

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURS ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'études

***En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie
mécanique***

THEME

**Etude de la résistance à la fatigue des pièces
traitées par le procédé de tribofinition**

Proposé et dirigé par :

M.D.SAIDI

Pr. M.BOUAZIZ

Etudié par :

Said BOUZINI

Promotion : Juin 2012

*Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach
16200 Alger (Algérie)*

ملخص:

انجزنا هذه الدراسة بهدف تحسين مدى حياة القطع الميكانيكية وتطوير خصائصها الميكانيكية و الهندسية وذلك باستعمال طريقة معالجة المعادن بالكشط بالاهتزازات.

الكلمات المفتاحية: الكشط بالاهتزازات, الاهتزازات, الاجهاد, التحمل, الاضافات الكيميائية.

Résumé :

Dans ce modeste travail que j'ai réalisé, mon objectif était d'améliorer la longévité des pièces mécanique et leur caractéristiques mécaniques et géométriques par la méthode traitement des métaux par vibro-abrasion TMVA et appelée aussi « tribofinition »

Mots clés : vibro-abrasion, vibration, fatigue, endurance, additifs chimiques.

Abstract:

In this modest work that I realized, my goal was to improve the durability of mechanical parts and their mechanical and geometrical characteristics by the method of processing metals by vibro-abrasion and also called "tribofinishing"

Key words: vibration-abrasive, vibration, fatigue, endurance, chemical additives.

Remerciements

Au terme de ce Mémoire je tiens à remercier tout naturellement en premier lieu

Dieu le tout Puissant qui m'a donné la force, le courage et la patience de bien mener ce travail.

Mes remerciements vont à M. D.SAIDI et Prof. M.BOUAZIZ d'avoir acceptés de m'encadrer, de leurs précieux conseils et de leurs disponibilités.

Je remercie Monsieur S.RECHAK, qui a bien voulu assurer la présidence du jury ainsi que Monsieur H.BELHENECHÉ, pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

Je remercie également Monsieur Y. BELKACEMI et Monsieur I. BELHADEF de m'avoir permis d'effectuer ce travail dans des bonnes conditions au laboratoire de génie mécanique.

Je remercie la société Acces Industries pour m'accepte de faire le traitement.

Je remercie les responsables de laboratoire de science des matériaux (faculté de génie mécanique USTHB) et de laboratoire des essais mécaniques des matériaux (faculté des sciences de l'ingénieur, UMBB).

Je remercie aussi l'ensemble des enseignants qui ont contribué à ma formation.

Mes sentiments vont également à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma mère et mon père.

A ma grand-mère.

A mes frères et mes sœurs.

A mes oncles et mes tantes et mes cousins.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A cette terre qui m'a vu naître.

Said

Tables des matières

Introduction	1
---------------------------	---

Chapitre I : Fondements théorique de la Vibration, la mécanique de contact et la fatigue.

I.1. Fondements théorique sur la vibration.....	3
I.1.1. Généralité sur le système oscillatoire.....	3
I.1.2. Système vibratoire.....	5
I.1.2.1. Système à un degré de liberté.....	5
I.1.2.2. Phénomène de résonance.....	7
I.1.2.3. Systèmes à N degrés de liberté.....	8
I.2. Mécanique de contact.....	9
I.2.1. Généralités sur la mécanique de contact.....	9
I.2.2. Contact de Hertz.....	9
I.2.3. Problèmes classiques de la mécanique des contacts.....	10
I.3. Fatigue des matériaux.....	14
I.3.1. Rupture des matériaux par fatigue.....	14
I.3.2. Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue.....	14
I.4. La corrosion.....	18
II.4.1. Définition.....	18
II.4.2. Corrosion des métaux.....	19
II.4.3. Approche de la protection contre la corrosion.....	21
II.4.4. Types de corrosion.....	22

Chapitre II : Procédé de vibro-abrasion.

II.1. Introduction.....	24
II.2. Définition la vibro-abrasion.....	24
II.3. Paramètres du procédé de vibro-abrasion.....	26
II.3.1. Vitesse d'impact des medias et des pièces traitées.....	27
II.3.2. Accélération de l'impact.....	28
II.3.3. Force de l'impact des medias.....	28
II.3.4. Energie de l'impact des medias avec les pièces.....	29
II.3.5. Pression de contact dans la zone de l'impact.....	29
II.3.6. Température dans la chambre de travail.....	30

II.4. Paramètres des surfaces superficielles.....	31
II.4.1. Rugosité.....	31
II.4.2. Dureté et micro-dureté.....	33
II.4.3. Contraintes résiduelles.....	42
II.4.4. Structure et Microstructure.....	44

Chapitre III : Equipements de la vibro-abrasion.

III.1. Introduction.....	48
III.2. Types des vibrateurs.....	48
III.2.1. Vibrateurs circulaires.....	48
III.2.2. Machines à force centrifuge.....	52
III.2.3. Vibrateurs en continu (circulaire, spirale ou linéaire).....	54
III.2.4. Machines multibroches type Smuritropie.....	56
III.3. Milieux actifs (Abrasifs).....	58
III.3.1. Définition.....	58
III.3.2. Les paramètres des abrasifs.....	60
III.3.3. Qualité et Géométrie des médias (abrasifs).....	61
III.4. Additifs chimiques.....	61
III.4.1. Additif liquides.....	62
III.4.2. Additif poudres.....	64
III.4.3. Additive pâte.....	65

Chapitre IV : Recherche expérimentale.

IV.1. Description de la méthode expérimentale.....	66
IV.2. Equipements de traitement par vibro-abrasion.....	66
IV.2.1. Machine de vibro-abrasion et les caractéristiques techniques.....	66
IV.2.1.1. Fonctionnement de la machine.....	68
IV.2.1.2. Règles de l'installation de la machine.....	68
IV.2.2. Abrasifs et Additif.....	68
IV.2.2.1. Abrasif.....	68

IV.2.2.2. Additif chimique.....	69
IV.3. Traitement effectuée.....	69
IV.3.1. Identification des matériaux.....	69
IV.3.3. Observations sur les échantillons après le traitement.....	70
IV.4. Réalisation et analyse des essais expérimentales.....	72
IV.4.1. Poids.....	72
IV.4.2. Rugosité.....	73
IV.4.3. structure et microstructure.....	75
IV.4.4. dureté.....	77
IV.4.5. Essais de traction.....	79
IV.4.6. Essais de fatigue.....	81
IV.5. Influence de différents paramètres sur l'endurance.....	85
Conclusion générale.....	86
Bibliographie.....	87

Liste des figures :

Figure.I.1: Représentation des vibrations harmoniques.....	4
Figure.I.2: Diverses mesures de l'amplitude et la période d'une oscillation harmonique.....	5
Figure.I.3: Masse- ressort.....	5
Figure.I.4: Masse-ressort-amortisseur.....	6
Figure.I.5: Phénomène de résonance.....	8
Figure.I.6: Contact entre une sphère et un demi-plan.....	10
Figure.I.7: Contact entre une sphère et un demi-espace élastique.....	10
Figure.I.8: Contact entre deux sphères.....	11
Figure.I.9: Contact entre un cylindre rigide et un demi-espace élastique.....	12
Figure.I.10: Contact entre un solide conique rigide et un demi-espace élastique....	12
Figure.I.11: Contact entre deux cylindres avec des axes parallèles.....	13
Figure.I.12: Trois domaines d'endurance des matériaux-Diagramme de Wöhler....	15
Figure.I.13: Diagramme de Goodmann-Smith.....	17
Figure.I.14: Courbe de Wöhler.....	17
Figure.I.15: Corrosion sur une pièce.....	20
Figure.I.16: Corrosion de contact suite à une rupture de bague.....	20
Figure.II.1: Schéma du traitement par vibro-abrasion.....	25
Figure.II.2: Paramètre de mesure de rugosité.....	31
Figure.II.3: Schéma de principe d'un essai de dureté Brinell.....	33
Figure.II.4: Schéma de dureté de Knoop.....	36
Figure.II.5: Schéma démonstratif de l'essai de Vickers.....	37
Figure.II.6: Schéma démonstratif de l'essai de Rockwell.....	39
Figure.II.7: Définition schématique des contraintes résiduelles des 1ers, 2 e et 3 e ordres pour un matériau monphasé.....	43
Figure.II.8: Diagramme d'équilibre Fer-Carbone.....	48
Figure.III.1: Schéma d'un vibreur circulaire.....	49
Figure.III.2 : Vibreur circulaire.....	49
Figure.III.3: Vibreur circulaire à grand rayon.....	50
Figure.III.4: Schéma machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale...	51
Figure.III.5: Vibreur circulaire spiral type Rotomatic.....	52
Figure.III.6: Schéma d'une machine à force centrifuge.....	53
Figure.III.7: Machine à force centrifuge.....	53
Figure.III.8: Schéma d'un vibreur linéaire.....	55
Figure.III.9: Deux types des vibreurs linéaires.....	56
Figure.III.10: Schéma d'une machine multibroche type Smuritropie.....	56
Figure.III.11: Machines multibroche type Smuritropie.....	57
Figure.III.12: Géométrie de la particule abrasive.....	59
Figure.III.13: Des abrasifs avec différents formes et dimensions.....	60
Figure.IV.1: Vibreur circulaire RC230.....	67
Figure.IV.2: Schéma de vibreur circulaire RC230.....	67
Figure.IV.3: Abrasifs ou chips.....	68

Figure.IV.4: Dimension de l'abrasif.....	68
Figure.IV.5: Eprouvettes en aluminium avant le procède de TMVA.....	70
Figure.IV.6: Eprouvettes en acier avant le procède de TMVA.....	70
Figure.IV.7: Eprouvettes en aluminium après le traitement.....	71
Figure.IV.8: Eprouvettes en acier après le traitement.....	71
Figure.IV.9: Variation de poids des éprouvettes en acier et en aluminium avant et après traitement.....	72
Figure.IV.10: Variation de rugosité des échantillons en aluminium et en acier avant et après traitement.....	74
Figure.IV.11: Structure d'aluminium avant le traitement avec un agrandissement : (a) x 500 et (b) x 1000.....	75
Figure.IV.12: Structure d'aluminium après le traitement avec un agrandissement : (a) x 500 et (b) x 1000.....	76
Figure.IV.13: Structure d'acier avant le traitement avec un agrandissement : (a)x 500 et (b) x 1000.....	76
Figure.IV.14: Structure d'acier après le traitement avec un agrandissement : (a) x 500 et (b) x 1000.....	77
Figure.IV.15: Variation de la dureté des éprouvettes en acier et en aluminium avant et après traitement.....	78
Figure.IV.16: Essai de traction d'une éprouvette en aluminium avant traitement...	79
Figure.IV.17: Essai de traction d'une éprouvette en aluminium après traitement...	80
Figure.IV.18: Essai de traction d'une éprouvette en acier avant traitement.....	80
Figure.IV.19: Essai de traction d'une éprouvette en acier avant traitement.....	81
Figure.IV.20: La courbe d'endurance pour l'aluminium.....	83
Figure.IV.21: Machine de flexion rotative « SCHENCK ».....	84
Figure.IV.22: La courbe d'endurance pour l'acier.....	84

Liste des tables :

Tableau.II.1: Dureté de Brinell des déférents mâtereaux.....	34
Tableau.II.2: Dureté de Rockwell avec déférents échelles.....	40
Tableau.II.3: représentant les phases, les constituants et la microstructure de l'acier.....	47
Tableau.III.1: Quelque exemple des particules utilisé pour les différentes opérations.....	61
Tableau.III.2: Composition de l'additif chimique liquide recommandé pour déférentes opérations.....	64
Tableau.III.3: L'additif poudre et déférentes opérations.....	65
Tableau.IV.1: Masse des éprouvettes en aluminium et en acier avant et après traitement.....	72
Tableau.IV.2: Rugosité des échantillons en acier et en aluminium avant et après traitement.....	74
Tableau.IV.3: La dureté des échantillons avant et après traitement.....	78
Tableau.IV.4: Tableau d'endurance pour l'aluminium.....	82
Tableau.IV.5: Tableau d'endurance pour l'acier.....	84

Introduction

générale

INTRODUCTION GENERALE

Le développement dans le domaine mécanique est caractérisé par la création de nouvelles méthodes de traitement de surface qui a pour but d'accroître et d'améliorer les caractéristiques mécaniques, géométriques, la qualité, et la performance des pièces mécaniques. Ces dernières années, De nombreuses études ont prouvés que la méthode de traitement des métaux par vibro-abrasion est très efficace et qui a pour but d'améliorer la qualité de surface, la durabilité, et la fiabilité des produits.

Ce traitement est caractérisé par une grande polyvalence technico-économique à savoir une grande précision, une productivité élevée et une qualité de surface meilleure.

Le procédé de vibro-abrasion est utilisé aussi pour un durcissement superficiel et la finition des pièces mécaniques, cette méthode est utilisée dans divers domaines d'industries à savoir l'industrie automobile, aéronautique, machines agricoles, la construction navale...etc.

Parmi les pièces traitées il y'a les panneaux d'aéronefs, les vilebrequins, arbres à cames des moteurs, les engrenages, aubes de turbine, des outils d'emboutissage et de découpe...etc. et les pièces de formes géométriques très complexes.

Le travail présenté dans ce manuscrit est composé de 2 parties.

La 1^{ère} partie théorique contient (3 chapitres)

Dans le 1^{er} chapitre j'ai présenté les fondements théoriques des vibrations mécaniques, la mécanique de contact, la corrosion et ainsi la mécanique de rupture. Dans le second chapitre j'ai présenté les différentes méthodes de tribofinition et leurs paramètres ainsi que les caractéristiques géométriques et mécaniques. Dans le 3^{ème} chapitre j'ai présenté les différents équipements et accessoires ainsi que les différents médias, les additifs chimiques et leurs domaines d'application.

La deuxième partie expérimentale contient seul chapitre.

Le chapitre IV représente la méthode de réalisation des essais expérimentaux, les équipements utilisés, et les appareils de mesure, la présentation des résultats obtenus et leur l'interprétation. Et j'ai achevé ce modeste travail par une conclusion.

LA PROBLEMATIQUE

Les fissures issues de fatigue naissent, le plus généralement à la surface des pièces (amorçage), puis se propagent et en dernier lieu en aura une rupture.

L'usinage des pièces par différentes méthodes connues tel que le tournage, le fraisage et la rectification apportent des changements sur les caractéristiques mécaniques et géométriques. Ce changement est moins appréciable par rapport à ce que nous chercherons, donc pour améliorer ces caractéristiques, je propose cette nouvelle méthode de vibro-abrasion qui est plus efficace et d'actualité pour assure une meilleure (fiabilité, tenue à la fatigue, dureté, micro dureté, rugosité...etc.)

BUT ET OBJECTIF DE LA RECHERCHE :

L'Objectif dans notre recherche, c'est d'apporter des solutions aux problèmes de fatigue, c'est-à-dire d'améliorer la longévité, la durabilité, et la tenue en fatigue des pièces mécaniques par le procédé de vibro-abrasion

Il s'agit de mettre les échantillons avec les abrasifs dans la chambre de travail d'un vibreur mélangé avec de l'additifs chimiques, tout est mis en vibration à base à savoir fréquence à savoir amplitude $A = [0,5-8 \text{ mm}]$, fréquence $f = [0-150 \text{ Hz}]$,

Le mouvement vibratoire généré par le vibreur, crée deux efforts principaux au niveau de la couche superficielle de l'échantillon, qui sont les frottements et l'impact ou la collision,

Les frottements nous aident à diminuer la rugosité de la pièce par l'enlèvement des microfissures qui sont la cause principale du phénomène de la fatigue.

L'impact, nous apporte une déformation plastique au niveau de la couche superficielle, qui se manifeste par la mise en mouvement et la naissance des défauts linéaires appelé (dislocation), leur densité génère un durcissement au niveau de la couche écrouie.

Chapitre I :

Fondements théorique

de la Vibration, la

mécanique de contact

et la fatigue

I.1. FONDEMENTS THEORIQUES DE LA TECHNOLOGIE DE VIBRATION

I.1.1. Généralité sur le système oscillatoire

En général, les ondulations décrite comme visant à restreindre le mouvement (ou le changement de condition), répétée en totalité ou en partie. En conséquence, un système qui peut, sous certaines conditions bien définies, effectuer des vibrations, on l'appelle les systèmes oscillatoires. Les vibrations sont appelés mécaniques, si elles sont en train de changer seulement les valeurs mécaniques (les valeurs de mouvement, vitesse, accélération, pression etc.)

Dans le domaine de la technique et la technologie (y compris la technologie du traitement des métaux) est largement utilisé le terme « vibration ». Il reflète largement la notion des oscillations mécaniques, ou oscillations des systèmes mécaniques. Le terme vibration est le plus souvent utilisé dans les cas où les oscillations de l'amplitude sont relativement petites et à très basse fréquence.

Les ondulations sont appelés périodique, si la valeur est répété a un nombre illimité, à certains intervalles. Le plus petit intervalle de temps T, qui après avoir répété la valeur (ou la période pendant laquelle la durée du cycle d'oscillation), appelée la période d'oscillation.

Les caractéristiques les plus importantes du processus oscillatoire (vibrations) sont l'amplitude et la fréquence d'oscillations. Le premier est décrit comme le plus grand écart par rapport à la valeur moyenne des valeurs variables (figure. I. 2). Le second (la fréquence) est le nombre d'oscillations par unité de temps.

L'expression de fréquence est donnés par :

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{Hz}) \quad (\text{I.1})$$

f se mesure en (s^{-1}). On a 1 Hertz (Hz) = 1 oscillation à la seconde.

La période d'oscillation harmonique est exprimée en termes de fréquence angulaire suivant la formule ci-après :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (\text{s}) \quad (\text{I.2})$$

Conformément.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (\text{rad/s}) \quad (\text{I.3})$$

Phase d'oscillation harmonique définit le sens de modification de la valeur avec l'unité d'amplitude à un moment donné. La phase est exprimée en unités angulaires (radians ou degrés). Pour une représentation visuelle des vibrations harmoniques, vous pouvez utiliser diagramme circulaire (figure.I.1).

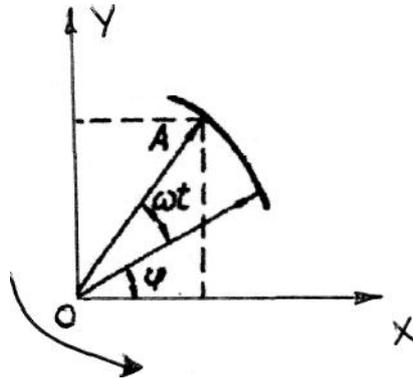


Figure.I.1: Représentation des vibrations harmoniques.

Autrement dit les oscillations périodiques sont harmoniques (sinusoïdales) et sa valeur varie dans le temps, selon la loi :

$$U(t) = A \sin (\omega t + \varphi) \quad (\text{I.4})$$

d'où :

A, ω et φ : paramètres constants.

A : amplitude (mm).

ω : Fréquence angulaire (rad/s).

φ : phase initiale d'oscillation (rad).

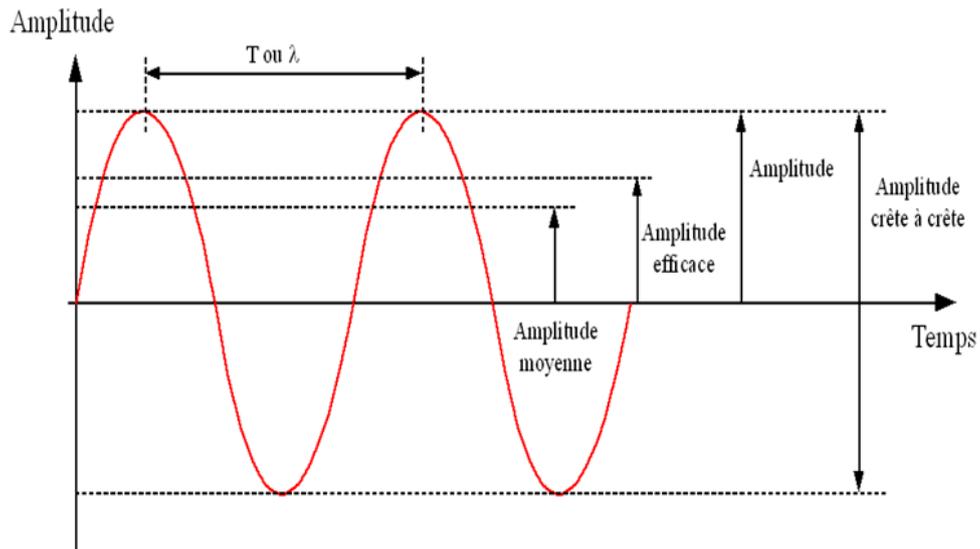


Figure.I.2: Diverses mesures de l'amplitude et la période d'une oscillation harmonique.

I.1.2. Système vibratoire.

I.1.2.1. Système à un degré de liberté.

a) Vibration libre :

➤ Systèmes conservatifs :

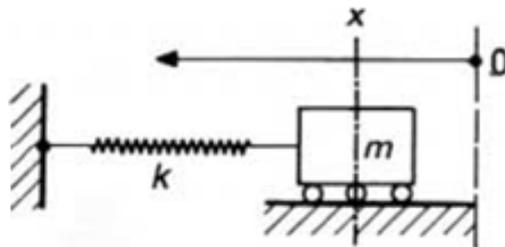


Figure.I.3 : Masse- ressort.

L'équation qui régit le mouvement d'un tel système est :

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + kx = 0 \quad (I.5)$$

avec :

m : masse.

k : rigidité de ressort.

On déduit :

$$x(t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{I.6})$$

avec la pulsation :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/s}) \quad (\text{I.7})$$

➤ systèmes dissipatifs

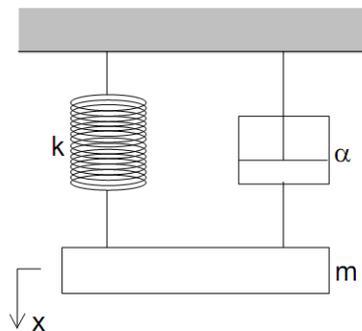


Figure.I.4: Masse-ressort-amortisseur.

Le coefficient d'amortissement visqueux (ou fluide) λ exerce sur le mouvement de la masse m une force d'amortissement $\lambda \frac{\partial x}{\partial t}$ proportionnelle à la vitesse instantanée.

L'équation différentielle traduisant le comportement du système (déplacement de la masse $x(t)$ par rapport à sa position du repos après un lâcher) peut s'écrire :

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + \lambda \frac{\partial x}{\partial t} + kx = 0 \quad (\text{I.8})$$

avec :

k : rigidité du ressort qui exprime que la force de rappel est proportionnelle à l'élongation x .

Si on fait le changement de variable $x = Be^{rt}$

L'équation caractéristique est :

$$mr^2 + \lambda r + k = 0 \quad (\text{I.9})$$

dont les racines sont :

$$r = \frac{-\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 4mk}}{2m} \quad (\text{I.10})$$

Selon le signe $\lambda^2 - 4mk$, trois cas sont envisagés.

- $\lambda^2 - 4mk < 0$, mouvement périodique amorti ou pseudopériodique.
- $\lambda^2 - 4mk = 0$, mouvement apériodique critique.
- $\lambda^2 - 4mk > 0$ mouvement apériodique.

b) Vibration forcée

Le signal excitateur est une force périodique ou un déplacement imposé.

- Déplacement imposé $d(t)$:

L'équation de mouvement s'écrit :

$$m\ddot{x} + k[x - d(t) - l_0] = 0 \quad (\text{I.11})$$

Soit :

$$m\ddot{x} + k(x - l_0) = kd(t) \quad (\text{I.12})$$

Avec l_0 longueur libre du ressort.

- Force périodique $f(t)$:

L'équation du mouvement s'écrit :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_i \cos(\omega_i t + \varphi) \quad (\text{I.13})$$

avec :

x la variable de position et $\omega_i = \frac{2\pi}{T}$ la pulsation.

