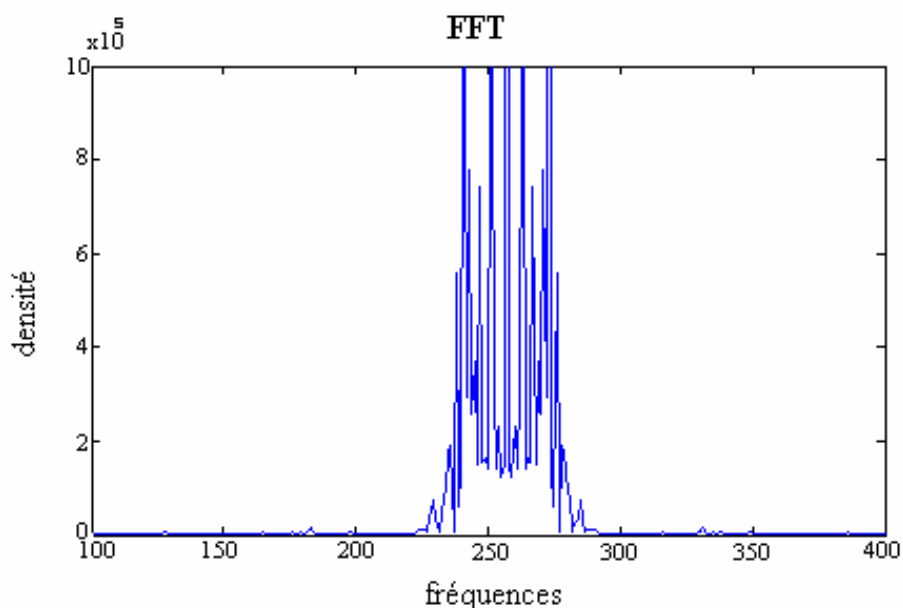
#### Régime 1

**Tableau VI.1 : Régime 1**

v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
179,07	0,11	0,125



**Figure VI.1 (a) : Spectre 1**



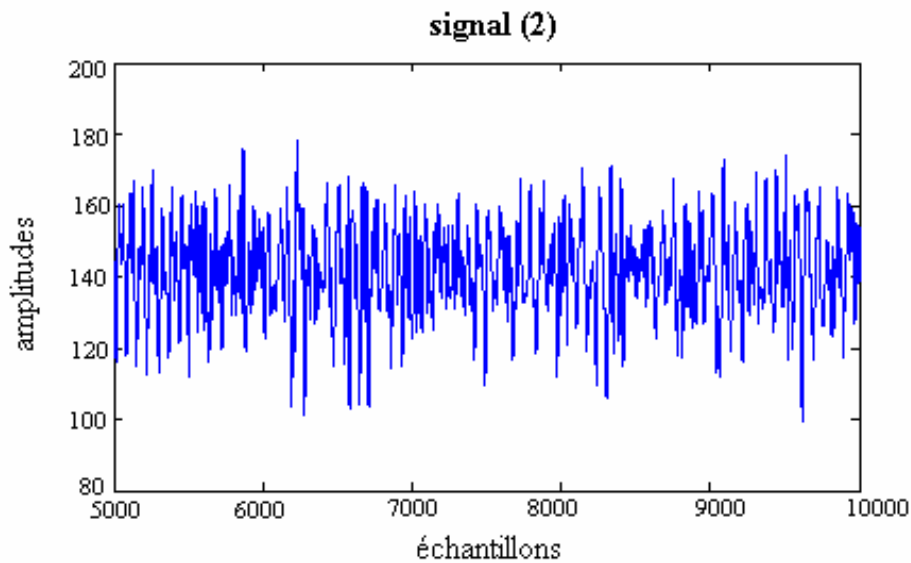
**Figure VI.1 (b) : FFT 1**

Nous remarquons, pour ce régime, que l'accélération vibratoire varie entre la valeur de 110 et 170  $\text{mm/s}^2$  et que la fréquence est d'environ 380 Hz, sa densité spectrale est très faible. L'accélération vibratoire moyenne enregistrée est donc de 145  $\text{mm/s}^2$ , alors que sa valeur moyenne calculée est de 143,7157  $\text{mm/s}^2$ .

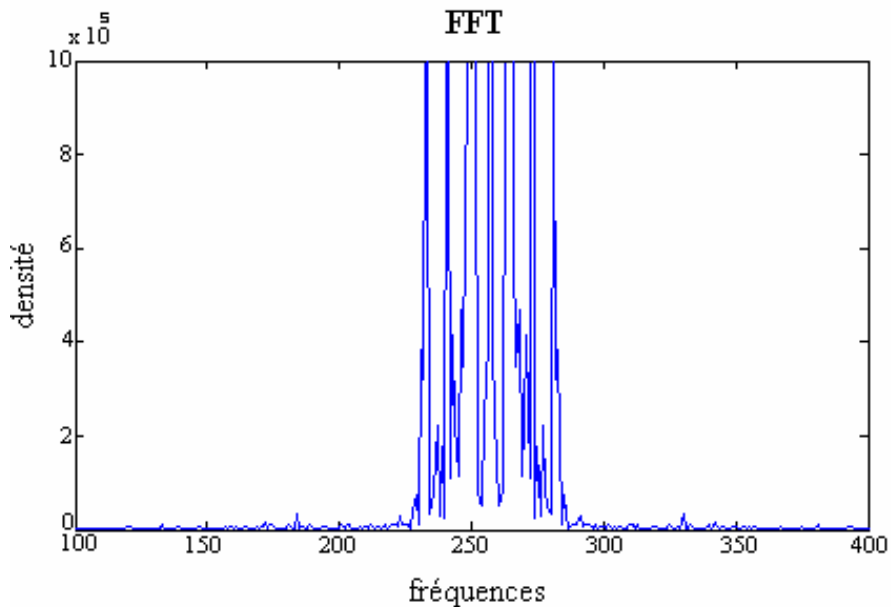
### Régime 2

**Tableau VI.2 : Régime 2**

v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
250,69	0,11	0,125



**Figure VI.2 (a) : Spectre 2**

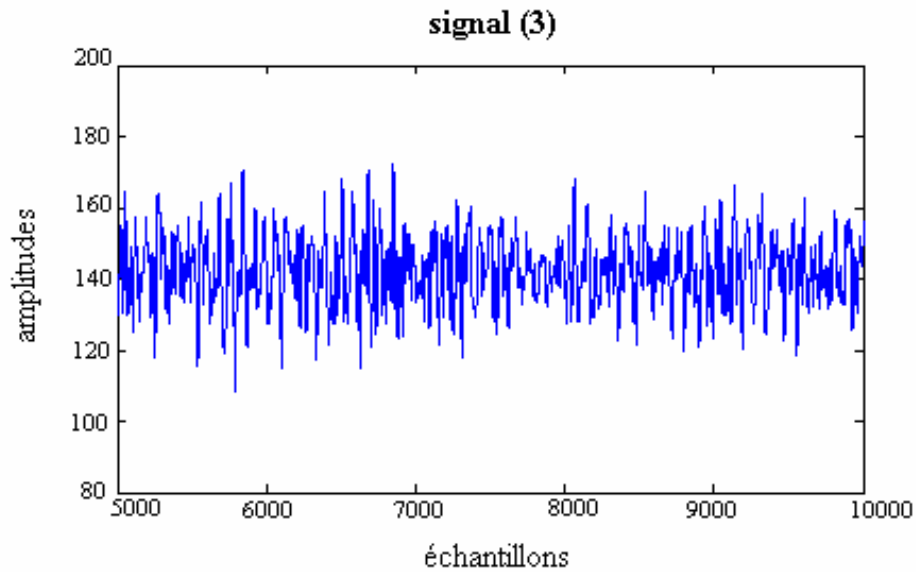
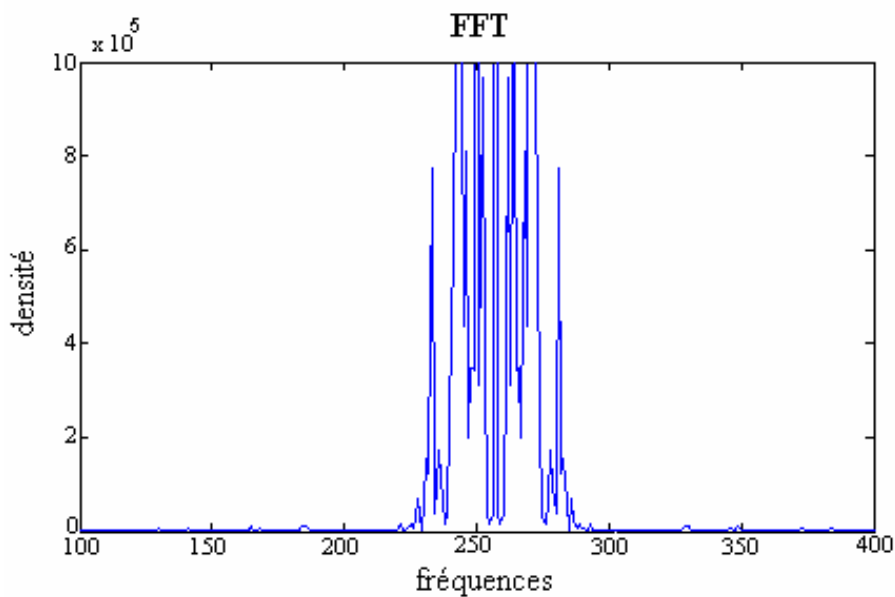


**Figure VI.2 (b) : FFT 2**

L'accélération oscille dans un intervalle de 98 à 178  $\text{mm/s}^2$ , cette accélération est plus grande que l'accélération du premier régime. Sa fréquence varie autour de 390Hz. L'accélération moyenne est de 138  $\text{mm/s}^2$ .

