

BADJI MOKHTAR ANNABA-UNIVERSITY جامعة باجي مختار عنابة
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

INTITULE

**MODELISATION DE L'ETAT DE SURFACE ET DU NIVEAU
VIBRATOIRE EN FONCTION DES PARAMETRES DU REGIME
DE COUPE - CAS DU FRAISAGE**

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE MECANIQUE

SPECIALITE : PRODUCTIQUE

PRESENTE PAR : KADDECHE FARES

DIRECTEUR DU MEMOIRE : Pr. Bouchelaghem Abdelaziz Mahmoud

DEVANT LE JURY

**PRESIDENT : Pr. Bouchelaghem Abdelaziz Mahmoud UNIVERSITE
ANNABA**

EXAMINATEURS :

- H. Hamadache	Grade : Prof.	UNIVERSITE ANNABA
- A. Lagred	Grade : M.C.A	UNIVERSITE ANNABA
- R. Bourenane	Grade : M.C.A	UNIVERSITE ANNABA
- R. Boulakrouche	Grade : M.A.A	UNIVERSITE ANNABA

Année : 2014/2015

SOMMAIRE

Liste des abréviations	-4-
Liste des figures.....	-6-
Liste des tableaux.....	-8-
Introduction Générale.....	-10-
Chapitre I.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1 Usinage	Erreur ! Signet non défini.
I.1.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
I.1.2 Définition de l'usinage	Erreur ! Signet non défini.
I.1.3 Définition du fraisage	Erreur ! Signet non défini.
I.1.4 Opérations de fraisage	Erreur ! Signet non défini.
I.1.5 Paramètres de coupe	Erreur ! Signet non défini.
I.1.6 Les différents mouvements	Erreur ! Signet non défini.
I.1.6.1 Mouvement de rotation de la fraise	Erreur ! Signet non défini.
I.1.6.2 Mouvement d'avance	Erreur ! Signet non défini.
I.1.6.3 Mouvement de pénétration	Erreur ! Signet non défini.
I.1.7 Calculs des régimes de coupe.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1.7.1 La vitesse de coupe.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1.7.2 La vitesse d'avance.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1.7.3 Profondeur de passe.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2 Rugosité de surface	Erreur ! Signet non défini.
I.2.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
I.2.2 Définition	Erreur ! Signet non défini.
I.2.3 Défauts de surface	Erreur ! Signet non défini.
I.2.4. Moyens utilisés pour mesurer la Rugosité	Erreur ! Signet non défini.
I.3 Les vibrations.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.1 Introduction	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2 Définitions	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2.1 Les vibrations périodiques.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2.2 Les vibrations transitoires.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.2.3 Les vibrations aléatoires	Erreur ! Signet non défini.

I.3.3	Caractéristiques des vibrations	Erreur ! Signet non défini.
I.3.3.1	L'amplitude des vibrations	Erreur ! Signet non défini.
I.3.3.2	La fréquence des vibrations	Erreur ! Signet non défini.
I.3.4	Influence d'une vitesse de rotation variable sur les vibrations	Erreur ! Signet non défini.
	d'usinage.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5	Influences des vibrations sur l'usinage et l'état de surface.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5.1	Les vibrations forcées	Erreur ! Signet non défini.
I.3.5.2	Les vibrations auto excitées	Erreur ! Signet non défini.
I.3.6	Appareils de mesure des vibrations.....	Erreur ! Signet non défini.
I.3.6.1	Définitions	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre II	Erreur ! Signet non défini.
II.1	Problématique et données expérimentales.....	Erreur ! Signet non défini.
II.1.1	Problématique	Erreur ! Signet non défini.
II.1.2	Objectifs.....	Erreur ! Signet non défini.
II.1.3	Schéma d'acquisition des signaux vibratoires.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2	Données expérimentales	Erreur ! Signet non défini.
II.2.1	Matériau de la pièce	Erreur ! Signet non défini.
II.2.2	Dimensions de la pièce	Erreur ! Signet non défini.
II.2.3	Outil de coupe	Erreur ! Signet non défini.
Fraise	Erreur ! Signet non défini.
II.2.4	Matériau d'outil	Erreur ! Signet non défini.
II.2.5	Capteur.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2.6	Machine-outil.....	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre III	Erreur ! Signet non défini.
III.1	Expériences préliminaires	Erreur ! Signet non défini.
III.2	Plan d'expériences.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3	Matrice des entrées et sorties.....	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre IV	Erreur ! Signet non défini.
IV.1	Signaux Vibratoires et Niveaux vibratoires des régimes	Erreur ! Signet non défini.
	expérimentés.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.2	Etudes comparatives	Erreur ! Signet non défini.

IV.2.1 Niveaux vibratoires des huit régimes	Erreur ! Signet non défini.
IV.2.2 Rugosités de surfaces des huit régimes	Erreur ! Signet non défini.
IV.3 Modélisation de la rugosité de surface et du niveau des	Erreur ! Signet non défini.
Vibrations	Erreur ! Signet non défini.
Conclusion générale :	Erreur ! Signet non défini.
Références bibliographiques.....	-47
Annexes.....	-48-82-

Liste des abréviations

N : nombre de tr/min ou fréquence de rotations de la broche.

V_C : vitesse de coupe (m/min).

f : avance par tour (mm/tr).

a_p : profondeur de passe (mm).

D_f : diamètre de la fraise (mm).

V_f : vitesse d'avance (mm/min).

F_z : avance par dents (mm/dt).

α : angle de dépouille.

β : angle du taillant ou de matière de l'outil.

γ : angle de coupe.

HSS : acier rapide.

RMS (de l'Anglais Root Mean Square) : valeur déterminée par la racine carrée de la moyenne de la grandeur vibratoire (accélération) au carré, sur un intervalle de temps donné.

EXP : Exponentielle, valeur calculée du niveau moyen exponentiel de signaux mis à l'échelle ou de signaux de mêmes angles.

PEAK : Pic, valeur calculée du niveau des signaux mis à l'échelle ou des signaux de mêmes angles aux pointes

MAX MIN : Max-Min, valeur calculée par les niveaux max-min, ou différences entre les valeurs maximales et minimales des signaux mis à l'échelle ou des signaux de mêmes angles.

Ra : Ecart moyen ou moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et les creux. "Ra" mesure la distance entre cette moyenne et la "ligne centrale". On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.

Rz : Régularité ou moyenne des écarts totaux de rugosité "Rt" observés sur 5 longueurs.

rε : stries ou sillons dus au passage de l'outil.

ω : période(s).

π : constante.

f : fréquence vibratoire (hertz).

m : masse (kg).

k : constante de la raideur.

Y : réponse du modèle mathématique (rugosité ou niveau vibratoire).

c_1, c_2, \dots, c_{16} : coefficients du modèle.

$X_{2.3}, X_{2.4}, X_{2.5}, X_{3.4}, X_{3.5}, X_{4.5}, X_{2.3.4}, X_{2.3.5}, X_{3.4.5}, X_{2.4.5}, X_{2.3.4.5}$: interactions des paramètres de coupe et du niveau vibratoire.

X_2 : vitesse de coupe.

X_3 : vitesse d'avance

X_4 : profondeur de passe.

[y] : matrices de rugosité ou de niveau vibratoire.

Liste des figures

Figure n° 1 : Opération de fraisage

Figure n° 2 : Schéma du processus de coupe

Figure n° 3 : Paramètres de coupe

Figure n° 4 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 1

Figure n° 5 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 2

Figure n° 6 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 3

Figure n° 7 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 4

Figure n° 8 : Rugosimètre

Figure n° 9 : Ecart moyen (Ra)

Figure n° 10 : Relevé rugosimétrique tridimensionnel d'une aube

Figure n° 11 : Mouvement vibratoire

Figure n° 12 : Vibrations périodiques

Figure n° 13 : Vibrations transitoires

Figure n° 14 : Capteur de mesure vibratoire

Figure n° 15 : Génération de vibrations

Figure n° 16 : Schéma d'acquisition et d'analyse des signaux vibratoires

Figure n° 17 : La pièce

Figure n° 18 : Dessin de définition

Figure n° 19 : fraise

Figure n° 20 : tableau fraise HSS

Figure n° 21 : Éléments de l'outil

Figure n° 22 : Fraiseuse

Figure n° 23 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai0, fenêtre 21

Figure n° 24 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai1, fenêtre 21

Figure n° 25 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai2, fenêtre 21

Figure n° 26 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai3, fenêtre 21

Figure n° 27 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai0

Figure n° 28 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai1

Figure n° 29 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai2

Figure n° 30 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai3

Figure n° 31 : Graphe des rugosités mesurées

Liste des tableaux

Tableau n° 1 : composition d'alliage

Tableau n° 2 : Caractéristiques physiques

Tableau n° 3 : Tableau simplifié des aptitudes technologiques et d'usage

Tableau n° 4 : tableau des alliages

Tableau n° 5 : Caractéristiques de la machine-outil

Tableau n° 6 : Matrice complète des essais utilisée

Tableau n° 7 : Tableau des rugosités mesurées

R e m e r c i e m e n t s e t d é d i c a c e

Je remercie tous les enseignants du Département de Génie Mécanique qui ont participé à ma formation universitaire, qui m'ont transmis leur savoir et leurs connaissances scientifiques, en particulier en productique mécanique. Avec leurs précieuses aides et leurs conseils, j'ai terminé mes études et j'ai finalisé mon projet de fin d'études.