I.1.2.2. Phénomène de résonance

Le phénomène de résonance peut affecter différentes grandeurs :

- Le déplacement, dont l'amplitude évolue en fonction de la pulsation excitatrice ω_i et passe par un maximum pour une valeur de ω_i dite pulsation de résonance.
- L'accélération, dont l'amplitude passe par un maximum pour une autre valeur de ω_i ceci est à prendre en compte lors du transport de passagers.

Prenons le cas d'une excitation harmonique.

$$F(t) = F_0 \cos(\omega_i t + j) \quad (I.14)$$

Sur la figure.I.5 on peut voir l'allure des courbes $H(\omega) = \frac{X_{max}}{\frac{F_0}{k}}$ en fonction de $\alpha = \frac{\omega_i}{\sqrt{k/m}}$

pour différents valeurs du coefficient de facteur d'amortissement réduit $\varepsilon = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

Apparaît clairement le phénomène de résonance de déplacement pour $\omega_i = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

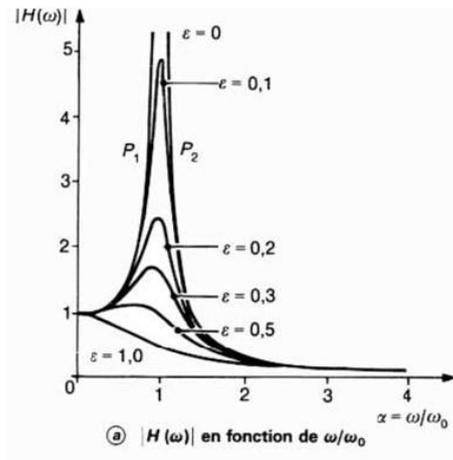


Figure.I.5: Phénomène de résonance.

I.1.2.3. Systèmes à N degrés de liberté

Les équations de Lagrange permettent d'obtenir le système d'équation :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad \{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{Bmatrix} \quad (I.15)$$

a) Vibration libre non amortie :

On alors $[C] = [0]$ et $\{F(t)\} = 0$.

L'équation de mouvement s'écrit :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (I.16)$$

d'où :

$$\{\ddot{x}\} + [M]^{-1}[K]\{x\} = \{0\} \quad (I.17)$$

La solution générale s'écrit :

$$\{x(t)\} = \begin{Bmatrix} A_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ A_{n1} \end{Bmatrix} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \dots + \begin{Bmatrix} A_{1n} \\ \cdot \\ \cdot \\ A_{nn} \end{Bmatrix} \cos(\omega_n t + \varphi_n) \quad (\text{II.18})$$

b) **Vibration forcée :**

➤ Système non amortie :

L'équation du mouvement s'écrit :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (\text{I.19})$$

➤ Système avec amortissement visqueux

L'équation du mouvement s'écrit :

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (\text{I.20})$$

I.2. MECANIQUE DES CONTACTS

I.2.1. Généralités sur la mécanique de contact

La mécanique des contacts traite des calculs impliquant des corps élastiques, viscoélastiques ou plastiques lors de contacts statiques ou dynamiques. La mécanique des contacts est l'un des fondements de l'ingénierie mécanique et elle est nécessaire pour la conception de projets sûrs et énergiquement efficaces.

Elle peut être appliquée dans différents domaines tel que le contact : roue-rail, les embrayages, les freins, les pneumatiques, les paliers et roulements, les moteurs à combustion, les liaisons mécaniques, les joints, les machines de production, le soudage par ultrasons, les contacts électriques et bien d'autres. Les applications vont de l'analyse des efforts au sein d'éléments de contact et de liaison jusqu'à l'influence de la lubrification et de la géométrie sur l'usure et les frottements d'un système en passant par l'étude de système microscopiques.

I.2.2. Contact de Hertz

En génie mécanique et en tribologie, le contact de Hertz, est une description, due à Heinrich Rudolf Hertz (dont le nom est également associé aux unités SI Hertz), de la

contrainte au sein de deux objets en contact. La description du contact de Hertz, obtenue en 1880 [HERTZ 1881], s'applique au contact de deux sphères de rayons différents.

Généralités sur la théorie de contact de Hertz

Le contact de Hertz se réfère aux contraintes localisées qui se développent lorsque deux surfaces courbes viennent en contact et se déforment légèrement sous l'action des forces appliquées. Le degré de déformation dépend de l'élasticité du matériau en contact, autrement dit, de son module élastique. La théorie du contact de Hertz fournit la contrainte dans la zone de contact en fonction de la force normale appliquée, des rayons de courbure des deux corps et de leur module élastique.

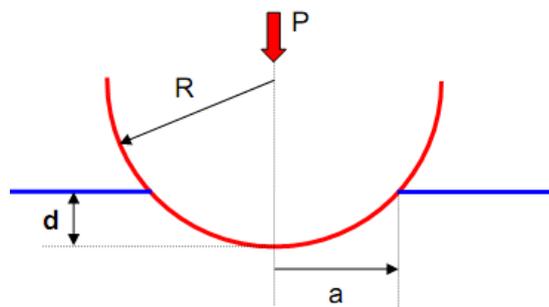


Figure.I.6: Contact entre une sphère et un demi-plan.

Dans les engrenages et les roulements en mouvement, ces forces de contact sont cycliques. À la longue, elles entraînent une fatigue du matériau et l'apparition de fissures sous la surface. La théorie du contact de Hertz constitue le fondement des équations pour le calcul du chargement admissible pour les roulements, les engrenages et autres pièces dont deux surfaces sont en contact.

I.2.3. Problèmes classiques de la mécanique des contacts

1. Contact entre une sphère élastique et un demi-espace élastique

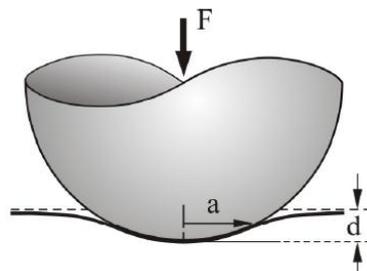


Figure.I.7: Contact entre une sphère et un demi-espace élastique.

Une sphère élastique de rayon R est enfoncée d'une profondeur d dans un demi-espace élastique, ceci crée une zone de contact de rayon $a = \sqrt{Rd}$. La force nécessaire pour maintenir ce contact est égal à :

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} \quad (\text{I.21})$$

Ou :

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (\text{I.22})$$

E_1 et E_2 ainsi que ν_1 et ν_2 sont respectivement les modules d'élasticité et les coefficients de Poisson des deux corps.

2. Contact entre deux sphères

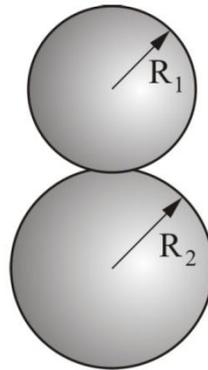


Figure.I.8: Contact entre deux sphères.

Si deux sphères de rayons R_1 et R_2 sont en contact, on peut obtenir un rayon équivalent R par le calcul suivant :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

La distribution de la pression sur la zone de contact est donnée par

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{1/2} \quad (\text{I.23})$$

avec

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left(\frac{d}{R}\right)^{1/2} \quad (\text{I.24})$$

La tension maximale intérieure de cisaillement se situe à $z \approx 0.49a$ pour $\nu = 0.33$.

3. Contact entre un cylindre rigide et un demi-espace élastique

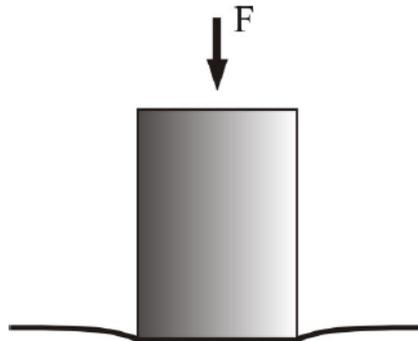


Figure.I.9 : Contact entre un cylindre rigide et un demi-espace élastique.

Un cylindre rigide de rayon a est enfoncé dans un demi-espace élastique. On obtient la répartition de la pression avec :

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{-1/2} \quad (\text{I.25})$$

où

$$p_0 = \frac{1}{\pi} E^* \frac{d}{a} \quad (\text{I.26})$$

La relation entre la profondeur de l'enfoncement et la force normale est :

$$F = 2aE^*d \quad (\text{I.27})$$

4. Contact entre un solide conique rigide et un demi-espace élastique

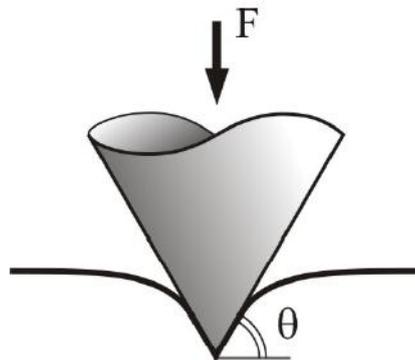


Figure.I.10: Contact entre un solide conique rigide et un demi-espace élastique.

Lors du contact entre un cône rigide et un demi-espace élastique, la profondeur de l'enfoncement et le rayon de contact sont reliés par la relation suivante:

$$d = \frac{\pi}{2} a \tan \theta \quad (\text{I.28})$$

Où :

θ est l'angle entre le plan et la face latérale du cône.

La répartition de la pression est de la forme :

$$p(r) = -\frac{Ed}{\pi a(1-\nu^2)} \ln\left(\frac{a}{r} + \sqrt{\left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1}\right) \quad (\text{I.29})$$

La contrainte à la pointe du cône (au centre de la zone de contact) a une singularité logarithmique.

La force totale se calcule ainsi :

$$F_N = \frac{2}{\pi} E \frac{a^2}{\tan \theta} \quad (\text{I.30})$$

5. Contact entre deux cylindres avec des axes parallèles

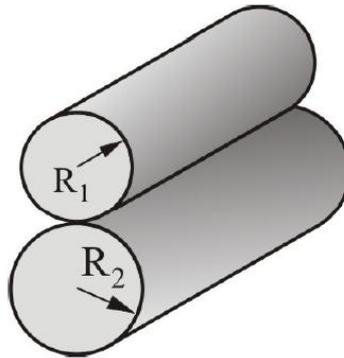


Figure.I.11: Contact entre deux cylindres avec des axes parallèles.

Lors d'un contact entre deux cylindres dont les axes sont parallèles, la force est linéairement proportionnelle à la profondeur de l'enfoncement :

$$F = \frac{\pi}{4} E^* L d \quad (\text{I.31})$$

Le rayon de courbure n'apparaît pas dans cette relation. La moitié de la largeur de contact devient avec la même relation :

$$a = \sqrt{Rd}$$

avec :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{I.32})$$

Comme lors du contact entre deux sphères. La pression maximale est égale :

$$p_0 = \left(\frac{E^*F}{\pi LR} \right)^{1/2} \quad (\text{I.33})$$

I.3. FATIGUE DES MATERIAUX.

I.3.1. Rupture des matériaux par fatigue :

En mécanique, la notion de fatigue désigne une rupture des matériaux soumis à une sollicitation cyclique. Ce terme fait intervenir la notion de durée de vie d'un matériau sous un type de sollicitation cyclique donné.

Généralités sur la fatigue, mécanismes, représentations

L'endurance des matériaux soumis à une sollicitation cyclique est généralement décrite à l'aide des diagrammes de Wöhler qui présentent l'évolution de la durée de vie d'une pièce en fonction de l'amplitude de la variation de la contrainte.

Les diagrammes de Wöhler permettent d'identifier trois principaux domaines d'endurance des matériaux, illustrés sur le graphique de la Figure I.12 [LALANNE 1999].

II.3.2. Courbe de Wöhler et les différents domaines de fatigue

La courbe de Wöhler est appelée courbe S-N (Stress - Number of cycles) dans les pays anglo-saxons. Universellement connue, la courbe de Wöhler est la plus ancienne et la seule qui permet de visualiser la tenue de la pièce ou des matériaux dans le domaine de fatigue. Elle définit une relation entre la contrainte appliquée σ (parfois notée S) et le nombre de cycles à la rupture N_R .

Pour la tracer, on réalise généralement des essais simples qui consistent à soumettre chaque éprouvette à des cycles des efforts périodiques, d'amplitude de chargement constante fluctuant autour d'une valeur moyenne fixée, et à noter le nombre de cycles au bout duquel l'amorçage d'une fissure est observé, appelé ici nombre de cycles à rupture N_R . Pour plus de commodité, ce nombre N_R est reporté en abscisse sur une échelle logarithmique, et l'amplitude de contrainte σ_a est reportée en ordonnée sur une échelle linéaire. Ainsi, à chaque pièce essayée, correspond donc un point du plan (N_R, σ_a) et à partir d'un certain nombre d'essais à contrainte généralement décroissante, on peut établir la courbe de Wöhler qui a l'allure suivante :

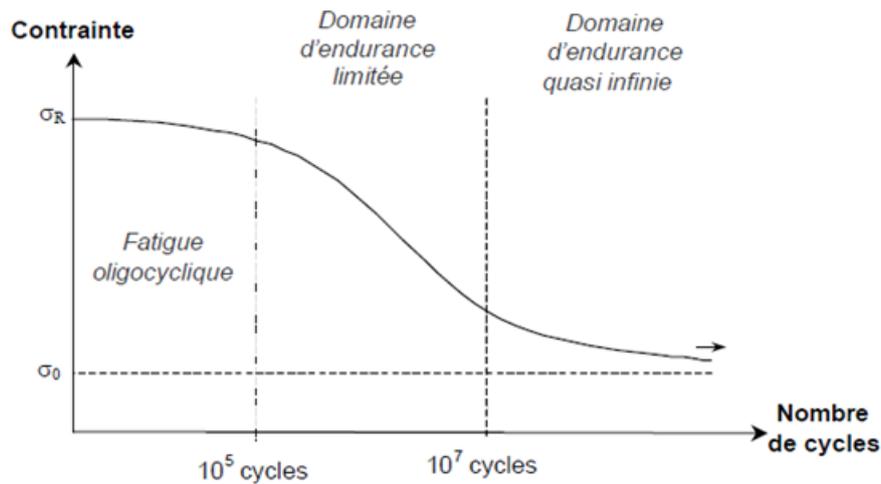


Figure.I.12: Trois domaines d'endurance des matériaux-Diagramme de Wöhler.

➤ Le domaine de la fatigue oligo-cyclique dans lequel les matériaux sont endommagés après un nombre de cycles restreint. De manière générale, ce domaine de fatigue à faible nombre de cycles désigne les essais où les échantillons sont endommagés à moins de 10^5 cycles. Ce domaine désigne principalement des sollicitations supérieures à la limite d'élasticité du matériau. L'endommagement des éprouvettes est lié à une fragilisation des échantillons suite à des écrouissages successifs.

Dans cette zone, la rupture survient après un certain nombre de cycles et est précédée d'une déformation plastique notable. Par suite de l'amplitude de la contrainte maximale, chaque cycle d'effort entraîne une déformation plastique d'ensemble accompagnée le plus souvent soit d'un durcissement notable, soit d'un adoucissement du métal. Coffin a montré que, dans le cas uniaxial, le nombre de cycles N_R était relié à la déformation plastique élémentaire $\Delta\varepsilon^P$ accompagnant chaque cycle par la relation :

$$\frac{\Delta\varepsilon^P}{2} = A(2N_R)^\alpha \quad (I.36)$$

A et α étant des constantes liées au matériau.

➤ Le domaine d'endurance limitée désigne généralement la plage de contraintes autour de laquelle la durée de vie des échantillons varie de 10^5 à 10^7 cycles. Dans ce domaine la fragilisation du matériau et la croissance des fissures sont influencées par la concentration des contraintes autour des défauts de volume – criques, précipités, impuretés.

Dans ce régime, le nombre de cycles N_R croît quand l'amplitude de la contrainte périodique σ_a décroît. De nombreuses formules mathématiques ont été proposées pour relier N_R à σ_a . On peut citer à titre d'exemple celle donnée par Basquin (1910) :

$$N_R \sigma_a^\beta = c \quad (\text{I.37})$$

tel que α , β et C sont des constantes liées au matériau.

➤ Le domaine d'endurance quasi infinie (illimitée) désigne les essais de plus de 10^7 cycles. A ce niveau, les concentrations de contraintes au voisinage des défauts de volume n'est pas suffisante pour permettre la croissance des microfissures et ce domaine est généralement représenté par une droite horizontale à une contrainte critique σ_D . La notion de fatigue giga-cyclique, ou fatigue à très grand nombre de cycles, désigne les essais dépassant 10^8 cycles.

L'étude de ce domaine est difficile en raison de la durée des essais et son étude est relativement récente. La rupture des matériaux est à ce niveau initiée par des défauts volumiques microscopiques – carbures, défauts cristallins [MARINES 2003].

Limite de fatigue

Pour une contrainte moyenne donnée, la limite de fatigue est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il n'y aura pas de rupture après un nombre infini de sollicitations.

Limite d'endurance

La limite d'endurance est la plus grande amplitude de contrainte pour laquelle il est constaté 50 % de rupture après un nombre fini N (appelé censure) de sollicitations.

Rapport d'endurance

C'est le rapport de la limite d'endurance à la charge de rupture à la limite de traction:

$$R = \sigma_D(N) / R_m$$

II.3.3. Diagrammes de Goodman-Smith :

Les courbes de fatigue de Wöhler sont généralement complétées par des diagrammes de Goodman-Smith qui présentent pour un nombre de cycles à rupture donné, l'évolution de l'amplitude de variation de la contrainte en fonction de la contrainte moyenne. Les schémas

de la figure suivante présent un diagramme de Goodman-Smith (Figure.I.13) associé à une courbe de Wöhler (Figure I.14).

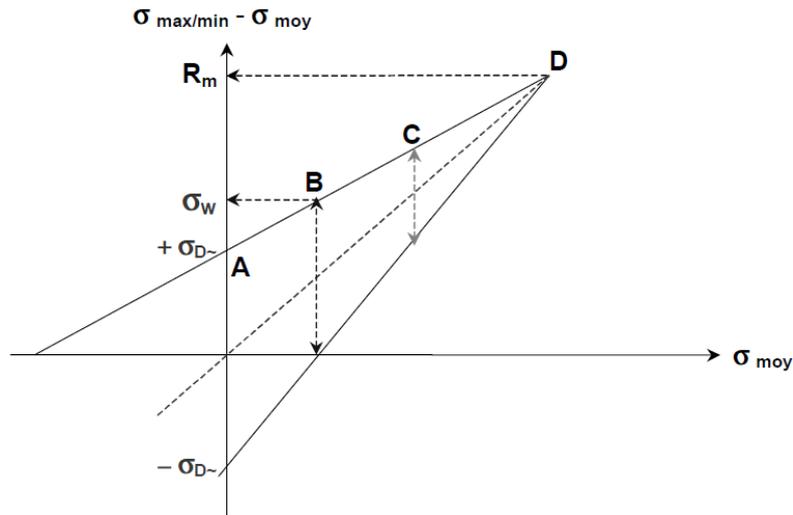


Figure.I.13: Diagramme de Goodman-Smith

A : rupture en contraintes alternées $\pm \sigma_D \sim$

B : rupture en contraintes répétées $0 - \sigma_w$

C : rupture en contraintes ondulées, avec une précontrainte σ_{moy} , et une variation maximale de contrainte $\sigma_{max} - \sigma_{moy}$.

D : rupture avec une variation de contrainte nulle résistance à rupture R_m .

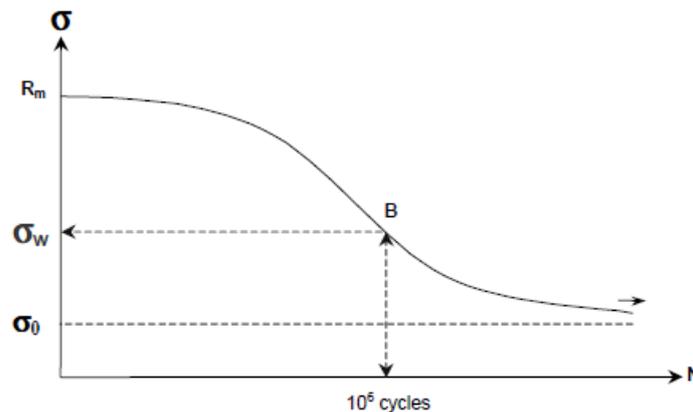


Figure.I.14 : Courbe de Wöhler

Sur le diagramme de Goodman-Smith de la (Figure.I.13), le point D correspond à la résistance à rupture du matériau étudié. Dans le cas des dépôts minces, cette contrainte peut être déterminée par des essais de fissuration unidirectionnelle par flexion d'une lame revêtue.

La position de ce point sur ce tracé ne dépend pas du nombre de cycles à rupture choisi. Cette représentation complète la courbe de Wöhler de (la Figure.I.14), en précisant l'évolution de l'amplitude de la variation de contrainte en fonction de la précontrainte pour un nombre de cycles à rupture constant. Ce type de représentation permet d'appréhender l'influence des contraintes résiduelles dans un échantillon donné sur l'endurance des matériaux soumis à une contrainte cyclique d'amplitude connue – point C de la (Figure.I.13). Ainsi, les contraintes résiduelles de compression obtenues par des procédés de grenailage ou de galetage permettent un gain significatif sur le nombre de cycles à rupture d'un matériau donné. De même, les contraintes résiduelles en compression importantes présentes dans les dépôts PVD auraient un effet bénéfique sur leur endurance lors d'essais de chocs répétés.

En ce qui concerne l'influence de la fréquence de la sollicitation cyclique sur l'endurance des matériaux, elle peut être considérée comme négligeable tant que la chaleur apportée dans la pièce par la sollicitation peut être évacuée. Dans le domaine d'endurance limité des matériaux métalliques, les effets de la fréquence de la sollicitation sont négligeables tant qu'elle ne dépasse pas les 100 Hz. Ces remarques concernent les essais de fatigue traditionnels et négligent les effets de transformations tribologiques superficielles issues d'un contact ou la chaleur dissipée par frottement.

La propagation des fissures est liée à la distribution des défauts dans la microstructure des échantillons testés. Selon la distribution spatiale et dimensionnelle de ces défauts volumiques, les essais de fatigue présentent une dispersion de résultats qui peut être appréhendée par une analyse statistique d'un nombre d'essais de fatigue suffisamment grand.

I.4. CORROSION

I.4. 1. Définition

C'est l'attaque destructive d'un métal par réaction chimique ou électrochimique avec son environnement. Les propriétés mécaniques des matériaux sont altérées.

La détérioration par des moyens physiques n'est pas appelée corrosion, mais suivant le cas : Erosion - Usure - Grippage – etc.

La corrosion désigne l'altération d'un matériau par réaction chimique avec un oxydant (le dioxygène et le cation H^+ en majorité). Il faut en exclure les effets purement mécaniques

(cela ne concerne pas, par exemple, la rupture sous l'effet de chocs), mais la corrosion peut se combiner avec les effets mécaniques et donner de la corrosion sous contrainte et de la fatigue-corrosion; de même, elle intervient dans certaines formes d'usure des surfaces dont les causes sont à la fois physicochimiques et mécaniques.

Les exemples les plus connus sont les altérations chimiques des métaux à l'air ou dans l'eau, telles la rouille du fer et de l'acier ou la formation de vert-de-gris sur le cuivre et ses alliages (bronze, laiton).

Cependant, la corrosion est un domaine bien plus vaste qui touche toutes sortes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) dans des environnements variables (milieu aqueux, atmosphère, hautes températures).

La corrosion est un problème industriel important : le coût de la corrosion, qui recouvre l'ensemble des moyens de lutte contre la corrosion, le remplacement des pièces ou ouvrages corrodés et les conséquences directes et indirectes des accidents dus à la corrosion, est estimé à 2 % du produit brut mondial. Chaque seconde, ce sont quelque 5 tonnes d'acier qui est ainsi transformées en oxydes de fer [1].

