

École Nationale supérieure Polytechnique
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'État
En Génie Mécanique

THÈME :

**Etude et expérimentation
des différents matériaux
par le procédé de Vibro-Abrasion**

Proposé et dirigé par :

**Mr. Djamel SAIDI
Mr. Mohamed BOUAZIZ**

Réalisé par :

TALA BOUZROU Athman

Promotion 2010 - 2011

Dédicaces

Je dédie cet humble travail à la mémoire de mon père qui m'est toujours le plus chère, que Dieu le miséricordieux ait pitié de son âme.

Ma mère qui s'est sacrifiée pour que je réussisse dans mon cursus universitaire.

A mon frère et à ma sœur

A toute ma famille

Aux sources de force d'amour et de fidélité, celles qui ont toujours répondu dans le besoin, emblème amitié, aux grands cœurs, pour leurs encouragements moraux ; mes amis : Mohamed, Houssine, Wassim, Nassim, Mikhael, Sid ali, Abdellah, Amina, Hannan, Nadjeh, Amina, Kawthar, Assia, Nadjib, Ahlam, Faisa, Said, Fares

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le Dieu Tout Puissant et Miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et le courage qui ma mener à finir ce travail

Je remercie ma très chère mère pour toute l'aide et le soutien morale et financier qu'elle ma offert tout au long de ma vie.

Je tiens particulièrement à exprimer mes remerciements et mes profonds respects à monsieur SAIDI Djamel et BOUAZIZ Mohamed qui ont propose et dirigé ce travail pour leurs suivi et leurs conseils.

J'adresse mes remerciements à Monsieur M.BENBRAIKA, qui a bien voulu assurer la présidence de mon jury ainsi que Monsieur M. BELHADEF, pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Je remercie tous les enseignants du département Génie Mécanique pour leur soutien tout au long de ma formation.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ma modeste formation d'ingénieur.

Finalement, Je remercie tous mes amis et ma famille qui m'ont énormément aidé dans ce travail.

ملخص

الكشط بالاهتزازات هو وسيلة لمعالجة سطوح الميكانو- كيميائية ، والتي تتركز على استخدام تكنولوجيا الاهتزازات ذات التردد المنخفضة في معالجة القطع الميكانيكية المعدنية أو الغير المعدنية بوجود مواد مضافة كيميائية و الابرزيف. نظام المعالجة ومعلماته لديها تأثير كبير على الخصائص الهندسية, الميكانيكية وحتى الأسطح المجهرية. عملية الكشط بالاهتزازات لها العديد من المزايا التكنولوجية, الاقتصادية والبيئية، وخاصة بالنسبة للقطع الميكانيكية ذات الأشكال المعقدة.

المفاتيحية الكلمات : الكشط بالاهتزازات, ترييوفينيشن, المعالجة السطحية

Résumé

La vibro-abrasion est un procédé de traitement des surfaces chimico-mécanique qui consiste à utiliser la technologie de vibration à basses fréquences dans le traitement des pièces métalliques en présence d'abrasifs et d'additifs chimiques. Le régime du traitement et ses paramètres ont une grande influence sur les caractéristiques géométriques, mécaniques et métallographiques des surfaces traitées. Le procédé de vibro-abrasion présente de nombreux avantages techniques, économiques et écologiques, notamment pour le traitement des pièces mécaniques de formes complexes.

Mots clés : vibro-abrasion, tribofinition, traitement de surface.

Abstract

The vibro-abrasion is a method of surface treatment chemi-mechanical, which is to use the technology at a low frequency vibration in the treatment of metal parts in the presence of abrasive and chemical additives. The treatment regimen and its parameters have a great influence on the geometrical characteristics, mechanical and metallographic treated surfaces. The process of vibro-abrasion has many technical advantages, economic and ecological, including the processing of mechanical parts with complex shapes.

Key words : vibro-abrasion, tribofinition, surface treatment.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale

Chapitre I : fondements théoriques de la technologie des vibrations

I.1. Introduction	(1)
I.2. Technologie des vibrations	
I.2.1. Types des vibrations	(1)
I.3.2. Description	(1)
I.3. paramètres du procédé	
I.3.1. Description du procédé de vibro-abrasion	(4)
I.3.2. Analyse des principaux paramètres du procédé (F, V, a, E, P et T).....	(6)
➤ Vitesse d'impact des abrasifs et des pièces traitées.....	(6)
➤ Accélération de l'impact.....	(7)
➤ Force de l'impact des abrasifs.....	(7)
➤ Energie de l'impact des abrasifs avec les pièces.....	(8)
➤ Pression de contact dans la zone de l'impact.....	(8)
➤ Température dans la zone de l'impact	(9)
I.4. les caractéristiques mécaniques	
I.4.1. Etat de surface (Rugosité)	(10)
I.4.2. Dureté et micro-dureté	(12)
I.4.2.2. Les différents essais de dureté	(12)
I.4.2.3. Essai de la micro-dureté	(19)
I.4.3. Structure	(22)
I.4.4. Contraintes résiduelles	(26)

Chapitre II : Méthode d'études expérimentales

II.1. La vibro-abrasion et ses différents équipements	
II.1.1. Les vibrateurs circulaires	(29)
II.1.2. Les machines à force centrifuge	(31)

II.1.3. Les machines multibroches.....	(33)
II.1.4. Les Vibrateurs linéaires.....	(35)
II.2. milieux actifs et additifs chimiques	
II.2.1. abrasifs.....	(36)
II.2.2. additif chimique.....	(38)

Chapitre III : Recherche expérimentale

III.1. Matériel d'expérimentation.....	(42)
III.1.1. Procède de la machine.....	(44)
III.1.2. La correction de la machine.....	(44)
III.1.3. Les règles de l'installation de la machine.....	(45)
III.2. Les caractéristiques du milieu actif utilisées pour le traitement	
III.2.1. Abrasifs (chips).....	(45)
III.2.2. Additif chimique.....	(46)
III.3. Les matériaux utilisés.....	(46)
III.4. Les moyens de contrôle du traitement.....	(48)
III.5. Le traitement	
Avant le 1 ^{er} essai : l'état initial des pièces.....	(50)
1 ^{er} essai : Traitement pièces contre pièces.....	(53)
2 ^{ème} essai : Traitement pièces contre pièces avec abrasif.....	(56)
3 ^{ème} essai : Traitement pièces contre pièces avec abrasif + additif chimique.....	(60)

Chapitre IV : Interprétation des résultats expérimentaux

IV.1. Interprétation des résultats	
IV.1.1. La rugosité R_a	(64)
IV.1.2. Poids	(65)
IV.1.3. Dureté HB.....	(66)
IV.1.4. Structure.....	(67)
IV.1.5. Remarques.....	(67)
IV.2. Evaluation écologique et environnemental de la vibro-abrasion.....	(68)

Conclusions

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les diverses mesures de l'amplitude et la période d'une oscillation harmonique

Figure 1.2 : Représentation des vibrations harmoniques

Figure 1.3 : Schéma du traitement par vibro-abrasion

Figure 1.4 : Paramètre de mesure de la rugosité

Figure 1.5 : Géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et microdureté

Figure 1.6 : Schéma de principe d'un essai de dureté Brinell

Figure 1.7 : Schéma de principe d'un essai de dureté Vickers

Figure 1.8 : Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell

Figure 1.9 : Echelles correspondant aux divers niveaux de description des constructions mécaniques

Figure 1.10 : Les constituants qu'on peut observer sur un acier

Figure 1.11 : Diagramme de phase des aciers au carbone non alliés

Figure 1.12 : Origine des contraintes résiduelles

Figure 1.15 : Distribution des contraintes résiduelles sur la couche superficielle d'échantillons en acier: (a) recuit et (B) trempé

Figure 2.1 : Schéma d'un vibreur circulaire

Figure 2.2 : Schéma machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale

Figure 2.3 : Schéma d'une machine à force centrifuge

Figure 2.4 : Schéma d'une machine multibroche

Figure 2.5 : Schéma d'un vibreur linéaire

Figure 3.1 : Schéma du vibreur RC230

Figure 3.2 : Dimension de l'abrasif

Figure 3.3 : Structure de l'acier doux brut à l'état initial avec un agrandissement :
(a) x200 (b) x100

Figure 3.4 : Structure de la fonte sphérolitique à l'état initial

Figure 3.5 : Structure de l'acier doux brut après le 2^{ème} traitement avec un agrandissement:
(a) x 200 (b) x 100

Figure 3.6 : Structure de la fonte sphérolitique après le 2^{ème} traitement

Figure 3.7 : Structure de l'acier doux brut après le traitement final

Figure 3.8 : Structure de la fonte sphérolitique après le traitement final

Figure 4.1 : Graphe de l'état des surfaces de l'acier

Figure 4.2 : Graphe de l'état des surfaces de la fonte

Figure 4.3 : Graphe de l'état des surfaces de l'aluminium

Figure 4.4 : Graphe de l'état des surfaces de la face et de l'alésage en bronze

Figure 4.5 : Graphe du poids de l'acier

Figure 4.6 : Graphe du poids de la fonte

Figure 4.7 : Graphe du poids du bronze

Figure 4.8 : Graphe du poids de l'aluminium

Figure 4.9 : Graphe de la dureté de l'acier

Figure 4.10 : Graphe de la dureté de la fonte

Figure 4.11 : Graphe de la dureté du bronze

Figure 4.12 : Graphe de la dureté de l'aluminium

LISTE DES PHOTO

Photo II.1 : Vibrateur circulaire

Photo II.2 : Machine à force centrifuge

Photo II.3 : Machine multibroche

Photo II.4 : Vibrateur linéaire

Photo II.5 : Quelques exemples sur les différents abrasifs

Photo III.1 : Vibrateur RC230

Photo III.2 : Les abrasifs ou chips

Photo III.3 : Rugosimètre à palpeur

Photo III.4 : Balance électronique à 1/100 de précision

Photo III.5 : Duromètre Brinell

Photo III.6 : Microscope optique

Photo III.7 : Boucles métalliques

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Représente les diverses mesures de l'amplitude

Tableau 1.2 : Représente les différentes rugosités d'une surface et leurs déterminations

Tableau 1.3 : Représente les différentes charges à utiliser dans la dureté de brinell par rapport au diamètre de la bille et le matériau de la pièce à mesurer

Tableau 1.4 : Représente les pénétrateurs et les diverses charges qui permettent d'avoir un assez grand nombre d'échelles Rockwell

Tableau 1.5 : Représente la comparaison de différentes duretés Brinell, Rockwell et Vickers

Tableau 1.6 : Représente les charges qu'on peut utiliser dans le procédé Vickers

Tableau 1.7 : Représente des différentes phases qu'on trouve dans un diagramme d'aciers au carbone non alliés

Tableau 2.1 : Représente quelque exemple des particules utilisé dans le milieu actif pour les différentes opérations.

Tableau 2.2 : Représente les différentes compositions de l'additif chimique liquide recommandé pour différentes opérations

Tableau 2.3 : Représente quelque exemple des différents additifs chimiques poudre recommandé pour différentes opérations

Tableau 3.1 : Représente la correction de la machine

Tableau 3.2 : Caractéristiques métallurgiques des matériaux traités

Tableau 3.3 : Représente les pièces à l'état initial (avant le traitement)

Tableau 3.4 : Représente les pièces après 60 minutes du 1^{er} essai expérimental

Tableau 3.5 : Représente les pièces après 60 minutes du 2^{ème} essai expérimentale

Tableau 3.6 : Représente les pièces après 60 minutes du 3^{ème} essai expérimentale (état finale)

Introduction générale

L'aptitude d'une pièce à une fonction donnée dépend d'un ensemble de conditions, notamment les caractéristiques de ses états de surface.

Parmi les techniques de vibro-abrasions connues pour l'amélioration de la qualité de surface, on peut citer la méthode la plus récente qui est un procédé chimico-mécanique consistant à enlever de petites particules du métal tout en travaillant à basse fréquence [15Hz à 50Hz] avec une amplitude [0.5mm à 5mm].

Le concept de technologie de vibration est apparu récemment dans les années 60, comme une conséquence au développement du processus utilisant les impacts de vibration à basse fréquence, dans plusieurs domaines tels que l'industrie mécanique, le revêtement métallique et chimique. De même, cette technologie révolutionnaire est employée dans les essais de fatigue des matériaux, dans le domaine de la métallurgie, de la fonderie, du moulage par régénération et du nettoyage des pièces brutes.

La vibro-abrasion remplace avantageusement, en terme de qualité et de productivité les opérations de polissage.

Dans ce travail, on cherche à étudier l'influence des paramètres de traitement par vibro-abrasion (traitement pièces contre pièces, traitement pièces contre pièces avec abrasif, traitement pièces contre pièces avec abrasif + additif chimique) dans le but d'améliorer les caractéristiques mécaniques (dureté, microdureté), métallurgiques (microstructure superficielle) et état de surface. Les essais ont été réalisés dans l'entreprise ACCES INDUSTRIE. La machine étant pré-réglée, les paramètres du régime vibratoire (amplitude, fréquence) n'ont pu être modifiés.

Le mémoire est composé de 4 chapitres. Le 1^{er} chapitre présente une étude théorique concernant les paramètres influant sur le procédé tout en citant des cas pratiques des travaux réalisés dans ce sens.

Les chapitres 2 et 3 représentent la partie expérimentale répondant à l'objectif de notre travail.

Dans le dernier chapitre 4, on présente l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus, tout en observant les paramètres suivants après chaque stade de traitement ;

- le poids
- la Rugosité
- la dureté
- la structure

On termine ce modeste travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Fondements théoriques de la technologie de vibration

I.1. Introduction :

Il existe plusieurs méthodes qui ont pour but d'améliorer la qualité des surfaces :

- Méthode par vibro-abrasion.
- Méthode par jet des billes.
- Méthode de traitement par force magnétique....etc.

La vibro-abrasion intègre les techniques mécanisées du traitement des surfaces en particulier, polissage et ébavurage. Les ingrédients sont les médias abrasifs (céramique, porcelaine, plastique, métaux), les additifs chimiques et bien sûr les équipements qui génèrent les mouvements (vibrateurs, centrifuge...etc).

I.2. Technologie des vibrations :

Les vibrations sont des agresseurs physiques. Il s'agit d'un phénomène mécanique, oscillatoire perceptible par d'autres sens que l'ouïe et produit par un objet vibrant et transmis à un autre corps en contact avec lui.

A cet égard, voici quelques informations générales sur les vibrations mécaniques et sur les processus d'ondes.

I.2.1. Types des vibrations :

- Très basses fréquences (< 1 Hz) :
Ce sont des vibrations qu'on trouve sur les bateaux.
- Basses fréquences (1 - 100 Hz) :
Elles proviennent des véhicules de toutes sortes.
- Moyennes et hautes fréquences (> 100 Hz) : en général les Moyennes fréquences sont entre 100Hz-1kHz et les hautes fréquences sont généralement au-delà de 1 kHz. Leur transmission se confine généralement aux membres supérieurs (système main-bras).

I.2.2. Description :

- ✓ Les vibrations se font dans tous les axes (X, Y, Z), d'où la complexité à analyser le phénomène.
- ✓ Phénomène oscillatoire : c'est le déplacement d'un objet de part et d'autre d'une position dite d'équilibre ou de référence.

- ✓ Dans le domaine technique et de la technologie (y compris la technologie du traitement des métaux) le terme « vibration » est largement utilisé car 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 basses fréquences.
- ✓ Les caractéristiques les plus importantes du processus des vibrations sont l'amplitude et la fréquence d'oscillations. [1]

a) Fréquence :

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit pendant une durée déterminée. La fréquence est l'inverse (au sens mathématique) de la période, On note :

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

T : Période en seconde (S).

f - fréquence en hertz (Hz).

Donc, 1 hertz (Hz) = 1 cycle par seconde (S^{-1}) car La fréquence est le nombre d'aller-retour complets (cycle) effectués par un objet autour de sa position d'équilibre pendant une seconde.

A titre de rappel : un phénomène est périodique s'il se reproduit identiquement à lui-même à intervalles de temps réguliers et les variations de son amplitude se reproduisent régulièrement au bout d'une période T ou λ constante comme sur la figure (1.1)

b) Amplitude

- En physique classique, on nomme amplitude la mesure scalaire (une coordonnée) d'un nombre positif caractérisant l'ampleur de l'oscillation d'une onde par rapport à sa valeur moyenne.
- En mécanique quantique, on nomme amplitude un vecteur composé d'un module et d'une phase, qui peut être représenté par un nombre complexe (deux coordonnées). Le carré du module de cette amplitude est assimilable grosso modo à une probabilité de détection de la particule en un endroit donné.

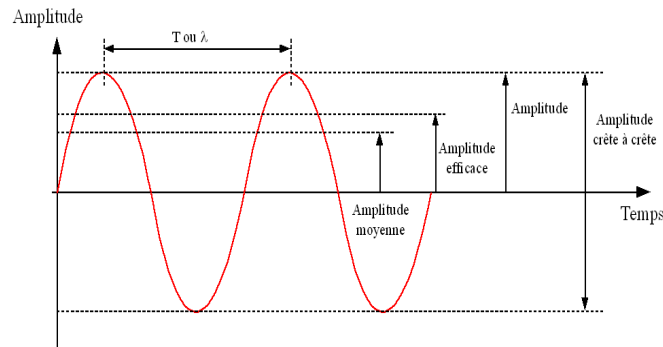


Figure 1.1 Les diverses mesures de l'amplitude et la période d'une oscillation harmonique

Tableau 2.1 : Représente les diverses mesures de l'amplitude

Dénomination	Définition
Amplitude moyenne	Valeur moyenne arithmétique du signal positif
Amplitude efficace	Amplitude continue , appelée aussi valeur efficace
Amplitude	Amplitude maximale positive, appelée aussi valeur maximale
Amplitude crête à crête	Amplitude maximale positive et négative [1]

c) Vibrations harmoniques :

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

$$U(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.2)$$

D'où :

A, ω , φ : constants.