Un remerciement particulier est adressé à mon encadreur et directeur de mémoire, Professeur Bouchelaghem Abdelaziz Mahmoud qui n'a pas ménagé ses efforts, il m'a prodigué les conseils nécessaires et les bonnes orientations afin de terminer ce travail.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements à mes amis et à mes collègues de l'université, avec qui j'ai passé des moments inoubliables.

Enfin, je dédie ce mémoire à mes très chers parents, mes chers frères et ma petite sœur qui se sont sacrifiés pour moi.

Introduction Générale

A ce jour, le procédé par enlèvement de matière au moyen d'un outil coupant occupe une place prédominante parmi les procédés de mise 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 d'outils, les revêtements, les lubrifiants, ont permis aussi 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.

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.

Chapitre I

Chapitre I

I.1 Usinage

I.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.

I.1.2 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.

[1]. [4]. [5]. [6]. [9].

I.1.3 Définition du fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage dont le rôle primordial est l'obtention de surfaces planes de forme concave ou convexe. L'outil employé pour effectuer ce travail est la fraise. En tournant, la fraise enlève sur la pièce, des copeaux. L'enlèvement des copeaux s'effectue grâce à la combinaison du mouvement de rotation de la fraise et du mouvement d'avance de la table.

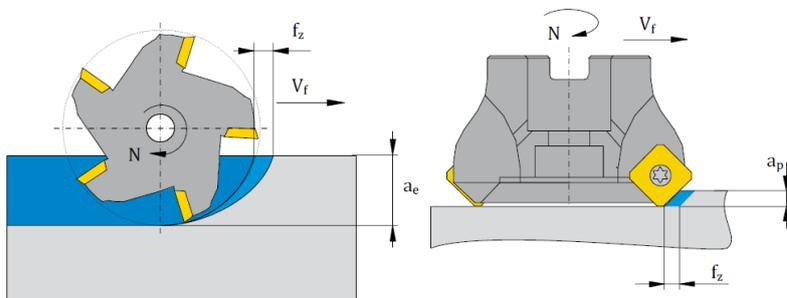


Figure n° 1 : Opération de fraisage

I.1.4 Opérations de fraisage

- **Le surfacage**

Consiste à réaliser une surface plane à l'aide de fraises de face ou de profil.

- **Le rainurage**

Consiste à réaliser une rainure à l'aide de fraises de profils adaptées au genre de rainures à exécuter.

- **Le détournage de profils**

Consiste à finir le profil d'une pièce à l'aide d'une fraise généralement cylindrique à une taille.

- **Le profilage**

Lorsque les profils fraisés résultent directement de formes de la fraise et non des mouvements de la pièce.

I.1.5 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.

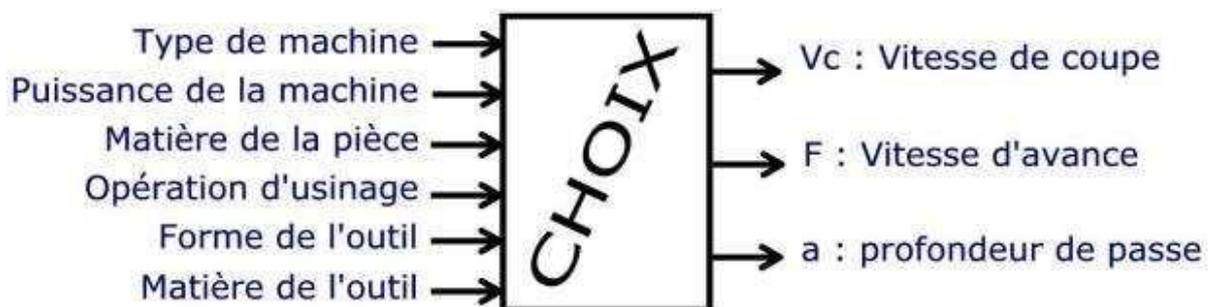


Figure n° 2 : Schéma du processus de coupe

I.1.6 Les différents mouvements

I.1.6.1 Mouvement de rotation de la fraise

Obtenu par le mouvement de rotation de l'arbre porte-fraise. Cette rotation est produite par un moteur électrique.

I.1.6.2 Mouvement d'avance

Ce mouvement peut être communiqué à la table :

- manuellement par la vis de la table actionnée au moyen de la manivelle ou du volant,
- automatiquement par la vis de la table qui est commandée par la boîte des avances.

C'est l'avance par dent qui détermine l'épaisseur du copeau.

I.1.6.3 Mouvement de pénétration

Il est obtenu par le déplacement vertical de la console sur une fraiseuse horizontale ou par un déplacement latéral de la table sur une fraiseuse verticale. C'est ce mouvement de positionnement qui permet de régler la profondeur de passe.

I.1.7 Calculs des régimes de coupe

I.1.7.1 La vitesse de coupe

$$N = \frac{1000 * V_c}{\pi * D_f}$$

- N : nombre de rotations en tours par minute (tr/min)
- V_c : vitesse de coupe (m/min)
- D_f : diamètre de la fraise (mm).

I.1.7.2 La vitesse d'avance

$$V_f = n * f_z * Z$$

- V_f : avance par minute (mm/min)
- f_z : avance par dent (mm/dt)
- Z : nombre de dents de la fraise

I.1.7.3 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].

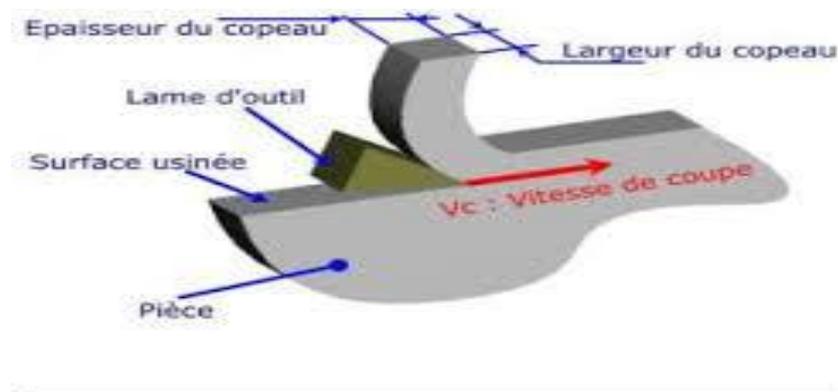


Figure n° 3 : Paramètres de coupe

[2]. [3]. [7]. [8]

I.2 Rugosité de surface

I.2.1 Introduction

La rugosité des surfaces des pièces usinées par fraisage joue un très grand rôle dans la qualité du produit fini. 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. Les vibrations, issues des phénomènes d'usures, des jeux, des défauts de fixation et de positionnement, des mauvais choix des régimes de coupe, ont une influence sur le processus de coupe (le fraisage) et, par là, sur les états des surfaces générées. L'étude et la détermination de cette influence deviennent intéressantes à mener et à réaliser.

I.2.2 Définition

La rugosité est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique.

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.

I.2.3 Défauts de surface

Pour caractériser l'état de surface, il existe 4 ordres :

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

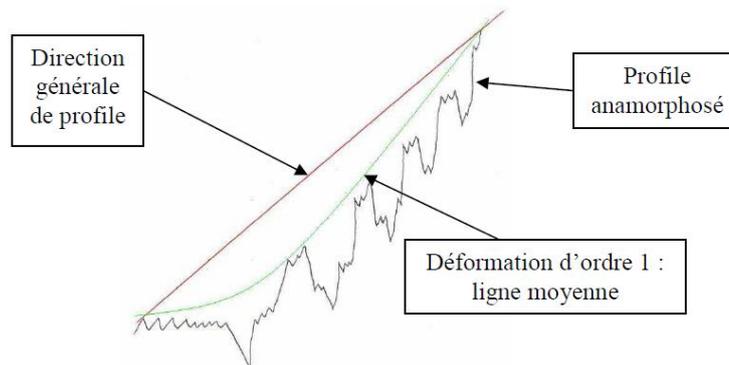


Figure n° 4 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 1

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 due à l'action de la pièce sur l'outil.
- Les défauts au niveau des guidages.