I.4. 2. Corrosion des métaux

La corrosion des métaux est un phénomène naturel. Il n'existe que de rares cas de métaux présents à l'état natif naturellement :

- l'or et généralement tous les métaux nobles : platine, or, iridium, osmium, ruthénium, rhodium, palladium et argent ; ceci est dû à leur potentiel standard d'oxydo-réduction positif.
- cuivre, argent, fer de provenance météoritique.

Mais dans l'écrasante majorité des cas, le métal est présent sur Terre sous forme d'oxyde, dans les minerais : bauxite pour l'aluminium, hématite pour le fer, chalcoppyrite pour le cuivre, rutile pour le titane...

Depuis la préhistoire, le travail de métallurgie a consisté à réduire ces oxydes dans des bas-fourneaux puis des hauts-fourneaux pour fabriquer le métal. La corrosion n'est qu'un retour à l'état d'oxyde naturel.

La corrosion des métaux est dans la grande majorité des cas une réaction électrochimique (une oxydo-réduction) qui fait intervenir la pièce manufacturée et l'environnement.

Exemples de corrosion de contact (à propos de ce phénomène) :



Figure.I.15: Corrosion sur une pièce.



Figure.I.16: Corrosion de contact suite à une rupture de bague.

Il faut donc prendre en compte :

- le matériau :
 - composition chimique.
 - microstructure (taille de cristallites, précipités), et donc les traitements thermomécaniques.
 - traitements de surface.
- l'environnement :
 - composition chimique.
 - pression.
 - température.

Cela conditionne le type de corrosion et la vitesse de corrosion, dans les installations industrielles, on définit ainsi des zones de risque de corrosion appelées boucles de corrosion.

La forme de la pièce et les traitements subis mise en forme, soudure, vissage jouent un rôle primordial. Ainsi, un assemblage de deux métaux différents (par exemple deux nuances

d'acier, ou le même acier traité différemment) peut créer une corrosion accélérée, on voit d'ailleurs souvent des traces de rouille au niveau des écrous. Si la pièce présente un interstice (par exemple entre deux plaques), cela pourra former un milieu confiné qui évoluera différemment du reste de la pièce et donc pourra aboutir à une corrosion locale accélérée.

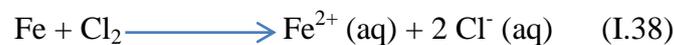
Toute hétérogénéité peut conduire à une corrosion locale accélérée, par exemple aux cordons de soudure. L'hétérogénéité de l'environnement auquel est soumise une pièce métallique de composition régulière peut susciter une corrosion dite par "pile de concentration". Il en est de même pour une pièce métallique localisée dans une solution de composition identique mais connaissant des agitations non-uniformes. Une plaque métallique partiellement immergée subira une corrosion localisée dite "à la ligne d'eau".

I.4.3. Approche de la protection contre la corrosion

La corrosion est donc un phénomène qui dépend du matériau utilisé, de la conception de la pièce (forme, traitement, assemblage) et de l'environnement. Le processus de corrosion peut également être ralenti en agissant sur la réaction chimique en elle-même.

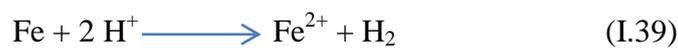
On parle d'immunité lorsque le métal est stable en présence du milieu corrodant.

Exemple de formule de corrosion



Cette formule correspond par exemple à la réaction de corrosion des canalisations métalliques d'eau potable par le dichlore gazeux servant initialement à détruire les microorganismes. Il ne faut pas faire l'amalgame avec l'effet des ions chlorures de l'eau de mer sur la vitesse de corrosion.

L'atmosphère contient des acides HNO_3 , H_2SO_4 , etc., résidus de combustion. Ces acides attaquent les métaux :



Ces phénomènes sont à la base de la corrosion atmosphérique qui n'a d'ailleurs pas lieu en absence d'humidité dans l'air.

L'oxygène de l'air, en présence d'eau, oxyde le fer et peut former divers oxydes. Selon les conditions chimiques, il forme divers oxydes ou hydroxydes qui peuvent être soit non-protecteurs, soit modérément protecteurs.

Par exemple: $\text{Fe}(\text{OH})_3, n\text{H}_2\text{O}$: la rouille, cet hydroxyde est poreux et ne protège pas le fer. Mais en milieu réducteur (peu ou pas d'oxygène) neutre ou modérément basique, c'est l'eau qui oxyde le fer, on peut alors obtenir la magnétite Fe_3O_4 , qui elle est modérément protectrice. L'acier inoxydable, communément désigné par "acier inox", contient du chrome, au minimum 12 %. Les oxydes qui se forment en surface de l'alliage (avec une forte proportion d'oxyde de chrome de type Cr_2O_3) gênent la progression de l'oxygène ou le transfert d'électrons nécessaire à l'oxydation, on parle alors de passivation. Le terme indique un net ralentissement de la vitesse de corrosion par rapport à la cinétique initiale de corrosion. Toutefois, la corrosion n'est pas annulée mais fortement ralentie, de quelques ordres de grandeur. L'effet protecteur du chrome croît en général avec sa teneur. Un minimum de 12 % est nécessaire, mais les aciers destinés à des environnements agressifs, par exemple en présence de chlorures ou vers les milieux acides, ont des teneurs plus élevées, jusqu'à 25 % par exemple. L'ajout de molybdène a aussi un effet passivant très élevé, plus même que celui du chrome (1% Mo ~ 2,5% Cr).

I.4.4.Types de corrosion

a) Corrosion uniforme ou généralisée

C'est la forme la plus commune caractérisée par une réaction chimique ou électrochimique qui se produit uniformément sur toute la surface considérée.

Exemple :

- acier ordinaire ou Zinc immergé dans une solution acide sulfurique diluée.
- acier ordinaire en présence d'air humide
- acier ordinaire en eau de mer.

b) Corrosion galvanique

Entre deux métaux dissemblables plongés dans un électrolyte, existe une différence de potentiel. Si ces métaux sont en contact (c'est-à-dire connectés électriquement), un courant électrique s'établit. Le métal le moins noble (qui a un potentiel de dissolution moins élevé dans la série galvanique) joue le rôle d'anode et se corrode. C'est ce qui se passe dans une pile sèche avec le zinc.

Exemples de piles :

- hélice bronze connectée à coque en acier dans eau de mer.

- canalisation acier oxydée avec canalisation masse enterrées.
- métal écroui en contact avec métal non écroui.
- zone de soudure thermiquement affectée par la chaleur.
- assemblage à brides réunissant des métaux différents.
- boîtes de distribution des échangeurs et tubes laiton sur eau de mer.

c) Corrosion par crevasse

Ce type de corrosion est généralement associé à la présence de petits volumes de solution stagnant dans les trous, sous les dépôts, à l'interface des brides et joints, à l'interface d'un objet tombé dans le fond d'un récipient. C'est une attaque électrochimique par "aération différentielle" qui se prolonge par une ou des réactions secondaires.

d) Corrosion sous contrainte

Les actions simultanées de contraintes et d'un milieu corrosif produisent des fissurations dans un métal. Les fissures sont inter-granulaires ou trans-granulaires et se présentent souvent sous forme ramifiée.

e) Corrosion par fatigue

La fatigue représente la tendance du métal à se fracturer sous l'action répétée d'un cycle de contraintes. La fissuration apparaît normalement au-dessous de la limite élastique. La "corrosion sous fatigue" est une réduction de la résistance à la fatigue due à la présence d'un milieu corrosif.

En eau de mer, les inox austénitiques ne conservent que 75 % de leur résistance à la fatigue. Les fissures sont généralement transe-granulaires, elles prennent naissance grâce aux piqûres.

Chapitre II :

Procédé de

vibro-abrasion

II. 1. INTRODUCTION

Il existe plusieurs méthodes qui ont pour but d'améliorer la qualité de surface comme:

- Méthode par vibro-abrasion.
- Méthode par force centrifuge.
- Méthode par jet des billes.
- Méthode de traitement par abrasion destiné pour les pièces a révolution.
- Méthode de traitement par force magnétique.

La méthode qui nous intéresse si la méthode de traitement par vibro-abrasion (TMVA) tel que consiste à l'usinage par abrasion.

II.2. DEFINITION LA VIBRO-ABRASION

Le processus est l'exploitation industrielle des phénomènes de friction dans un environnement chimique contrôlé.

Les pièces et les médias abrasifs sont mis en vibration dans une cuve avec ajout d'eau et d'additif chimique pour obtention de la finition demandée.

L'enlèvement de matière, le niveau de polissage et l'état de surface dépendent de la composition et de la taille des médias. Ainsi que la déformation plastique de la couche superficielle des éléments de contact. Dans le processus de traitement des micro-impacts sont produit dans différents angles entre l'outil et les pièces à traiter.

Polissage, lissage, ébavurage, décalaminage, rayonnage, désoxydation, dégraissage, nettoyage de surface,.....etc. sont les diverses applications de cette technologie qui peut s'appliquer aux surfaces métalliques, neuves ou usagées, de toutes natures mais aussi aux matières plastiques et même au bois [MOTPEHKO 2002].

- 1 : tube pour le fluide (eau et l'additif chimique).
 2 : pompe.
 3 : réservoir de vidange.
 4 : tube pour épanchement.
 5 : chambre de travail.
 6 : ressort spiral.
 7 : moteur (vibrateur).
 8 : fondation.
 9 : amortisseur.
 10 : pièce à traiter.

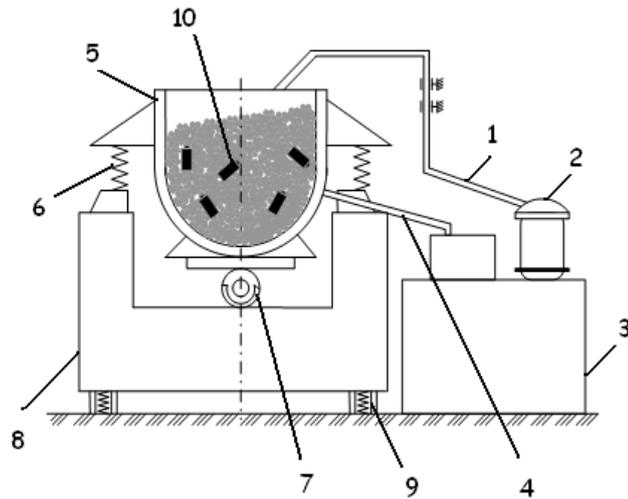


Figure.II.1. Schéma du traitement par vibro-abrasion

On générale la méthode du traitement par vibro-abrasion est caractérisée par les phénomènes suivant :

- L'impact dynamique du milieu actif est sous la forme de plusieurs collisions des particules sur la surface des pièces traitée.
- L'interaction mécanique de milieu actif et des pièces mécanique.
- Le choc acoustique sous l'explosion des ondes.

Les deux premiers phénomènes causent principalement des changements sur la surface et surtout sur la surface des couches minces, la différence de choc acoustique est un phénomène qui est caractérisé par l'influence des ondes sur la structure du matériau, ainsi que le changement au niveau de contrainte résiduelle et aussi au niveau de l'état énergétique.

La vibration et la déformation plastique active au processus physico-chimique. Qui se produit sur la surface des pièces traitées.

Dans le processus et selon le schéma de base l'échantillon et le milieu actif sont constamment confrontés à une accélération, il y aura deux types de mouvement : un mouvement de vibration et un deuxième mouvement de rotation lent .Dans ce processus l'échantillon peut prendre plusieurs position dans le milieu actif, dont le but est de lui assurer un traitement uniforme sur toute la surface, l'échantillon reçoit un grand nombre de micro impact dans des directions différentes.

Sous l'influence des vibrations, le traitement se produit relativement uniformément dans toutes les zones de la chambre de travail.

Le traitement de vibro-abrasion représente un ensemble complexe des phénomènes mécano physico chimique, la nature de phénomènes est caractérisée par :

- La propriété physique du milieu actif (abrasifs, granulations...).
- Les caractéristiques du matériau de la pièce traitée.
- Les paramètres dynamiques du processus qui reflètent le régime de traitement.
- La composition, les propriétés et la qualité de l'additif chimique.

L'intensité du traitement se produit beaucoup plus dans le fond de la chambre de travail ou la pression elle est la plus élevée. Pour avoir un traitement uniforme au niveau de toute la chambre de travail (au niveau des parois comme au fond de la chambre de travail) on ajoute une pression supplémentaire, le traitement est effectué principalement par une alimentation continue et périodique de fluide dans la chambre de travail. Le fluide assure l'élimination des produits d'usure et les particules du métal...) avec les pièces traitées. Le changement du niveau de fluide influe sur l'intensité du traitement.

L'additif chimique rajouté au fluide ayant des propriétés particulières dans le but d'améliorer l'intensité du traitement et de la qualité de surface, le fluide joue aussi un rôle de refroidisseur.

L'intensité du traitement par vibro-abrasion dépend de différents facteurs qui sont :

- le régime du traitement (l'amplitude, la fréquence, la durée du traitement, la taille et la forme des particules).
- les paramètres du traitement (la force de l'impact «micro-impact», les caractéristiques des particules et leur vitesses, l'accélération, la pression et la température dans la chambre de travail).

Le choix des abrasifs dépend de l'utilisation et de l'exploitation on utilise divers types de matériaux d'abrasifs. L'enlèvement de matière, le niveau de polissage et l'état de surface dépendent de la taille et composition des médias (métallique et non métallique) introduits dans le vibreur [БАБИЧЕВ 2003].

II.3. PARAMETRES DU PROCEDE DE VIBRO-ABRASION

L'intensité du traitement par vibro-abrasion dépend du régime du traitement (l'amplitude, la fréquence, la durée du traitement, la taille et la forme des particules), et de plusieurs autres paramètres. Les pièces sont caractérisées par leur milieu d'utilisation, les

conditions de travaux, et le lieu d'exploitation. Ce paramètre nomme par les paramètres physico-mécaniques qui elles sont :

- La force de l'impact.
- La vitesse et l'accélération des particules.
- La pression de contact et les contraintes et l'énergie de l'impact.
- La température.

Nous pouvons remarquer que l'amplitude des oscillations dans la plupart des cas varie entre 0,5 – 5mm. Et rarement, atteint 7 – 8mm. Avec une basse fréquence qui varie, entre 15 – 50 Hz.

L'efficacité du traitement par vibro-abrasion dépend du régime du traitement (l'amplitude, la fréquence, la durée du traitement, la taille, la forme et matériaux des medias et additif chimique), et des paramètres du traitement [force de l'impact (micro-impact), les caractéristiques des particules et leurs vitesses, l'accélération, la pression, la contrainte et la température dans la chambre de travail [MOTPEHKO 2002].

Les valeurs numériques de ces paramètres sont :

1. la vitesse des medias varie entre 0,5 – 1.0 m/s.
2. l'accélération varie entre 20 - 150 m/s².
3. La force micro-impact entre 1,5 – 2.5 kg.
4. La pression de contact varie entre 700 - 1500 kgf /mm².
5. La température moyenne dans la chambre de travail en général est situé entre 30 - 40 °C.

II.3.1. Vitesse d'impact des medias et des pièces traitées

Cette vitesse varie comme déjà citée précédemment entre 0,5 – 1 m/s mais elle peut être déterminée par la formule empirique connue :

$$V_i = V_{ch} \times k_v \quad (\text{II.1})$$

D'où;

$$\begin{cases} k_v = a^L \approx 0,9877^L \\ V_{ch} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{cases} V_x = A_x \times \omega \times \sin \omega t \\ V_y = A_y \times \omega \times \cos \omega t \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

D'après la trajectoire du mouvement par la circonférence

$$\begin{cases} V_{ch} = A \times \omega \\ \omega = 2\pi f = \frac{2\pi N}{60} \approx \frac{N}{10} \Rightarrow V_{ch} \approx \frac{AN}{10} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

D'où :

V_i : Vitesse d'interaction des media et des pièces à traiter (m/s).

V_{ch} : Vitesse de déplacement des points de la chambre de travail (m/s).

k_v : Coefficient de perte de vitesse.

A : Amplitude (mm).

ω : Vitesse angulaire d'oscillation (rad/s).

N : Vitesse de tour (tours/min)

t : Temps en secondes (s).

A_x et A_y : Les valeurs de l'amplitude d'oscillation selon les coordonnées x et y (mm).

a : Coefficient empirique.

L : La distance de la paroi de la chambre de travail jusqu'au point de la particule (mm).

II.3.2. Accélération de l'impact

L'accélération de l'impact des objets d'après le traitement des métaux par vibro-abrasion varie entre 15 - 150 m/s² .et elle peut être calculée par la formule suivante:

$$a_x = A_x \times \omega^2 \times \cos \omega t \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{II.5})$$

$$a_y = -A_y \times \omega^2 \times \sin \omega t \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{cases} a = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \\ a_{max} = A\omega^2 \end{cases} \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{II.7})$$

II.3.3. Force de l'impact des medias

La force de l'impact des medias et des pièces à traiter d'après la méthode du traitement des métaux par vibro-abrasion, dépend du régime d'oscillation et des caractéristiques des particules et elle varie entre 0.5 – 5 Kgf.

➤ Pour le traitement des pièces fixées :

$$F_{pff} = 6V_i \sqrt{\frac{m \sigma_e R_b k_m k_g}{k_n}} \left(1 - \frac{3}{8} k\right) \quad (\text{kgf}) \quad (\text{II.8})$$

➤ Pour le traitement des pièces libres :

$$F_{pl} = 6V_i \sqrt{\frac{m \sigma_e R_b k_m k_g}{k_n}} B \quad (\text{kgf}) \quad (\text{II.9})$$

d'où :

m : masse des particules (g).

V_{im} : vitesse de l'impact (m/s).

R_b : rayon de la bille (mm).

σ_e : La limite d'élasticité des matériaux des pièces à traiter (MPa ou N/mm²).

k_n : coefficient qui prend en considération l'impact répétitif des particules dans un seul endroit.

k_m : Coefficient qui prend en considération la simultanéité d'action des particules.

k_g : Coefficient qui prend en considération les propriétés d'amortissement du milieu actif au moment de l'impact.

k : coefficient de régénération (récupération).

B : coefficient qui détermine la quantité d'énergie de l'impact et du déplacement des pièces chargée librement.

II.3.4. Energie de l'impact des medias avec les pièces

Pour déterminer l'énergie de l'impact, on utilise la formule suivante :

$$E \approx \frac{HB \cdot d^2}{6D} \quad (\text{II.10})$$

D'où :

HB : dureté du matériau des pièces à traité (essai de brinell).

d : diamètre de l'empreinte (mm).

D : Diamètre de la bille (mm).

II.3.5. Pression de contact dans la zone de l'impact

La pression de contact dans la zone de l'impact est caractérisée par l'équation suivante :

$$P_{c \max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi ab} \quad (\text{Pa}) \quad (\text{II.11})$$

d'où :

F : force de l'impact (kgf).

a et b : dimension de demi-axe de la surface de contact (mm).

a et b peuvent être déterminé par la formule suivante :

$$\begin{cases} a = \vartheta_1 \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{F}{\Sigma \rho} (\vartheta_1 + \vartheta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \\ b = \vartheta_2 \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{F}{\Sigma \rho} (\vartheta_1 + \vartheta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

d'où :

ϑ_1, ϑ_2 : Coefficients d'élasticité qui caractérisent des propriétés d'élasticité du matériau des objets de l'impact.

$\Sigma \rho$: Somme des valeurs des rayons de retour de la courbure principale des surfaces de contact.

Suivant le traitement par vibro-abrasion, le plus caractérisant est l'impact de la surface sphérique avec la surface plane quand, $a = b$.

Les dimensions du demi-axe des surfaces de l'impact sont :

$$a = 0,0677 (F \cdot D)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{mm}) \quad (\text{II.13})$$

D : Le diamètre de la bille (media du milieu actif).

II.3.6. Température dans la chambre de travail

Le phénomène thermique dans la chambre de travail est considéré comme un résultat de la collision des matériaux. Celle-ci engendre de la température dans la zone de l'impact et elle est déterminée sur la base de l'évolution de l'énergie cinétique dans un environnement en traitant la surface au moment de l'impact, qui se calcule comme suit:

$$T = \frac{m \cdot V_i^2}{2} \cdot \frac{1}{427} \cdot \frac{(1-k^2)}{c_s \gamma n v} \quad (\text{K}) \quad (\text{II.14})$$

Ou :

$$\begin{cases} v = \frac{\pi \cdot r^4}{4R} \\ T = \frac{2mV_{ch}^2 R (1-k^2) k_m k_g}{427 c_s \gamma n \pi r^4} \end{cases} \quad (\text{K}) \quad (\text{II.15})$$

D'où :

V_i : Vitesse d'interaction des media et des pièces à traiter (m/s).

V_{ch} : Vitesse de déplacement des points de la chambre de travail (m/s).

c_s : chaleur spécifique.

γ : Densité du matériau.

n : Coefficient de proportionnalité.

v : Volume de l'empreinte.

r : Rayon de l'empreinte.

R : Rayon de la bille (les media du milieu actif).

m : masse des particule.

k_m : Coefficient qui prend en considération la simultanéité d'action des particules.

k_g : Coefficient qui prend en considération les propriétés d'amortissement du milieu actif au moment de l'impact.

k : coefficient de régénération (récupération).

II.4. PARAMETRES DES SURFACES SUPERFICIELLES

Ils existent des autres paramètres qui ont permis à obtenir des pièces avec des caractéristiques recherchées ces paramètres des pièces traitées comme la rugosité, la dureté et la microdureté, structure et microstructure et la contrainte résiduelle [BAHH MAO 2003].

II.4.1. Rugosité

On désigne par rugosité les aspérités et les creux d'une surface mesurés par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan. La caractérisation géométrique de ce paramètre est délicate parce qu'il s'agit d'un paramètre statistique qui ne peut être défini par une seule mesure, et parce qu'il s'agit d'une variable dépendant de deux dimensions, en général analysée suivant une seule dimension.

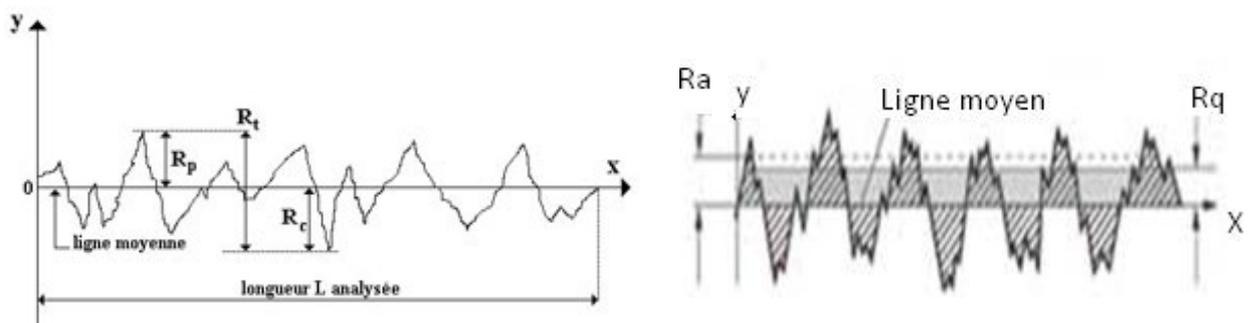


Figure.II.2: Paramètre de mesure de rugosité.

➤ Paramètres de rugosité

La rugosité est une caractéristique de l'état de surface d'un matériau solide. Elle est susceptible de recevoir deux acceptions techniques (tribologie, hydraulique), en mécanique des solides c'est l'aspect de tribologie qui nous intéresse, celle-ci est une profondeur caractéristique des stries sillonnant la surface.

La rugosité est notée par R et exprimée en μm .

La rugosité d'une surface donnée peut être déterminée par la mesure d'un certain nombre de paramètres. On peut citer notamment, parmi les plus utilisés:

- **Pic maximal (R_p)** : Observé sur la longueur analysée. Si l'on pose un repère cartésien dont l'axe des abscisses est aligné sur la ligne centrale de la surface à mesurer, le pic maximal, lu sur l'axe des ordonnées, pourra également être noté $R_p = y_{\max}$.
- **Creux maximal (R_c)** : Observé sur la longueur analysée $R_c : R_c = |y_{\min}|$

Valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base.