A: amplitude (mm).

ω : fréquence angulaire (rad/s).

φ : phase initiale d'oscillation (rad).

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

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1.3)$$

Conformément :
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1.4)$$

La 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, on peut utiliser un diagramme circulaire (figure 1.2). [2]

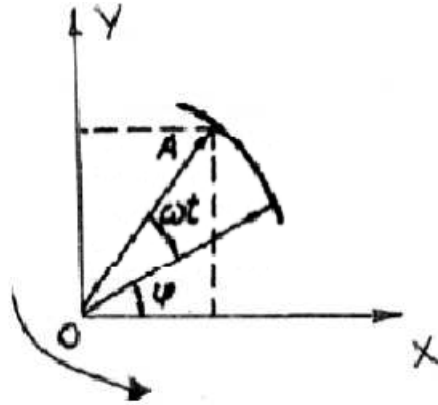


Figure 1.2 Représentation des vibrations harmoniques [2]

I.3. paramètres du procédé :

I.3.1. La description du procédé de vibro-abrasion:

Le traitement par vibro-abrasion est un procédé mécano-chimique qui a pour but d'abolir les particules métalliques et ses oxydes présents sur les surfaces traitées, ainsi que la déformation plastique de la couche superficielle des éléments de contact. Dans le processus de traitement des micro-impacts sont produits dans différents angles entre l'outil et les pièces à traiter (voir la figure 1.3).

Rep	Désignation
1	chambre de travail
2	ressort spiral (élément élastique)
3	Moteur
4	Base (fondation)
5	tube pour le fluide (eau et l'additif chimique)
6	la pompe
7	réservoir de vidange

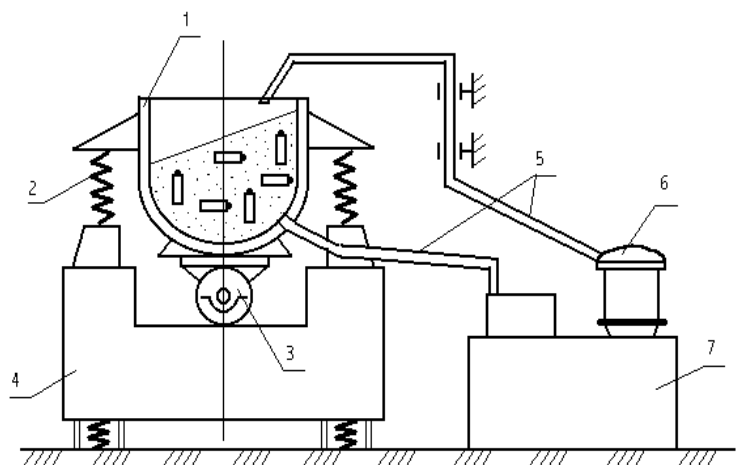


Figure 1.3 Schéma du traitement par vibro-abrasion

Selon le schéma, les pièces et média sont mis en vibration dans une chambre de travail sous l'action de deux mouvements (mouvement rotatif lent et un mouvement vibratoire) avec ajout d'eau et d'additif chimique pour obtention de la finition demandée. Dans ce processus les pièces peuvent prendre plusieurs positions dans la chambre de travail. Celui-ci lui assure un traitement uniforme sur toute la surface. Les échantillons reçoivent un grand nombre de micro-coups dans des directions différentes.

Le 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.

En générale la méthode du traitement par vibro-abrasion est caractérisée par les phénomènes suivants :

- L'impact dynamique du milieu actif est sous la forme de plusieurs collisions des particules sur la surface des pièces traitées.
- L'interaction mécanique de milieu actif et du matériau des pièces traitées.
- 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. Le choc acoustique est un phénomène qui est caractérisé par l'influence des ondes sur la structure du matériau.

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

- Les propriétés physiques du milieu actif (abrasifs, granulations...).
- Les caractéristiques métallurgiques du matériau de la pièce traitée.
- Les paramètres dynamiques du processus qui reflètent le régime du traitement.
- Les propriétés chimiques, la composition et la qualité de l'additif chimique.[3]

L'intensité du traitement se produit beaucoup plus dans le fond de la chambre de travail où la pression est la plus élevée. Pour avoir un traitement uniforme au niveau de toute la chambre de travail on ajoute une pression supplémentaire. Le traitement est effectué principalement par une alimentation continue et périodique du 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 du fluide influe sur l'intensité du traitement.

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

Le choix des abrasifs dépend de la nature du matériau, de sa forme géométrique et ses dimensions.

L'enlèvement de la matière, le niveau de polissage et la qualité des surfaces dépendent de la taille, nuance et la forme des médias (métallique et non métallique) introduits dans le vibreur.

L'intensité du traitement par vibro impact dépend de différents facteurs :

- le régime et la durée du traitement (l'amplitude, la fréquence et la durée du traitement).
- les caractéristiques et les tailles des médias.
- le volume de la chambre de travail et le degré de son remplissage.
- les propriétés mécaniques du matériau.
- la nature du mouvement de la chambre de travail (vitesse et accélération, force et énergie des micro-impacts, pressions de contact, températures qui apparaissent sur la zone de l'action des micro-coups).

I.3.2. Analyse des principaux paramètres du procédé (F, V, a, E, P et T) :

Nous pouvons remarquer que l'amplitude des oscillations dans la plupart des cas varie entre 0,5 – 5 mm avec une basse fréquence qui varie entre 15 – 50 Hz

Les valeurs numériques de ces paramètres sont :

1. vitesse des abrasifs entre 0,5 – 1.0 m/s.
2. accélération varie entre 20 - 150 m/s².
3. force micro-impact entre 1,5 – 2.5 kg.
4. pression de contact entre 700 - 1500 daN/mm².
5. température moyenne dans la chambre de travail en général est située entre 30 - 40 °C et au niveau de la surface de la pièce entre 50 à 70 °C suite aux micros impacts.

a) Vitesse d'impact des abrasifs 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 :

$$\begin{cases} V_i = V_{ch} \times k_v \\ k_v = a^L \approx 0,9877^L \end{cases} \quad (1.5)$$

D'où;

$$V_{ch} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (1.6)$$

$$\begin{cases} V_x = A_x \times \omega \times \sin \omega t \\ V_y = A_y \times \omega \times \cos \omega t \end{cases} \quad (1.7)$$

D'après la trajectoire du mouvement par la circonférence

$$\begin{cases} V_{ch} = A \times \omega \\ \omega = 2\pi f = \frac{2\pi N}{60} \approx \frac{N}{10} \Rightarrow V_{ch} \approx \frac{AN}{10} \end{cases} \quad (1.8)$$

D'où :

V_i : Vitesse d'interaction des abrasifs 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 rotation (tours/min)

t : Temps (s).

A_x et A_y : Les valeurs de l'amplitude d'oscillations 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).

b) 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:

$$a_x = A_x \times \omega^2 \times \cos \omega t \quad (1.9)$$

$$a_y = -A_y \times \omega^2 \times \sin \omega t \quad (1.10)$$

$$\begin{cases} a = A\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \\ a_{max} = A\omega^2 \end{cases} \quad (1.11)$$

c) Force de l'impact des abrasifs :

La force de l'impact des abrasifs 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 daN.

Pour le traitement des pièces fixées :

$$F_{pf} = 6V_i \sqrt{\frac{m \sigma_e R_b k_m k_g}{k_n}} \left(1 - \frac{3}{8}k\right) \quad (1.12)$$

Pour le traitement des pièces libres :

$$F_{pl} = 6V_i \sqrt{\frac{m \sigma_e R_b k_m k_g}{k_n}} B \quad (1.13)$$

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 (daN/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 chargées librement.

d) Energie de l'impact des abrasifs avec les pièces :

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

$$E \approx \frac{HB.d^2}{6D} \quad (1.14)$$

D'Où :

HB : dureté du matériau des pièces à traiter (essai Brinell).

d : diamètre de l'empreinte (mm).

D : diamètre de la bille (mm).

e) La 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 :

$$P_{c \max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{\pi ab} \quad (1.15)$$

D'Où :

F : force de l'impact (daN).

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

a et b peuvent être déterminés par la formule suivante :

$$\begin{cases} a = \vartheta_1 \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{F}{\sum \rho} (\vartheta_1 + \vartheta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \\ b = \vartheta_2 \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{F}{\sum \rho} (\vartheta_1 + \vartheta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad (1.16)$$

D'où :

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

$\sum \rho$: 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 :

$$a = 0,0677 (F \cdot D)^{\frac{1}{3}} \quad (1.17)$$

D : Le diamètre de la bille (média du milieu actif) (mm). [3, 4]

f) Température dans la zone de l'impact :

Le phénomène thermique dans la chambre de travail est considéré comme un résultat de la collision des matériaux. Celui-ci engendre une 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.

La température moyenne dans la chambre de travail en général ne doit pas excéder 30 à 40 °C, et au niveau de la surface de la pièce entre 50 à 70 °C suite aux micros impacts.

$$T = \frac{m \cdot V_i^2}{2} \cdot \frac{1}{427} \cdot \frac{(1-k^2)}{c_s \gamma n v} \quad (1.18)$$

D'où

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

c_s : chaleur spécifique (J.kg⁻¹.K⁻¹).

γ : densité du matériau.

n : coefficient de proportionnalité.

v : volume de l'empreinte (mm³).

m : masse des particules (g).

k : coefficient de régénération (récupération). [4]

I.4. les caractéristiques mécaniques :

I.4.1. Etat de surface (Rugosité) :

En mécanique, l'état de surface est un élément de cotation d'une pièce indiquant la fonction, la rugosité, la géométrie et l'aspect des surfaces usinées.

Une surface usinée n'est pas une surface parfaitement lisse: selon la méthode d'usinage et les outils utilisés, mais aussi selon le matériau, elle présente de nombreuses irrégularités micro-géométriques ou macro-géométriques. Ces irrégularités sont définies par comparaison avec une ligne "moyenne", et sont classées en deux catégories : des aspérités ou "pics", et des cavités ou "creux". L'ensemble de ces défauts de surface constitue la 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 caractéristiques des stries sillonnant la surface.[5]

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:

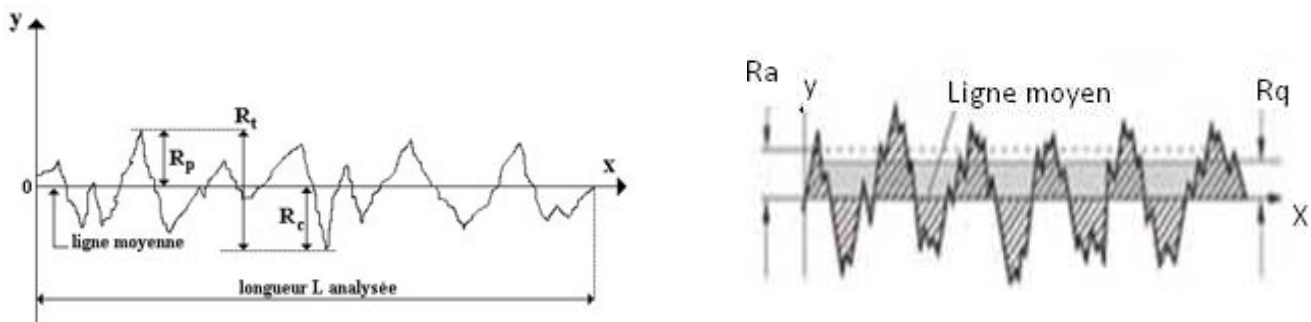


Figure 1.4 Paramètre de mesure de la rugosité [6]

Tableau 1.2 : Représente les différentes rugosités d'une surface et leurs déterminations

symbole	définitions
R_p	Pic maximal 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 $R_p = y_{\max}$ (voir figure1.4)
R_c	Creux maximal observé sur la longueur analysée $R_c : R_c = y_{\min} $ (voir figure1.4).
R_t	Rugosité totale. Elle correspond à la somme du pic maximal et du creux maximal observé sur la longueur analysée. $R_t = R_p + R_c$ (voir figure1.4)
R_z	C'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "R _t " observés sur 5 longueurs.
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. $R_a = \frac{1}{L} \int_0^L y(x) dx \quad (1.19)$
R_q	Moyenne quadratique ou écart moyen 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.[6] $R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (1.20)$

$y(x)$: Ordonnées du profile de la rugosité

Plus l'indice de rugosité est faible, plus il est difficile a obtenir, ce qui augmente nécessairement le cout de fabrication.

I.4.2. Dureté et micro-dureté :

Dans les années 1920 – 1930, trois procédés de mesure statique de la dureté ont été développés successivement et normalisés : les essais de dureté selon Brinell, Vickers et Rockwell. La méthode de mesure est, pour ces trois types d'essais, basée sur la pénétration d'un pénétrateur très dur à la surface d'un matériau. 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.

Les trois procédés se différencient par le type de pénétrateur, la force exercée sur celui-ci, la grandeur mesurée, et le mode de détermination de la valeur de la dureté.

En revanche, les essais de microdureté sont des essais de dureté à l'échelle des différents constituants microstructuraux d'un matériau (polyphasé ou revêtu).

La figure 1.6 définit la géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et microdureté.[7]

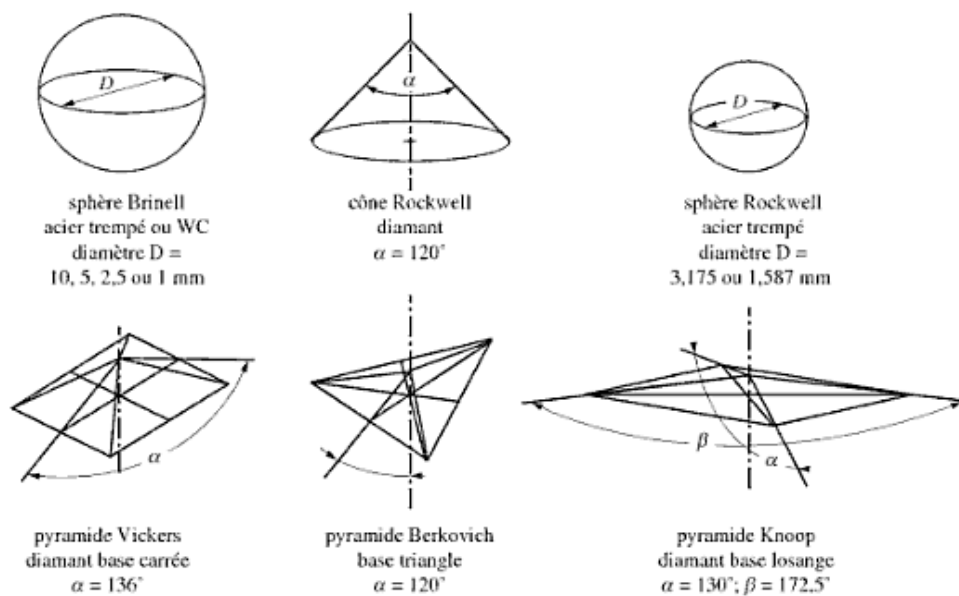


Figure 1.5 géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et microdureté [7]

I.4.2.1 Les différents essais de dureté :

1) Essai de dureté Brinell :

La dureté Brinell est notée HB. Les mesures de dureté Brinell, dont le principe est présenté en figure 1.7 est qui consiste à pénétrer une bille d'acier trempé ou une bille en carbure.

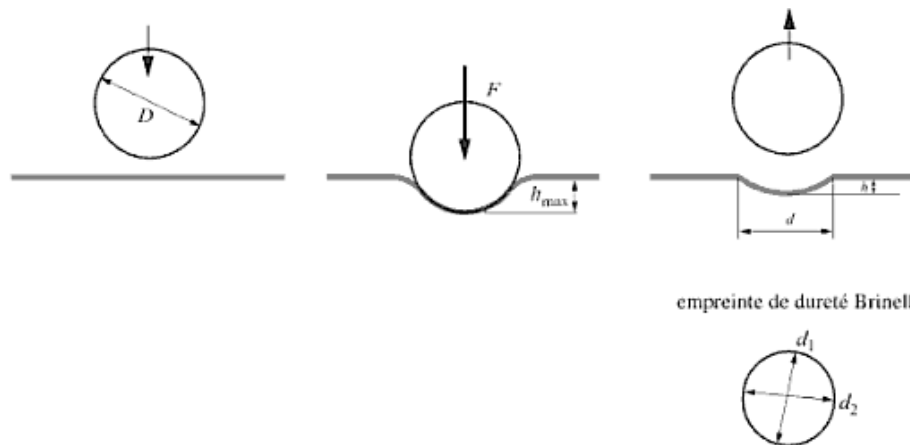


Figure 1.6 Schéma de principe d'un essai de dureté Brinell

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

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

Le pénétrateur doit être appliqué sur une surface lisse (si la pièce n'est pas plate ou lisse on doit la faire passer dans une polisseuse) des pièces traités avec une force donnée avec un maintien a la charge maximale de durée comprise entre 10 à 30 s.

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 trouve 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 :

Tableau 1.3 : représente les différentes charges à utiliser dans la dureté Brinell par rapport au diamètre de la bille et le matériau de la pièce à mesurer

D (mm)	1	2.5	5	10
Matériaux				
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

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

Cette Dureté peut être déduite des formules suivantes :

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} \quad (1.21)$$

F : force appliquée (N).

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

$$A = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2} \quad (1.22)$$

Avec

D : diamètre de la bille (mm).

d : diamètre de l'empreinte (mm).

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 différentes billes).