- ✓ **Ordre 2** : ondulations périodiques, l'influence de ces défauts est la même que celle de l'ordre 1.

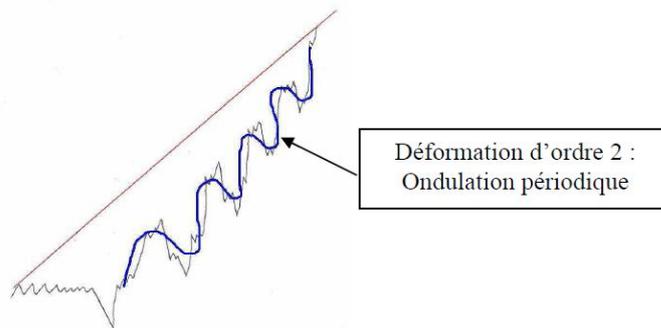


Figure n° 5 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 2

Les causes de ces défauts sont :

- ❖ Les phénomènes vibratoires bas fréquence

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{K}{m}} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

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

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

- ✓ **Ordre 3** : stries ou sillons :

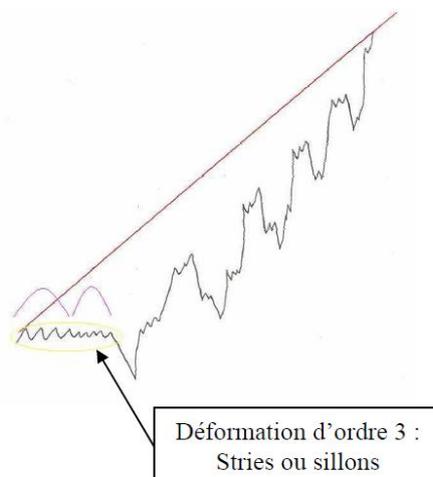


Figure n° 6 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 3

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 hauts fréquence.
 - Les stries ou sillons dus au passage de l'outil ($r\epsilon$).
- ✓ **Ordre 4** : arrachement de matière, l'influence de ces défauts est la même que celle de l'ordre 3.

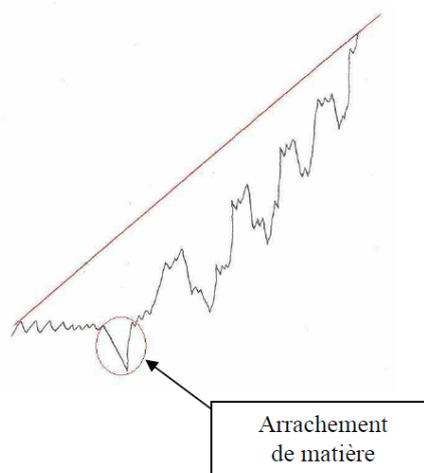


Figure n° 7 : Caractérisation de l'état de surface d'Ordre 4

Les causes de ces défauts sont :

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

I.2.4. Moyens utilisés pour mesurer la Rugosité

- ❖ Rugosimètres à lecture digitale



Figure n° 8 : Rugosimètre

❖ Rugosimètres 2 D

Il peut être utilisé pour réaliser des relevés de surface linéaires (z en fonction de x , ou « mesure 2D »).

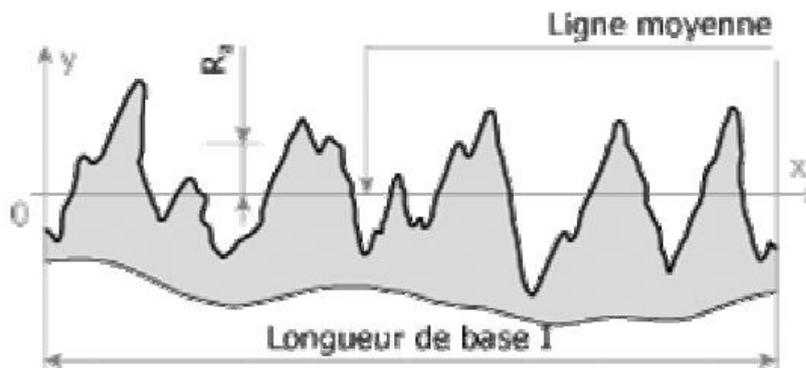


Figure n° 9 : Ecart moyen (R_a)

❖ Rugosimètres 3 D

La Rugosimètre est la mesure de l'état de surface des pièces mécaniques. L'ordre de grandeur des défauts mesurés est le micron. Cette mesure des états de surfaces est aussi répandue et indispensable que la mesure des caractéristiques dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques (longueur, orientation, perpendicularité...). La figure 1 représente un relevé rugosimétrique tridimensionnel d'une partie d'une aube de turbine de haute précision (à droite en fausses couleurs).

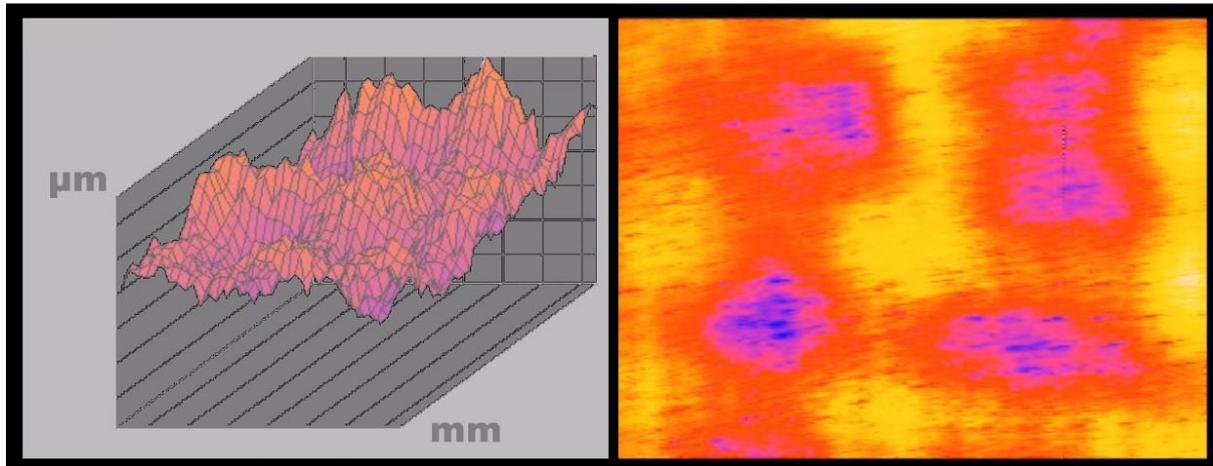


Figure n° 10 : Relevé rugosimétrique tridimensionnel d'une aube

La mesure de Rugosimètre repose traditionnellement sur deux éléments distincts : le capteur, qui peut être mécanique (palpeur) ou optique, et le traitement du signal et des données (algorithmes informatiques), qui permet de traduire les mesures physiques de base, produites par le capteur, en données numériques exploitables, représentatives des caractéristiques physiques de la surface analysée.

De la conjonction des caractéristiques techniques du capteur et du traitement numérique vont découler les qualités essentielles du Rugosimètre : sa rapidité ; sa résolution ; sa précision ; son amplitude de mesure.

Lorsque l'ensemble est suffisamment rapide, il peut être utilisé pour réaliser des relevés de surface (z en fonction de (x, y) , ou « mesure 3D ») et non plus simplement des profils linéaires (z en fonction de x , ou « mesure 2D »). Si, à cette exigence de rapidité, on ajoute celle de précision ainsi que celle de grande amplitude de mesure, on arrive, avec les technologies actuellement disponibles, Cela fait que le développement de la Rugosimètre 3D de précision a été, jusqu'à présent, assez lent. Le projet, dont est tiré le sujet, a pour ambition de développer et de mettre sur le marché un Rugosimètre 3D de précision à faible coût.

[18]. [19]

I.3 Les vibrations

I.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.

I.3.2 Définitions

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.

