

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté : sciences et technologies

Département : génie mécanique

Domaine : sciences et technologies

Filière : génie mécanique

Spécialité : fabrication mécanique et productique

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de  
Master

Thème:

**CONTRIBUTION A L'ANALYSE DU COMPORTEMENT  
VIBRATOIRE EN USINAGE DISCONTINUE**

Présenté par : BENABDELLATIF Billel

Encadrant : LAGRED.A      Grade : Professeur      Université UBM Annaba

### Jury de soutenance :

BOURENANE RABAH	Pr	UBM Annaba	Président
LAGRED AHMED	Pr	UBM Annaba	Encadrant
CHELIA AZZEDDINE	MAA	UBM Annaba	Examineur

Année universitaire : 2021/2022

# *Remerciements*

*Je remercie avant tout, ALLAH le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour achever ce travail.*

*Je remercie profondément notre encadreur Mr LAGRED AHMED de m'avoir guidé avec patience, et pour tous ses conseils, orientations et corrections.*

*Mes remerciements sont adressés aussi aux membres de jury qui ont bien voulu m'honorer d'évaluer ce travail.*

*Je remercie chaleureusement et avec gratitude mes enseignants du département génie mécanique.*

*Un grand merci à ma grande famille de m'avoir soutenu pendant mon cursus universitaire.*

*Enfin, un vif remerciement à mes amis qui m'ont apporté de l'aide de près ou de loin sans exception.*

## *Dédicace :*

C'est avec une grande joie que je dédie ce modeste travail :

-à mes parents;

-à mes frères

- à mes sœurs *SOULEF* et *SONDOUS*;

-à toute ma grande famille;

-à tous mes amis particulièrement SAADI, AYMEN,  
FETHI, AYOUB et ISMAIL.

## **Résumé :**

Dans le présent manuscrit, nous nous intéressons à l'étude du comportement vibratoire des machines. L'influence des vibrations en usinage sur la qualité de fabrication mécanique. Comme exemple nous avons pris l'usinage discontinue.

Une étude détaillée sur l'usinage et plus particulièrement sur l'usinage discontinu a été présenté dans le chapitre I.

Nous avons introduit la théorie des vibrations et les formes de vibrations en usinage dans le chapitre II.

Les modes des mesures des vibrations mécaniques ont été développé dans le chapitre III .

Une analyse sur l'influence des vibrations sur la qualité d'usinage en fraisage est exposé dans le chapitre IV.

Une partie pratique sur la fabrication d'une pièce mécanique est présentée dans le chapitre V.

**Mots clé :** vibrations, usinage discontinue, fraisage, rugosité.

## **ملخص :**

في هذه الأطروحة، نهتم بدراسة سلوك اهتزازات الآلات ، تأثير الاهتزازات على جودة التصنيع الميكانيكي كمثال اخذنا بالتصنيع غير المستمر.

تم تقديم دراسة تفصيلية حول التشغيل الآلي وبشكل أكثر تحديداً حول المعالجة الآلية غير المستمرة في الفصل في الفصل الاول.

قدمنا نظرية الاهتزازات و اشكال الاهتزازات في التشغيل الآلي في الفصل الثاني .

تم تطوير أوضاع قياسات الاهتزازات الميكانيكية في الفصل الثالث.

ثم تقديم تحليل تأثير الاهتزازات على جودة التصنيع في الات التفريز في الفصل الرابع

و اخيرا في الجزء العملي قمنا بتصنيع قطعة ميكانيكية تم طرحها في الفصل الخامس.

**الكلمات المفتاحية :** الاهتزازات، التصنيع غير المستمر، التفريز، الخشونة

**Abstract :**

In this manuscript, we are interested in the study of the vibration behavior of machines. The influence of vibrations in machining on the quality of mechanical manufacturing. As an example we have taken discontinuous machining.

A detailed study on machining and more particularly on discontinuous machining was presented in chapter I.

We introduced the theory of vibrations and the forms of vibrations in machining in chapter II.

The modes of the measurements of the mechanical vibrations were developed in the chapter III.

An analysis of the influence of vibrations on the quality of machining in milling is presented in chapter IV. A practical part on the manufacture of a mechanical part is presented in chapter V.

**Keys-words :** vibration , discontinuous machining , roughness , milling

## **SOMMAIRE :**

### **REMERCIEMENTS**

### **DEDICASE**

### **RESUME**

### **LISTE DES FIGURES**

### **INTRODUCTION**

#### **CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1. Définition de fraisage .....	1
I.2. Principe de fonction .....	1
I.3. Modes de fraisage .....	1
I.3.1. Fraisage de face .....	2
I.3.2. Fraisage de profil .....	2
I.3.3. Fraisage en opposition .....	3
I.3.4. Fraisage en concordance ou ‘en avalant’ .....	3
I.4. Phénomène de la formation du copeau .....	4
I.4.1. Analyse de la formation du copeau .....	4
I.4.2. Formes de copeaux obtenus en usinage .....	5
I.5. Vibrations de la structure mécanique .....	6
I.5.1. Définition de vibration .....	6
I.5.2. Degrés de liberté .....	7
I.5.3. Vibrations à un degré de liberté .....	8
I.5.4. Equation de mouvement de vibration à un degré de liberté .....	9
I.5.5. Vibrations à deux degré de liberté .....	9
I.5.6. Equation de mouvement .....	10

#### **CHAPITRE II : VIBRATIONS EN USINAGE**

II.1. Introduction .....	11
II.2. Vibrations libres .....	12
II.3. Vibrations forcées .....	12
II.4. Vibrations auto-entretenues (broutement) .....	14
II.4.1. Broutement d’origine régénératif .....	15

II.4.2. Broutement d'origine non-régénératif .....	17
II.4.3. Phénomène de couplage des modes .....	18
II.4.4. Talonnage .....	18

### CHAPITRE III : METHODE DE MESURE DES VIBRATIONS

III.1. Méthodes des mesures générales .....	21
III.1.1. Mesures directes .....	21
III.1.1.1. Mesure avec contact .....	21
III.1.1.1. Mesures sans contact .....	22
III.1.2. Mesures indirectes .....	24

### CHAPITRE IV : INFLUENCE DES VIBRATIONS SUR L'USINAGE

IV.1.1. Etude dynamique de la broche libre .....	26
IV.1.2. Etude de la broche avec l'outil .....	28
IV.1.3. Etude de la broche lors de la coupe .....	30
IV.2 Influence des paramètres de coupe sur les vibrations .....	31
IV.2.1. Influence de la vitesse de coupe sur les vibrations .....	31
IV.2.2. Influence de l'avance par dent sur les vibrations .....	32
IV.2.3. Influence de la profondeur de passe sur les vibrations .....	33
IV.2.4. Influence du mode d'usinage sur les vibrations .....	34
IV.3.1. Définitions de la rugosité .....	38
IV.3.2. Défauts de surface .....	39
IV.3.6. Mesure l'état de surface .....	45
IV.3.7. Influences des vibrations sur l'état de surface .....	46

### CHAPITRE V : ETUDE EXPERIMENTALE

V. PARTIE PRATIQUE .....	47
V.1. Introduction .....	47
V.2. Laminage .....	48
V.3 Laminoir .....	48
V.4. Dessin de définition .....	50
V.5. Analyse de matériau .....	50
V.6. Routage d'usinage .....	51
V.7. Gamme d'usinage .....	52
CONCLUSION .....	57
Références bibliographiques : .....	59

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre I : Etude bibliographique

FIGURE I-1 FRAISAGE DE FACE .....	3
FIGURE I-2 FRAISAGE DE PROFIL .....	3
FIGURE I-3 FRAISAGE EN OPPOSITION. ....	3
FIGURE I-4 FRAISAGE EN AVALANT .....	4
FIGURE I-5 PRINCIPALES ZONES DE CISAILLEMENT COPEAUX .....	6
FIGURE I-6 DIFFERENTS TYPES DE COPEAUX .....	6
FIGURE I-7 VIBRATION LIBRE .....	7
FIGURE I-8 SYSTEMES A UN DEGRE DE LIBERTE .....	8
FIGURE I-9 SYSTEMES A DEUX DEGRES DE LIBERTE .....	8
FIGURE I-10 EQUIVALENT MASSE ET RESSORT .....	9
FIGURE I-11 REPRESENTATION GRAPHIQUE DU MOUVEMENT D'UN OSCILLATEUR SIMPLE .....	10
FIGURE I-12 schématisation système à 2 DDL complet.....	11

### Chapitre II : Vibrations en usinage

FIGURE II-1 TROIS FAMILLES DE VIBRATIONS PRESENTEES EN USINAGE.....	12
FIGURE II-2 PHOTO D'UNE PASSE D'USINAGE .....	14
FIGURE II-3 CONSEQUENCES DES VIBRATIONS .....	15
FIGURE II-4 DEPHASAGE LORS DE LA REGENERATION DE SURFACE DANS LE CAS D'UNE OPERATION D'ENLEVEMENT DE MATIERE.....	16
FIGURE II-5 EFFET RELATIF A LA DIFFERENCE DE PHASE SUR L'EPaisseur DU COPEAU (MARQUES LAISSEES PAR DEUX DENTS SUCCESSIVES).....	16
FIGURE II-6 REGENERATION DES VIBRATIONS EN BROUITEMENT [25].....	17
FIGURE II-7 PHENOMENE DE COUPLAGE DES MODES DE VIBRATION .....	18
FIGURE II-8 PHENOMENE DE TALONNAGE DE L'OUTIL.....	19
FIGURE II-9 EFFET DU TALONNAGE SUR LA LIMITE DE STABILITE.....	19

### Chapitre III : Methode de mesure des vibrations

FIGURE III-1 DYNAMOMETRE, MICROPHONE .....	22
FIGURE III-2 ACCELEROMETRE.....	22
FIGURE III-4 DIFFERENTES METHODES D'ISOLATION DU SIGNAL ACOUSTIQUE .....	23
FIGURE III-5 VIBROMETRE LASER .....	23
FIGURE III-6 MESURE DES VIBRATIONS PAR DYNAMOMETRE .....	24

### Chapitre IV : Influence des vibrations sur l'usinage

FIGURE IV-1 DEMARCHE ADOPTEE.....	26
FIGURE IV-2 DIAGRAMME WATERFALL DES ACCELERATIONS, BROCHE LIBRE SANS L'OUTIL .....	27
FIGURE IV-3 FREQUENCES POUR LA VITESSE DE ROTATION DE 8.000 TR/MIN SUR LES TROIS DIRECTIONS X, Y ET Z DE LA MACHINE. ....	29
FIGURE IV-4 DIAGRAMME DE WATERFALL DES ACCELERATIONS, BROCHE AVEC L'OUTIL, FRAISE DE DIAMETRE 80 MM A 6 DENTS.....	29
FIGURE IV-5 MESURES DES VIBRATIONS ET POSITION DE L'ACCELEROMETRE 3D PENDANT LA COUPE.....	30
FIGURE IV-6 SIGNAUX DES COMPOSANTES DE LA RESULTANTE .....	31
FIGURE IV-7 EFFET DE LA VITESSE DE COUPE SUR LES VIBRATIONS .....	32

FIGURE IV-8 . EFFET DE L'AVANCE PAR DENT SUR LES VIBRATIONS .....	33
FIGURE IV-9 EFFET DE LA PROFONDEUR DE PASSE SUR LES VIBRATIONS .....	34
FIGURE IV-10 INFLUENCE DU MODE D'USINAGE SUR LES VIBRATIONS .....	35
FIGURE IV-11 INFLUENCE DU MODE D'USINAGE SUR LES VIBRATIONS .....	35
FIGURE IV-12 INFLUENCE DU MODE D'USINAGE SUR LES VIBRATIONS .....	36
FIGURE IV-13 INFLUENCE DU MODE D'USINAGE SUR LES VIBRATIONS .....	36
FIGURE IV-14 INFLUENCE DU MODE D'USINAGE SUR LES VIBRATIONS .....	37
FIGURE IV-15 ECART DE FORME .....	39
FIGURE IV-16 ONDULATIONS PERIODIQUES .....	40
FIGURE IV-17 STRIES OU SILLONS .....	41
FIGURE IV-18 ARRACHEMENT DE MATIERE.....	42
FIGURE IV-19 LONGUEUR DE BASE, D'EVALUATION .....	43
FIGURE IV-20 LIGNE MOYENNE ARITHMETIQUE .....	43
FIGURE IV-21 LIGNE ENVELOPPE SUPERIEURE ET INFERIEUR .....	44
FIGURE IV-22 ECART MOYEN .....	44
FIGURE IV 23 (R MAX) ; (R T) ; (R P).....	45
FIGURE IV-24 DISPOSITIF POUR MESURER LA RUGOSITE SANS .....	46
FIGURE IV-25 RUGOSIMETRESJ-201P.....	46
FIGURE IV-26 ALTI SURF 500 .....	46
FIGURE IV-27 METHODE DE MESURE DE LA RUGOSITE ET LES VIBRATIONS.....	46

### **Chapitre V : Eude Expérimentale**

FIGURE V.1 LAMINAGE A CHAUD .....	49
FIGURE V.2 PRINCIPE DE LAMINOIR .....	50
FIGURE V.3 PALIER DE FIXATION .....	56
FIGURE V.4 DESSIN DE DEFINITION .....	57

## I. INTRODUCTION :

L'usinage par enlèvement de copeaux est un des procédés les plus importants dans la fabrication et finition de pièces mécaniques [1]. D'un point de vue économique, le secteur industriel de l'usinage a une importance économique non négligeable. Pour se convaincre de cette importance économique, il suffit de considérer le volume des dépenses faites aux U.S.A. Pour l'usinage des métaux, il représente 5 % du Produit National Brut ce qui est énorme pour une seule technique [2]. La précision, la fiabilité, la productivité élevée, le temps de cycle et le coût bas de production sont les principales motivations des innovations en technologie de fabrication d'aujourd'hui [3].

Un matériau est la matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme utilise pour produire des objets. Un matériau est défini comme une matière de base choisie en raison de ses propriétés particulières et de la mise en œuvre en vue d'un usage spécifique. Les propriétés particulières des matériaux sont offertes par la nature chimique des différentes matières premières. Les grands groupes de matériaux utilisés en usinage sont : métalliques, composites, plastiques [4]. Les métaux présentent tous l'éclat sur une coupe fraîche, dû à la réflexion de la lumière sur le nuage d'électrons libres; à l'exception du mercure, les métaux sont solides à température et à pression normales, ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques, la ductilité et la malléabilité qui tiennent à la souplesse de la liaison métallique, à cause de la valeur élevée de l'énergie de la liaison intermétallique.

En résumé, l'usinage par enlèvement de copeaux représente l'ensemble des techniques permettant d'obtenir une surface par enlèvement de matière au moyen d'un outil tranchant. Cette technique ancienne est souvent nommée coupe onéreuse dans la mesure où la mise en forme de la pièce entraîne une transformation de matière en déchets (copeaux) [5].

**CHAPITRE I :**  
**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **I.1. Définition de fraisage :**

Le fraisage est l'un des procédés d'usinage les plus répandus dans l'obtention des pièces mécaniques. En effet, il est caractérisé par la flexibilité, la simplicité des opérations, ainsi que par le bas prix de revient de fabrication d'une pièce [6,7,8]. Le fraisage faisant intervenir, en coordination, le mouvement de rotation d'un outil à plusieurs arêtes et l'avance rectiligne de la pièce, il en résulte une trajectoire particulière de chacune des parties actives de l'outil dans le référentiel de la pièce [9]. Deux propriétés qui caractérisent ce procédé sont : la formation du copeau due à la discontinuité de coupe au cours du passage des dents et la complexité des formes des surfaces usinées, qui rendent difficile le contrôle du comportement vibratoire dans les opérations de fraisage [10].

Le fraisage a plusieurs avantages. Parmi lesquels nous citons :

- la bonne finition de surface ;
- la haute précision et la grande souplesse au niveau de la génération de différentes formes.

Le plus souvent, le fraisage est utilisé pour produire des surfaces planes, des épaulements et de gorges, son efficacité en contournage est remarquable grâce à l'utilisation des techniques de programmation pour les machines à commande numérique (CNC).

Le fraisage est utilisé dans plusieurs applications (domaines aéronautiques, automobiles, énergétiques, moules et matrices...).

### **I.2. Principe de fonction :**

Lors d'une opération de fraisage, l'enlèvement de la matière – sous forme de copeau- résulte de la combinaison de deux mouvements : le mouvement de rotation de l'outil sur son axe d'une part et le mouvement d'avance de la pièce suivant trois axe orthogonaux d'autre part [11].

### **I.3. Modes de fraisage**

On distingue deux modes : le fraisage de face et le fraisage de profil [11].

### I.3.1. Fraisage de face

Dans ce mode, l'axe de la fraise est perpendiculaire au plan fraisé (figure I-1). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où l'on ne retrouve aucune trace de la forme de la génératrice de la fraise. Ce mode de fraisage est également appelé "fraisage en bout" (d'enveloppe).

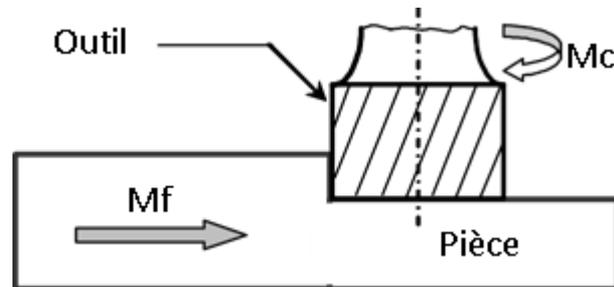


Figure I-1. Fraisage de face.

### I.3.2. Fraisage de profil

Dans ce mode, la génératrice de la fraise est parallèle à la surface usinée (figure I-2). C'est un procédé d'obtention des surfaces planes où quelconques dans des positions diverses. Ce mode de fraisage est également appelé "fraisage en roulant" (de forme).

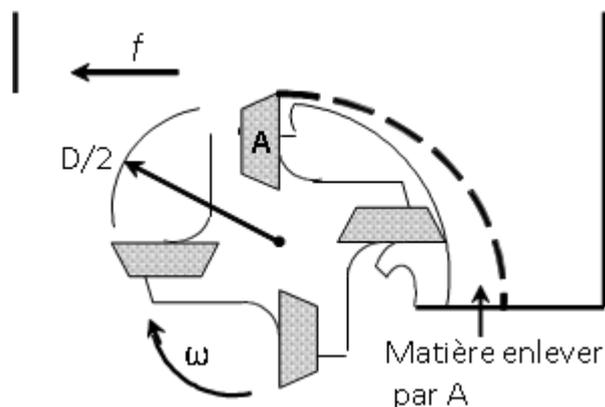


Figure I-2. fraisage de profile

Lors d'une opération de fraisage de profile et selon le sens de rotation de l'outil par rapport à la pièce, Il existe deux manières de procéder [12] :

### I.3.3. Fraisage en opposition

La direction d'avance de la pièce est à l'opposé du sens de rotation de la fraise dans la zone de coupe. L'épaisseur des copeaux est nulle au départ, puis maximale à la fin de la passe (figure I-3).