Afin que les mesures soient reproductibles, il est donc nécessaire de respecter certaines conditions :

- La surface arrière de la pièce ne doit pas présenter de déformation visible (inclinaison, bordure qui sort,...etc.), et l'épaisseur minimale de l'échantillon est donnée par la norme $e_{\min} \geq 8$ fois la profondeur de pénétration de la bille.
- La charge doit être choisie de telle sorte que l'empreinte ne soit ni trop plate (bord de l'empreinte peu lisible) ni trop profonde, c'est pour cette raison que le diamètre de l'empreinte doit être compris entre 0.24 et 0.6 fois le diamètre de la bille.

2) Essai de 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 on distingue plusieurs variantes de cet essai qu'on détaillera plus loin (mesure de microdureté).

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

Pour l'essai de dureté de Vickers, dont le principe est défini sur la (figure 1.8), on utilise comme pénétrateur un diamant épointé de forme pyramidale à base carrée et d'angle 136° entre deux faces opposées (figure 1.6).

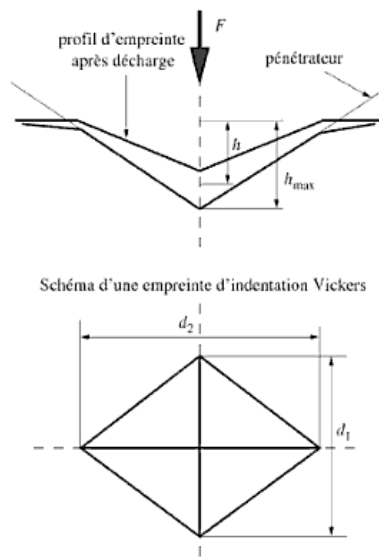


Figure 1.7 Schéma de principe d'un essai de dureté Vickers

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 à 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-la d'essai de microdureté Vickers.

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

$$HV = \frac{\text{Charge d'essai}}{\text{Aire de l'empreinte}} = \frac{1,854 \cdot F}{d^2} \quad (1.23)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1.24)$$

Avec :

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

d₁ et **d₂** : diagonale 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, plus la dureté a grande et la qualité de la surface doit être polie).
- Pour les mesures de dureté d'une couche superficielle durcie, la force de mesure doit être choisie de telle sorte qu'aucune trace de déformation ne soit visible sur la face opposée après l'essai, et de telle sorte que l'épaisseur de la couche soit supérieure ou égale à 1.5 fois la diagonale de l'empreinte d.
- Bien respecter un bon centrage de l'échantillon par rapport à l'axe du pénétrateur pour la mesure de dureté pour les surfaces cylindrique convexe ou sphérique.

3) Essai de 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.

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 (figure 1.6).

La pénétration s'effectue en deux temps à la surface lisse de la pièce. Une charge initiale F_0 est 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 (voir la figure 1.9).

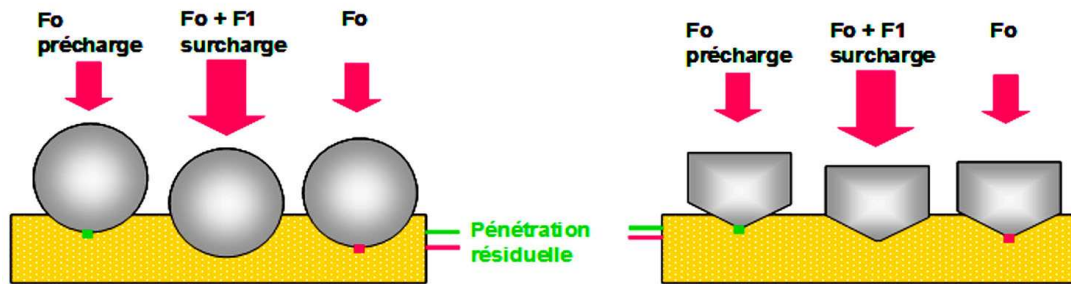


Figure 1.8 Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell

e est appelé profondeur de pénétration résiduelle.

On déduit la dureté de Rockwell de l'accroissement de profondeur de pénétration, mesure entre la troisième et la première opération.

La valeur de Rockwell varie linéairement avec la profondeur de l'empreinte selon une relation dont les paramètres sont normalisés. Ces paramètres constants sont listés selon plusieurs échelles (A, B, C...N, T) correspondant à la nature des matériaux :

$$HR = N - \frac{e}{S} \quad (1.25)$$

Avec

N : des constantes des différentes échelles [$N=130$ (pour les billes) ou $N=100$ (pour les cônes)].

e : profondeur de pénétration résiduelle (mm).

S : facteur [0,002 pour les échantillons massifs conventionnels (échelle de A à K) et 0,001 pour les mesures de dureté superficielle (échelle de N et T)].

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 :

Tableau 1.4 : Représente les pénétrateurs et les diverses charges qui permettent d'avoir un assez grand nombre d'échelles Rockwell

Échelle	Désignation	Pénétrateur	F_0 (N)	F_1 (N)	F (N)	Gamme
A	HRA	Cône diamant	98,07	490,3	588,4	20 à 88 HRA
B	HRB	Bille 1,5875 mm	98,07	882,6	980,7	20 à 100 HRB
C	HRC	Cône diamant	98,07	1373	1471	20 à 70 HRC
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
F	HRF	Bille 1,5875 mm	98,07	490,3	588,4	60 à 100 HRF
G	HRG	Bille 1,5875 mm	98,07	1373	1471	30 à 44 HRG
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

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 où le cône est remplacé par une bille en acier de diamètre 1,587 mm. 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 est la même que la dureté Vickers sauf que la dureté dans la couche superficielle durcie n'est mesurable que par le procédé HRC que si son épaisseur est supérieur à 0.7 mm.[7, 8, 9]

4) Autre essais de dureté :

Essai Shore : il consiste à appliquer un effort tendant à enfoncer un pénétrateur dans le matériau à tester par l'intermédiaire d'un ressort étalonné. La pénétration se traduit par la lecture sur un cadran d'un indice compris entre 0 et 100. Le caractère transportable de l'appareil (scléroscope Shore) le fait utiliser parfois pour de grosses pièces métalliques sur chantier ; sinon, ce type d'essai est appliqué surtout aux polymères et élastomères.

Essai de Mohs : basée sur la résistance à l'abrasion, elle est constituée de dix matériaux de référence (talc, gypse, calcite, fluorite, apatite, feldspath, quartz, topaze, saphir, diamant) dont chacun raye ceux qui sont au-dessous de lui dans l'échelle et est rayé par tous ceux qui sont au-dessus. Dix stylets des matériaux de références sont utilisés pour effectuer les essais. De création ancienne et très imprécise, cette échelle est encore parfois utilisée pour les minéraux.

Essai de rebondissement : il consiste à mesurer la hauteur de rebond d'une masse connue tombant d'une hauteur connue sur la surface du matériau à tester. Cette technique mesure ainsi plutôt la capacité de restitution d'énergie élastique du choc avec le matériau testé et donne un résultat sans relation avec les autres échelles de dureté. L'appareil utilisé comporte une petite masse en acier terminée par un diamant arrondi. Elle tombe en glissant dans un tube de verre et on mesure à la volée la hauteur de son rebond. [10]

5) La comparaison entre des différentes duretés :

On peut d'un seul essai estimer les autres a l'aide des relations empiriques telles que :

$$HB \cong 0,95 HV \quad (1.26)$$

$$HRC = 1/10 HV \quad (\text{Dans le domaine } 200 - 400 HV) \quad (1.27)$$

Tableau 2.5 : Représente la comparaison de différentes duretés Brinell, Rockwell et Vickers

Type d'essai	Préparation de la pièce	Utilisation principale	Commentaire
Brinell	La surface de la pièce ne nécessite pas une préparation extrêmement soignée (tournage ou meulage).	En atelier	La méthode ayant la mise en œuvre la plus facile des trois méthodes.
Rockwell	Bonne préparation de surface (au papier de verre 00 par exemple). La présence de rayures donne des valeurs sous estimées.	En atelier	L'essai est simple et rapide. Convient bien pour des duretés plus élevées (supérieures à 400 Brinell). Elle est plutôt utilisée pour les petites pièces (il est nécessaire que la pièce soit parfaitement stable). La dureté Rockwell présente l'inconvénient d'avoir une dispersion relativement importante.
Vickers	État de surface très soigné (on obtient de petites empreintes, la présence d'irrégularité gêne la lecture).	En laboratoire	C'est un essai assez polyvalent qui convient aux matériaux tendres ou très durs. Il est utilisé généralement pour des pièces de petites dimensions. [6]

II.4.2.2 Essai de la micro-dureté :

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 correspondant est de l'ordre de quelques 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.

Comme pour les mesures de dureté macroscopique, il est indispensable que lorsqu'on donne une valeur de microdureté, de préciser les conditions d'essai en particulier la charge appliquée et vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage), structure micrographique ; elles nécessitent des précautions multiples, comme l'élimination des

vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme du diamant, caractéristiques optiques, précision mécanique).

On trouve plusieurs méthodes pour trouver la valeur de la microdureté :

1) La méthode statique :

La plupart des méthodes statiques couramment utilisées pour mesurer la microdureté, sont basées sur le principe de mesure de l'aire d'une empreinte comme on n'a vu dans les précédentes méthodes de dureté (création d'une empreinte par pénétrateur sous l'action d'une charge, et mesure de l'aire de l'empreinte après décharge) sous très faible charge. On obtient alors une valeur dite statique de microdureté et la valeur correspondent à la microdureté statique H (par exemple : la microdureté selon vickers, HV) est calculée comme suite :

$$H = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{l'aire de l'empreinte}} = \frac{F}{A} = \frac{cF}{d^2} \quad (1.28)$$

Ou :

F : la charge appliquée (N).

A : l'aire de l'empreinte (mm²).

c : une constante caractéristique de la géométrie du pénétrateur.

d : diagonale de l'empreinte générée (mm).

Parmi les plus utilisé dans la microdureté statique on trouve l'essai de Vickers, Comme pour l'essai de dureté Vickers, l'essai de microdureté Vickers identique en tout (le principe, le mode d'utilisation, la méthode de calcul ...etc.) sauf que qu'il est utilise sous charge réduite ou l'essai de microdureté Vickers utilise comme pénétrateur un diamant de forme pyramidale Vickers.

On peut distinguer plusieurs charges quand on peut utiliser dans ce procédé dans ce tableau :

Tableau 1.6 : représente les charges quand peut utiliser dans le procédé Vickers

Désignation	Charge (N)
HV _{0,01}	0,09807
HV _{0,015}	0,1471
HV _{0,02}	0,1961
HV _{0,025}	0,2452
HV _{0,05}	0,4903
HV _{0,1}	0,9807

Un microduromètre est composé d'un appareil de mesure de dureté et d'un microscope. Pour l'évaluation des très petites empreintes de microdureté on utilise un microscope électronique à balayage.

2) La méthode de Knoop :

La méthode Knoop de mesure de microdureté est particulièrement intéressante, le pénétrateur utilisé est un diamant de forme pyramidale à base losange, dont les diagonales sont sensiblement dans un rapport 7/1 (fig. 1.6). Son avantage est la dimension d'empreinte suffisamment importante pour une charge néanmoins très faible.

La dureté Knoop notée HK, est calculée comme suite :

$$HK = \frac{\text{charge appliquée}}{\text{surface}} \approx 14,23 \cdot \frac{0,102 \cdot F}{l^2} \quad (1.29)$$

Ou :

F : la charge appliquée (N).

l : le plus grande diagonale de l'empreinte (mm).

3) La méthode universelle :

La méthode universelle de mesure de microdureté a des concepts différents de ceux utilisés pour les mesures statiques.

La valeur de la dureté universelle ou dureté dynamique est noté HU, celle-ci représente une autre grandeur par rapport aux duretés Vickers (HV), Brinell (HB), Rockwell (HRC et HRB).

L'évaluation de la microdureté s'effectue par mesure de la profondeur de pénétration de pénétrateur [pénétrateur Vickers (pyramide à base carrée), pénétrateur Brinell (sphère), pénétrateur Knoop (pyramide à base losange) ou un pénétrateur Berkovitch (pyramide à base triangulaire)] (les géomètres des différents pénétrateurs sont définies à la figure 1.6).

La dureté universelle mesurée est définie comme suit :

$$HU = \frac{\text{La force maximale appliquée}}{\text{l'aire de l'empreinte}} = \frac{cF}{h^2} \quad (1.30)$$

Ou :

F : la force maximale appliquée (N).

c : constante caractéristique de la forme du pénétrateur.

h : la profondeur de pénétration lors de l'application de la force maximale (mm).

Les mesure de microdureté sont également utilisées pour caractériser les couches traitées superficiellement dans leur épaisseur (couche nitrurées, carburées, carbonitrurées....), pour mesuré l'écrouissage superficiel d'une pièce. Et parmi les méthodes de microdureté en trouve le pénétrateur Knoop est particulièrement intéressant pour caractériser les couches superficielles dans leur épaisseur, en raison de sa faible dimension dans une direction de pénétration.

La profondeur (épaisseur) de la couche superficielle qui est déterminée par l'équation connue.[7]

$$a = \sqrt{\frac{F}{\sigma}} \quad (1.31)$$

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)

I.4.3. Structure :

Un ensemble mécanique est constitué d'un certain nombre de pièces bien définies dont la description détaillée est indispensable à la fois à la réalisation de l'ensemble et à la compréhension de son fonctionnement. De même, chacune des pièces est constituée d'un ensemble de parties dont la disposition constitue la structure de la pièce ;

- ✓ **La macrostructure :** ou l'on analyse la pièce à une échelle de l'ordre de 0,1 mm (quelques micromètres à 1cm). Par exemple, il est souvent utile de distinguer :

—Les différentes couche superficielles (par exemple : couche cémentée, revêtements protecteurs ou décoratifs, rechargements).

—Les différentes parties des matériaux composites (par exemple : produits composites frittés pour garnitures de frein,....).

—Le fibrage dans le cas de pièces forgées.

- ✓ **La microstructure :** où l'analyse se fait à une échelle allant de 1Å à plusieurs dizaines de micromètres. La description est alors celle des différentes phases et des structures cristallines qui la composent. A la figure 1.9, nous donnons un exemple de ces différents niveaux de description, dans le cas d'une pièce mécanique cémentée.

Comme l'était celle des pièces d'un ensemble mécanique, la description des structures des pièces est utile pour leur réalisation (par traitement thermique et traitement superficiel d'un matériau adapté) et pour la bonne compréhension de leurs propriétés mécaniques. Nous développons donc, ci-après, quelques notions fondamentales relatives à la description des structures rencontrées couramment en mécanique et les moyens dont nous disposons pour les caractériser.

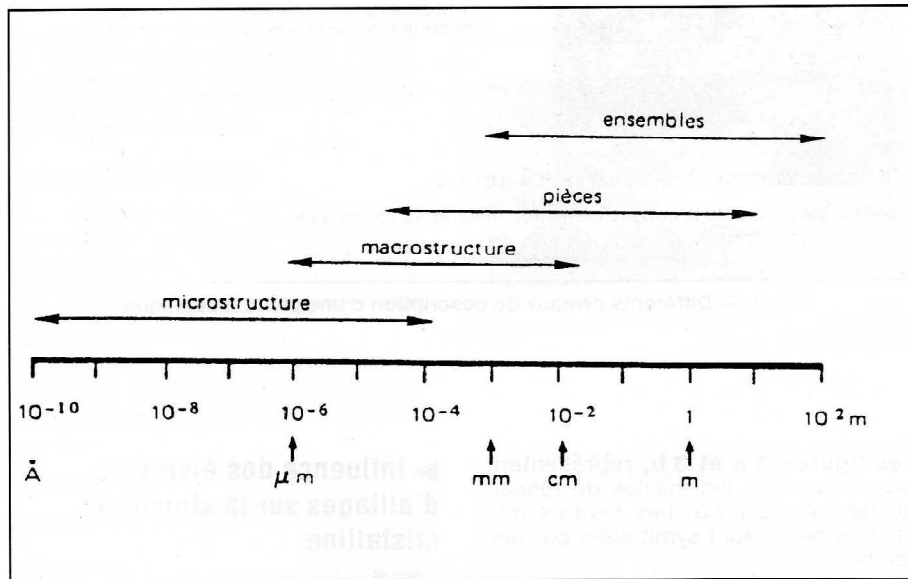


Figure 1.9 : Echelles correspondant aux divers niveaux de description des constructions mécaniques

1) Les structures vues par le mécanicien :

Il est rare en dehors des industries à vocation métallurgique que l'on parle de lacunes, de dislocations ou autres noms évoqués précédemment. Dans les industries, on limite le plus souvent l'exploration structurale à la microscopie optique.

La plupart des constituants que l'on peut observer dans ces conditions sont indiqués sur la figure 1.10.

Outre ces éléments, on identifie également certains des défauts évoqués précédemment s'ils ont une taille suffisante pour être observés aux grossissements classiques utilisés en microscopie optique. C'est ainsi que l'on peut observer sur les microphotographies, grains, précipités et inclusions.

Exemple : En ce qui concerne les constituants de l'acier, ils sont en fait définis à partir des éléments de la microstructure tels que nous les avons décrits au paragraphe précédent.

Ainsi, par exemple, on peut dire très grossièrement que le constituant ferrite de la figure 1.10(a), est construit par la répétition d'une maille cubique centrée dans l'espace et que cet édifice contient des atomes en insertion (0,02 % C au maximum), 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.