**Régime 3****Tableau VI.3 : Régime 3**

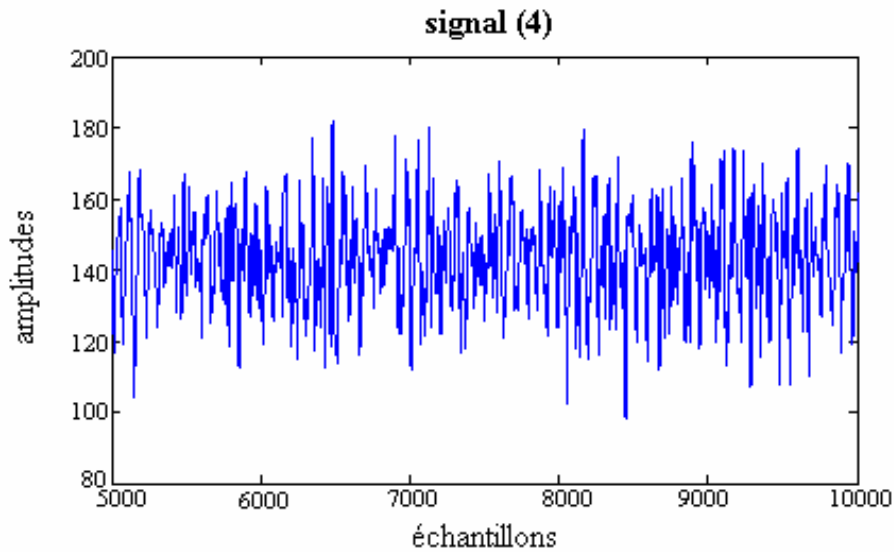
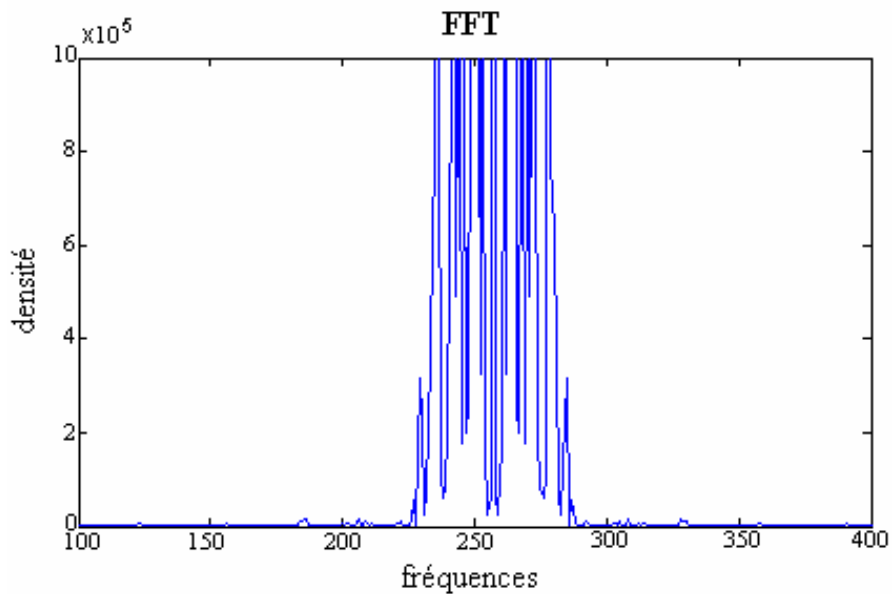
v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
179,07	0,20	0,125

**Figure VI.3 (a) : Spectre 3****Figure VI.3 (b) : FFT 3**

L'accélération varie de 115 à 170 mm/s<sup>2</sup> alors que la fréquence de 370 à 385 Hz. Les valeurs de ces variations sont presque identiques à celles du régime 1. L'accélération moyenne est de 142,5 mm/s<sup>2</sup>.

**Régime 4****Tableau VI.4 : Régime 4**

v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
250,69	0,20	0,125

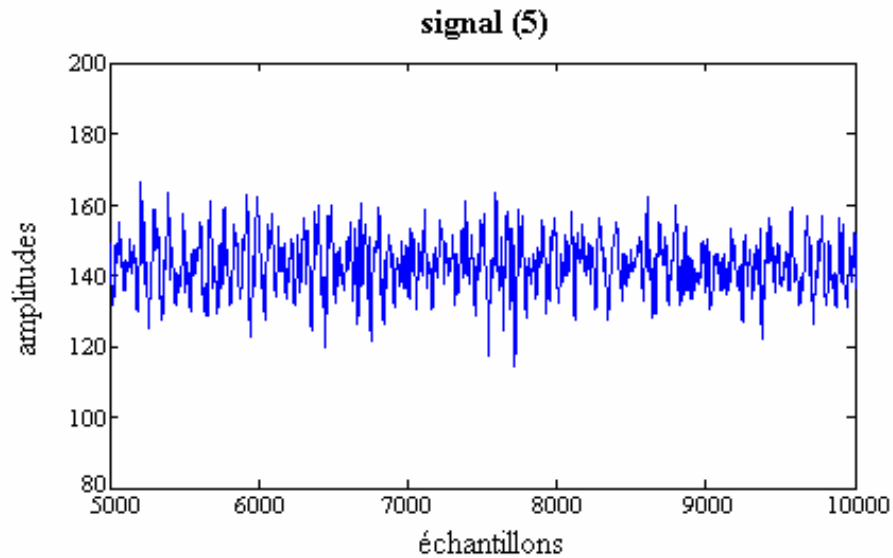
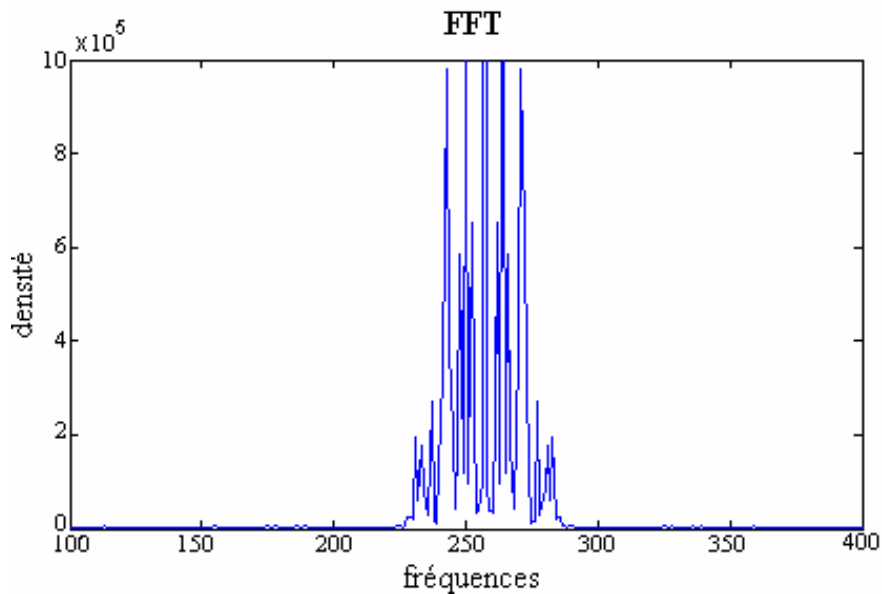
**Figure VI.4 (a) : Spectre 4****Figure VI.4 (b) : FFT 4**

Pour ce régime, on remarque que le signal est beaucoup plus bruité par rapport à celui des trois régimes précédents, les valeurs de son accélération sont comprises entre 96 et 180  $\text{mm/s}^2$ , la fréquence est de 385 Hz.

L'accélération vibratoire moyenne est de 138  $\text{mm/s}^2$ .

