

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



Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme  
d'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème

Expérimentation et Analyse de Différents Matériaux par le procédé de  
Tribofinition

Dirigé par :

Pr. M.BOUAZIZ  
Mr D.SAIDI  
Mr H. Belhaneche

Réalisé par :

Omar LAKEHAL

Juin 2014

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach

16200 Alger

## Remerciements

Je remercie le bon Dieu de m'avoir accordé toute la patience, le courage, la volonté et la motivation qui m'ont permis d'achever ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude, mon grand respect et ma sincère reconnaissance à mes promoteurs : Pr Bouaziz, Mr Saidi et Mr Belhaneche pour avoir assumé la responsabilité de m'encadrer, m'orienter et me conseiller tout au long de ce travail.

Je remercie chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Je remercie également M<sup>elle</sup> Hachemi du laboratoire de Métallurgie, ainsi que Mr Laribi et Mr Salhi pour leur aide.

Je souhaite aussi remercier tous les enseignants du département de Génie Mécanique pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts ainsi que tous mes collègues.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de mes sincères gratitude.

## ملخص

الهدف من وراء هذا العمل هو دراسة تأثير طريقة الكشط بالاهتزازات على مختلف الخصائص الميكانيكية و الهندسية للمعادن و هذا عن طريق مقارنة تغيرات هذه الخصائص بعد العملية.  
الكلمات المفتاحية الكشط بالاهتزازات – المعادن - الخصائص

## Résumé

Ce travail a été réalisé dans le but d'étudier l'impact du procédé de tribofinition sur les différentes caractéristiques mécaniques et géométriques des matériaux, en l'occurrence, l'état de surface, la dureté, la structure microscopique, la résistance au choc, et ceci en comparant ces caractéristiques avant et après le traitement par tribofinition.

Mots clés: tribofinition, matériaux, caractéristiques

## Abstract

This work was realized with the aim of studying the impact of the process of tribo-finish on the various mechanical geometrical characteristics of materials, in this particular case, the state of surface, the hardness, the microscopic structure, the impact resistance by comparing these characteristics before and after the treatment.

Keywords: tribo-finish, materials, characteristics

## Liste des figures

1. 1 Exemples de systèmes à un degré de liberté .....	2
1. 2 Variation de la position en fonction du temps pour un système harmonique .....	2
1. 3 Réponse forcée .....	3
1. 4 Schéma du vibreur de tribo- finition .....	2
1 Défauts d'états de surface .....	11
2. 2 Motif local du profil.....	12
2. 3 Hauteur maximale du profil.....	12
2. 4 Hauteur maximale de saillie .....	12
2.5 Hauteur maximale de saillie .....	12
2. 6 Maximum de la hauteur des irrégularités du profil .....	13
2. 7 Hauteur des irrégularités sur 10 points.....	13
2. 8 Pas moyen des irrégularités du profil.....	13
2. 9 Taux de longueur portante.....	14
2. 10 Profondeur moyenne de rugosité.....	14
2. 11 Influence de la direction de mesure sur le résultat des paramètres de rugosité.....	14
2. 12 Géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et micro dureté .....	16
2. 13 Schéma de principe d'un essai de dureté Brinell.....	17
2. 14 Schéma de principe d'un essai de dureté Vickers .....	18
2. 15 Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell.....	19
2. 16 Schéma de principe d'un nano -indenteur et d'une courbe de nano-indentation.	22
2. 17 Diagramme Fer-Carbone (%C < 2%).....	24
2. 17 Structure microscopique de l'acier en fonction de la teneur en carbone.....	26
2.18 Micrographie optique après attaque Nital de la fonte grise à graphite en rubans dite lamellaire.....	27
2.19 Machine de l'essai de résistance au choc.....	29
2.20Schéma de l'introduction des contraintes résiduelles par déformation plastique.....	30
2. 21Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance entre les différents états du matériau.....	30
2. 22Contraintes résiduelles d'origine thermique et mécanique.....	31
2. 23 Contraintes résiduelles d'ordre 2 dans un matériau.....	33
2. 24 Représentation schématique des déformations.....	33
2. 25 Répartition du champ de contraintes dans un matériau.....	34
2. 26Schématisation de l'effet des contraintes sur l'angle de diffraction.....	36
2. 27Effet des contraintes sur les pics de diffraction.....	36
2.28 Influence de la fréquence des oscillations sur la répartition des contraintes résiduelles .....	38
2. 29 Effet de l'amplitude des oscillations sur la répartition des contraintes résiduelles dans les échantillons d'acier.....	38

2. 30 Effet du poids des pièces traitées sur la distribution des contraintes résiduelles pour un acier: a - recuit, b – trempé.....	39
3. 1 Schéma d'un vibreur circulaire.....	41
3. 2 Exemple d'un vibreur circulaire.....	42
3. 3 Exemple d'un vibreur circulaire à grand rayon.....	42
3. 4 Schéma de la machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale.....	44
3. 5 Exemple d'un vibreur circulaire hélicoïdal.....	44
3. 6 Exemple d'un vibreur circulaire spiral de type Rotomatic.....	45
3. 7 Schéma et photo d'une machine à force centrifuge.....	45
3. 8 Schéma du vibreur linéaire.....	47
3. 9 Deux types de vibrateurs linéaires.....	48
3. 10 Schéma d'une machine multibroche type Smuritropie.....	48
3. 11 Machines multibroche type Smuritropie.....	49
3. 12 Différents types d'abrasifs (Cône, Bille et prisme) .....	50
4. 1 Schéma de la machine de vibro- abrasion RC230.....	56
4. 2 Photo de la machine de vibro- abrasion RC230.....	57
4. 3 Abrasifs en céramique.....	58
4. 4 Vibreur spiral de séchage.....	58
4. 5 Abrasifs métalliques.....	58
4. 6 Balance digitale.....	59
4. 7 Duromètre .....	59
4. 8 Rugosimètre portatif .....	60
4. 9 Polisseuse et microscope électronique à balayage .....	61
4. 10 Variation du poids des différentes pièces.....	62
4. 11 Exemple d'enlèvement de la bavure.....	62
4. 12 Variation de la dureté des différentes pièces.....	63
4. 13 Structure microscopique de l'acier mi-dur.....	63
4. 14 Structure microscopique de la fonte.....	64

## Liste des tableaux

1 Type d'aciers.....	24
2 Les différentes phases du système Fe-Fe <sub>3</sub> C.....	25
3 Quelques exemples de particules utilisés dans le milieu actif pour les différentes opérations.....	52
4 Composition de l'additif chimique liquide recommandé pour différentes Opérations.....	54
5 L'additif poudre et différentes opérations.....	55
6 Résultats de mesure .....	62

# Table des matières

Chapitre 1 : Fondements théoriques des vibrations et de tribofinition.....	1
I      Vibrations	
Introduction	
1. Généralités .....	1
a-Oscillations harmoniques.....	1
b-Mouvement libre à un degré de liberté.....	1
c- Mouvement forcé à un degré de liberté.....	2
2. Types de vibration.....	3
II     Tribofinition.....	4
1. Description du procédé de Tribofinition.....	4
2. Paramètres du procédé de tribo-finition .....	6
a-Vitesse d'impact des medias et des pièces traitées.....	6
b-Accélération d'impact.....	7
c-Force d'impact des medias.....	7
d-Energie de l'impact des medias avec les pièces.....	8
e-Pression de contact dans la zone de l'impact.....	8
f-Température dans la chambre de travail.....	8
Chapitre 2 : Caractéristiques mécaniques et géométriques des métaux.....	10
I      Etat de surface : .....	10
1. Influence de la rugosité.....	10
2. Critères d'état de surface .....	11
3. Motif local de profil .....	12
4. Paramètres d'états de surface.....	12
5. Direction de mesurage .....	14
II     Dureté .....	15
1. Mesure de dureté.....	15
2. Principaux essais de dureté.....	16
a. Essai de dureté Brinell .....	16
b. Essai de dureté Vickers.....	17
c. Essai de dureté Rockwell .....	19
3. Autre essais de dureté .....	20
a. Essai Mohs.....	20
b. Essai de rebondissement.....	20
4. Comparaison entre les différentes duretés.....	20
III    Micro dureté.....	20
1. Méthodes de mesure de micro dureté.....	21
a-Méthodes statiques.....	21
b-Méthode de Knoop.....	22
IV     Nano-dur.....	22
V      Microstructure.....	23

1. Alliages fer-carbone .....	23
2. Propriétés générales des aciers .....	23
3. Diagramme d'équilibre fer-carbone.....	24
4. Définitions.....	25
5. Microstructure des aciers au carbone.....	26
6. Fonte et sa classification.....	27
VI Résilience .....	28
VII Contraintes résiduelles.....	29
1. Origines des contraintes résiduelles.....	29
2. Les 3 ordres de contraintes résiduelles.....	31
a. Les contraintes internes du premier ordre ou macroscopique.....	31
b. Les contraintes internes du deuxième ordre ou mésoscopiques.....	32
c. Les contraintes internes du troisième ordre ou microscopiques.....	33
3. Méthodes expérimentales de détermination les contraintes internes.....	35
a. Méthodes non destructives .....	35
a. 1. Analyse par diffraction des rayons X.....	35
a.2. Autres méthodes.....	36
b. Méthodes semi destructives.....	36
Méthode du trou .....	36
c. Méthodes destructives .....	36
4. Contraintes résiduelles et tribo-finition.....	37
Conclusion.....	39
Chapitre 3 : Equipements de la Tribofinition.....	40
I Vibrateurs.....	40
1. Description du procédé de tribofinition .....	40
2. Différents types de vibrateurs.....	41
2.1. Vibrateurs circulaires .....	41
2.2. Machines à force centrifuge.....	45
2.3. Vibrateurs en continu.....	46
2.4. Machines multibroches type Smuritropie.....	48
II Milieux actifs et additifs chimiques.....	50
1 Abrasifs.....	50
2 Additifs chimiques.....	52
2.1 Additifs liquides.....	53
2.2 Additif poudre.....	54
2.3 Additifs pâtes.....	55
Chapitre 4 : Expérimentation.....	56
1 Machine utilisée.....	56
2 Description du procédé tribofinition .....	57
3 Détermination des différentes caractéristiques des pièces.....	58
4 Résultats.....	61



5	Interprétation des résultat.....	62
	Conclusions.....	65
	Bibliographie .....	66

## Introduction

La destruction des pièces au cours de processus d'exploitation commence par sa couche superficielle, ce qui est expliqué par leur soumission à une intense d'efforts et à l'influence d'un milieu extérieur actif, d'ici résulte la nécessité absolue de l'amélioration des caractéristiques physico mécaniques et géométrique des surfaces des pièces.

Presque toutes les pièces et les composants usinés exigent une certaine amélioration de la surface avant l'assemblage final, où la finition est exigée pour rendre les pièces acceptables et pour que ces pièces peuvent supporter les efforts thermiques et mécaniques des conditions du travail.

La plupart des entreprises industrielles qui utilisent des techniques de tribofinition font ainsi en raison des avantages économiques à obtenir et aussi l'amélioration importante des propriétés mécaniques des surfaces des pièces traitées, particulièrement en comparaison avec l'ébavurage manuel et les autres techniques de finition des surfaces.

La tribofinition ou la vibro-abrasion remplace souvent les procédures qui exigent la main d'œuvre et la manipulation étendue des pièces, et produit des effets extérieurs qui ne peuvent pas être obtenus avec des procédés dans lesquels les pièces sont individuellement traitées.

Bien que chacun des types de tribofinition porte avec lui des avantages et des inconvénients, tous sont suffisamment souples pour pouvoir traiter une large variété des pièces avec succès.

Dans ce travail, on va étudier cette méthode de tribofinition en analysant ces paramètres et leurs effets sur les propriétés mécaniques des pièces.

## CHAPITRE 1

---

# FONDEMENTS THEORIQUES DES VIBRATIONS ET DE TRIBOFINITION

---

### I. INTRODUCTION

La vibration est un phénomène physique oscillatoire d'un corps en mouvement autour de sa position d'équilibre. Parmi les mouvements mécaniques les plus variés, il existe des mouvements qui se répètent: les battements du cœur, le mouvement d'une balançoire, le mouvement alternatif des pistons d'un moteur à explosion. Tous ces mouvements ont un trait commun : une répétition du mouvement sur *un cycle*.

#### 1. Généralités

Le mouvement oscillatoire est dit linéaire si l'écart par rapport à la position d'équilibre est infinitésimal.

On appelle mouvement oscillatoire périodique un mouvement qui se répète et dont chaque cycle se reproduit identiquement. La durée d'un cycle est appelée *période*.

#### a-Oscillations harmoniques

Un mouvement périodique particulièrement intéressant est celui d'un objet qui se déplace de sa position d'équilibre et y revient en effectuant un mouvement de va-et-vient par rapport à cette position.

Ce type de mouvement périodique se nomme oscillation ou mouvement oscillatoire. Les oscillations d'une masse reliée à un ressort, le mouvement d'un pendule ou les vibrations d'un instrument à corde sont des exemples de mouvements oscillatoires. Un système physique oscillant est repéré par la coordonnée généralisée  $p$  qui est définie par l'écart par rapport à la position d'équilibre stable.

#### b-Mouvement libre à un degré de liberté

On définit l'oscillation harmonique d'un système à un degré de liberté par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{p}(t) + \omega_0^2 p(t) = 0 \quad (1)$$

Où  $\omega_0$  est appelée la pulsation propre du système.

On définit la période propre  $T_0$  comme suit :  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$

On appelle fréquence  $f$  le nombre d'oscillations par unité du temps :

$$f = \frac{1}{T_0} \quad (2)$$

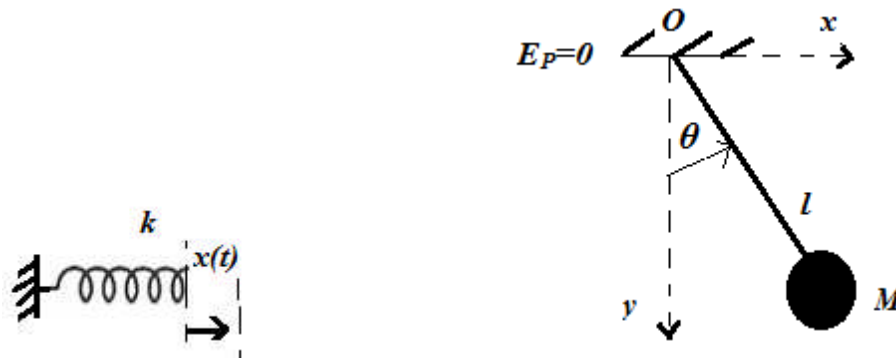


Fig.1.1 :Exemples des systèmes à un degré de liberté

La solution de cette équation différentielle est de forme sinusoïdale tel que :

$$p(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (3)$$

Où  $A$  représente l'amplitude des oscillations et  $\varphi$  est le déphasage. Les constantes  $A$  et  $\varphi$  sont déterminées par les conditions initiales.

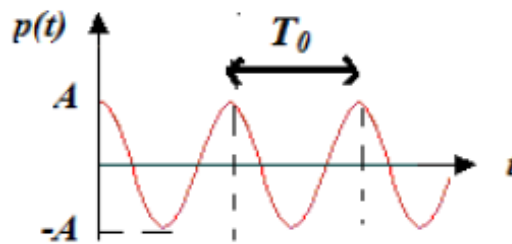


Fig.1.2 :Variation de la position en fonction du temps pour un système harmonique.

Toutes les oscillations de faible amplitude autour de la position d'équilibre peuvent être assimilées à des mouvements.

En revanche, au-delà d'une certaine amplitude l'oscillation devient non linéaire.

### c- Mouvement forcé à un degré de liberté

On entend par une oscillation forcée, tout système en mouvement sous l'action d'une force extérieure.

On définit l'équation du mouvement forcé comme suit :

$$\ddot{p}(t) + 2\delta\dot{p}(t) + \omega_0^2 p(t) = f(t) \quad (4)$$

Où  $f(t)$  est appelée la fonction excitation extérieure. Cette équation est linéaire de second ordre non homogène à coefficients constants.

La solution  $p(t)$  de l'équation différentielle qui présente la réponse du système à l'action extérieure, est la somme de deux termes :

$$p(t) = p_g(t) + p_p(t) \quad (5)$$

Où  $p_g(t)$  et  $p_p(t)$  représentent respectivement la solution générale la solution particulière.

Au début du mouvement  $p(t)$  représente le régime transitoire. Au fil du temps la solution homogène  $p_g(t)$  devient négligeable devant la solution particulière  $p_p(t)$  qui définit le régime permanent. Ainsi la solution totale dans ce cas, est de forme :  $p(t) = p_p(t)$

Dans le cas où l'excitation est sinusoïdale de type :  $f(t) = f_0 \cos \omega t = f_0 e^{j\omega t}$ , La solution totale s'écrit alors comme suit :

$$p(t) = p_p(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \tag{6}$$

Où  $A$  représente l'amplitude de la solution totale et  $\varphi$  le déphasage.