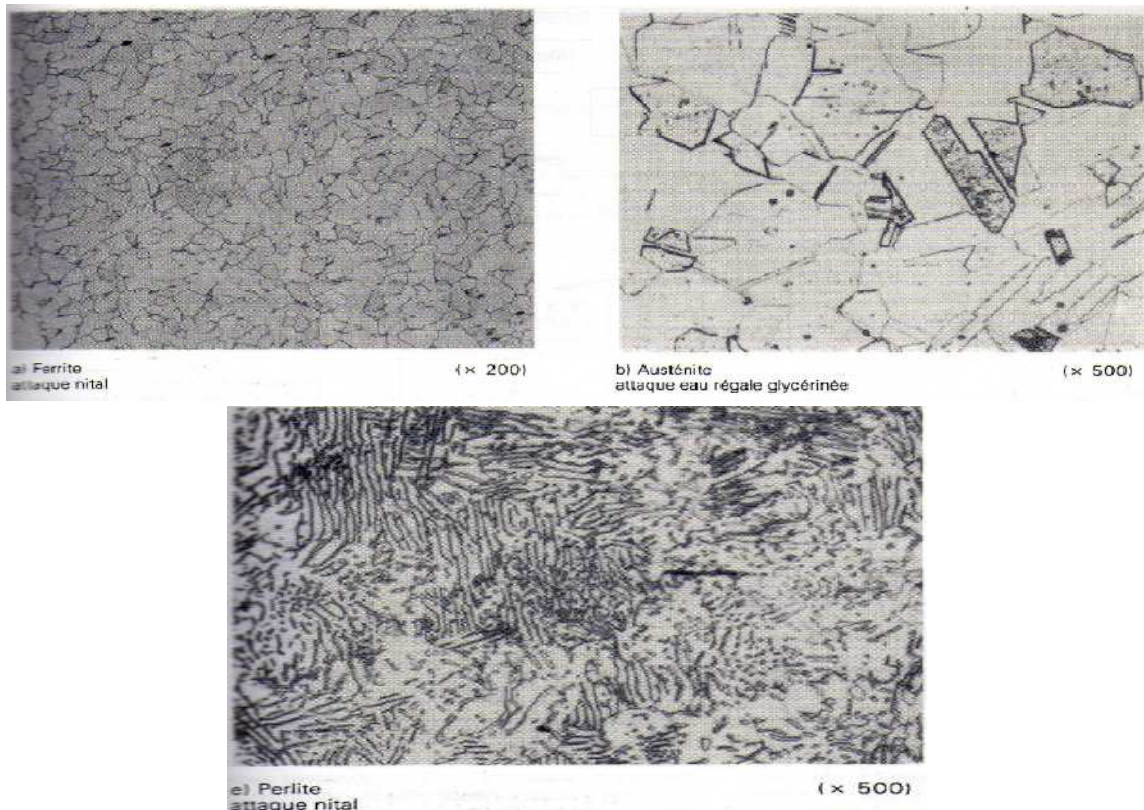


Figure 1.10 Les constituant qu'on peut observer sur un acier [11]

2) Cas pratique de l'acier :

Nous allons passer en revue les différents éléments de microstructure, en commençant par la notion de phase (tout matériau est constitué sous divers états que l'on appelle une phase).

A l'échelle microscopique, la description des structures est intéressante car elle permet d'en déduire les propriétés mécaniques des aciers.

Les aciers, alliages Fe-C à teneur inférieure à 2 % C, ont des microstructures qui correspondent toujours aux équilibres du diagramme Fe-Fe₃C. Ils traversent tous le domaine monophasé γ au cours de leur refroidissement et contiennent à l'équilibre une plus ou moins grande proportion du mélange eutectoïde lamellaire ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$) formé en E₁ appelé perlite.

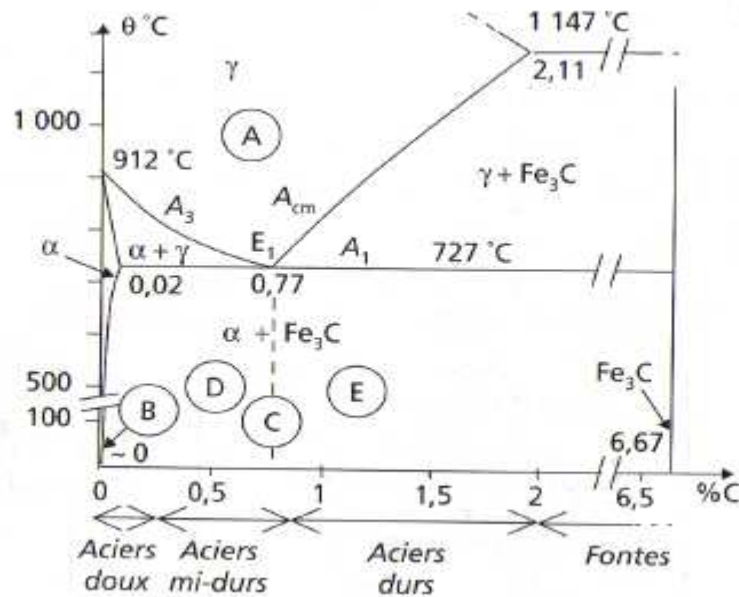
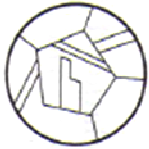
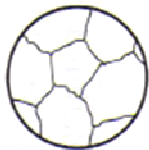






Figure 1.11 Diagramme de phase des aciers au carbone non alliés [10]

Tableau 1.7 : Représente les différentes phases qu'on trouve dans un diagramme d'aciers au carbone non alliés

<p>(A)</p>	<p>Austénite Solution solide cfc de carbone dans le fer γ. Ductile et Stable uniquement au-dessus de la ligne A_1, dans les aciers non alliés.</p>	
<p>(B)</p>	<p>Ferrite Solution solide cc de carbone dans le fer α. Ductile et peu dure ($R_e = 300$ MPa, $HV = 80$, $A = 50$ %).</p>	
<p>(C)</p>	<p>Perlite Mélange eutectoïde d'environ 88 % de ferrite et 12 % de cémentite sous forme de fines lamelles alternées ($R_e = 800$ MPa, $HV = 200$, $A = 10$ %).</p>	
<p></p>	<p>Cémentite Composé défini Fe_3C. Carbure de fer à structure cristalline orthorhombique. Très dur et fragile ($HV = 700$, $A = 0$ %).</p>	
<p>(D)</p>	<p>Ferrite + perlite Mélange caractéristique des aciers hypoeutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone. Les grains de ferrite germent le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine $\alpha + \gamma$.</p>	

E	<p>Perlite + cémentite</p> <p>Mélange caractéristique des aciers hypereutectoïdes. Proportions variables selon la teneur en carbone, mais n'excédant jamais 20 % de cémentite dans les aciers.</p> <p>Le réseau de cémentite se forme le long des joints de grains de l'austénite au refroidissement à la traversée du domaine $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$. [10]</p>	
---	---	---

I.4.4. Contraintes résiduelles :

Tous les traitements mécaniques de finition (rectification fine, polissage au carborundum, à l'alumine, au diamant, vibro-abrasion, ...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.

On définit généralement les contraintes résiduelles comme étant les contraintes qui subsistent (restent) dans les pièces mécaniques. Celle-ci est générée par quasiment tous les processus de production et techniques de traitement utilisées.

Ces contraintes sont en équilibre sur l'ensemble du volume que constitue un composant ou une structure mécanique.

La conception de matériaux en fonction de l'application nécessite une prise en compte des contraintes résiduelles ciblées pour améliorer les performances et augmenter les capacités (ex. durée de vie, dureté, résistance, fatigue).

Des contraintes résiduelles existent dans pratiquement tous les matériaux solides, métalliques ou non métalliques (bois, polymère, verre, céramique,....etc.).

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

— **contraintes de 3^{ème} ordre, à l'échelle du cristal.** On atteint à ce niveau, la limite de la notion de contraintes. Ce sont les actions créées par tous les types de défauts cristallins dans les grains : lacunes, interstitiels, atomes en substitution, dislocations, défauts d'empilement, macles ;

— **contraintes de 2^{ème} ordre** dues à l'hétérogénéité et à l'anisotropie de chaque cristal ou grain dans un matériau polycristallin. Lors d'une sollicitation mécanique (traction uniforme d'une éprouvette lisse par exemple), certains grains orientés favorablement atteindront avant d'autres la limite d'écoulement, ce qui provoquera une hétérogénéité du comportement lorsque la charge sera supprimée. Les retours élastiques se feront donc différemment et plus ou moins librement suivant les grains, ce qui conduira ceux-ci dans des états de contraintes résiduelles du 2^{ème} ordre non nulles. Cependant, la moyenne de ces contraintes, c'est-à-dire la

résultante générale suivant l'axe de traction, sera nulle à la fin de l'essai (contrainte résiduelle du 1^{er} ordre). Ce type de contraintes pourrait être mesuré par diffraction des rayons X.

— **contraintes résiduelles de 1^{er} ordre**, ou macroscopiques, qui se situent à l'échelle d'un grand nombre de grains ou de la pièce mécanique. Elles sont accessibles à la mesure, par exemple à l'aide de jauges qui détectent les déformations qu'elles produisent et par rayons X.

Ces trois types de contraintes résiduelles interviennent les unes sur les autres. Ce sont bien sûr les contraintes du premier ordre ou macro-contraintes qui intéressent le mécanicien ou les bureaux d'études. Mais les contraintes résiduelles de 2^{ème} ordre sont également très importantes, car elles sont l'indicateur de l'état d'écrouissage et d'endommagement du matériau.

Les origines des contraintes résiduelles sont très diverses. Elles peuvent être séparées en trois catégories : mécanique, thermique et métallurgique. On assiste souvent à une combinaison de ces différentes causes pour la genèse des contraintes résiduelles (figure 1.14).[9]

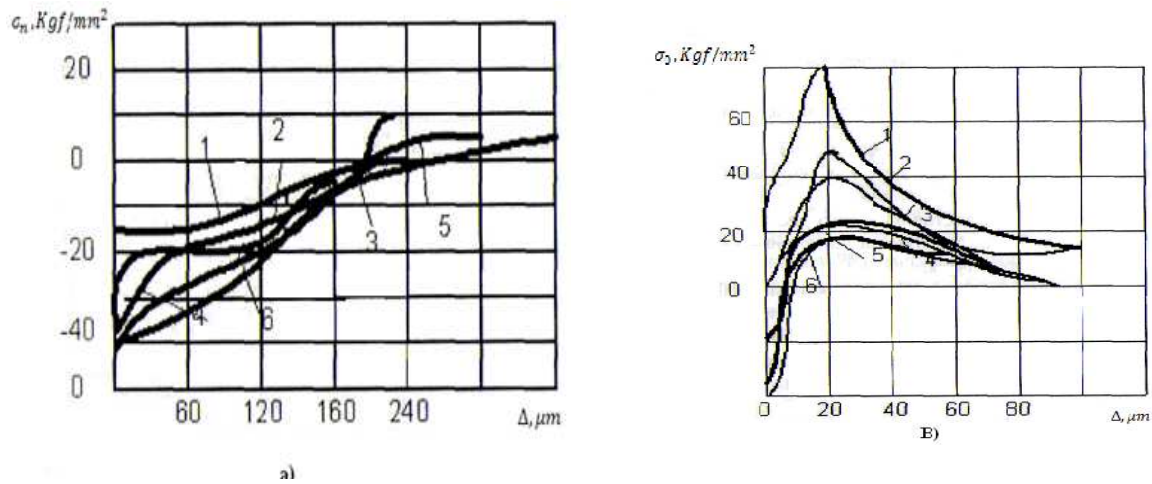


Figure 1.12 origine des contraintes résiduelles [9]

Cas pratique :

Pour bien expliquer les contraintes résiduelles nous avons effectué des recherches sur les différents échantillons à surface plane en acier à l'état recuit et trempé en effectuant le traitement de vibro-abrasion.

Les résultats de traitement sur la (figure. 1. 15).



N°	Duré du traitement (min)	N°	Duré du traitement (min)	N°	Duré du traitement (min)
1	30	3	90	5	240
2	60	4	120	6	480

Figure 1.15 Distribution des contraintes résiduelles sur la couche superficielle d'échantillons en acier: (a) recuit et (B) trempé

Pour les échantillons en acier recuit dans l'intervalle de traitement des couches superficielles (5 - 60 μm), on constate d'après le schéma que les contraintes résiduelles se trouvent à l'état de compression et suit l'interaction d'un ensemble de micro-impact, les particules sur la couche traitée superficielle, et la déformation de cette dernière.

Pour les échantillons en acier trempé, on constate que sur la couche superficielle mince (5 - 20 μm), la répartition des contraintes résiduelles plus ou moins se retrouvent à l'état de traction, La compression des contraintes résiduelles d'après le diagramme varie entre 15 et 38 daN/mm^2 , où la durée du traitement est plus grande et peut aller jusqu'à 480 min.[12]

Chapitre II

Méthode d'études expérimentales

II.1. Les différents équipements de la vibro-abrasion:

Dans le traitement de vibro-abrasion il y a peu d'industries qui fabriquent ce genre de matériel mais on peut voir dans certaines industries comme Rösler (Russie), ABC Swiss Tech (Suisse)...etc, plusieurs types de ces machines.

Parmi les différents équipements de vibro-abrasion :

II.1.1. Les vibrateurs circulaires :

Ils sont les plus utilisés en vibro-abrasion. Ils peuvent être utilisés dans une large gamme d'applications. Les vibrateurs circulaires peuvent intégrer des installations automatisées grâce à l'adaptation des matériels périphériques.[13]

Rep	Désignation
1	Cuve de traitement
2	Balourds
3	Pompe
4	Réservoir de vidage pour les épouses toxiques
5	Moteur
6	Ressort d'amortissement
7	Tuyau de vidange
8	Tuyau d'arrosage
9	Abrasifs+ pièces+additif chimique

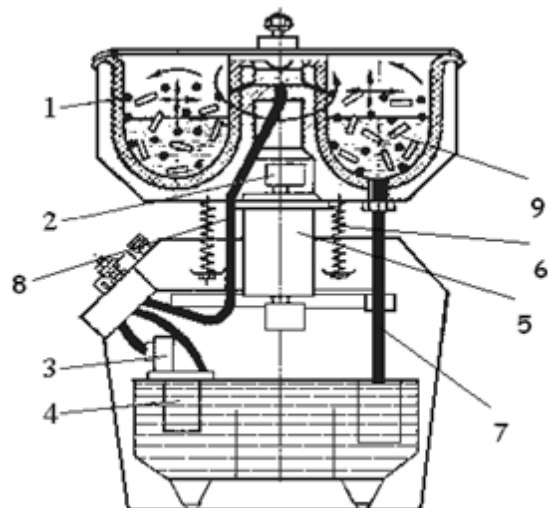


Figure 2.1 schéma d'un vibrateur circulaire [3]

Le traitement s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moteur balourdé 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 (savon), sont brassés dans la cuve (voir figure 2.1).

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

Les pièces sont transférées via le tamis de séparation à l'extérieur du vibrateur pour être ensuite séchées dans un sécheur circulaire, les médias restants retournent dans la cuve de traitement.



Photo II.1 Vibrateur circulaire

Les domaines d'application des vibreurs circulaires sont extrêmement flexibles et évolutifs et permettent plusieurs types de traitements : 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, les vibreurs circulaires offrent une multitude de solutions en finition.

Il y a plusieurs types de vibreurs circulaires qui se différencient par la forme et la dimension de la cuve:

➤ **Les vibreurs circulaires à grand rayon :**

Le plus grand avantage des vibreurs circulaires à grands rayons est la possibilité de pouvoir utiliser un système de production continu. Leur haut degré de flexibilité offre des avantages significatifs pour les plannings de production, favorisant ainsi la réduction du temps de traitement à un coût plus économique.

Par ailleurs, ils nécessitent un faible encombrement au sol.

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

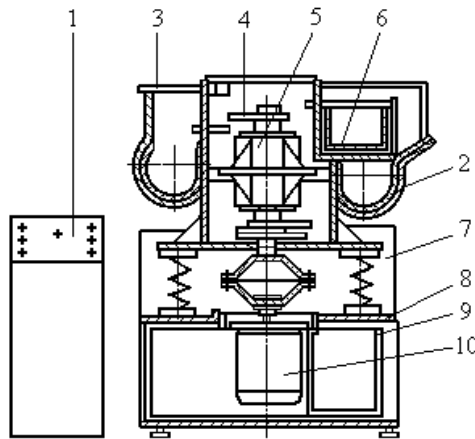
La cuve comporte une double paroi toroïdale de largeur et profondeur égales.

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 2075 mm à 3050 mm et un volume supérieur à 500 dm².

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

➤ **Vibrateurs circulaires hélicoïdaux :**



Rep	Désignation
1	La commande de la machine
2	cuve
3	Couverture
4	balourd
5	Arbre à moteur
6	pont
7	ressorts hélicoïdaux
8	Base
9	Réservoir
10	Moteur électrique

Figure 2.2 Schéma machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale

Le traitement est accompli dans une cuve sous forme hélicoïdale 2 (figure 2.2) montée sur un ressort hélicoïdal 7, à l'aide d'une commande de mise en marche et d'arrêt 1.

Un moteur électrique 10, monté en bas de la base 8 de la machine.

Le moteur fournit de l'énergie à l'arbre 5 qui est fixé sur les balourds 4 qui permet à la machine de vibrer.

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

➤ **Vibrateur circulaire spiral :**

La machine Rotomatic est particulièrement adaptée pour l'ébavurage, le décapage, le nettoyage, le rayonnage et d'autres applications. Ce nouveau concept 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).

Dans ce vibrateur la zone de séparation est directement intégrée dans le bol, ce qui économise l'espace et l'argent. [13]

II.1.2. Les machines à force centrifuge :

C'est une méthode de traitement des surfaces qui existe dans différents pays mais dans chaque pays le nom est différent. Ainsi, en Pologne - cascade de rotation, Allemagne - rotor de finition, et dans notre pays - une pompe centrifuge rotative.