**Régime 5****Tableau VI.5 : Régime 5**

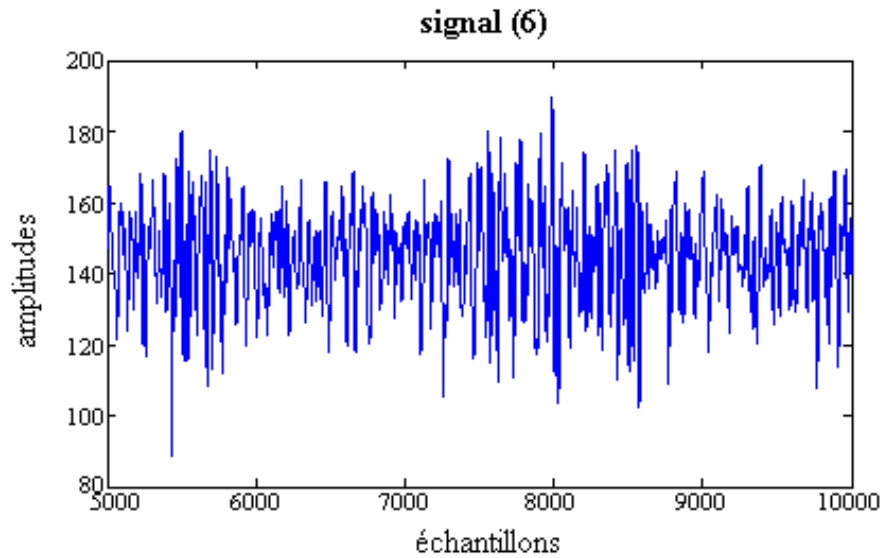
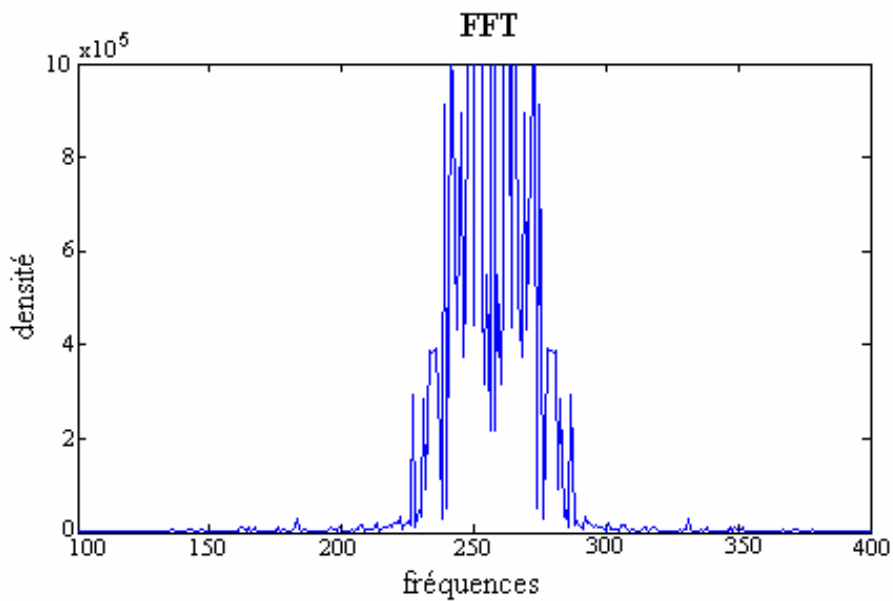
v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
179,07	0,11	0,375

**Figure VI.5 (a) : Spectre 5****Figure VI.5 (b) : FFT 5**

La vibration est beaucoup moins bruitée que dans le régime précédent, les valeurs de l'accélération sont comprises entre 119 et 165 mm/s<sup>2</sup>. La fréquence est de 360 Hz. L'accélération vibratoire moyenne est de 142 mm/s<sup>2</sup>.

**Régime 6****Tableau VI.6 : Régime 6**

v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
250,69	0,11	0,375

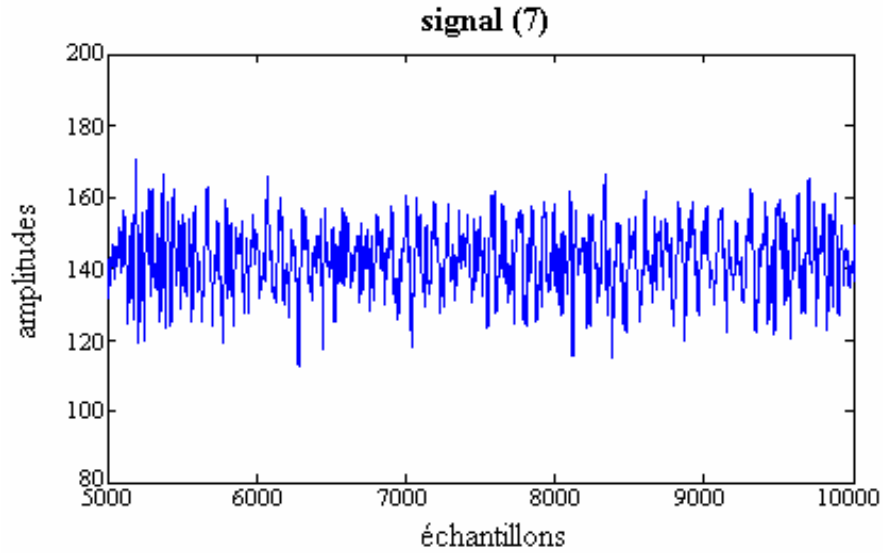
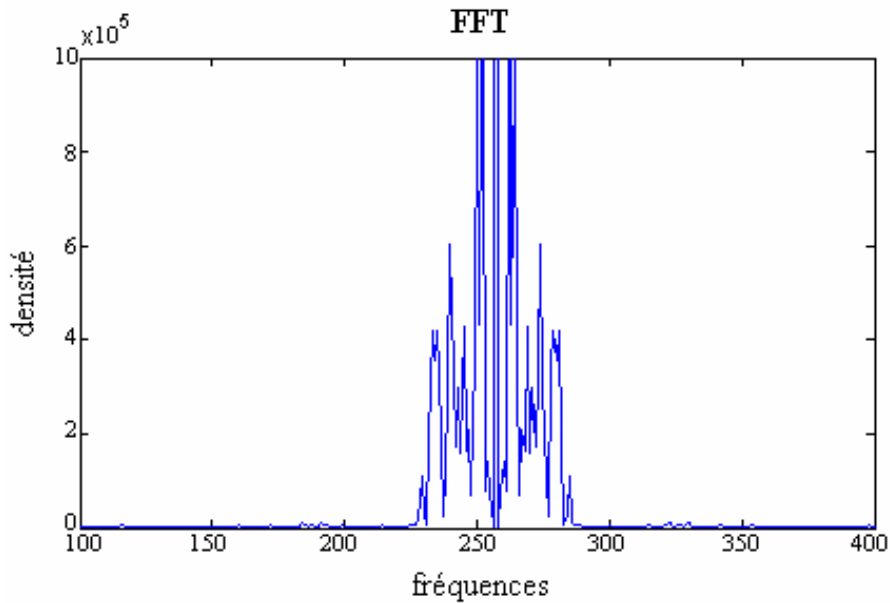
**Figure VI.6 (a) : Spectre 6****Figure VI.6 (b) : FFT 6**

Ce régime a aussi produit un signal bruité comme au régime 4, l'intervalle de l'accélération est de 88 à 187  $\text{mm/s}^2$ , et celui de la fréquence est de 365 à 370 Hz. L'accélération vibratoire moyenne est de 137.5  $\text{mm/s}^2$ .



**Régime 7****Tableau VI.7 : Régime 7**

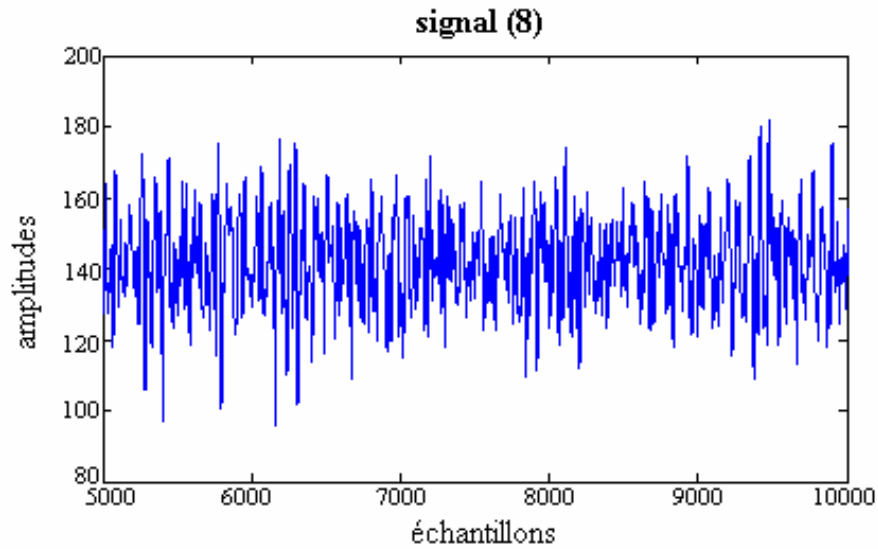
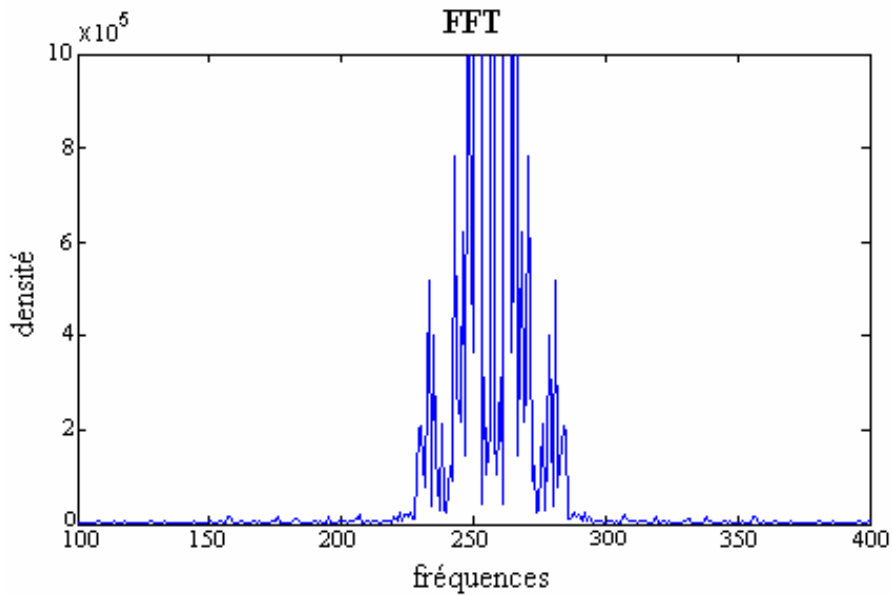
v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
179,07	0,20	0,375