- **Rugosité totale (R_t)** : Elle correspond à la somme du pic maximal et du creux maximal observé sur la longueur analysée. $R_t = R_p + R_c$.
- **R_z** : C'est la moyenne des écarts totaux de rugosité " R_t " observés sur 5 longueurs.
- **Moyenne quadratique ou écart moyen (R_q)** : De toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base. Notée " R_q ". Ce paramètre "moyen" permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée, et est par conséquent rarement utilisé.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (\text{II.16})$$

- **Ecart arithmétique moyen du profil (R_a)** : Moyenne arithmétique ou écart moyen de toutes les ordonnées du profil à l'intérieur de la longueur de base. " R_a " correspond à la différence entre cette distance moyenne et la "ligne centrale". Ce paramètre "moyen" permet de donner une indication générale résumant les autres paramètres de rugosité d'une surface donnée, et est par conséquent fréquemment utilisé.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (\text{II.17})$$

- **Ligne de référence arithmétique (ligne centrale)** : Ligne de référence divisant le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base les sommes des aires des solides et des vides compris entre celle-ci et le profil soient identiques.

II.4.2. Dureté et microdureté

Propriétés mécaniques

Les essais mécaniques ont pour but de déterminer un certain nombre de caractéristiques des métaux et alliages telles que l'aptitude à la déformation par traction ou compression, la résistance à la pénétration d'une pièce dure soumise à un effort constant ...etc.

Les résultats obtenus, par ces différents essais qui mettent en œuvre des techniques particulières, sont en relation directe avec la structure du métal et permettent de prévoir son comportement dans les conditions réelles d'utilisation [HANS 2003].

I.4.2.1. Essais de dureté

La dureté est la résistance qu'oppose un matériau à sa pénétration par un autre corps plus dur que lui. L'essai consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à tester. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. Celle-ci est d'autant plus grande que le métal est mou. Une valeur de dureté est déterminée à partir de la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte (de l'ordre de millimètre mm) laissée par le pénétrateur soumis à une charge et une vitesse d'application contrôlées.

Il existe différents types de dureté:

1. Dureté Brinell

La dureté Brinell est notée HB. Les mesures de dureté Brinell, dont le principe est présenté en figure.II.3 est qui consiste à pénétrer une bille d'acier trempé ou une bille en carbure.

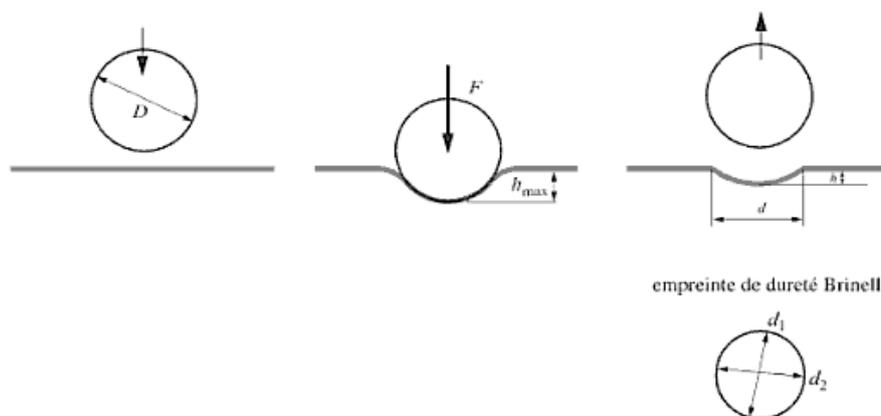


Figure.II.3. Schéma de principe d'un essai de dureté Brinell.

Pour les duretés de Brinell la dureté peut aller jusqu'à des duretés de 650 HB (pour les bille en acier HBW est utilisé pour des duretés allant jusqu'à 350 HB, et pour des duretés plus importantes en utilise alors une bille en carbure HBS).

Le diamètre de la bille doit être adapté à l'épaisseur et à la dureté de la pièce, c'est même diamètres sont normalisés (1 ; 2.5 ; 5 ou 10 mm).

Le pénétrateur doit être appliqué sur une surface lisse (c'est la pièce ne pas plat ou lisse en doit la faire passer dans une polisseuse) des pièces traitées avec une force donnée avec un maintien à la charge maximale de durée comprise entre 10 à 30 s (un maintien de 15 s pour les alliages ferreux et 30s pour les alliages non ferreux).

Dans le cas d'une empreinte circulaire avec une forme calotte sphérique on prend le diamètre de l'empreinte mais dans le cas d'une empreinte non circulaire, on prendra la valeur moyenne des deux diamètres perpendiculaires de l'empreinte.

Le diamètre de l'empreinte est mesuré à 0.01 mm (1%) près. Si la machine ne possède pas de système optique d'agrandissement, on utilise une lunette à oculaire micrométrique.

Pour trouver la valeur de la dureté de Brinell on doit mesurer tout d'abord le diamètre d (mm) de l'empreinte obtenue sous une charge déterminée du tableau suivant :

D (mm) Matériaux	1	2.5	5	10
Acier – alliage de nickel et titane – Fonte	30	187.5	750	3000
Laitons – Cuivre et alliages	10	62.5	250	1000
Métaux légers	5	31.25	125	500
Plomb - Etain	2.5	12.5	62.5	200

Tableau.II.1:Dureté de Brinell des différents matériaux

F : charge en (kgf) et D diamètre de la bille en (mm)

Cette Dureté peut être déduite des formules suivantes :

$$HB = \frac{F}{A} \quad (\text{II.18})$$

avec :

F : force appliquée (N).

A : l'aire de l'empreinte de la calotte sphérique (mm²).

$$A = \frac{\pi \cdot g \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

D : diamètre de la bille (mm).

d : diamètre de l'empreinte (mm).

Donc :

$$HB = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot g \cdot D \cdot (d - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{II.20})$$

$$F = 9,81 \text{ KD}_2$$

Où :

K : coefficient dépendant du matériau considéré.

En effet:

K= 2,5; 5; 10 pour l'aluminium et ses alliages, K= 30 pour les aciers, K=5, 10,30 pour le cuivre et ses alliages.

Le centre de l'empreinte doit être à une distance au moins égale à 2d du bord de la pièce : l'entraxe de deux empreintes voisines doit être au moins égale à 3d.

Dans la pratique, la dureté de Brinell n'est pas calculée mais relevée dans des tables, en fonction du diamètre d de l'empreinte, du diamètre D de la bille et du rapport de charge ou de la charge d'essai : $C \cong F/D$ (le rapport de charge est la seule manière de différencier les valeurs de la dureté obtenue avec des différents billes).

L'essai Brinell est largement utilisé dans le cas des pièces mi-dures et de grandes épaisseurs.

Il présente des avantages et des inconvénients. Parmi ses avantages, on distingue:

- Facilité de mesurer l'empreinte.
- La dureté Brinell est le procédé le plus précis pour le contrôle de la dureté.

Concernant les inconvénients, on peut citer:

- La lecture indirecte de la valeur de la dureté.
- Le procédé n'est pas utilisable pour les petites pièces (charge trop grande)

2. Dureté Knoop

L'essai de Knoop permet la mesure de dureté des matériaux fragiles comme le verre et la céramique.

Le pénétrateur en diamant est de forme pyramidale à base rectangulaire avec un angle de $172^{\circ}30'$ entre deux faces opposées et 130° pour les deux autres faces. Les charges appliquées sont inférieures à 1 kgf.

Le pénétrateur laisse une empreinte dont la taille est comprise entre 0,01 et 0,1 mm ($D = 7 d$ et $H = D / 30$).

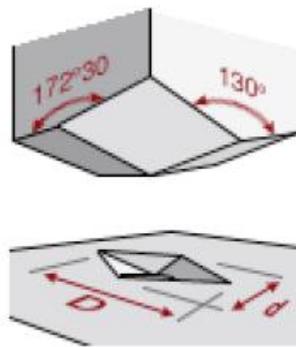


Figure.II.4.Schéma de dureté de Knoop.

Si on mesure la longueur et la largeur de l'empreinte à l'aide d'un microscope, la dureté de Knoop (HK) est donnée par la formule suivante :

$$HK = \frac{14.229 * F}{D^2} \quad (\text{II.21})$$

Où F est la charge en kgf et D^2 , l'aire de l'empreinte en millimètres carrés.

3. Dureté Vickers

Le procédé de Vickers est le procédé de mesure de dureté le plus précis, et concerne le domaine de mesure le plus large, et en distingue plusieurs variantes de cet essai quand détaillera plus loin (mesure de microdureté et nanodureté).

Le symbole de la dureté Vickers est HV mais se symbole doit être complète par l'indice indiquant la valeur de la charge appliquée. Ex : HV₅₀.

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à tester, un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée (angle au sommet égal à 136°), sous une charge F et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface S après suppression de la charge.

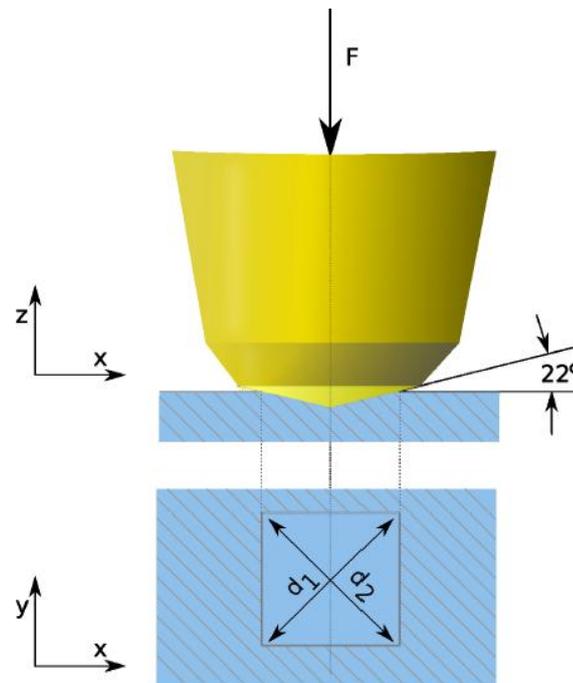


Figure.II.5 : schéma démonstratif de l'essai de Vickers.

Celui-ci est fragile aux chocs, et de ce fait moins apte à l'utilisation en condition sévères que la bille dans le procédé Brinell. En revanche, il est possible d'examiner des matériaux plus durs. Il n'a a priori pas de limite aux duretés mesurables par l'essai de dureté Vickers.

Le pénétrateur est amené au contact de la surface de la pièce : la charge est appliquée progressivement jusqu'à la valeur choisie et maintenue pendant 10 à 15 s.

Pour des charges comprises entre 100 et 1000 N, la charge est sans influence sur la mesure de la dureté. Pour les échantillons dont la surface de mesure est petite ou mince (couche dure superficielle par exemple) on utilise des charges comprises entre 2 et 50 N, et si la charge est inférieure à 2 N on parlera de l'essai de microdureté Vickers.

Les calculs des duretés Vickers (HV) et Brinell (HB) sont semblables. La mesure de dureté Vickers est définie par :

$$HV = \frac{\text{Charge d'essai}}{\text{Aire de l'empreinte}} = \frac{1,854 \cdot F}{d^2} \quad (\text{II.22})$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (\text{II.23})$$

Avec :

F : La force de pénétration ou charge d'essai (N).

d_1 et d_2 : diagonales de l'empreinte (mm).

d : la moyenne des deux diagonales (mm).

Dans le calcul de la dureté Vickers la précision du dispositif de mesure des diagonaux doit être de 1% (0.01 mm) donc la précision ou l'écart sur la dureté Vickers est de 2%.

La distance entre le centre de l'empreinte et le bord de la pièce ou le contour d'une autre empreinte doit être au moins égale à 2.5 fois la diagonale de l'empreinte (2,5d).

Les domaines d'application de la mesure de dureté Vickers sont :

- La mesure de dureté des matériaux de tout niveau de dureté, y compris les matériaux durs frittés. Dans ce dernier cas l'empreinte ne mesure que quelques μm (plus l'empreinte est petit et plus la dureté grandes et la qualité de la surface doit être polie).
- Pour les mesure de dureté d'une couche superficielle durcie, la force de mesure doit être choisie de telle sorte qu'aucun trace de déformation ne soit visible sur la face opposée après l'essai, et de telle sorte que l'épaisseur de la couche soit supérieur ou égale à 1.5 fois la diagonale de l'empreinte d.

4. Dureté Rockwell

Dans l'essai de dureté selon Rockwell, la dureté n'est pas définie par le quotient d'une force par la surface de l'empreinte comme c'est le cas avec les procédés Brinell et Vickers, mais est déterminée par la profondeur de l'empreinte. Celle-ci, ainsi que la dureté elle-même, sont lues sur un cadran. Le procédé est entièrement automatisable [2].

Dans les essais de dureté Rockwell, le pénétrateur est soit un cône en diamant pointu d'angle au sommet 120° et à pointe arrondie sphérique (rayon 0.2mm), soit une bille en acier de diamètre 1.587mm ou 3.175mm.

La pénétration s'effectue en deux temps à la surface lisse de la pièce. Une charge initiale F_0 et d'abord appliquée ; cette charge est de 30 N pour les duretés superficielles, et de 100 N pour des échantillons massifs. Puis, la charge est augmentée progressivement jusqu'à la charge d'essai $F = F_0 + F_1$, elle est maintenue constante durant 4 ± 2 s. Puis une décharge s'effectue jusqu'à la charge initial F_0 . Après enlèvement de la surcharge, le dispositif mesure automatiquement l'accroissement rémanent de la profondeur de l'empreinte, e, correspondant à la déformation plastique.

Mesure de la dureté d'un métal selon l'enfoncement d'une bille d'acier, appelé dureté Rockwell B (**HRB**) ou d'un cône de diamant de 120° , dureté Rockwell C (**HRC**).

L'essai consiste à appliquer une précharge $F_0=100$ N sur le pénétrateur qui s'enfonce d'une profondeur e_0 . On applique une force supplémentaire F_1 , pendant 3 à 8 s, le cône

s'enfonce d'une profondeur e_1 . On supprime la force F_1 , le cône reste enfoncé d'une profondeur e_2 . La profondeur rémanente ($e_2 - e_0$) permet le calcul de la dureté selon la formule :

Les indices Rockwell peuvent se lire directement sur un cadran gradué.

ROCKWELL C

$$HRC = 500(100 - (e_2 - e_0)) \quad (\text{II.24})$$

Le pénétrateur est un cône de diamant de 120° et d'extrémité sphérique ($\varnothing 0,2$ mm).

La charge F_0 est de 1400 N (150 kgf).

ROCKWELL B

$$HRB = 500(130 - (e_2 - e_0)) \quad (\text{II.25})$$

La charge F_1 est de 900 N (100 kgf).

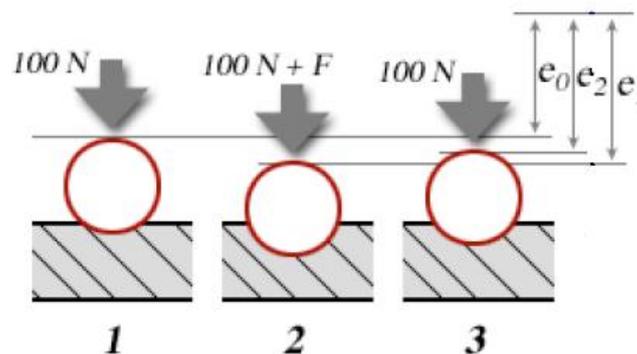


Figure.II.6 : schéma démonstratif de l'essai de Rockwell.

La combinaison de divers pénétrateurs et de diverses charges permet d'avoir un assez grand nombre d'échelles Rockwell. Elles figurent dans le tableau suivant :

Échelle	Désignation	Pénétrateur	F_0 (N)	F_1 (N)	F (N)	Gamme	Application
A	HRA	Cône diamant	98,07	490,3	588,4	20 à 88 HRA	Carbure, acier et en épaisseur mince
B	HRB	Bille 1,5875 mm	98,07	882,6	980,7	20 à 100 HRB	Alliage de cuivre, acier doux, alliage d'aluminium Matériaux ayant une résistance à la rupture comprise entre 340 et 1000 MPa

C	HRC	Cône diamant	98.07	1373	1471	20 à 70 HRC	Acier, fonte, titane Matériau ayant une dureté résistance à la rupture supérieure à 1000 MPa
D	HRD	Cône diamant	98.07	882,6	980,7	40 à 77 HRD	
E	HRE	Bille 3,175 mm	98.07	882,6	980,7	70 à 100 HRE	Fonte, alliage d'aluminium et de fonte
F	HRF	Bille 1,5875 mm	98.07	490,3	588,4	60 à 100 HRF	Alliage de cuivre recuit, fine tôle de métal.
G	HRG	Bille 1,5875 mm	98.07	1373	1471	30 à 44 HRG	Cupro-nickel, alliage cuivre-nickel-zinc
H	HRH	Bille 3,175 mm	98.07	490,3	588,4	80 à 100 HRH	
K	HRK	Bille 3,175 mm	98.07	1373	1471	40 à 100 HRK	

Tableau.II.2: Dureté de Rockwell et leurs différentes échelles.

La valeur de dureté de Rockwell ainsi obtenue est désignée par le symbole HR suivi par la lettre correspondant à l'échelle de mesure utilisée. Ex : 59 HRC.

Le domaine d'application de la mesure de dureté Rockwell est essentiellement celui des mesures rapides de dureté pour les matériaux de dureté comprise entre 20 et 70 HRC. Pour les matériaux plus mous, l'échelle HRB doit être utilisée ou le cône est remplacé par une bille en acier de diamètre 1,587mm. Pour Les matériaux de dureté supérieure à 65 HRC (dureté d'un acier trempé ou de la martensite), le procédé devient imprécis.

Les domaines d'application de la mesure de dureté Rockwell et la même que la dureté Vickers sauf que la dureté dans la couche superficielle durcie ni mesurable que par le procédé HRC que si son épaisseur est supérieur à 0.7mm.

II.4.2.2. La Microdureté

Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté précédemment décrits des essais de microdureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelquefois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés en principe à définir les propriétés à l'intérieur des grains, soit de ses divers constituants. Alors que les essais de dureté procurent une valeur moyenne des propriétés d'une zone de métal assez

importante, les essais de microdureté permettent de déterminer des caractéristiques locales ce même essai correspondante est de l'ordre de quelque micromètres (μm).

Les mesures de microdureté sont utilisées pour mesurer les duretés des différentes phases d'un matériau polyphasé. Pour que la valeur de chaque phase soit valable, la taille de l'empreinte ne doit pas dépasser de l'ordre de 1/7 de la taille du constituant. Elles sont également parfois utilisées pour mesurer la ténacité d'un matériau fragile.

La microdureté représente l'un des essais mécaniques non destructifs prévus pour déterminer les caractéristiques des métaux et alliages. Les résultats obtenus par cet essai ont une relation directe avec la structure du matériau et permettent de prévoir son comportement dans les conditions réelles d'utilisation. Le microduremètre permet une étude très localisée de la surface des matériaux. Le pénétrateur est généralement de type Vickers ou Brinell [2].

Les mesures de microdureté doivent être faites, en respectant des conditions concernant :

- La vitesse de mise en charge.
- La charge appliquée.
- Le mode de polissage de la surface.

La profondeur (épaisseur) de la couche superficielle qui déterminée par l'équation connue.

$$a = \sqrt{\frac{F}{\sigma}} \quad (\text{II.26})$$

D'où :

F : La force de l'impact (N).

σ : La limite élastique du matériau. (daN/mm^2).

a : Épaisseur de la couche superficielle (mm).

Le nombre de coup pour la formation de la couche superficielle :

$$N_n = \frac{1,27 \cdot d_{ct} \cdot K \cdot K_{rf}}{d_e} \quad (\text{II.27})$$

$$d_e = \frac{a}{1,5} = \sqrt{\frac{F}{\frac{2 \cdot \sigma_s}{1,5}}} \quad (\text{II.28})$$

F : force de l'impact (N)

σ_s : La limite d'élasticité des matériaux des pièces à traiter. (Mpa)

K : coefficient de régénération (récupération).

d_e : Diamètre de l'empreinte (mm)

N_n : Le nombre d'interaction

Nous obtiendrons après les changements :

$$N_n = \frac{1,9 \cdot d_{ct} \cdot K \cdot K_{rf}}{\sqrt{\frac{F}{2 \cdot \sigma_s}}} \quad (\text{II.29})$$

Temps nécessaire pour le traitement de toute la surface, est déterminé par le nombre des empreintes :

$$T = \frac{N_n}{N_e} \quad N_e = N_c \cdot K_N = n_K \cdot K_N$$

$$T = \frac{1,27 \cdot d_{ct} \cdot K \cdot K_{rf} \cdot K_{pAV}}{\sqrt{\frac{F}{2 \cdot \sigma_s}} \cdot n_K \cdot K_N} \quad (\text{min}) \quad (\text{II.30})$$

Où :

N_e : Nombre efficace de micro coups.

n_K : La fréquence d'oscillation par minute.

K_N : Coefficient, qui prend en considération le nombre de micro coup.

N_p : Le nombre de micro coup.

K : Coefficient de régénération (récupération).

d_{ct} : Diamètre de particule dans le milieu actif (mm).

I.4.3. Contraintes résiduelles

Tous les traitements mécaniques de finition (rectification fine, polissage au carborundum, à l'alumine, au diamant, tribofinition, etc.) entraînent obligatoirement une déformation plastique sans échauffement notable des couches en proche surface de la pièce.

Des contraintes résiduelles de compression sont ainsi engendrées mais sur une très faible profondeur de l'ordre de quelques dizaines de micromètres.

Les contraintes résiduelles σ_R sont des contraintes multiaxiales statiques auto équilibrées existant dans un système isolé de température uniforme et en l'absence de tout chargement extérieur.

Les déformations à l'origine des contraintes résiduelles peuvent intéresser des domaines de taille macroscopique et microscopique. Selon l'échelle considérée, il est classique de distinguer trois ordres de contraintes (figure III.7).

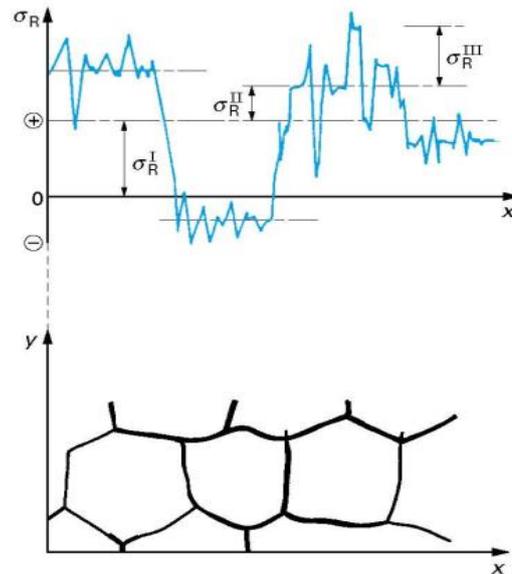


Figure.II.7: Définition schématique des contraintes résiduelles des 1ers, 2 e et 3 e ordres pour un matériau monophasé.

Les niveaux des contraintes

Ces contraintes existent à différents niveaux. On en distingue en général trois qui dépendent de l'échelle à laquelle on les observe :

1. Les contraintes résiduelles du premier ordre ou d'ordre (1) : (σ_R^I) sont homogènes, c'est-à-dire sont constantes en intensité et en direction, dans des domaines relativement importants s'étendant sur plusieurs grains dans le cas des matériaux monophasés. Les forces résultant des contraintes du premier ordre sont en équilibre dans chaque section de la pièce et les moments liés à ces forces nuls par rapport à tout axe. Les contraintes résiduelles du premier ordre sont également appelées contraintes résiduelles macroscopiques.

Il est important de noter que toute modification dans l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du premier ordre, due par exemple à un enlèvement de matière dissymétrique, se traduit par des variations dimensionnelles macroscopiques à l'échelle de la pièce.