On cherche la solution de l'équation différentielle sous forme complexe :

$$p(t) = p_p(t) = A e^{(j\omega t + \varphi)}$$

Avec

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) &= j\omega A e^{(j\omega t + \varphi)} \\ \ddot{p}(t) &= -\omega^2 A e^{(j\omega t + \varphi)} \end{aligned}$$

Le module de l'amplitude s'écrit :  $|A| = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\lambda^2 \omega^2}}$  (7)

- Et l'argument :  $\varphi = \arctan \frac{2\lambda\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}$

- Il existe deux pulsations :  $\omega_1 = \Omega = 0$

$$\omega_2 = \Omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\lambda^2}$$

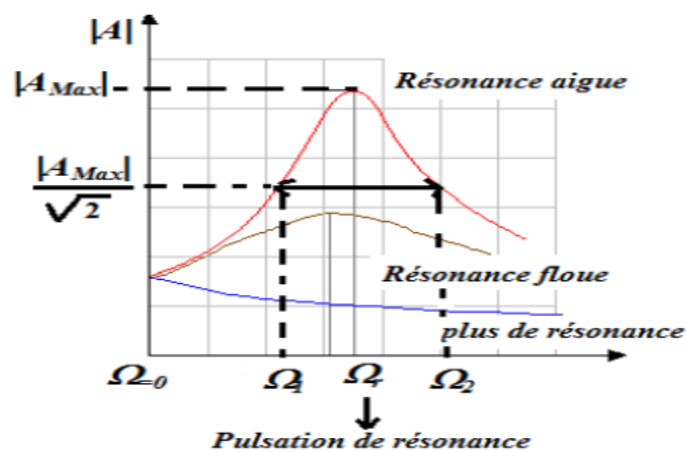


Fig.1.3 : Réponse forcée

On appelle  $\Omega_r$  la pulsation de résonance.

## 2 Types de vibration

Il existe plusieurs types de vibrations en fonction de la fréquence de vibrations :

- Très basse fréquence (< 1 Hz) : ne provoque pas d'effets à long terme.
- Basse fréquence (1 - 80 Hz) : elles représentent les vibrations globales du corps et elles sont ressenties dans le corps entier.
- Moyenne et haute fréquences (> 80 Hz) : ce sont généralement les vibrations segmentaires et elles proviennent des outils portatifs. Leur transmission se confine généralement aux membres supérieurs.

## II. TRIBOFINITION

### 1. Description du procédé de Tribofinition

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

Les pièces et les médias abrasifs sont mis en vibration dans une cuve avec ajout d'eau et d'additifs chimiques pour obtenir la finition demandée.

L'enlèvement de matière, le niveau de polissage et l'état de surface dépendent de la composition et de la taille des médias, ainsi que la déformation plastique de la couche superficielle des éléments de contact.

1	Chambre de travail
2	Élément élastique (ressort spiral)
3	Vibrateur
4	Base (fondation)
5	Tube pour le fluide (eau et l'additif chimique) et pour épanchement
6	Pompe
7	Réservoir de vidange

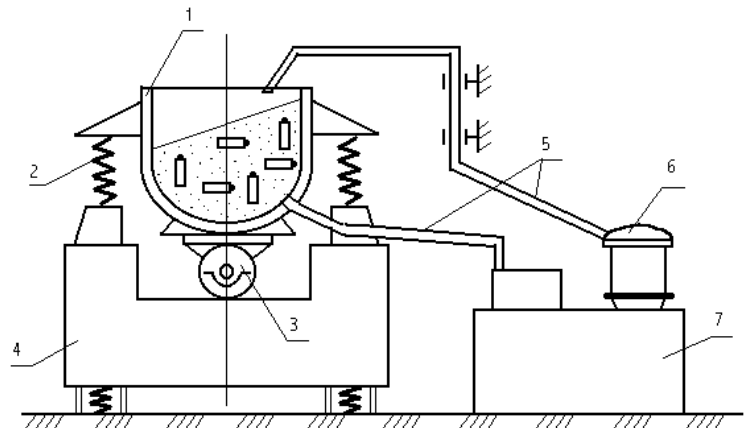


Fig. 1. 4 : Schéma du vibreur de tribofinition

Plusieurs opérations telles que: polissage, lissage, ébavurage, décalaminage, rayonnage, désoxydation, dégraissage, nettoyage de surface,.....etc. peuvent utiliser cette technologie et ce pour des surfaces métalliques, neuves ou usagées, de toutes natures mais aussi aux matières plastiques et même au bois.

En générale, la méthode du traitement par tribofinition 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 traitée.
- L'interaction mécanique du milieu actif et des pièces mécaniques.
- Le choc acoustique sous l'explosion des ondes.

Les deux premiers phénomènes causent principalement des changements sur la surface et surtout sur celle des couches minces, la différence de choc acoustique est un phénomène qui est caractérisé par l'influence des ondes sur la structure du matériau,

ainsi que le changement au niveau de la contrainte résiduelle et aussi au niveau de l'état énergétique.

La tribofinition est un processus physico-chimique qui consiste à enlever les petites particules du métal superficiellement.

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

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

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

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

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

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

L'intensité du traitement par tribofinition dépend de différents facteurs qui sont :

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

Le choix des abrasifs et de leurs matériaux dépend de l'utilisation et de l'exploitation des pièces traitées. L'enlèvement de matière, le niveau de polissage et l'état de surface dépendent de la taille et composition des médias (métallique et non métallique) introduits dans le vibreur.

## 2. Paramètres du procédé de tribofinition

L'intensité du traitement par tribofinition dépend du régime du et de plusieurs autres paramètres. Les pièces sont caractérisées par leur milieu d'utilisation, les conditions de travaux, et le lieu d'exploitation. Les différents paramètres physico-mécaniques du procédé sont :

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

Nous pouvons remarquer que l'amplitude des oscillations dans la plupart des cas varie entre 0,5 – 5mm, elle atteint rarement 7 – 8mm, avec une basse fréquence qui varie, entre 15 – 50 Hz. L'efficacité du traitement par tribofinition dépend du régime du traitement et de ses paramètres : la force d'impact (micro-impact), les caractéristiques des particules et leurs vitesses, l'accélération, la pression, la contrainte et la température dans la chambre de travail.

Les valeurs numériques de ces paramètres sont :

- la vitesse des medias varie entre 0,5 – 1.0 m/s.
- l'accélération varie entre 20 - 150 m/s<sup>2</sup>.
- La force micro-impact entre 15 – 25 N.
- La pression de contact varie entre 6864-14710 Mpa
- La température moyenne dans la chambre de travail en général est situé entre 30 -40 ° C.

### a- Vitesse d'impact des medias et des pièces traitées

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

$$v_i = v_{ch} * k_v \quad (8)$$

$$\text{Où } k_v = a^L \cong .98774^L$$

$$v_{ch} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

Et on a :

$$v_x = A_x * \Omega * \sin \Omega t$$

$$v_y = A_y * \Omega * \cos \Omega t$$

D'après la trajectoire du mouvement sur la circonférence :

$$v_{ch} = A * \Omega$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi N}{60} \cong \frac{N}{10}$$

$$\text{On en déduit : } v_{ch} \cong \frac{A * N}{10}$$

Où :

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

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



$k_v$  : Coefficient de perte de vitesse.

$A$  : Amplitude (mm).

$\Omega$ : Vitesse angulaire d'oscillation (rad/s).

$N$  : Vitesse de rotation (tours/min)

$t$  : Temps en secondes (s).

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

$a$  : Coefficient empirique.

$L$  : La distance de la paroi de la chambre de travail jusqu'à la position de la particule (mm).

### b-Accélération d'impact

L'accélération d'impact des objets d'après le traitement des métaux par tribofinition varie entre 15 - 150 m/s<sup>2</sup> et elle peut être calculée par la formule suivante:

$$a_x = A_x * \Omega^2 * \cos \Omega t$$

$$a_y = -A_y * \Omega^2 * \sin \Omega t$$

$$\text{Ce qui donne : } a = A * \Omega^2 * \sin(\Omega t + \varphi) \quad (9)$$

### c-Force d'impact des medias

La force d'impact des medias et des pièces à traiter dépend du régime d'oscillation et des caractéristiques des particules et elle varie entre 4.9-49 [N].

Pour le traitement des pièces fixées:

$$F_{pf} = 58.8 * V_i * \sqrt{\frac{m * \sigma_e * R_b * k_m * k_g}{k_n}} \left(1 - \frac{3}{8} k\right) \quad [\text{N}] \quad (10)$$

Pour le traitement des pièces libres :

$$F_{pl} = 58.8 * V_i * \sqrt{\frac{m * \sigma_e * R_b * k_m * k_g * B}{k_n}} \quad (11)$$

Avec :

$m$  : Masse des particules (g).

$V_i$  : Vitesse d'impact (m/s).

$R_b$ : Rayon de la bille (mm).

$\sigma_e$ : Limite d'élasticité des matériaux des pièces à traiter (MPa ou N/mm<sup>2</sup>).

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

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

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

$k$  : Coefficient de régénération (récupération).

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

### d-Energie d'impact des medias avec les pièces

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

$$E = \frac{HB*d^2}{6D} \quad (12)$$

Où  $HB$ : Dureté Brinell du matériau.

$d$ : Diamètre de l'empreinte (mm).

$D$  : Diamètre de la bille (mm).

### e-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 :

$$P_{cmax} = \frac{3}{2} * \frac{F}{\pi ab} \quad (13)$$

Où  $F$  : force de l'impact [N].

$a$  et  $b$  : dimensions de demi-axe de la surface de contact (mm), ils peuvent être déterminé par la formule suivante :

$$a = \theta_1 \left[ \frac{3}{8} * \frac{F}{\sum \rho} (\theta_1 + \theta_2) \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{et} \quad b = \theta_2 \left[ \frac{3}{8} * \frac{F}{\sum \rho} (\theta_1 + \theta_2) \right]^{\frac{1}{3}}$$

Où :

$\theta_1$  et  $\theta_2$ : Coefficients d'élasticité qui caractérisent les 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 tribofinition, 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 :

$$a = 0.0677(F * D)^{\frac{1}{3}}$$

$D$  : Le diamètre des medias du milieu actif.

### f- Température dans la chambre de travail

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

$$T = \frac{m*v_i^2}{2} * \frac{1}{427} * \frac{1-k^2}{c_s*\gamma*n*\mu} \quad (14)$$

Où :  $\mu = \frac{\pi r^4}{4R}$  Volume de l'empreinte.

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

$c_s$  : Chaleur spécifique.

$\gamma$  : Densité du matériau.

$n$  : Coefficient de proportionnalité.

$\mu$  : Rayon de l'empreinte.

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

$m$ : Masse des particules.

$k$  : Coefficient de régénération (récupération)

## CHAPITRE 2

---

# CARACTERISTIQUES MECANIKES ET GEOMETRIQUES DES METAUX

---

### I. ETAT DE SURFACE :

Les divers procédés d'usinages (rabotage, tournage, fraisage, rectification, rodage, superfinition, etc.) laissent tous à des degrés plus ou moins importants subsister deux types de défauts sur les pièces :

- a) **défauts de forme** (défauts macro géométriques) : défauts affectant la forme géométrique, l'orientation ou la position relative des pièces usinées. Ces défauts sont qualifiés de 1<sup>er</sup> ordre.
- b) **défauts de rugosité** (défauts micro géométriques) : défauts caractérisant la qualité de surface des pièces. Ils sont qualifiés de 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre :
  - **défauts de 2<sup>ème</sup> ordre** : défauts moyens d'ondulation périodiques provoqués par l'avance de l'outil de coupe.
  - **défauts de 3<sup>ème</sup> ordre** : ce sont des petits défauts (stries, sillons) réguliers de rugosité de hautes fréquences. Ils sont provoqués par un mauvais état de l'arête de coupe (géométrie et qualité d'affûtage).
  - **défauts de 4<sup>ème</sup> ordre** : ce sont des petits défauts anormaux de rugosité (fentes, piqûre, arrachement de matière par un outil exerçant un frottement intense sur la surface usinée), ils sont dus par exemple à l'hétérogénéité du matériau, aux conditions de lubrification (nature, filtrage), etc.

#### 1. Influence de la rugosité :

Si l'on veut avoir un jeu ou un serrage bien défini, il faut obtenir des rugosités telles que la somme des sillons des deux surfaces soit bien inférieure à la tolérance de ces ajustements. Une tolérance dimensionnelle impose donc un maximum à la tolérance de rugosité.

Cependant, l'absence de sillons n'est pas toujours souhaitable. Ainsi :

- l'état de surface des cylindres laminoirs ne doit pas être trop fin, sinon la tôle est mal entraînée

Par contre :

- a) l'emploi de joints toriques dans les vérins nécessite un bon état de surface du cylindre.
- b) un polissage soigné augmente l'endurance de certaines pièces soumises aux chocs répétés et à la corrosion.

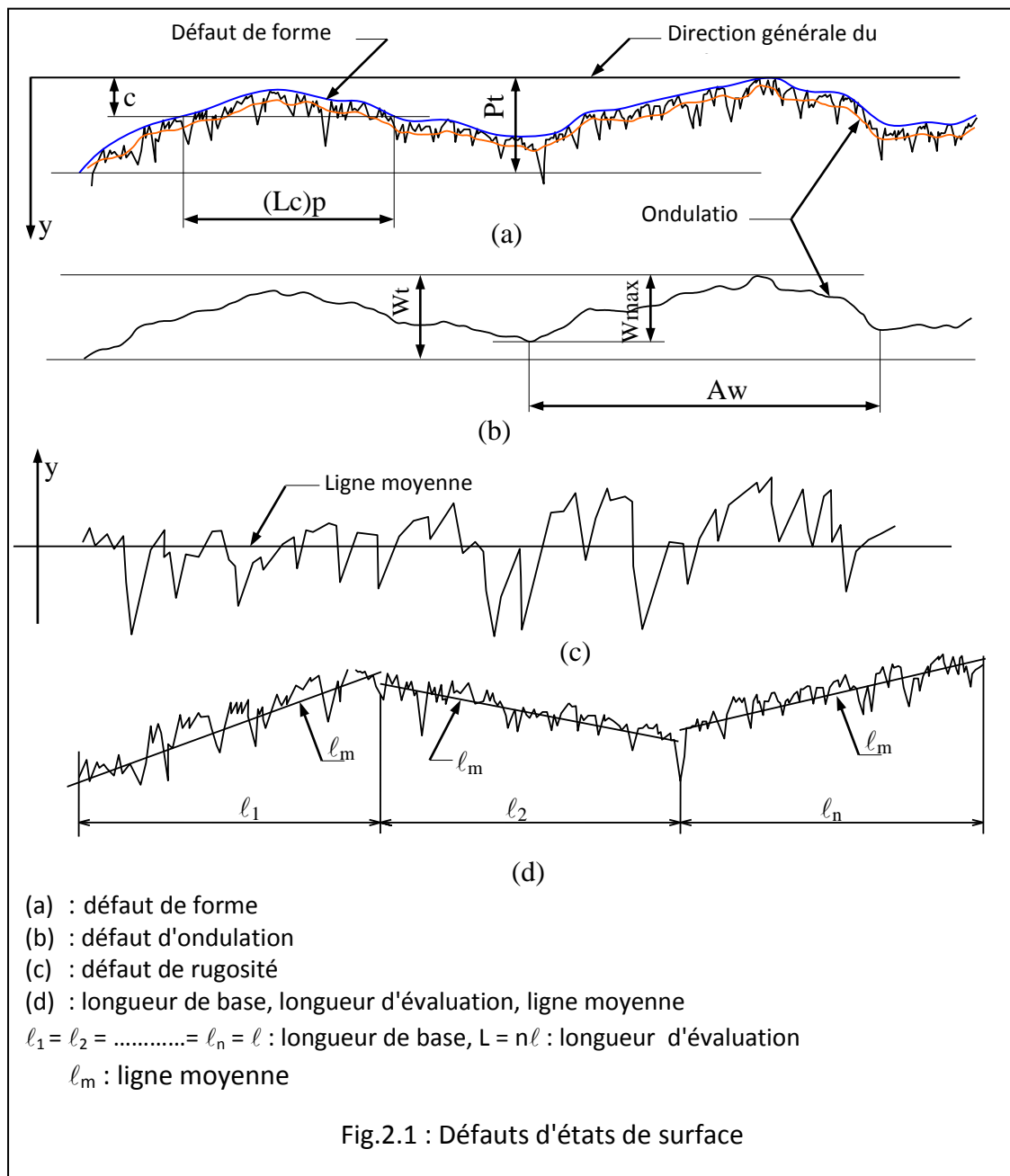
La rugosité a donc de nombreuses répercussions sur le comportement de la surface des pièces usinées :

- frottement mécanique
- échauffement
- résistance à la rupture et à la fatigue

- étanchéité, etc.

**2. Critères d'état de surface :**

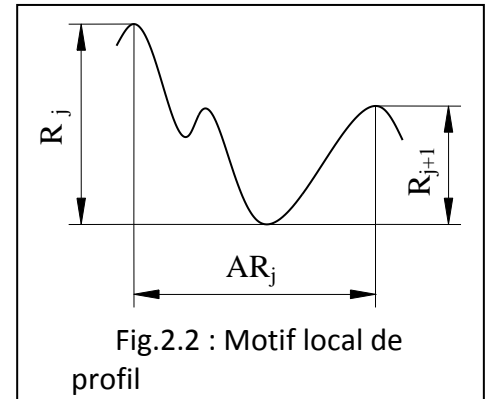
Les paramètres d'états de surface sont désignés par des lettres dont la première lettre, en majuscule indique le profil sur lequel les paramètres correspondant ont été calculés : P Pour primaire, W pour ondulation et R pour rugosité. Par exemple  $P_t$  est calculé sur le profil primaire,  $R_a$  sur le profil de rugosité. La fig.2.1 illustre les défauts d'état de surface.



### 3. Motif local de profil

C'est une portion de profil comprise entre les points de deux saillies locales de profil, consécutives ou non. Un motif est caractérisé par :

- sa longueur  $AR_j$ ,
- ses deux profondeurs  $R_j$  et  $R_{j+1}$ .
  