**Figure VI.7 (a) : Spectre 7****Figure VI.7 (b) : FFT 7**

La valeur de l'accélération obtenue par ce régime est presque la même que celle obtenue avec le premier régime, alors que la fréquence tend vers 400Hz.

**Régime 8****Tableau VI.8 : Régime 8**

v (m/s)	a (mm/tr)	p (mm)
250,69	0,20	0,375

**Figure VI.8 (a) : Spectre 8****Figure VI.8 (b) : FFT 8**

Le 8<sup>ème</sup> régime a produit, à peu près, la même valeur de la fréquence que celle du 7<sup>ème</sup> régime, la variation de l'accélération vibratoire est de 96 à 180 mm/s<sup>2</sup>. L'accélération vibratoire moyenne est de 138 mm/s<sup>2</sup>.

### Discussions sur les spectres enregistrés et leurs paramètres

Il y a concordance des valeurs estimées et calculées de l'accélération vibratoire. En effet, les valeurs moyennes estimées de l'accélération vibratoire des 8 régimes sont, à peu près, identiques aux valeurs moyennes calculées numériquement.

D'une manière générale, les signaux sont plus ou moins bruités, en particulier avec les régimes 4 et 6. Ces bruits, irréguliers et aléatoires, ne peuvent être totalement éliminés, mais réduits en utilisant un filtrage sur le signal. Les accélérations s'amplifient avec l'augmentation de la vitesse de coupe, c'est à dire pour  $V_c = 250$  m/s, les accélérations varient de 88 à 185  $\text{mm/s}^2$ , ce qui est bien indiqué par le régime 6. Par contre la fréquence varie très peu et de manière irrégulière par rapport à la vitesse de coupe.

On remarque que la fréquence augmente avec l'augmentation de l'avance ce qui est bien enregistré dans les régimes 7 et 8. Par contre la variation de la profondeur de passe dans les différents régimes n'a aucune influence sur l'accélération vibratoire ni sur la fréquence. Dans le régime le plus sévère ( $V_c = 250$  m/s,  $a = 0.2$  mm/tr et  $p = 0.375$  mm), on a enregistré une amplification de l'accélération et une fréquence assez importantes. On peut déduire que les paramètres de coupe dynamiques influent directement sur l'accélération vibratoire et sa fréquence.

### 6.2. Modélisation de la rugosité de surface et de l'accélération vibratoire

Le modèle du plan factoriel complet  $2^k$  est un polynôme de premier degré [41] :

$$Y = a_0 + a_i X_i + \dots + a_{ij} X_{ij} + \dots + a_{ijk} X_{ijk} \quad (\text{VI-1})$$

A partir de ce polynôme, on a modélisé les deux réponses qui sont :

- rugosité de la surface usinée ( $\mu\text{m}$ ).
- l'accélération vibratoire ( $\text{m/s}^2$ ).

On donne le modèle pour notre plan  $2^3$ , et la formule devient comme suit :

$$Y = a_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_{2,3} + a_6 X_{3,4} + a_7 X_{2,4} + a_8 X_{2,3,4} \quad (\text{VI-2})$$

Où :

- Y : la réponse (rugosité et l'accélération).
- $a_1, a_2, \dots, a_8$  : les coefficients du modèle.
- $X_{2,3}, X_{3,4}, X_{2,4}, X_{2,3,4}$  : les interactions des paramètres de coupe.
- $X_2$  : la vitesse de coupe.
- $X_3$  : l'avance.
- $X_4$  : la profondeur de passe.

L'équation (VI-2) peut être écrite sous forme matricielle :

$$[Y] = [X] \cdot [a] \quad (\text{VI-3})$$

Où :

- ❖ [Y] : matrice colonne de la rugosité de surface et de l'accélération vibratoire.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{bmatrix}$$

- ❖ [X] : matrice d'expérience

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

- ❖ [a] : matrice colonne des coefficients

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix}$$

Il suffit de déterminer les coefficients  $a_i$  / ( $i=1, \dots, 8$ ), on multiplie [X]<sup>-1</sup> dans les deux membres de la formule (VI-3) :

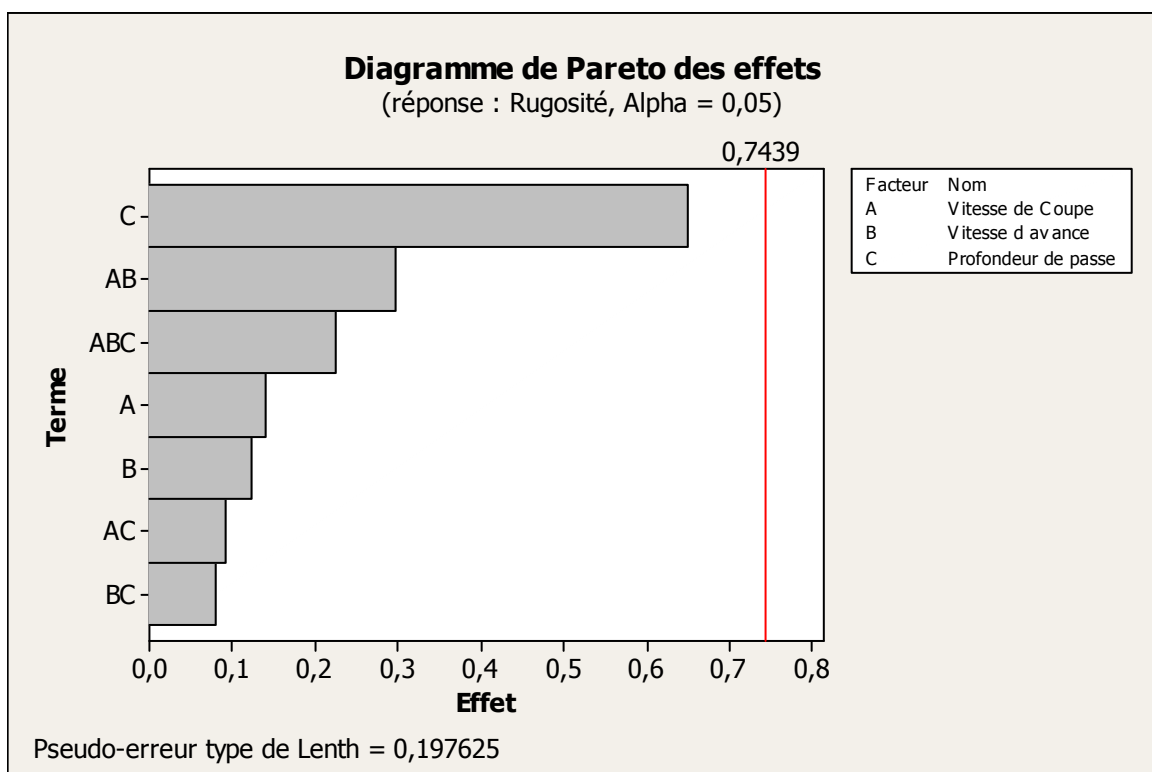
$$[Y] = [X] [a] \Rightarrow [X]^{-1} [Y] = [X]^{-1} [X] [a] \Rightarrow [a] = [X]^{-1} [Y]$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{bmatrix}$$

Pour effectuer ces calculs matriciels et obtenir les modèles, le programme « Matlab » a été utilisé. Il nous a donné les résultats ci-dessous.