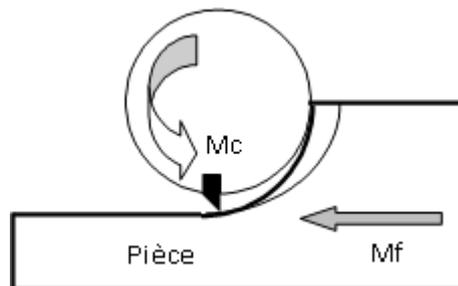


Figure I-3. Fraisage en opposition

### I.3.4. Fraisage en concordance ou 'en avalant'

Dans le cas de fraisage en avalant, la direction d'avance est la même que le sens de rotation de la fraise. L'épaisseur de copeau va donc diminuer jusqu'à être égale à zéro à la fin de la passe (figure I-4).

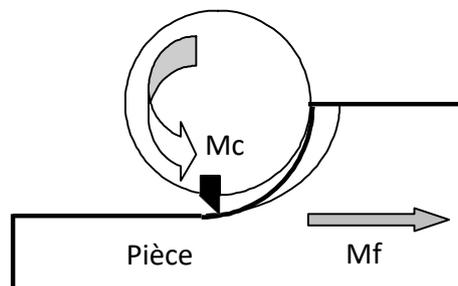


Figure I-4. Fraisage en avalant.

On peut également effectuer un fraisage combiné, c'est-à-dire de face et de profile en même temps.

## I.4. Phénomène de la formation du copeau

La formation du copeau fait intervenir un grand nombre de paramètres, tels que la rhéologie du matériau usiné, la nature du contact outil-matière et les différents paramètres d'usinage. La compréhension des divers phénomènes qui entrent en jeu lors d'une opération de coupe nécessite une observation locale très fine ; deux méthodes expérimentales ont permis de mettre en exergue quelques phénomènes :

- méthode de visualisation et d'investigation métallographique [13] des essais de coupe brusquement interrompue;
- procédé de microcinématographie, qui permet de visualiser la formation du copeau [13].

### I.4.1. Analyse de la formation du copeau :

Les observations micrographiques montrent généralement la présence de 3 zones lors de la formation du copeau (figure I.6).

- Zone de cisaillement primaire : Elle est aussi appelée zone immédiate de formation du copeau et s'étend de l'arête de coupe jusqu'à la surface libre du copeau. Dans cette zone les grains constituant le copeau sont orientés suivant le plan de cisaillement. Le plan de cisaillement fait un angle  $\phi_s$  (angle de cisaillement) avec la surface usinée. Cet angle et l'épaisseur effective  $h_c$  du copeau dépendent de l'épaisseur de coupe  $h$ , de l'angle de coupe  $\alpha$ , du type du matériau usiné et du matériau de l'outil.
- Zone de cisaillement secondaire : Elle est aussi appelée zone d'écrouissage du copeau et se situe à l'interface de l'outil et du copeau. C'est une zone de frottement et de glissement qui est responsable entre autre de l'usure en cratère.
- Zone de cisaillement tertiaire : c'est la zone d'écrouissage de la pièce. C'est une zone de frottement et de glissement entre la face de dépouille et la surface usinée. Elle donne naissance à l'usure en dépouille suite au retour élastique de la matière après le passage de la pointe de l'outil. Dans cette zone, des singularités d'écoulement peuvent se produire sur la pointe de l'outil.

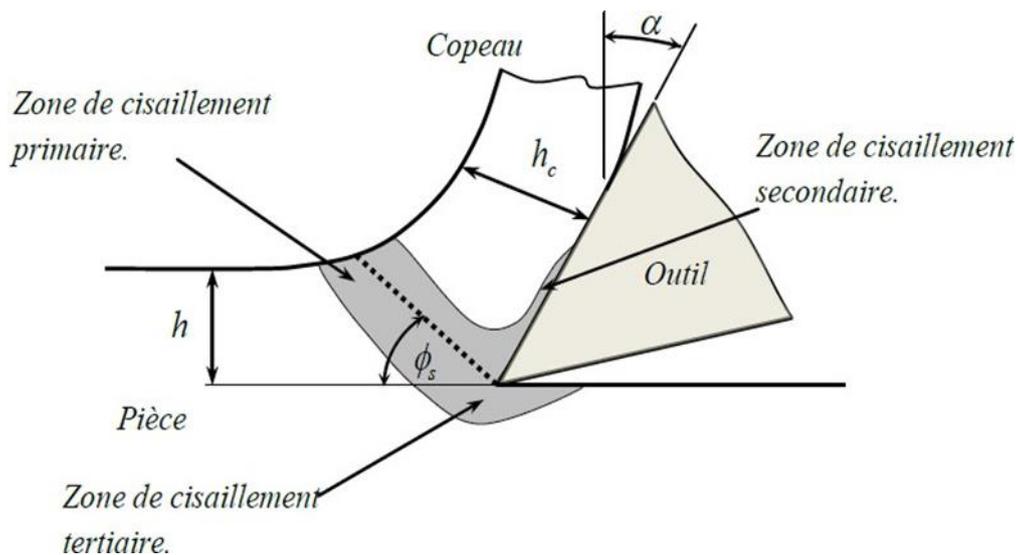


Figure I-5. Principales zones de cisaillement du copeau.

#### I.4.2. Formes de copeaux obtenus en usinage

Il existe plusieurs formes du copeau [13], on peut citer:

- ✓ le copeau continu ;
  - ✓ le copeau discontinu (ou festonné) ;
  - ✓ le copeau fragmenté ;
  - ✓ le copeau dentelé.
- **Copeau continu** : est le plus simple à traiter, la matière s'écoule sur l'outil de façon continue et stationnaire. Il se forme par déformation plastique de cisaillement, sans fissuration au niveau de la zone de cisaillement primaire (figure I.7-a-) par ex :tournage .
  - **Copeau discontinu** : il se caractérise par des profils d'écoulement oscillatoire de la matière lors de la coupe (figure I.6-b-) par ex fraisage.

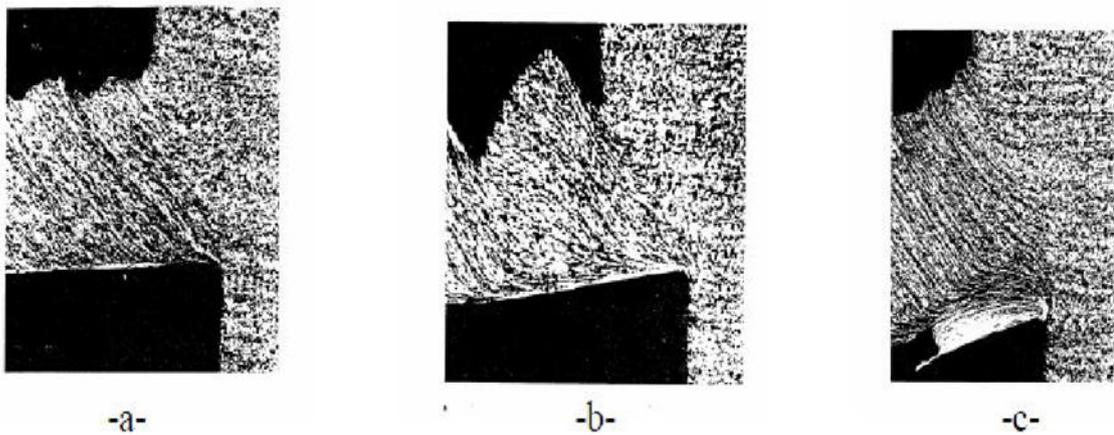


Figure I-6. Différents types de copeaux [13].

## I.5. Vibrations de la structure mécanique :

### I.5.1. Définition de vibration :

La vibration est un phénomène mécanique par lequel des oscillations se produisent autour d'un point d'équilibre. Le mot vient de la latine *vibration* ("secouant, brandissant"). Les oscillations peuvent être périodiques, comme le mouvement d'un pendule - ou aléatoires, comme le mouvement d'un pneu sur une route de gravier.

La vibration peut être souhaitable: par exemple, le mouvement d'un diapason, l'anche dans un instrument à vent ou un harmonica, un téléphone portable ou le cône d'un haut – parleur [14].

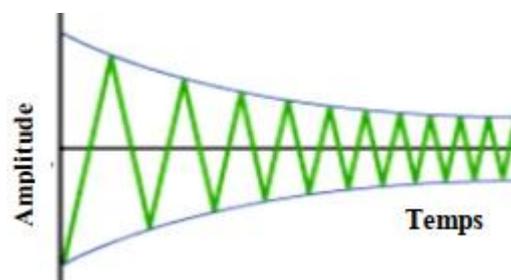


Figure I-7. Vibration libre

### I.5.2. Degrés de liberté :

La modélisation mathématique d'un système physique nécessite l'utilisation d'un ensemble de variables qui décrit le comportement du système. Le nombre minimum des variables indépendantes requises pour déterminer complètement les positions de toutes les parties d'un système à chaque instant est le degré de liberté du système. Une seule particule libre se déplace dans l'espace à trois degrés de liberté, et un choix bien approprié de coordonnées généralisées sont les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  de la particule par rapport à un repère fixe. Comme la particule se déplace dans l'espace, sa position est fonction du temps[15].

Un corps rigide libre (sans contraintes) possède six degrés de liberté, trois coordonnées de l'emplacement de son centre de masse, et la rotation angulaire autour de trois axes de coordonnées. Cependant les contraintes peuvent réduire ce nombre. Le mouvement plan d'un corps rigide présente trois degrés de liberté possible, le déplacement de son centre de masse dans un plan, et la rotation angulaire autour d'un axe. Deux organes rigides subissant un mouvement planaire ont six degrés de liberté, mais ils peuvent être connectés d'une manière à réduire le nombre de degrés de liberté. Les figures 1.8, 1.9 illustrent respectivement des systèmes 1, 2 et 3 degrés de liberté. La figure 1.6 représente un système continu.

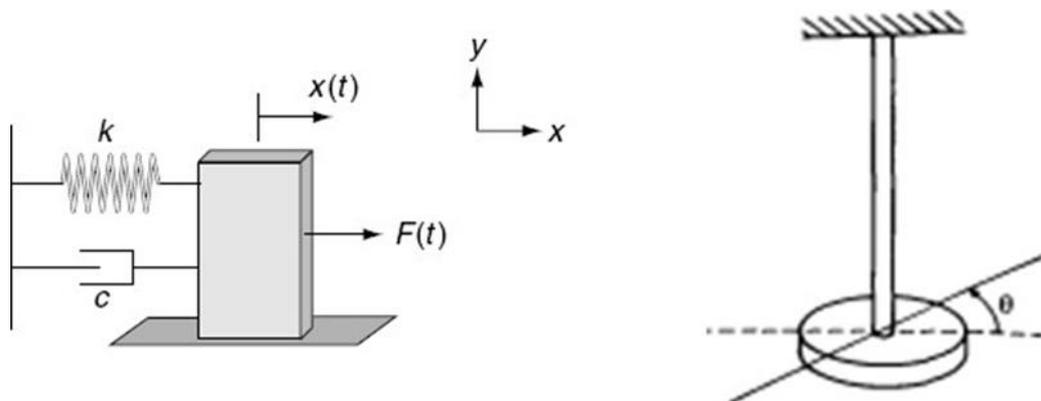


Figure I-8. Systèmes à un degré de liberté

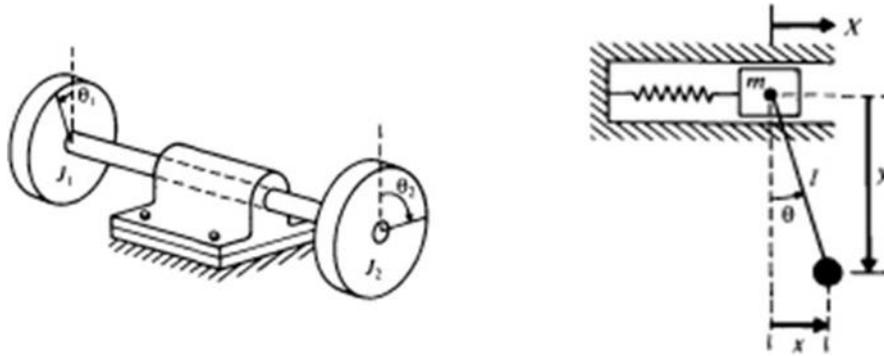


Figure I-9. Systèmes à deux degrés de liberté

**I.5.3. Vibrations à un degré de liberté :**

Le système mécanique le plus simple est le système à un seul degré de liberté. Ce dernier est caractérisé par le fait que son mouvement est décrit par une variable unique. Un tel modèle est souvent utilisé comme une approximation pour un système généralement plus complexe. Les excitations peuvent être divisées en deux types, perturbations initiales et les forces appliquées de l'extérieur. Le comportement d'un système causé par ces excitations est appelé réponse du système. Le mouvement est généralement décrit par les déplacements [15].

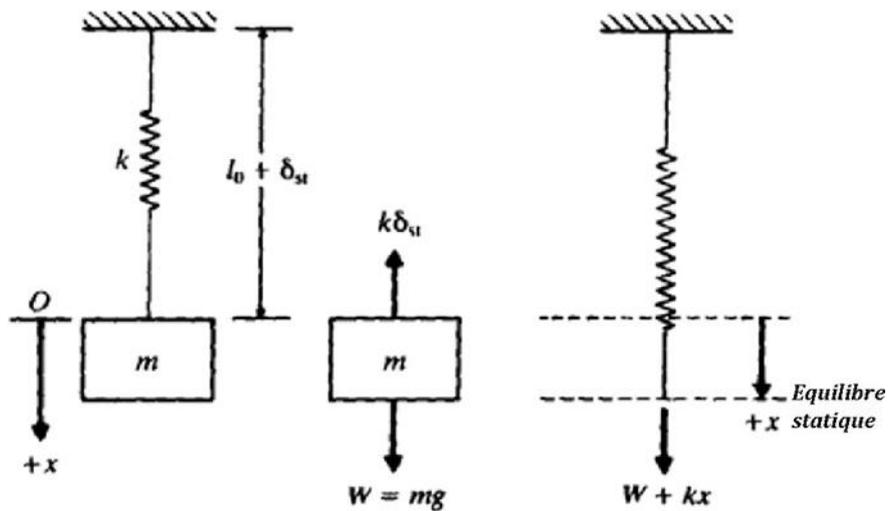
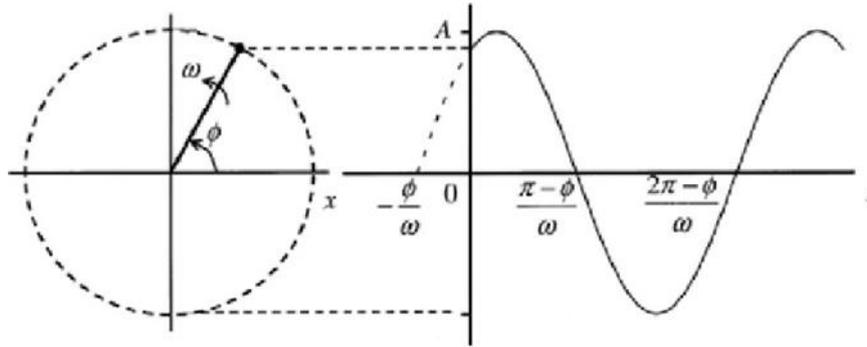


Figure I-10. Système équivalent masse et ressort



**Figure I-11. Représentation graphique du mouvement d'un oscillateur simple**

$$f(t) = F \sin * \frac{2\pi t}{T}$$

#### **I.5.4. Equation de mouvement de vibration à un degré de liberté :**

L'équation du mouvement de la masse  $m$  est obtenue en appliquant deux méthodes : la loi de Newton est les équations de Lagrange:

- Loi de Newton :  $\sum f = m \ddot{X}$
- $F_k = k(0 - x(t)) = -kx(t)$  : est la force de rappel du ressort
- $F_c = c(0 - \dot{x}(t)) = -c \dot{x}(t)$  : est la force due l'amortissement

L'équation du mouvement est alors

$$m \ddot{X}(t) + c \dot{X}(t) + kx(t) = f(t)$$

#### **I.5.5. Vibrations à deux degré de liberté :**

Pour étudier certaine vibration d'un solide rigide et celles d'un ensemble de plusieurs solides ou d'un solide déformable, il est nécessaire de connaître la variation en fonction du temps, ou de la fréquence, de plusieurs paramètres.

Les variations en fonction du temps de ces paramètres sont couplés. Les équations de mouvement du système mécanique considéré constituent un système différentiel.

Le système à 2 degrés de liberté présente l'avantage de pouvoir être traité analytiquement en même temps qu'ils introduisent le passage de un à plusieurs degrés de liberté.

Une modélisation linéaire d'un système à 2 DDL peut rapidement conduire à un système différentiel de la même forme que celui qui constitue les équations de mouvement d'un système de 2 masses – ressorts [16] :

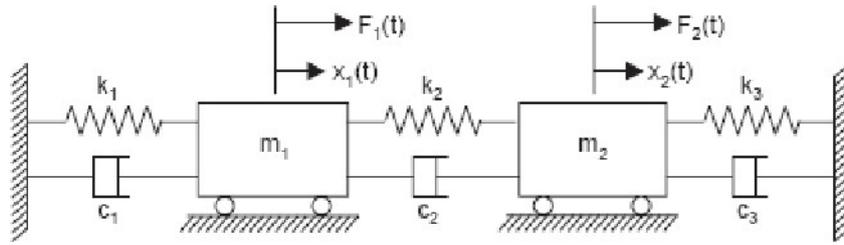


Figure I-12. Schématisation système à 2 DDL complet

### I.5.6. Equation de mouvement

Les équations du mouvement des 2 masses en translation (assurée par une liaison glisser parfaite) selon X :

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + (c_1 + c_2) \dot{x}_1(t) - c_2 \dot{x}_2(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2 x_2(t) = F_1(t)$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) + c_2 \dot{x}_1(t) + (c_2 + c_3) \dot{x}_2(t) - k_2 x_1(t) + (k_2 + k_3)x_2(t) = F_2(t)$$

# CHAPITRE II : VIBRATIONS EN USINAGE

## II.1. INTRODUCTION

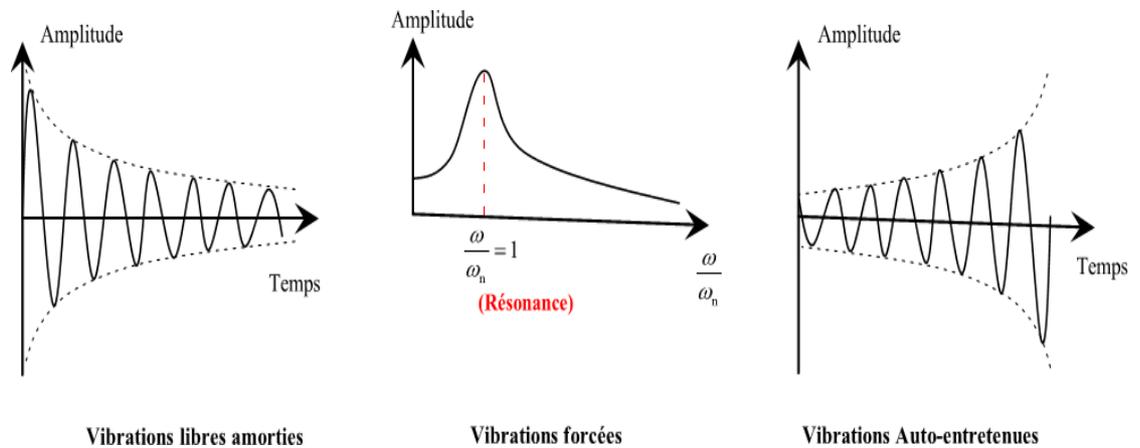
Depuis plus d'un siècle les vibrations d'usinage sont identifiées comme un frein majeur à la productivité. Lionel ARNAUD [17] montre d'abord que ce problème est multifactoriel, en faisant intervenir au même niveau des caractéristiques de la machine, de l'outil, de la pièce ainsi que les choix des conditions de coupe.