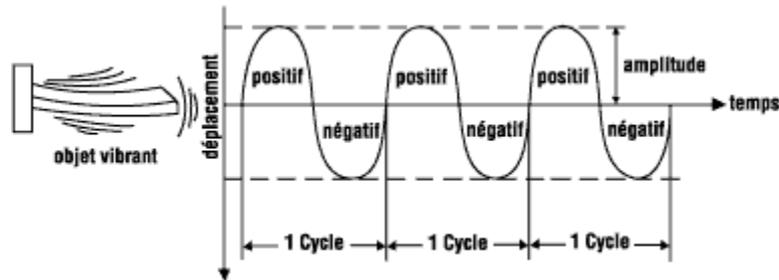


Figure n° 11 : Mouvement vibratoire

Le mouvement vibratoire peut être soit périodique, soit apériodique (transitoire ou aléatoire).

I.3.2.1 Les vibrations périodiques

Elles correspondent 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.

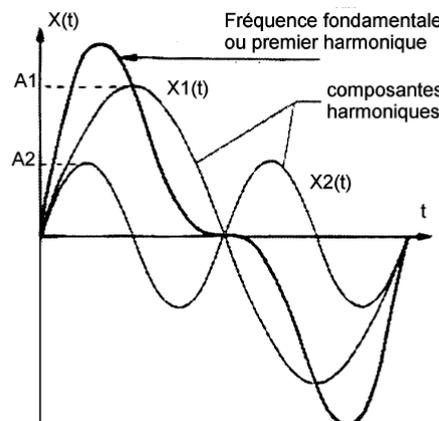


Figure n° 12 : Vibrations périodiques

I.3.2.2 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 apériodique.

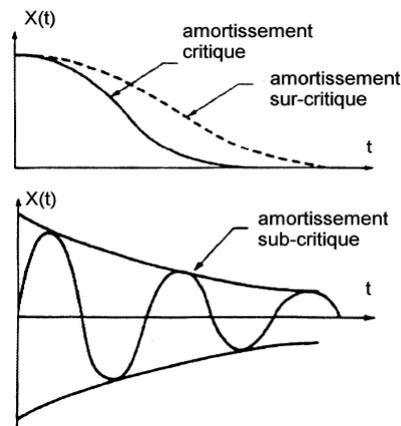


Figure n° 13 : Vibrations transitoires

I.3.2.3 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.

I.3.3 Caractéristiques des vibrations

I.3.3.1 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.

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 2. Pour un mouvement sinusoïdal, l'accélération A (en m/s^2) peut se calculer à partir de la fréquence f (en cycles par seconde) et du déplacement d (en mètres) :

$$A = (2\pi f)^2 d$$

I.3.3.2 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 hertz (Hz). Un hertz correspond à un cycle par seconde.

I.3.4 Influence d'une vitesse de rotation variable sur les vibrations d'usinage

Actuellement, l'usinage par enlèvement de matière constitue l'un des principaux moyens de mise en œuvre pour les pièces mécaniques. Cependant, la productivité du fraisage est limitée par l'apparition de fortes vibrations. Ces vibrations régénératives, très néfastes pour l'usinage, dégradent l'état de surface, augmentent l'usure de l'outil coupant et la dégradation de la broche.

I.3.5 Influences des vibrations sur l'usinage et l'état de surface

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.

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.

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.

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).

I.3.5.1 Les vibrations forcées

Ce genre de vibration 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...

I.3.5.2 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'écaillage 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 œuvre et ses propriétés mécaniques, les facteurs mécaniques d'usinage, la géométrie de la partie active de l'outil et la raideur du système machine – dispositif – outil - pièce.

I.3.6 Appareils de mesure des vibrations

I.3.6.1 Définitions

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 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.

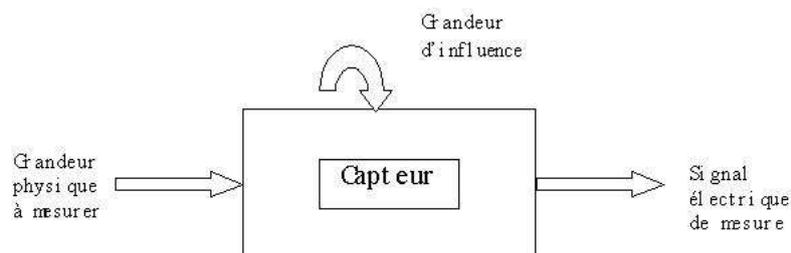


Figure n° 14 : Capteur de mesure vibratoire

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.

• **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 du 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.

• **Capteurs de vitesse**

La vitesse, si elle n'est pas déduite du déplacement ou de l'accélération, peut être mesurée 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).

• **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 :

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

[10].[11].[12].[13].[14] .[15]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les grands principes de l'usinage et particulièrement le fraisage, avec ses outils, les matériaux d'outils, les états de surfaces usinées, les défauts des surfaces, les vibrations et leurs influences sur l'usinage et sur l'état de surface des pièces.

Chapitre II

Chapitre II

II.1 Problématique et données expérimentales

II.1.1 Problématique

Comme il a été déjà rapporté, les vibrations, phénomènes appelés aussi broutement, du système machine - outil - dispositif - outil - pièce (MODOP) 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. Les vibrations, à l'interface outil/copeau, sont principalement dues aux variations du frottement à l'interface et aux variations d'épaisseur et de largeur usinées.

Tous ces dérèglages génèrent donc une surface ondulée à chaque passe d'outil qui influence le comportement dynamique de l'ensemble outil/porte-outil et dégradent ainsi la qualité de la surface usinée.

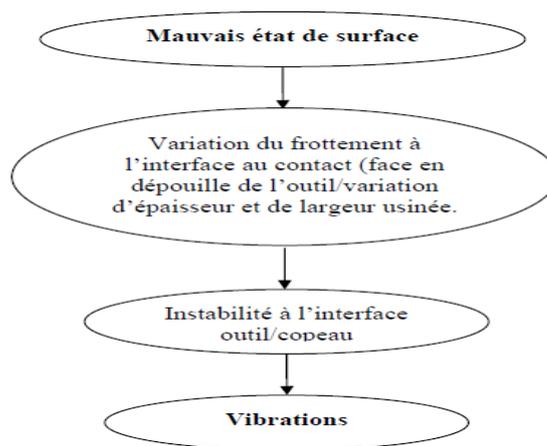


Figure n° 15 : Génération de vibrations

II.1.2 Objectifs

Notre travail a pour buts :

- 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 les niveaux vibratoires en fonction des paramètres de coupe.
- D'introduire le niveau vibratoires comme paramètre dans un modèle de rugosité de surface, afin de le minimiser en optimisation.

II.1.3 Schéma d'acquisition des signaux vibratoires

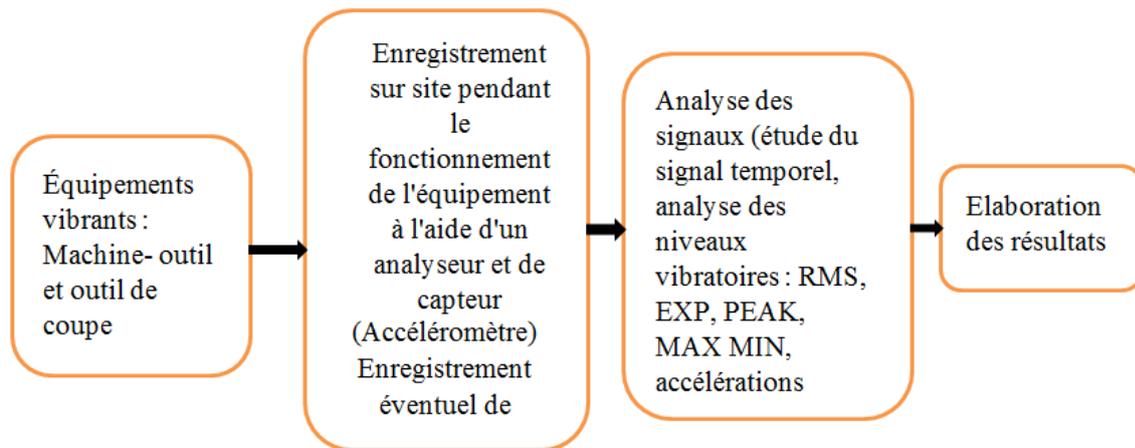


Figure n° 16 : Schéma d'acquisition et d'analyse des signaux vibratoires

II.2 Données expérimentales

II.2.1 Matériau de la pièce

Le matériau de la pièce est un alliage d'aluminium :

Ancienne Désignation Française : AG06 (nouvelle désignation : 5005)

Désignation ISO CEN : Al Mg1

L'élément d'alliage est le magnésium (jusqu'à 5 %). Ce sont des alliages par écrouissage.