### Modèle de la rugosité de surface usinée

$$R_a = 3.0601 - 0.0696 v - 0.0621 a - 0.3254 p - 0.1489 v a + 0.0464 a p + 0.0404 v p + 0.1121 v a p \quad (\text{VI-4})$$

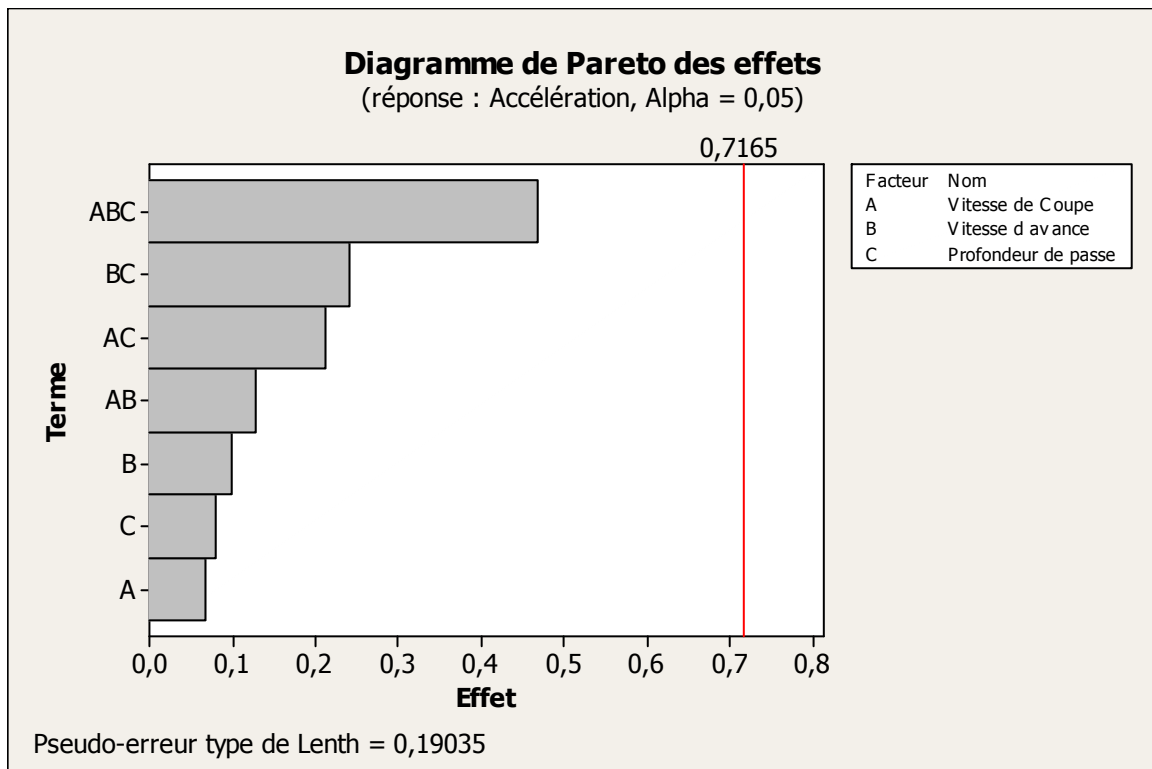


**Figure VI.9 : Diagramme de Pareto (rugosité)**

**Modèle de l'accélération vibratoire**

$$A=143,0655 - 0,0334 v - 0,0485 a - 0,0387 p + 0,0629 v a + 0,1050 a p + 0,1204 v p - 0,234 v a p$$

(VI-5)



**Figure VI.10 : Diagramme de Pareto (accélération vibratoire)**

**Discussion sur les modèles obtenus Ra et A**

Le modèle de rugosité obtenu permet de déduire que les paramètres de régime de coupe ( $v$ ,  $a$ ,  $p$ ) sont inversement proportionnels à la rugosité ( $R_a$ ). ceci confirme la règle de détérioration des états de surfaces avec les vitesses de coupe et d'avances faibles.

Pour ce qui est de l'ordre de l'influence des paramètres. D'après le modèle de rugosité obtenu et d'après le diagramme de paréto (fig. VI.10), la profondeur de passe a une influence sur la rugosité très importante, elle est suivie de l'interaction de vitesse-avance, de l'interaction vitesse-avance-profondeur de passe, de la vitesse de coupe, de l'avance et enfin des interactions vitesse-profondeur de passe et avance-profondeur de passe.

Le modèle de l'accélération vibratoire, quant à lui, nous a permis de déduire que les paramètres de coupe ont une influence aussi inversement proportionnelle sur l'accélération vibratoire.

C'est à dire si on démine un des paramètres, par exemple la vitesse ou l'avance, l'accélération vibratoire augmente. Pour ce qui est de l'ordre de l'influence, on a enregistré :

1. Interaction vitesse - avance-profondeur de passe.
2. Interaction avance - profondeur de passe.
3. Interaction vitesse - profondeur de passe.
4. Interaction vitesse – avance.
5. vitesse d'avance.
6. profondeur de passe.
7. vitesse de coupe.

Parmi les paramètres du régime de coupe individualisés, on note en premier l'influence de l'avance, en suite la profondeur de passe et enfin la vitesse de coupe.

### **6.3. Interpolation au sens des moindres carrés**

L'objectif principal de l'interpolation est d'interpoler des données connues à partir des points discrets. Dans ce cas, la valeur de la fonction entre ces points peut être estimée. Cette méthode d'estimation peut être étendue et utilisée dans divers domaines ; à savoir la dérivation et l'intégration numérique des polynômes. [43]

Dans le domaine de l'analyse numérique des données, on a souvent besoin d'établir un modèle mathématique liant plusieurs séries de données expérimentales. L'interpolation polynomiale consiste à approcher la courbe liant les deux séries de mesures par un polynôme. Les coefficients optimaux de ce polynôme sont ceux qui minimisent la variance de l'erreur d'interpolation. Ce principe est connu sous le nom de la méthode des moindres carrés.

#### **6.3.1. Méthode des moindres carrés**

La méthode des moindres carrés, indépendamment élaborée par Gauss et Legendre, permet de comparer des données expérimentales, généralement entachées d'erreurs de mesure à un modèle mathématique censé décrire ces données. Ce modèle peut prendre diverses formes : linéaire, polynôme,...etc. La méthode des moindres carrés permet alors de minimiser l'impact des erreurs expérimentales en « ajoutant de l'information » dans le processus de mesure. [42]  
Soit le modèle complet :

$$y_i = a_0 + a_1x_{i,1} + \dots + a_px_{i,p} + \epsilon_i \quad (\text{VI-6})$$

Après estimation des paramètres, on obtient :

$$\hat{y}_i = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_{i,1} + \dots + \hat{a}_px_{i,p} \quad (\text{VI-7})$$

Soit :

$$\hat{\epsilon}_i \equiv y_i - \hat{y}_i \quad (\text{VI-8})$$

Les résidus estimés sont les différences entre les valeurs de y observées et estimées.

Le principe des moindres carrés consiste à rechercher les valeurs des paramètres qui minimisent la somme des carrés des résidus.

$$\min \sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2 = \min_{\hat{a}_0, \dots, \hat{a}_p} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{a}_0 - \hat{a}_1 x_{i,1} - \dots - \hat{a}_p x_{i,p})^2 \quad (\text{VI-9})$$

Ce qui revient à rechercher les solutions de :

$$\frac{\partial(\sum \hat{\epsilon}_i^2)}{\partial \hat{a}_j} = 0 \quad (\text{VI-10})$$

Nous avons  $j = p + 1$  équations, dites équations normales, à résoudre. ?  
La solution obtenue est l'estimateur des moindres carrés ordinaires, il s'écrit :

$$\hat{a} = (X'X)^{-1} X'Y \quad (\text{VI-11})$$

Avec  $X'$  la transposée de  $X$ , dite : matrice de Vandermonde.

Le coefficient de corrélation multiple est défini comme suit :

$$R^2 = \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad \Rightarrow \quad R = \sqrt{R^2} \quad (\text{VI-12})$$

Ou :

$$SCE = \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{VI-13})$$

Est la somme des carrés expliqués,

$$SCT = \sum_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{VI-14})$$

La somme des carrés totaux,

Et

$$SCR = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{VI-15})$$

La somme des carrés résiduels.



#### 6.4. Applications de la méthode des moindres carrés

Les variables  $x_{i,1} \dots \dots x_{i,p}$  sont les valeurs de l'accélération moyenne mesurée :

$$x = [143.7157, 142.8406, 142.7785, 143.0949, 142.7139, 143.1995, 143.1989, 143.0006]$$

Et les  $y_i$  les valeurs de rugosité mesurée :

$$y = [3.343, 3.633, 3.660, 2.906, 2.743, 2.770, 2.773, 2.653]$$

On obtient enfin, après calculs, un polynôme du 4<sup>ème</sup> degré qui relie la rugosité Ra (Y) à l'accélération vibratoire A (X) :

$$Ra = -1.211 A^4 + 1.472 A^3 + 2.522 A^2 - 0.7805 A + 2.652 \quad (\text{VI-16})$$

#### Détermination du coefficient de corrélation de cette relation

Tableau VI.9 : Ecart entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées

N°	$y_m$	$y_e$	$(y_m - y_e)$	$(y_m - y_e)^2$	$\bar{y}_m$
1	3.343	3.3417	0.0013	0.0000017	3.0601
2	3.633	3.6421	-0.0091	0.000080	
3	3.660	3.5258	0.1342	0.018010	
4	2.906	2.6048	0.3012	0.090700	
5	2.743	2.8107	-0.0677	0.004583	
6	2.770	2.8240	-0.0540	0.002916	
7	2.773	2.8208	-0.0478	0.002284	
8	2.653	2.9104	-0.2574	0.066250	

Alors : SCR = 0.1848

Et SCT = 21.4209

$$R^2 = 1 - (0.1848 / 21.4209) =$$

$$\mathbf{R = 0.99}$$

#### Remarque

Le coefficient de corrélation de la méthode des moindres carrés doit être compris entre  
 $0 \leq R^2 \leq 1$

#### Conclusion

D'après le coefficient de corrélation  $R = 0.99$ , nous pouvons déduire que l'approximation appliquée de la fonction polynomiale est très bonne et la méthode utilisée est donc parfaite.