- sa caractéristique (T) égale à la plus petite des deux profondeurs  $R_j$  et  $R_{j+1}$  ; dans le cas de la fig.2, on a  $T = R_{j+1}$  car  $R_{j+1} < R_j$



### 4. Paramètres d'états de surface

On distingue les paramètres liés à la ligne moyenne et ceux liés aux motifs. Nous en citerons quelques-uns seulement.

#### 4. 1. Paramètres liés à la ligne moyenne sur les longueurs de base et d'évaluation

- **Hauteur maximale du profil** (fig.2.3)

$R_{yi}$  est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux sur la longueur de base.

La hauteur totale  $R_t$  sur la longueur d'évaluation est la valeur maximale des  $R_{yi}$

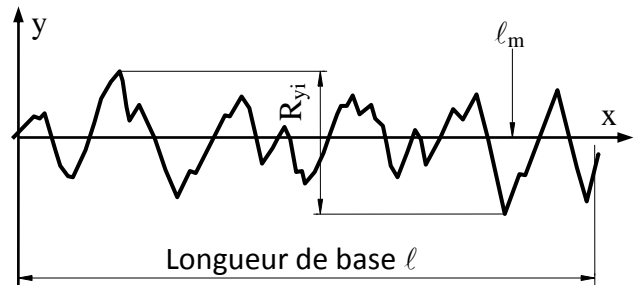


Fig. 2.3

- **Hauteur maximale de saillie** (fig.2.4)

$R_{pi}$  est la distance du point le plus haut à la ligne moyenne  $\ell_m$

La hauteur maximale sur la longueur d'évaluation est :

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{p_i}$$

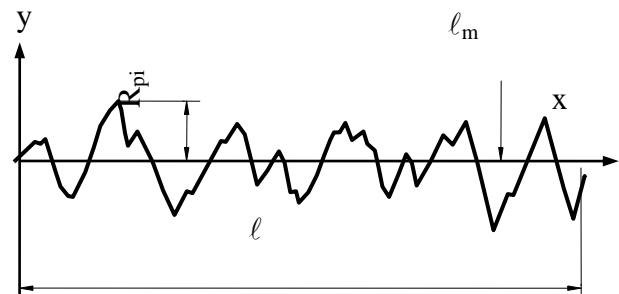


Fig. 2.4

- **Ecart moyen arithmétique du profil** (fig.2.5)

$$Ra_i = \frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} |y(x)| dx$$

La rugosité arithmétique sur la longueur d'évaluation est :

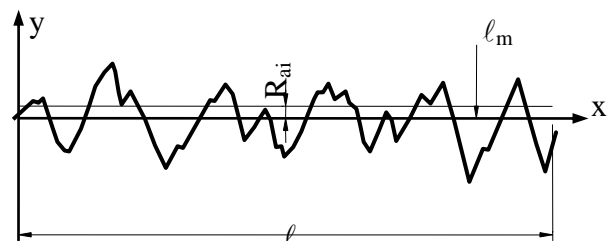


Fig. 2.5

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ra_i$$

• **Ecart moyen quadratique du profil**

$$R_{qi} = \sqrt{\frac{1}{\ell} \int_0^{\ell} y^2(x) dx}$$

Sur la longueur d'évaluation L, on a :  $R_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{qi}$

• **Maximum de la hauteur des irrégularités du profil (fig. 2. 6)**

On a :  $R_{max_i} = \max(y_p + y_v)$  avec  $(y_p + y_v)$  somme de la hauteur d'une saillie et de la profondeur d'un creux adjacent.

Sur la longueur d'évaluation, on a :

$$R_{max} = \max \text{ des } R_{max_i}$$

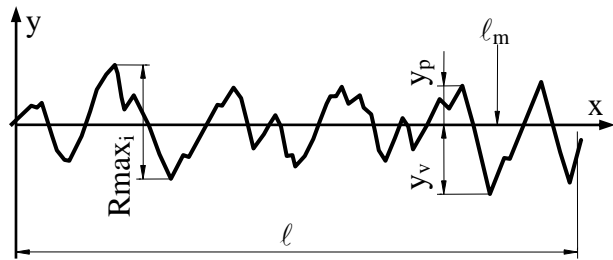


Fig. 2.6

• **Hauteur des irrégularités sur 10 points (fig. 2. 7)**

$$R_{zi} = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5}$$

$R_{zi}$  est déterminé en prenant 5 saillies les plus hautes et 5 creux les plus bas.

Sur la longueur d'évaluation, on a :

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{zi}$$

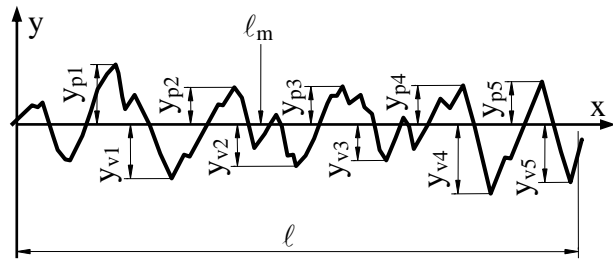


Fig. 2.7

• **Pas moyen des irrégularités du profil (fig. 2. 8)**

$$\overline{S_{mj}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_{mi}$$

Sur la longueur d'évaluation, on a :

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \overline{S_{mj}}$$

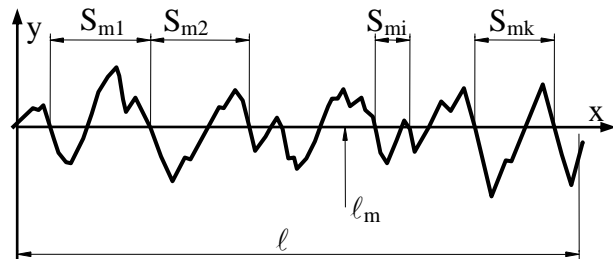


Fig. 2.8

• **Taux de longueur portante (fig. 2. 9)**

$$(t_p)_c = \frac{\eta_p}{L}$$

avec :  $\eta_p = b_1 + b_2 + \dots + b_n$

L est la longueur d'évaluation

c est le niveau de coupe (distance une ligne de saillie  $l_s$  et une ligne parallèle coupant le profil),  $\eta_p$  la longueur portante du profil.

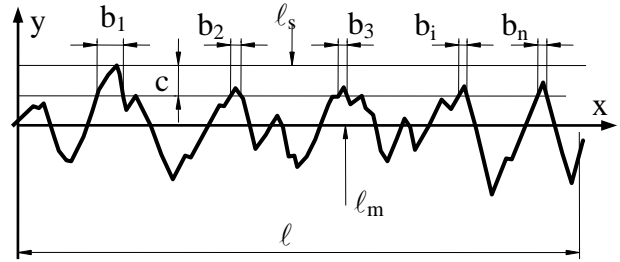


fig. 2.9

## 4.2. Paramètres liés aux motifs

### 4.2.1 Paramètres de rugosité

- **Profondeur moyenne de rugosité** (fig.2.10)

A remarquer que pour un motif de profil donné, il y a deux fois plus de  $R_i$  que de  $AR_i$ , ce qui donne :  $m = 2n$

Pour n motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation L, la profondeur moyenne de rugosité est définie par :

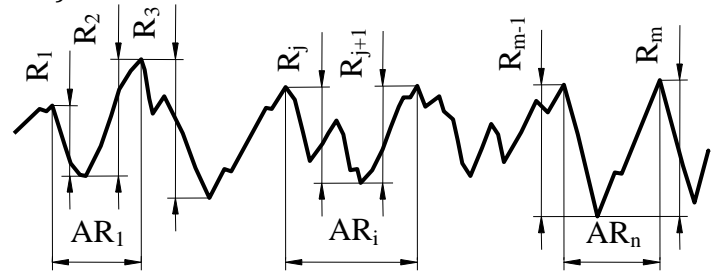


fig. 2 .10

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i$$

- **Pas moyen de rugosité**

Pour n motifs caractéristiques sur la longueur d'évaluation L, le pas moyen de rugosité

est défini par :  $AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$

- **Profondeur maximale de rugosité**

Elle est désignée par  $R'_{max}$  : c'est la valeur maximale des  $R_i$ .

## 5. Direction de mesurage

Habituellement, la rugosité est mesurée perpendiculairement (sauf indication contraire) à la direction prépondérante des stries (fig.2.11, segment A ou vue F-F) qui donne le nombre maximal de crêtes couvertes par h longueur d'évaluation, par suite h valeur maximale des profondeurs des paramètres de rugosité. Si la direction de mesurage est différente (segments B, C, D), les crêtes de rugosité diminuent jusqu'à même où ils ne seront plus enregistrés (segment E : direction parallèle aux sillons). Dans ce dernier cas, le résultat de mesurage est minimal et correspond à la rugosité du 4<sup>ème</sup> ordre.



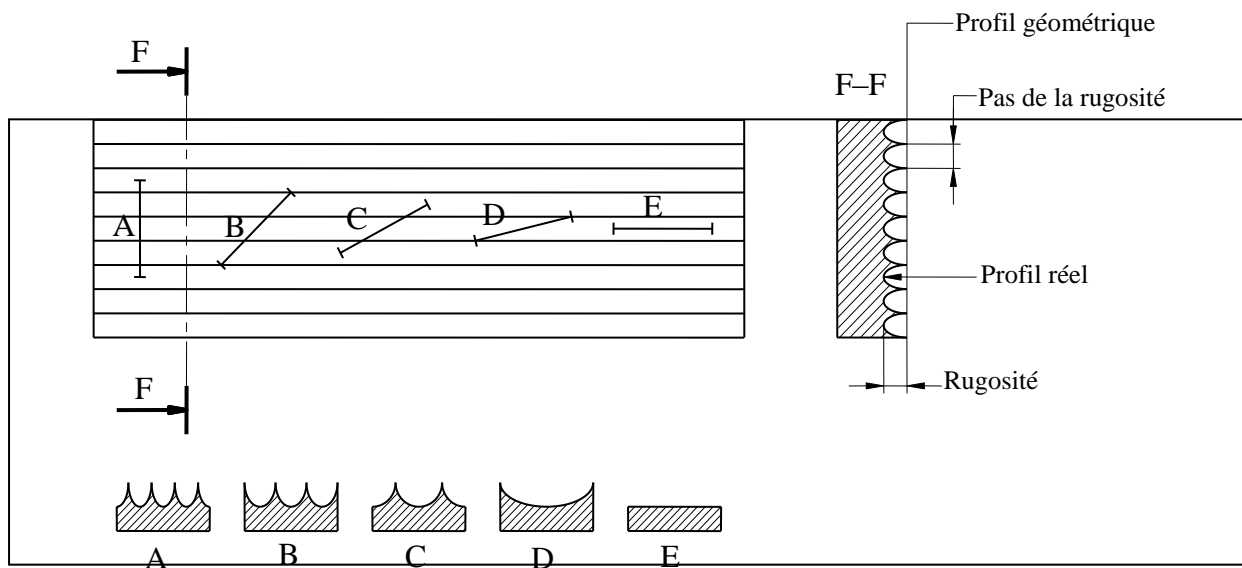


fig.2.11 : Influence de la direction de mesure sur le résultat des paramètres de rugosité

## II.DURETE

La dureté d'un matériau est une caractéristique de sa résistance à la déformation plastique localisée. Les mesures de dureté sont fréquemment utilisées, car elles ne nécessitent pas la préparation d'une éprouvette spéciale et peuvent être effectuées directement sur pièce de structure. Ce sont des mesures non destructives, qui donnent essentiellement des valeurs comparatives. Ces essais sont souvent utilisés en essais mécaniques suivi de fabrication, contrôle de qualité, etc.

La dureté des matériaux peut être profondément modifiée par écrouissage ou par traitement thermique. Inversement on peut, à l'aide de la valeur de dureté, tirer des conclusions relatives à l'état microstructurale du matériau (état de précipitation) par exemple).

### 1. Mesure de 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 indenteur ou d'un pénétrateur très dure à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté, sans dimension, 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.

Les essais de dureté donnent des empreintes dont la taille est de l'ordre de du millimètre. Une empreinte de dureté couvre donc généralement un nombre important de grains .Ceci peut être un avantage, l'anisotropie des grains étant responsable pour une large part de l'importance dispersion sur les mesures de dureté obtenus avec des tailles d'empreintes inférieurs au diamètre d'un grain.

La figure 2.12 définit la géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et micro dureté

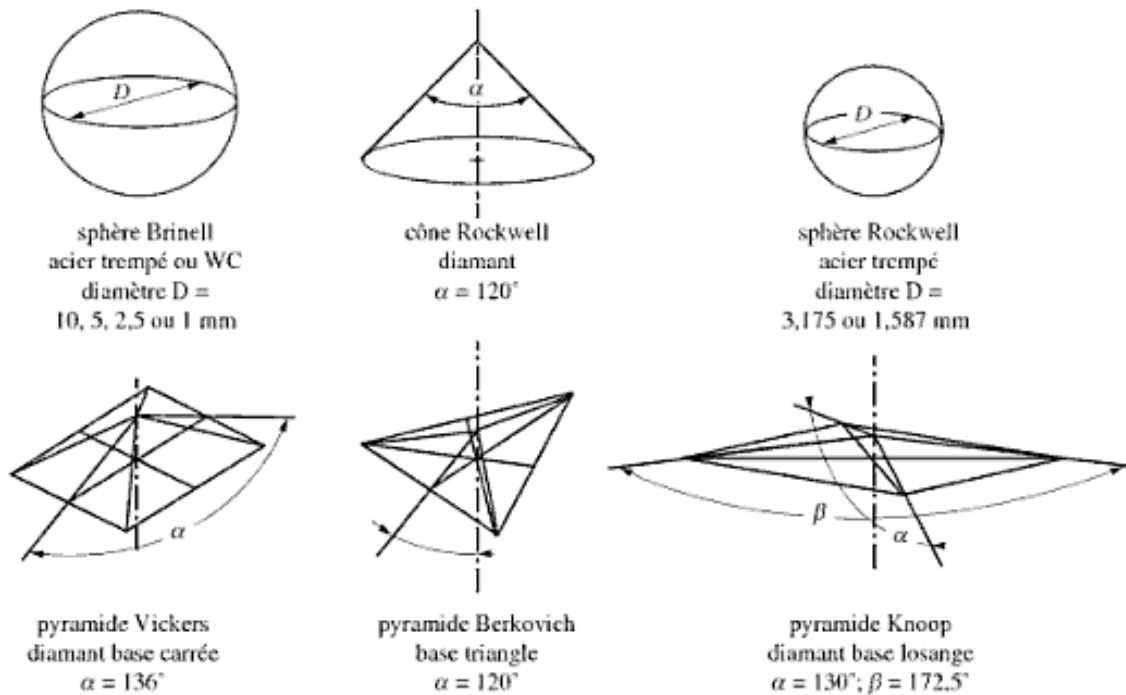


Figure. 2. 12:géométrie des différents types d'indenteurs utilisés pour les mesures de dureté et micro dureté

## 2. Principaux essais de dureté

### a- Essai de dureté Brinell

La dureté de Brinell est notée  $HB$ , les mesures de dureté Brinell sont utilisables jusqu'à des duretés de 650  $HB$ . Pour l'essai Brinell, le pénétrateur est une bille en acier trempé polie ou une bille en carbure. La bille en acier est utilisée pour des duretés allant jusqu'à 350  $HB$ , pour des duretés plus importants, la déformation élastique de la bille en acier n'est pas négligeable, on utilise alors une bille en carbure dont sont normalisés (1 ; 2,5 ; 5 ou 10 mm).

Le pénétrateur doit être appliqué sur une surface lisse de la pièce avec une force donnée, à une vitesse contrôlée.

Le diamètre de l'empreinte laissée par le pénétrateur après retrait complet de la charge est mesuré sur la pièce.

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.

La surface arrière de la pièce ne doit pas présenter de déformations visibles (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.

L’empreinte est supposée circulaire et ayant une forme d’une calotte sphérique, on prend le diamètre de l’empreinte avec une précision de  $\pm 1\%$  afin que l’incertitude sur la valeur de dureté ne dépasse pas 2%. Dans le cas d’une empreinte non circulaire, on prend la valeur moyenne des deux diamètres perpendiculaires de l’empreinte.

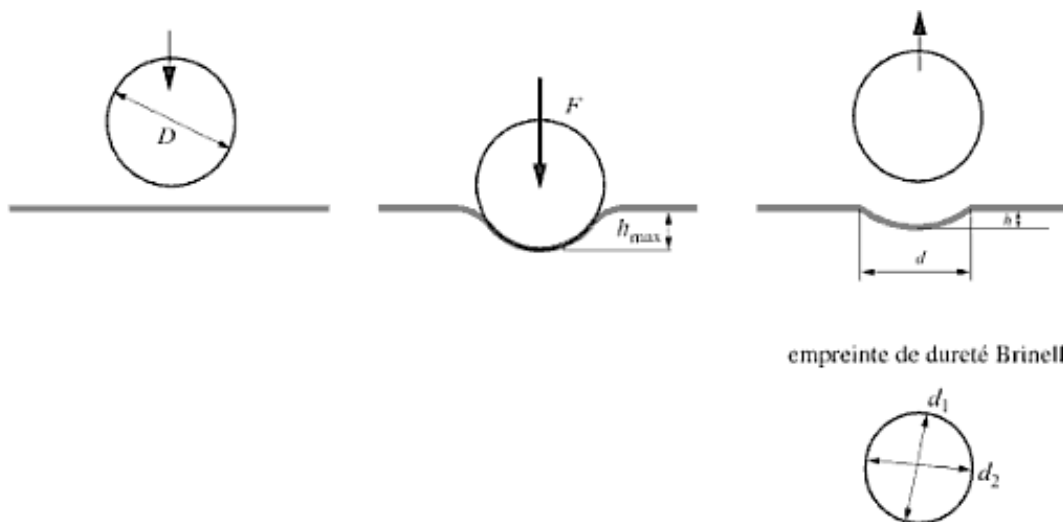


Fig. 2. 13 : Schéma de principe d’un essai de dureté Brinell

La valeur de la dureté Brinell est donnée par :

$$HB = \frac{0.102 * F}{A}$$

$F$  : Force appliquée (N).