Ces alliages ont des caractéristiques mécaniques moyennes qui augmentent avec le taux de magnésium. Ces caractéristiques augmenteront également avec le taux d'écrouissage

Ils ont une bonne aptitude à la déformation. Cette aptitude diminuant si le taux de magnésium augmente. Ils ont un excellent comportement à la soudure et à ce titre sont utilisés en chaudronnerie soudure. Ils ont également un bon comportement aux basses températures. Ils ont un bon comportement à la corrosion qui justifie leur utilisation dans les applications marines.

Ils sont utilisés dans la construction navale, le transport, l'industrie chimique.

- Composition

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr+Ti	Autres chaque	Autres total	Al
0.30	0.7	0.20	0.20	1.10	0.10	/	0.25	/	/	0.05	0.15	Le reste

Tableau n° 1 : composition d'alliage

Les concentrations sont en pourcentage massique.

- Caractéristiques physiques

/	5005
Masse volumique (g/cm ³)	2,70
Intervalle de fusion	630-655
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10 ⁻⁶ /K)	23,7
Module d'élasticité (MPa) (1)	69 000
Coefficient de Poisson	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C)(W/M°C)	État O : 205
Résistivité à 20 °C (μΩcm)	État O : 3,3
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J/kg°C)	945
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	135 (2)
Limité à la rupture Rm (MPa)	160-222 (2)

Tableau n° 2 : Caractéristiques physiques

Alliages	Résistance mécanique	Usinabilité	Soudabilité	Malléabilité à froid	Malléabilité à chaud	Résistance à la corrosion			Aptitude à l'anodisation	
						Normale	Marine	Coulabilité	De protection	De décoration
Al.	1	1	4	4	4	4	4	1	4	4
Al Cu	4	4	0	1	3	1	0	2	2	2
Al Si	2	1	3	-	2	4	3	4	4	1
Al Mg	2	2	4	3	1	4	4	1	4	3
Al Mn	2	2	4	3	3	4	3	1	4	3
Al Si Mg	3	3	3	2	4	4	3	4	4	4
Al Zn Mg	3	3	3	2	3	3	2	2	3	2
Al Zn Mg Cu	4	4	0	1	2	1	0	-	2	2

Tableau n° 3 : Tableau simplifié des aptitudes technologiques et d'usage

1 : très bon

2 : bon

3 et 4 : mauvais, à déconseiller

II.2.2 Dimensions de la pièce

La pièce utilisée est un prisme de longueur 178 mm et de largeur 48 mm, divisée en 4 paliers.

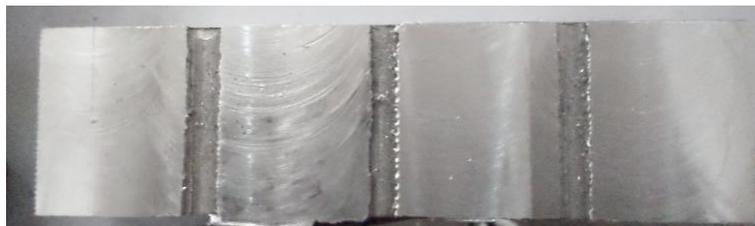


Figure n° 17 : La pièce

- Nombres de paliers : 4 paliers.
- Longueur de palier : 38 mm.
- Gorge : (8 mm×5 mm) de épaisseur et de profondeur.

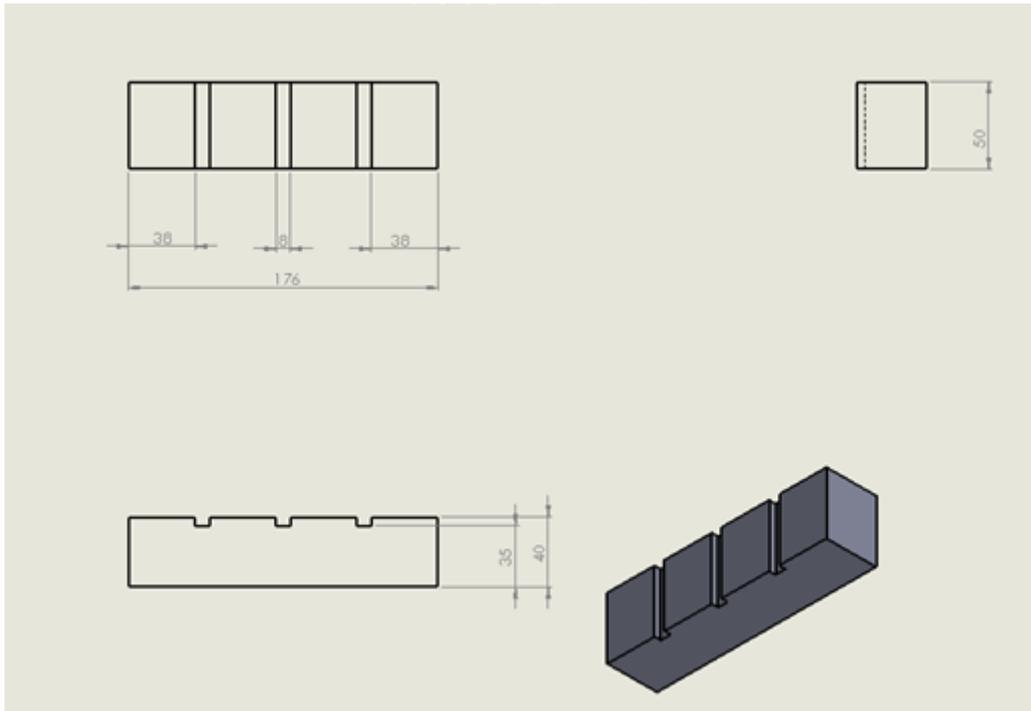


Figure n° 18 : Dessin de définition

II.2.3 Outil de coupe

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

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

Un outil de coupe comprend :

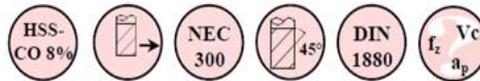
- une partie active : partie de l'outil portant les éléments coupants ou les plaquettes. Parfois, les arêtes peuvent être taillées directement dans le corps.
- un corps ou queue de l'outil : nécessaire à la mise en position et le maintien de l'outil sur le porte-outil.

Fraise

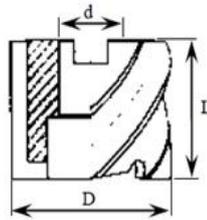


Figure n° 19 : fraise

FRAISE DE FINITION ELITE - ALESAGE LISSE



Page 3-126



D_{js14}	L	d_{H7}	Z	E498	E4988
				sans revêtement	avec revêtement
40	32	16	4	⊙	⊙
50	36	22	5	●	⊙
63	40	27	6	⊙	⊙
80	45	27	8	⊙	⊙
100	50	32	10	⊙	⊙

Figure n° 20 : tableau fraise HSS

La fraise est un outil multiple, formé par plusieurs taillants disposés radialement sur une circonférence. La forme géométrique des taillants d'une fraise est soumise à trois angles fondamentaux sont :

- angle de dépouille, α (alpha)
- angle de coupe, γ (gamma)
- angle de matière, β (beta)

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

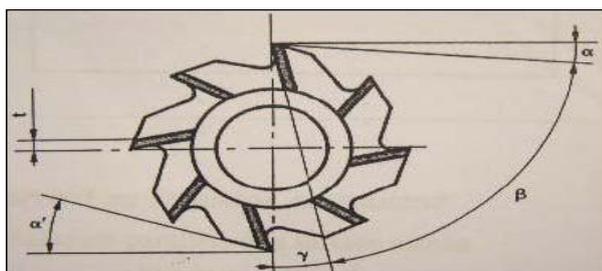


Figure n° 21 : Éléments de l'outil

II.2.4 Matériau d'outil

Le matériau de la fraise est l'acier rapide : **HSS-CO 8%**

Les aciers rapides HSS, (HIGH SPEED STEEL) sont les matériaux de coupe les plus utilisés pour la fabrication des outils coupants. Nous proposons 3 qualités :

- **HSS** : Acier rapide, **M2**, pour l'usinage des matières jusqu'à 800N/mm²
- **HSS-E** : Acier rapide, **M35**, à 5% de cobalt. Sa meilleure résistance à la chaleur permet l'usinage des matières jusqu'à 1200 N/mm².
- **HSS-CO 8%** : Acier rapide, **M42**, à 8% de cobalt, excellente résistance thermique, couramment utilisé en outils de fraisage.
- **HSS PM** : Acier rapide fritté, issu de la métallurgie des poudres. Sa structure très fine offre un bon compromis de résistance à l'usure et de ténacité dans des matières jusqu'à 140 N/mm². Excellent substrat pour recevoir les revêtements modernes.