## 6.5. Vérifications des résultats

### 6.5.1. Vérification du Polynôme

Pour vérifier et contrôler le polynôme obtenu, j'ai utilisé l'algorithme de Horner. Cet algorithme emploie le moins d'opérations pour calculer les images de réels, il utilise  $n$  additions et  $n$  multiplications pour un polynôme de degré  $n$ . Le calcul brutal demanderait  $n$  multiplications pour calculer  $\alpha^n$ , encore  $n$  multiplications pour obtenir chacun des monômes (en supposant qu'on garde en mémoire toutes les puissances de  $\alpha$ ), et encore  $n$  additions, soit  $2n$  multiplications et  $n$  additions. C'est le plus utilisé en informatique.

Schéma de Horner pour l'évaluation d'un polynôme :

Entrées :  $p(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0$ ,  $\alpha \in R$

Sorties :  $f(\alpha)$

$$C_{n-1} = a_n$$

Pour  $i = n-1$  jusqu'à  $i=0$

Faire

$$C_i = a_{i+1} + \alpha C_{i+1}$$

$$f(\alpha) = a_0 + \alpha C_0$$

Fin

Soit :  $\alpha = 0.05$

En appliquant l'algorithme d'Horner :

$$C_0 = -1.2110$$

$$C_1 = 1.4114$$

$$C_2 = 2.5926$$

$$C_3 = -0.6509$$

$$C_4 = 2.6195$$

### Remarque

D'après ces calculs, les coefficients calculées ( $C_0, \dots, C_4$ ) par l'algorithme d'Horner sont à peu près égaux aux coefficients du polynôme et il est bien approximé.

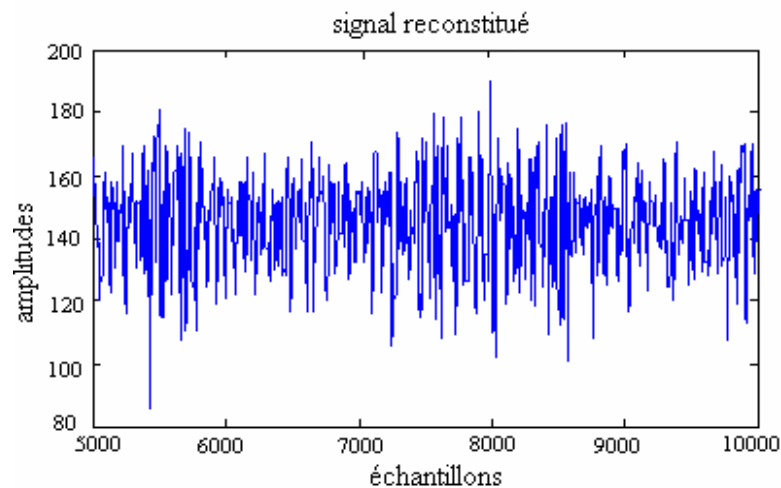
### 6.5.2. Applications du polynôme obtenu

Avec le concours d'un programme qu'on a développé par nos soins et présenté en annexe 4 et aussi avec l'utilisation de Matlab, nous avons pu reconstituer les signaux équivalents, c'est à dire leurs spectres. Des exemples d'application sont présentés ci-contre.

**Exemple** prenons la valeur d'accélération vibratoire  $143.00 \text{ mm/s}^2$ .

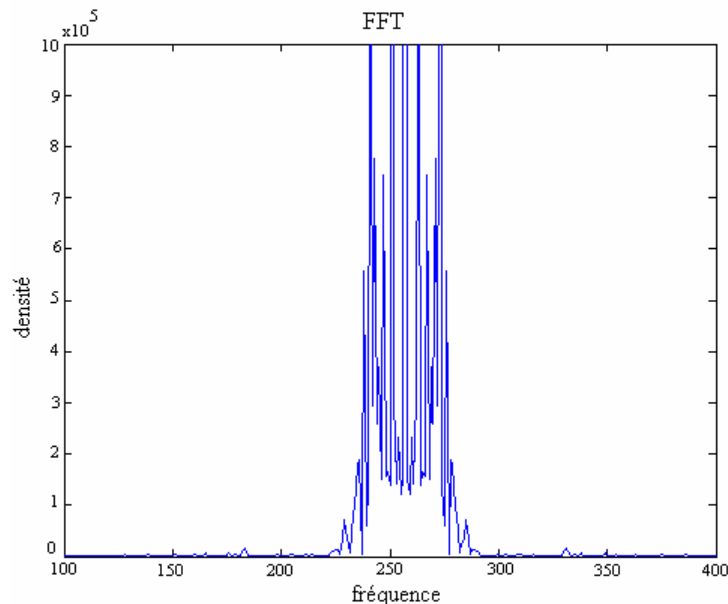
1<sup>ère</sup> étape : depuis la relation obtenue (VI-16), et en utilisant le programme « Matlab », la rugosité calculée est :  $2.91343 \text{ }\mu\text{m}$ .

2<sup>ème</sup> étape : selon le programme établi (annexe 3), le spectre et la FFT seront :



**Figure VI.12 : Spectre reconstitué avec  $A = 143 \text{ mm/s}^2$**

Vérification de la FFT :



**Figure VI.13 : FFT du signal reconstitué**

### Conclusion

A travers cet exemple, on constate que la FFT est pratiquement comme le régime (1) et que le lien établi entre la rugosité et l'accélération vibratoire est bien estimé.

## Conclusion générale

Le travail mené comporte, en fait, plusieurs chapitres dont la moitié a été réservée à la recherche bibliographique. Ce volume important d'entrer en matière est expliqué par la nature du thème. En effet celui-ci comporte la théorie de coupe, l'analyse vibratoire dans le procédé d'usinage. Dans le volet « expérience », les premiers résultats nous ont permis de tirer une constatation intéressante que ce soit par les spectres ou les FFT, une surveillance de l'état de surface par le signal vibratoire est possible.

Après cette déduction, nous avons développé moyennement un traitement du signal, un modèle mathématique de calcul de la rugosité de surface.

Ce modèle nous permet donc d'estimer et de diagnostiquer la rugosité de surface.

Ce travail a été bénéfique à plus d'un titre pour moi, par ce qu'il m'ouvre de grandes perspectives dans le domaine de diagnostic vibratoire, surtout dans la fabrication des pièces mécaniques

## Références bibliographiques

- [1] STEPHANIE COHEN ASSOULINE , P. LORONG , G. COFFIGNAL. Thèse : simulation numérique de l'usinage à l'échelle macroscopique : prise en compte d'une pièce déformable, école nationale supérieure d'arts et métiers (2005).
- [2] BERNARD MARANDET, BENOIT VERQUIN , JEAN SAINT-CHELY, CHERYL ANDERON , MARC RYCKBOER. Cours : Usinage , principes fondamentaux d'usinage définition de l'usinage.
- [3] BOURDET. La coupe des métaux, édition 1977.
- [4] A. CASTELLA. DUPONT. Technologie coupe des métaux, édition Des forges 1976 Paris
- [5] C. MARTY. Industrialisation des produits mécaniques Tome 3 : procédés de fabrication LAVOISIER 1999
- [6] SANDVIK . Techniques modernes d'usinage. Edition Sandvik , 1997.
- [7] ADMIN PASCAL. Tech-05, les outils de coupe.
- [8] Yan Boutin , Ing . Stag , M. Ing. Service d'appui à l'industrie - Usinage haute performance. École Polytechnique de Montréal (514) 340-4711 extension 3933.
- [9] REMADNA, MEDHI. Thèse : Le comportement du système usinant dur. Application au cas d'un acier trempé usinée avec des plaquettes CBN. Institut national des sciences appliquées de Lyon (2001).
- [10] ALEXANDRE TOUMINE. Cours d'usinage. Groupe de conception et de production. INSA de Lyon.
- [11] Frank P. Bowden et David Tabor . Introduction à la tribologie , nature et comportement des surfaces frottantes, aspects géométriques, édition : Heinemann (1973), London.
- [12] MARTIN BENJAMIN, résumé de cours : Défaut de surface ; rugosité.
- [13] GERARD PALU, MICHEL BENOIST. Cours : codification de la qualité, qualité et état de surface, rugosité.
- [14] ALI BENAMAR , GENIVIEVE INGLEBERT, MOHAMED BOUMAH RAT. Article ; durée de vie d'un carbure P20 pour le chariotage d'un acier C38 à rugosité contrôlée, mécanique & Industries (2006).
- [15] HÉLÈNE CHANAL , Pascal RAY , Emmanuel DUC . Thèse : Etude du comportement d'une machine à structure parallèle vis-à-vis des sollicitations de l'usinage, université Blaise Pascal (2005).