$A$  : L’aire de l’empreinte de la calotte sphérique (mm<sup>2</sup>).

Elle est donnée par :  $A = \frac{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$  (15)

Avec  $D$  : diamètre de la bille (mm).

$d$  : diamètre de l’empreinte (mm).

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).

Les valeurs de la dureté obtenues par différentes méthodes ne sont comparables que si ces mesures ont été effectuées sous des conditions identiques.

### b- 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. Pour cet essai, dont le principe est défini sur la figure

2.8, on utilise comme pénétrateur un diamant épointé de forme pyramidale à base carrée et d'angle 136° entre deux faces opposées (figure 2.14).

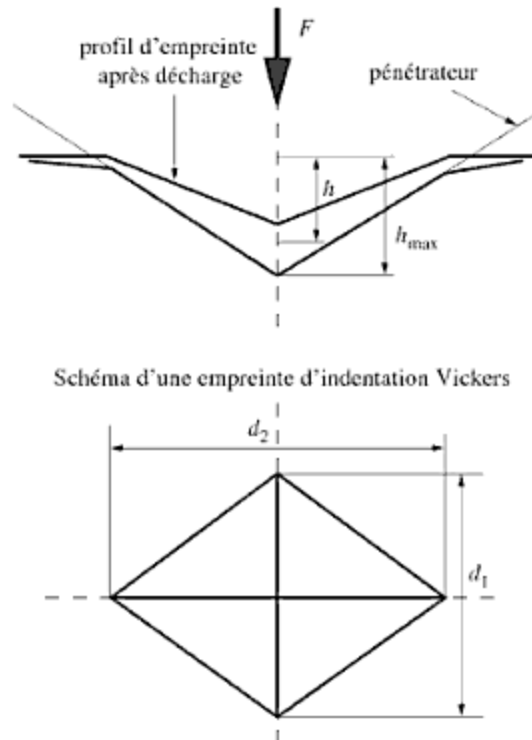


Figure .2..14 : Schéma de principe d'un essai de dureté Vickers

Le diamant 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. La charge est appliquée en 10 à 15 secondes jusqu'à sa valeur maximale, elle est ensuite retirée. L'empreinte laisse alors une empreinte de forme pyramidale.

La diagonale de l'empreinte est mesurée. La valeur moyenne des deux diagonales est utilisée si le matériau est anisotrope. La précision du dispositif de mesure des diagonales doit être de 1% (0.01 mm) correspondant à un écart sur la dureté Vickers est de 2%.

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

$$HV = \frac{1.854 * F}{d^2} \quad (16)$$

$$d = \frac{d_1 + d_1}{2}$$

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

$d_1$  et  $d_1$  : diagonale de l'empreinte (mm)

$d$  : La moyenne des deux diagonales (mm)

A l'instar des valeurs de la dureté Brinell, les valeurs de la dureté Vickers obtenues par différentes méthodes ne sont comparables que si ces mesures ont été effectuées sous des conditions identiques.

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 micromètre (plus l'empreinte est petit et plus la dureté grandes et la qualité de la surface doit être polie).
- Pour les mesure de dureté d'une couche superficielle durcie, la force de mesure doit être choisie de telle sorte qu'aucune trace de déformation ne soit visible sur la face opposée après l'essai, et de que l'épaisseur de la couche soit supérieur ou égale à 1.5 fois la diagonale de l'empreinte.

La mesure de dureté Vickers peut être effectuée sur une surface cylindrique convexe ou sphérique .Il convient alors d'une part de respecter un bon centrage de l'échantillon par rapport à l'axe du pénétrateur, et d'autre part d'effectuer une correction fournie par la norme en fonction de la géométrie de la surface indentée.

### c- 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 elle plutôt 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 sureté Rockwell, le pénétrateur est soit un cône en diamant pointu d'angle au sommet  $120^\circ$  et à pointe arrondie sphérique (rayon 0.2mm), soit une bille en acier de diamètre 1.587mm ou 3.175mm

La pénétration s'effectue en deux temps à la surface lisse de la pièce. Une charge initiale  $F_0$  et d'abord appliquée, cette charge est de 30 N pour les duretés superficielles, et de 100 N pour des échantillons massifs. Puis, la charge est augmentée progressivement jusqu'à la charge d'essai en 2 à 8 secondes, elle est maintenue constante durant  $4 \pm 2$  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 (d'après la figure 2.15).

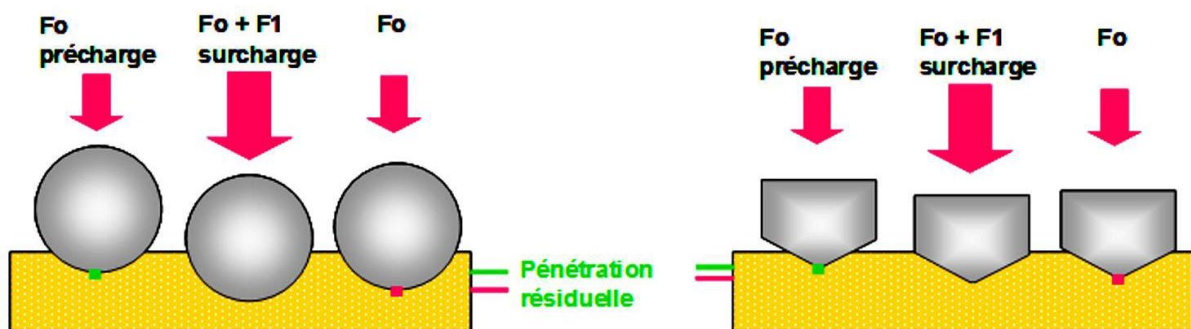


Figure .2. 15 : Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell

$e$  : profondeur de pénétration résiduelle.

On déduit la dureté de Rockwell de l'accroissement de profondeur de pénétration, mesuré 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 :

$$HR = N - e/s$$

Avec

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

$e$  : Profondeur de pénétration résiduelle (mm).

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

Le domaine d'application de la mesure de dureté Rockwell est essentiellement celui des mesures rapides de dureté pour les matériaux de dureté comprise entre 20 et 70 HRC. Pour les matériaux plus mous, l'échelle HRB doit être utilisée ou le cône est remplacé par une bille en acier de diamètre 1,587 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 et 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 supérieure à 0.7 mm

### 3. Autre essais de dureté

#### a- Essai Mohs :

C'est la première échelle de dureté. C'est une échelle empirique pour classer les éléments non métalliques et minéraux en les comparant à divers minéraux rangés par ordre de dureté croissante. Chaque élément de l'échelle est susceptible de rayer tous les éléments qui le précèdent, et ne peut être rayé par eux. Les éléments de l'échelle de Mohs sont le talc, le gypse, la calcite, la fluorine, l'apatite, l'orthoclase, le quartz, la topaze, le corindon et le diamant.

#### b-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 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.

### 4. Comparaison entre les différentes duretés

A cause des différents processus micromécaniques mis en jeu dans les différentes méthodes de mesure de dureté, on comprend bien qu'il n'existe pas de formule de traduction entre les valeurs de dureté  $HB$ ,  $HV$  et  $HRC$ . Néanmoins, les résultats de

nombreuses séries d'essais sur des aciers ont permis d'établir des cartes de conversion . Une estimation peut de même être effectuée à l'aide de relations empiriques telles que  $HB \cong 0.95HV$  ou  $HRC = 1/10 HV$  (Dans le domaine 200 – 400HV).

### III.MICRO DURETE

On parle de micro dureté lorsque la taille d l'empreinte correspondante st de l'ordre de quelques micromètres ( $\mu m$ ).Elle nécessite des essais sous très faibles charges car elle mesure la dureté des tôles minces et des revêtements superficiels dont la profondeur d'empreinte ne dépasse pas 1/10 de l'épaisseur du matériau testé. Comme pour les mesures de dureté macroscopiques, il est indispensable lorsqu'on donne une valeur de micro dureté de préciser les conditions d'essai en particulier,la charge appliquée.

Les mesures de micro dureté sont utilisées pour mesurer les duretés des différentes phases d'un matériau polyphasé, ou celles des différents constituants d'un matériau composite. Pour que la valeur de la dureté de chaque phase soit valable, la taille de l'empreinte ne doit pas dépasser 1/7 de la taille du constituant .Elles sont parfois utilisées pour mesurer la ténacité d'un matériau fragile. Les mesures de micro dureté sont également utilisées pour caractériser les couches traitées superficiellement dans leur épaisseur (couche nitrurées, carburées, carbonitrurées....),ou pour mesurer l'écaillage superficiel d'une pièce.

#### 1. Méthodes de mesure de micro dureté

##### a-Méthodes statiques

La plupart des méthodes statiques couramment utilisées pour mesurer la micro dureté, analogues aux différentes méthodes décrites précédemment pour la mesure de dureté, sont basées sur le principe de mesure de l'aire d'une empreinte (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 micro dureté. La valeur de micro dureté statique,  $H$ , ( par exemple la micro dureté selon Vickers  $HV$ ) est calculée comme suit :

$$H = \frac{F}{A} = \frac{cF}{d^2} \quad (17)$$

Où :

$F$  : La charge appliquée (N).

$A$  : L'aire de l'empreinte ( $mm^2$ ).

$c$  : Une constante indépendante de la charge, fonction de la géométrie du pénétrateur.

$d$  : Diagonale de l'empreinte générée.

Le microduremètre est composé d'un appareil de mesure de dureté et d'un microscope. Pour l'évaluation de très petites empreintes de micro dureté, on utilise un microscope électronique à balayage.

### b-Méthode de Knoop

La méthode Knoop de mesure de micro dureté 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. Son avantage est la dimension d'empreinte suffisamment importante pour une charge néanmoins très faible.

La dureté Knoop notée HK, est calculée comme suite :

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{.102 * F}{l^2} \quad (18)$$

Où :

$F$  : La charge appliquée (N).

$A$  : La surface (mm<sup>2</sup>).

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

Le pénétrateur Knoop est intéressant pour caractériser les couches superficielles dans leur épaisseur, en raison de sa faible dimension dans une direction de pénétration.

### IV. NANO-DURETE

L'utilisation de couches de revêtement de plus en plus minces est nécessaire pour l'étude de leurs propriétés mécaniques. La mesure de nano-indentation est caractérisée par la profondeur de l'empreinte qui peut se limiter à quelques dizaines de nanomètres. Le pénétrateur utilisé est généralement de type Berkovich : diamant pyramidal à base triangulaire. La dureté  $H$  est obtenue par le rapport de la charge maximale appliquée  $P_{max}$  à l'aire  $A$  de contact pénétrateur/ échantillon. L'instrumentation du nano-indenteur permet de tracer la courbe « force  $P \times$  déplacement  $h$  » (figure 2.16). La pente  $dp/dh$  du retour élastique de l'indenteur est proportionnelle au module de Young du matériau testé, qui peut être calculé moyennant un étalonnage de rigidité de l'appareil.

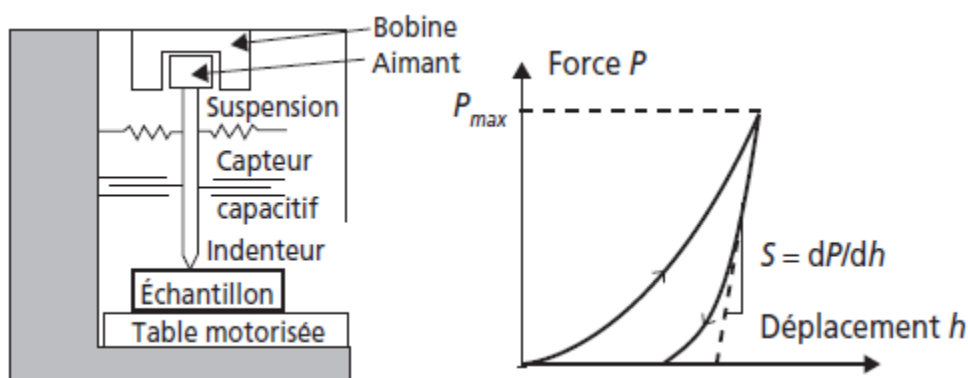


Fig. 2. 16 : Schéma de principe d'un nano-indenteur et d'une courbe de nano-indentation

Le nano duromètre est parfois relié à un microscope à force atomique de façon à pouvoir mesurer le relief d'indentation.



## V. MICROSTRUCTURE

### 1. Alliages fer-carbone :

L'acier est un alliage constitué d'au moins deux éléments :

- Le fer.
- Le carbone dans des proportions comprises entre 0,008 % et 2,14 % en masse.

Sa densité varie donc autour de celle du fer (7,32 à 7,86), suivant sa composition chimique et ses traitements thermiques. La densité d'un acier est typiquement un peu supérieure à 8. Par exemple, la densité d'un acier inoxydable de type 304 est environ 8,02.

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal que l'on appelle "acier". Il existe d'autres métaux à base de fer et de carbone qui ne sont pas des aciers, les fontes en est un exemple.

Ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition.

Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des traitements de surface auxquels ils ont été soumis.

### 2. Propriétés générales des aciers

Les aciers sont ordinairement très bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité et opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent. Ils sont le plus souvent durs, rigides et plastiquement déformables. Ils possèdent une température de fusion élevée.

Les aciers sont élaborés pour résister à des sollicitations mécaniques ou des agressions chimiques ou une combinaison des deux.

Pour résister à ces sollicitations et/ou agressions, des éléments chimiques peuvent être ajoutés en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, dont les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

Les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en 2 catégories:

- Les impuretés, originellement présentes dans les ingrédients de haut fourneau qui serviront à produire la fonte qui servira à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présents dans la coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb), intentionnelle pour conférer au matériau les propriétés recherchées.
- Les éléments d'accompagnement que l'acier utilise en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir en final un acier conforme à la spécification. C'est le cas d'éléments comme l'aluminium, le silicium, le calcium.

### 3. Diagramme d'équilibre fer-carbone

C'est le diagramme d'équilibre fer-carbone métastable .il représente la composition et la structure des alliages dont la concentration varie du fer à la cémentite.

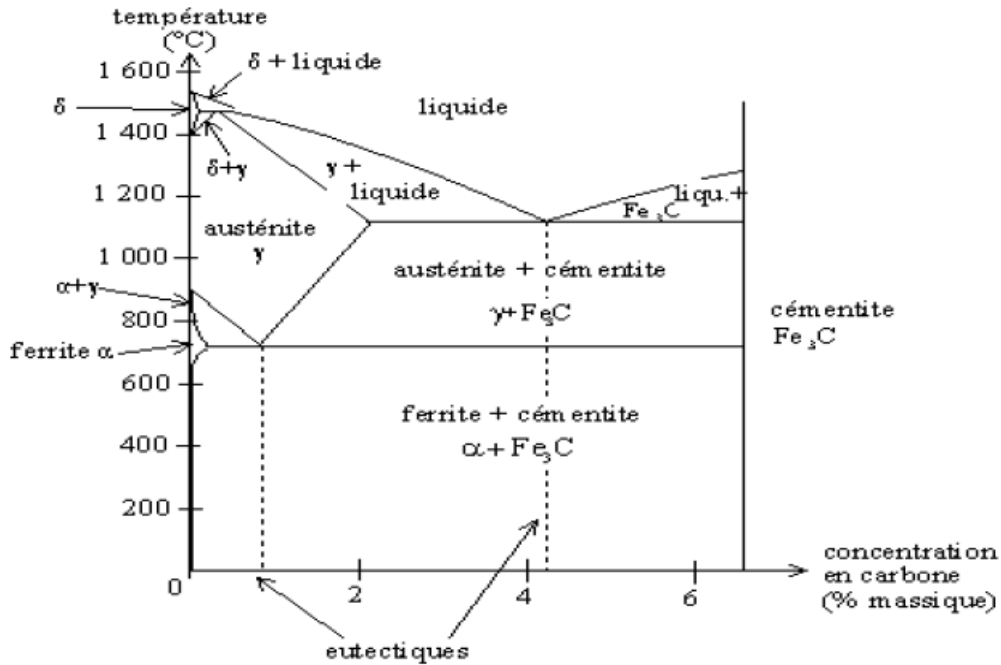


Fig.2.17 : Diagramme Fer-Carbone (%C < 2%)

A partir du diagramme fer carbone, on peut définir les aciers suivant leur teneur en carbone:

Tableau 1 : types d'aciers

Désignation	% de carbone
Acier hypoeutectique	0.02 à 0.8
Acier eutectoïde	0.8
Acier hypereutectique	0.8 à 2.06

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone, mais aussi d'autres éléments d'alliage) et de la température. On peut avoir aussi des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe).

La structure du fer pur dépend de la température :

Tableau 2 : les différentes phases du système Fe-Fe<sub>3</sub>C

Phase	Empilement	Solution liquide de carbone dans le fer
δ	C.C	Solution solide interstitielle désordonnée de C dans le fer C.C, la solubilité maximale à 1492°C est 0.08% pds .le fer δ est la phase stable du fer pur entre 1391°C et 1536°C.
γ	C.F.C	Solution solide interstitielle désordonnée de C dans le fer C.F.C. La solubilité maximale à 1130°C est 1.7% pds. le fer γ est la phase stable du fer pur entre 914°C et 1391°C.
α	C.C	Solution solide interstitielle désordonnée de C dans le fer C.C.La solubilité maximale à 723°C est 0.035% pds .le fer α est la phase stable du fer pur en dessous de 914°C
Fe <sub>3</sub> C	Complexe	Composé chimique défini de fer et de carbone, dur et fragile, contenant 6.7% pds de carbone.