2. Les contraintes résiduelles du deuxième ordre ou d'ordre (2) : (σ_R^{II}) sont homogènes dans des domaines correspondant à un grain ou à une portion de grain pour des matériaux monophasés. Elles proviennent dans ce cas de la différence d'orientation cristalline entre grains voisins. Les forces résultant des contraintes du second ordre et les moments associés s'équilibrent sur un nombre suffisant de grains. Les contraintes résiduelles du deuxième ordre sont parfois. Appelées contraintes résiduelles microscopiques homogènes.

Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du second ordre peut se traduire par des variations dimensionnelles macroscopiques à l'échelle de la pièce.

3. **Les contraintes résiduelles du troisième ordre ou d'ordre (3) : (σ_R^{III})** sont hétérogènes même dans des zones s'étendant sur quelques distances interatomiques. Elles sont associées en majorité aux déformations existant au voisinage des défauts cristallins. Les forces résultant des contraintes du troisième ordre et les moments associés s'équilibrent dans des zones représentant des portions très réduites d'un grain. Les contraintes résiduelles du troisième ordre sont parfois appelées contraintes résiduelles microscopiques hétérogènes.

Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du troisième ordre ne se traduit par aucune variation dimensionnelle macroscopique.

Les traitements de surfaces mécaniques, modifient l'état de contraintes résiduelles initialement existantes dans un matériau, ils modifient donc les propriétés mécaniques du matériau (tenue en fatigue, corrosion, résistance au frottement...).

Les traitements superficiels de durcissement ou de précontrainte ont pour but principal l'introduction d'un champ de contraintes résiduelles afin d'améliorer essentiellement la tenue à la fatigue des pièces.

La distribution des contraintes résiduelles dépend des conditions de réalisation du traitement et de l'état initial des contraintes.

I.4.4. Structure et Microstructure

Structure

L'étude métallographique est un moyen de contrôle essentiel de la structure micrographique des matériaux métalliques.

Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques.

Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées. Mise au point, utilisation, détérioration par corrosion, fatigue, rupture, ... etc.

Grâce à de nombreux microscopes optiques et cameras vidéos, il est possible de mener des études microscopiques ou macroscopiques précises et de visualiser tous types de surfaces avec un grossissement pouvant aller jusqu'à 1000 fois. On peut ainsi faire de nombreuses

observations, et grâce à une bonne connaissance de la physique des solides et des diagrammes de phases des matériaux, une analyse précise peut être menée.

Microstructure des aciers

- **Diagramme d'équilibre fer-carbone**

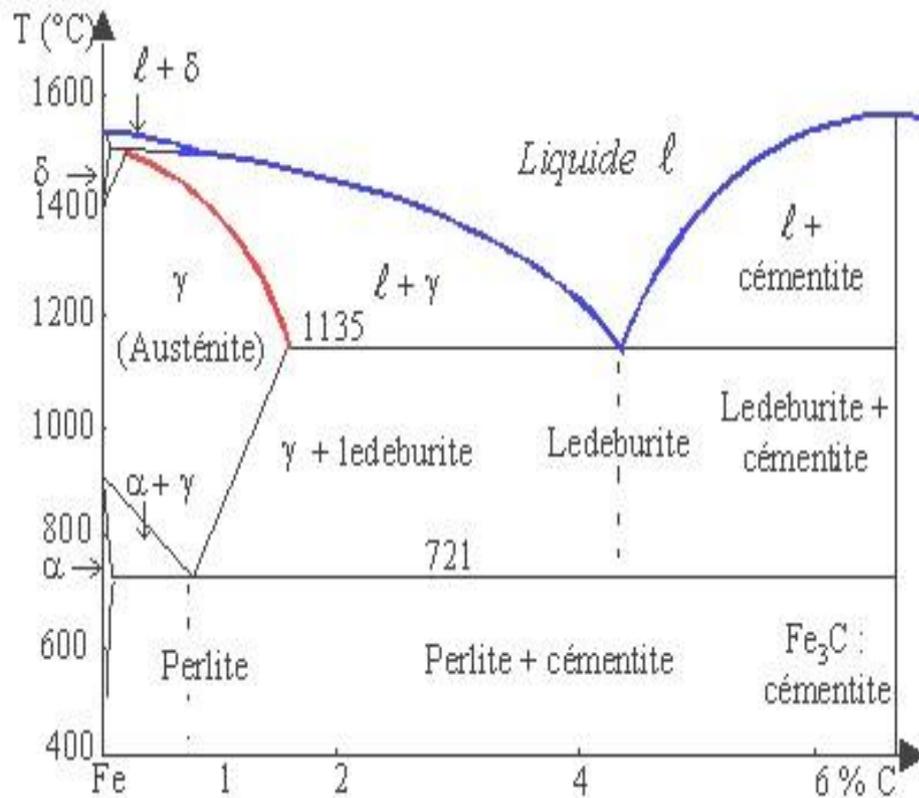


Figure.II.8 : Diagramme d'équilibre Fer-Carbonate.

Le diagramme d'équilibre des phases est un outil graphique très important pour l'étude des aciers et des fontes. Il permet de visualiser la forme d'acier ou de la fonte que l'on a selon la température et la teneur en carbone. Il tient compte des états de phase lorsque celles-ci sont stables. Cela signifie qu'à chaque niveau de température, on présume qu'un temps suffisamment long s'est écoulé pour que la transformation liquide-solide soit terminée.

Pour les aciers, le point d'importance sur le diagramme Fe-C est le point eutectoïde. Sa « température eutectoïde » est de 723 °C et sa « composition eutectoïde » est de 0,8% de carbone. Au point eutectoïde, l'austénite se transforme en deux nouvelles phases solides : la ferrite et la cémentite.

- **Le Fer :**

Le fer présente trois variétés allotropiques dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

a) Fer α :

- Domaine d'existence : de la température ambiante jusqu'à 906°C.
- Structure : réseau cubique centré.

b) **Fer γ** : si la température du fer s'élève à 906°C puis reste constante pendant un certain temps, bien que l'on continue à chauffer, alors le métal est le siège d'une transformation isotherme qui consiste à un changement de la place des ions. Le fer α s'est transformé en fer γ .

- Domaine d'existence : 906°C à 1528°C.
- Structure : réseau cubique à faces centrées.

c) **Fer δ** : à 1401°C, une nouvelle transformation se produit ; le fer reprend une structure centrée.

- Domaine d'existence : 1528°C à 1401°C.
- Réseau cubique centré.

- **Ferrite :**

La ferrite est une solution solide de carbone dans le fer α . Le terme ferrite désigne en effet l'acier à très faible teneur en carbone. Toutefois, comme son champ d'existence dans le diagramme de phase fer-carbone s'élargit très peu vers le carbone, le terme ferrite est souvent utilisé même pour indiquer le fer α lui-même.

Le fer α dissout assez mal le carbone : pour un acier fer-carbone, le champ d'existence de la ferrite s'étend jusqu'à 0,035 % de carbone en masse, à 723 °C.

- **Cémentite :**

La cémentite est un carbure de fer de formule chimique Fe_3C . À l'état pur, ce composé fait partie de la famille des céramiques. C'est une phase qui se forme dans les aciers et les fontes, et a une part importante dans les propriétés physiques de ces alliages.

La cémentite est un composé chimiquement dont la formule est Fe_3C . Des éléments tels que le manganèse ou le chrome peuvent se substituer partiellement au fer. Elle contient 6,67 % massique de carbone. C'est un composé très dur (dureté Vickers HV = 700 à 800) mais très fragile ($R_m = 700\text{MPa}$). Sa température de fusion est d'environ 1 500 K (1 216 °C).

- **Austénite :**

L'austénite est une solution solide de carbone dans le fer γ , qui est stable entre 911°C et 1392°C. Certains éléments (manganèse, nickel, azote par exemple) augmentent la plage de stabilité de l'austénite; ils sont dits « gamma-gènes ». Avec un dosage suffisant, ils

permettent, grâce à une trempe, d'obtenir de l'austénite à température ambiante à l'état métastable. C'est le cas des aciers dits austénitiques. La grande majorité des aciers inoxydables est austénitique, car ils combinent de bonnes résistances à la corrosion avec des propriétés mécaniques plus élevées que l'acier ferritique.

Perlite :

La perlite est un constituant biphasé de l'acier et de la fonte ; c'est un eutectoïde dont la température de transformation est de 727 °C. C'est un agrégat formé de 87,6 % de ferrite et 12,4 % de cémentite. La composition de la perlite est de 0,85 % de carbone.

Sa structure est généralement formée de lamelles alternées de cémentite (Fe_3C) et de ferrite.

La germination se fait aux joints de grain de la phase mère austénitique. La croissance des lamelles (ferrite, cémentite) est parallèle. Suivant la vitesse de refroidissement, on parle de perlite fine (vitesse élevée) ou de perlite grossière (vitesse lente).

Les propriétés mécaniques dépendent de la finesse (distance entre lamelles).

La dureté de la perlite est d'environ 220 HV, nettement supérieure à celle de la ferrite (80 HV).

Tableau récapitulatif :

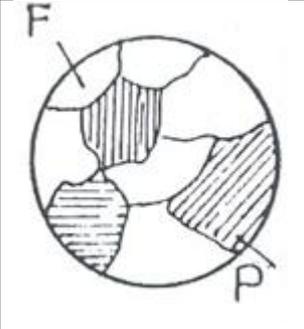
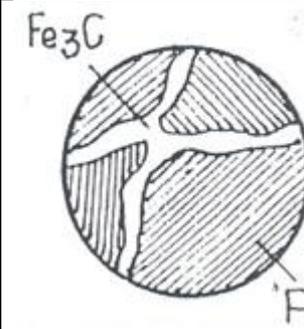
Nature de l'acier	Hypoeutectoides	eutectoïde	hypereutectoides
Constituants	Ferrite + Perlite (F+P)	Perlite (P)	Perlite + Cémentite (P+ Fe_3C)
Phases	F+ Fe_3C	F+ Fe_3C	F+ Fe_3C
% de Carbone	0.008	0.85	2.11
Microstructures			

Tableau.II.3: Représentant les phases, les constituants et la microstructure de l'acier.

Chapitre III :

Equipements

de la vibro-

abrasion

III.1.INTRODUCTION

Il existe plusieurs types des vibrateurs qui se diffèrent par la forme, volume et par la caractéristique du vibreur et chaque 'un il utilisée pour une application ou forme de pièce désigne et les modèle des vibrateurs les plus reconnaître sont :

1. Les vibrateurs circulaires.
2. Les machines à force centrifuge.
3. Les Vibreur en continu (circulaire spirale et linéaire)
4. Les machines multibroches type smuritropie.

III.2. TYPES DES VIBRATEURS

III.2.1. Vibrateurs circulaires.

Sont les plus utilisés en Tribofinition. Ils peuvent être utilisés dans une large gamme d'applications. Le succès des applications en vibro-abrasion résulte d'une combinaison des procédés technologiques créatifs et d'ingénieries innovantes. Cette approche est le reflet de toute la gamme des vibrateurs circulaires et leurs caractéristiques performantes.

Ils associent la grande qualité des équipements et une grande fiabilité avec un design extrêmement fonctionnel. C'est une gamme de machines en général à tamisage intégré extrêmement polyvalentes pour traiter une multitude de pièce.

Le traitement s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moto-vibreur spécial monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs), auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique, sont brassés dans la cuve (figure III.1).

Les vibrateurs circulaires sont souvent équipés de tamis de séparation et de trappe pneumatique pour assurer la séparation des pièces et médias.

Tandis que les pièces sont transférées via le tamis de séparation à l'extérieur du vibreur pour être ensuite, par exemple, séchées dans un sécheur circulaire, les médias restants retournent dans la cuve de traitement Les vibrateurs circulaires peuvent intégrer des installations automatisées grâce à l'adaptation de matériels périphériques.

Les domaines d'applications des vibrateurs circulaires sont extrêmement flexibles et évolutifs et permettent plusieurs types de traitement en Tribofinition : ébavurage, ébarbage, rayonnage,

nettoyage, décalaminage et polissage de pièces provenant d'emboutissage, fonderie, formage, forge, usinage. Plusieurs matières peuvent être traitées : métal, plastique, céramique, caoutchouc, bois, pierre et verre.

D'excellents résultats peuvent être obtenus, tant sur les petites pièces que sur celles plus grandes et plus lourdes.

De par la grande efficacité et flexibilité des vibrateurs circulaires, ils offrent une multitude de solutions en finition.

- 1 : Suspension de la cuve de traitement
- 2 : Vibreur (les balourds)
- 3 : Porte de vidage des abrasifs
- 4 : Cuve de traitement
- 5 : amortisseur
- 6 : Tamis de séparation intégré
- 7 : moteur
- 8 : Revêtement
- 9 : pompe
- 10 : Porte de vidage

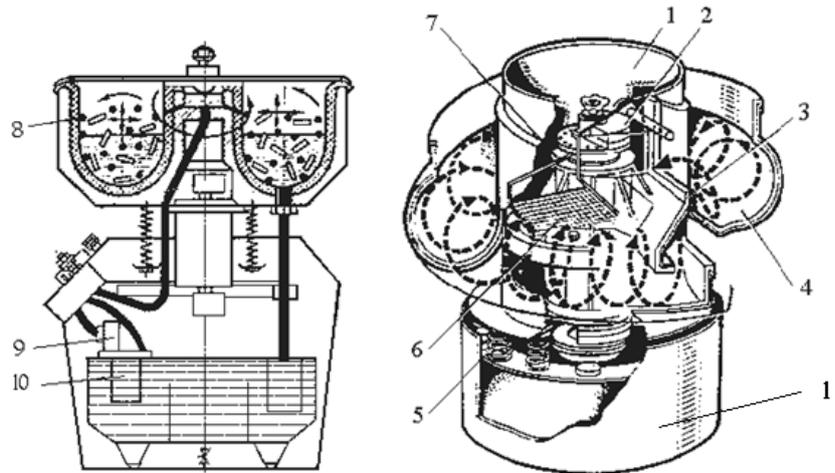


Figure.III.1 : Schéma d'un vibreur circulaire.

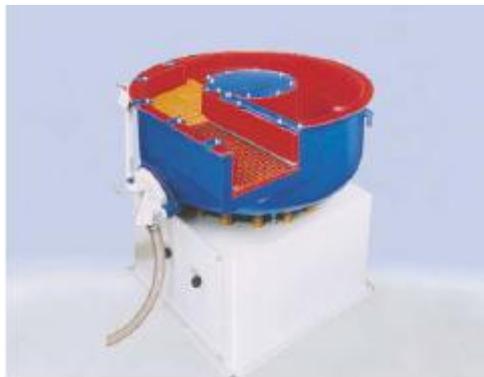


Figure.III.2 : Vibreur circulaire.

Il y a plusieurs types de vibreur circulaire qui se diffèrent par la forme et dimension de la cuve ou par la caractéristique du vibreur [4]:

III.2.1.1. Vibrateurs circulaires «EC» :

De par la conception spéciale de la cuve de traitement, les vibrateurs circulaires type EC sont les plus couramment proposés.

Le fond incliné de la cuve des machines EC permet le traitement et la séparation des petites et grandes pièces.

Les vibrateurs EC sont idéalement adaptés pour la finition de pièces fragiles.

III.2.1.2. Vibrateurs circulaires « Euro » :

Les vibrateurs circulaires Euro sont idéals pour les traitements de finition automatiques.

Ils sont caractérisés par une cuve torique spiralée avec trappe de séparation automatique intégrée.

III.2.1.3. Vibrateurs circulaires «A» :

Les vibrateurs circulaires type A avec séparateur magnétique ont été spécialement conçus pour le traitement de pièces pouvant être séparées magnétiquement.

Avec une cuve de travail renforcée spéciales pour faciliter la séparation magnétique.

III.2.1.4. Vibrateurs circulaires «R» :

Machines toriques à fond plat destinées au traitement de pièces lourdes et/ou fragiles.

Le fond plat assure une parfaite immersion des pièces dans la charge d'abrasifs. Pour les pièces devant être traitées séparément, il est possible d'adapter des cloisons mobiles. Les pièces traitées sont généralement retirées manuellement. Une porte permet le vidage complet de la cuve de travail et une séparation externe des pièces et médias.

III.2.1.5. Vibrateurs circulaires à grand rayon :

Le plus grand avantage des vibrateurs circulaires à grands rayons est la possibilité de pouvoir utilisés dans un système de production en continu ou par charge. Leur haut degré de flexibilité offre des avantages significatifs pour les plannings de production, favorisant la réduction des temps de traitement avec un coût plus économique.

Par ailleurs, ils nécessitent un faible encombrement au sol.



Figure.III.3 : Vibrateur circulaire à grand rayon.

Il est utilisé dans plusieurs domaines d'application : ébavurage, rayonnage, amélioration de surface, polissage et brillantage de pièces découpées, moulées, forgées ou usinées.

La cuve comporte une double paroi toroïdale de largeur et profondeur égales.

Ils garantissent un excellent mouvement de rotation et une parfaite immersion des pièces dans la charge de médias.

Avec un diamètre de la cuve entre 2,075 mm à 3,050 mm et un volume supérieur à 500 dm².

Elle a un fonctionnement autonome ou intégré dans une ligne automatisée avec périphériques de chargement et déchargement des pièces.

Les machines circulaires à grand rayon offrent des solutions supérieures pour la finition de pièces.

III.2.1.6. Vibrateurs circulaire hélicoïdale :

Le traitement est accompli dans une cuve sous forme hélicoïdale (figure III. 4) montée sur des ressorts hélicoïdaux, à l'aide d'une commande de mis en marche et d'arrêt.

Un moteur électrique monté en bas dans la base de la machine fournit de l'énergie au vibreur qui se règle à l'aide des balourds qui sont reliés au moteur, où les pièces traitées et médias sans contact et couvert par une couverture.

Ce type de machine est utilisé dans les machines à installation en continu.

- 1 : La commande de la machine
- 2 : cuve
- 3 : Couverture
- 4 : Les balourds (les déséquilibres)
- 5 : Vibreur
- 6 : pont
- 7 : ressorts hélicoïdaux
- 8 : Base
- 9 : Réservoir
- 10 : Moteur électrique

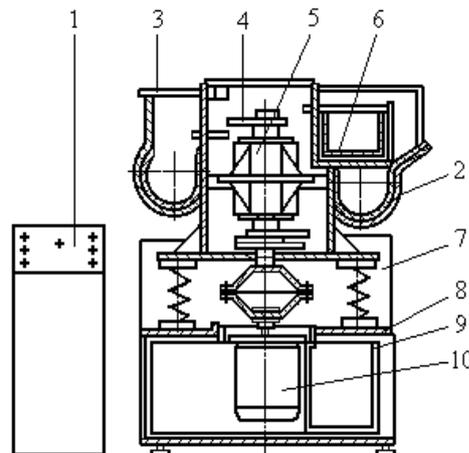


Figure.III.4 : Schéma machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale.

III.2.1.7. Vibrateur circulaire spirale type Rotomatic :

La machine Rotomatic est particulièrement adaptée pour l'ébavurage, le décapage, le nettoyage, le rayonnage et d'autres applications. Toutes les Rotomatic sont équipées du système d'entraînement direct à haute énergie. Le nouveau concept type Rotomatic est caractérisé par une cuve multi-spires d'une longueur totale allant de 18 m jusqu'à 30 m (la largeur du bol de travail est de 200 mm), avec réglage des temps de traitement.

Dans ce vibrateur la zone de séparation est directement intégrée dans le bol (cuve), ce qui économise l'espace et de l'argent.



Figure.III.5 : Vibrateur circulaire spiral type Rotomatic.

III.2. 2. Machines à force centrifuge :

C'est une méthode de traitement des pièces dans flux toroïdal-hélice de l'environnement de fabrication, cette méthode existe dans différents pays mais dans chaque pays le nom est ce diffère. Ainsi, en Pologne - il est appelé cascade de rotation, Allemagne - rotor de finition, et dans notre pays - une pompe centrifuge rotatif.

Cette machine est utilisée Pour des performances et une amélioration de l'efficacité décuplée. On les utilise Principalement pour l'élimination de grosses bavures et rayonnage de pièces en grande série. Des technologies spécifiques permettent aussi le traitement de pièces petites et fragiles [4].

Les machines à force centrifuge permettent d'atteindre des gains de temps dans un ratio de 3 à 10 par rapport à une application similaire en machine vibrante.

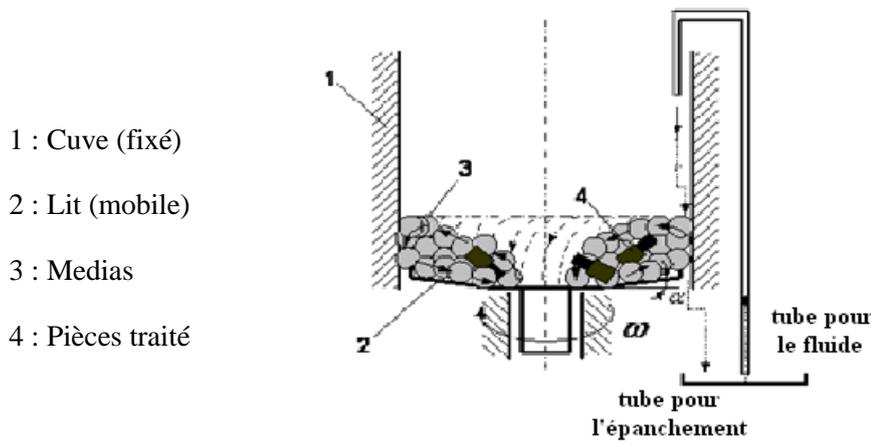


Figure.III.6 : Schéma d'une machine à force centrifuge.



Figure.III.7 : Machine à force centrifuge.

L'essence de la méthode de traitement rotatif centrifuge est que la charge granulaire (media) et les pièces (Figure. III.6) sont chargés dans la chambre de travail et sont en mouvement de rotation autour d'un axe vertical afin que le chargement de masse entière (pièces + medias) prenne la forme d'un tore.

La chambre de travail est un filetage toroïdal, composé d'une coque fixé en position verticale cylindrique et un lit pour la rotation. Les surfaces du lit et la partie fixe de la chambre de travail sont couvertes d'un matériel résistant à l'usure Pour réduire l'usure sur cette surface. Et parmi les matériaux plus couramment utilisé dans le revêtement du lit et la cuve sont le caoutchouc ou enduit de polyuréthane.

La rotation du fond est généralement fournie par un moteur électrique réversible ou moteur hydraulique.

Comme dans les autres gammes de vibro-abrasion en peut utiliser différents matériaux granulaires (medias): les particules abrasives de différentes formes, des billes de porcelaine, des billes d'acier poli,... etc.

Les principaux avantages du vibreur à force centrifuge sont les suivants:

- Il a une haute intensité de traitement.
- Simple d'utilisation dans les équipements de construction.
- Usinage simultané "en aval" en grande quantité.
- Gain de temps par rapport des autres types de vibreurs.

La rugosité de la surface usinée avec le traitement d'un vibreur à force centrifuge dépend des caractéristiques suivant :

- Les modes de traitement.
- Le volume de chargement de la chambre de travail.
- Les propriétés physiques et mécaniques du matériau.
- Rugosité de la surface initiale et d'autres facteurs.

III.2.3. Vibreurs en continu (circulaire, spirale ou linéaire) :

Les installations en continu prennent une importance de plus en plus grande dans le domaine de la Tribofinition grâce à toutes les innovations réalisées, elles sont l'aboutissement de la permanente volonté de perfectionnement dans le développement car le traitement en grand série de pièces et un grand défi pour tous les concepteurs.

L'avantage de ce traitement est : pas de mélange de lots de pièces, pas de coincement d'abrasifs dans les pièces. Ce qui nécessite un système de déclassement fiable et efficace des abrasifs usés, c'est pour cette raison quand utilise les vibreurs continus.

Ce traitement est utilisé pour une meilleure productivité grâce à une alimentation permanente en pièces, permet une meilleure automatisation des processus et diminue très fortement les frais liés à la manutention des pièces.