De plus, le problème est multifacette car il peut se manifester par des bruits, des états de surface dégradés, des casses d'outil, de l'usure de la machine, etc.

En 1907, dans son ouvrage fondateur sur l'art de la coupe des métaux, [18] :« le problème des vibrations d'usinage est le problème le plus obscur auquel est à faire face l'usineur ». Les solutions trouvées par les usineurs, sont souvent obtenues par tâtonnement et par le fruit de l'expérience (changer la vitesse, changer l'outil, augmenter le nombre de passes, brider la pièce différemment, mettre des éléments en caoutchouc, etc.....).

Les vibrations, phénomène dit aussi broutement, du système machine-montage- outil-pièce 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 [17].

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. Les vibrations constituent un obstacle majeur pour la recherche d'une plus grande productivité et d'une meilleure qualité des pièces réalisées. Ils accélèrent l'usure, dégradent le bec de l'outil et conduisent à des états de surface médiocres. 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. 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 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.



**Figure II.1. Trois familles de vibrations présentées en usinage**

## II.2. Vibrations libres

Il s'agit de vibrations d'une structure (outil, broche, pièce) en réponse à un choc ou un lâcher. Ces vibrations peuvent être déclenchées par un seul impact et elles s'amortissent d'elles-mêmes en fonction du comportement dynamique et de l'amortissement du système. Dans le cas de l'usinage, que ce soit en tournage ou en fraisage, elles sont généralement utilisées pour la caractérisation du système, lors d'un sonnage ou test du marteau

## II.3. Vibrations forcées

Les vibrations forcées sont la réponse vibratoire d'un système mécanique à une excitation périodique. Pour ce qui est de l'usinage, c'est par exemple la réponse du système lors d'une opération où la coupe est interrompue (discontinue).

Le fraisage est la principale opération d'usinage où la coupe est interrompue. En effet, l'outil est sollicité de manière périodique par les efforts de coupe appliqués sur les dents. Les dents passant alternativement dans la matière, les efforts de coupe varient et vont générer des vibrations forcées. Dans la mesure du possible, il est recommandé d'avoir une coupe la plus continue possible pour limiter l'impact de ce type de vibration. L'influence de la continuité de la coupe, en utilisant des fraises avec un angle d'hélice important ou en jouant sur l'immersion radiale, l'avance par dent

ou la profondeur de passe de la fraise [19].

Ce type de vibrations peut également apparaître dans le cas du tournage d'une pièce non cylindrique. Dans ce cas, la variation de la profondeur de passe au cours d'une révolution, entraînera comme dans le cas du fraisage, des variations d'effort et donc excitera l'outil en vibrations forcées.

On introduit d'autres sources possibles de vibrations forcées comme:

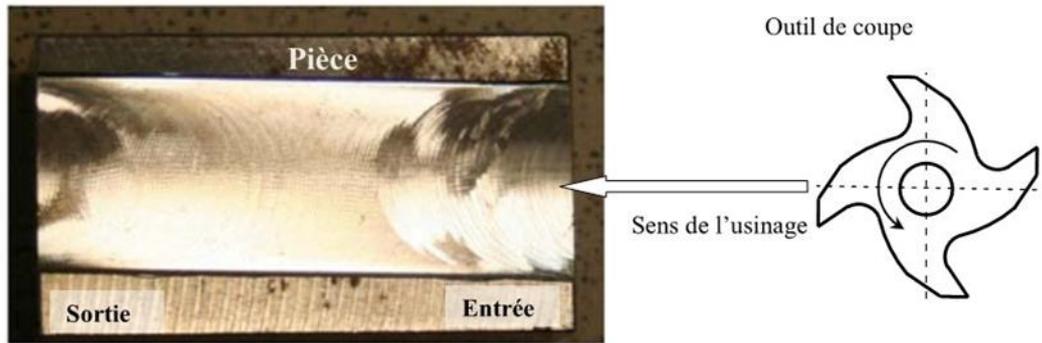
- des hétérogénéités matière;
- des irrégularités géométriques de la pièce;
- des effets de faux-rond et de balourd;
- une usure excessive ou la casse d'une des dents dans le cas du fraisage.

Cependant elles restent secondaires par rapport à l'irrégularité de la coupe, mais ne doivent pas être oubliées dans certaines circonstances comme par exemple:

- un outil tournant à très grande vitesse en fraisage;
- une pièce déformée par le serrage des mors en tournage [21].

Ces vibrations ont un impact relativement faible sur l'état de surface car elles ont la même fréquence que le passage des dents. Par conséquent, à chaque tour d'outil, l'enlèvement de matière est identique ce qui n'implique pas d'irrégularités lors de l'usinage.

- Cependant lors de l'entrée ou de la sortie de l'outil dans la matière, lorsque le régime permanent n'est pas encore établi, la combinaison des vibrations libres (dus à l'impact de l'outil dans la matière) et des vibrations forcées (dus à la rotation de l'outil) entraîne la plupart du temps des broutements et des bruits désagréables [22] (Figure:II.2



**Figure II.2. Photo d'une passe d'usinage prise pour mettre en évidence les instabilités temporaires de l'usinage à l'entrée de la pièce (à droite) et à la sortie de la pièce (à gauche)[20]**

#### **II.4. Vibrations auto-entretenues (broutement)**

Les vibrations auto-entretenues ont pour source le passage d'un régime de coupe stable à un régime de coupe instable. C'est à dire quand le système usinant se met à vibrer à une fréquence différente de la fréquence de passage des dents et le régime dynamique de la coupe est différent du régime dynamique de l'outil. Elles sont la cause du phénomène appelé broutement ou "chatter".

Ce phénomène est très préjudiciable car il entraîne généralement:

- un très mauvais état de surface de la pièce finie (Figure I.3);
- une baisse de la durée de vie de l'outil en accélérant l'usure ou dans des cas extrêmes entraînant la casse de l'outil;
- un bruit très désagréable lors de l'usinage;
- une usure prématurée de la broche de la machine.



(a) Sans vibrations auto-entretenues



(b) Avec vibrations auto-entretenues

**Figure II.3 : Conséquences des vibrations [23]**

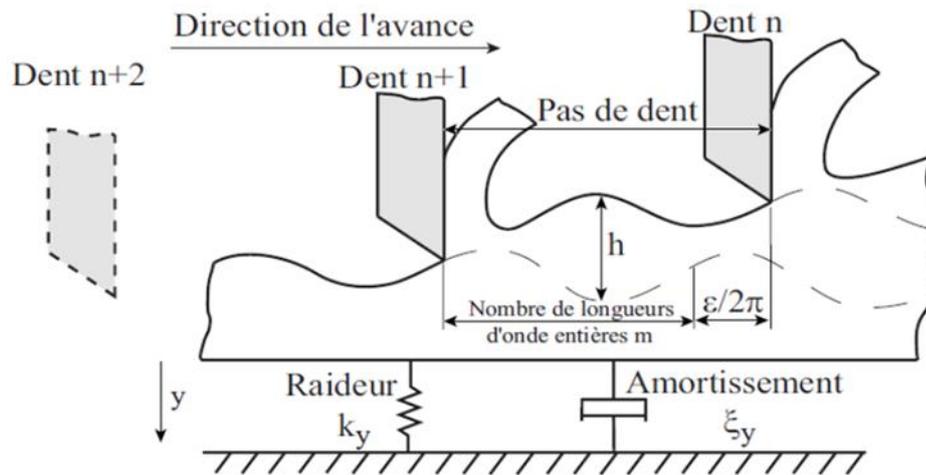
Dans le but de comprendre les phénomènes aboutissant à l'apparition du broutement et de développer les méthodes de prédiction, Zhao et Balachandran [24] évoquent les sources reconnues de ces vibrations auto-entretenues et les classent en deux catégories: elles peuvent être d'origines régénératives et non-régénératives.

#### **II.4.1. Broutement d'origine régénératif**

Le broutement régénératif, doit son origine dans la régénération de la surface précédemment usinée. Dans le cas d'un usinage par enlèvement de matière, l'outil pré-usiné la surface de la passe précédente. Cette surface a été générée en présence de vibrations forcées. Ces vibrations engendrent une surface aux ondulations régulières.

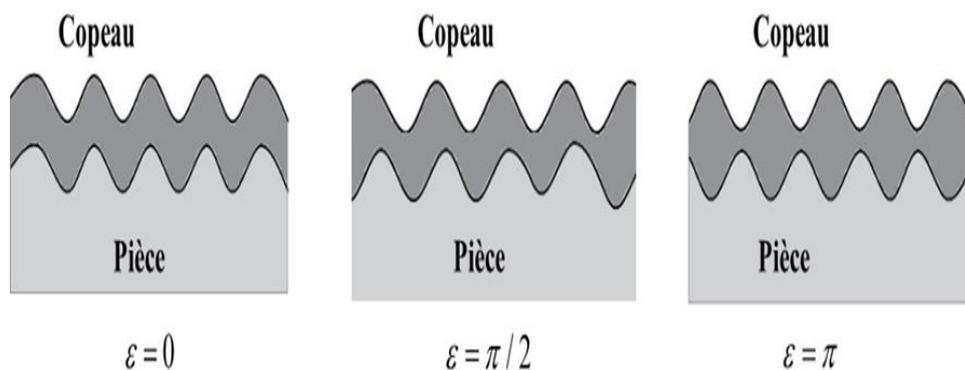
Dans le cas de l'apparition de broutement, les fréquences de passage de dent et de vibrations d'outil n'étant pas les mêmes, un déphasage va apparaître entre la surface usinée à la passe ( $n$ ) et à la passe ( $n - 1$ ). Ce déphasage illustré sur la figure (I.4), implique une variation de l'épaisseur de copeau, donc des efforts de coupe et finalement du comportement de l'outil [19].

La variation des efforts de coupe provoque alors un mouvement vibratoire de l'outil, impliquant une première ondulation de la surface usinée. Lorsque la dent suivante repasse sur cette surface ondulée, l'épaisseur nominale de copeau est variable. Cette nouvelle variation de l'effort de coupe va de nouveau entraîner un mouvement vibratoire de l'outil, impliquant une nouvelle surface ondulée (figure I.4). Ce phénomène est la source des vibrations auto entretenues.



**Figure II.4. Déphasage lors de la régénération de surface dans le cas d'une opération d'enlèvement de matière**

Le mouvement vibratoire actuel est directement influencé par l'historique de l'usinage. Un des paramètres à la source du phénomène est donc le temps entre deux passages de dent et ce temps de retard a un effet direct sur le déphasage entre les ondulations. Il est notamment un des éléments clefs pour la modélisation des vibrations auto entretenues



**Figure II.5. Effet relative à la différence de phase sur l'épaisseur du copeau (marques laissées par deux dents successives)**

En pratique, il y a deux évolutions possibles pour l'amplitude des vibrations. Si le déphasage entre l'ondulation de la surface précédente et le mouvement actuel de l'outil est faible, la section de copeau varie peu au cours de l'usinage (figure I.5). Dans ce cas, le système subit d'avantage des vibrations forcées, ayant en pratique peu de conséquences sur la surface usinée. C'est notamment ce régime de coupe qui est souvent choisi pour limiter les conséquences des vibrations auto-entretenues. En fraisage, les vibrations forcées et autoentretenues sont difficiles à séparer [20].

Au contraire, si le déphasage est assez grand et si l'amortissement ou la rigidité de la structure sont insuffisants, la variation de la section de copeau apporte suffisamment d'énergie pour amplifier le mouvement au cours de l'usinage. En pratique, ces vibrations instables sont stabilisées par des non-linéarités, par exemple lorsque l'outil sort de la matière (hors coupe) et limite ainsi l'apport d'énergie. De plus, la sortie de la matière implique généralement une forte dégradation de la surface usinée (figure II.6).

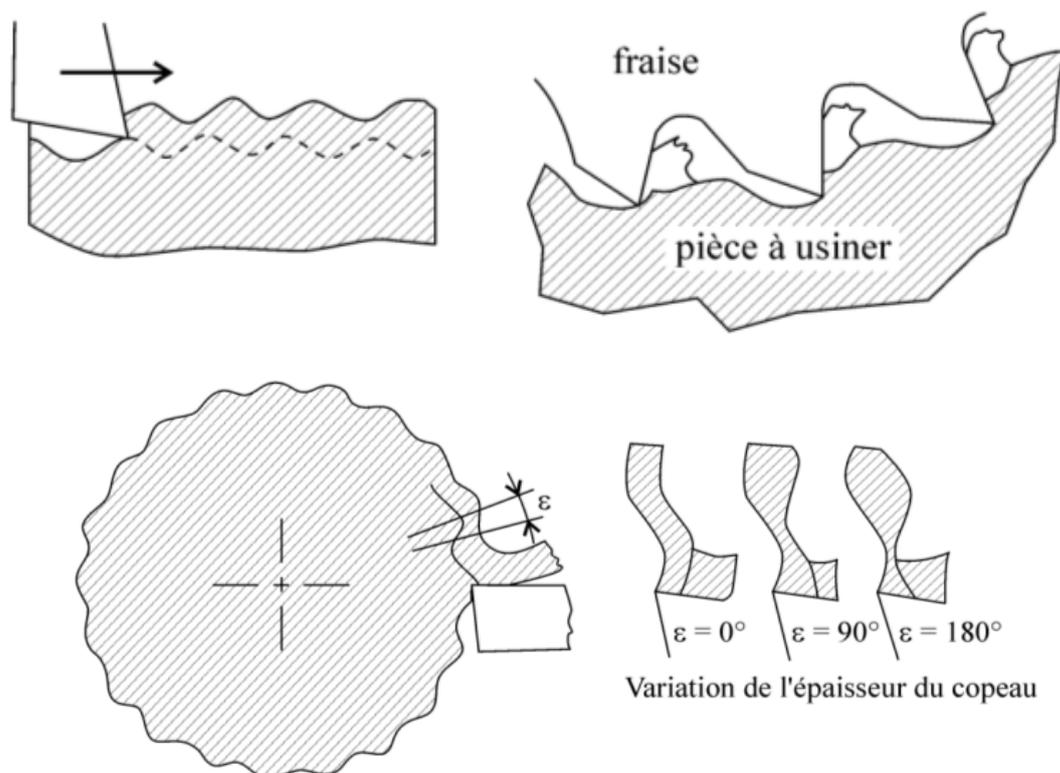


Figure II.6. Régénération des vibrations en broutement [25]

#### II.4.2. Broutement d'origine non-régénératif

Le broutement d'origine non-régénératif a plusieurs causes possibles:

- les non-linéarités apparaissant lors d'un usinage très instable. Dans certains cas, l'outil aura tendance à sortir de la matière lorsque les vibrations sont trop importantes. Ceci entraîne un comportement non-linéaire du système pièce - outil;
- le couplage des modes des vibrations : chacun des axes de l'outil ou de la machine possède des modes de vibrations qui peuvent s'influencer;
- d'autres phénomènes non-linéaires dus à la coupe de la matière comme:

le talonnage entre l'outil et la pièce ou les effets thermomécaniques liés à la formation du copeau.

### II.4.3. Phénomène de couplage des modes

Thusty et Polacek expliquaient également les vibrations auto-entretenues par le phénomène de couplage des modes. Ce phénomène intervient lorsqu'il y a couplage entre deux modes propres orthogonaux de l'outil. Il en résulte un mouvement relatif elliptique entre la pièce et l'outil qui engendre une variation de l'épaisseur de copeau, et donc une variation de l'effort de coupe.

Cette variation d'effort entretient ainsi le mouvement de l'outil (figure II.7). Thusty et al montrent que ce phénomène intervient en même temps que la régénération de la surface, et amplifie celle-ci. Le couplage des modes n'intervient plus avec un système à un degré de liberté.