#### 4. Définitions

**La ferrite** : La ferrite (fer α) est une phase de l'acier, sous la forme d'une structure cubique centrée. Cette phase est observable lorsque la température est inférieure à 912 °C ou supérieure à 1394 °C si la teneur en carbone est très faible (0.022%).

**L'austénite** : L'austénite (fer γ) est une phase du fer. Pour le fer pur elle est stable entre 910°C et 1394°C. Cette phase a une structure cristallographique cubique à faces centrées. Cette structure permet une grande solubilité du carbone (jusque 2,1 % massique à 1147°C).

**La cémentite** : la cémentite (ou carbure de fer) est un composé chimique dont la formule est Fe<sub>3</sub>C dont la structure est orthorhombique. Elle contient 6,67% de C. C'est un composé très dur mais très fragile. Elle forme avec la ferrite un constituant appelé perlite.

**La perlite** : constituant micrographique issu de la transformation eutectoïde des aciers et constitué d'un agrégat de ferrite et de cémentite de morphologie souvent lamellaire, parfois nodulaire.

**La lédéburite** : constituant métallographique des fontes, issu de la transformation eutectique du diagramme Fe-C, et constitué d'un agrégat de cémentite et d'austénite nodulaire.

**La bainite** : constituant métastable intermédiaire des aciers, constitué de ferrite sursaturée en carbone (de forme aciculaire ou en latte) et de fines particules de cémentite en forme de bâtonnets généralement. La bainite est obtenue par refroidissement assez rapide.

**La martensite** : solution solide métastable de carbone dans le fer, de structure quadratique centrée, obtenue par transformation sans diffusion de l'austénite lors d'un refroidissement suffisamment rapide

## 5 Microstructure des aciers au carbone

La microstructure des aciers au carbone change d'une manière remarquable avec la teneur en carbone: De 0 à 0.85 % poids de carbone, la microstructure de ferrite est graduellement remplacée par de la perlite. A des teneurs encore plus élevées, de carbone il y a formation de cémentite aux anciens joints de grains de l'austénite.

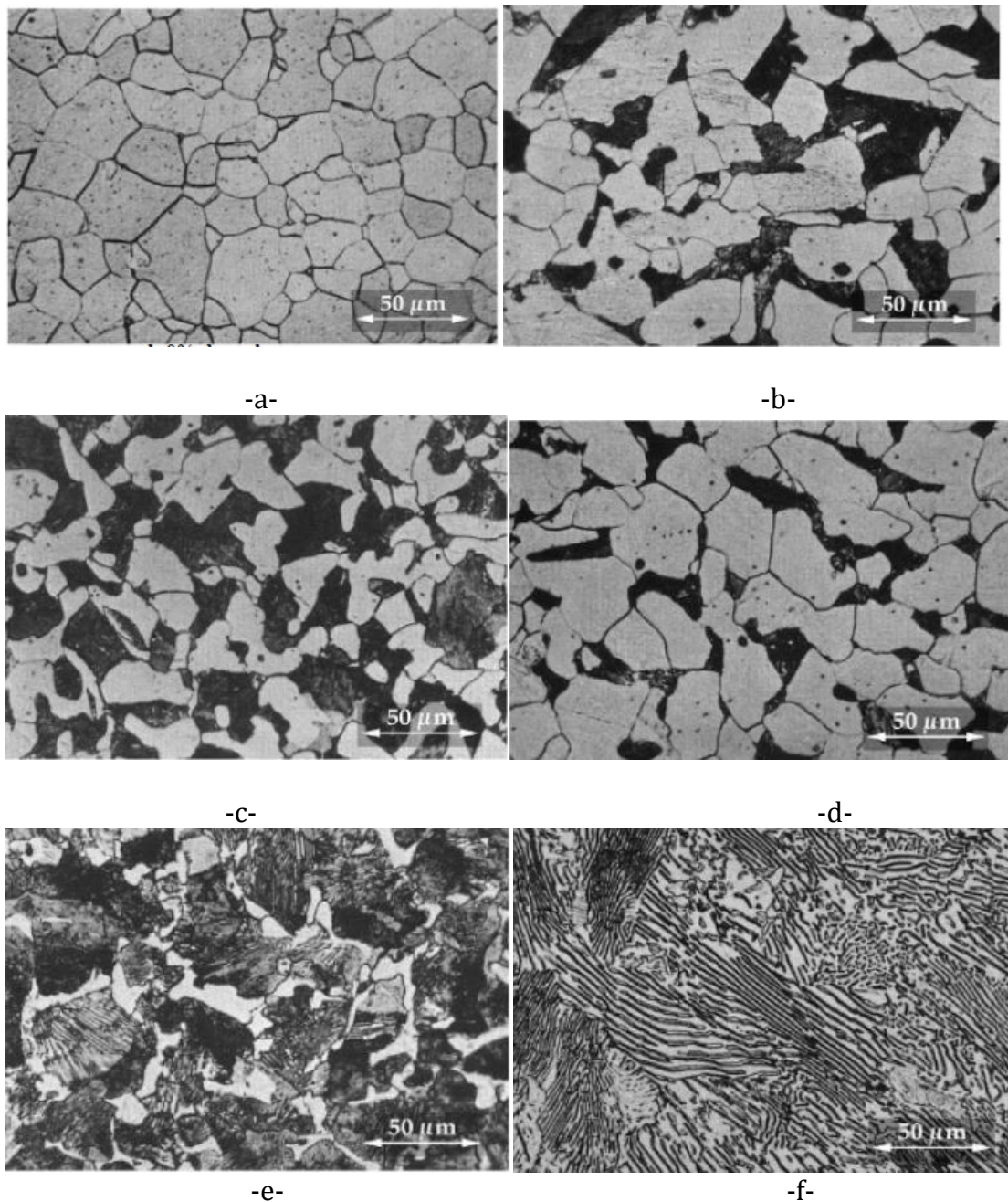


Fig.2.17 : Structure microscopique de l'acier en fonction de la teneur en carbone :  
a-0% b-0.25% c-0.35% d-0.5% e-0.6% f-0.85%

## 6 Fontes et leur classification

Les alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2,14 % s'appellent fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S. Dans le cas des fontes non alliées et de plus du chrome on trouve du molybdène, de l'aluminium, etc.

Dans une fonte, le carbone non en solution peut se présenter sous deux formes :

- Cémentite : l'aspect de la cassure est clair d'où l'appellation de fonte blanche.
- Graphite : l'aspect de la cassure est gris d'où l'appellation de fonte grise.

Par rapport aux aciers, les fontes ont des propriétés mécaniques relativement médiocres et sont souvent utilisées en fonderie à cause :

- De leur température de solidification relativement basse.
- De leur intervalle de solidification réduit.
- De leur très faible retrait lors de la solidification.
- De leur difficulté d'usinage.

Il existe plusieurs types de fontes:

- Fonte blanche.
- Fonte grise lamellaire (GL).
- Fonte à graphite sphéroïdal (GS).
- Fonte malléable.

### a Fontes blanches

La majorité du carbone se trouve sous forme de cémentite, ce qui donne à la cassure une couleur claire spécifique, c'est pourquoi elle est dite blanche. Elle est caractérisée par des teneurs en carbone et en silicium relativement faibles et par une teneur élevée en manganèse.

### b Fontes grises

La dénomination de fonte grise, fait allusion à l'aspect de la cassure grise. Dans ce type de fonte, la majeure quantité du carbone se trouve sous forme de graphite. Au fond, c'est un alliage Fe-C-Si, contenant comme impuretés inévitables Mn, S et P.

Une coupe métallographique montre que le graphite se présente sous formes de lamelles, ce qui caractérise particulièrement ces fontes, et ce qui détermine leurs principales propriétés.

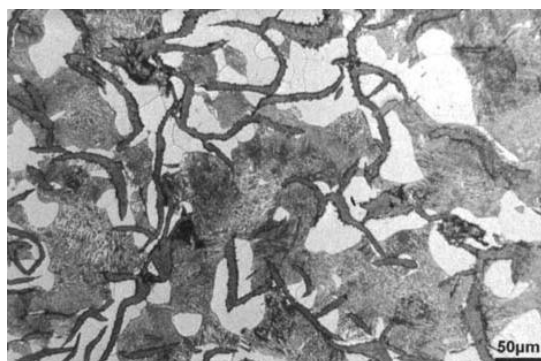


Fig.2.18 :Micrographie optique après attaque au nital de la fonte grise à graphite en rubans dit lamellaire

**c Fontes à graphite sphéroïdal**

Comme il a été déjà noté, le graphite lamellaire rend la fonte fragile. Ainsi, pour améliorer la résistance mécanique de la fonte grise, on ajoute des éléments d'addition tels que le Ni, Cr, Mn ou bien on cherche à améliorer l'effet du graphite sphérique. Dans ce cas, la fonte est appelée fonte à graphite sphéroïdal.

**d Fontes malléables**

La fonte malléable s'obtient par le maintien prolongé aux températures élevées (recuit) des pièces en fonte blanche. Le recuit produit un graphite nodulaire déchiqueté, qui, par rapport au graphite lamellaire, diminue beaucoup moins la résistance et la plasticité de la matrice métallique.

## **VI Résilience**

C'est la résistance d'un matériau aux chocs. On mesure l'énergie consommée pour rompre une éprouvette de référence de section égale à 1cm<sup>2</sup> en utilisant un « mouton-pendule ».

L'éprouvette de référence utilisée est un barreau de longueur 55 mm, à section carrée de dix par dix millimètres et entaillée sur une profondeur de 5 mm. L'entaille peut revêtir diverses formes : en U ou, le plus souvent, en V. Comme il ne s'agit pas d'une fissure parfaite mais d'une entaille, on peut observer une dispersion des résultats liée à la nucléation d'une fissure principale au fond de l'entaille.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence de l'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté, s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

Ainsi la résilience, généralement notée KCV se calcule comme suit :

$$K_{cv}(\text{J}/\text{cm}^2) = \frac{M.g.h}{1\text{cm}^2}(19)$$

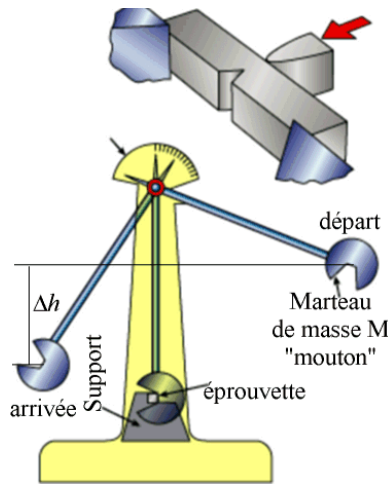


Fig.2.19 :Machine de l'essai de résistencr au choc

Lorsque l'énergie consommée par la rupture est grande, on dira que la rupture est ductile, en revanche lorsque cette énergie est faible on parlera de rupture fragile

## VII Contraintes résiduelles

### 1 Origines des contraintes résiduelles :

L'état mécanique d'un matériau est entièrement défini par les sollicitations extérieures auxquelles est ou a été soumise la pièce. On peut distinguer deux mécanismes de création des contraintes résiduelles (CR):

- La sollicitation hétérogène (par exemple une flexion) sur un matériau homogène (par exemple monophasé).
- La sollicitation homogène (par exemple une traction) sur un matériau hétérogène (par exemple polyphasé).

Mais généralement les deux sollicitations surviennent simultanément. Les contraintes induites dans le matériau doivent compenser les forces et les moments extérieurs en respectant les conditions d'équilibre.

En réalité, les matériaux ne sont jamais parfaitement homogènes. Ils présentent toujours des inhomogénéités telles que des joints de grain, des porosités ou des inclusions. A une échelle plus fine, à l'intérieur d'un grain, des discontinuités existent encore : précipités, dislocations, lacunes.

Certains de ces défauts peuvent migrer, s'éliminer ou se multiplier au cours de la mise en charge.

Les discontinuités de structure, l'irréversibilité des mécanismes microstructuraux liés à la déformation plastique font que les déformations ne sont plus compatibles (ne vérifient plus les équations de compatibilité). Pour valider les équations classiques de la mécanique, on peut décomposer la déformation plastique (dilatation due aux sollicitations thermiques, changement de phase ou déformation plastique due aux sollicitations mécaniques) en 2 parties selon que les déformations vérifient ou non les équations de compatibilité:

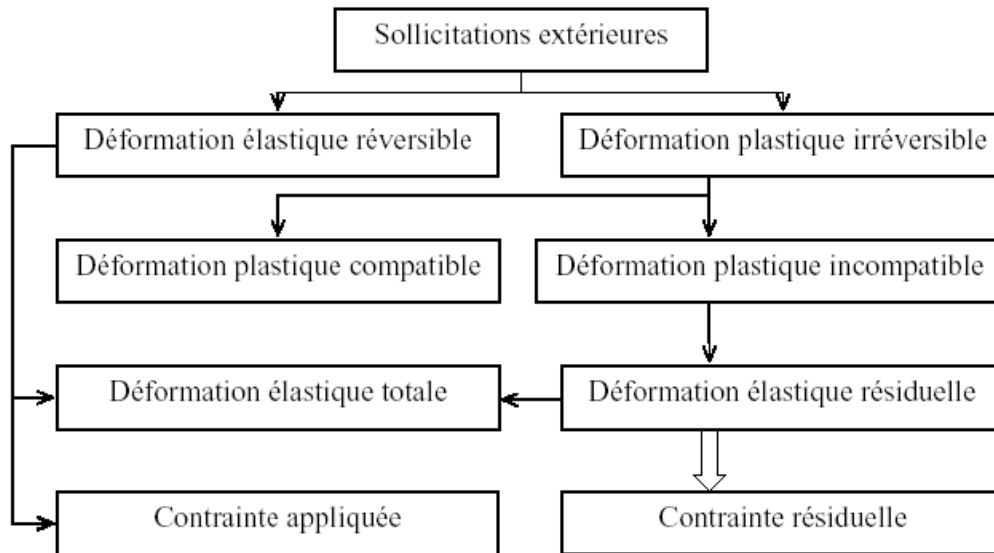


Figure 2.20: Schéma de l'introduction des contraintes résiduelles par déformation plastique

La dernière partie de la déformation plastique est compensée par des déformations élastiques irréversibles, car elles subsistent même en l'absence de toutes sollicitations extérieures. On relie donc ces déformations élastiques irréversibles à des contraintes appelées « contraintes résiduelles » qui s'ajoutent aux contraintes dues aux sollicitations extérieures de la pièce appelées « contraintes appliquées ». Ces contraintes résiduelles (CR) expriment les tensions ou les compressions internes liées à la présence des discontinuités structurales du matériau. Il s'agit de contraintes multiaxiales statiques qui existent pour un système isolé non soumis à des forces extérieures et en équilibre mécanique et thermique.

Dans la réalité, les divers effets mécaniques, thermiques et métallurgiques sont le plus souvent interdépendants comme le montre la Figure 2.21, ce qui rend très complexe la prévision des contraintes résiduelles en fonction des divers traitements.

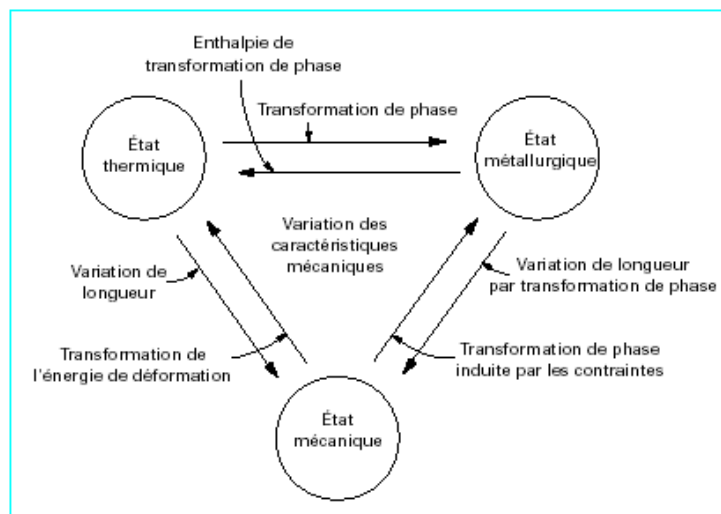


Figure 2.21- Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance entre les différents états du matériau



La Figure 2.22 montre un exemple de superposition d'un effet mécanique et d'un effet thermique expliquant la forme de la répartition des contraintes résiduelles après rectification fine d'une pièce en acier non allié, pour trois vitesses d'avance de la meule.