Pour le fonctionnement des installations en continue les pièces sont brassées dans une cuve (circulaire ou linéaire) remplie de médias de polissage et d'ébavurage durant un temps donné pour obtenir le traitement souhaité. Les paramètres tels que la durée du traitement et la finition demandée (polissage, ébavurage, brillantage) peuvent être ajustent par modification de l'inclinaison de la cuve de traitement, réglage de la force centrifuge ou de la vitesse de traitement. En fin de traitement, une grande surface de tamisage assure la séparation des pièces et des médias. Dans le même temps, les pièces peuvent être rincées puis transférées à l'étape de traitements suivants. Les abrasifs, quant à eux, sont transférés par convoyeur puis ramenés à l'intérieur de la cuve et les pièces sont sèches dans une machine de séchage.

Les installations en continu sont caractérisées par le chargement progressif et continu des pièces. Les temps de chargement et d'arrêt peuvent varier en fonction de la dimension des pièces et de leur fragilité. De ce fait, cette technique est parfaitement intégrable dans les procédés automatisés.

❖ Les Vibrateurs linéaire :

Le domaine d'application des vibrateurs linéaires sont spécialement adaptés pour tous les types de traitement de Tribofinition, tels qu'ébavurage, décapage, rayonnage, polissage et brillantage à la bille de pièces moulées et forgées. Ils permettent le traitement de pièces individuelles séparées par des cloisons amovibles ou le traitement de plusieurs pièces fixées sur des montages.

En fonction de leurs dimensions et de leur type, les vibrateurs linéaires sont entraînés par différentes motorisations. Le traitement s'effectue dans une cuve (sous forme U) de traitement montée sur des ressorts hélicoïdaux. Un vibreur monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire à la vibration. Les pièces et médias (abrasifs), auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique (savon) sont brassés dans la cuve de traitement dans une action linéaire rotative (la figure.III.18).

Il est également possible d'effectuer un traitement pièce contre pièce, sans média.

L'effluent peut être recyclé via le système de centrifugation, ce qui permet la réduction de consommation en eau et additif.

- 1 : Bâti (base) de la machine
- 2 : Cuve de traitement
- 3 : Environnement de travail (pièce + media)
- 4 : Plaque (revêtement)
- 5 : Bras support
- 6 : Couvercle principale de la cuve
- 7 : Vibreur
- 8 : Couvercle secondaire de trappe pour un dispositif de fixation des pièces
- 9 : Ressorts hélicoïdaux

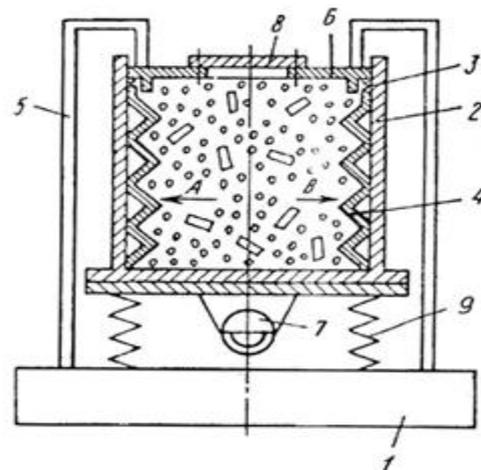


Figure.III.8 : Schéma d'un vibreur linéaire.



Figure.III.9 : Deux types des vibrateurs linéaires.

Il y a plusieurs types de vibreur linéaire qui se diffère par ca motorisation diverses par exemple :

❖ a) **Les vibrateurs linéaires type TE**

Moteur à entrainement direct qui est fixe directement sous la cuve de traitement.

❖ b) **Les vibrateurs linéaires type TS**

Deux groupes balourdés montés sur les flancs latéraux (gauche et droite) de la cuve de traitement.

III.2.4. Machines multibroches type Smuritropie

Les machines de vibration multibroches ouvrent de nouvelles perspectives de traitement de pièces de grande valeur, mais jusqu'à maintenant, seule la qualité d'un polissage manuel était acceptable.

L'efficacité des machines multibroches, grâce à leur motorisation spéciale, permet de réduire les durées de traitement d'un facteur 50 par rapport aux machines vibrantes et d'un facteur 10 par rapport aux machines à force centrifuge.

- 1 : Cuve (fixe)
- 2 : Base de fixation
- 3 : Intermédiaire de la broche
- 4 : Broches (mobiles)
- 5 : Milieu actifs
- 6 : Pièces.

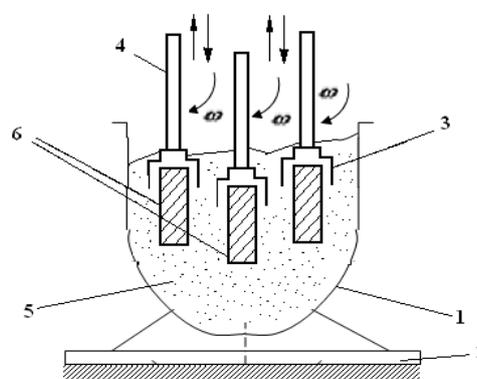


Figure.III.10 : Schéma d'une machine multibroche type Smuritropie.



Figure.III.11: Machines multibroche type Smuritropie.

Le coût d'exploitation des machines multibroches sont très importantes grâce à leur puissance, à la rapidité du traitement et à la faible consommation d'abrasifs. En effet, à la différence des autres machines de vibro-abrasion, la charge d'abrasifs est statique et seuls les éléments de cette charge en contact direct avec les pièces à traiter subissent une usure due au frottement. La proportion d'abrasifs travaillant réellement est donc beaucoup plus réduite que dans les autres machines de vibro-abrasion où la totalité de ces abrasifs est en mouvement et où la plupart s'usent entre eux.

Durant le traitement, les pièces, fixées par l'intermédiaire de broches fixes sur un anneau rotatif, sont immergées dans la charge abrasive statique. Dans certains cas, les pièces peuvent aussi être animées d'un mouvement satellitaire par mise en rotation des broches.

- Le choix des machines multibroches peut s'imposer dans les cas ci-après:
 - Leur traitement manuel demande une main d'œuvre longue et coûteuse.
 - Les pièces doivent être traitées de façon très régulière et reproductible.
 - Les pièces sont constituées d'alliages de grande dureté.
 - La morphologie des pièces est complexe et comporte de nombreuses arêtes.
 - Les pièces extrêmement fragiles ne doivent pas risquer de s'entrechoquer.
 - Les pièces doivent avoir un état de surface très fin.
- Les multibroches sont utilisées pour les pièces suivantes:
 - Hélices marines ou aéronautiques.
 - Poignées de porte (haut de gamme)
 - Aubes de turbine
 - Pignons et carters de boîtes de vitesse

- Pièces forgées (amélioration d'état de surface)
- Pièces de moteurs, pompes et vannes hydrauliques
- Pièces fragiles et de grande valeur
- Les avantages du système multibroches est :
 - Machines équipées en série de 12 broches porte pièces rotatives permettant de fixer une ou plusieurs pièces.
 - Vitesse variable en continu.
 - Possibilité d'inversion de sens de rotation de l'anneau et des broches.
 - Le mouvement satellitaire des broches peut être activé ou interrompu.
 - Les vitesses de rotation de l'anneau et des broches sont indépendantes.
 - Angle d'inclinaison des broches réglables.

Remarque : Il existe une machines mono-broches type Smuritropie qui consiste à un traitement pouvant aller d'un polissage agressif au Brillantage et il plus utilise pour les jantes des véhicule (il a le même mode d'utilisation que les machines multibroche sauf qu'il est équipé d'une seul broche).

III.3. MILIEUX ACTIFS (ABRASIFS)

III.3.1. Définition

Les abrasifs ou médias abrasifs ou milieu actif sont des ingrédients de la tribofinition qui son appelé des chips, ils ont existé plusieurs type à employer dans les machines vibrantes ; les abrasif (chips) sont déférents entre eux comme composition, degré d'abrasion, forme et dimensions. Ils sont souvent à base céramique, polyester, verre, plastique...etc.

Leur forme est très variable et comprend principalement des cylindres, des triangles, des billes, des cônes, des pyramides, des paraboloïdes, des étoiles, des flèches, des tétraèdres,... etc.

Ces médias abrasifs permettent de mécaniser des opérations d'ébavurage ou de polissage et d'apporter un traitement à la fois particulièrement uniforme et en particulier constant, même sur des séries de pièces particulièrement importantes [5].

Ils possèdent deux caractéristiques importantes :

- La dureté qui leur permet d'attaquer les matériaux plus tendre.
- La taille et la géométrie des grains qui génère l'état de surface final (la rugosité).

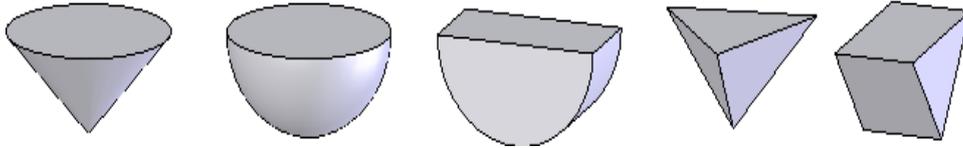


Figure.III.12: Géométrie de la particule abrasive.

Les abrasifs sont réalisés avec des matériaux particulièrement résistants à l'usure et sont choisis toujours en fonction du travail qu'ils doivent effectuer.

Ces médias abrasifs permettent de mécaniser des opérations d'ébavurage ou de polissage et d'apporter un traitement à la fois très uniforme et surtout constant, même sur des séries de pièces très importantes.

Pour le choix de la constitution des médias il est nécessaire de prendre en compte l'opération, à réaliser :

- Matériau en abrasif pour des opérations vibro-abrasif.
- Matériau non abrasif pour des opérations de finition.
- Les matériaux métallique (bille, rouleau,...) pour le durcissement superficiel, par exemple pour la réalisation des opérations grossiers « ébauche » (l'enlèvement des grosses bavures).

C'est quand on a besoin plus d'enlèvement de la matière on utilise des abrasives grossières hautes duretés avec grosse granulation (abrasif de grand taille et lourd) et aussi pour les opérations de nettoyage des pièces brute moulé. Pour les opérations de finition pour avoir un bon état de surface on utilise beaucoup plus les abrasifs à granulation fine moins agressif (abrasif de petit taille et léger).

La composition de l'abrasif (granulation) est déterminée par son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce, par exemple pour métaux et les alliages non ferreux on utilise des billes en verre (se chois a été fait par l'état de surface initial et celle quand veut obtenir)

Pour le durcissement superficiel, habituellement on prend les billes en acier traité de différent diamètre avec un rajout d'additif chimique.

La déformation de la surface sous l'action de la particule abrasive dépend en effet de plusieurs variables :

- La nature des matériaux antagonistes (abrasif/pièce).
- La forme, la taille et l'orientation de l'outil (abrasif).

- Les forces agissant sur l'outil (abrasif).
- Les trajectoires et vitesses imposées.

III.3.2. Les paramètres des abrasifs

- **La Composition** : La composition de l'abrasif détermine son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce.
- **La Forme** : La forme de la pièce à ébavurer détermine la forme de l'abrasif nécessaire. La parfaite adaptation entre l'abrasif et la pièce permet de s'assurer que toutes les surfaces sont traitées uniformément et que l'abrasif ne coince pas. La forme de l'abrasif influence également le pouvoir de coupe. Les formes angulaires et à arêtes vives sont plus agressives que les formes arrondies.
- **Les Dimensions** : La dimension et le poids sont des facteurs clés du pouvoir de coupe. Un abrasif de grande taille et lourd, de hautes duretés, procure un état de surface plus grossier ; on utilise quand on a besoin plus d'enlèvement de la matière et aussi pour les opérations de nettoyage des pièces brute moulé, un abrasif petit et léger est moins agressif et donc mieux adapté à des exigences de bon état de surface, c'est pour les opérations de finition.

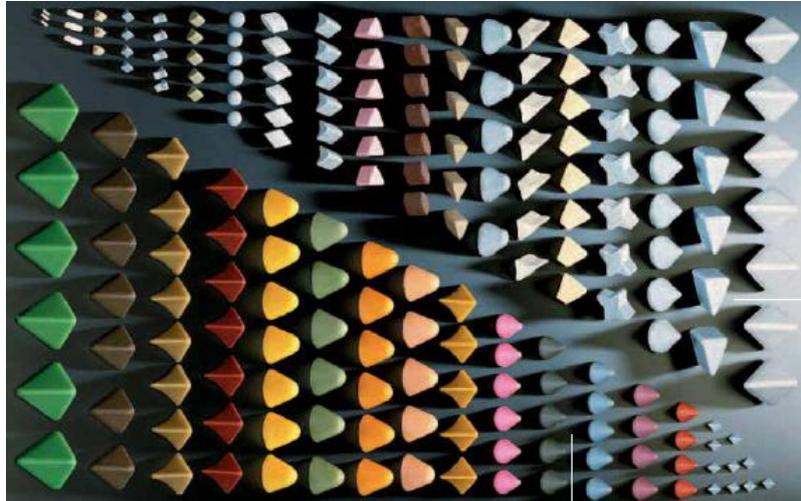


Figure.III.13 : Des abrasifs avec différents formes et dimensions.

Pour le choix de la taille des particules il est nécessaire de prendre en compte les dimensions de la pièce à traiter (forme, rainure, trou,...etc.), par exemple la taille des particules d'abrasif ne doit pas être supérieure à la dimension de trous ou bien les cavités d'une pièce qui sera traité car la parfaite adaptation entre l'abrasif et la pièce permet de s'assurer que toutes les surfaces sont traitées uniformément et que l'abrasif ne coince pas.

III.3.3. Qualité et Géométrie des médias (abrasifs)

Le type de finition demandé, la capacité de la machine et le poids des pièces à traiter sont des facteurs primordiaux dans le choix de la bonne qualité et des bonnes dimensions d'abrasifs. Différents qualités d'abrasifs plus ou moins mordants sont exigées en fonction des résultats souhaités :

N°	La composition du matériau	Domain d'utilisation
1	Granule d'abrasif	L'ébavurage, l'arrondissement des angles vifs, rectifications des surfaces
2	Bakélite	Nettoyage des déchets, l'ébavurage, l'arrondissement des angles vifs
3	Granule abrasif s forme cylindrique (rouleaux)	Décalaminage, l'arrondissement des angles vifs et rectifications
4	Les billes en porcelaine (Φ 6 et 10mm)	L'ébavurage léger, l'arrondissement des angles vifs, polissage
5	Les billes en verre (Φ 2-14mm)	Polissage des matériaux ferriaux et non ferriaux, rectifications des pièces en alliage à base de cuivre.
6	Granule abrasif en polymère	Le polissage, opération de finissage de surface
7	Les billes en acier traité	Polissage, durcissement superficiel, opération des stabilisations
8	Granule en résine	Nettoyage des pièces de la saleté

Tableau.III.1: Quelque exemple des particules utilisé pour les différentes opérations.

III.4. ADDITIFS CHIMIQUES

Ils sont la base parfaite de tous les procédés de Tribofinition. Ils combinent les procédés d'intégration écologiques (environnement chimique) avec les procédés technologiques de précision et de qualité.

Dans le processus de la technologie de vibration il est nécessaire pour avoir un traitement complet et celui-ci fonction en rajoutant des additifs chimique au traitement pièce avec abrasif [3].

Le choix de l'additif doit être fait en tenant compte des facteurs suivants :

- Le type de travail à effectuer (ébavurage, polissage, brillantage, effet mat, dégraissage, passivation...).
- Le type de matériel à traiter.
- Le type de chips (abrasif) à employer.
- Le type d'équipement utilisé.
- Les normes environnementales à respecter.

Il existe 3 types d'additif chimique de vibro-abrasion :

- Liquides.
- Poudres.
- Pâtes.

III.4.1. Additifs liquides

Les composés liquides constituent les bases de travail optimales des techniques modernes du traitement vibratoire. Grâce à leur grande capacité de nettoyage, ils gardent les pièces et les abrasifs propres et les préparent pour tout traitement de finition.

Il est le produit le plus utilisé dans le traitement de vibration car il est le plus approprié et le plus favorisé pour la rentabilité et la protection de l'environnement.

Le fluide dans le processus du traitement par vibro-abrasion accomplit l'état suivant :

- L'intensification du processus sur la surface à traiter et ce la suite à l'interaction chimique.
- Refroidissement des échantillons.
- Assurer la stabilité des outils coupants du milieu actif pour les protéger contre la saleté et la pollution.
- Prévention de l'endurance des pièces à surface plane.
- La protection de la surface superficielle de la corrosion.

Il existe trois types de fluides :

1. activateur chimique dans un milieu acide : il est destiné pour le nettoyage des pièces en acier, la destruction et l'enlèvement de la bavure et l'intensification du processus de traitement.

2. activateur chimique dans un milieu alcalin (basique) : il est destiné pour l'enlèvement de la bavure, et aussi pour le polissage.

3. activateur chimique dans un milieu neutre : il est destiné pour le nettoyage et le lavage et l'enlèvement des produits d'usure.

Les lubrifiants les plus utilisés est l'activateur chimique en milieu acide et basique, dans le but d'élargir et de renforcer leur action on rajoutant les éléments suivants : La soude, le détergent, ...etc. Pour le nettoyage on utilise anhydride chromique.

Le volume de remplissage de fluide utilisé varie entre 3 à 5% par rapport à la chambre de travail, pour la durée de traitement ne doit pas dépasser deux heures, dans le cas contraire le pourcentage de la saleté augmente et la concentration d'activation diminue.

Pour le traitement de longue durée on utilise des solutions chimiques à concentration moindre, ce qui préserve leur propriété physico-chimique.

Le débit de fluide varie de 2 - 10 (L/min), tous dépend de l'opération à réaliser, dépend du volume de la chambre de travail, et aussi de la rigidité des pièces à traiter.

La classification des fluides et leur propriété est divisée en trois groupes en dépendance de la valeur d'hydrogène :

- Neutre (PH=7).
- Acide (PH< 7).
- Basic (PH>7).

Le plus grand débit est utilisé pour un vibreur avec une grande capacité de la chambre de travail.

Dans le tableau ci-après on introduit la Composition de l'additif chimique liquide recommandé pour différentes opérations

N°	Composition des additifs chimiques	Symbole	Concentration (g/l)	L'utilisation
1	Silicate de sodium	[Na ₂ SiO ₃]	20 - 30	Protéger les détails de la corrosion, conservation de courte durée
2	Hydroxyde de sodium	[NaOH]	20	
3	Carbonate de soude	[Na ₂ CO ₃]	20	

4	Nitrate de sodium	[NaNO ₃]	20 - 30	Nettoyage, décalaminage
5	Hydrate d'oxyde de sodium	[Na ₂ O, H ₂ O]	15	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine,
6	Phosphate de sodium	[Na ₃ PO ₄]	20 - 30	
7	Soude à l'ammoniac	[NH ₃ , NaOH]	20 - 30	
8	Perchlorure de fer	[FeCl ₃]	2 - 10	Assure une couleur éclatante pour l'état de surface
9	polyacrylamides	$\left[\begin{array}{c} -CH_2 - CH - \\ \\ CONH_2 \end{array} \right]_n$	10	Assure la brillance du métal

Tableau.III.2: Composition de l'additif chimique liquide recommandé pour différentes opérations.

III.4.2. Additifs poudres

Les additifs peuvent être sous forme de poudre, ces composés en poudre remplissent leur fonction là où d'autres produits seuls ne suffisent pas :

- dégraissage massif.
- procédés spéciaux de décapage et de décalaminage.
- augmentation du pouvoir abrasif.
- nettoyage des abrasifs sont les principales fonctions de ce type de produit.

Il existe aussi des poudres très fines dont la taille est de l'ordre de la dizaine de nanomètres. Ces poudres permettent d'obtenir des résultats particulièrement intéressants lorsque l'on recherche un état de surface de très haute qualité et parmi si poudre en trouve :

N°	Composition des additifs chimiques	L'utilisation
1	poudre d'oxyde d'Aluminium	Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage doux, mais également pour des travaux de préparation au polissage
2	poudre d'oxyde d'Aluminium	Destinée à des travaux de polissage fin. Nécessite une première étape de préparation au polissage avec une poudre de type poudre d'oxyde d'Aluminium ou équivalent

3	poudre de carbure de silicium purifiée	<p>Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage puissant</p> <p>Il peut avoir pour inconvénient de ternir les surfaces (inox par exemple) et nécessiter un ébavurage complémentaire à la poudre d'oxyde d'Aluminium avant de passer au polissage</p>
----------	--	---

Tableau.III.3: L'additif poudre et différentes opérations.

III.4.3. Additifs pâtes

Les pâtes sont utilisées avec des médias en vibrateurs circulaires et machines à force centrifuge pour obtenir une finition lisse et très brillante sur des surfaces sensibles. Avec la pâte et les médias, et adapté à tous les problèmes spécifiques car elle peut être utilisée comme pâte de polissage ou d'ébavurage.

Cette même pâte s'accorde à la structure des surfaces et les affine de façon économique en respectant l'environnement.

Les produits en poudre sont l'évolution logique de nos pâtes déjà éprouvées.

Et on trouve plusieurs types de pâte qui se différencient avec le type de matériaux utilisés (Acier, Cuivre, Aluminium, Zinc.....) et le travail à faire (Ebarbage, Ebavurage, Rayonnage, Superfinition, Brillantage, Polissage....).

Et parmi les différences de type de pâte on trouve :

- Pâte de polissage.
- Pâte d'ébavurage universelle.
- Pâte à effet légèrement abrasif.
- Pâte de polissage avec effet de brillantage.
- Pâte de brillantage pour la finition de pièces pré-polies.
- Pâte légèrement abrasive ayant une bonne action de brillantage et de polissage.
- Pâte universelle pour polissage avec pouvoir abrasif réduit.
- Pâte de polissage avec bonne capacité de brillantage.
- Produit spécial pour métaux non ferreux et précieux.
- Pâte d'ébavurage avec pouvoir abrasif renforcé.
- Pâte d'ébavurage très et extrêmement mordante.

Chapitre IV :

Recherche

expérimentale

IV.1. DESCRIPTION DE LA METHODE EXPERIMENTALE

Dans cette partie on a traité des éprouvettes par la méthode de traitement par vibro-abrasion TMVA dans un vibreur circulaire RC 230.

Choix des paramètres du vibreur:

Amplitude : $A = 3\text{mm}$.

Fréquence : $f=50\text{ Hz}$.

Durée du traitement : $t= 140\text{mn}$.

Les essais expérimentaux ont été réalisés sur un vibreur circulaire (cité ci-dessous) dans le but d'améliorer la longévité des pièces mécaniques. J'ai choisi deux types de matériaux à savoir (acier doux A60 et aluminium Al 7020). Par la suite je vérifie les caractéristiques mécaniques et géométriques suivantes avant et après traitement (Poids, Dureté, Rugosité, Résistance à la traction, essais de fatigue et observation de la structure).

IV.2. EQUIPEMENTS DE TRAITEMENT PAR VIBRO-ABRASION

IV.2.1. Machine de vibro-abrasion et les caractéristiques techniques

Le traitement des échantillons par le procédé de vibro-abrasion, a été réalisé dans une usine privé (Acces Industrie, sise à El Alia- Alger), sur un vibreur circulaire de marque Renti CIRILLO, de type RC230.

Machine : RC 230

RC : Reni Cirillo (Le nom de laboratoire d'essais).

230 : Capacité de la machine (Volume) = 230 dm^3 .

Amplitude : 3mm .

Fréquence : 50 Hz .

Puissance du moteur : 1.5 kW .

Voltage de la machine : 380 V .

Le volume des pièces à traiter dans la chambre de travail= 100dm^3 .



Figure.IV.1 : Vibreur Circulaire RC230.