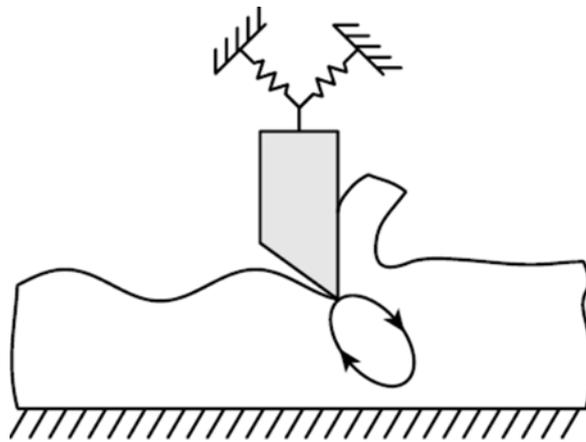
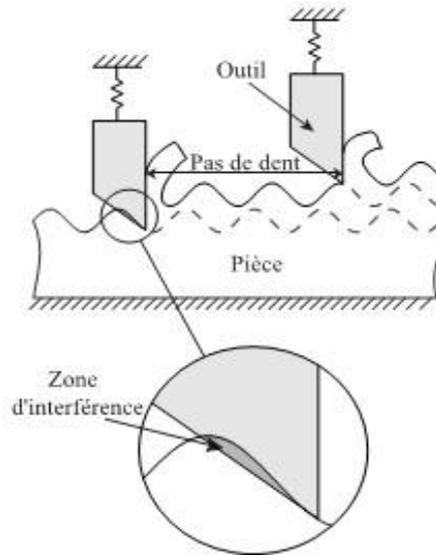


Figure II.7. Phénomène de couplage des modes de vibrations

### II.4.4. Talonnage

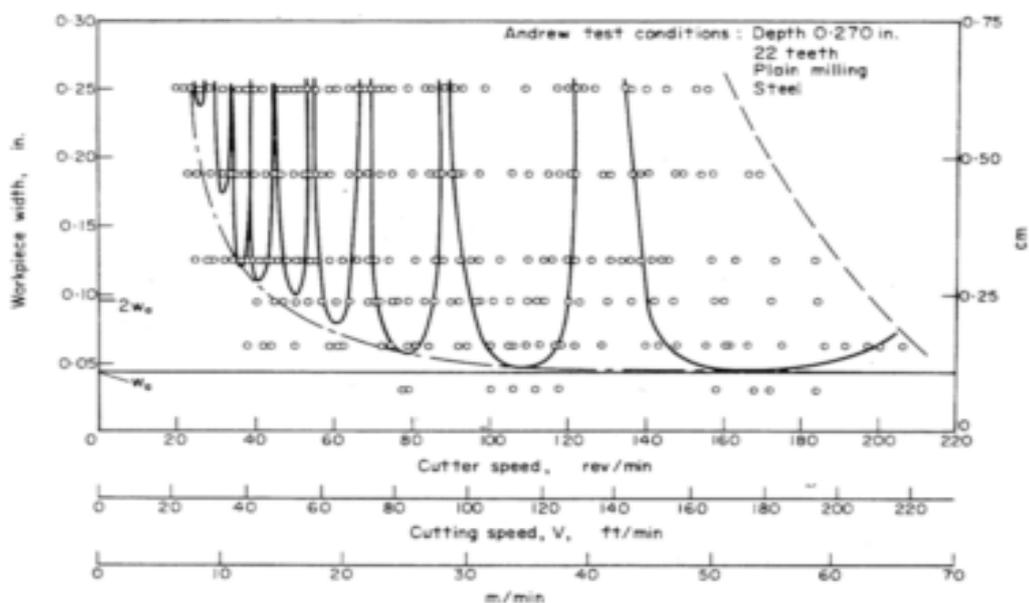
Le talonnage, étudié pour la première fois par Albrecht, joue un rôle prépondérant dans le comportement dynamique du système usinant. Il apparaît lorsque la face de dépouille de l'outil entre en contact avec la surface usinée et vient frotter sur celle-ci (figure II.8). Keg a étudié le phénomène de stabilité à faible vitesse et montre qu'il existe un autre effort de coupe en fonction de la vitesse de pénétration de l'outil dans la matière et de l'amortissement de la coupe. Il conclut que cet

amortissement ne peut découler que du phénomène de talonnage, et qu'il est la cause principale de la stabilité de la coupe à ces vitesses (figure II.9)



**Figure II.8. Phénomène de talonnage de l'outil**

Thrusty a expliqué le rôle du talonnage à faible vitesse de la façon suivante. La fréquence de vibration de la pièce ou de l'outil est souvent très proche de l'un de ses modes propres à faible vitesse, la période de dent est beaucoup plus importante que la période des vibrations. Il apparaît donc un nombre élevé de longueurs d'ondes entières entre deux passages de dent. La pente de la surface à usiner est assez importante pour qu'il y ait interaction entre cette surface et la surface de dépouille de l'outil (figure II.8)



**Figure II.9. Effet du talonnage sur la limite de stabilité**

# CHAPITRE III : METHODES DES MESURES DES VIBRATIONS

### **III. INTRODUCTION :**

Plusieurs types de grandeurs peuvent être mesurés en usinage, nous présentons également les principaux capteurs associés par le Fruit de nombreux travaux, les efforts de coupe sont parmi les paramètres les plus importants pour un usinage. Ils sont essentiellement mesurés par des dynamomètres utilisant l'effet piézoélectrique (figure III.1). Ce type de capteur est limité par sa bande passante (de l'ordre du KHz), ce qui le rend peu adapté à l'usinage grand vitesse

De plus, les mesures sont souvent perturbées par la contribution dynamique de la platine en réponse aux vibrations régénératives. L'utilisation d'une donnée comme la puissance consommée par la coupe ou encore le courant nécessaire au pilotage de broche à paliers magnétiques actifs, permet aussi une estimation des efforts de coupe. Mais là encore, les données sont extrêmement bruitées ou les efforts en jeu sont faibles. Cette mesure indirecte des vibrations est peu intéressante [26].

### **III.1. Méthodes de mesure générales :**

L'étude des vibrations en cours d'usinage nécessite la mesure de celles-ci. Il faut être capable de les mesurer dans un environnement difficile, du fait de la configuration de la machine (cratérisation et mouvements des axes), de la lubrification, du bruit ambiant et de la projection de copeaux. Si la technique de mesure est classique (mesure du signal, puis traitement FFT), il faut choisir le capteur avec précaution. Nous distinguerons ici les mesures directes avec contact et sans contact, et les mesures indirectes.

#### **III.1.1. Mesures directes :**

Ici, le capteur mesure directement les déplacements, vitesses ou accélérations de la pièce ou de l'outil pendant l'usinage, il faut choisir le capteur avec précaution nous montrons ici les mesures avec et sans contact

##### **III.1.1.1. Mesure avec contact :**

Le capteur de vibrations le plus couramment utilisé est l'accéléromètre, qui mesure les accélérations. C'est un capteur qui est en contact (collé) avec le corps à mesurer, et qui doit donc se trouver au cœur de l'usinage. Son utilisation pose plusieurs problèmes. Premièrement, il est impossible à utiliser lorsqu'on veut mesurer les vibrations de l'outil, car celui-ci est en rotation. Il faut donc le placer sur la broche pour capter le signal de l'outil transmis à celle-ci. Deuxièmement, la masse de l'accéléromètre n'est pas nulle, et dans le cas de l'usinage de petites pièces, on ne mesure plus le comportement de la pièce, mais le comportement de la pièce et du capteur. Il faut également faire attention à l'endroit où est placé le capteur, pour éviter tout risque de collision entre l'outil et celui-ci.

Bien qu'il n'y ait pas contact entre le capteur et le corps à mesurer, les capteurs de déplacement (capacitif, inductif) sont également considérés comme des capteurs avec contact, dans le sens où ils doivent être placés à proximité du corps à mesurer (quelques dixièmes de millimètres). Ces capteurs ne posent pas le problème de la masse ajoutée comme les accéléromètres. Par contre, la très faible distance de mesure peut entraîner des collisions sous l'effet de l'amplitude des vibrations, qui peuvent endommager le capteur [27].



**Figure III.1. Dynamomètre, microphone**



**Figure III.2. Accéléromètre**

#### **III.1.1.1. Mesures sans contact**

Contrairement aux capteurs avec contact, les capteurs sans contact sont capables de mesurer les vibrations du système usinant à une distance importante (plusieurs mètres). Ceci ne pose pas le problème de l'interaction entre le capteur et la pièce à mesurer.

On rencontre principalement des capteurs de pression acoustique (microphone, sonde d'intensité acoustique). Ce sont des capteurs très courants, de taille réduite et facilement utilisables. Ces capteurs possèdent un avantage : ils sont sensibles aux bruits environnants. Ainsi, ils capteront aussi bien les vibrations de la pièce que les vibrations de l'outil. Mais c'est également un inconvénient. Ils vont également capter le son émis par d'autres sources que le système usinant en vibration. Il faut donc être capable d'isoler le signal recherché du signal mesuré. Pour isoler le signal émis par les vibrations du système usinant, il existe plusieurs techniques (figure III-2) les ont comparées, et ils concluent qu'une des méthodes les plus efficaces est la mesure de l'intensité acoustique. L'intensité acoustique est maximale lorsque la source sonore se trouve dans l'axe du capteur. Il faut donc pointer le capteur vers le système usinant, le signal ayant la plus grande intensité acoustique correspondant à la source pointée par le capteur

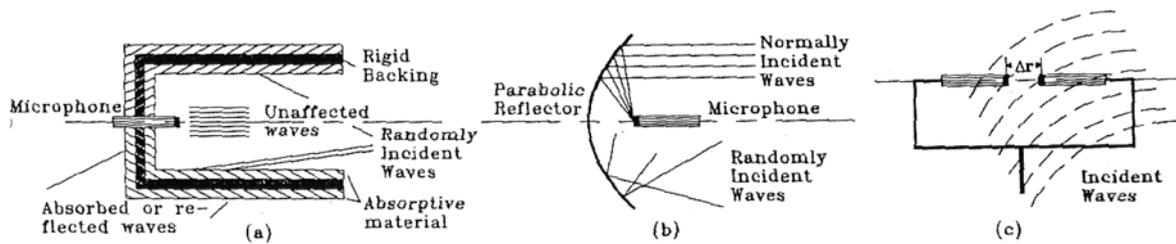


Figure III.3 . Différentes méthodes d'isolation du signal acoustique

Les vibromètres laser sont également utilisés (figure III.3). Il s'agit d'un capteur qui, par le biais d'un faisceau laser, mesure la vitesse de déplacement par effet Doppler. Contrairement aux capteurs acoustiques, le vibromètre laser ne mesure que le corps sur lequel il est pointé. Il faut donc au préalable savoir qui de la pièce ou de l'outil va vibrer. Dans la pratique, les vibrations étant transmises dans les deux corps, il est possible de mesurer les vibrations de l'outil en pointant la pièce, mais le signal est plus faible. Ce capteur présente l'avantage de pouvoir mesurer les vibrations depuis l'extérieur de l'enceinte de la machine, le faisceau laser passant à travers les vitres. Par contre, il est très difficile de réaliser des mesures d'usinage sous lubrification, le faisceau n'étant pas réfléchi correctement par la surface du corps à mesurer [27].



Figure III.4. Vibromètre laser

### III.1.2. Mesures indirectes :

Il s'agit ici de mesures de grandeurs indirectement liées aux déplacements, vitesses, accélérations du système usinant. Les mesures les plus courantes sont les mesures des efforts de coupe de l'outil sur la pièce. Les efforts de coupe sont directement liés aux déplacements relatifs entre l'outil et la pièce par le biais de la loi de coupe. Ainsi, on mesure aussi bien les vibrations de l'outil que les vibrations de la pièce. Le capteur d'efforts (dynamomètre) se présente sous la forme d'une platine sur laquelle est montée la pièce, et qui est installée sur la table de la machine. Le capteur mesure ainsi les efforts dans les trois directions. Cependant, il faut prendre garde à ce que le comportement dynamique du capteur n'interfère pas avec le comportement du système usinant. Le premier mode propre de ces platines se situe aux environs de 1 kHz, ce qui est du même ordre de grandeur que les fréquences de vibrations du système usinant. Nous risquons alors de mesurer les vibrations de la platine, et non du système usinant [27].

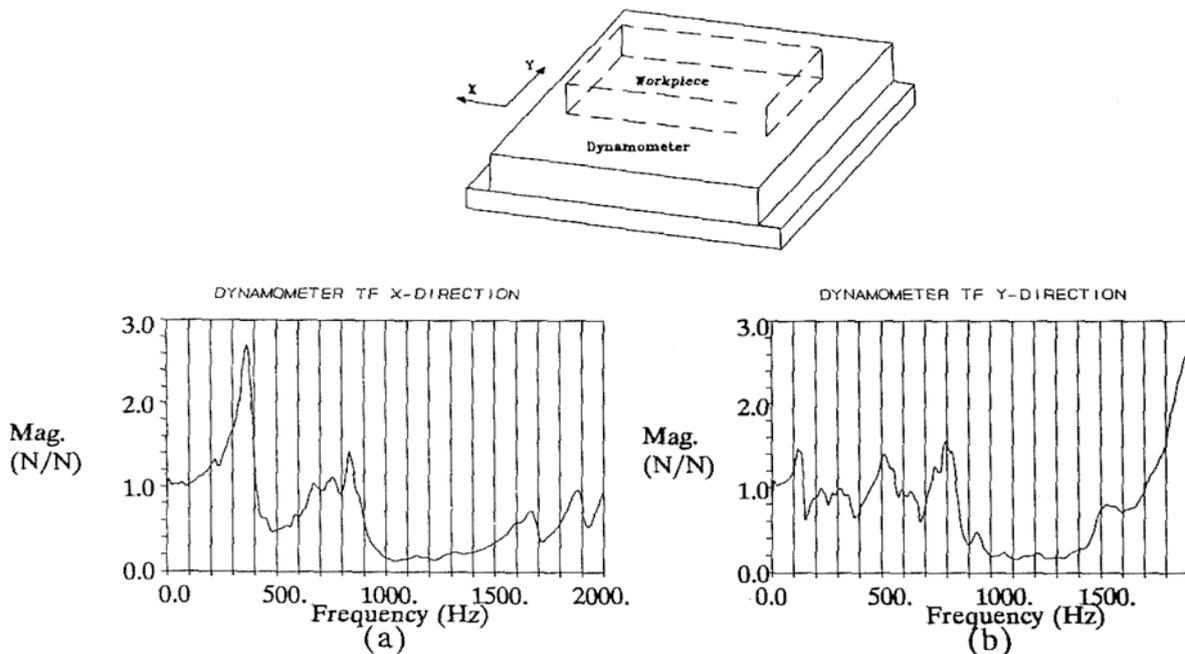


Figure III.5. Mesures des vibrations par dynamomètre

Il est également possible de mesurer les vibrations en étudiant l'intensité du courant de la broche. Cette intensité est l'image du couple exercé par l'outil sur la pièce, et donc des efforts de coupe. Comme nous l'avons vu précédemment, nous pouvons étudier les vibrations à partir des efforts de coupe.

# CHAPITRE IV : INFLUENCE DES VIBRATIONS SUR L'USINAGE

#### **IV. INTRODUCTION :**

Usinage des pièces, conduit à considérer un ensemble de procédures qui doivent être effectuées par des ingénieurs pour préparer la machine-outil ou le centre d'usinage afin d'atteindre une productivité élevée en termes de qualité et de précision spécifiée par le concepteur. L'objectif de chapitre fait partie d'une recherche plus vaste (figur.IV.1), comportant une analyse expérimentale importante du comportement dynamique de la broche afin de limiter le temps d'intervention et d'entretien lors de l'usinage pièces. De plus nous souhaitons obtenir le plus petit nombre possible de rebuts généré par un manque de qualité de surface et de précision géométrique des pièces usinées. En outre, la qualité du comportement dynamique de la broche peut influencer le contact pièce/outil. Il peut en résulter, implicitement, une influence sur la qualité de la partie active de l'outil tout en gardant néanmoins les coûts de production dans des limites concurrentielles acceptables. L'ensemble de la présente recherche est de caractériser le système usinant tridimensionnel, en particulier la broche, les axes linéaires et la structure de la machine-outil. L'objectif est de déterminer les imperfections ou les défauts de fonctionnement dus à l'usure. En effet, ceux-ci peuvent influencer la précision de l'usinage. Ce chapitre analyse le comportement de la broche en utilisant différentes méthodes d'analyse dynamique, les machines-outils d'aujourd'hui possèdent des comportements dynamiques assez élevés en ce qui concerne les rigidités et les capacités d'amortissement. Cependant les causes d'apparition de vibrations, ou bien des régimes instables, sont données par la dynamique du processus de coupe dans différentes conditions de travail.

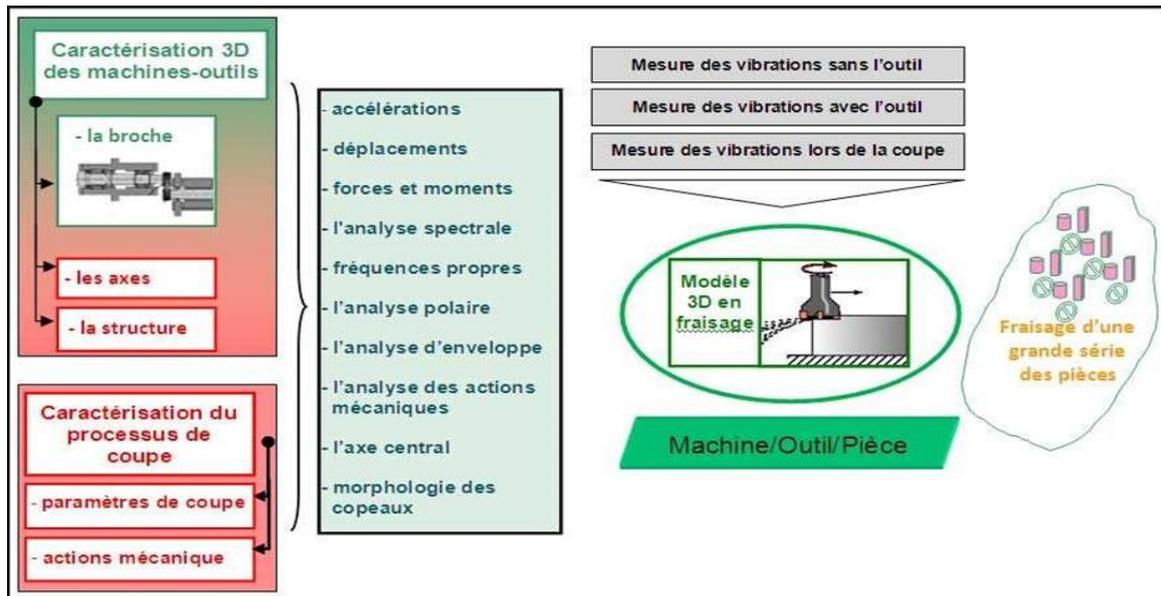


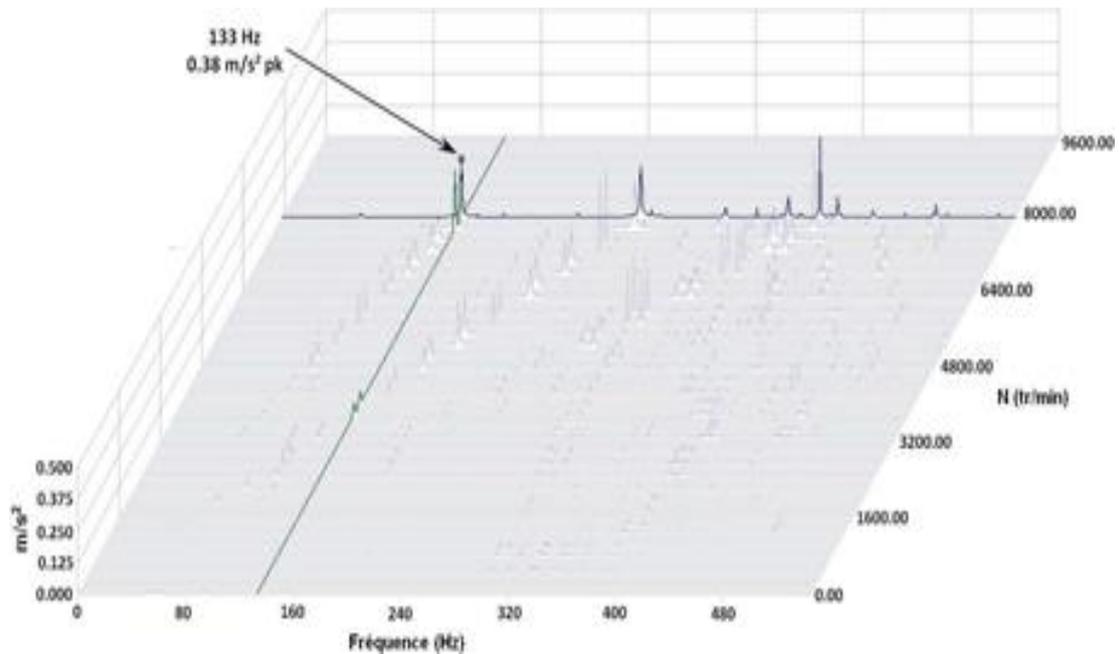
Figure. IV.1. Démarche adoptée

#### IV.1.1. Etude dynamique de la broche libre

Nous mesurons d'abord la vitesse de rotation de la broche sans l'outil, puis avec l'outil et en fin pendant le processus de coupe. Le premier test effectué, (Figure IV. 2) (mesures dans la direction d'avance X), montre l'accroissement de l'amplitude des vibrations en fonction de la vitesse de coupe, notamment à partir de 5.000 tr/min et jusqu'à 8.000 tr/min. L'analyse des accélérations est effectuée pour identifier les différents défauts existants sur la chaîne cinématique, mais aussi en vitesse de vibration et de déplacement.