La machine à force centrifuge 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.[14]

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.

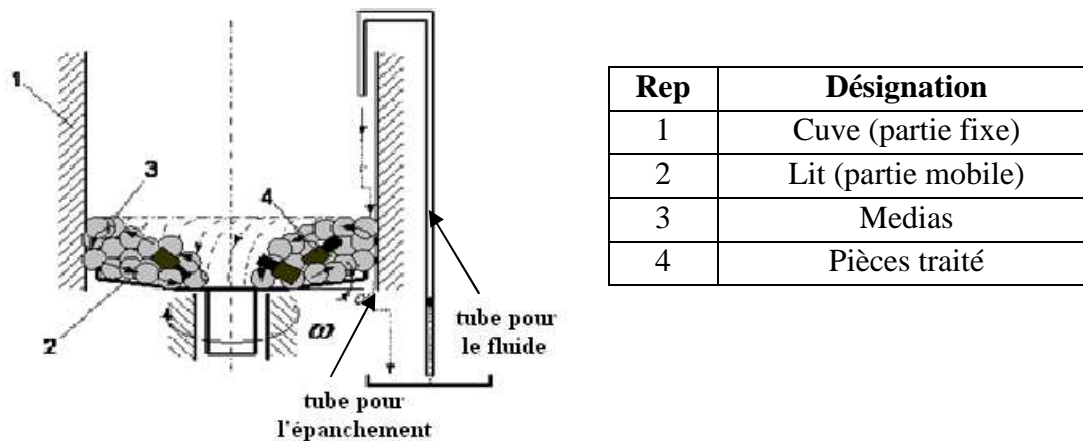


Figure 2.3 schéma d'une machine à force centrifuge [4]



Photo II.2 Machine à force centrifuge

L'essence de la méthode de traitement rotatif centrifuge est que les abrasifs 3 et les pièces 4 (Figure 2.3) 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 fixe en position verticale cylindrique 1 et un lit pour la rotation 2 (Figure 2.3). 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 utilisés 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 ou moteur hydraulique. Comme dans les autres gammes de vibro-abrasion on peut utiliser différents médias : abrasifs à différentes formes, billes de porcelaine, 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;

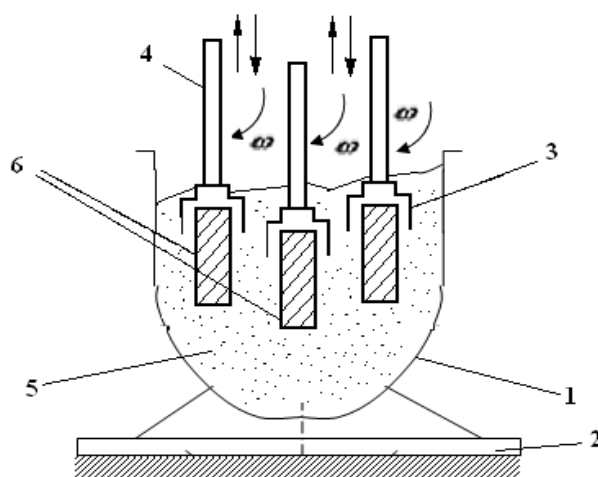
La rugosité de la surface usinée avec le traitement d'un vibreur à force centrifuge dépend des caractéristiques suivantes :

- 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. [4]

II.1.3 Les machines multibroches :

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.



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

Figure 2.4 schéma d'une machine multibroche

Durant le traitement, les pièces, fixées par l'intermédiaire des broches 3 (voir figure 3.4) 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 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.



Photo II.3 Machine multibroche

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 avantages du système multibroches est :

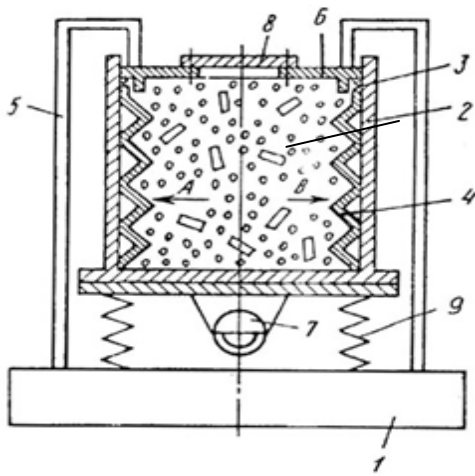
- Machines équipées de plusieurs broches porte pièces rotatives permettant de fixer une ou plusieurs pièces.
- Vitesse variable en continu.
- Possibilité d'inversion de sens de rotation de l'anneau.
- Le mouvement satellitaire des broches peut être activé ou interrompu.
- Les vitesses de rotation de l'anneau et des broches sont indépendantes.
- Angle d'inclinaison des broches réglables.
- Broches à pince automatique pour échange rapide des pièces.
- Verrouillage commandé par pédale [13]

Remarque :

Il existe une machines mono-broches qui consiste à un traitement pouvant aller d'un polissage agressif au brillantage, il est plus utilisé pour les jantes des véhicule (il a le même mode d'utilisation que les machines multibroche sauf qu'il est équipé d'une seule broche).

II.1.4 Les Vibrateurs linéaire :

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



Rep	Désignation
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	Moteur
8	Couvercle secondaire de trappe pour un dispositif de fixation des pièces
9	Ressorts hélicoïdaux

Figure 2.5 schéma d'un vibrateur linéaire



Photo II.4 Vibrateur linéaire

Le traitement s'effectue dans une cuve 2 (sous forme U) de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux 9. Un vibrateur 1 monté au centre de la cuve fournit l'énergie nécessaire aux vibrations. Les pièces et médias (abrasifs) 3, auxquels sont ajoutés l'eau et un additif chimique (savon) sont brassés dans la cuve de traitement dans une action linéaire rotative (voir la figure 2.5).[3]

II.2. Les milieux actifs et additifs chimiques :

II.2.1. Les abrasifs :

Les abrasifs ou médias sont des ingrédients de la vibro-abrasion qui sont appelés des chips, il en existe plusieurs types à employer dans les machines vibrantes ; les abrasifs (chips) sont différents 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 tétraèdres,... ect.



Photo II.5 : Quelques exemples sur les différents abrasifs

Ils possèdent deux caractéristiques importantes :

- la dureté qui leur permet d'attaquer les matériaux plus tendres.
- la taille des grains qui engendre l'état de surface final (la rugosité).

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 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 abrasifs il est nécessaire de prendre en compte l'opération, à réaliser :

- Matériau en abrasif pour des opérations de polissage, ébavurage....etc.
- Matériau non abrasif pour des opérations de finition.

- Les matériaux métallique (bille, rouleau,...) pour le durcissement superficiel, par exemple pour la réalisation des opérations grossière « ébauche » (l'enlèvement des grosses bavures).

Quand on a besoin d'enlever plus de matière, on utilise des abrasives hautes duretés avec grosse granulation (abrasifs de grandes tailles et lourds) et aussi pour les opérations de nettoyage des pièces brutes moulées. Pour les opérations de finition pour avoir un bon état de surface on utilise beaucoup plus les abrasifs à granulation fine moins agressifs (abrasif de petite taille et léger).

La composition de l'abrasif est déterminée par son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce, par exemple pour ces métaux et les alliages non ferreux on utilise des billes en verre (ce choix a été fait par l'état des surfaces initiales et celle qu'on veut obtenir).[13]

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

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 supérieur à la dimension de l'alésage ou bien les cavités d'une pièce qui sera traitée 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.

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 sans oublier que la taille et le poids de l'abrasif peut entraîner des déformations de la pièce à traiter si pour cette raison pour traitement des pièces dans le but de ne pas déformer la pièce il est nécessaire d'utiliser la granulation à petite dimension et à petit poids.

Dans le tableau suivant on cite quelques exemples des particules utilisées dans le milieu actif pour les différentes opérations.

Tableau 2.1 : Représente quelque exemple des particules utilisé dans le milieu actif pour les différentes opérations [12]

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

II.2.2. L'additif chimique

Ils sont la base parfaite de tous les procédés de traitement de surface. 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 de rajoutant des additifs chimiques au traitement pièce avec abrasif.

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 d'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.

1) Additif 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 cela 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.

Le lubrifiant les plus utilisés sont l'activateur chimique en milieu acide et basique, dans le but d'élargir et de renforcer leur action en 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, elle 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.

La classification des fluides et leur propriété, on divisé en trois groupe 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.

Tableau 2.2 : Représente les différentes compositions de l'additif chimique liquide recommandé pour différentes opérations [12]

N°	Composition des additifs chimiques	Symbole	Concentration	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	Perchlorure de fer	[FeCl ₃]	2 – 10	Assure une couleur éclatante pour l'état de surface
8	polyacrylamides	$\left[\begin{array}{c} -CH_2 - CH - \\ \\ CONH_2 \end{array} \right]_n$	10	Assure la brillance du métal

2) Les 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 ces poudres on trouve :

Tableau 2.3 : Représente quelques exemples des différents additifs chimiques poudre recommandés pour les opérations [15]

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 fin	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	Bien adaptée pour des travaux d'ébavurage puissant. 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

3) L'additif pâte :

Les pâtes sont utilisées avec des abrasifs en vibrateurs circulaires et machines à force centrifuge pour obtenir une finition lisse et très brillante sur des surfaces sensibles. Elles sont adaptées à tous les problèmes spécifiques car elles peuvent être utilisées comme pâte de polissage ou d'ébavurage.

Ces mêmes pâtes s'accordent à la structure des surfaces et les affinent de façon économique en respectant l'environnement.

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

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 différents types de pâte on trouve :

- Pâte de polissage et d'ébavurage.
- 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.[13]

Chapitre III

Recherche expérimentale

Le traitement des métaux par le procédé de vibro-abrasion, génère des modifications géométriques, physico-chimiques et structurales des matériaux traités.

L'objectif du travail consiste à effectuer un traitement de vibro-abrasion sur des échantillons de matériaux différents et ainsi pouvoir :

- ✓ Déterminer l'évolution de l'état de surface des échantillons traités.
- ✓ Définir la perte de masse enregistrée.
- ✓ Observer les transformations de la microstructure.
- ✓ Voir le comportement mécanique (dureté).

III.1. Matériel d'expérimentation :

Machine : **RC 230** RC : Reni Cirillo (Le nom de la société S.p.A)

230 : La capacité de la machine (le volume) = 230 dm³

Type de machine : Vibrateur circulaire.

L'amplitude et la fréquence sont préréglées : Amplitude : 3mm

Fréquence : 50 Hz

La puissance du moteur et le voltage : La puissance du moteur : 1.5 kW

La tension d'alimentation de la machine : 380 V

Le volume des pièces à traiter (ou de la cuve) = 1/3 la capacité de la machine

= 230/3 = 77 dm³

Moteur balourdé avec 2 vitesses de rotation (1500 t/mn et 1000 t/mn) à 50 Hz.

Revêtement polyuréthane moulé à chaud de la cuve.



Photo III.1 : Vibrateur RC230

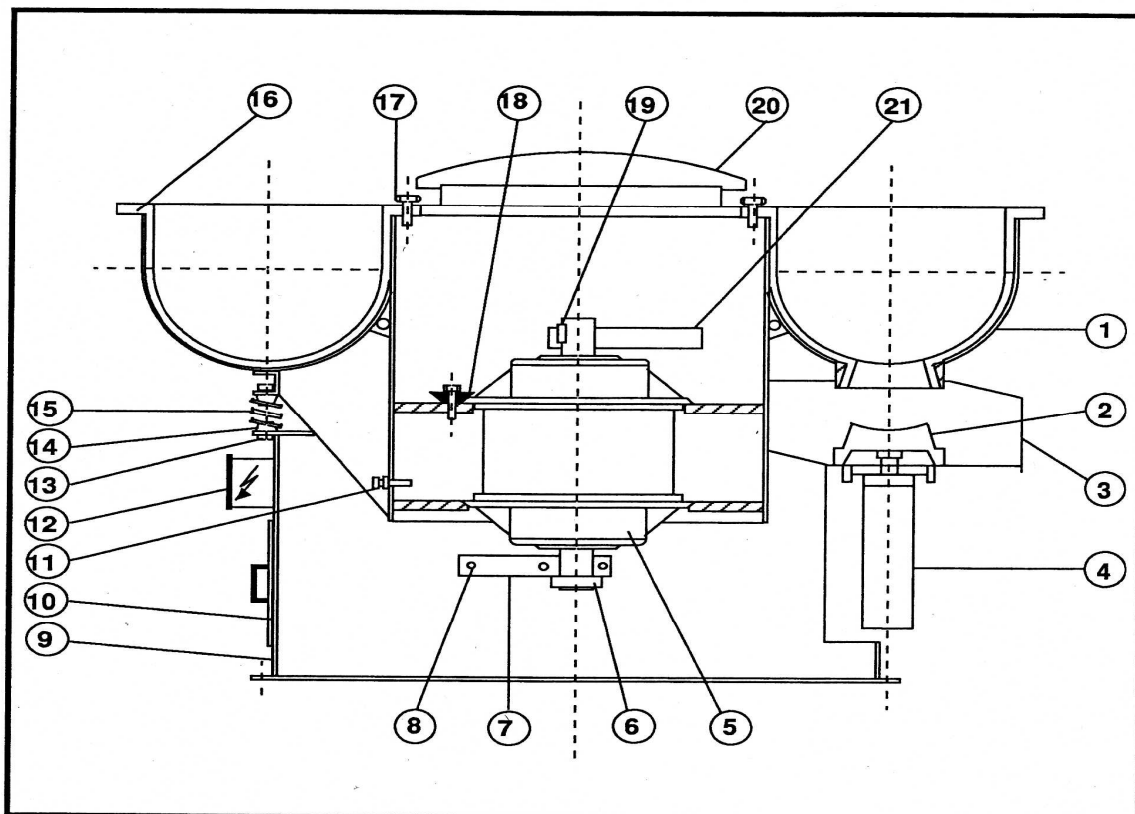


Figure 3.1 Schéma du vibrateur RC230

Rep	Désignation	Rep	Désignation	Rep	Désignation
1	Cuve	8	Balourd auxiliaire	15	Ressort
2	Bouchon déchargement pièces	9	Base	16	Revêtement cuve
3	Trémie déchargement pièces	10	Porte d'inspection	17	Boulons fixage couvercle moteur
4	Cylindre pneumatique de commande déchargement pièces	11	Serre-câbles moteur	18	Blocs fixage moteur
5	Moteur électrique	12	Boîte de dérivation	19	Clavette fixage du balourd supérieur
6	Bague graduée	13	Boulons de fixage douilles	20	Couvercle moteur
7	Balourd inférieur	14	Douilles	21	Balourd supérieur

III.1.1 Procède de la machine :

Le vibreur exploite le mouvement des pièces et des médias pour la finition des surfaces.

Les parois intérieures de la cuve du vibreur qui est de forme annulaire donnent à la masse (chips+pièces) à traiter une force vibrante tri-dimensionnelle.

Les différents réglages angulaires des balourds, les différentes formes des chips, les quantités d'eau, l'additif + 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.

III.1.2 La correction de la machine : Ci- dessous le tableau suivant :

Tableau 3.1 : Représente la correction de la machine

Causes possibles ou problème de la machine	Conséquences
Force d'avancement du matériel insuffisant	<ul style="list-style-type: none"> - Trop peu d'eau dans la cuve. - Quantité de chips insuffisante. - Angle des balourds est trop petit.
Force d'avancement du matériel excessif	<ul style="list-style-type: none"> - Excès de chips. - Angle entre les balourds trop grand.
Procédé trop délicat	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité d'eau insuffisante. - Additif en excès ou visqueux. - Chips trop petits.
Procédé trop violent	<ul style="list-style-type: none"> - Chips trop grands. - Présence d'additif à PH acide. - Quantité d'eau insuffisante

III.1.3 Les règles de l'installation de la machine :

- La machine doit être placée sur une surface parfaitement plane parce que la moindre inclinaison peut interférer sur la rotation des pièces et médias dans la machine.
- La machine doit être attachée à sa base par des boulons fixés au sol pour éviter à la machine de vibrer lors de son fonctionnement.
- La fixation 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.
- A 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.
- L'accès à la porte base de la machine doit être libre pour permettre les opérations de réglage.

III.2 Les caractéristiques du milieu actif utilisées pour le traitement :

III.2.1. Abrasifs (chips):



Photo III.2 Les abrasifs ou chips



Figure 3.2 Dimension de l'abrasif

Forme : Prisme

Dimension : $a = 5 \text{ mm}$
 $b = 5 \text{ mm}$

Le poids d'un seul abrasif est : 0.326 g

Composition des chips : abrasif en céramique

La proportion des chips est :

$$\begin{aligned}\text{Volume des chips} &= 2/3 \text{ de la capacité de la machine} \\ &= (2 \cdot 230) / 3 = 153 \text{ dm}^3\end{aligned}$$

Quantité d'abrasif utilisée pour le traitement est : 75 kg

III.2.2. Additif chimique :

Additif chimique : mélange de tensio-actif.

Structure : tensio-actif anionique de la famille de lauryl ether sulfate.

Forme : liquide base (PH < 7).

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

Odeur : aucune odeur.

Quantité : 7 L d'eau (pour que les pièces et medias soit émergés dans l'eau).
1 L d'additif chimique.

Pour la quantité d'eau on peut mettre :

Peu d'eau : tendance à travailler avec forte abrasion.

Beaucoup d'eau : tendance à travailler avec peu d'abrasion.

III.3 Les matériaux utilisés :

Nous avons utilisé des échantillons de différents matériaux (Acier non traité, Acier traité, Fonte, Aluminium, Bronze) de forme cylindrique, cubique, hexagonale,...etc, découpés à partir d'une barre de dimensions différentes (au sein de l'école nationale polytechnique dept. Génie mécanique).