Désignation SUNSTEEL	Norme U.S.A	% Alliages					
		C	Cr	W	Mo	V	Co
HSS	M2	0,82	4	6,5	5	2	-
HSS-E	M35	0,82	4,5	6	5	2	5
HSS-Co8%	M42	1,08	4	1,5	9,5	1,2	8,25
HSS-PM	ASP30	1,3	4	6,5	5	3	8

Tableau n° 4 : tableau des alliages

[20]

II.2.5 Capteur

Accéléromètre type "PCB Piezotronics".

- ✓ Sensitivity = 9.81 mV/g (1.001 mV/m/s²).
- ✓ Bias Level = 10.9 V.

Fréquence d'échantillonnage : 0 à 7000 Hz.

II.2.6 Machine-outil

La machine-outil utilisée pour nos essais est une fraiseuse verticale **REMAC**

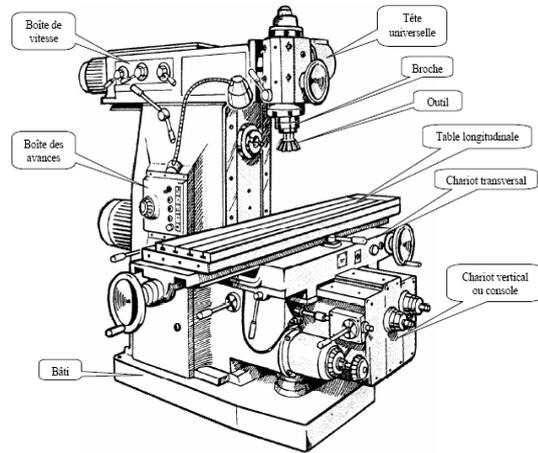


Figure n° 22 : Fraiseuse

- **Caractéristiques de la machine-outil**

	Avance (mm/min)	Vitesse de rotation (tr/min)
Max	7	25
Min	320	1300

Tableau n° 5 : Caractéristiques de la machine-outil

Chapitre III

Chapitre III

III.1 Expériences préliminaires

On a fait des expériences préliminaires, avec les mêmes conditions (machine, outil, pièce) pour vérifier et confirmer les paramètres d'usinage max et min, afin d'obtenir des usinages correctes et surtout des usinages sans vibrations excessives. Nous avons arrêté les paramètres suivants :

- vitesse de coupe max $V_c = 770$ tr/min
- vitesse de coupe min $V_a = 320$ mm/min
- vitesse d'avance max $V_a = 132$ mm/min
- vitesse d'avance min $V_a = 132$ mm/min
- profondeur de passe max $P = 1$ mm
- profondeur de passe $P = 0.5$ mm

III.2 Plan d'expériences

Pour notre étude, nous avons utilisé un plan d'expérience factoriel complet, c'est à dire 8 essais, obtenus 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, profondeur de passe). Nous avons aussi ajouté dans notre étude de modélisation, le paramètre niveau vibratoire : Peak.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Le modèle du plan factoriel complet 2^k est un polynôme de premier degré

$$Y = c_0 + c_1 X_1 + \dots + c_{ij} X_{ij} + \dots + c_{ijk} X_{ijk}$$

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

- rugosité de la surface usinée R_a (μm).
- le niveau vibratoire Peak (m/s^2).

Le modèle pour notre plan devient comme suit :

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 + C_5 X_{2,3} + C_6 X_{3,4} + C_7 X_{2,4} + C_8 X_{2,3,4}$$

Où :

C_1, C_2, \dots, C_8 : coefficients du modèle.

$X_{2,3}, X_{2,4}, X_{2,5}, X_{3,4}, X_{3,5}, X_{4,5}, X_{2,3,4}, X_{2,3,5}, X_{3,4,5}, X_{2,4,5}, X_{2,3,4,5}$: interactions entre les paramètres du modèle.

X_1 : vitesse de coupe (N)

X_2 : vitesse d'avance (f)

X_3 : profondeur de passe (a_p)

[Y]_{1,2} : matrices des colonnes de rugosité (Ra) et de niveau vibratoire (peak)

[X] : matrice des régimes expérimentés.

L'équation peut être écrite sous forme matricielle :

$$[Y] = [X] \cdot [a]$$

Où :

[Y] : matrice colonne de la rugosité de surface ou matrice colonne du niveau vibratoire peak :

$$\begin{array}{|c} Y1 \\ Y2 \\ Y3 \\ Y4 \\ Y5 \\ Y6 \\ Y7 \\ Y8 \end{array}$$

[X] :

$$\begin{array}{|cccccccc} X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \end{array}$$

[a] : matrice colonne des coefficients

C1
C2
C3
C4
C5
C6
C7
C8

Il suffit de déterminer les coefficients C_i / ($i=1, \dots, 8$), on multiplie $[X]^{-1}$ dans les deux membres de la formule :

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

III.3 Matrice des entrées et sorties

	$X_{1,2,3}$			Y_1	Y_2
	vitesse N (tr/min)	avance f (mm/min)	profondeur de passe a_p (mm)	peak	Ra
R1	770	132	1	2.755	2.27
R2	320	132	1	19.62	2.536
R3	320	026	1	19.62	1.285
R4	770	026	0.5	19.62	1.247
R5	320	132	0.5	2.755	1.944
R6	770	026	1	2.755	3.439
R7	770	132	0.5	19.62	0.693
R8	320	026	0.5	2.755	1.527

Tableau n° 6 : Matrice complète des essais utilisée

[16]. [17]

Chapitre IV

Chapitre IV

IV.1 Signaux Vibratoires et Niveaux vibratoires des régimes expérimentés

Les différents régimes expérimentés nous ont aidé à obtenir différentes rugosités de surface et nous ont permis d'enregistrer des signaux vibratoires avec calculs de niveaux de vibration.

L'enregistrement et le traitement du signal s'est effectué sur le logiciel spécialisé «Labview», ci-après des images des spectres de vibrations relevés.

Les niveaux vibratoires sont représentés et donnés par le logiciel Labview en RMS, EXP, PEAK et MAX MIN, ils sont donnés dans le tableau sous le spectre.

Environ une cinquantaine de fenêtres par régime a été enregistré dans le logiciel et seulement trois par régime sont donnés en annexe, à la fin de ce mémoire, pour les huit régimes expérimentés. Pour le traitement et la modélisation, nous avons considéré seulement la fenêtre du milieu (Fenêtre n° 21 ou n° 22) et le niveau vibratoire PEAK.

Pour des raisons de commodité, nous avons présenté ci-après, seulement les signaux et les niveaux vibratoires du régime 1 (R₁), les autres sont donc en annexe.

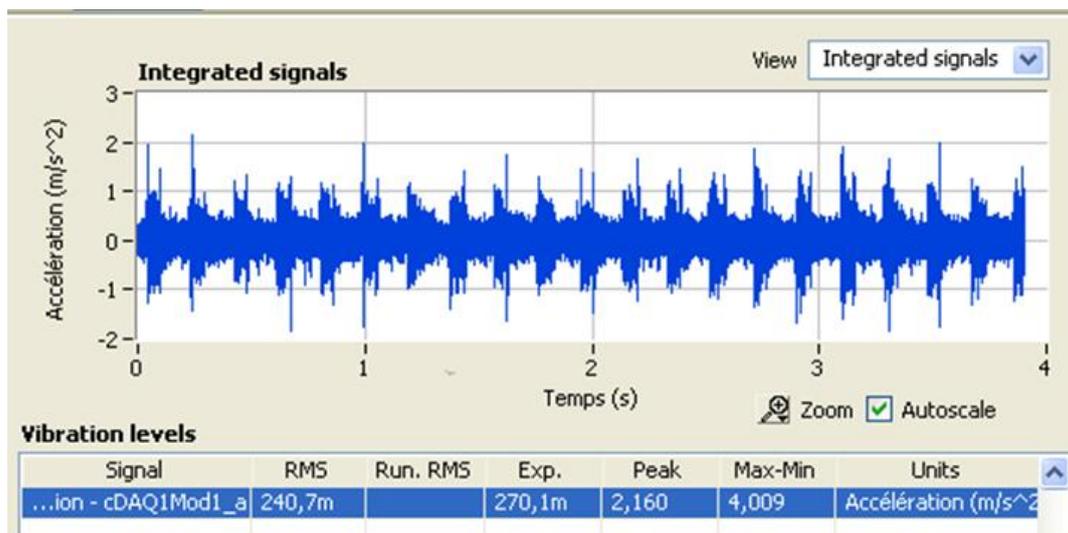


Figure n° 23 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai0, fenêtre 21