Tableau: 1. Paramètres de coupe.

Fraise	N	$f_z$	$V_f$	$V_c$	$a_p$
	(tr/min)	(mm/dent)	(mm/min)	m/min	(mm)
	1.000	0,066	396	251,32	
diamètre 80 mm	2.000	0,033	396	502,64	1
(z = 6 dents)	5.000	0,033	990	1.256,6	



**Figure IV.2. Diagramme Waterfall des accélérations, broche libre sans l'outil**

Nous observons une augmentation de l'amplitude des vibrations. Nous analysons le spectre de fréquence pour chaque palier de vitesse de rotation. Les fréquences génératrices des vibrations sont alors recherchées. La figure IV.2 présente l'étude des fréquences données par l'accéléromètre sur les trois directions de mouvement de la machine, plus spécialement dans les conditions de vitesse à 8.000 tr/min. Sur la fréquence fondamentale (première harmonique qui correspond à la fréquence de rotation) nous trouvons une amplitude très importante par rapport à l'amplitude globale. Par exemple, sur X nous avons une amplitude de 0,52 mm/s pour la vibration globale et de 0,45 mm/s pour l'harmonique du premier ordre. De même sur Y nous avons 0,98 mm/s pour la vibration globale et 0,97 mm/s pour l'harmonique du premier ordre. Enfin, sur Z nous constatons 0,3 mm/s en vibration globale et 0,19 mm/s d'amplitude sur l'harmonique du premier ordre. Lors de cette analyse pour chaque vitesse de rotation utilisée nous constatons la persistance d'une amplitude élevée de la fréquence fondamentale donnée par la vitesse de rotation de la broche. L'équilibrage de la broche s'avère donc nécessaire pour un bon fonctionnement de celle-ci. A présent, nous nous intéressons au fraisage des pièces de grandes dimensions. Dans cette optique, nous utilisons des fraises de grand diamètre. L'analyse dynamique est menée sur le comportement de la broche munie d'une fraise neuve de diamètre 80 mm type Sandvika Coromant, à six dents (R365-080Q27-15M). Lors des essais effectués avec l'outil, en suivant le même protocole expérimental que précédemment, nous déterminons le diagramme de Waterfall présenté à la Figure IV.4. Nous observons que l'amplitude atteinte est de 2,05 m/s<sup>2</sup> pour la vitesse de

rotation de 8.000tr/min. L'amplitude présente le même comportement de croissance en fonction de la vitesse. Cependant, la croissance de l'amplitude des vibrations correspondant à la fréquence fondamentale est plus importante avec l'outil que sans l'outil. [30].

#### **IV.1.2. Etude de la broche avec l'outil :**

Maintenant l'analyse est approfondie au niveau de l'outil pour caractériser son état dynamique et son évolution en fonction de la vitesse de rotation [28]. La nécessité de développer des applications à l'aide du traitement du signal nous est imposée par les exigences de qualité des produits manufacturés, de maintenance et de coûts de production. L'analyse des signaux est effectuée pour 98.304 lignes spectrales. Ensuite nous utilisons une analyse FFT synchrone et par une double intégration nous obtenons les déplacements. Comme l'équilibrage peut avoir des influences vibratoires sur le comportement dynamique de l'outil [29] nous nous efforçons de déterminer les différents effets des vibrations sur celui-ci. Nous déterminons l'ellipse des déplacements de vibration dans le plan (X, Y) et le diagramme polaire pour les composantes des vecteurs de vibrations selon X, Y et Z. Nous privilégions deux configurations de la position de l'outil dans le porte- outil : à  $0^\circ$  (première position de l'outil dans le cône de la broche) et à  $180^\circ$  (deuxième position de l'outil tourné de  $180^\circ$  par rapport à la première position). Celles-ci correspondent en effet à l'harmonique du premier ordre,

Dans la position à  $0^\circ$  nous déterminons les caractéristiques de l'ellipse des déplacements. Son grand axe est de  $4,5 \mu m$  et le petit axe de  $1,4 \mu m$ . L'angle d'inclinaison du plan de l'ellipse est de  $20^\circ$ . De même pour la position à  $180^\circ$  l'angle d'inclinaison du plan de l'ellipse est de  $63^\circ$  tandis que le grand axe est de  $3,4 \mu m$  et le petit axe de  $1,6 \mu m$ . Avec ces différentes amplitudes et grâce au diagramme polaire nous obtenons les amplitudes et la position angulaire pour les trois directions. Nous remarquons une déficience de l'outil [30].

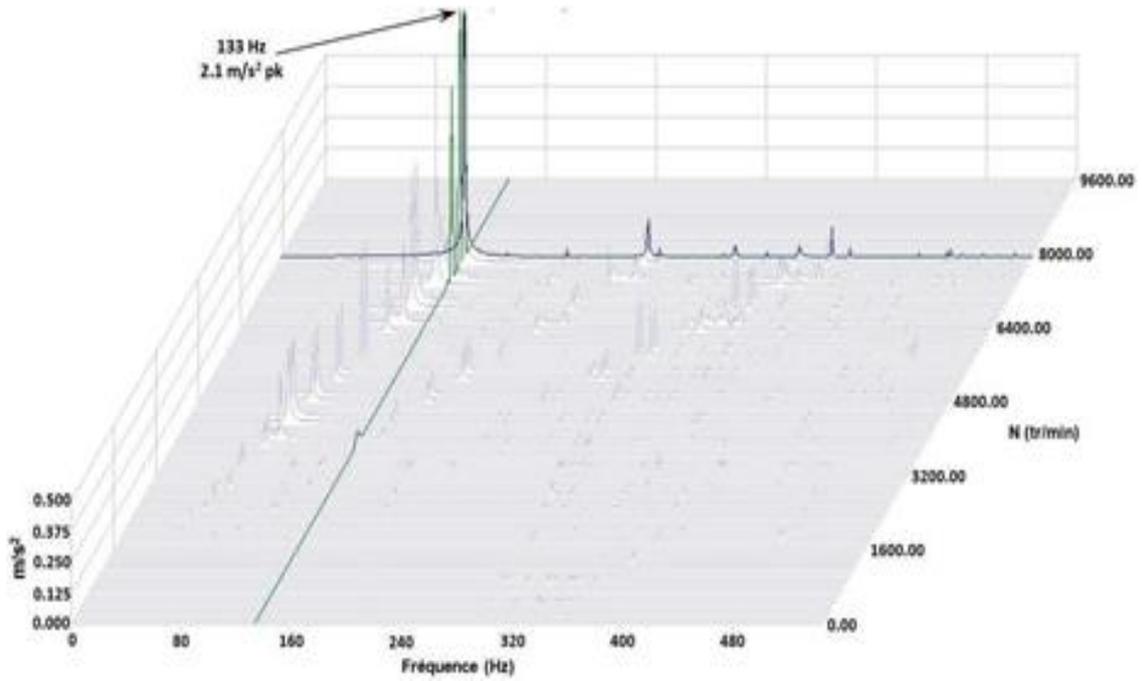


Figure IV.3. fréquences pour la vitesse de rotation de 8.000 tr/min sur les trois directions X, Y et Z de la machine.

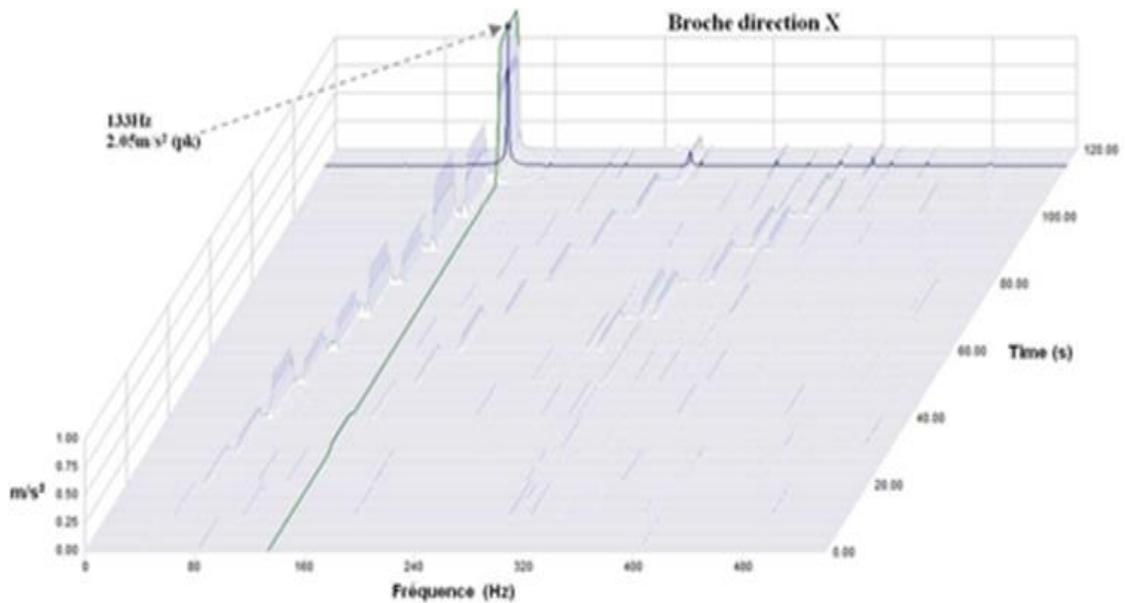


Figure IV.4. Diagramme de Waterfall des accélérations, broche avec l'outil, fraise de diamètre 80 mm à 6 dents.

### IV.1.3. Etude de la broche lors de la coupe :

L'étude dynamique continue avec l'analyse du comportement pendant la coupe. Pour ces essais, l'outil utilisé est de type Sandvik R365-080Q27-15M (plaquette de carbure CBN). Le matériau usiné est de type aluminium. Pour chaque essai, en fonction de la vitesse de coupe et d'avance, les efforts de coupe sont mesurés en même temps que les vibrations. Lors des mesures effectuées nous observons qu'il y a des dents qui sont plus chargées. Les résultats dynamométriques obtenus sont validés par les signaux ( $X_d$ ,  $Y_d$  et  $Z_d$ ) obtenu grâce à l'accéléromètre tridimensionnel, fixé sur la pièce, et aussi grâce à l'accélération mesurée sur le corps de la broche,  $X_b$  dans la direction X de la machine (Figure IV. 8). Le caractère variable du travail des dents pendant la coupe a une influence importante sur le comportement dynamique de la broche que nous pouvons analyser à partir des données accélérométriques mesurées par les accéléromètres.

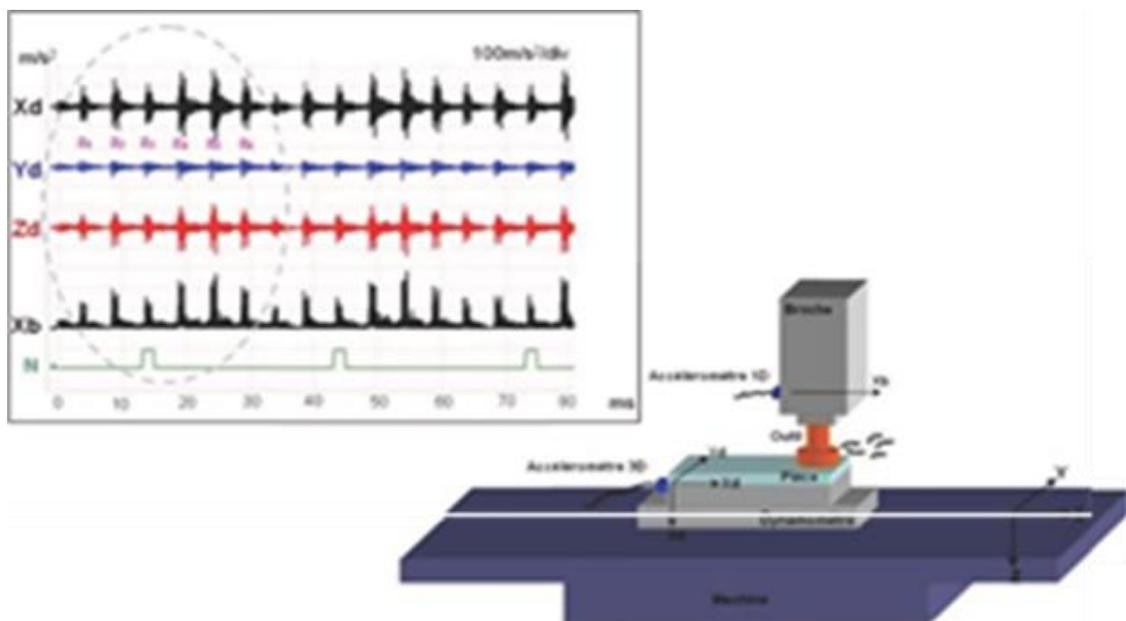


Figure IV.5. Mesures des vibrations et position de l'accéléromètre 3D pendant la coupe

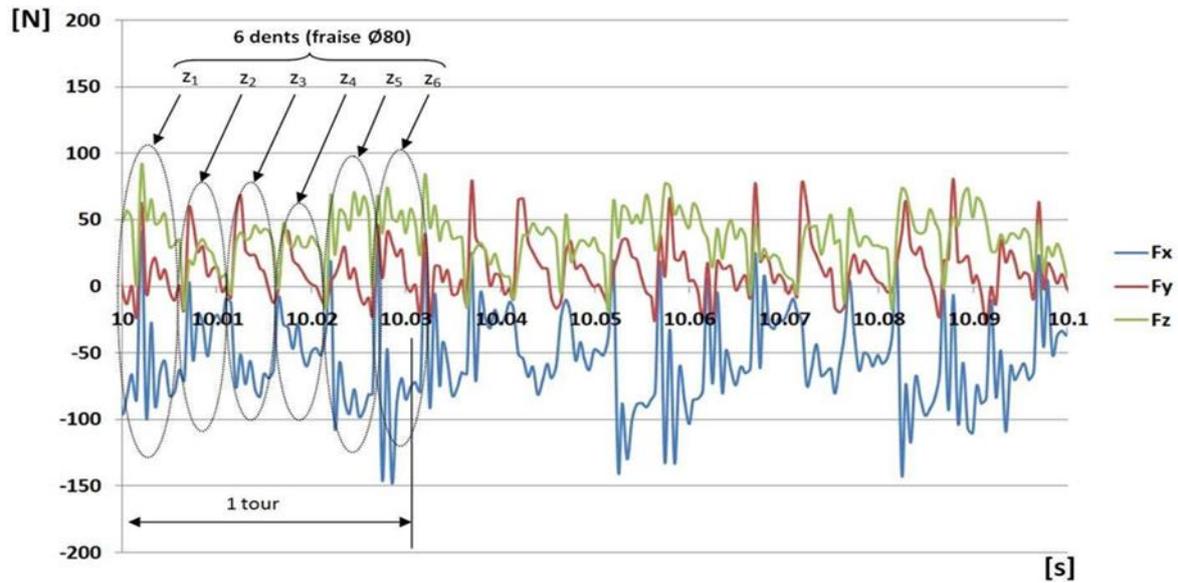


Figure IV.6. Signaux des composantes de la résultante sur les trois directions de coupe pour trois tours dans le cas :  $a_p = 1$  mm,  $f = 0,033$  mm/dent et  $N = 2.000$  tr/min.

## IV.2 Influence des paramètres de coupe sur les vibrations :

### IV.2.1. Influence de la vitesse de coupe sur les vibrations

La figure IV.7 expose les résultats de l'évolution des vibrations en fonction de la vitesse de Coupe ( $V_c$ ) pour une avance ( $f_z$ ) = 0,02 mm/dt et une profondeur de passe  $a_p = 0,2$  mm.

L'analyse des résultats montre que la tendance des courbes se divise en deux zones. Dans la première zone l'effet de la vitesse de coupe montre une légère augmentation des vibrations dans les deux directions, cela se traduit par une stabilité du système usinant. Dans la deuxième zone et à partir de  $V_c = 222$  m/min, on observe une augmentation des vibrations ( $V_x$ ,  $V_y$ ). Cette augmentation des vibrations dans les deux directions de la pièce peut être expliquée par l'augmentation de la fréquence de rotation de la fraise ce qui a pour effet l'augmentation du contact (choc) du couple dent/pièce et par conséquent les vibrations de la pièce augmentent dans les deux directions mesurées. L'analyse des résultats montre aussi que l'augmentation de la vitesse de coupe de 78.5 à 314, fait augmenter les deux accélérations ( $V_x$  et  $V_y$ ) respectivement de (54,09%, 82,78%) [31].

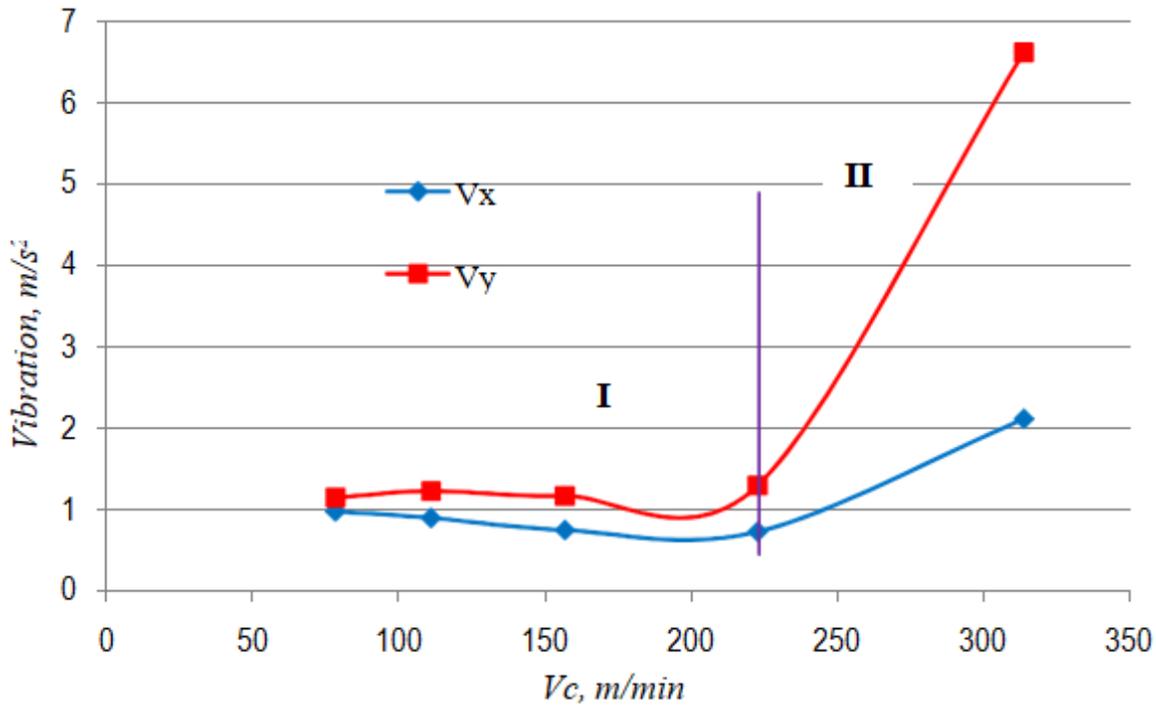


Figure IV.7. Effet de la vitesse de coupe sur les vibrations :  $f_z = 0.02$  mm/dt;  $a_p = 0.2$  mm

#### IV.2.2. Influence de l'avance par dent sur les vibrations :

La figure IV.8 montre les résultats de l'évolution des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) en fonction de l'avance par dent ( $f_z$ ) et cela pour une vitesse de coupe  $V_c = 222$  m/min et une profondeur de passe  $a_p = 0,2$  mm.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation de l'avance par dent ( $f_z$ ) fait augmenter les vibrations dans les deux directions ( $V_x$  et  $V_y$ ), cela est expliqué par l'augmentation de la section des copeaux enlevés ce qui augmente le débit de copeaux et par conséquent les trois composantes de l'effort de coupe et tout ce la produit une augmentation des vibrations de la pièce augmentent dans les deux directions. L'analyse des résultats montre aussi que l'augmentation de l'avance par dent de 0.03 à 0.225 fait augmenter les deux accélérations ( $V_x$  et  $V_y$ ) respectivement de (63,66%, 49,77 %).