- [16] RAFIC YOUNES , JOE CHALFOUN , YASSER ALAYLI, PETER WAGSTAFF  
article ; étude de la stabilité des vibrations de l'usinage , XIV<sup>e</sup> colloque ,vibrations ;  
chocs et bruits, école centrale de Lyon , juin (2004).
- [17] N. OUELAA, N. KRIBES, A. REZAIGUIA, M.A. YALLESE. Article ; étude semi  
expérimentale du comportement vibratoire de l'outil de coupe en chariotage, janvier  
(2001)
- [18] A. BOULENGER, C.PACHAUD. Diagnostic vibratoire en maintenance préventive  
Edition : Dunod, Paris, octobre 1999.
- [19] MICHEAL J. GRIFFIN. Les vibrations : Les risques professionnels , Encyclopédie  
de sécurité et de santé au travail , volume II, édition originale Anglaise établie sous  
la direction de Jeanne Mager Stellman.
- [20] Capteurs et électronique associée. ESIEE-Olivier Français, 2000
- [21] TIWILSON .Capteurs utilisés pour la mesure de signaux dynamiques.Acquisition  
et traitement de signaux dynamiques. National Instruments.
- [22] PAUL – ERIC DUPUIS , technique de l'ingénieur, essais de vibrations, mesures et  
exploitation des résultats, BM 5160 (2000).
- [23] BRUEL & KJAER SCHENCK . Condition Monitoring Systems , vibrations ,  
équilibrage sur site, applications à la maintenance conditionnelle (2001)
- [24] JACQUES MOREL . Technique de l'ingénieur , surveillance vibratoire et  
maintenance prédictive, surveillance vibratoire, BN 6100,
- [25] OLIVIER RIOU , cours : aides au diagnostic , analyse vibratoire , choix de la  
méthode de surveillance.
- [26] PHILIPPE ESTOCQ , CHEVALIER LUC , MARCHE PIERRE . Thèse ; une  
approche méthodologique numérique et expérimentale d'aide à la détection et au  
suivi vibratoire de défauts d'écaillage de roulements à billes , Université de Reims  
Champagne Ardenne décembre (2004).
- [27] JEAN CATALIFAUD. Acoustique industrielle , analyse . METRAVIB RDS.
- [28] JACQUES MOREL, surveillance vibratoire et maintenance prédictive, technique  
de l'ingénieur, BM 5148 (2005).
- [29] OLIVIER RIOU . Cours : Aide au diagnostic , présentation de la surveillance  
vibratoire , Portail Réseau maintenance , Association française des ingénieurs et  
responsables de Maintenance.
- [30] DAHMANE MALEK, BOUCLAGHEM ABDELAZIZ. Mémoire : diagnostic et  
simulation d'usure d'outil (2005).

- [31] TAHMI RAOUF, I. BELAIDI. Thèse : conception optimisée d'un réseau de neurone pour la surveillance en ligne de l'usure des outils coupants (2006).
- [32] ABDELDJALIL OUAHABI, WAFAA RMILI & ROGER SERRA. Article : Analyse temps-fréquence appliquée aux signaux vibratoires relevés en tournage 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique , Grenoble , (août 2007).
- [33] WAFAA RMILI , ROGER SERRA & ABDELDJALIL OUAHABI. Publication : Contribution à l'étude de la surveillance de l'usure des outils de coupe en usinage 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique , Grenoble , (août 2007).
- [34] ALAIN GIRAUDEAU , MOHAMED EI MANSORI , publication ; la réponse en fréquence comme signature d'usinabilité , revue : Mécanique & Industries 8 , 529-536 (2007).DOI: 10.1051/meca:2007076.
- [35] CLAUDIU-FLORINEL BISU , PHILIPPE DARNIS , JEAN-YVES K'NEVEZ OLIVIER CAHUC, RAYNALD LAHEURTE, ALAIN GÉRARD, CONSTANTIN ISPAS , publication ; nouvelle analyse des phénomènes vibratoires en tournage, revue : Mécanique et industries ISSN 1296-2139.
- [36] ABDELKRIM MOURAD , MOURAD BRIOUA , RACHID BENBOUTA , mémoire ; étude de l'influence de la température de coupe dans l'usure des outils et sur les caractéristiques métallurgiques des alliages usinés ( 2008 ).
- [37] BRUEL & KJAER SCHENCK , Condition Monitoring Systems , VIBRO GmbH, Acceleration Sensor AS – 065.
- [38] JACQUES GOUPY. Cours : les plans d'expériences, Revue MODULAD (2006)
- [39] BERNARD CLEMENT. Cours : introduction à la planification d'expériences (2006)
- [40] ALAIN LAMURE. Cours : méthodologie des plans d'expériences, plans factoriels Complets
- [41] V. LEGAT. Mathématiques et méthodes numériques ( 2004 ).
- [42] GREGORY VIAL. Approximation au sens des moindres carrés (2003).
- [43] FETHI ALOUI. Polynômes et interpolation polynomiale. Résolution des équations non linéaires.
- [44] YADOLAH DODGE et VALENTIN ROUSSON . Analyse de régression appliquée, Dunod, 2004.
- [45] GALT. Cours ; Algorithme de Horner.
- [46] ROMAIN MICHARD , ARNAUD TISSERAND et NICOLAS VEYRAT-CHARVILLON. Article : évaluation de polynômes et de fractions rationnelles sur FPGA avec des opérateurs à additions et décalages en grande base

# ANNEXES



## ANNAEXE I

### 1-Traitement statistique (Ra)

Le traitement statistique et ses résultats du plan factoriel de la Rugosité de surface (Ra) en fonction de la vitesse de coupe (v), de la vitesse d'avance (a) et de la profondeur de passe est présentée en annexe 1.

Effets et coefficients estimés pour Rugosité (unités codées)

Terme	Effet	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante		3,0601	0,1121	27,29	0,023	
Vitesse de Coupe	-0,1392	-0,0696	0,1121	-0,62	0,646	
Vitesse d avance	-0,1242	-0,0621	0,1121	-0,55	0,678	
Profondeur de passe	-0,6508	-0,3254	0,1121	-2,90	0,211	
Vitesse de Coupe*Vitesse d avance	-0,2978	-0,1489	0,1121	-1,33	0,411	
Vitesse de Coupe*Profondeur de passe	0,0927	0,0464	0,1121	0,41	0,750	
Vitesse d avance*Profondeur de passe	0,0808	0,0404	0,1121	0,36	0,780	

S = 0,317137      SomCar-ErrPrév = 6,43687  
R carré = 91,79 %      R carré (prév) = 0,00 %      R carré (ajust) = 42,52 %

Analyse de la variance pour Rugosité (unités codées)

Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
Effets principaux	3	0,9166	0,9166	0,30554	3,04	0,394
2 Interactions - Nombre de facteurs	3	0,2076	0,2076	0,06919	0,69	0,686
Erreur résiduelle	1	0,1006	0,1006	0,10058		
Total	7	1,2247				

Coefficients estimés pour Rugosité à l'aide des données des unités non codées

Terme	Coeff
Constante	2,10030
Vitesse de Coupe	0,0097854
Vitesse d avance	16,6768
Profondeur de passe	-5,94176
Vitesse de Coupe*Vitesse d avance	-0,0923857
Vitesse de Coupe*Profondeur de passe	0,0103602
Vitesse d avance*Profondeur de passe	7,1778

## 2-Traitement statistique (A)

Le traitement statistique et ses résultats du plan factoriel de l'accélération vibratoire (A) en fonction de la vitesse de coupe (v), de la vitesse d'avance (a) et de la profondeur de passe est présentée en annexe 2.