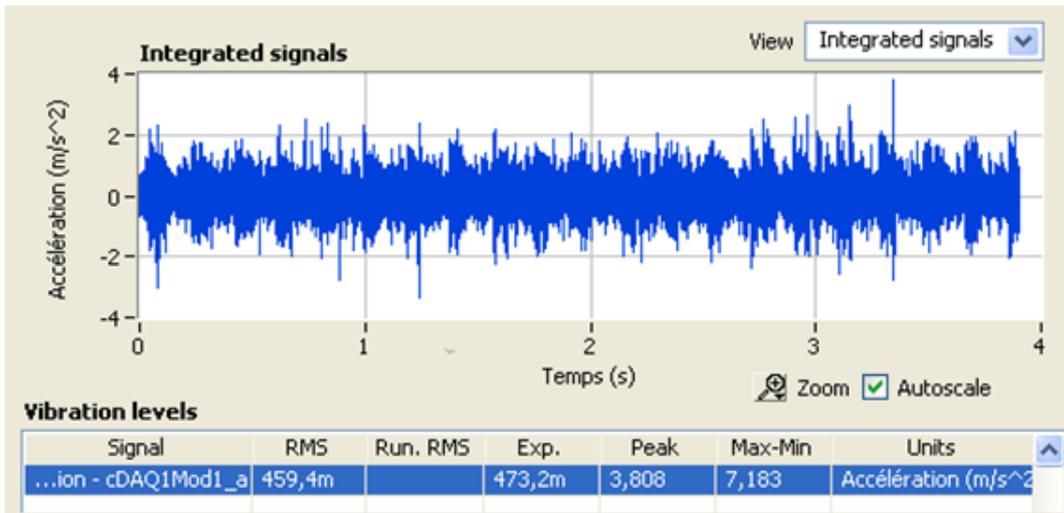


Figure n° 24 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai1, fenêtre 21

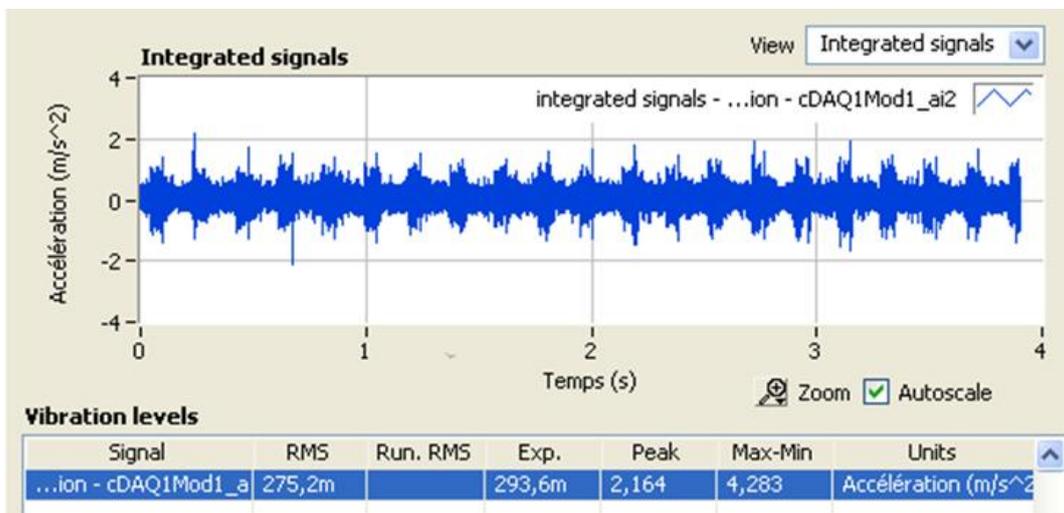


Figure n° 25 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai2, fenêtre 21

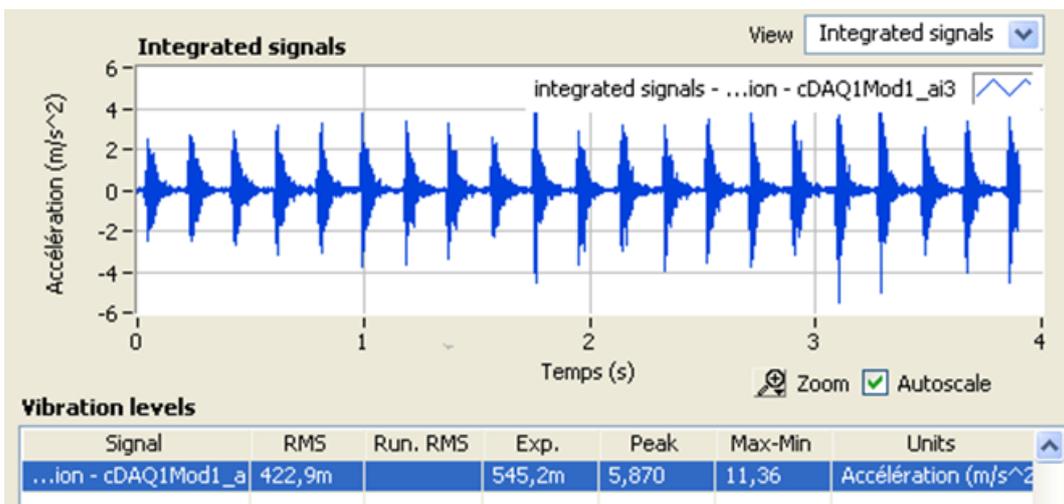


Figure n° 26 : Signaux Vibratoires du régime 1, relevés sur l'axe ai3, fenêtre 21

Nous avons donc enregistré un signal et un niveau vibratoire, pour chaque régime expérimenté, sur quatre axes ou directions de vibrations : le principal axe ou principale direction vibratoire, considérée dans l'étude, a été enregistrée par le capteur mono axial et suivant la direction d'avance longitudinale de la table de la machine (f), il est symbolisé par la mention (ai0) ; les autres enregistrements ont été effectués par le capteur tri axial, suivant trois axes ou directions (avance longitudinale ai1, avance transversale ai2 et avance verticale ai3).

Nous constatons que les spectres des directions ai0 et ai1 sont presque équivalentes en amplitudes, ce qui n'est pas le cas pour les directions ai2 et ai3.

IV.2 Etudes comparatives

IV.2.1 Niveaux vibratoires des huit régimes

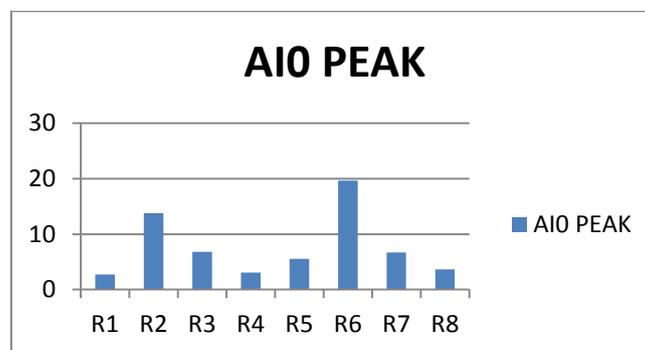


Figure n° 27 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai0

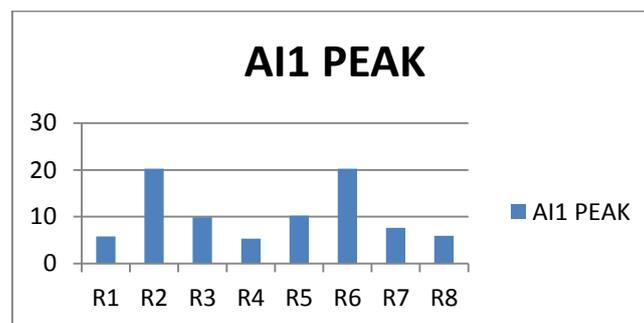


Figure n° 28 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai1

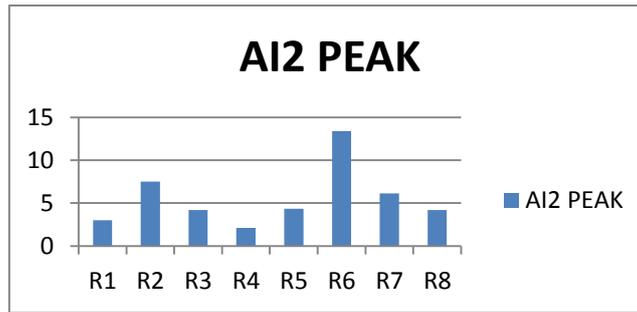


Figure n° 29 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai2

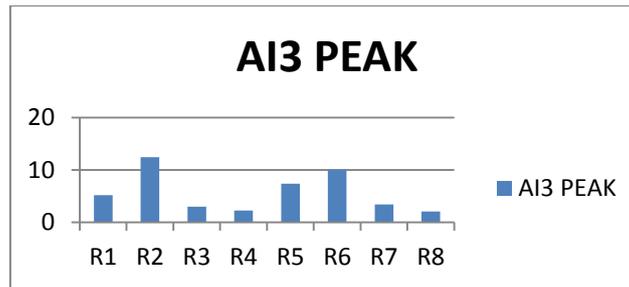


Figure n° 30 : Niveaux vibratoires des huit régimes sur l'axe ai3

Cette étude confirme le rapprochement des niveaux vibratoires (peak) des directions ai0 et ai1. Elle a révélé que le régime 4 est le moins vibrant avec un peak faible, dans les trois directions, alors que le régime 6 est le plus vibrant avec un peak fort et aussi dans les trois directions.