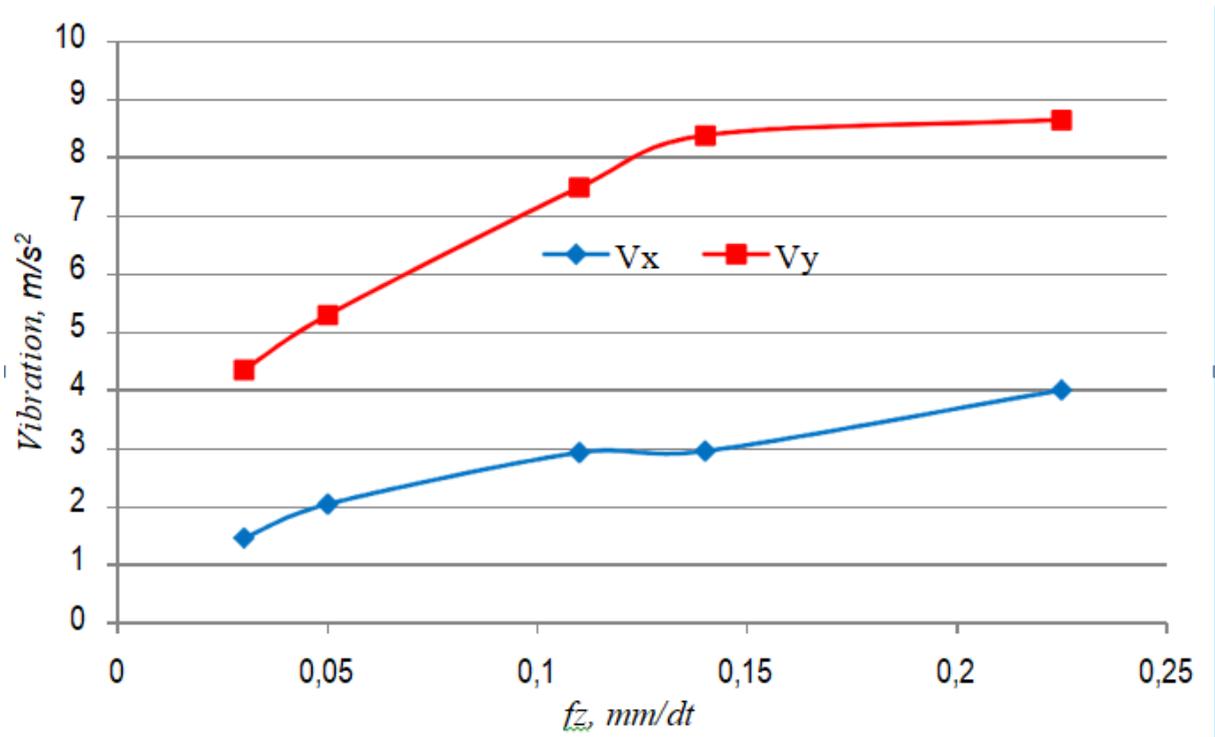


Figure IV.8. Effet de l'avance par dent sur les vibrations :  $V_c = 222$  m/min;  $a_p = 0.2$  mm

#### IV.2.3. Influence de la profondeur de passe sur les vibrations :

La figure IV.9, illustre, l'évolution des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) en fonction de la profondeur de passe ( $a_p$ ) et cela pour une vitesse de coupe  $V_c = 222$  m/min et une avance par dent  $f_z = 0,02$  mm/dt.

L'analyse des résultats montre que l'augmentation de la profondeur de passe induit une augmentation des vibrations dans les deux directions de la pièce ( $V_x$  et  $V_y$ ), cette augmentation peut être expliquée par l'augmentation de la section des copeaux enlevés ce qui augmente les trois composantes de l'effort de coupe et par conséquent les vibrations de la pièce augmentent dans les deux directions. L'analyse des résultats montre aussi que l'augmentation de la profondeur de passe de 0.2 à 1 mm fait augmenter les deux accélérations ( $V_x$  et  $V_y$ ) successivement de (58,37%, 59,84%) [31].

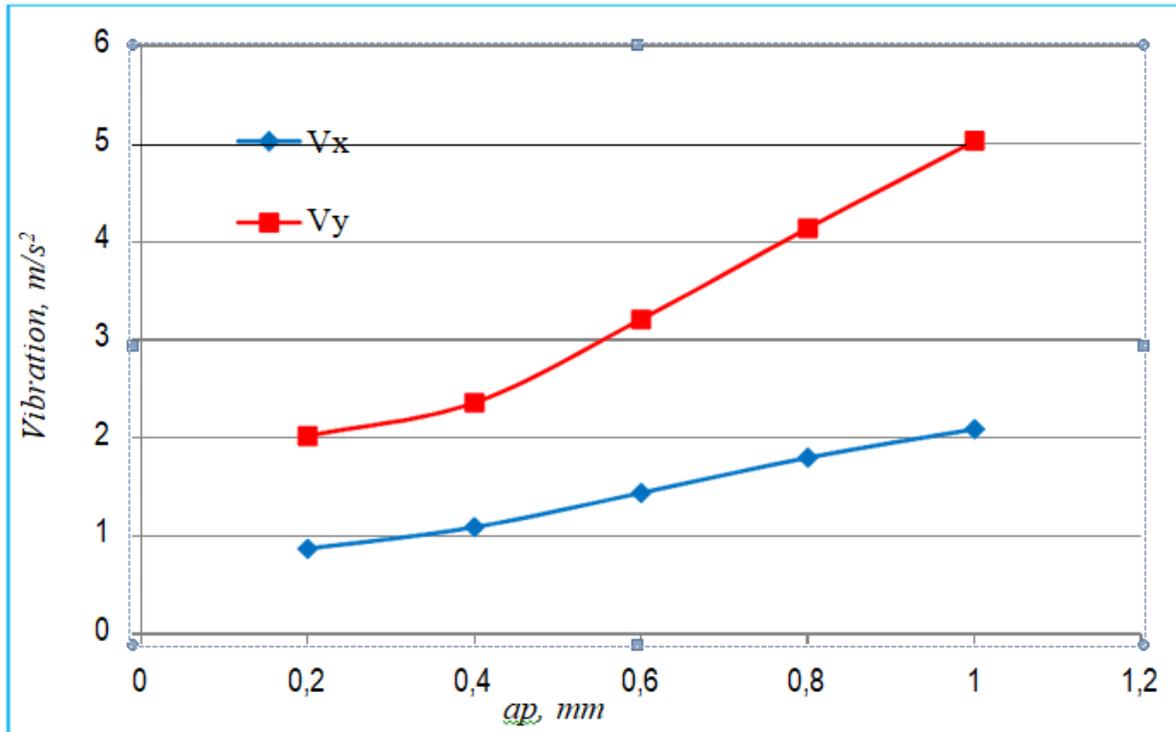


Figure IV.9 Effet de la profondeur de passe sur les vibrations :  $V_c=222\text{m/min}$ ,  $f_z = 0.02 \text{ mm/dt}$

#### IV.2.4. Influence du mode d'usinage sur les vibrations

Les Figures IV.10 à IV.14 exposent les résultats de l'évolution des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) en fonction des paramètres de coupe ( $V_c$ ,  $f_z$  et  $a_p$ ) à différentes vitesses de coupe, avances par dent et profondeurs de passe. Les vibrations ont été enregistrées pour deux modes d'usinage (fraisage en opposition et fraisage en avalant).

L'analyse des résultats, montre que les deux modes d'usinage donnent presque les mêmes valeurs de vibration pour la direction ( $V_x$ ) avec un avantage pour le fraisage en avalant, par contre pour la vibration ( $V_y$ ) le fraisage en opposition donne des vibrations élevées et cela est valable pour toutes les conditions de coupe testées. L'analyse montre aussi que l'augmentation des vibrations ( $V_x$ ) causées par les deux modes d'usinage (fraisage en opposition et fraisage en avalant) et cela pour les cinq régimes de coupe est de (18,55 %, 22,65 %, 03,85 %, 05, 10 % et 10,93 %) et celle de ( $V_y$ ) est de (37,10 %, 48,24 %, 47,30 %, 49,16 %, 48,95%) respectivement [31].

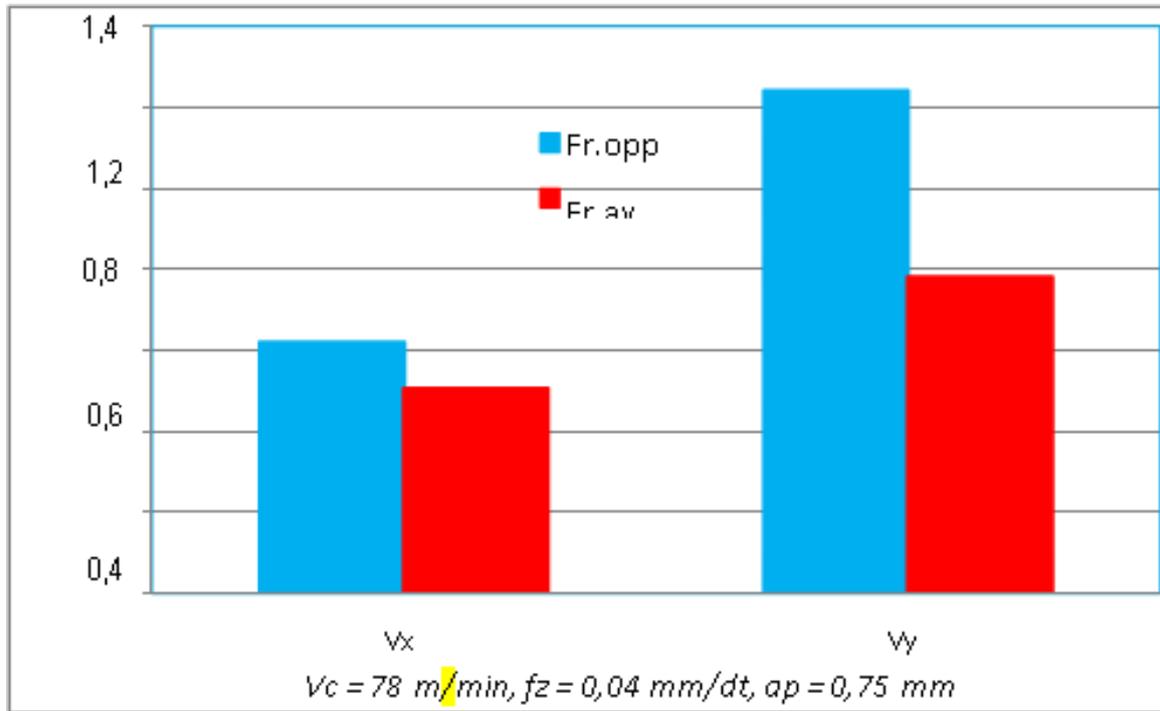


Figure IV.10. Influence du mode d'usinage sur les vibrations :  $V_c = 78 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,04 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,75 \text{ mm}$ .

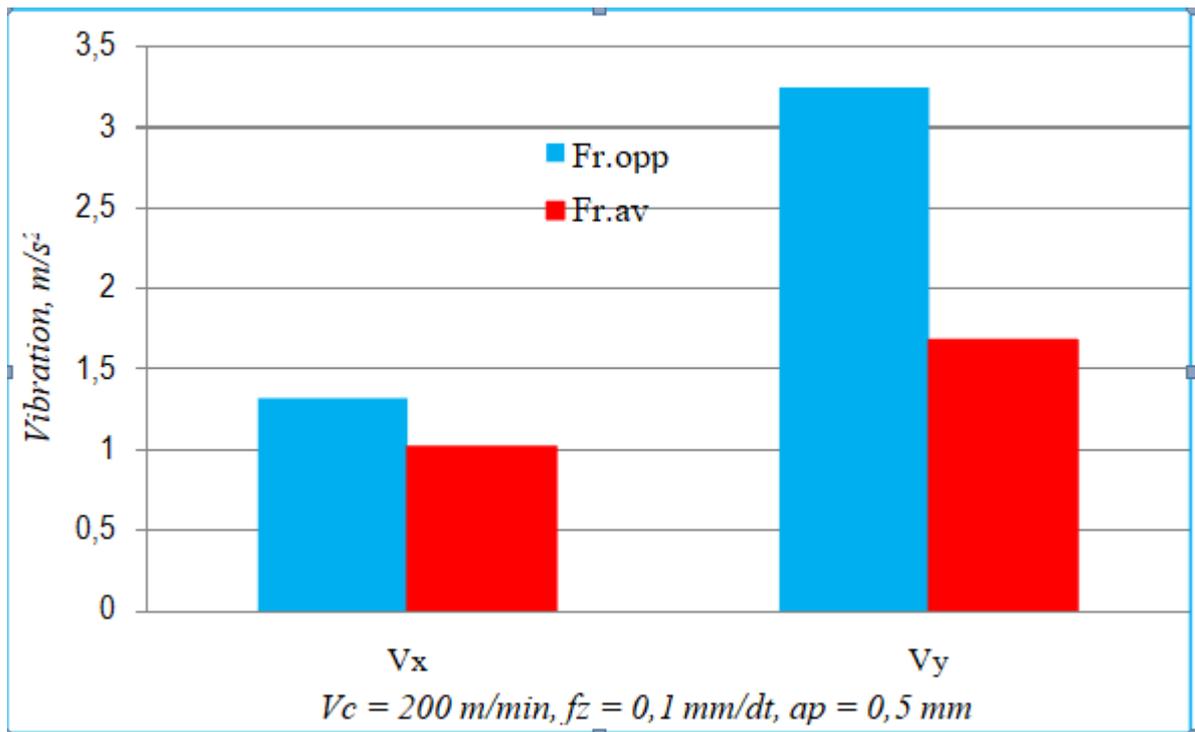


Figure IV.13. Influence du mode d'usinage sur les vibrations :  $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,1 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,5 \text{ mm}$

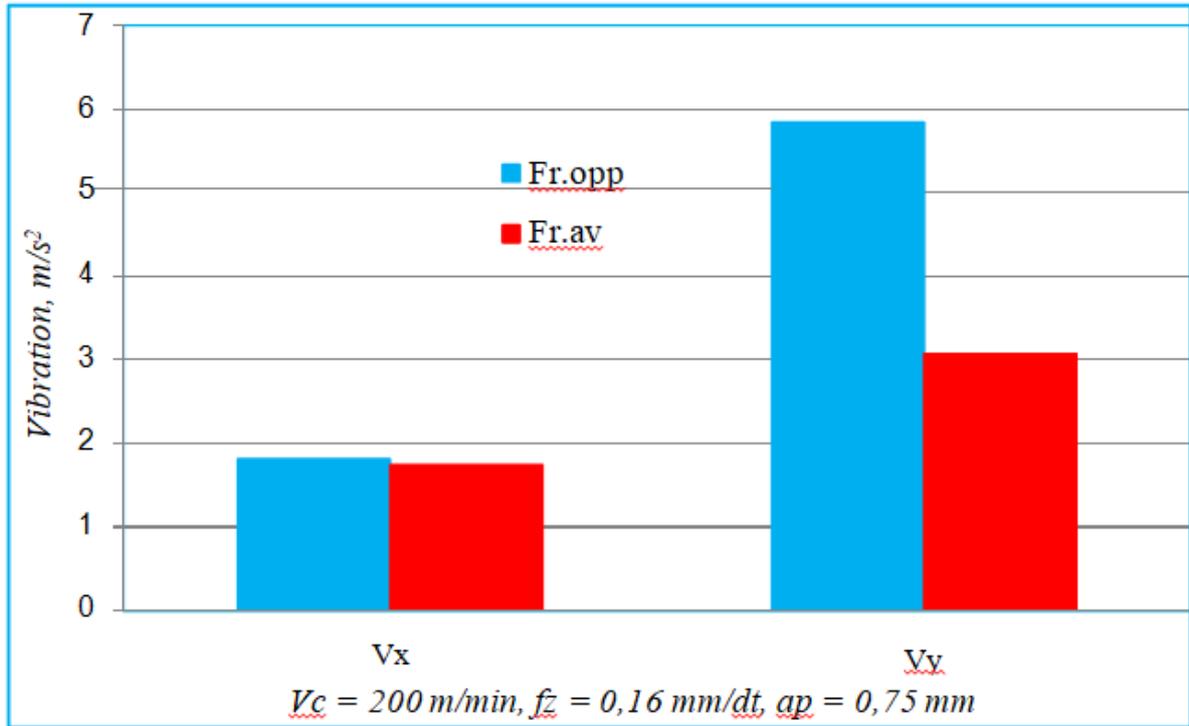


Figure IV.14. Influence du mode d'usinage sur les vibrations :  $V_c = 200 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,16 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,75 \text{ mm}$

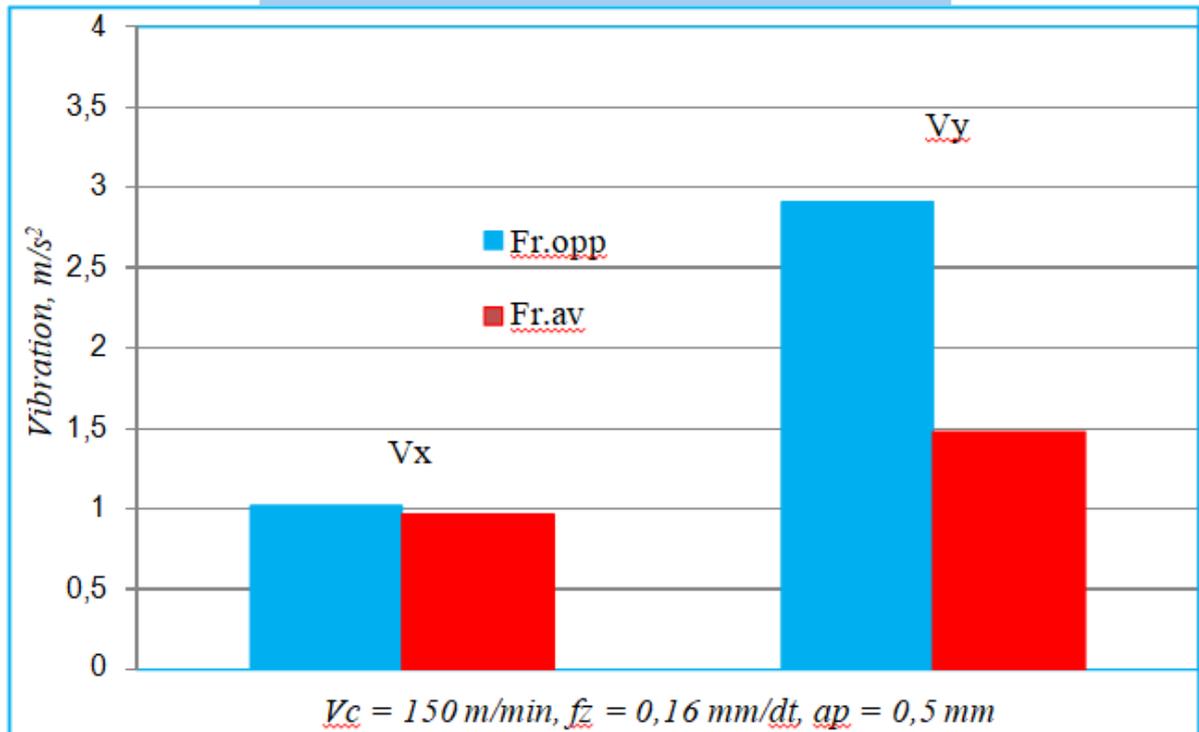


Figure IV.15. Influence du mode d'usinage sur les vibrations :  $V_c = 150 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,16 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 0,5 \text{ mm}$