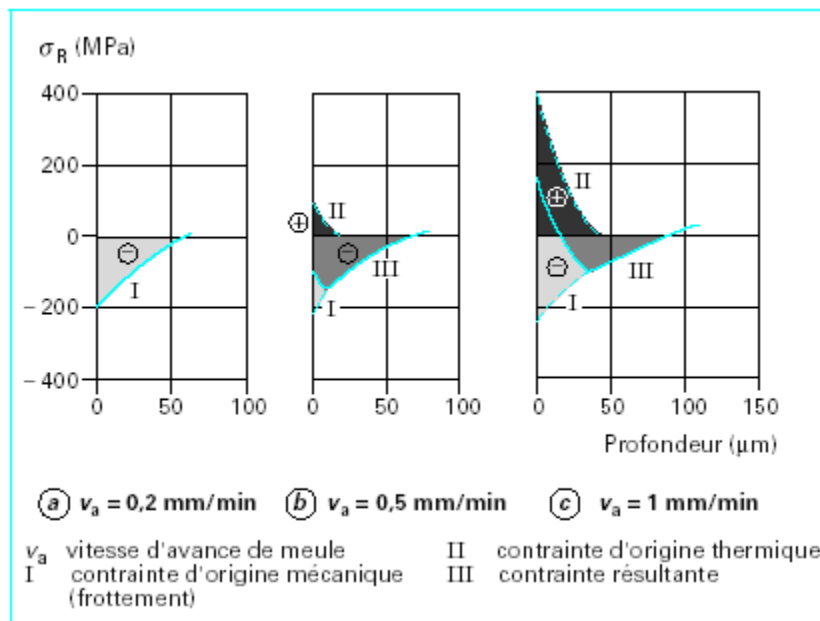


Figure 2.22– Contraintes résiduelles d'origine thermique et mécanique

## 2 Les 3 ordres de contraintes résiduelles

A cause du caractère poly cristallin et hétérogène des matériaux, les sources des CR peuvent provenir des déformations aux échelles macroscopiques, mésoscopiques (à l'échelle du grain) et microscopiques.

Un matériau est, dans la plupart du temps, constitué de plusieurs phases qui sont, elles-mêmes, composées d'une multitude de grains. Généralement, pour un matériau polyphasé, les propriétés mécaniques des phases et des constituants ne sont pas les mêmes. Le comportement sous une sollicitation extérieure est alors une moyenne des comportements des phases constituant le matériau. Dans une phase non soumise à des sollicitations externes, un grain est considéré comme un monocristal. Lors d'un chargement extérieur suffisamment élevé pour induire des déformations plastiques, des sous joints de grains et des dislocations peuvent apparaître dans le matériau. Ceux-ci sont le résultat des interactions et des réarrangements des dislocations au cours de la déformation.

Les grains seront alors divisés par ces discontinuités du réseau cristallin.

Quelle que soit l'échelle à laquelle on considère le matériau, on peut mettre en évidence des CR associées à des déformations élastiques assurant la continuité du matériau.

Une classification des CR en trois ordres, liée à l'échelle à laquelle on considère le matériau, a été proposée il y a quelques années. Ces trois ordres seront définis en s'appuyant sur les schémas suivants:

### a Les contraintes internes du premier ordre ou macroscopiques :

Elles sont homogènes sur un très grand nombre de domaines du matériau (plusieurs grains soit quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres). Les forces internes liées à ces contraintes sont en équilibre dans chaque section et les moments liés à ces forces sont nuls autour de tout axe. Des variations dimensionnelles macroscopiques résultent toujours d'une modification de l'équilibre des forces et des moments liés à ces contraintes.

Elles proviennent d'une répartition non statistique des contraintes internes du deuxième ordre.

Cette hétérogénéité est engendrée par l'existence, dans le volume de matière considéré, d'un gradient de déformation dont l'origine peut être :

- **Chimique** : conséquence indirecte d'une hétérogénéité de la composition chimique du matériau (cas d'une décarburation superficielle, d'une cémentation, ...).
- **Physico-chimique** : par la présence des différentes phases, de volumes spécifiques différents ou de phases homogènes n'apparaissant pas simultanément en tout point du matériau.
- **Thermique** : un simple gradient thermique peut produire des écarts de dilatation incompatibles avec les déformations élastiques du matériau aux températures considérées.
- **Mécanique** : comme conséquence d'un écrouissage hétérogène (laminage, grenailage, étirage, ...).

### **b Les contraintes internes du deuxième ordre ou mésoscopiques**

Elles sont homogènes sur de petits domaines du matériau (un grain ou une phase, soit à une échelle de quelques dizaines de micromètres).

Les forces internes et les moments liés à ces contraintes sont en équilibre dans un assez grand nombre de grains. Des variations dimensionnelles macroscopiques induites peuvent résulter d'une modification de cet équilibre.

Elles sont parfois appelées contraintes résiduelles microscopiques homogènes. Les cas où existent des contraintes d'ordre 2 à l'état « pur » sont peu nombreux, la figure 2.23 en donne un exemple pour un matériau biphasé. Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du second ordre peut se traduire par des variations dimensionnelles macroscopiques à l'échelle de la pièce.

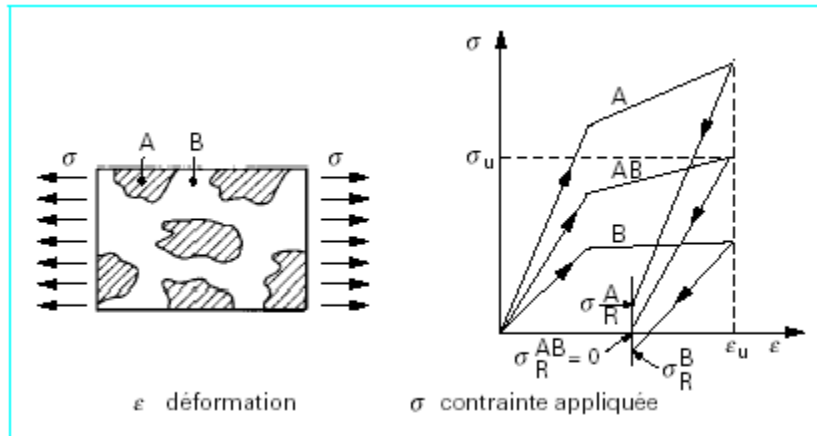


Figure 2.23- Contraintes résiduelles d'ordre 2 dans un matériau

**c Les contraintes internes du troisième ordre ou microscopiques :**

Elles sont inhomogènes sur les plus petits domaines du matériau (quelques distances interatomiques, soit de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres).

Elles sont parfois appelées contraintes résiduelles microscopiques hétérogènes. Les forces internes et les moments liés à ces contraintes sont en équilibre dans ces très petits domaines. La modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du troisième ordre ne se traduit par aucune variation dimensionnelle macroscopique. La Figure 2.24 est une représentation schématique des déformations à l'origine des contraintes résiduelles d'ordre 3.

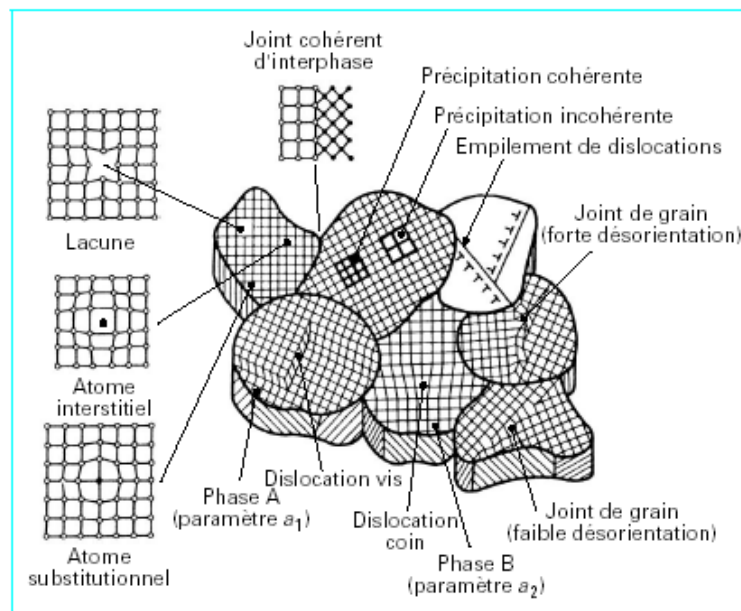


Figure 2.24 : Représentation schématique de déformations

Cette classification proposée pour les contraintes internes a un aspect pour l'instant théorique, car la séparation effective des différents ordres de contraintes n'est atteinte par aucune méthode de calcul ou de mesure. Cependant, elle a pour intérêt de

montrer que toute hétérogénéité de déformation introduite à toute échelle de la structure entraîne l'existence de contraintes résiduelles.

La Figure 2.25 illustre la répartition du champ de contraintes internes pouvant exister dans un échantillon selon la direction x, par exemple :

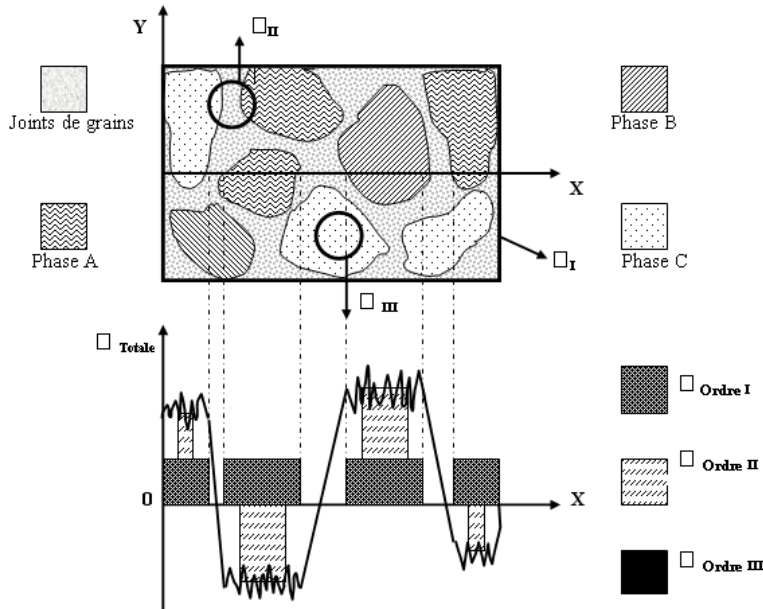


Figure 2.25 : Répartition du champ de contraintes dans un matériau

Sur ce schéma, la courbe des contraintes est représentée par la contrainte dans la direction de mesure en fonction de l'abscisse x traversant plusieurs grains.

- Les contraintes d'ordre I s'étendent, par définition, sur plusieurs grains et correspondent à une valeur moyenne dans le matériau.
- Les contraintes d'ordre II s'étendent sur un grain et peuvent être considérées comme des variations de contraintes autour de la valeur moyenne représentée par  $\sigma_I$ .
- Les contraintes d'ordre III, de la même façon, oscillent autour de la valeur moyenne des contraintes dans un grain, de telle sorte que ces contraintes d'ordre III correspondent à la variation locale de la somme des contraintes d'ordre I et II.

On peut donc écrire que la contrainte  $\sigma_p$  en un point est égale à :

$$\sigma^R = \sigma^I + \sigma^{II} + \sigma^{III}$$

Avec :

$$\sigma^I = \frac{\iint dA}{\int dA} \text{ (Plusieurs grains), tel que } dA \text{ est un élément de surface}$$

$$\sigma^{II} = \frac{\iint dA}{\int dA} \text{ (un grain)}$$

$$\sigma^{III} = \sigma^R - \sigma^I - \sigma^{II} \text{ (Un point)}$$

Cette définition propose une séparation très théorique des différents ordres de contraintes, cette séparation n'est atteinte par aucune méthode de mesure à l'heure actuelle.

Néanmoins, elle a pour intérêt de montrer que toute hétérogénéité de déformation introduite à toutes les échelles dans la structure entraîne la création de CR.

La séparation des différents ordres de contraintes ne peut être effectuée à l'aide d'un seul et unique moyen de contrôle. De plus en plus, les recherches mettant en œuvre différents moyens de mesures complémentaires, dans des domaines complémentaires, peuvent permettre une étude complète des CR présentes dans une pièce ou un échantillon à contrôler.

### 3 Méthodes expérimentales de détermination les contraintes internes

Chaque type de contraintes possède ses propres méthodes d'investigations. La détermination des contraintes internes du premier ordre ou contraintes résiduelles peut se faire à l'aide de plusieurs méthodes que l'on classe en trois catégories :

- Les méthodes destructives ;
- Les méthodes semi-destructives ;
- Les méthodes non-destructives.

#### a Méthodes non destructives

Le prototype de ces méthodes est une technique fondée sur la diffraction des rayons X qui permet de déterminer les déformations du réseau sous un champ de contraintes biracial à la surface d'un solide. Elle est basée sur la mesure des distances inter-réticulaires d'une famille de plans cristallographique convenablement choisie qui varie en fonction du champ de contraintes imposées.

##### a.1 Analyse par diffraction des rayons X

Soit  $d_{hkl}$  la distance inter-réticulaire d'une famille de plans  $\{h\ k\ l\}$  et  $d_0$  sa valeur au repos.

Comme il a été précédemment dit, sous l'effet d'une contrainte, la distance  $d_{hkl}$  va différer de  $d_0$  d'une distance  $\Delta d = d_{hkl} - d_0$ . La mesure de la distance inter-réticulaire se fait en utilisant la loi de Bragg :

$$2 \times d_{hkl} \times \sin\theta = n \times \lambda \quad (19)$$

Avec :

$\theta$ : Angle de diffraction (de Bragg).

$\lambda$ : Longueur d'onde des rayons X incidents.

$n$  : Nombre entier naturel

Si l'on différencie en 0  $d$  cette relation, on obtient (en isolant  $d_{hkl}$  à gauche) :

$$\Delta d_{hkl} = -n \times \lambda \times \frac{\cos\theta_0}{(\sin\theta_0)^2} \times \Delta\theta \quad (20)$$

Après division par  $d_0$  on obtient :

$$\frac{\Delta d_{hkl}}{d_0} = -(\cotan\theta_0) \times \Delta\theta \quad (21)$$

Et la variation totale de l'angle de diffraction  $\varepsilon$  s'écrit :

$$\varepsilon = 2 \times \frac{\Delta d_{hkl}}{d_0} = -(\cotan\theta_0) \times \Delta 2\theta \quad (22)$$

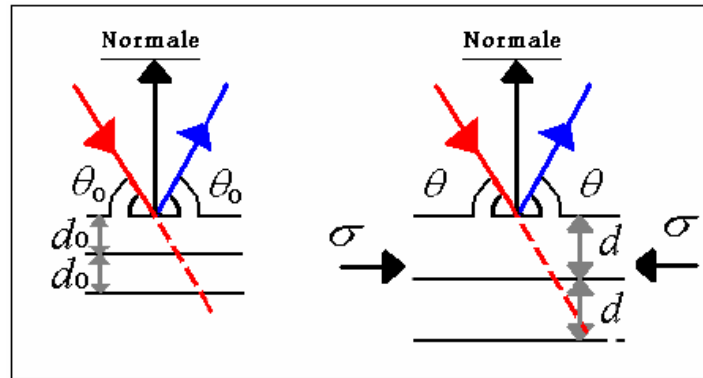
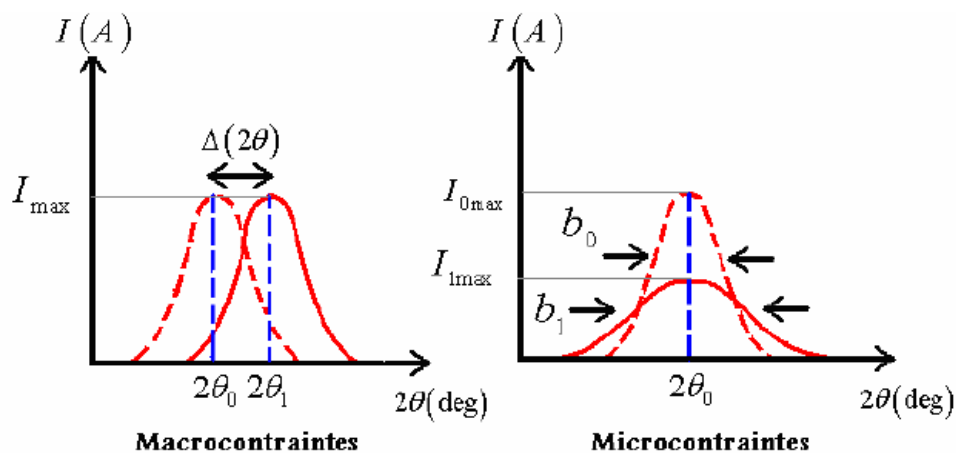


Figure 2.26: Schématisation de l'effet des contraintes sur l'angle de diffraction.

Les variations de  $d_{hkl}$  ont plusieurs effets sur la déformation des raies de diffractions selon leur échelles :

- **A l'échelle macroscopique:** La déformation peut être considérée uniforme et il y a effectivement, dans ce cas, une translation uniforme du pic de diffraction.
- **A l'échelle microscopique:** La déformation n'est plus uniforme et il y a un élargissement du pic de diffraction qui peut être caractérisé par la mesure de la largeur de corde à mi-hauteur.

On peut alors déduire les contraintes macroscopiques et microscopiques des déformations correspondantes obtenues à partir des raies de diffraction.



(a) : Translation du pic de diffraction (Contraintes du premier ordre)  
 (b) : Elargissement du pic de diffraction (Contraintes du second et troisième ordre)

Figure 2.27: L'effet des contraintes sur les pics de diffraction

## a.2 Autres méthodes

Méthode synchrotron: avec une très haute énergie des rayons X, la profondeur de pénétration est plus élevée, ce qui donne plus de détails sur la carte des déformations existant dans le matériau.

Méthode magnétique: lors de l'utilisation de cette méthode, les paramètres intrinsèques du matériau (dureté, structure, taille des grains ...), peuvent influencer la mesure des contraintes à cause de la forte sensibilisation à l'état de contraintes internes des propriétés ferromagnétiques des alliages ferreux. Pour cela la méthode magnétique est peu utilisée.

Méthode aux ultra-sons : Cette technique peut servir pour mesurer des contraintes résiduelles d'origines différentes (mécanique, chimique...). C'est une méthode nouvelle de détermination des contraintes. Le principe de cette technique repose sur le calcul de l'état de contraintes à partir de la détermination de l'état de déformation. L'évaluation de ces contraintes nécessite la connaissance des constantes acousto-élastiques qui sont déterminées au moyen des tests de traction sur des échantillons représentatifs.