IV.2.2 Rugosités de surfaces des huit régimes

	Ra μm			Rz μm		
	1	2	3	1	2	3
Régime1	0.39	2.27	0.771	2.771	11.89	2.699
Régime2	2.227	2.536	1.508	9.187	12.37	8.91
Régime3	1.386	1.285	1.305	7.789	7.292	7.304
Régime4	0.881	1.247	2.544	4.050	7.085	7.484
Régime5	1.664	1.944	3.348	7.410	9.828	12.55
Régime6	1.957	3.439	1.661	8.667	9.207	8.945
Régime7	0.809	0.693	1.477	4.328	4.000	7.324
Régime8	1.894	1.527	1.212	6.378	8.539	6.742

Tableau n° 7. Tableau des rugosités mesurées

Nous avons effectué trois mesures des rugosités Ra et Rz, mais nous avons considéré seulement la rugosité Ra2, pour des raisons de commodité.

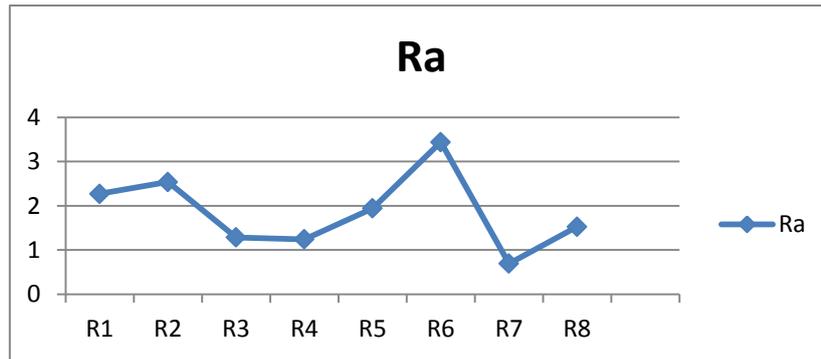


Figure n° 31 : Graphe des rugosités mesurées

Cette étude représente les rugosités de surface dans les huit régimes. On remarque que la rugosité de surface dans le régime R7 est plus faible (meilleur état de surface), alors que la rugosité de surface dans le régime R6 est plus haute (mauvaise état de surface).

IV.3 Modélisation de la rugosité de surface et du niveau des Vibrations

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Le modèle du plan factoriel complet 2^k est un polynôme de premier degré

$$Y = c_0 + c_1 X_1 + \dots + c_{ij} X_{ij} + \dots + c_{ijk} X_{ijk}$$

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

- rugosité de la surface usinée (μm).
- l'accélération vibratoire (m/s^2).
- On donne le modèle pour notre plan 2^3 , et la formule devient comme suit :

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 + C_5 X_{2,3} + C_6 X_{3,4} + C_7 X_{2,4} + C_8 X_{2,3,4}$$

Où :

C_1, c_2, \dots, c_8 : coefficients du modèle.

$X_{2,3}, X_{2,4}, X_{2,5}, X_{3,4}, X_{3,5}, X_{4,5}, X_{2,3,4}, X_{2,3,5}, X_{3,4,5}, X_{2,4,5}, X_{2,3,4,5}$: interactions des

Paramètres de coupe.

X_1 : vitesse de coupe

X_2 : vitesse d'avance

X_3 : profondeur de passe.

X_4 : niveau vibratoire

[y] : matrice colonne de rugosité.

[x] : matrice d'expérience.

L'équation peut être écrite sous forme matricielle :

$$[Y] = [X] \cdot [a]$$

Où :

[Y] : matrice colonne de la rugosité de surface et niveau vibratoire :

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ Y2 \\ Y3 \\ Y4 \\ Y5 \\ Y6 \\ Y7 \\ Y8 \end{pmatrix}$$

[X] :

$$\begin{pmatrix} X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \\ X & X & X & X & X & X & X & X \end{pmatrix}$$

[a] : matrice colonne des coefficients

$$\begin{pmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \\ C5 \\ C6 \\ C7 \\ C8 \end{pmatrix}$$

Il suffit de déterminer les coefficients C_i / ($i=1, \dots, 8$), on multiplie $[X]^{-1}$ dans les deux membres de la formule :

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

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**

$$Ra = 1.867 + 0.319N - 0.679f + 0.033a_p - 0.120N.f + 0.262f.a_p - 0.111N.a_p - 0.044N.f.a_p$$

- **Modèle de niveau vibratoire peak**

$$Peak = 1.867 + 0.319N - 0.679f + 0.033a_p - 0.120N.f + 0.262f.a_p - 0.111N.a_p - 0.044N.f.a_p$$

Conclusion générale

Le travail mené comporte, en fait, plusieurs chapitres dont la moitié a été réservés 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 suit par niveau vibratoire peak, 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 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] Bernard Marandet, Benoit Verquin, Jean Saint - Chely, Cheril Anderon, Marc Ryckboer. Usinage, principes fondamentaux d'usinage, définition de l'usinage. Cours
- [2] Bourdet. La coupe des métaux. Edition 1977.
- [3] SANDVIK. Techniques modernes d'usinage. Edition Sandvik, 1997.
- [4] A.CASTELLA.DUPONT. Technologie coupe des métaux, édition Des forges, 1976
- [5] C. MARTY. Industrialisation des produits mécaniques Tome 3 : procédés de fabrication LAVOISIER 1999
- [6][AFNOR, 1997] Norme AFNOR, "Couple Outil-Matière : Domaine de fonctionnement des Outils Coupants", NF E 66-520, Vol. 1 à 6, Paris : AFNOR, 1997.
- [7][Albert, 2007] G. Albert, O. Cahuc, R. Laheurte and P. Darnis, "Etude expérimentale de la coupe en fraisage", Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août 2007
- [8] G. Albert¹⁻², O. Cahuc¹, R. Laheurte¹⁻², P. Darnis²ÉTUDE EXPERIMENTALE DE LA COUPE EN FRAISAGE 2007
- [9] Application à l'usinage de pales aéronautiques .18 Novembre 2005
- [10] RAFIC YOUNES, JOE CHALFOUN, YASSER ALAYLI, PETER WAGSTAFF article ; étude de la stabilité des vibrations de l'usinage, XIVE colloque, vibrations ; chocs et bruits, école centrale de Lyon, juin (2004).
- [11] Y. Gagou Cours de Traitement du Signal 2008-2009
- [12] Capteurs et électronique associée. ESIEE-Olivier Français, 2000
- [13] G. Blanchet and M. Charbit, Traitement numérique du signal, Hermès, Paris, 1998.
- [14] PAUL – ERIC DUPUIS, technique de l'ingénieur, essais de vibrations, mesures et exploitation des résultats, (2000).
- [15] G. Blanchet and M. Charbit, Traitement numérique du signal, Hermès, Paris, 1998
- [16] V. LEGAT. Mathématiques et méthodes numériques (2004).
- [17] ALAIN LAMURE. Cours : méthodologie des plans d'expériences, plans factoriels Complets
- [18] Palanikumar K., Karunamoorthy L., Karthikeyan R., Assessment of factors influencing surface roughness

[19] Tsao C.C., Hocheng H., Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network, Journal of Materials Processing Technology, 203, 342-348, 2008.

[19] www.sunstell.fr (l'outil coupant sunstell)

A n n e x e s

Signaux Vibratoires et Niveaux vibratoires des régimes expérimentés