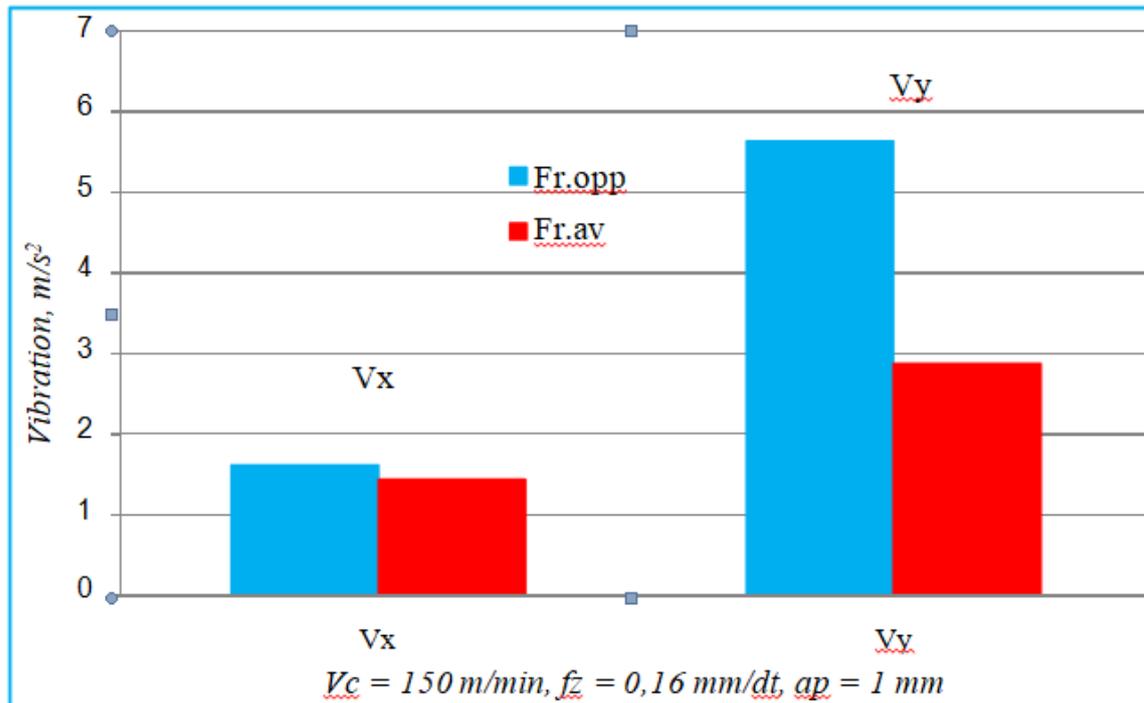


Figure IV.16. Influence du mode d'usinage sur les vibrations :  $V_c = 150 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,16 \text{ mm/dt}$ ,  $a_p = 1 \text{ mm}$

#### IV.2.5. CONCLUSION

On remarque que les valeurs maximales des vibrations ( $V_x$  et  $V_y$ ) ont été obtenues pour le régime de coupe suivant:  $V_c = 222 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,16 \text{ mm/dt}$  et  $a_p = 0,75 \text{ mm}$ .

L'augmentation des paramètres de coupe implique un débit de copeau important ce qui cause une élévation des vibrations. Alors que leurs valeurs minimales ont été enregistrées pour les conditions suivantes :  $V_c = 78 \text{ m/min}$ ,  $f_z = 0,04 \text{ mm/dt}$  et  $a_p = 0,75 \text{ mm}$ .

La diminution de la vitesse de coupe avec de faibles valeurs d'avance par dent ( $f_z$ ) conduit généralement à une diminution des vibrations.

### IV.3. Généralités sur les états de surface :

La structure superficielle lors de l'usinage des métaux par enlèvement de copeaux est déterminée par les irrégularités résultant de la déformation de la surface usinée. Elle varie essentiellement selon la méthode d'usinage, les conditions de coupe, la matière à usiner et la stabilité d'ensemble de l'opération.

#### IV.3.1. Définitions de la rugosité :

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide.

Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

Le rôle fonctionnel d'une surface dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment de l'état de surface (étanchéité, glissement, etc.). Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile à obtenir, ce qui augmente nécessairement le coût de fabrication.

- ✓ *Surface géométrique* : sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de côtes nominales.
- ✓ *Surface spécifiée* : Surface résultant de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit les limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des côtes nominales du dessin.
- ✓ *Surface mesurée* : Surface déterminée à l'aide des instruments de mesure à partir de la surface réelle. La surface mesurée, résultant de l'exploration de la surface réelle devra être l'image la plus rapprochée de celle-ci.
- ✓ *Surface réelle* : Surface obtenue au cours de la fabrication.

### IV.3.2. Défauts de surface :

Pour caractériser l'état de surface, il existe 4 ordres [32] :

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

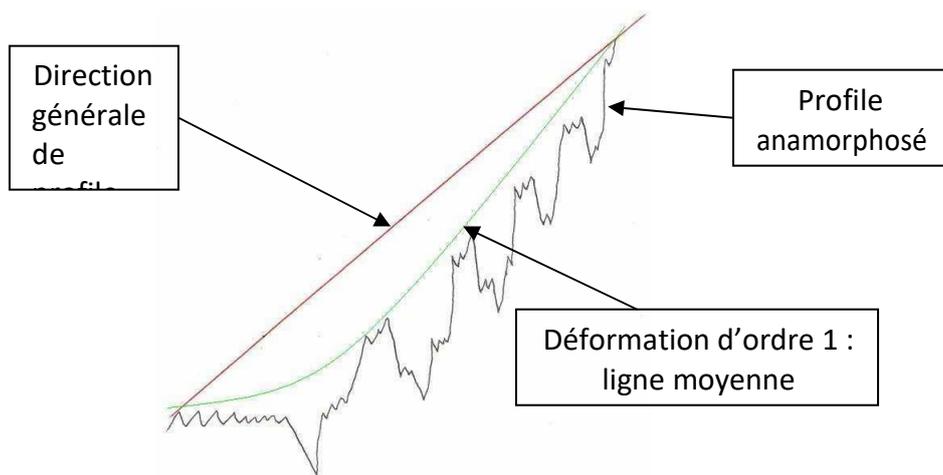


Figure IV.17 . écart de forme

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

- les défauts de planéité;
- les défauts de rectitude;
- les défauts de circularité.

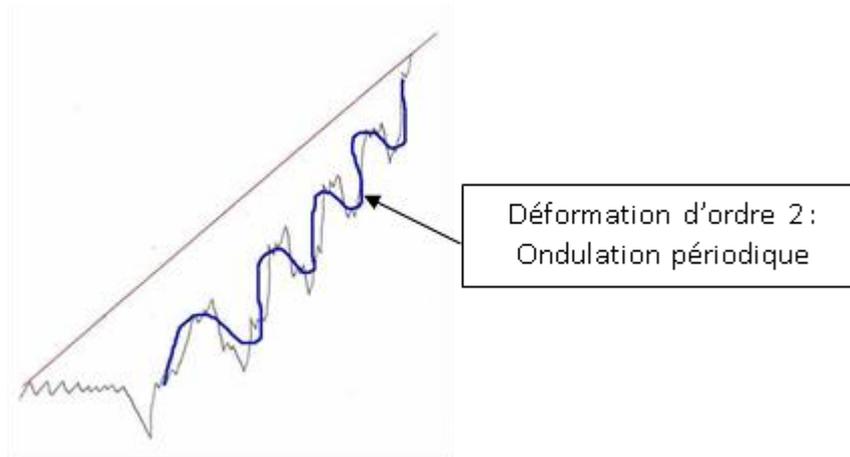
Les causes de ces défauts sont :

- 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.

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



**Figure IV.18. ondulations périodiques**

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 le porte pièce;
- l'outil, dû à une dent cassée au niveau de la fraise par exemple;
- la machine.

**Ordre 3** : stries ou sillons



**Figure IV.19. Stries ou sillons**

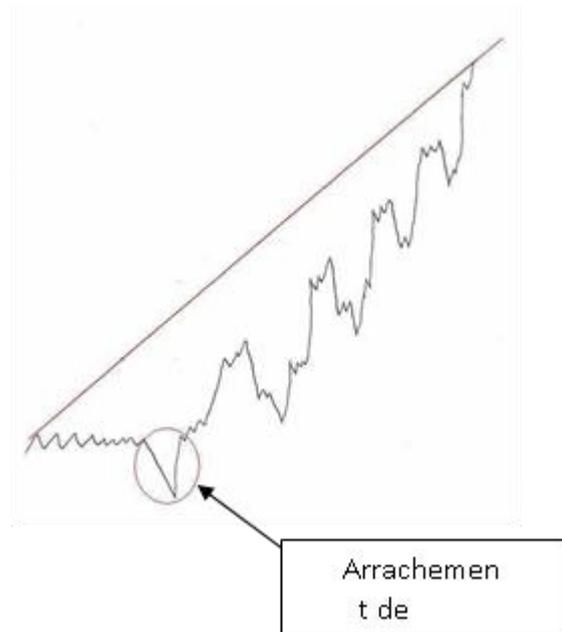
**L'influence de ces défauts a lieu au niveau de :**

- 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.

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



**Figure IV.20 . Arrachement de matière**

**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.

### **IV.3.3. Définition des différents types de lignes**

**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).

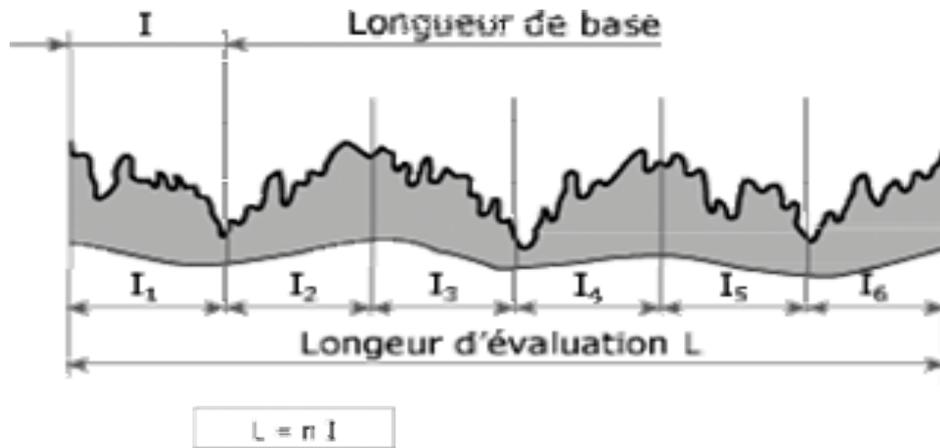


Figure IV.21. Longueur de base, d'évaluation

#### IV.3.4. 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 [33].

**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 [33].

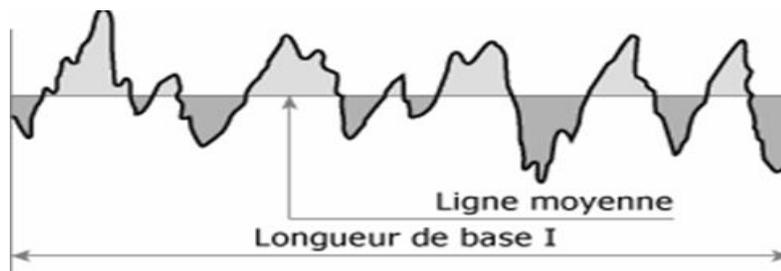
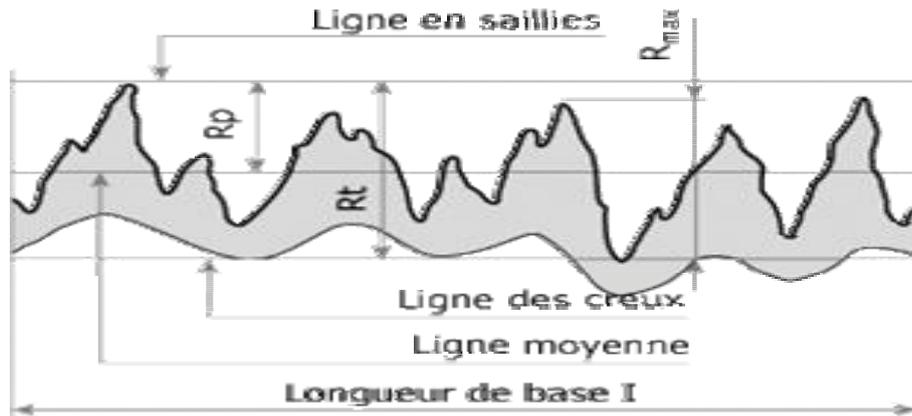


Figure IV.22. Ligne moyenne arithmétique

**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 [33].

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



Figure IV.25. ( $R_{max}$ ) ; ( $R_t$ ) ; ( $R_p$ )

#### IV.3.6. Mesure l'état de surface :

Les valeurs des quatre critères de rugosité ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  et  $R_q$ ) ont été mesurées à l'aide d'un rugosimètre 2D SurfTest SJ-201 (Mitutoyo) (Fig. IV.24. IV.25). Cet appareil est constitué d'une pointe en diamant (palpeur), avec un rayon de pointe de  $5 \mu\text{m}$  se déplaçant linéairement sur la surface mesurée. Afin d'éviter les erreurs de reprise et pour plus de précision, la mesure de la rugosité a été réalisée directement sur la fraiseuse et sans démontage de la pièce.

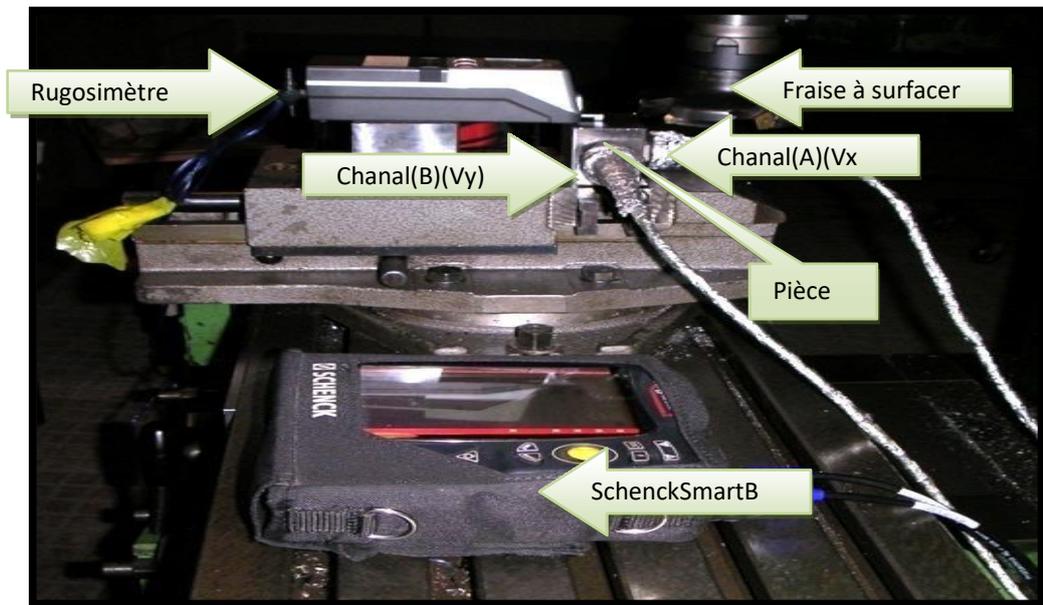
L'utilisation du rugosimètre (3D) s'est avéré un outil très intéressant permettant l'élaboration des cartes topographiques tridimensionnelles, cela a pour effet, la bonne compréhension des caractéristiques des surfaces fraisées. Pour la mesure de la rugosité en 3D, nous avons utilisé un rugosimètre 3D (Alti Surf 500) (Fig. IV.26). figure IV.27 montre la méthode de mesure des quatre critères de rugosité et des vibrations.



**Figure: IV.24. Dispositif pour mesurer la rugosité sans démonter la pièce**

**Figure: IV.25. RugosimètreSj-201p**

**Figure: IV.26. Alti surf 500**



**Figure IV.27. Méthode de mesure de la rugosité et les vibrations.**

#### **IV.3.7. 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).

# CHAPITRE V : ETUDE EXPÉRIMENTALE

## **V. PARTIE PRATIQUE :**

### **V.1. Introduction**

Le stage pratique représente pour les étudiants en master une étape très importante dans la formation. Il permet aux étudiants d'acquérir une première expérience pratique. L'insertion dans le domaine industriel et le contact direct avec les opérateurs et les impératifs de la production améliore considérablement les connaissances des étudiants.

C'est dans cette optique que pour ma formation de master en fabrication mécanique et productique j'ai intégré le complexe Sider d'El-Hadjar et j'ai passé mon stage aux ateliers AMM. Qui nécessite une large connaissance sur les machines-outils et les machines à commande numérique principalement.

Notre choix de cette pièce a été basé sur la méthode de fabrication, que nous avons vue, contient certaines des erreurs que nous aborderons pour l'amélioration.

Lors de notre formation au complexe El-Hadjar et plus particulièrement dans les AMM, qui fabriquent les pièces et les réparent, nous avons choisi une pièce fabriquée durant la période de notre séjour. Bien que nous n'ayons pas suivi toutes les étapes de sa fabrication, mais nous avons recueilli les informations les plus importantes qui appartiennent à la pièce.

## V.2. Laminage

Le laminage est un processus de transformation qui consiste à faire traverser un matériau entre deux cylindres lisses tournant dans deux sens contraires. Le mouvement rotatif ainsi produit engendre un effet de compression diminuant continuellement l'épaisseur initiale du matériau. On compose deux types de laminage : laminage à chaud, laminage à froid.

## V.3. Laminoir

Le laminoir est un outil industriel ayant pour but la réduction d'épaisseur d'un matériau (généralement du métal). Le laminoir est composé de deux cylindres, un fixe et l'autre mobile, la cage de laminoir.