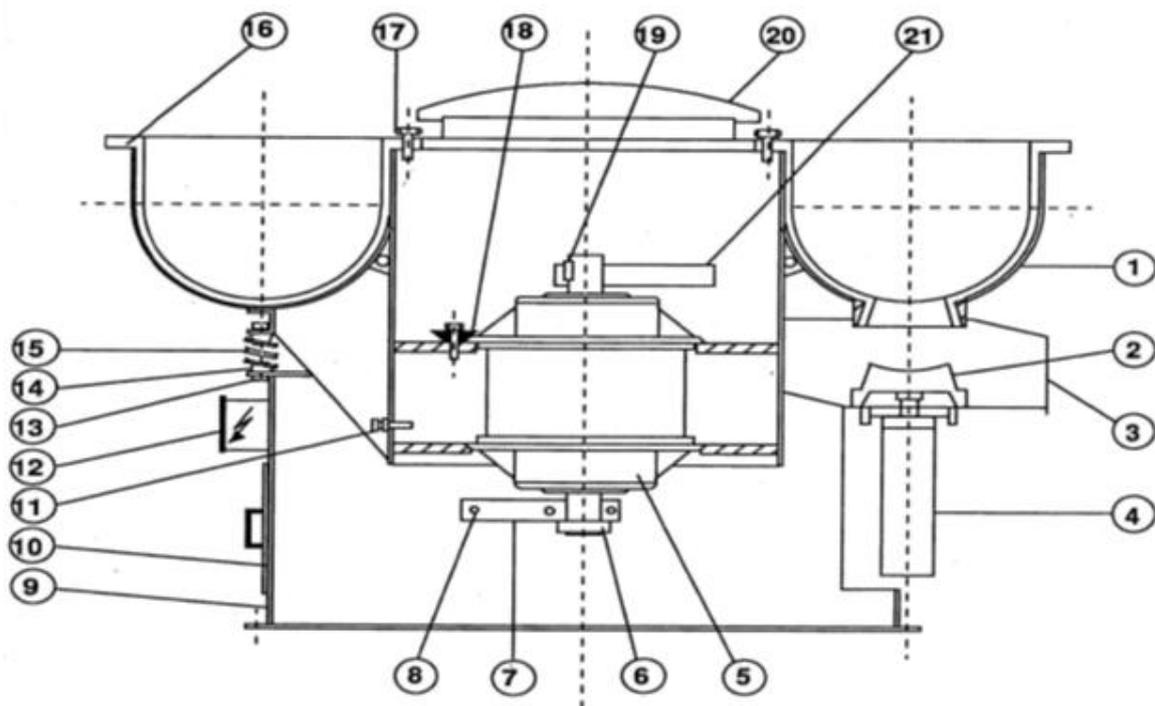


Figure.IV.2 : Schéma de vibreur circulaire RC230.

- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 : Cuve. | 8 : Poids auxiliaire. |
| 2 : Bouchon déchargement pièces. | 9 : Base. |
| 3 : Trémie déchargement pièces. | 10 : Porte d'inspection. |
| 4 : Cylindre pneumatique de commande déchargement pièces. | 11 : Serre-câbles moteur. |
| 5 : Moteur électrique. | 12 : Boîte de dérivation. |
| 6 : Bague graduée. | 13 : Boulons de fixation douilles. |
| 7 : Poids inférieur. | 14 : Douilles. |
| | 15 : Ressort. |

16 : Revêtement cuve.

17 : Boulons fixage couvercle
moteur.

18 : Blocs fixage moteur.

19 : Clavette fixage poids supérieur.

20 : Couvercle moteur.

21 : Poids supérieur.

IV.2.1.1. Fonctionnement de la machine

Le vibreur exploite le mouvement des pièces et des medias (chips) pour la finition des surfaces. Les parois intérieures de la cuve du vibreur, qui est de forme annulaire, donnent à la masse chips/pièce à traiter une force vibrante tridimensionnelle.

Les différents réglages angulaires des poids, les différentes formes des chips, les quantités d'eau, l'additif plus abrasif permettent d'obtenir une large gamme d'opérations qui passent de l'ébavurage au lissage des pièces coulées et au polissage des pièces délicates.

IV.2.1.2. Règles de l'installation de la machine

- La machine doit être placée sur une surface parfaitement plane parce que la moindre inclinaison peut interfère sur la rotation des pièces et médias dans la machine dans une même place.
- La machine doit être fixée à la bride de base au moyen de boulons de fondation et ça pour le maintien de la machine quand elle vibre.
- La bride supérieure de la base de la machine, à laquelle sont fixés les ressorts, peut être considérée comme plan de référence pour le positionnement de la machine.
- La mise en marche ou arrêt de la machine, le conteneur des pièces peut osciller, il faut laisser de l'espace libre et suffisant autour de la machine.

IV.2.2. Abrasifs et Additifs chimiques

IV.2.2.1. Abrasifs (chips)



Figure.IV.3: Abrasifs ou chips.

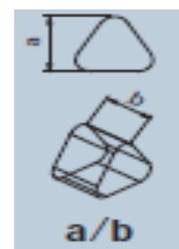


Figure.IV.4: Dimension de l'abrasif.

Forme : Prisme.

Dimensions : a = 5mm, b = 6mm.

Poids : 0.326 g.

Composition d'abrasifs : Céramique.

Quantité d'abrasifs utilisée pour le traitement: 50 kg.

IV.2.2.2. Additifs chimiques

Additifs chimiques : mélange de tensio-actif.

Structure : tensio-actif anionique de la famille de laurylether sulfate.

Formule chimique : $C_{12}H_{25}O_4S$

Forme : liquide base (PH < 7).

Couleur : jaune pâle avec des bulles (presque transparent).

Odeur : aucune odeur.

Quantité : 1 litre d'additif chimique pour 40 litres d'eau.

IV.3. TRAITEMENT EFFECTUE

IV.3.1. Identification des matériaux

J'ai utilisé deux types de matériaux à savoir (Acier doux A60 et Aluminium Al 7020) de forme géométriques cylindriques.

La composition chimique d'Al 7020 ex AZ5G :

éléments	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Autre
Pourcentage %	0.35	0.40	0.20	0.05	1.00	0.10	4.00	0.15
				0.50	1.40	0.35	5.00	

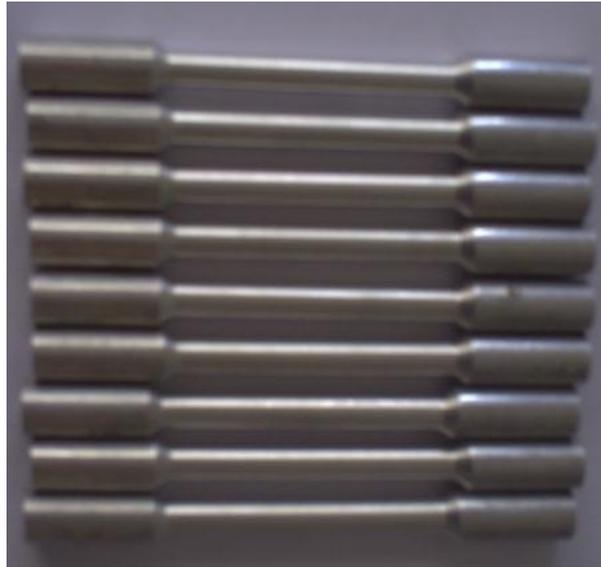


Figure.IV.5 : Epreuves en aluminium avant traitement.

Composition Chimique De L'acier Doux A60:

éléments	C	Mn	S	P	N
Pourcentage %	0.25	0,5	0,045 max	0,045 max	0.009



Figure.IV.6: Epreuves en acier avant traitement

IV.3.2. Observations sur les échantillons après le traitement

J'ai constaté visuellement les observations suivantes pour les éprouvettes en aluminium :

- Amélioration de l'état de surface.
- Enlèvement de la saleté.

- Petit enlèvement de la bavure.
- Un tout petit arrondissement des angles vifs à l'extrémité de l'éprouvette.
- L'apparition de l'aspect brillance.



Figure.IV.7 : Eprouvettes en Aluminium après traitement.

J'ai constaté pour les éprouvettes d'acier les observations suivantes :

- Enlèvement de la saleté.
- Enlèvement de la rouille (corrosion).
- Amélioration de l'état de surface.
- Enlèvement de la bavure.
- L'apparition de l'aspect brillance.
- Un tout petit arrondissement des angles vifs à l'extrémité de l'éprouvette.



Figure.IV.8 : Eprouvettes d'acier après le traitement.

IV.4 : REALISATION ET ANALYSE DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

IV.4.1.Poids: on utilise une balance électronique allant jusqu'à 0.01g de précision qui se trouve au niveau du département de génie minier (ENP).

La masse des éprouvettes en Aluminium et en Acier avant et après le traitement :

	masse (g)			
	aluminium		acier	
	Avant traitement	Après traitement	Avant traitement	Après traitement
1	26,06	25,92	72,83	72,14
2	25,88	25,67	73,16	72,55
3	25,04	24,84	72,52	72,00
4	26,01	25,80	72,11	71,59
5	26,05	25,84	73,28	72,48
6	25,90	25,70	70,57	70,03
7	25,50	25,30	71,49	70,97
8	25,96	25,73	71,80	71,20
La moyenne	25.80	25.60	72.22	71.62

Tableau.IV.1 : Masse des éprouvettes en aluminium et en acier avant et après traitement.

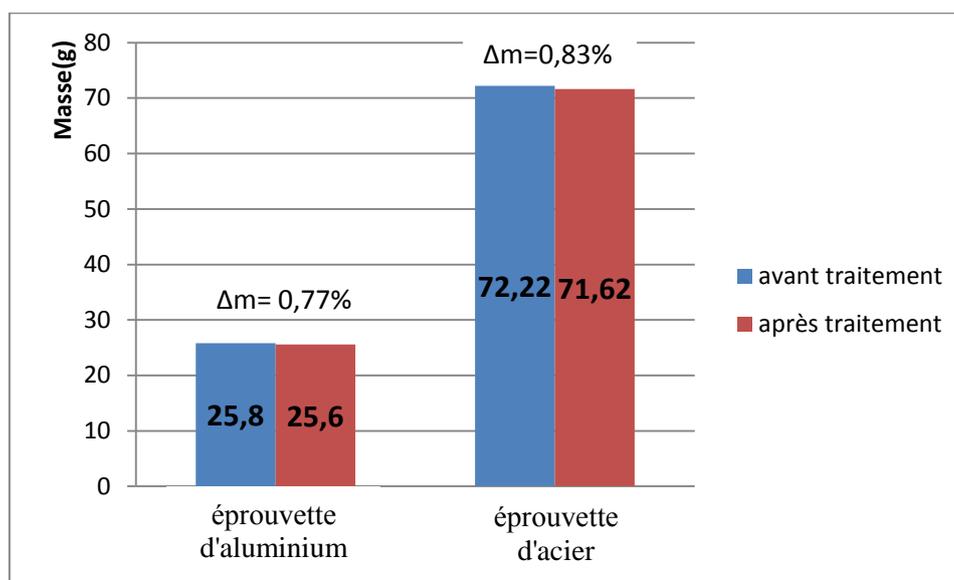


Figure.IV.9 : Variation de masse des éprouvettes en acier et en aluminium avant et après traitement.

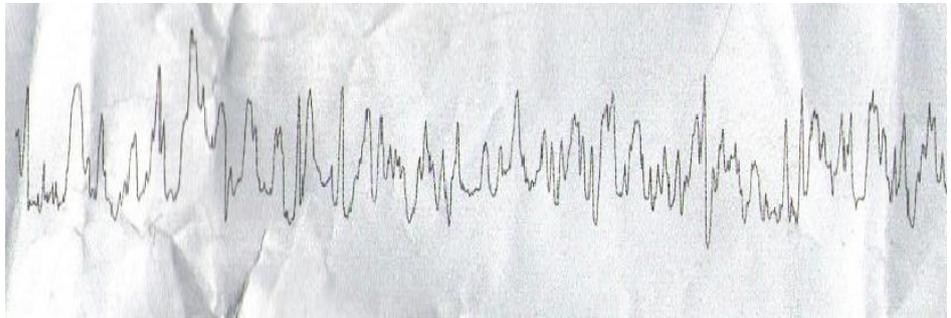
Analyse les résultats de poids

Le poids des échantillons en aluminium a diminué par de 0,20g à la moyenne qui représente un taux $\Delta m = 0,77\%$ par rapport au poids initial de l'éprouvette, et pour le poids des échantillons en acier ont diminué de 0,60g à la moyenne qui représente un taux $\Delta m = 0,83\%$ au poids initial de l'éprouvette en acier.

Je constate que le poids perdu dans l'acier plus que celle dans l'aluminium à cause que l'éprouvette en acier contient une couche de la rouille (corrosion) et la saleté qui couvre la surface non usinée, mais dans l'aluminium la rouille et la saleté très réduite et le poids perdu résultant seulement par l'impact des abrasifs sur la surface de l'éprouvette.

IV.4.2. Rugosité

J'ai effectué les mesures de rugosité au laboratoire de métrologie (département mécanique, SNVI à Rouïba) par Rugosité à palpeur à l'état initial et à l'état final pour l'aluminium et l'acier et j'ai obtenu les résultats qui sont représentés dans le tableau suivant :

aluminium	avant traitement	Ra = 1.38	
	après traitement	Ra = 1.07	

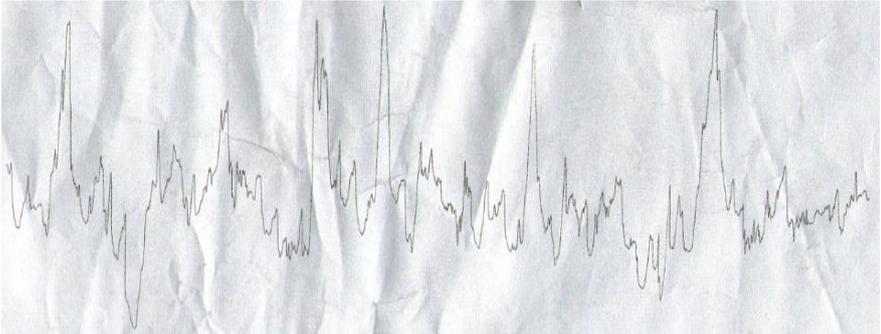
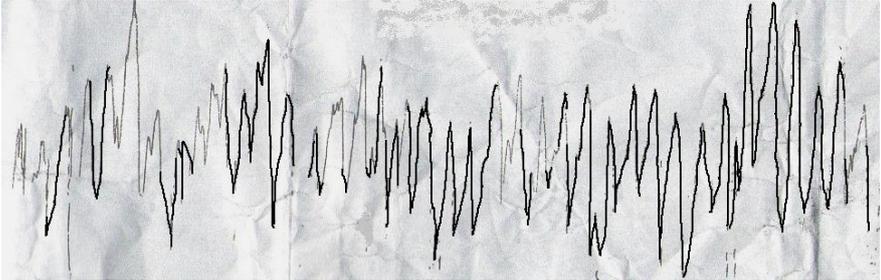
acier	avant traitement	Ra = 2.06	
	après traitement	Ra = 1.77	

Tableau.IV.2 : Rugosité des échantillons en acier et en aluminium avant et après traitement.

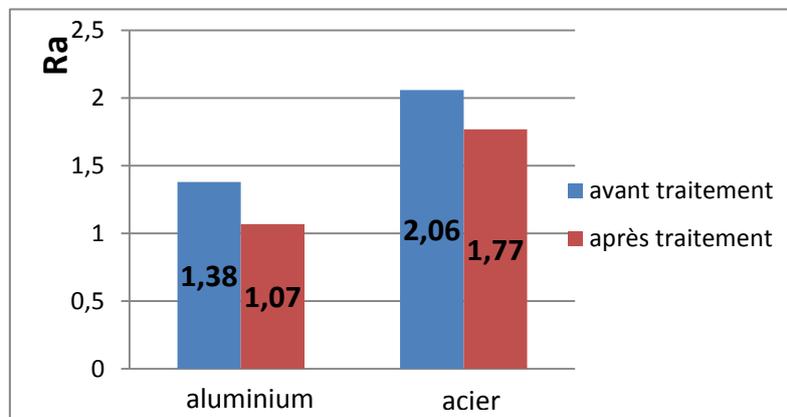


Figure.IV.10 : Variation de rugosité des échantillons en aluminium et en acier avant et après traitement.

Analyse les résultats de rugosité

On remarque qu’une amélioration dans l’état de surface des échantillons après traitement tel que la rugosité Ra diminue dans les deux cas soit pour l’aluminium (Ra=1.38 et d’après

traitement $Ra=1.07$) la valeur de Ra diminue par un taux de 22.46%, pour l'acier ($Ra =2.06$ et après traitement $Ra=1.77$) la valeur de Ra diminue par un taux de 14%.

Cela s'explique par L'abrasion qui a éliminé les pics de quelque dixième de millimètres de profondeur suite à la continuité du frottement. Ce qui a conduit à une amélioration de l'état de surface des pièces traitées.

IV.4.3. Structure

Nous avons fait les observations métallographiques au niveau du laboratoire de génie métallurgie sur un microscope optique NIKON EPIPHOT 300, équipé d'un logiciel ARCHAMID relié par une caméra NIKON FDX, après avoir procédé à un polissage de la surface à explorer en utilisant une succession de papier abrasif avec différentes textures 100, 180, 320, 600, 1000, 1200 et enfin utilisé un papier feutre avec de l'alumine pour aboutir à un état de surface exploitable.

Les surfaces préparées ont subi une attaque chimique selon leur nature :

- Les échantillons en acier: attaqués à l'aide du NITAL (5 cm^3 d'acide citrique(HNO_3), 95 cm^3 d'alcool éthylique(CH_2CH_2OH)).
- Les échantillons en Al : attaqué par solution de KILLER (2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml d'acide chlorhydrique HCl, 1 ml d'acide fluorhydrique concentré HF et 95 ml de l'eau distillée)

L'observation sur les échantillons en aluminium :

avec un agrandissement x500 :



(a) Avant traitement.



(b) Après traitement.

Figure.IV.11 : Structure en aluminium avec un agrandissement x 500 avant et après traitement.

avec un agrandissement x 1000 :

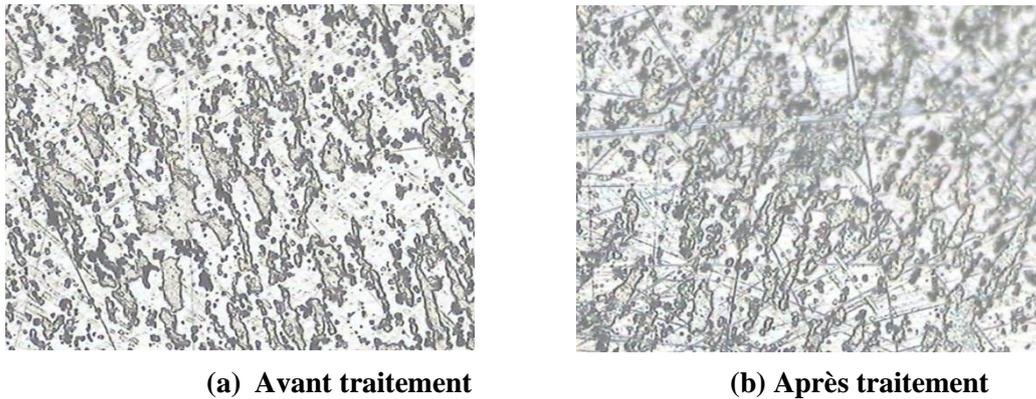


Figure.IV.12 : Structure en aluminium avec un agrandissement x 1000 avant et après traitement.

Analyse les structures d'aluminium :

Notre matériau est un alliage Al Zn Mg, série 7020 des alliages d'aluminium, il s'agit d'un matériau à durcissement structural par précipitation on voit clair qu'il y a la présence des précipités $MgZn_2$ la phase en gris claire représente donc l'aluminium pur et la phase noir foncée c'est des précipités en $MgZn_2$ donc c'est un matériau polycristalline biphasé.

Après traitement on voit que les précipitants ont changé de forme, ils étaient sphéroïdale et ils sont devenue lamellaires avec une réduction de la taille des grains.

Observation sur les échantillons en acier :

avec un agrandissement x 500 :

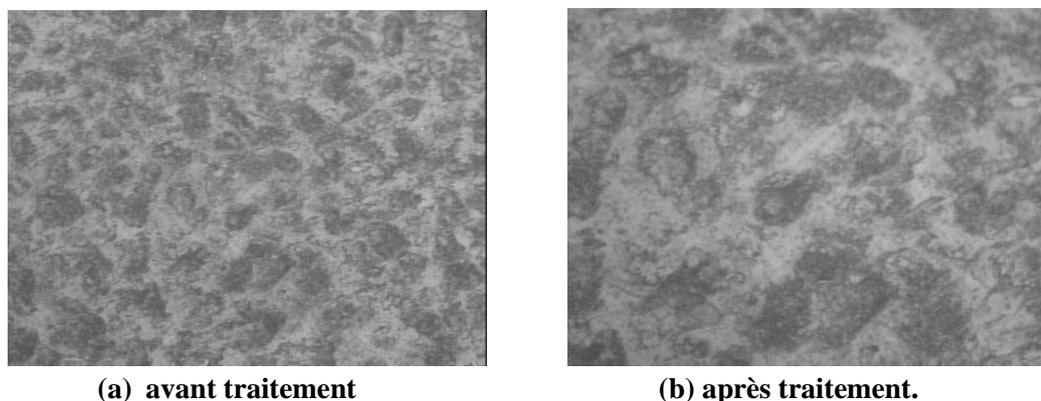
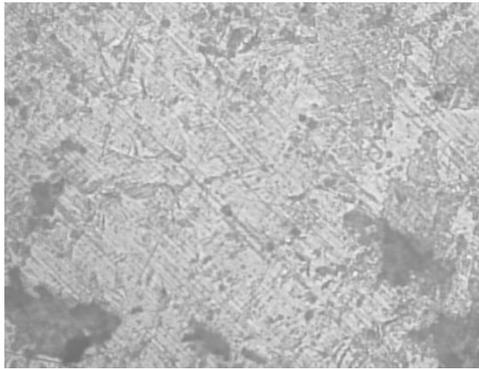
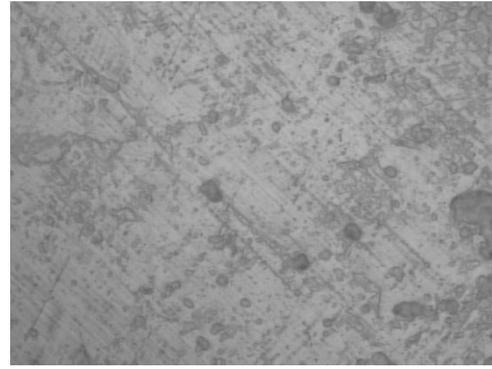


Figure.IV.13: Structure en acier avec un agrandissement x 500 avant et après traitement.

avec agrandissement x 1000 :



(a) avant traitement



(b) après traitement

Figure.IV.14: Structure avec un agrandissement x1000 avant et après traitement.

Analyse les structures d'acier :

L'observation métallographique de l'acier doux A60 permet de voir des phases de graphite sphéroïdal et de ferrite, la phase noir foncée représente graphite sphéroïdal et la ferrite est de phase blanc clair. La constituante ferrite est construite par la répétition d'une maille cubique centrée dans l'espace et que cet édifice contient des atomes en insertion, une faible densité de dislocations, une taille de grain élevée puisque visible au microscope optique, peu de précipités fins.

L'austénite est également construite sur le même modèle, par la répétition d'une maille cubique à faces centrées dans l'espace. Elle contient également peu de dislocations et présente une taille de grain élevée.

Après traitement de vibro-abrasion la phase ferrite est transformée à la phase ferritoperlitique représentée par couleur grise et la taille de graine a augmenté.

IV.4.4.Dureté

Afin de définir et d'approfondir nos connaissances sur l'influence du traitement de vibro-abrasion sur le comportement mécanique des échantillons, nous avons effectuait des essais de dureté (la méthode de Rockwell) par l'utilisation la duremetre de Rockwell type HRB qui existe au departement du génie mecanique, la charge applique est 100kgf équivalent 900N.