Méthode piézo-spectroscopique (de Raman): L'effet Raman est basé sur l'interaction de la lumière avec la matière. Cette méthode est réservée aux matériaux transparents tels le saphir, quelques céramiques ainsi que les fibres optiques.

### **b Méthodes semi destructives**

#### **Méthode du trou :**

Cette méthode, d'usage courant, consiste à mesurer la relaxation de contraintes survenant à la surface après y avoir percé un trou.

Une rosette, constituée de trois jauges d'extensomètre est d'abord fixée est centrée autour du point où l'on veut effectuer la mesure. Celle-ci est reliée à un pont d'extensomètre par une boîte de commutation. On équilibre le zéro des jauges puis on perce un trou au point de mesure et on mesure les déformations obtenues.

Dans la plupart des cas, le trou percé est borgne et sa profondeur est :

- Approximativement égale à son diamètre.
- Fiable par rapport à l'épaisseur de la structure.

Malheureusement, la méthode du trou borgne est complexe est nécessite l'introduction de facteurs empiriques dans les équations élastiques. Une solution rigoureuse peut cependant être obtenue dans le cadre du trou débouchant dans une plaque mince dans laquelle les contraintes sont uniformes selon l'épaisseur. Ces résultats pourront ensuite être généralisés au cas du trou borgne.

### **c Méthodes destructives**

Parmi lesquelles on trouve :

- Méthode d'enlèvement de couches successive
- Méthodes mathématiques

## **4 Contraintes résiduelles et tribofinition**

### **a Influence de la fréquence d'oscillation sur la contrainte résiduelle**

Sur la figure ci-dessous, on montre la répartition des contraintes résiduelles pendant une durée de traitement par tribofinition de 120 min avec une fréquence qui varie entre 15, 25 et 33 Hz avec une amplitude  $A=1,25\text{mm}$ , on constate que la contrainte résiduelle de compression se transforme en contraintes résiduelles de traction ainsi qu'elle est plus grande que la fréquence d'oscillation est petite.

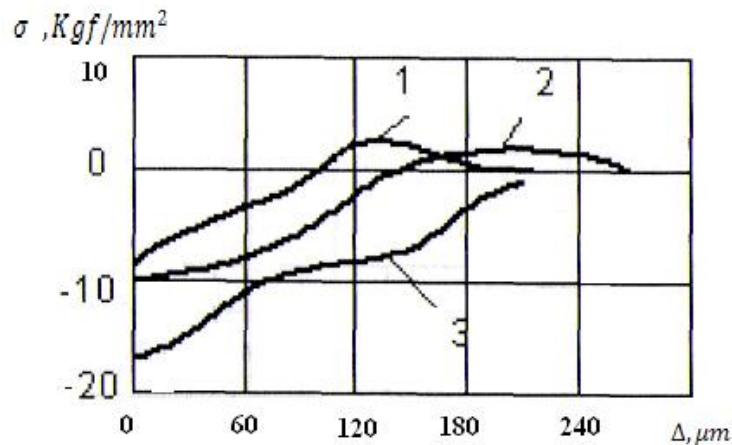


Figure 2.28 : Influence de la fréquence des oscillations sur la répartition des contraintes résiduelles

1 - 15 Hz; 2 - 25 Hz; 3 - 33 Hz

**b Influence de l'amplitude d'oscillation sur la propagation des contraintes résiduelles**

Des échantillons en acier doux avec des amplitudes différentes.

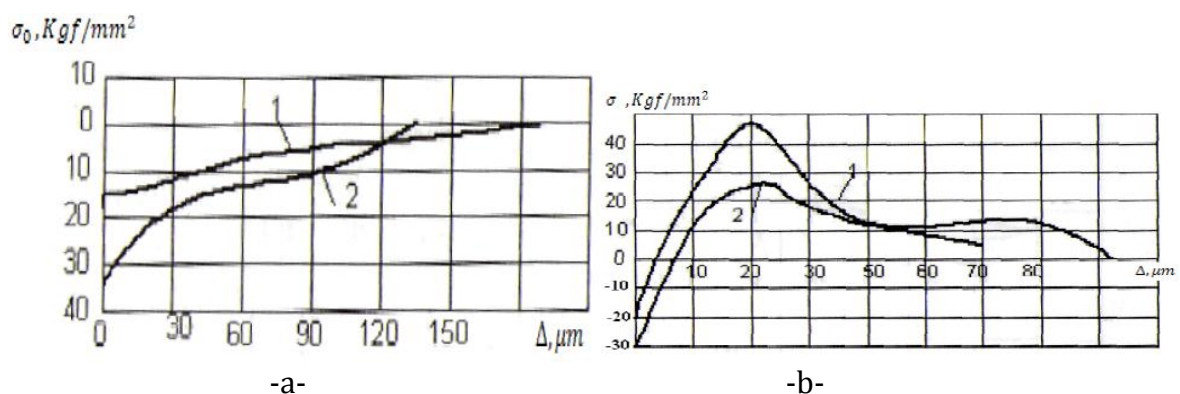


Figure. 2. 29 : L'effet de l'amplitude des oscillations sur la répartition des contraintes résiduelles dans les échantillons d'acier: (a) recuit; (b) trempé sous:

1 -  $A = 1,5$  ; 2 -  $A = 3$  mm



On remarque que la contrainte est d'autant plus grande que l'amplitude des oscillations est petite.

**c Influence du poids des pièces traitées sur la propagation des contraintes résiduelles :**

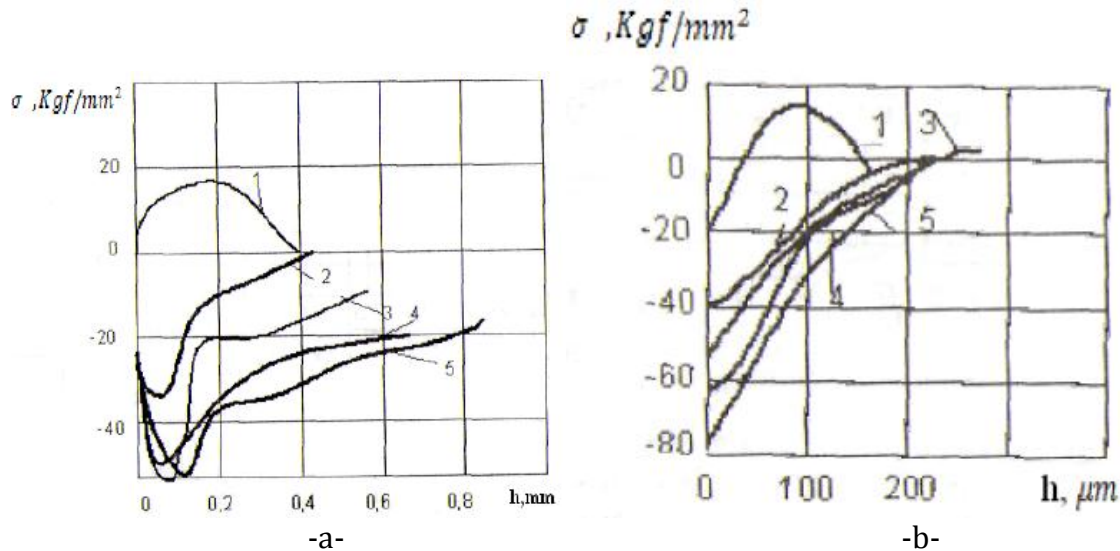


Figure 2. 30 : Effet du poids des pièces traitées sur la distribution des contraintes résiduelles pour un acier: a) - recuit, b) – trempé.

1 - l'original ; 2 - 0,05 ; 3 - 0,3 ; 4 - 0,5 ; 5 - 1 kg

D'après les deux courbes on constate que :

- La propagation des contraintes résiduelles dépend du traitement des échantillons en acier recuit ou trempé et du poids des pièces traitées.
- Pour le cas de l'acier recuit, la contrainte résiduelle est d'autant plus compressive que le poids des pièces est grand contrairement à l'acier trempé où la contrainte est beaucoup plus de traction.
- L'augmentation du poids des échantillons, la valeur des contraintes résiduelles augmente et la profondeur de la couche superficielle augmente.

**Conclusion :**

La formation de la contrainte résiduelle selon le procédé de tribofinition se produit sous l'influence des conditions du traitement et de l'état initial du matériau, suite à l'impact sur la pièce à traiter, des traces se forment sur la couche superficielle. Après un certain temps, la couche superficielle acquiert de nouvelles caractéristiques. La formation de la nouvelle couche superficielle est effectuée sur toute la surface simultanément et de manière uniforme.

## CHAPITRE 3

---

### EQUIPEMENTS DE LA TRIBOFINITION

---

#### I. DESCRIPTION DU PROCEDE DE TRIBOFINITION

La tribofinition intègre les techniques mécaniques de traitement de surfaces, en particulier le polissage et l'ébavurage, les ingrédients sont les médias abrasifs (céramique, porcelaine, plastique, métaux), les additifs chimiques ainsi que les équipements qui génèrent les mouvements (vibrateurs, centrifugeuses...).

Ce traitement est l'exploitation industrielle des phénomènes de friction ou tribofinition avec des pièces et abrasif (media) dans un environnement chimique contrôlé.

Les pièces et média sont mis en vibration dans une chambre de travail qui fait partie du vibrateur sous l'action de deux mouvements (mouvement rotative lents et un mouvement vibratoire) avec ajout d'eau et d'additifs chimiques pour l'obtention de la finition demandée.

Sous l'effet des vibrations, le traitement se produit dans toutes les zones de la chambre de travail, ce qui assure un traitement uniforme de toutes les surfaces en recevant un grand nombre de micro-coups sur les différents sens qui contribue à éliminer les endommagements sur la surface des pièces et la couche superficielle (changement des paramètres géométriques et physico-mécaniques des couches superficielles) à l'aide des medias.

La majorité du fonctionnement du traitement par tribofinition est faite avec une alimentation continue ou intermittente de l'additif chimique et des abrasifs.

L'additif chimique assure l'extraction des produits d'usure qui se situent sur la surface des pièces et des particules du milieu actif. L'arrosage des pièces, contribue à la séparation et à la distribution d'uniforme dans le milieu actif. Il est aussi possible de régler l'intensité du traitement en changeant le niveau du liquide (additif+eau) dans la chambre de travail.

La composition de l'additif chimique permet également de régler l'intensité du procédé et la qualité de la surface usinée.

L'intensité du traitement par tribofinition dépend des paramètres suivants :

- le régime et la durée du traitement (A, f, t).
- les caractéristiques et les tailles des particules du milieu actif.
- 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 l'énergie des micro-impacts, pressions de contact, températures qui apparaissent sur la zone de l'action des micro-coups).

## II. Différents types de vibrateurs

Il existe différents types de vibrateurs, voici quelques un :

### 1. Vibrateurs circulaires

Le traitement s'effectue dans une cuve de traitement montée sur ressorts hélicoïdaux. Un moto-vibrateur 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.

Les vibrateurs circulaires sont souvent équipés de tamis de séparation et de trappe pneumatique pour assurer la séparation des pièces et médias. Tandis que les pièces sont transférées via le tamis de séparation à l'extérieur du vibrateur pour être ensuite, par exemple, séchées dans un sécheur circulaire, les médias restent dans la cuve de traitement.

Les domaines d'applications des vibrateurs circulaires sont extrêmement flexibles et évolutifs et permettent plusieurs types de traitement en Tribofinition : ébavurage, ébarbage, rayonnage, nettoyage, décalaminage et polissage de pièces provenant d'emboutissage, fonderie, formage, forge, usinage. Plusieurs matières peuvent être traitées : métal, plastique, céramique, caoutchouc, bois, pierre et verre.

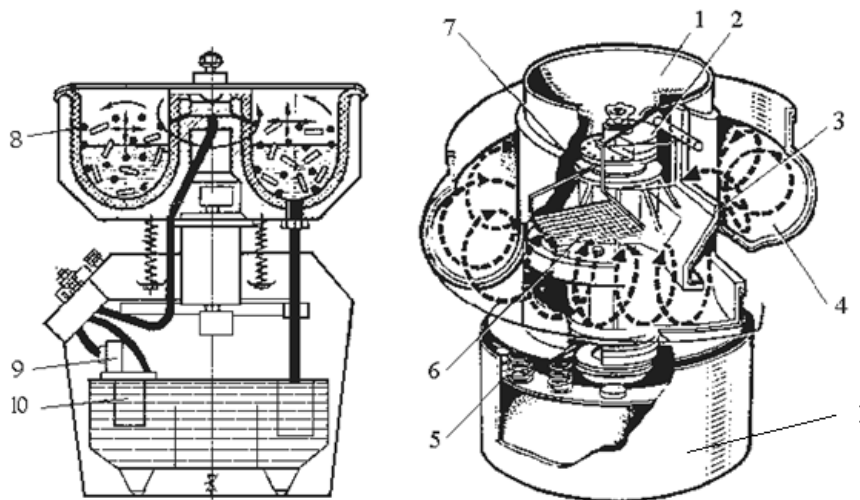


Figure 3.1. Schéma d'un vibrateur circulaire

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

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

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

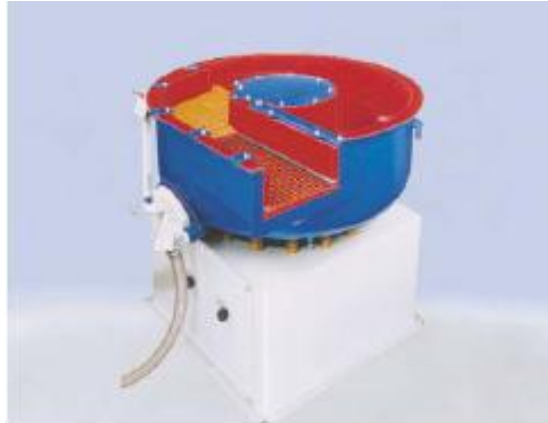


Figure 3. 2 : Exemple d'un vibrateur circulaire

Il existe plusieurs types de vibrateurs circulaires qui se diffèrent par la forme et les dimensions de la cuve ou par la caractéristique du vibrateur, citons quelques-uns ;

- **Vibrateurs circulaires «EC»**

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

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

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

- **Vibrateurs circulaires « Euro »**

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

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

- **Vibrateurs circulaires «A»**

Ils sont munis d'un séparateur magnétique et sont spécialement conçus pour le traitement des pièces pouvant être séparées magnétiquement. Ils sont munis d'une cuve de travail renforcée spéciale pour faciliter la séparation magnétique.

- **Vibrateurs circulaires «R»**

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

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

- **Vibrateurs circulaires à grand rayon**

Leur plus grand avantage est la possibilité d'être utilisés dans un système de production en continu ou par charge. Leur haut degré de flexibilité offre des avantages significatifs pour les plannings de production, favorisant la réduction du temps de traitement avec un coût plus économique. Par ailleurs, ils nécessitent un faible encombrement au sol.

Ils sont utilisés 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 des médias.

Avec un diamètre de la cuve entre 2075 mm à 3050 mm et un volume supérieur à 500 dm<sup>2</sup>.

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

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

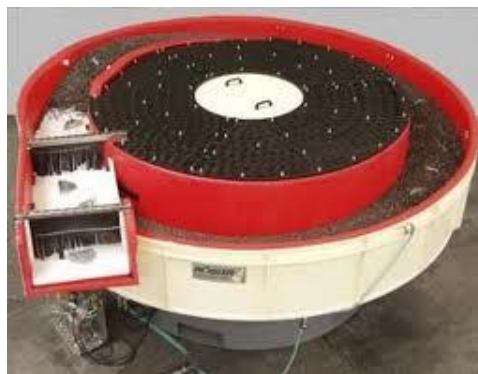


Figure 3. 3. Exemple d'un vibrateur circulaire à grand rayon

- **Vibrateurs circulaires à haute énergie**

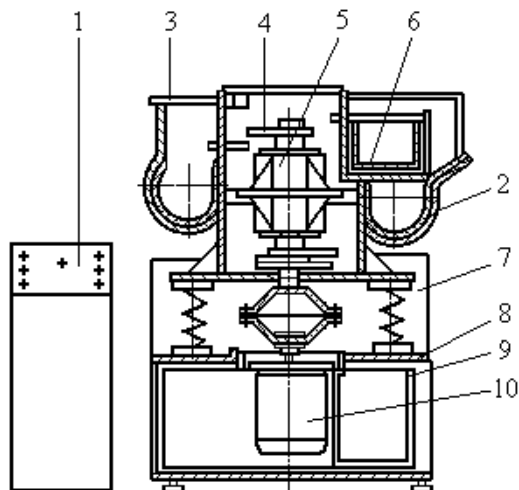
Ils produisent une performance de traitement supérieure de 50 %. Selon le type des pièces à traiter et les résultats d'ébavurage souhaités, ces vibrateurs représentent une réelle alternative par rapport aux vibrateurs circulaires.

- **Vibrateurs circulaire hélicoïdaux**

Le traitement est accompli dans une cuve sous forme hélicoïdale(2) (fig. 3.4) montée sur des ressort hélicoïdaux (7), à l'aide d'une commande de mis en marche et d'arrêt.

Un moteur électrique (10) monté en bas dans la base (8) de la machine fournie de l'énergie au vibreur (5) qui se règle à l'aide des balourds (4) qui sont reliés au moteur, où les pièces à traiter et medias sans mis en contact et couverts par une couverture (3).