Matériaux ferreux :

- Acier non traité :
- Acier doux brut : c'est un acier de construction à usage général. C'est un acier non-allié, à faible taux de carbone. Sa limite d'élasticité $R_e = 240 \text{ N/mm}^2$
- Acier doux usiné : il a les mêmes caractéristiques que l'acier doux brut sauf qu'il a subit une finition d'usinage.

- Acier traité : ce sont des aciers faiblement alliés

Tableau 3.2 : Caractéristiques métallurgiques des matériaux traités

Le matériau	Traitements	Caractéristiques	Composition	Utilisation
Acier faiblement allié (acier Cr)	Forgeage entre 900° et 1000° Trempe à l'huile : 825° à 840° Trempe à l'eau : pièce massives 800° Revenu : 180° - 250°	Dureté Rockwell : 61 – 62 HV R = 215 – 225 kg/mm ² Jaune pâle	C : 1 Cr : 1,3 Mn : 0,3	Outils de découpage Matrice à froid alésoirs Billes de roulements
Acier faiblement allié (cémenté)	Forgeage entre 850° et 1100° Trempe à l'huile : 825° à 850° Revenu : à 200° cémenté	Dureté Brinell : 140 – 170 HB R = 130 kg/mm ²	C : 0,12 Ni : 3 Cr : 0,8	Engrenages Axe de piston Organes de direction
Acier faiblement allié (Acier Cr-Ni)	Forgeage entre 900° et 1050° Trempe à l'huile : 825° à 850° Non revenu	Dureté Brinell : 210 – 300 HB R = 180 kg/mm ²	C : 0,3 Ni : 3 Cr : 0,8	Arbre Goujon de culasse Boulon de bielle Bielle et vilebrequin

- Fonte : c'est une fonte à graphite sphéroïdal, aussi appelée fonte ductile avec une limite à la rupture de R = 400 MPa et un allongement à la rupture A% = 15% de désignation de FGS 400-15

Matériau non ferreux

- Aluminium : C'est un métal malléable, de couleur argentée. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. Cette résistance à la corrosion et sa remarquable légèreté ont en fait un matériau très utilisé industriellement.
- Bronze : Le bronze est un alliage de plus de 60% cuivre et d'une proportion variable d'étain, c'est un excellent conducteur thermique et électrique et a une bonne résistance à la corrosion.

III.4 Les moyens de contrôle du traitement :

Dans ce nouveau traitement qui consiste à traiter des différents échantillons ferreux (les aciers et fonte) et non ferreux (bronze et aluminium) il est nécessaire de faire des contrôles mécaniques à l'aide de différents instruments de mesure pour prouver l'utilité de ce procédé au sein de l'industrie mécanique :

1) La rugosité :

Les mesures de rugosité ont été effectuées au laboratoire de métrologie, SNVI sur un rugosimètre à palpeur. Le profil de rugosité est mesuré sur une distance de 5mm.



Photo III.3 Rugosimètre à palpeur

2) Poids :

Les mesures de poids ont été effectuées au niveau du laboratoire de chimie, SNVI sur une balance digitale d'une précision de 0,01g.



Photo III.4 Balance électronique à 1/100 de précision

3) Dureté :

Ces essais ont été effectués au niveau du laboratoire de métrologie, (département mécanique, SNVI) sur un duromètre Brinell. On a utilisé des billes en acier traité de diamètre de 5 mm. La charge utilisée est de 750 daN pour les matériaux ferreux et 250 daN pour les matériaux non ferreux, et le temps d'application de la charge est de 10s.



Photo III.5 Duromètre Brinell

4) Structure :

Nous avons fait les observations métallographiques au niveau du laboratoire de métallurgie (dept. génie métallurgie. Ecole nationale polytechnique) sur un microscope optique équipé d'un logiciel INSPECTOR relié par une camera. 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 à l'aide du NITAL 2%.



Photo III.6 Microscope optique

III.5 Le traitement :

La partie expérimentale de vibro-abrasion comprend les essais suivants :

1^{er} essai : Traitement pièces contre pièces (PCP)

2^{ème} essai : Traitement pièces contre pièces avec abrasif (PCP+A)

3^{ème} essai : Traitement pièces contre pièces avec abrasif + additif chimique (PCP+A+A)

Avant le 1^{er} essai : l'état initial des pièces :

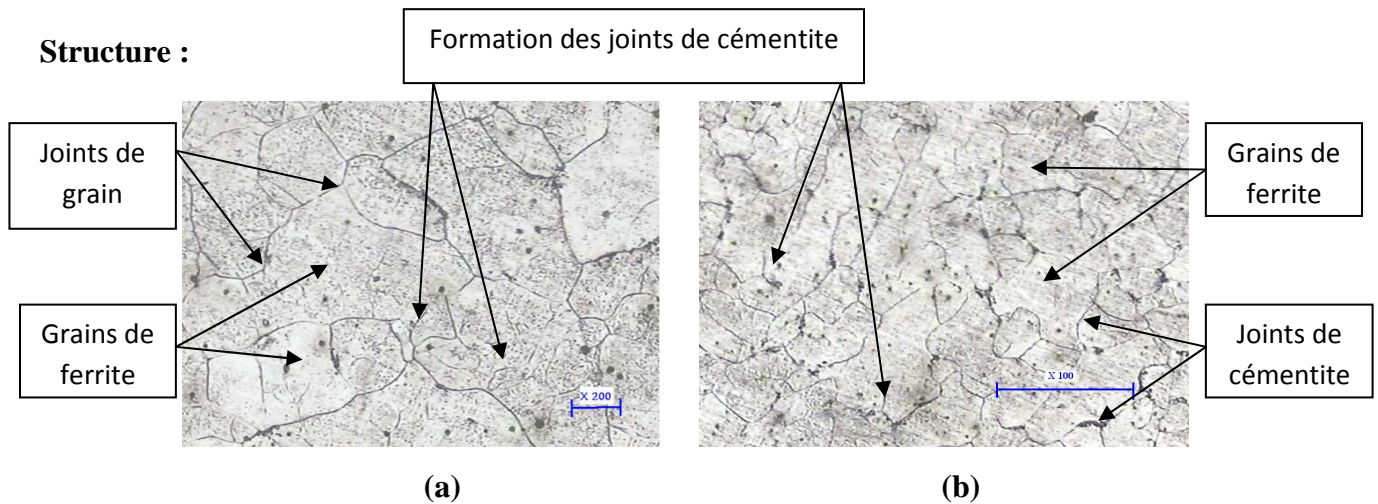


Figure 3.3 Structure de l'acier doux brut à l'état initial avec un agrandissement : (a) x200 (b) x100

La figure 3.3 (a) et (b) représentent une structure ferritique formée d'une multitude de grains dont la taille varie de 2 à 20 μm qui sont limités par des joints de grains.

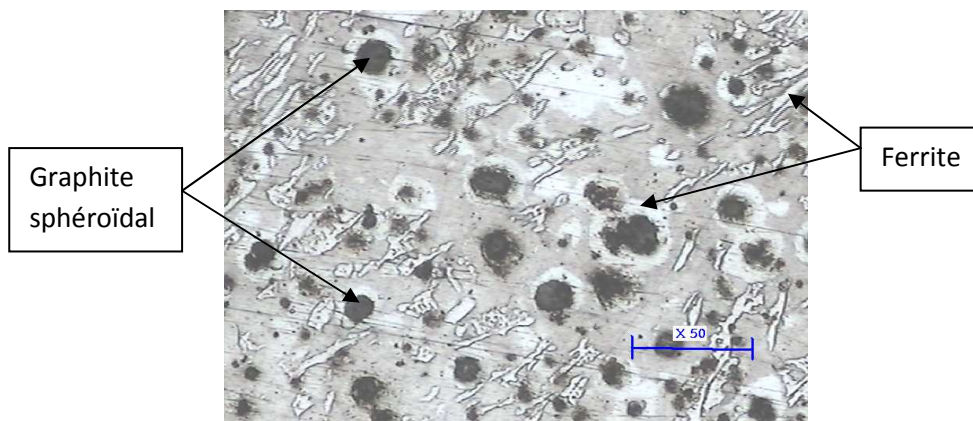



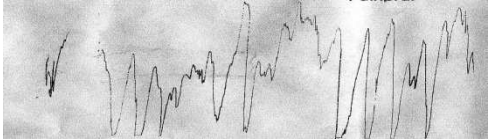
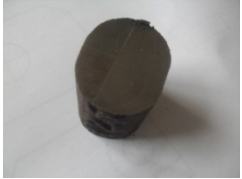
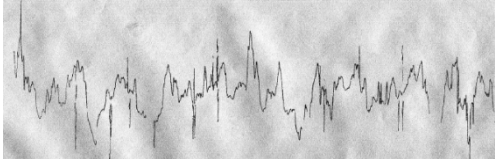

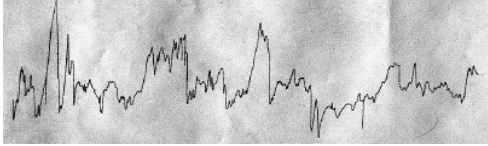

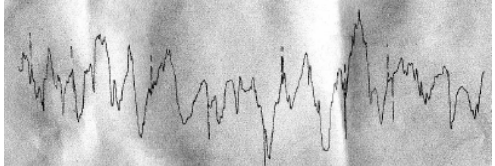


Figure 3.4 Structure de la fonte sphérolitique à l'état initial

La figure 3.4 Représente une structure de fonte à graphite sphéroïdale à matrice ferritique.

	Matériaux	Photo	Dimension (mm)	Poids (g)	Dureté (HB)	Rugosité (μm)
Matériaux ferreux	Acier faiblement allié (acier Cr)		Diamètre = 40,152 Hauteur = 31,135	291.45	HBW 5/750 162	$R_a = 4.02$ 
	Acier faiblement allié (cémenté)		Face carrée = 35,134 Hauteur = 32,187	296.80	HBW 5/750 143	$R_a = 5.54$ 
	Fonte sphérolitique		Longueur = 31,995 Largeur = 25,507 Hauteur = 32,235	146.47	HBW 5/750 201	$R_a = 2.30$ 
	Acier faiblement allié (Acier Cr-Ni)		Diamètre = 22,102 Hauteur = 48,370	142.87	HBW 5/750 212	$R_a = 4.01$ 
	Acier doux usiné		Diamètre intérieur de l'hexagone = 20,974 Hauteur = 17,837	115.88	HBW 5/750 156	$R_a = 3.98$ 

	Acier doux brut		Diamètre = 40,250 Hauteur = 31,397	301.44	HBW 5/750 95	$R_a = 3.67$ 
Matériaux non ferreux	Aluminium		Diamètre = 40,140 Hauteur = 23,401	80.88	HBW 5/250 81	$R_a = 4.60$ 
	Bronze	 	Diamètre = 79,854 Hauteur = 13,112 Diamètre de l'alésage = 20,268	570.55	HBW 5/250 51	Face : $R_a = 3.85$  Alésage : $R_a = 2.85$ 

Tableau 3.3 : Représente les pièces à l'état initial (avant le traitement)

1^{er} essai expérimental : traitement pièces contre pièces :

Dans ce premier traitement, nous avons mis nos échantillons et d'autres pièces métalliques dans la chambre de travail. A la mise en marche de la machine les différents échantillons et pièces vont entrer en contact grâce aux vibrations et au mouvement circulaire lent de la machine.

Cette phase de traitement assure une légère modification de l'aspect extérieur des pièces (des arrondissements, enlèvement d'ébavurage, amélioration de l'état de surface, enlèvement de la saleté, l'ébarbage, enlèvement de la corrosion.....etc).

Dans cette partie, nous n'avons fait qu'observer le changement extérieur qui s'est effectué.

On a utilisé la machine RC230 (vibrateur circulaire) avec les caractéristiques citées avant. ($f = 50 \text{ Hz}$ et $A = 3 \text{ mm}$).

On a utilisé des différents matériaux ferreux (aciers et fonte) et non ferreux (bronze et aluminium) avec d'autres pièces de même type de façon à remplir la cuve à un volume de 77dm^3 .

Les pièces utilisées pour assurer le frottement avec les pièces à traiter ont la forme de boucles métalliques (voire la Photo III.7).

Ces mêmes boucles sont des aciers faiblement alliés de plomb (Pb) et étain (Sn).

Une boucle pèse environ 6.28 g.



Photo III.7 : Boucles métalliques

La durée du traitement est de 60 minutes avec un constat visuel au bout de 30 minutes.


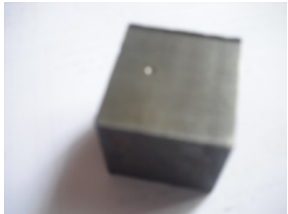
Après une durée de traitement de 30 minutes :

Nous avons constaté les résultats suivants :

- Amélioration de l'état de surface pour tous les matériaux.
- Enlèvement des bavures pour les matériaux suivants : acier doux brut et acier doux usiné, et un léger arrondissement des angles vifs des autres matériaux : aluminium, bronze et les aciers traités.
- Enlèvement de la saleté pour tous les matériaux.
- Enlèvement de la peinture pour les matériaux suivants : l'acier faiblement allié (acier Cr-Ni), acier doux brut, partiellement pour l'acier faiblement allié (acier Cr) et aucun enlèvement de la peinture pour l'acier faiblement allié (cémenté).
- Enlèvement de la rouille pour les matériaux suivants : bronze, acier doux brut. Un enlèvement partiel de la rouille (corrosion) pour l'acier faiblement allié (acier Cr) et la fonte sphérolitique. Aucun enlèvement de la rouille pour l'acier faiblement allié (cémenté).
- Aucun changement concernant l'alésage du bronze.

Après 60 minutes de traitement :

Tableau 3.4 : Représente les pièces après 60 minutes du 1^{er} essai expérimental

Matériaux	Photo	Observation
Acier faiblement allié (acier Cr)		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Enlèvement de la moitié de la bavure. - Un tout petit arrondissement des angles vifs. - Enlèvement de la couche de peinture. - Enlèvement de la rouille (corrosion).
Acier faiblement allié (cémenté)		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une amélioration de la qualité des surfaces. - Un tout petit arrondissement des angles vifs. - Un petit enlèvement de la couche de peinture. - Un petit enlèvement de la rouille (corrosion).

Fonte sphérolitique		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Un tout petit enlèvement de la bavure. - Un tout petit arrondissement des angles vifs. - Enlèvement de la couche de peinture. - Un petit enlèvement de la rouille (corrosion).
Acier faiblement allié (Acier Cr-Ni)		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Un tout petit enlèvement de la bavure. - Aucun arrondissement des angles vifs. - Enlèvement de la couche de peinture. - Enlèvement de la rouille (corrosion).
Acier doux usiné		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Enlèvement de la bavure. - aucun arrondissement des angles vifs. - Enlèvement de la rouille.
Acier doux brut		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Enlèvement de la bavure. - Un tout petit arrondissement des angles vifs. - Enlèvement de la rouille.
Aluminium		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Enlèvement de la bavure. - Un petit arrondissement.
Bronze		<ul style="list-style-type: none"> - Enlèvement de la saleté. - Une légère amélioration de la qualité des surfaces. - Enlèvement de la moitié de la bavure. - Un tout petit arrondissement des angles vifs et des petites traces de polissage sur les cotés de la pièce brut. - Enlèvement de la rouille (corrosion). - Aucun changement concernant l'alésage de la pièce

2^{ème} essai expérimental : traitement pièces contre pièces avec abrasif :

Le 2^{ème} essai consiste à traiter les échantillons dans un milieu actif (abrasif en céramique). Le tout (pièces + abrasifs) est mélangé dans la cuve avec les caractéristiques mécaniques citées avant. ($f = 50$ Hz et $A = 3$ mm).

On a utilisé les mêmes matériaux ferreux (aciers et fonte) et non ferreux (bronze et aluminium) avec les chips en céramique (voire la photo III.2) de façon à remplir la cuve.

La durée du traitement est de 60 minutes avec un constat visuel au bout de 30 minutes.

Après une durée de traitement de 30 minutes :

Nous avons constaté les résultats suivants :

- L'état des surfaces s'est amélioré pour tous les matériaux.
- Petit enlèvement de la bavure pour les matériaux : aluminium, fonte sphérolitique, acier faiblement allié (acier Cr-Ni), acier faiblement allié (acier Cr), et un enroulement de la bavure concernant le bronze.
- Enlèvement de la rouille (corrosion) pour l'acier faiblement allié (acier Cr) et la fonte sphérolitique.
- Amélioration de l'état des surfaces concernant l'alésage du bronze.
- Pour l'acier faiblement allié (cémenté) nous avons constaté qu'il n'y a eu aucun changement dans les 30 premières minutes.

Après 60 minutes de traitement :

Nous avons constaté les résultats suivants :

- Enlèvement de la bavure pour les matériaux suivants : aluminium, fonte sphérolitique, acier faiblement allié (acier Cr-Ni),
- Présence d'une petite bavure pour l'acier faiblement allié (acier Cr).
- La bavure du bronze s'est écrasée.
- Concernant l'acier faiblement allié (cémenté) la peinture a été totalement enlevée, mais la rouille et la bavure ont été enlevées partiellement.