On a obtenu les valeurs de la dureté suivantes :

Matériau		Dureté HRB			
		essaie 1	essaie 2	essaie 3	moyenne
aluminium	Avant traitement	42	37	38	39
	Après traitement	74	69	70	71
acier	Avant traitement	74	78	79	77
	Après traitement	91	96	95	94

Tableau.IV.3 : Dureté des échantillons avant et après traitement.

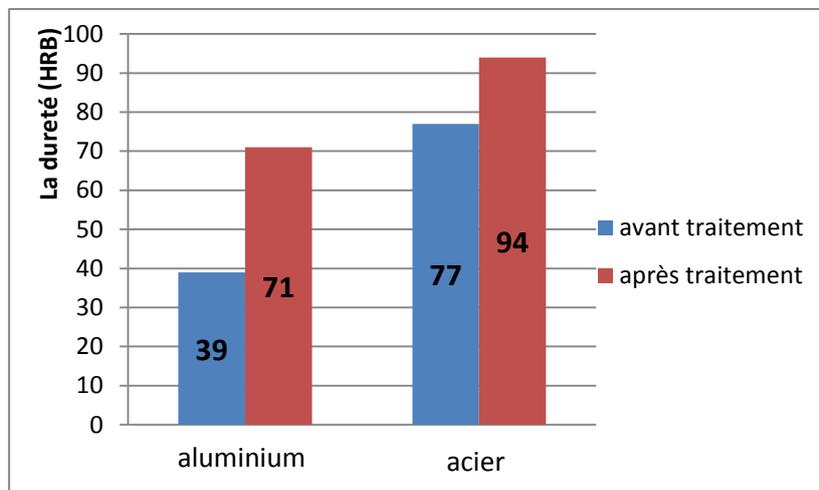


Figure.IV.15: Variation de la dureté des éprouvettes en acier et en aluminium avant et après traitement.

Analyse les résultats de la dureté :

On remarque qu'après 140 minutes de traitement par vibro-abrasion, la dureté a augmenté, sur tout pour l'aluminium ou l'augmentation de la dureté est très importante. La dureté d'aluminium augmente à 39 HRB jusqu'à 71HRB avec un taux 82%, pour l'acier la dureté variée à 77 HRB jusqu'à 94 HRB avec un taux de 22%.

Ce durcissement superficiel s'explique par la quantité importante des micros coups que la surface a reçus et qui engendre une déformation plastique et grossissements des grains. Les dislocations interagissent entre elles. Ceci gêne le mouvement des dislocations et par ce moyen rend le matériau plus dur.

Alors il y a ce qu'on appelle un durcissement par écrouissage.

IV.4.5. Essais de traction

Nous avons réalisé les essais de traction au niveau du laboratoire de science des matériaux (faculté de génie mécanique et génie des procédés, USTHB) sur une machine de marque TN-MD 50 KN n° : 08M7608 assistés par un logiciel HOYWIN. Ces essais ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques.

Les essais ont donné les résultats suivants :

L'aluminium à l'état initial

Résistance à la traction : $R_m = 485.3 \text{ N/mm}^2$.

Limite élastique : $R_p = 401.6 \text{ N/mm}^2$.

Allongement : $A = 4.8\%$.

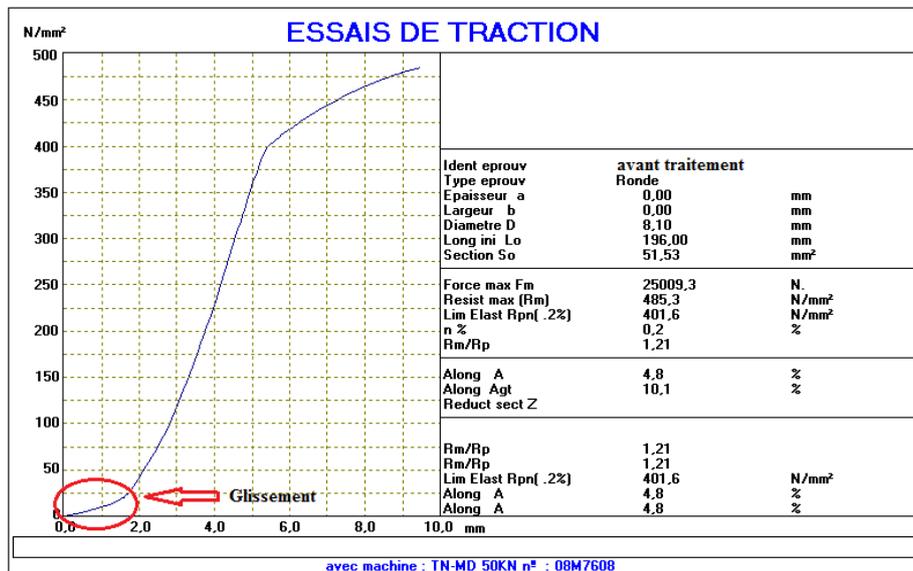


Figure.IV.16: Essai de traction d'une éprouvette en aluminium avant traitement.

L'aluminium après traitement :

Résistance à la traction : $R_m = 493,9 \text{ N/mm}^2$.

Limite élastique : $R_p = 403,0 \text{ N/mm}^2$.

Allongement : $A = 5,2\%$.

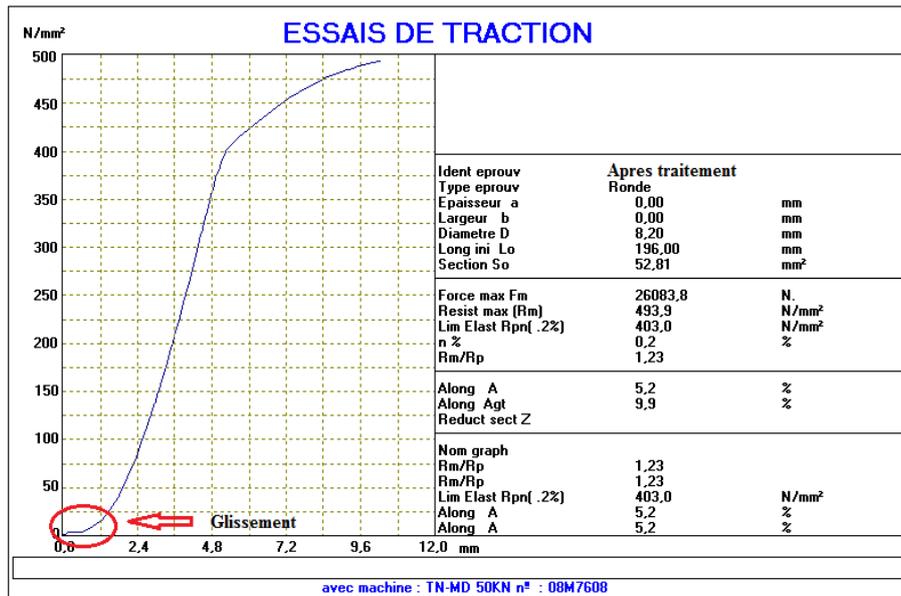


Figure.IV.17: Essai de traction d'une éprouvette en aluminium après traitement.

L'acier avant traitement :

Résistance à traction : $R_m = 548.2 \text{ N/mm}^2$.

Limite élastique : $R_p = 412.7 \text{ N/mm}^2$.

Allongement : $A = 19,2\%$.

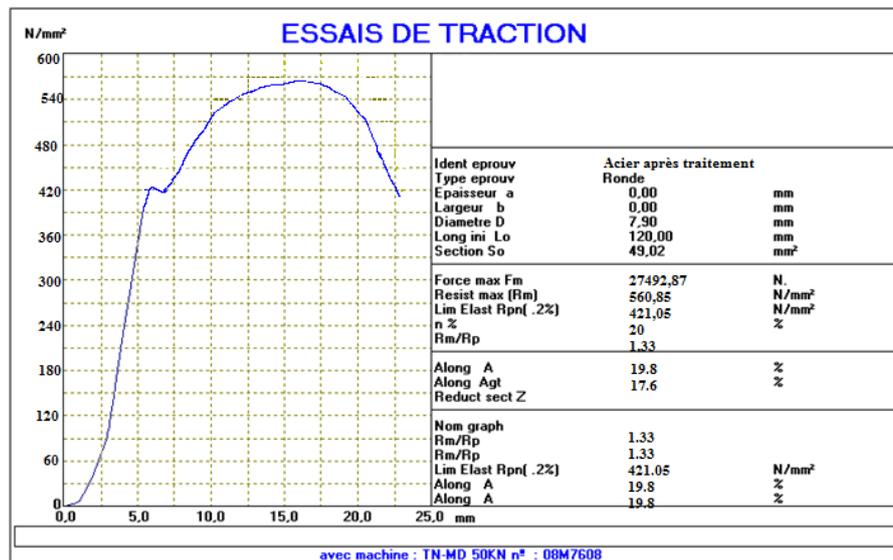


Figure.IV.18: Essai de traction d'une éprouvette en acier avant traitement.

L'acier après traitement :

Résistance à la traction : $R_m = 560,85 \text{ N/mm}^2$.

Limite élastique : $R_p = 421,05 \text{ N/mm}^2$.

Allongement : $A = 19,8 \%$.

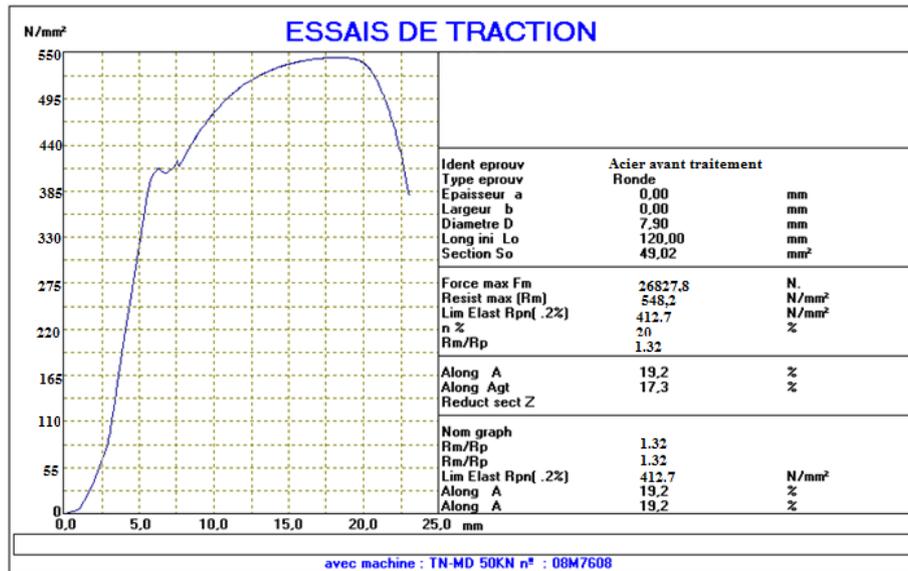


Figure.IV.19: Essai de traction d’une éprouvette en acier avant traitement.

Interprétation les résultats des essais de traction :

D’après le traitement les valeurs de résistance à la traction Rm ont augmenté, pour l’aluminium (485.3 N/mm² jusqu’à 493 ,9 N/mm²) avec un taux 1,77%, et pour l’acier (548.2 N/mm² jusqu’à 560,85 N/mm²) avec un taux de 2.30%.

Cela s’explique par l’influence de la densité des dislocations qui a durci le matériau et augmente la résistance à la traction et la limite élastique. Et l’influence de la taille des grains. Quand la taille de grains a augmente la contrainte critique est petite.

IV.4.6.Essais de fatigue

Dans ces essais on utilise deux types des machines de fatigue l’une pour l’aluminium et l’autre pour l’acier.

1. Essais de fatigue pour l’aluminium :

Pour l’aluminium nous avons utilisé la machine de traction cyclique. Les essais on été réalisé au niveau du laboratoire des essais mecaniques des matériaux (faculté des sciences de l’ingénieur ,UMBB) sur une machine electromecanique pour les essais dynamiques à haute fréquence allons de 30 à 300 Hz avec un chargement qui atteind 150 KN. Cette machine est pilotés par un logiciel de marque test expert version 12.1

Le protocole d’essai contient l’amplitude de la contrainte σ_a , la contrainte moyenne σ_m , les valeurs de σ_m ont été donné par rapport à la résistance de traction Rm.

Protocole d'essai :

éprouvette	Contrainte (MPa)	80%(Rm)	70%(Rm)	60%(Rm)	50%(Rm)	40%(Rm)	35%(Rm)
Avant traitement	σ_m (MPa)	305,2	356,7	208,2	–	113,6	91,6
	σ_a (MPa)	84	84	84	–	84	84
	N	42000	53301	108886	–	3807960	34720409
Après traitement	σ_m (MPa)	311,1	261,7	212,3	159,7	120,3	–
	σ_a (MPa)	84	84	84	84	84	–
	N	93694	119809	278963	4178952	97842870	–

Avant traitement		Après traitement	
Contrainte maximale σ (MPa)	Nombre de cycle (N)	Le contrainte maximale σ (MPa)	Nombre de cycle (N)
389,2	42000	395,1	93694
340,7	53301	345,7	119809
292,2	108886	296,3	278963
197,6	3807960	243,7	4178952
175,6	34720409	204,3	97842870

Tableau.IV.4. tableau d'endurance pour l'aluminium.

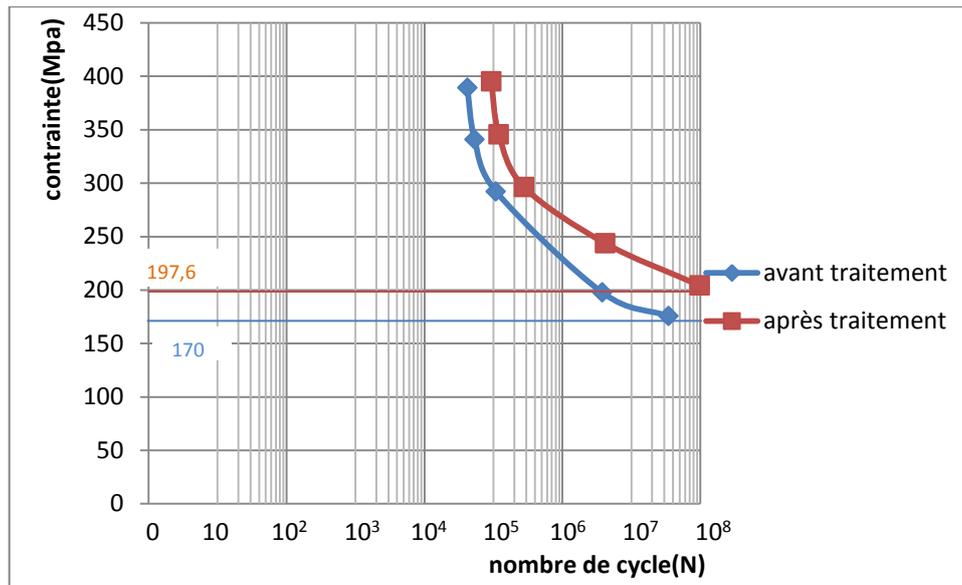
Courbe d'endurance :

Figure.IV.20 : Courbe d'endurance pour l'aluminium.

Interpretation les résultat d'endurance pour l'aluminium :

Après le traitement par vibro-abrasion, la résistance à la fatigue a augmenté pour les éprouvettes en acier d'une manière très importante. La limite d'endurance avant traitement $\sigma_D(N)=170\text{Mpa}$ et le rapport d'endurance $R=35\%$ et après traitement la limite d'endurance $\sigma_D(N)=197,6\text{Mpa}$ et le rapport d'endurance $R=40\%$.

L'amélioration de l'état de surface a conduit à l'enlèvement des microfissures qui sont la cause principale de l'amorçage d'une fissure ce qui a entraîné une augmentation de la limite élastique. Par l'amélioration de la dureté qui augmente la résistance à la traction statique du matériau et qui est liée directement à la valeur de la contrainte au chargement cyclique et qui a conduit à une élévation des seuils des contraintes des échantillons pour les essais d'endurance.

2. Essais de fatigue pour l'acier : Pour l'acier nous avons utilisé la machine de flexion rotative « SCHENCK » qui est disponible au niveau du laboratoire du département de génie mécanique (ENP) représentée sur la (figure.IV.21)



Figure.IV.21: Machine de flexion rotative « SCHENCK ».

Les résultats obtenus :

Les essais de fatigue pour les éprouvettes en acier:

Contrainte σ (MPa)	Nombre de cycle jusqu'à la rupture (N)	
	Avant traitement	Après traitement
300	90400	185200
280	155000	287000
270	215000	524700
260	478700	978600
250	1240500	2764400
240	4157300	---

Tableau.IV.5: Tableau d'endurance pour l'acier.

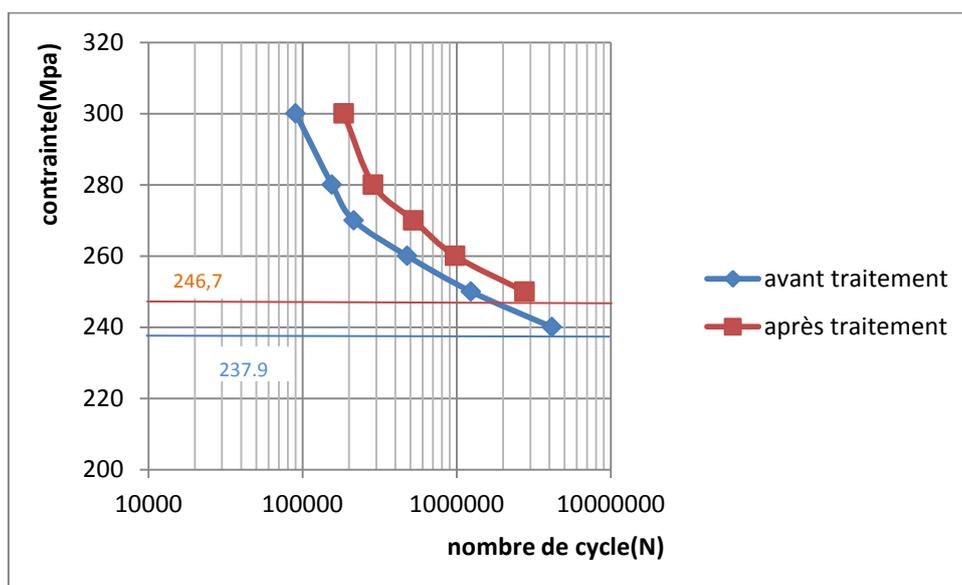


Figure.IV.22 : Courbe d'endurance pour l'acier.

Interpretation les résultats d'endurance pour l'acier :

La courbe en rouge représente l'évolution de la contrainte maximale de l'échantillon à l'état initial en fonction de nombre de cycles à la rupture. La courbe en bleu représente l'évolution de la contrainte maximale de l'échantillon après avoir subi un traitement de vibro-abrasion d'une durée de 140mn en fonction de nombre de cycles à la rupture.

D'après les deux courbes d'endurance, je constate que la limite d'endurance des éprouvettes après traitement s'est amélioré, tel que la limite d'endurance a augmenté à 237,9Mpa jusqu'à 246.7Mpa. Cette augmentation de la limite d'endurance suite à l'amélioration de la dureté et la limite à la traction.

IV.5. INFLUENCE DE DIFFERENCES PARAMETRES SUR L'ENDURANCE

- **Influence de l'état de surface :** D'après les résultats obtenus précédemment de la rugosité, je constate que l'amélioration de l'état de surface a conduit à l'enlèvement des microfissures, donc favorise la tenue en fatigue du matériau après un traitement par vibor-abrasion.
- **Influence de la résistance maximale à la traction :** L'amélioration de la résistance maximale à la traction des éprouvettes traitée par vibro-abrasion a conduit à une élévation du seuil des contraintes des échantillons qui ont été traitées, pour des nombres de cycles égaux à celui des échantillons à l'état initial de la courbe d'endurance.
- **Influence de la dureté :** L'amélioration de la dureté au niveau de la couche superficielle a conduit à une optimisation entre dureté et ductilité du matériau ce qui n'a pas favorisé la fragilité qui provoque une rupture fragile, mais par contre elle a conduit à une augmentation de la résistance maximale à la traction du matériau.

Conclusion

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de notre Projet de Fin d'Etudes, nous avons effectué un traitement de surface par vibro-abrasion à basses fréquences sur des échantillons de matériaux différents (acier doux et aluminium). Avec ce procédé, on obtient des pièces mécaniques avec des surfaces à aspect esthétique (brillance) et des caractéristiques mécaniques et géométriques améliorées (tenue en fatigue, rugosité, dureté et structure)

Ce procédé permet aussi d'améliorer la longévité des pièces traitées du fait de l'amélioration de leur qualité de surface (diminution de la rugosité), de l'atténuation des microfissures et de l'augmentation de la dureté superficielle (ou microdureté). Ceci conduit à l'augmentation de la résistance maximale à la traction, et par conséquent, à l'élévation du seuil des contraintes.

Pour améliorer la dureté, il est nécessaire d'augmenter la durée du traitement et utiliser des medias en acier traité sous forme de billes ou de rouleaux. Le choix des medias, la durée du traitement et la nature des matériaux à traiter ont donc une influence considérable sur l'état de surface à obtenir et la dureté des surfaces traitées. Il faut donc définir ces paramètres en fonction des objectifs qu'on veut atteindre.

En perspectives, il est intéressant d'étudier les effets des paramètres de vibration (fréquence et amplitude) pour déterminer leur influence sur les différentes caractéristiques des surfaces traitées.

BIBLIOGRAPHIE

[HERTZ 1881] « Über die Berührung fester elastischer Körper (Sur le contact entre corps élastiques) » -Heinrich Hertz- dans J. für reine und angewandte Mathematik, vol. 92, (1881).

[LALANNE 1999] « Dommages par fatigue – Vibrations et chocs mécaniques – Tome 4» - C.LALANNE – Ed. Hermes (1999).

[MARINES 2003] « An understanding of very high cycle fatigue of metals »-I.MARINES; X. BIN; C. BATHIAS – International Journal of Fatigue 25 (2003) – pp. 1101-1107.

[DELAPLACE 2008] «Aide-Mémoire Mécanique Des Structures Résistance des matériaux »ARNAUD DELAPLACE, FABRICE GATUINGT, FREDERIC RAGUENEAU, (2008)

[HANS 2003] «Analyse et la Technologie des surfaces », HANS JORG MATHIEU, ERICH BERGMANN, RENE GRAS, édition 4, presses polytechniques et universitaires romandes.

[БАБИЧЕВ 2003] Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Прокопец Г.А. Проявление ударно-волновых явлений при виброударной упрочняющей обработке ППД. Актуальные проблемы конструктор.-технолог. обеспечения машиностроительного пр-ва: сб. материалов науч.-техн. конф. – Волгоград, 2003г

[МОТРЕНКО 2002] Мотренко П.Д., Бабичев А.П., Прокопец Г.А., Холоденко Н.Г. Влияние кривизны поверхности детали на процесс отделочно-упрочняющей обработки многоконтактным виброударным инструментом. //Высокие технологии в машиностроении: Материалы науч.-техн. конф. – Самара, СГТУ, 2002

[ВАНН МАО 2003] Ванн мао, повышение эффективности и качества очистки поверхности деталей от эксплуатационных загрязнений за счет применения вибрационной обработки в технологи авторемонтных производств, г. ростов-на-дону 2003.

[ПОВЫ 2004] ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТДЕЛОЧНО-Упрочняющей Обработки Деталей Поверхностным Пластическим Деформированием На Основе Применения Многоконтактных Виброударных Инструментов, Мотренко Пётр Данилович, Ростов- на-Дону – 2004 г.

Sites web :

[1] Le livre multimédia de la corrosion (INSA Lyon) ([http:// www. cdcorrosion. com/ index. htm](http://www.cdcorrosion.com/index.htm))

[2] Site technique d'ingénieur (www.techniques-ingenieur.fr)

[3] www.abcswisstech.com

[4] Rosler : constructeur allemand des équipements de tribofinition : www.rosler.fr

[5] Otec : www.otec.de