Effets et coefficients estimés pour Accélération (unités codées)

Terme	Effet	Coeff	Coef	ErT	T	P
Constante		143,068	0,2344	610,29	0,001	
Vitesse de Coupe	-0,068	-0,034	0,2344	-0,14	0,909	
Vitesse d avance	-0,099	-0,050	0,2344	-0,21	0,867	
Profondeur de passe	-0,079	-0,040	0,2344	-0,17	0,893	
Vitesse de Coupe*Vitesse d avance	0,127	0,063	0,2344	0,27	0,832	
Vitesse de Coupe*Profondeur de passe	0,212	0,106	0,2344	0,45	0,730	
Vitesse d avance*Profondeur de passe	0,242	0,121	0,2344	0,52	0,696	

S = 0,663054      SomCar-ErrPrév = 28,1370  
R carré = 38,95 %      R carré (prév) = 0,00 %      R carré (ajust) = 0,00 %

Analyse de la variance pour Accélération (unités codées)

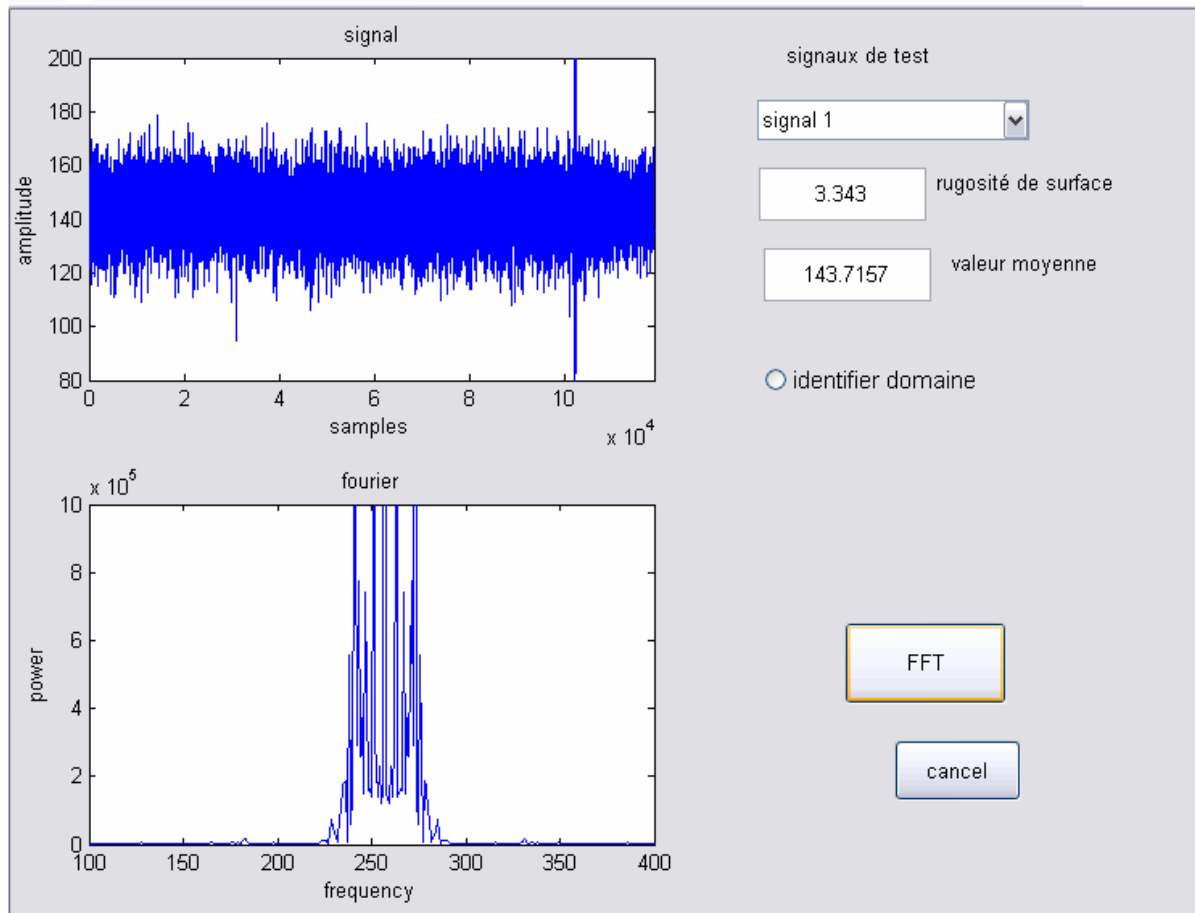
Source	DL	SomCar séq	SomCar ajust	CM ajust	F	P
Effets principaux	3	0,04143	0,04143	0,01381	0,03	0,989
2 Interactions - Nombre de facteurs	3	0,23904	0,23904	0,07968	0,18	0,900
Erreur résiduelle	1	0,43964	0,43964	0,43964		
Total	7	0,72012				

Coefficients estimés pour Accélération à l'aide des données des unités non codées

Terme	Coeff
Constante	146,936
Vitesse de Coupe	-0,0129566
Vitesse d avance	-14,9463
Profondeur de passe	-8,7309
Vitesse de Coupe*Vitesse d avance	0,039374
Vitesse de Coupe*Profondeur de passe	0,0236247
Vitesse d avance*Profondeur de passe	21,5333

## ANNEXE II

### FFT pour les huit signaux



```
function varargout = nadjette(varargin)
% NADJETTE M-file for nadjette.fig
%   NADJETTE, by itself, creates a new NADJETTE or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = NADJETTE returns the handle to a new NADJETTE or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   NADJETTE('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in NADJETTE.M with the given input
arguments.
%
%   NADJETTE('Property','Value',...) creates a new NADJETTE or raises
the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%   applied to the GUI before nadjette_OpeningFunction gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property
application
%   stop. All inputs are passed to nadjette_OpeningFcn via varargin.
```

```

%
%      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu.  Choose "GUI allows only one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help nadjette

% Last Modified by GUIDE v2.5 01-Jan-2008 01:26:16

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @nadjette_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @nadjette_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before nadjette is made visible.
function nadjette_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to nadjette (see VARARGIN)
fid1=fopen('experience11.bin');
fid2=fopen('experience12.bin');
fid3=fopen('experience13.bin');
fid4=fopen('experience14.bin');
fid5=fopen('experience15.bin');
fid6=fopen('experience16.bin');
fid7=fopen('experience17.bin');
fid8=fopen('experience18.bin');
global x1,global x2,global x3,global x4,global x5,global x6,global
x7,global x8
x1=fread(fid1);
x2=fread(fid2);
x3=fread(fid3);
x4=fread(fid4);
x5=fread(fid5);
x6=fread(fid6);
x7=fread(fid7);
x8=fread(fid8);

%set(handles.edit3,'string',num2str(0))
%set(handles.edit4,'string',num2str(1000000))
set(handles.edit3,'visible','off')
set(handles.edit4,'visible','off')

```

```

set(handles.text3,'visible','off')
set(handles.text4,'visible','off')
% Choose default command line output for nadjette
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes nadjette wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = nadjette_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject handle to figure
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
v=get(handles.popupmenu1,'value');
axes(handles.axes1)
global current;
switch v
    case 2
        global x1;
        current=x1;
        n=length(x1);
        set(handles.edit1,'string',num2str(3.343))
        set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x1)))
    case 3
        global x2;
        current=x2;
        n=length(x2);
        set(handles.edit1,'string',num2str(3.633))
        set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x2)))
    case 4
        global x3;
        current=x3;
        n=length(x3);
        set(handles.edit1,'string',num2str(3.660))
        set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x3)))
    case 5
        global x4;
        current=x4;
        n=length(x4);
        set(handles.edit1,'string',num2str(2.906))
        set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x4)))
    case 6
        global x5;
        current=x5;
        n=length(x5);

```

```

                set(handles.edit1,'string',num2str(2.743))
                set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x5)))
    case 7
        global x6
        current=x6;
        n=length(x6);
                set(handles.edit1,'string',num2str(2.770))
                set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x6)))
    case 8
        global x7
        current=x7;
        n=length(x7);
                set(handles.edit1,'string',num2str(2.773))
                set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x7)))
    case 9
        global x8
        current=x8;
        n=length(x8);
                set(handles.edit1,'string',num2str(2.653))
                set(handles.edit2,'string',num2str(mean(x8)))

end
plot(current)
title('signal')
xlabel('samples')
ylabel('amplitude')
g=get(handles.radiobutton1,'value');
if g==0
axis([0 n 80 200])
else
dim1=get(handles.edit3,'string');
dim2=get(handles.edit4,'string');
if ~(isempty(dim1)==1 | isempty(dim2)==1)
    dim11=str2double(dim1);
    dim22=str2double(dim2);
axis([dim11 dim22 80 200])
end
end
% Hints: contents = get(hObject,'String') returns popupmenu contents as
cell array
%         contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
st=fclose('all')
delete(handles.figure1)

```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit1 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
%     str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a
double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in radiobutton1.
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to radiobutton1 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of radiobutton1
g=get(handles.radiobutton1,'value');
if g==0
    set(handles.edit3,'visible','off')
    set(handles.edit4,'visible','off')
    set(handles.text3,'visible','off')
set(handles.text4,'visible','off')
else
    set(handles.edit3,'visible','on')
    set(handles.edit4,'visible','on')
    set(handles.text3,'visible','on')
set(handles.text4,'visible','on')
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
global current;
xf=fft(current,512);
pxf=abs(xf).^2;
rxf=fftshift(pxf);
axes(handles.axes2)
plot(rxf)
axis([100 400 0 1000000])
title('fourier')
xlabel('frequency')

```



## ANNEXE III

### Reconstitution de signaux de test

```
clc
clear
close all
global y;
fname = [];
if (isempty(fname))
    [FileName,PathName]=uigetfile({ ...
        '*.bin','signal file (*.bin)'}, ...
        'Select signal');
    if isequal(FileName,0);        retun;        end
    fname=[FileName,PathName];
end
fid=fopen('fname');
sig=fread(fid);
fclose(fid);
m=mean(sig);
if isempty(y) fun==0
    plot(sig)
end
```