Pour la rugosité, dureté, poids, dimensionnement et la structure voir tableau et figures ci-dessous :

Structure :

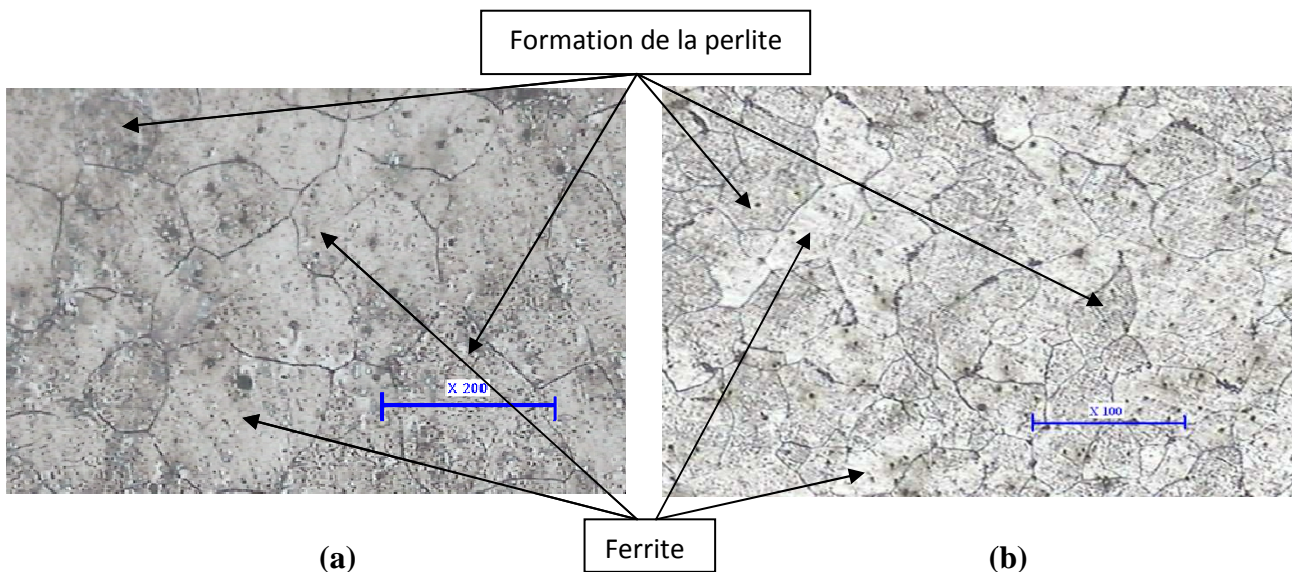


Figure 3.5 structure de l'acier doux brut après le 2^{ème} traitement avec un agrandissement : (a) x 200 (b) x 100

La figure 3.5 (a) et (b) représentent une structure ferritique de l'acier doux brut.

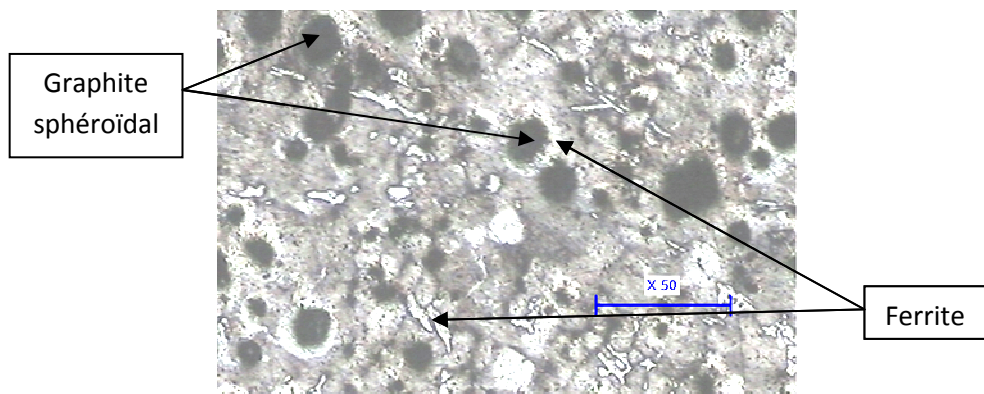

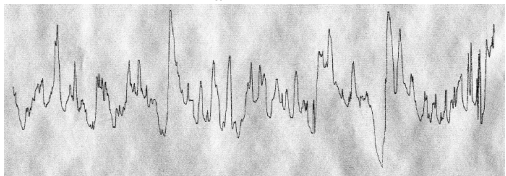
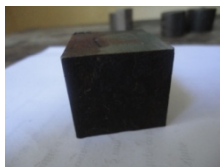
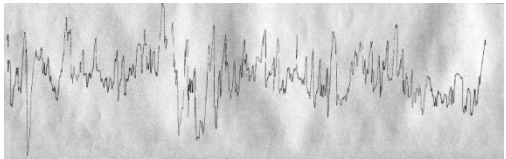



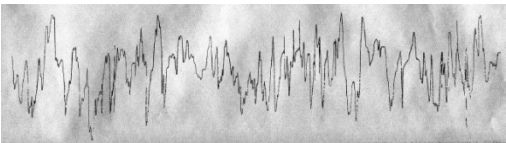

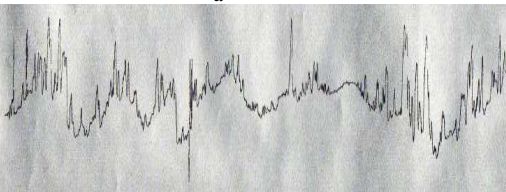


Figure 3.6 structure de la fonte sphérolitique après le 2^{ème} traitement

La figure 3.6 représente une structure de fonte à graphite sphéroïdale à matrice ferritique.

	Matériaux	Photo	Dimension (mm)	Poids (g)	Dureté (HB)	Rugosité (μm)
Matériaux ferreux	Acier faiblement allié (acier Cr)		Diamètre = 40,152 Hauteur = 31,135	291.30	HBW 5/750 179	$R_a = 2.08$ 
	Acier faiblement allié (cémenté)		Face carrée = 35,134 Hauteur = 32,187	296.60	HBW 5/750 163	$R_a = 2.57$ 
	Fonte sphérolitique		Longueur = 31,995 Largeur = 25,507 Hauteur = 32,235	146.42	HBW 5/750 241	$R_a = 1.77$ 
	Acier faiblement allié (Acier Cr-Ni)		Diamètre = 22,102 Hauteur = 48,370	142.85	HBW 5/750 235	$R_a = 2.69$ 
	Acier doux usiné		Diamètre intérieur de l'hexagone = 20,974 Hauteur = 17,837	115.64	HBW 5/750 163	$R_a = 1.56$ 

	Acier doux brut		Diamètre = 40,250 Hauteur = 31,397	301.18	HBW 5/750 99	$R_a = 2.20$ 
Matériaux non ferreux	Aluminium		Diamètre = 40,140 Hauteur = 23,401	80.34	HBW 5/250 79	$R_a = 2.87$ 
	Bronze	 	Diamètre = 79,854 Hauteur = 13,112 Diamètre de l'alésage = 20,268	569.76	HBW 5/250 52	Face : $R_a = 2.14$  Alésage : $R_a = 1.83$ 

Tableau 3.5 : Représente les pièces après 60 minutes du 2^{ème} essai expérimentale

3^{ème} essai expérimental : traitement pièces contre pièces avec abrasif + additif chimique:

C'est la dernière étape. Dans ce traitement, en plus des abrasifs, nous avons rajouté un environnement chimique (eau + additif chimique) qui a pour rôle de nettoyer les surfaces des échantillons et leur donner un aspect brillant où ils sont mis dans la cuve.

Nous avons utilisé les mêmes matériaux ferreux (aciers et fonte) et non ferreux (bronze et aluminium) avec les chips (voir la photo III.2) et additif chimique + eau.

Les pièces et les abrasifs sont immergés dans l'eau puis on rajoute l'additif chimique suivant les normes ci-dessous :

10 mL d'eau → 1 mL d'additif chimique.

Comme nous avons utilisé 7 litres d'eau il nous a fallu donc 1 litre d'additif

La durée du traitement est de 60 minutes avec un contrôle visuel au bout de 30 minutes.

Après une durée de traitement de 30 minutes :

Nous avons constaté les résultats suivants :

- L'état des surfaces s'est amélioré pour tous les matériaux.
- Brillance pour l'aluminium, l'acier doux usiné, l'acier faiblement allié (acier Cr-Ni).
- Nettoyage complet des autres pièces.
- Pas de changement concernant les bavures de l'acier faiblement allié (acier Cr) et l'acier faiblement (cémenté).

Après 60 minutes de traitement :

Nous avons constaté les résultats suivants :

- Brillance pour certains matériaux sauf pour ceux qui sont à l'état brut.
- Nettoyage total des pièces.
- Petite bavure sur l'acier faiblement allié (acier Cr) et acier faiblement (cémenté).

Pour la rugosité, dureté, poids, dimensionnement et la structure voir tableau et figures ci-dessous :

Structure :

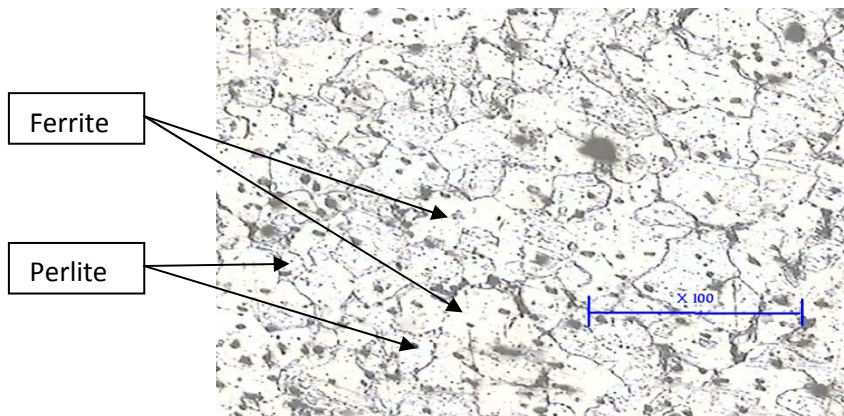


Figure 3.7 structure de l'acier doux brut après le traitement final

La figure 3.7 Représente une structure ferrito-perlitique de l'acier doux brut.

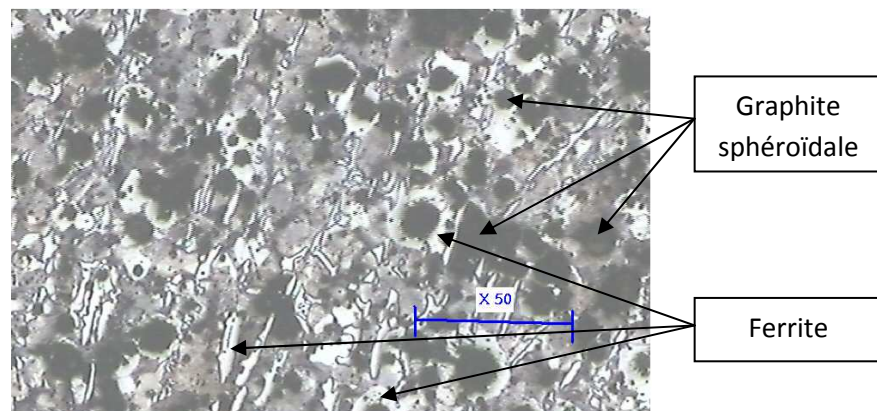

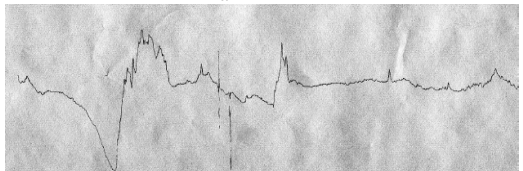

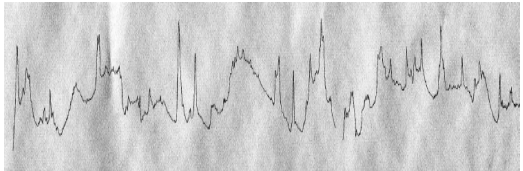

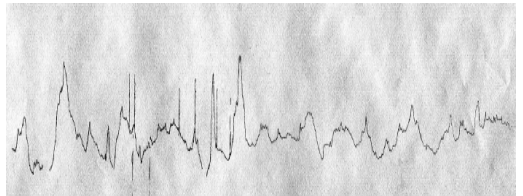

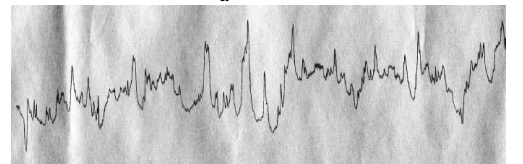

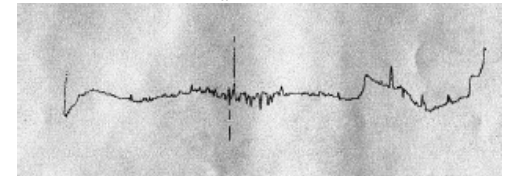


Figure 3.8 structure de la fonte sphérolitique après le traitement final

La figure 3.8 Représente une structure de Fonte à graphite sphéroïdale à matrice ferritique

	Matériaux	Photo	Dimension (mm)	Poids (g)	Dureté (HB)	Rugosité (μm)
Matériaux ferreux	Acier faiblement allié (acier Cr)		Diamètre = 39,732 Hauteur = 30,978	291.26	HBW 5/750 197	$R_a = 1.33$ 
	Acier faiblement allié (cémenté)		Face carrée = 34,985 Hauteur = 32,007	296.59	HBW 5/750 170	$R_a = 1.47$ 
	Fonte sphérolitique		Longueur = 31,990 Largeur = 25,286 Hauteur = 31,916	146.39	HBW 5/750 255	$R_a = 1.13$ 
	Acier faiblement allié (Acier Cr-Ni)		Diamètre = 21,957 Hauteur = 48,010	142.84	HBW 5/750 297	$R_a = 1.01$ 
	Acier doux usiné		Diamètre intérieur de l'hexagone = 20,892 Hauteur = 17,563	115.58	HBW 5/750 165	$R_a = 0.97$ 




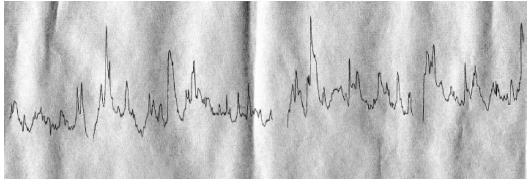



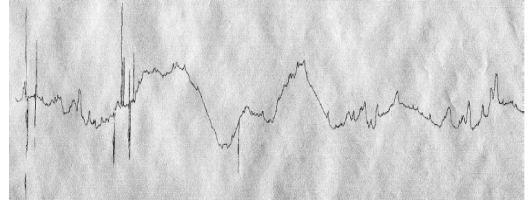
	Acier doux brut		Diamètre = 39,957 Hauteur = 30,563	301.15	HBW 5/750 103	$R_a = 0.88$ 
Matériaux non ferreux	Aluminium		Diamètre = 39,975 Hauteur = 23,201	80.24	HBW 5/250 80	$R_a = 1.24$ 
	Bronze	 	Diamètre = 79,505 Hauteur = 12,810 Diamètre de l'alésage = 20,230	569.60	HBW 5/250 53	Face : $R_a = 1.49$  Alésage : $R_a = 1.44$ 

Tableau 3.6 : Représente les pièces après 60 minutes du 3^{ème} essai expérimentale (état finale)

Chapitre IV : Interprétation des résultats expérimentaux

IV.1. Interprétation des résultats :

IV.1.1. La rugosité R_a :

Les courbes d'état de surface est obtenue en variant la durée de 180 minutes de traitement (trois traitements de 60 minutes chacun ; PCP, P+A et P+A+A). Les figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4 représente la variation d'état de surface (rugosité R_a) en fonction de la durée du traitement pour l'acier doux, fonte, aluminium et bronze (face et alésage).

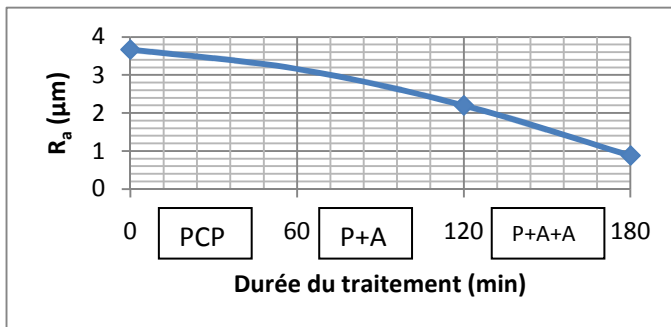


Fig. 4.1 Graphe d'état des surfaces

de l'acier doux

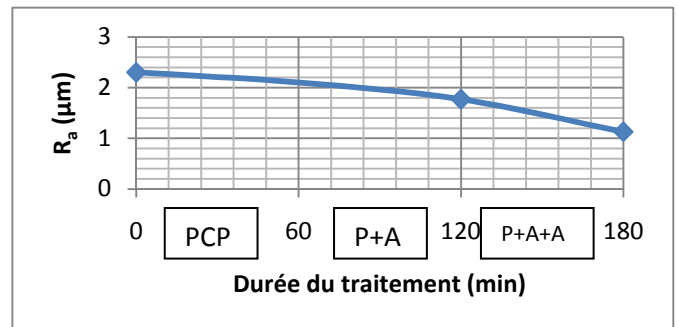


Fig. 4.2 Graphe d'état des surfaces

de la fonte

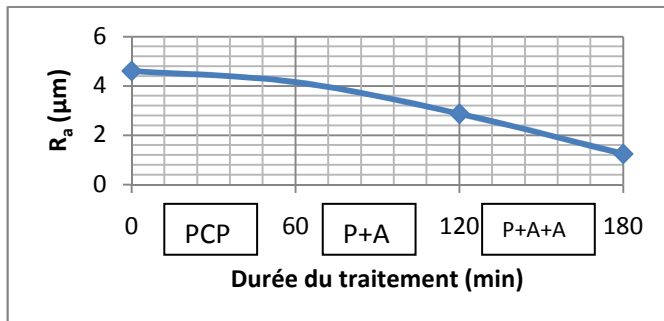


Fig. 4.3 Graphe d'état des surfaces

de l'aluminium

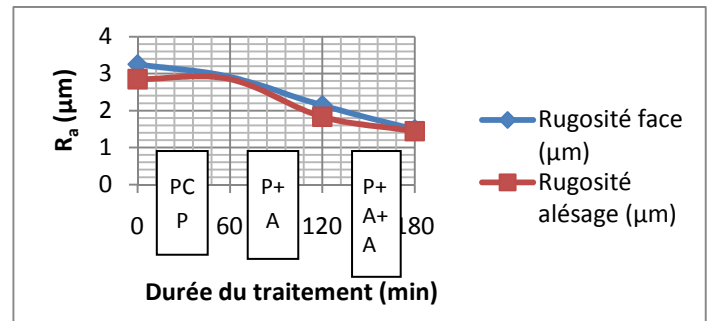


Fig. 4.4 Graphe d'état des surfaces

de la face et de l'alésage en bronze

Nous avons constaté une diminution importante de la rugosité à savoir : 76% de l'acier, 51% de la fonte, 61% du bronze (face), 46% du bronze (alésage). Par ces résultats on remarque que le traitement influe beaucoup sur les matériaux ductiles et faciles à usiner. Pour la fonte on utilisera un abrasif plus dur ou on échangera les paramètres machine (fréquence et amplitude).