Figure V.1. Laminage à chaud

## V.4. Principe de régler l'épaisseur des brames :

Nous contrôlons l'épaisseur des brames en réduisant l'espace entre les deux cylindres par des vérins. L'étude est consacrée sur les paliers.

## Le Laminage

- Réduire l'épaisseur du matériau par déformation plastique
- Déformation grâce à deux cylindres : les laminoirs
- Possibilité de réaliser des profilés

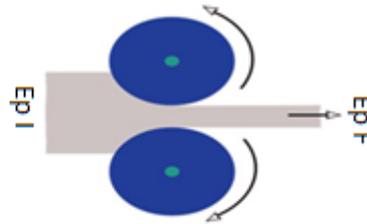


Figure V.2. Principe de laminoir

### V.5. Palier de fixation :

Le but de ce palier est de fixer le vérin et de guider l'arbre pour diriger le cylindre mobile est minimiser l'épaisseur des brames.



Figure V.3. Palier de fixation

### V.4. Dessin de définition

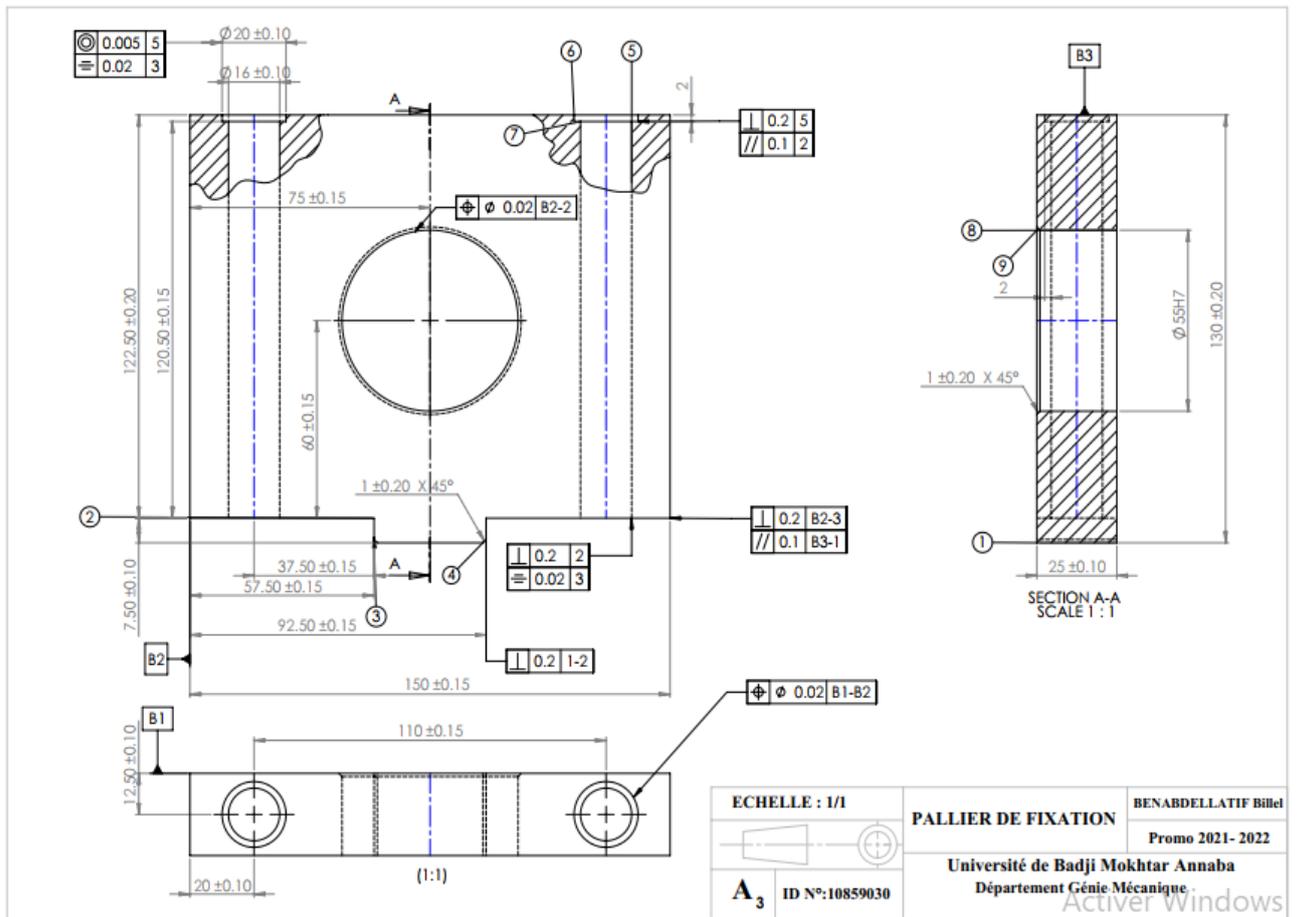


Figure V.4. Dessin de définition

### V.5. Analyse de matériau

Le matériau qu'on a choisi pour la fabrication de palier est un acier XC48. L'acier XC48 est adapté à la trompe (820 - 860°C à l'huile) et est très utilisé en mécanique générale. Cet acier offre une excellente usinabilité.

### V.6. Routage d'usinage

N° Phase	Détails des opérations	durée
10	<b>Débitage</b>	30 min
	Couper tôle ép 40*140*160	
20	Contrôle (pied à coulisse)	
30	<b>Fraisage</b>	04 Heures
	*BRIDER LA PIECE 25*130*150 *REALISER 2 EPAULMETS PROF = 7.5 L57.5*25 *REALISER 2 CHANFRIENS = 1*45 *aL=20/12.5 percer 2 trous 16Ø avec lamage Ø20 prof Ø25 *TOURNER LA PIECE Au centre de la pièce al 75/67.5 *percer un avant trou Ø25	
40	<b>Contrôle</b>	
50	<b>Alésage</b>	2 Heures
	Alésage Ø55 H7	
60	Contrôle (tampon de contrôle)	

V.7. Gamme d'usinage

GAMME D'USINAGE				
NOM: BENABDELLATIF, Prénom: Billel			Université Badji Mokhtar-Annaba	
Ensemble: / Sous ensemble: / Pièce : pallier de fixation		Nombre: Matière: XC48 Brut:	FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE N °: 01	2021/2022
N° des Phases	Désignation des phases, Sous phases et opérations	Machine utilisée	-outillage de coupe -outillage de contrôle	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage
100	<b>CONTROLE DU BRUT:</b> Vérification de: - cotes - spécifications	Atelier de contrôle	-Pied à coulisse 1/10	
110	<b>FRAISAGE:</b> 1 Pièce au montage référentiel De départ définie par: -appui plan sur B3 en 3N (1,2,3). -appui linéaire sur B2 en 2N(4,5). -appui ponctuel sur B1 en 1N(6). -Serrage opposé aux appuis -1) Surfacier en finition: <b>Cm: 130<sup>+0.15</sup>,</b> <b>Rugosité: 6.3</b>	FV	-Fraise à surfacer Ø40 - Pied à coulisse 1/10	

GAMME D'USINAGE				
NOM: BENABDELLATIF, Prénom: Billel		Université Badji Mokhtar-Annaba		
Ensemble: /		Nombre:		FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE N °: 02
Sous ensemble: /		Matière: XC48		
Pièce : palier de fixation		Brut:		
N° des Phases	Désignation des phases, Sous phases et operations	Machine utilisée	-outillage de coupe -outillage de contrôle	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage
120	<p><b>FRAISAGE:</b> 1 Pièce au montage référentiel</p> <p>De départ définie par:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-appui plan sur B3 en 3N (1,2,3).</li> <li>-appui linéaire sur B2 en 2N(4,5).</li> <li>-appui ponctuel sur B1 en 1N(6).</li> </ul> <p>-Serrage opposé aux appuis</p> <p>-1) épaulement en ébauche:  <math>Cm: 122.5^{+0.2}_-</math>,  <math>Cm_2: 75.5^{+0.15}_-</math></p> <p>-2) épaulement en finition:  <math>Cm_1: 122.5^{+0.1}_-</math>,  <math>Cm_2: 75.5^{+0.15}_-</math></p> <p><b>Regosité: 3.2</b></p>	FV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fraise 2T Ø 40</li> <li>- Pied a coulisse 1/100</li> </ul>	
130	<p><b>FRAISAGE:</b> 1 Pièce au montage référentiel</p> <p>De départ définie par:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-appui plan sur B3 en 3N (1,2,3).</li> <li>-appui linéaire sur B2 en 2N(4,5).</li> <li>-appui ponctuel sur B1 en 1N(6).</li> </ul> <p>-Serrage opposé aux appuis</p> <p>-1) chanfrein en finition</p> <p><b>Regosité: 6.3</b></p>	FV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fraise 2T Ø 40</li> <li>- Pied a coulisse 1/10</li> </ul>	

GAMME D'USINAGE				
NOM: BENABDELLATIF, Prénom: Billel		Université Badji Mokhtar-Annaba		
Ensemble: / Sous ensemble: / Pièce : pallier de fixation		Nombre: Matière: XC48 Brut:		FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE N°: 03  2021/2022
N° des Phases	Désignation des phases, Sous phases et operations	Machine utilisée	-outillage de coupe -outillage de contrôle	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage
200	<p><b>PERÇAGE:</b> pièce au montage référentiel de départ définie par:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-appui plan sur B1 en 3N (1,2,3).</li> <li>-appui linéaire sur B2 en 2N(4,5).</li> <li>-appui ponctuel sur (1) en 1N(6).</li> </ul> <p>-Serrage opposé aux appuis</p> <p>-1) percer en finition :  <b>Cm<sub>1</sub>: 122.5<sup>+0.1</sup>.</b>  <b>Co: 16<sup>+0.1</sup></b></p>	<p><b>PMB</b> (Perçuse multibroche)</p>	<p>-foret Ø 16 - TLD16<sup>+0.1</sup></p>	
210	<p><b>ALESAGE:</b> 1 Pièce au montage référentiel de départ définie par:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-appui plan sur B1 en 3N (1,2,3).</li> <li>-appui linéaire sur B2 en 2N(4,5).</li> <li>-appui ponctuel sur (1) en 1N(6).</li> </ul> <p>-Serrage opposé aux appuis.</p> <p>-1) lamage en finition:  <b>Cm<sub>1</sub>=2:, Co=20<sup>+0.1</sup></b></p>	<p><b>FV</b></p>	<p>-fraise à lamage Ø 20 - TLD Ø 20H7</p>	

GAMME D'USINAGE				
NOM: BENABDELLATIF, Prénom: Billal			Université Badji Mokhtar-Annaba	
Ensemble: /		Nombre:		FEUILLE D'ANALYSE D'USINAGE N °: 01
Sous ensemble: /		Matière: XC48		
Pièce : pallier de fixation		Brut:		
N° des Phases	Désignation des phases, Sous phases et opérations	Machine utilisée	-outillage de coupe -outillage de contrôle	Croquis de la pièce à ses divers stades d'usinage
300	<p><b>PERCAGE:</b> Pièce au montage référentiel de départ définie par:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-appui plan sur B1 en 3N (1,2,3).</li> <li>-appui linéaire sur B2 en 2N(4,5).</li> <li>-appui ponctuel sur (1)en 1N(6).</li> <li>-Serrage opposé aux appuis</li> </ul> <p>-1) percer en ébauche: <b>Cm<sub>1</sub>:60, Cm<sub>2</sub>:75, Co:50</b></p> <p>-2) alisier en 1/2F: <b>Cm:25, Co:55H7</b></p> <p>-3) alisier en Finition: <b>Cm:25, Co:55H7</b></p>	P	<ul style="list-style-type: none"> <li>-foret Ø 50</li> <li>-fraise Ø 55</li> <li>- TLD55H7</li> </ul>	
310	<p><b>FRAISAGE:</b>1 Pièce au montage référentiel de départ définie par:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-appui plan sur B1 en 3N (1,2,3).</li> <li>-appui linéaire sur B2 en 2N(4,5).</li> <li>-appui ponctuel sur B3en 1N(6).</li> <li>-Serrage opposé aux appuis.</li> <li>Chanfrein en finition</li> </ul> <p><b>Cm:,Co:</b></p>	FV	<ul style="list-style-type: none"> <li>-fraise de chanfrein Ø55</li> <li>- TLD55H7</li> </ul>	



## CONCLUSION :

Dans le premier chapitre nous avons fait étude bibliographique sur l'usinage discontinue représenté par fraisage et nous avons expliqué les notions de base et étudié les formes des copeaux et étudié les vibrations en générale.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié les vibrations en usinage et expliqué les différents types et présenté les influences sur l'usinage discontinue.

Troisième chapitre explique comment mesurer les vibrations sur l'usinage discontinue et présenter les différents types de mesure.

Quatrième chapitre, la première partie est une étude sur les broches et l'effet des vibrations sur celles-ci en trois conditions : broche libre, broche avec l'outil, broche pendant le coupe.

La deuxième partie de ce chapitre nous étudions l'influence des conditions de coupe sur les vibrations et l'influence de mode usinage sur les vibrations.

Troisième partie, on a étudié l'influence des vibrations sur la qualité de surface et expliqué les résultats de cette influence sur la rugosité.

Cinquième chapitre est une étude expérimentale sur une pièce on a choisi en stage pour faire cette étude et réaliser une gamme usinage.

## PERSPPECTIVES

- Nous proposition une gamme d'usinage d'après les machine disponible dans l'atelier des AMM.
- Nous suggérons la phase de fraisage sur la fraiseuse à CNC (pour éliminer les 2 phases ( alésages et perçage ) on gagne plus de temps, le coût, et la précision.
- Pour une production en série une autre gamme sera proposé en fonction disponibilité des machines-outils.

**Références bibliographiques :**

- [1] **L.R. Castro Martinez.** Identification des sources de vibration en usinage. Etude expérimentale et numérique. Thèse de doctorat. Université Paul Verlaine – Metz. France. 2006.
- [2] **M.Benghersallah.** Recherche sur le fraisage des matériaux durs avec les matières de coupe modernes : Application à l'UGV des superalliages. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2010.
- [3] **T.Erkan.** Méthodes de suivi de l'état des machines-outils par palpation d'artefacts. Thèse de doctorat. Université de Montréal. 2010.
- [4] **L.Laouar.** Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 Optimisation et caractérisation. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba .Algérie. 2007.
- [5] **S.Mekhilef.** Etude des nouveaux matériaux de coupe et Leur aptitude à l'usinage. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2007.
- [6] **S.Belhadi.** Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : Etude expérimentale de la formation du copeau. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2009.
- [7] **W. Bouzid, A. Zghal, L. Saï.** Optimisation de la rugosité des surfaces fraisées. Revue de Mécanique Appliquée et Théorique. Vol. 1, 5. 341-356. 2003.
- [8] **A. Hadj Ali.** Étude de l'influence des conditions de coupe en usinage 5 axes sur l'intégrité des surfaces par la méthode des surfaces de réponse. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure. Université du Québec. Montréal. 2005.
- [9] **F.Girardin.** Etude de l'usinage des matériaux performants et surveillance de l'usinage. Thèse de doctorat. Institut National des sciences appliquées de Lyon. 2010.
- [10] **H.Yengui.** Modélisation du comportement dynamique non linéaire d'un système machine – outil – pièce lors d'une opération de fraisage. Thèse de doctorat. Ecole centrale des arts et manufactures « Ecole Centrale Paris ». 2010-2011.
- [11] **L. Rimbaud, G. Layes, J. Moulin,** « Guide pratique de l'usinage–fraisage», Collection n° 62 – Edition n° 06, 1999.

- 
- [12] **Société sandvik-COROMANT**, « Fraisage: principe », Article BM 7082, Technique de l'ingénieur, 2001.
- [13] **S.Belhadi**. Etude de l'usinage des aciers traités lors du tournage avec des matériaux de coupe de haute technologie : Etude expérimentale de la formation du copeau. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. Algérie. 2009
- [14] **Société sandvik-coromant**, « Fraisage: principe », Article BM 7082, Technique de l'ingénieur, 2001.
- [15] **Rassim belakroum**, Introduction aux Vibrations Mecaniques,livre,unvi kasdi merbah ouergla 2016, 1,2,35
- [16] **Georges Venizelos**, vibration des structures ,livre , 904
- [17] **Lionel, A.** Vibrations d'usinage-Comment les identifier et les limiter.
- [18] **Taylor, F.W.** On the art of cutting metals. Transaction of ASME, 28 (1907).
- [19] Y. Altintas, S. Engin, E. Budak « Analytical stability prediction and design of variable pitch cutters, » Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 121, p. 173-178, 1999
- [20] **E. Budak** « An analytical design method for milling cutters with non-constant pitch to increase stability, part I: theory, Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125, p. 29-34, 2003
- [21] **E. Budak** « An analytical design method for milling cutters with non-constant pitch to increase stability, part II: application» Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125, p. 35-38, 2003.
- [22] **Segreti M.** « Vibrations en coupe orthogonale. Modélisation, étude de stabilité et validation expérimentale ». Thèse de doctorat de mécanique, université de Metz. France 2002.
- [23] **V. Thevenot.** « Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques ». Thèse de doctorat de L'Institut National Polytechnique de Toulouse, France 2005
- [24] **M. x. Zhao et B. Balachandran.** «Dynamics and stability of milling process».
- [25] **Tony L. Schmitz I Kevin S. Smith.** «Machining Dynamics Frequency Response to Improved Productivity» Springer, 2009.
- [26] **Altintas, Y.** « Analytical Prediction of Three Dimensional Chatter Stability in Milling», JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 3, pp.717-72, 2001.

- [27] **M. Vincent Thevenot**, Contribution à la maîtrise des phénomènes vibratoires en usinage de parois minces : Application à l'usinage de pales aéronautiques. thèse, l'institut national polytechnique de Toulouse
- [28] **Namazi, M., Altintas, Y., Rajapakse, T.** : Modelling and identification of tool- holder spindle interface dynamics. *Int.J. Mach. Tools Manuf.* 47, 1333–13,541 (2007) Bissey, S., Poulachon, G., Lapujoulade.
- [29] **F. :** **Intégration de** la géométrie d'outil dans la prédiction des efforts de coupe en fraisage grande vitesse. *Méc. & Indust.* **6**, 391–398 (2005)
- [30] **Alain Gerard**,Analyse du comportement dynamique d'une broche de machine-outils, article , Université Polytechnique de Bucarest, 17 Jan 2012.
- [31] **Fnides mohamed**, Etude de l'impact des conditions d'usinage sur la rugosité de surface et des vibrations lors de fraisage de face,thèse,université 8 mai 1945 ,2017.
- [32] **Frank P. Bowden et David Tabor** . Introduction à la tribologie , nature et comportement des surfaces frottantes, aspects géométriques, édition : Heinemann (1973), London.VVI
- [33] **Chouikhi nadjette**, Diagnostic des états de surface par analyse vibratoire dans les procédés d'usinage, magister, Université Badji Mokhtar –Annaba,2017.
- [34] **Boudra abderrezak Azizou sonia** , Etude des effets des conditions de coupe en fraisage sur la qualité de la surface des matériaux composites, Université Abderrahmane Mira Bejaia,2018.