Pour l'alésage du bronze on remarque que le 1^{er} traitement pièces contre pièces n'a aucun effet sur son état de surface et cela à cause du diamètre de l'alésage qui est trop petit. Pour que ce traitement soit efficace, il faut que le diamètre de l'alésage doit être au moins 2,5 fois plus grand que les blocs utilisés.

IV.1.2. Poids :

La courbe du poids est obtenue en variant la durée de 180 minutes de traitement (trois traitements de 60 minutes chacun ; PCP, P+A et P+A+A). Les figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8 représentent la variation du poids en fonction de la durée du traitement pour l'acier doux, fonte, bronze et aluminium.

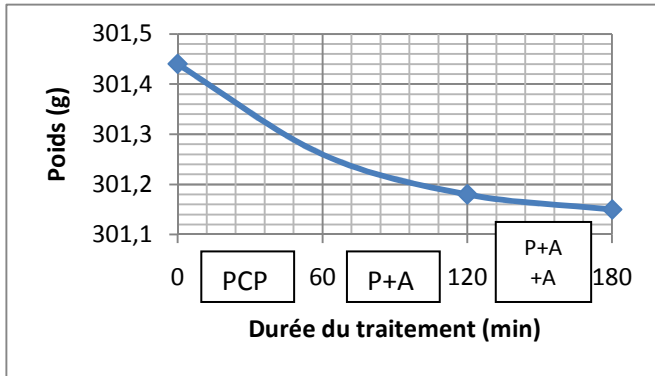


Fig. 4.5 Graphe du poids de l'acier doux

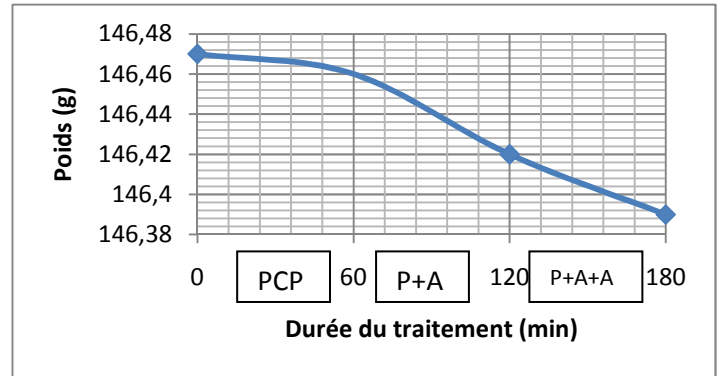


Fig. 4.6 Graphe du poids de la fonte

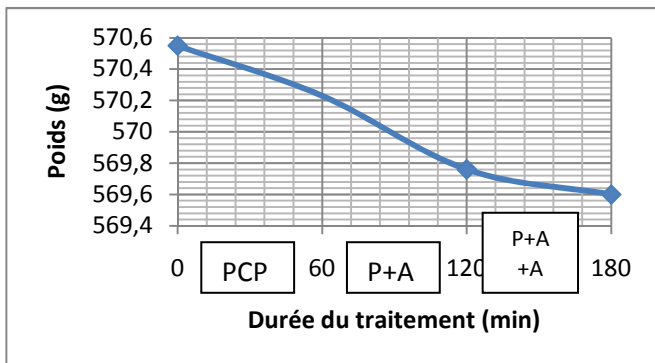


Fig. 4.7 Graphe du poids du bronze

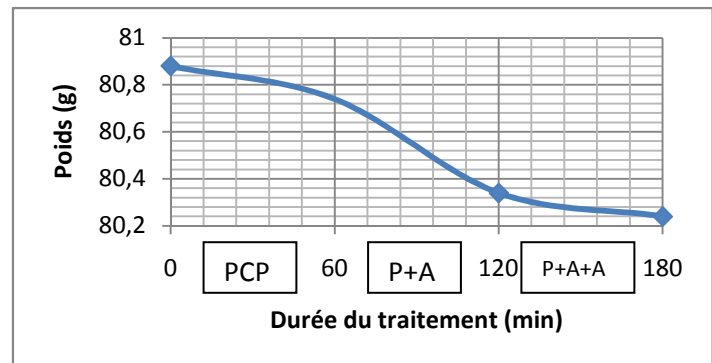


Fig. 4.8 Graphe du poids de l'aluminium

On remarque que le poids de chacune des pièces traitées a diminué d'une moyenne d'un dixième de gramme pour tous les matériaux soit 0,29 g pour l'acier, 0,08 g pour la fonte, 0,95 g pour le bronze, 0,64 g pour l'aluminium. C'est suite à l'enlèvement des microparticules de la couche superficielle à savoir : rouille, bavure, peinture, graisse, crasse...etc que ce poids a diminué.

Les graphes nous indiquent que le 1^{er} traitement pièces contre pièces a donné un résultat, lorsque celles-ci sont de la même matière (exemple acier contre acier figure 4.5). Les graphes des figures 4.6, 4.7 et 4.8 nous montrent que le premier traitement (soit 60 minutes) n'est pas efficace pour traiter la fonte le bronze et l'aluminium avec l'acier d'où la nécessité d'utiliser les mêmes matériaux pour chaque traitement pièces contre pièces.

IV.1.3. Dureté HB :

La courbe de la dureté est obtenue en variant la durée de 180 minutes de traitement (trois traitements de 60 minutes chacun ; PCP, P+A et P+A+A). Les figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 représentent la variation du poids en fonction de la durée du traitement pour l'acier doux, fonte, bronze et aluminium.

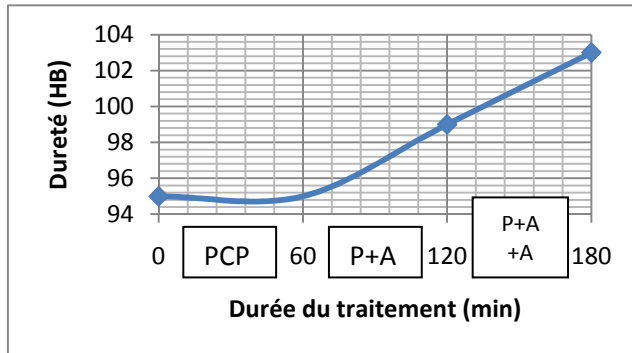


Fig. 4.9 Graphe de la dureté de l'acier doux

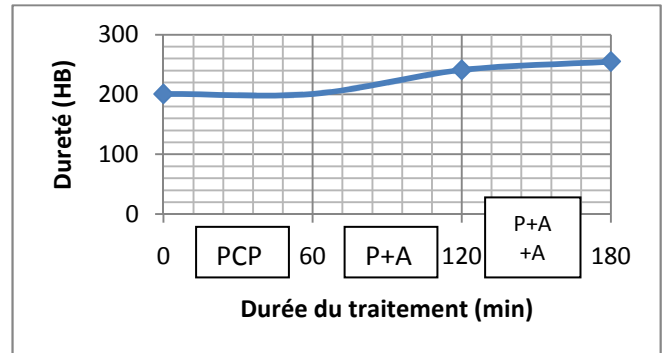


Fig. 4.10 Graphe de la dureté de la fonte

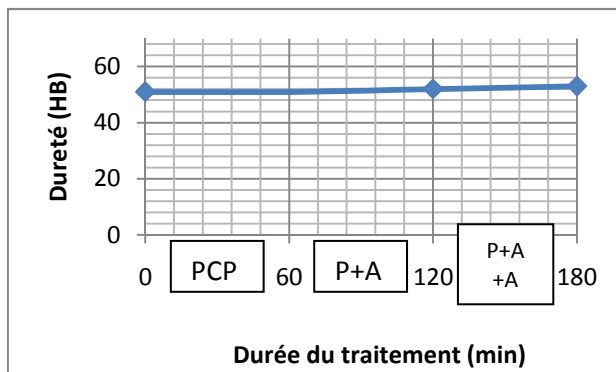


Fig. 4.11 Graphe de la dureté du bronze

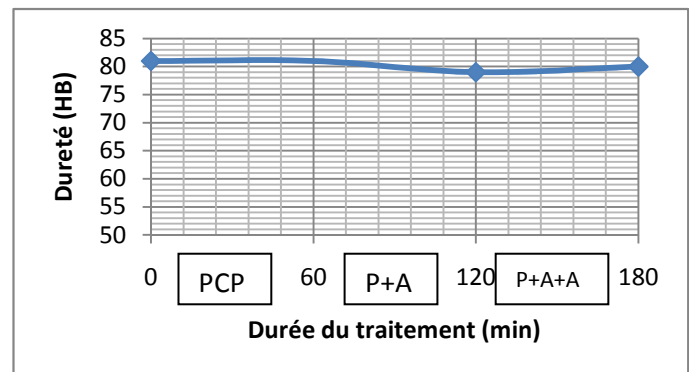


Fig. 4.12 Graphe de la dureté de l'aluminium

Le premier traitement n'a eu aucune incidence sur la dureté des matériaux à cause des formes des pièces (étant plat ils ne font que toucher les surfaces des pièces).

Les graphes des figures 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 nous montrent successivement une augmentation de dureté 8% pour l'acier, 21% pour la fonte, 4% pour le bronze et une diminution de 1% pour l'aluminium. Cela s'explique par le choix des médias en céramique car pour augmenter la dureté d'un matériau non ferreux, il est nécessaire d'utiliser des billes ou rouleaux en acier traité.

IV.1.4. Structure :

Acier : (figure 3.3, 3.5, 3.7)

La figure 3.3 représente une structure ferritique où on observe le début d'une formation de joints de grains.

La figure 3.5 représente une structure ferrito-perlitique où les joints de grains sont formés. Les grains sont plus petits et le début de la formation de la perlite dans les grains de ferrite.

La figure 3.7 représente une structure ferrito-perlitique où les grains de la perlite sont formés et séparés par les joints de grains avec les grains de ferrite.

Par ces trois figures on peut conclure qu'il y a un changement de structure est cela inclus le changement de la dureté ou vis-versa.

Fonte : (figure 3.4, 3.6, 3.8)

La figure 3.4 représente une structure à graphite sphéroïdale à matrice ferritique où la matrice commence à se former et où on trouve une couche de sphère de graphite et une autre de ferrite avec en plus des lamelles de ferrite.

La figure 3.6 représente une structure à graphite sphéroïdale à matrice ferritique où le nombre de sphères de graphite a augmenté et certaines sphères de graphite (carbone) n'ont pas de couche de ferrite mais les lamelles de ferrite plus grandes.

La figure 3.8 représente une structure à graphite sphéroïdale à matrice ferritique où le nombre des sphères de graphite a encore augmenté avec des sphères collées les unes aux autres avec des lamelles de ferrite plus longues.

Par ces trois figures on peut conclure qu'il y a un changement de structure cela inclus le changement de la dureté ou vis-versa.

IV.1.5. Remarques :

Pour les aciers traités [acier faiblement allié (acier Cr) et Acier faiblement (cémenté)] on constat que la bavure n'a pas été enlevée cela à cause de la résistance de la surface de la couche cémentée et à la grandeur de la bavure pour l'acier Cr. Pour cela les résultats ont montré que pour ce genre de traitement, les abrasifs ne conviennent pas aux matériaux ferreux traités à couche très dure. Il faut donc penser à changer la forme, la taille et la nature des abrasifs ou changer les paramètres de la machine (fréquence et amplitude).

La brillance est moins visible sur les matériaux bruts que sur les matériaux usinés, l'aluminium et la face du bronze.

IV.2. L'évaluation écologique et environnementale de la vibro-abrasion:

La présence de métaux, de particules d'abrasifs et d'additifs chimiques confère aux effluents de vibro-abrasion un caractère toxique qui ne permet pas un rejet direct vers le milieu naturel ou dans une station urbaine sans danger pour l'environnement. Dans la plupart des applications de vibro-abrasion.

Pour des raisons environnementales, la technologie de recyclage des effluents appelé aussi la centrifugation est la méthode la plus utilisée dans les applications industrielles. Le principe de séparation (solide/liquide) en 2 phases par la force centrifuge constitue la base de traitement des effluents. Une technologie performante associée à l'efficacité du procédé permet de nombreuses applications, pas seulement dans le domaine de la vibro-abrasion et des avantages du recyclage de l'eau du traitement est possible.

Il existe d'autres solutions pour le recyclage de l'eau de traitement, comme les stations de traitement physico-chimique des eaux, mais aussi des décanteurs, ou des filtres gravitaires, et sa selon la problématique.

Conclusion

Le traitement des métaux par vibro-abrasion est un procédé qui utilise la technologie de vibration à basse fréquence afin d'améliorer les paramètres de surfaces et les caractéristiques technologiques (mécanique et métallurgique) des pièces mécaniques (rugosité, tenue en fatigue, résistance à la corrosion, micro et macro dureté, structure).

La finition vibratoire est la solution la plus économique pour un ébavurage précis ou sous pression, le lissage, le polissage, la finition du métal, le nettoyage, le décapage et le séchage. Il est utilisable pour les pièces tournées, fraisées, moulées et embouties.

Dans le cadre de ce travail, on a effectué un traitement de surface par vibro-abrasion sur différents matériaux ferreux et non-ferreux.

D'après les résultats obtenus, on constate les faits suivants :

- Le traitement des matériaux à haute dureté avec les abrasifs utilisés (céramiques), la rugosité n'est pas suffisamment améliorée.
- Pour les matériaux non ferreux avec l'abrasif céramique, la dureté superficielle est pratiquement conservée (très légère augmentation pour le bronze, très légère diminution pour l'aluminium).
- Pour les matériaux ferreux traités avec l'abrasif céramique, l'ébavurage n'a pas été complètement enlevé. Ceci est dû à la surface qui est très dure.

Pour cette raison, on pense qu'il faut changer la forme, la taille et la nature des abrasifs, prendre par exemple, des billes en porcelaine de diamètre 4-6 mm pour la rugosité, des billes ou rouleaux en acier traité pour la dureté superficielle et granulés d'abrasif pour l'ébavurage. A noter aussi que d'autres paramètres du régime (amplitude, fréquence, durée du traitement, etc) influent sur les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des pièces traitées.

On peut dire qu'un choix judicieux des abrasifs, de la durée du traitement, de la nature des matériaux à traiter et du régime du traitement ont une influence considérable sur l'objectif à atteindre. On peut donc obtenir les résultats escomptés en choisissant ces paramètres convenablement.

Le procédé de vibro-abrasion a apporté une amélioration dans le domaine du traitement mécanique des surfaces et de tribologie. En plus de ses avantages techniques, il est très économique et connu pour être un procédé écologique et environnemental.

Enfin, nous notons que ce travail reste ouvert et est à enrichir. Pour cela, nous proposons comme complément à ce travail, d'étudier l'effet :

- de la durée du traitement
- de la nature des autres abrasifs sur ce traitement
- du régime du traitement,
- des différentes machines de vibro-abrasion.

Bibliographie

- [1] www.techno-science.net.
- [2] Jacky DUMAS, *Débuter la mesure vibratoire*, MVI technologies, Février 2001
- [3] ВАНН МАО
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ОТ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ТЕХНОЛОГИИ АВТОРЕМОНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ
05.02.08 — «Технология машиностроения»
- [4] БАБИЧЕВ А.П.
ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКОНТАКТНЫХ ВИБРОУДАРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ
05.02.08 – «Технология машиностроения»
- [5] WIKIPEDIA (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Dureté>)
- [6] Marie-Line Zani *La mesure de rugosité? Quelques normes... et plusieurs dizaines de paramètres* MESURES 758 - OCTOBRE 2003
- [7] M. Duriez, J. Arrambide *Nouveau traité de matériaux de construction tome.II* 1962.
- [8] J. Duroux, R.Faucard *Technologie générale et de construction Tome I* 1962
- [9] technique de l'ingénieur
- [10] Michel dupeux *Aide mémoire science des matériaux* 2008
- [11] Association technique de traitement thermique *Métallographie et technique d'analyse* 2004
- [12] МОТРЕНКО ПЁТР ДАНИЛОВИЧ
ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКОНТАКТНЫХ ВИБРОУДАРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ
05.02.08 – «Технология машиностроения»
- [13] ROSLER WWW.ROSLER.FR
- [14] Site web OTEC : *constructeur allemand des équipements de tribofinition*
- [15] Abc Swiss Tech www.abcswisstech.com