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



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

Fig. 3.4. Schéma machine vibrante avec une chambre de travail hélicoïdale



Figure 3.5. Exemple d'un vibreur circulaire hélicoïdal

- **Vibreur circulaire spirale type Rotomatic**

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

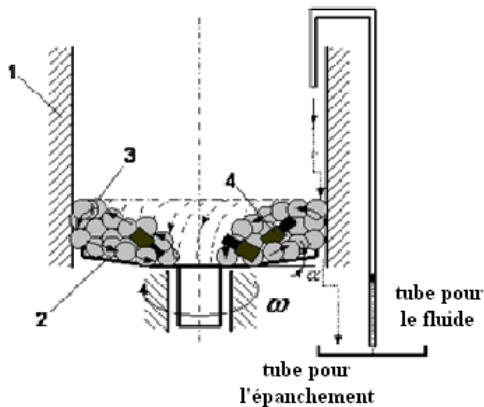
Dans ce vibreur la zone de séparation est directement intégrée dans le bol (cuve), ce qui économise l'espace.



Fig.3.6. Exemple d'un vibreur circulaire spiral de type Rotomatic

## 2. 2. Machines à force centrifuge

Elles sont utilisées principalement pour l'élimination de grosses bavures et le rayonnage des pièces en grande série. Des technologies spécifiques permettent aussi le traitement des pièces petites et fragiles. Elles permettent d'atteindre des gains de temps de l'ordre de 3 à 10 par rapport à une application similaire en machine vibrante



1	Cuve (fixe)
2	Lit (mobile)
3	Medias
4	Pièces traité



Figure 3.7. Schéma et photo d'une machine à force centrifuge

L'essence de la méthode de traitement rotatif centrifuge est que la charge granulaire (media) 3 et les pièces 4 (Fig. 3.7) 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 fixée en position verticale cylindrique 1 et un lit pour la rotation 2 (Fig. 3.7). Les surfaces du lit et la partie fixe de la chambre de travail sont couvertes d'un matériau résistant à l'usure pour réduire l'usure sur cette surface. Parmi les matériaux les plus couramment utilisés dans le revêtement du lit et la cuve, on trouve le caoutchouc ou enduit de polyuréthane.

La rotation du fond est généralement fournie par un moteur électrique réversible ou moteur hydraulique. Comme dans les autres gammes de tribofinition, on peut utiliser différents matériaux granulaires (medias): des particules abrasives de différentes formes, des billes de porcelaine, des billes d'acier poli,... etc.

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

- Une haute intensité de traitement.
- La simple utilisation dans les équipements de construction; Usinage simultané "en aval" en grande quantité.

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.

### **2.3. Vibreurs en continu (circulaire, spirale ou linéaire)**

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

L'avantage de ce traitement est : pas de mélange de lots de pièces et pas de coincement d'abrasifs dans les pièces, ce qui nécessite un système de déclassement fiable et efficace des abrasifs usés continus.

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

Pour le fonctionnement des installations en continue, les pièces sont brassées dans une cuve (circulaire ou linéaire) remplie de médias de polissage et d'ébavurage durant un temps donné pour obtenir le résultat souhaité. Les paramètres tels que la durée du traitement et la finition demandée (polissage, ébavurage, brillantage) peuvent être ajustés par modification de l'inclinaison de la cuve de traitement, réglage de la force



centrifuge ou de la vitesse de traitement. En fin de traitement, une grande surface de tamisage assure la séparation des pièces et des médias. Dans le même temps, les pièces peuvent être rincées puis transférées à l'étape de traitements suivants. Les abrasifs, quant à eux, sont transférés par convoyeur puis ramenés à l'intérieur de la cuve et les pièces seront séchées dans une machine de séchage.

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

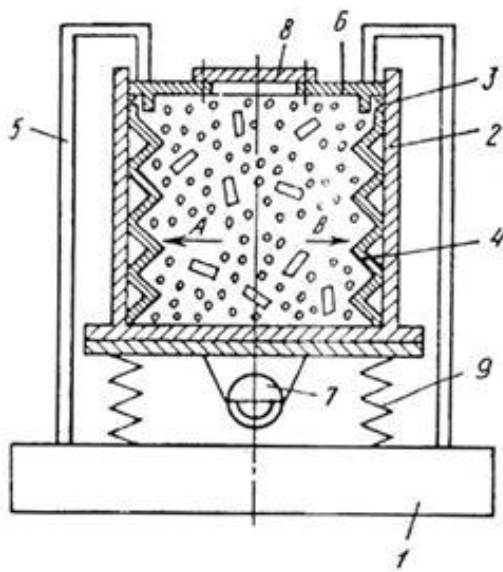
• **Les Vibrateurs linéaire :**

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

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

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

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



	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	Vibreur
8	Couvercle secondaire de trappe pour un dispositif de fixation des pièces
9	Ressorts hélicoïdaux

Fig. 3. 8. Schéma du vibreur linéaire



Figure. 3. 9. Deux types de vibrateurs linéaires.

Il existe plusieurs types de vibrateurs linéaires qui se diffèrent par leurs motorisations diverses, par exemple :

- **Les vibrateurs linéaires type TE**

Moteurs à entraînement direct qui sont fixés sous la cuve de traitement.

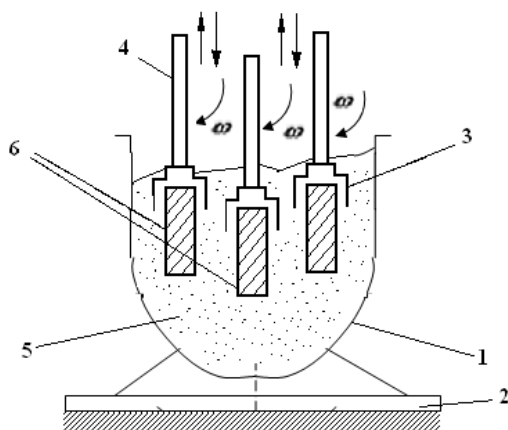
- **Les vibrateurs linéaires type TS**

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

#### 2.4. Machines multibroches type Smuritropie

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

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



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

Figure 3.10. Schéma d'une machine multibroche type Smuritropie



Figure. 3. 11. Machines multibroche type Smuritropie.

Les coûts d'exploitation des machines multibroches sont très importants à cause de leur puissance, rapidité du traitement et la faible consommation d'abrasifs. En effet, contrairement aux autres machines de tribofinition, 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 tribofinition où la totalité de ces abrasifs est en mouvement et où la plupart s'usent entre eux.

Durant le traitement, les pièces, fixées par l'intermédiaire de broches 3 (voir figure 3.9), sont immergées dans la charge abrasive statique. Dans certains cas, les pièces peuvent aussi être animées d'un mouvement satellitaire par mise en rotation des broches.

Le choix des machines multibroches peut s'imposer dans les cas ci-après:

- Leur traitement manuel demande une main d'œuvre longue et coûteuse.
- Les pièces doivent être traitées de façon très régulière et reproductible.
- Les pièces sont constituées d'alliages de grande dureté.
- La morphologie des pièces est complexe et comporte de nombreuses arêtes.
- Les pièces sont extrêmement fragiles et ne doivent pas s'entrechoquer.
- Les pièces doivent avoir un état de surface très fin.

Les multibroches sont utilisées pour les pièces suivantes:

- Hélices marines ou aéronautiques
- Outils à main (pinces, marteaux, etc.)
- Carcasses d'outils électroportatifs ou pneumatiques
- Implants chirurgicaux
- Poignées de porte (haut de gamme)
- Semelles de fer à repasser (polissage après revêtement)
- Aubes de turbine
- Guide-fil de machines pour l'industrie textile
- Corps et boisseaux de vannes

- Pignons et carters de boîtes de vitesse
- Pièces forgées (amélioration d'état de surface)
- Composants d'armes
- Eléments de machines-outils
- Pièces de moteurs, pompes et vannes hydrauliques

Les avantages du système multibroches sont :

- Machines équipées en série de 12 broches porte des 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.
- Possibilité d'inversion de sens de rotation des broches.
- Angle d'inclinaison des broches réglables.
- Dispositif intégré de lavage et de séchage des pièces.
- Broches à pince automatique pour échange rapide des pièces.
- Verrouillage commandé par pédale

### III. Milieux actifs et additifs chimiques

#### 1. Abrasifs (médias)

Les abrasifs ou médias abrasifs ou milieu actif sont des ingrédients de la tribofinition qui sont appelés des chips. Ils se différencient par leur composition, degré d'abrasion, forme et dimensions. Ils sont souvent à base céramique, polyester, verre, plastique...etc. Leur forme est très variable et comprend principalement des cylindres, des triangles, des billes, des cônes, des pyramides, des paraboloïdes, des étoiles, des flèches, des tétraèdres,... etc.



Figure 3. 12. Différents types d'abrasifs (Cône, Bille et prisme)

Ils possèdent deux caractéristiques importantes :

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

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

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

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

- Matériau en abrasif pour des opérations de tribofinition.
- Matériau non abrasif pour des opérations de finition.
- Les matériaux métalliques (bille, rouleau,...) sont utilisés pour le durcissement superficiel.

Dans le cas où l'on veut faire un important enlèvement de matière on utilise des abrasifs grossiers de hautes duretés avec de grosses granulations (abrasifs lourds de grande taille) et même pour les opérations de nettoyage des pièces brutes moulées. Pour les opérations de finition et pour avoir un bon état de surface on utilise beaucoup plus les abrasifs à granulation fine et moins agressif (abrasifs légers de petite taille).

La composition de l'abrasif (granulation) est déterminée par son pouvoir de coupe ainsi que l'état de surface de la pièce, par exemple, pour les métaux et les alliages non ferreux on utilise des billes en verre (ce choix est fait par rapport à l'état de surface initial et celui désiré).

Pour le durcissement superficiel, habituellement on prend des 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 supérieure à la dimension de trous ou bien les cavités de la pièce 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, ainsi, la taille et le poids de l'abrasif peut entraîner des déformations de la pièce à traiter, c'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'utiliser des abrasifs légers et de petites dimensions.

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

Tableau 3 : Quelques exemples de particules utilisées dans le milieu actif pour les différentes opérations.

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

## 2. Additifs chimiques

Ils sont la base de tous les procédés de tribofinition. Ils combinent les procédés d'intégration écologique (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, d'ajouter des additifs chimiques au traitement des pièces avec abrasifs.

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

- Le type du travail à effectuer (ébavurage, polissage, brillantage, dégraissage, passivation...).
- Le type de matériel à traiter.
- Le type de chips (abrasifs) à employer. é
- Le type d'équipements utilisés.
- Les normes environnementales à respecter.

Il existe 3 types d'additif chimique de tribofinition:

- Liquide.
- Poudre.

- Pâte.

### 2.1 Additifs liquides :

Les composés liquides constituent les bases de travail optimal 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.

C'est le type d'additifs le plus utilisé dans le traitement de vibration car il est le plus approprié pour la rentabilité et la protection de l'environnement.

Le rôle du fluide dans le processus du traitement par tribofinition est le suivant :

- L'intensification du processus sur la surface à traiter et ce à la suite de 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 :

a- **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.

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

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

Les lubrifiants 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 au volume de la chambre de travail. La durée de traitement ne doit pas dépasser deux heures, dans le cas contraire, le pourcentage de la saleté augmente et la concentration d'activation diminue.

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

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

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

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

Tableau 4 : Composition chimique de l'additif liquide recommandé pour les différentes opérations

	Composition des additifs chimiques	Symbole	Concentration (g/l)	Utilisation
1	Silicate de sodium	[Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ]	20 - 30	Protéger les détails de la corrosion, conservation de courte durée
2	Hydroxyde de sodium	[Na OH]	20	-
3	Carbonate de soude	[Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ]	20	-
4	Nitrate de sodium	[NaNO <sub>3</sub> ]	20 - 30	Nettoyage, décalaminage
5	Hydrate d'oxyde de sodium	[Na <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> O]	15	Nettoyage des surfaces épaisses de la calamine,
6	Phosphate de sodium	[Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ]	20 - 30	-
7	Soude à l'ammoniac	[NH <sub>3</sub> , Na OH]	20 - 30	-
8	Perchlorure de fer	[FeCl <sub>3</sub> ]	2 - 10	Assure une couleur éclatante pour l'état de surface
9	polyacrylamides	$\left[ \begin{array}{c} -CH_2 - CH - \\   \\ CONH_2 \end{array} \right]_n$	10	Assure la brillance du métal

## 2.2 Additifs poudre

Les additifs peuvent être sous forme de poudre, ils remplissent leur fonction là où d'autres produits seuls ne suffisent pas, les principales fonctions de ce type de produit sont :

- dégraissage massif.
- procédés spéciaux de décapage et de décalaminage.
- augmentation du pouvoir abrasif.
- nettoyage des abrasifs.

Il existe aussi des poudres très fines dont la taille est de l'ordre d'une dizaine de nanomètres. Ces poudres permettent d'obtenir des résultats particulièrement



intéressants lorsque l'on recherche un état de surface de très haute qualité. Parmi ces poudres on trouve :

Tableau 5: L'additif poudre et différentes opérations

	Composition des additifs chimiques	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 de carbure de silicium purifié	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.

### 2.3 Additifs pâte

Les pâtes sont utilisées avec des médias dans des vibrateurs circulaires et machines à force centrifuge pour obtenir une finition lisse et très brillante sur des surfaces sensibles. L'additif peut être utilisé comme pâte de polissage ou d'ébavurage.

On trouve plusieurs types de pâtes qui se différencient par le type des matériaux utilisés (Acier, Cuivre, Aluminium, Zinc.....) et le travail à effectuer (ébarbage, ébavurage, rayonnage, super finition, brillantage, polissage....). Parmi les différents type de pâte on trouve :

- Pâte de polissage.
- Pâte d'ébavurage universelle.
- Pâte à effet légèrement abrasif.
- Pâte de polissage avec effet de brillantage.
- Pâte de brillantage pour la finition des 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 les métaux non ferreux et précieux.
- Pâte d'ébavurage avec pouvoir abrasif renforcé.
- Pâte d'ébavurage très mordante.

## CHAPITRE 4

### EXPERIMENTATION

#### 1. Machine utilisée

L'opération de tribofinition a été faite en utilisant la machine dont les caractéristiques sont les suivantes:

Machine : Reni CirilloRC 230

Type de machine : Vibreur circulaire.

Capacité de la machine (volume) : 230 l

Amplitude : 5 mm

Vitesse de rotation : 50 tr/mn

Fréquence : 50 Hz

Puissance du moteur: 1.5 kW

Voltage de la machine : 380 V

Volume des pièces à traiter (ou de la cuve)= 1/3 la capacité de la machine =  $230/3 = 77$  l

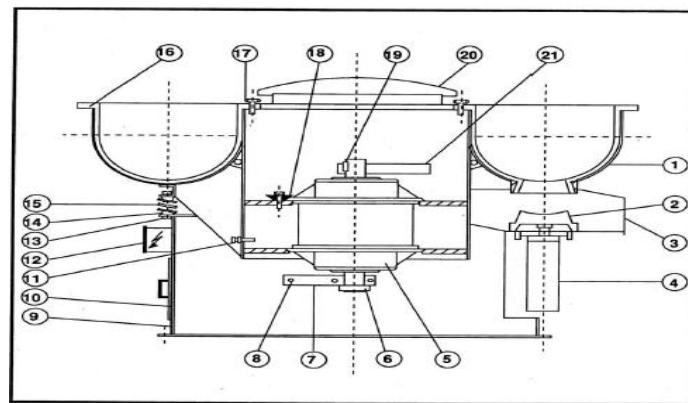


Figure 4.1. Schéma de la machine de tribofinition RC230

N°	Désignation	N°	Désignation	N°	Désignation
1	Cuve	8	Poids auxiliaire	15	Ressort
2	Bouchon de déchargement des pièces	9	Base	16	Revêtement cuve
3	Trémie de déchargement des pièces	10	Porte d'inspection	17	Boulons de fixation couvercle moteur

4	Cylindre pneumatique de commande de déchargement des pièces	11	Serre-câbles moteur	18	Blocs fixage moteur
5	Moteur électrique	12	Boite de dérivation	19	Clavette fixage poids supérieur
6	Bague graduée	13	Boulons de fixage douilles	20	Couvercle moteur
7	Poids inférieur	14	Douilles	21	Poids supérieur



Figure 4.2 : Photo de la machine de vibro-abrasion RC230

## 2. Description du procédé de tribofinition

### Première étape

#### Préparation des pièces :

Les pièces ont été obtenues à partir de barres métalliques stockées dans le magasin du département de Génie Mécanique. Après un découpage par la scie électrique, elles ont été usinées par fraisage ou par tournage afin d'avoir les dimensions recommandées.

### Seconde étape

#### Traitement par tribofinition :

Nous disposons de cinq pièces métalliques :trois en acier, une en fonte et une en aluminium.

Les pièces sont mises en vibration dans la cuve du vibreur qui est remplie à 2/3 d'abrasif en céramique , l'ensemble est en mouvement pendant 8 heures. En suite , on ajoute au mélange une grande quantité d'un acide spécial et de l'eau de manière que l'ensemble des pièces et abrasifs soit immergé dans le mélange, et ceci pendant 30 min afin d'enlever les résidus de tribofinition sur la surface des pièces. Les abrasifs utilisés sont des pièces pyramidales en céramique.



Fig.4.3 : Abrasifs en céramique

#### Troisième étape

On met les pièces dans un autre vibreur (cette fois-ci spiral) qui contient des abrasifs enmaïs et muni d'un sécheur pour sécher les pieces et ceci pendant 30 min.



Fig.4.4 :Vibreur spiral de séchage

#### Dernière étape

Les pièces sont séchées, on les remet dans le premier vibreur avec, cette fois-ci, des abrasifs métalliques pendant 30 minutes pour leur donner plus de dureté.



Fig.4.5:Abrasifs métalliques

### **3. Détermination des différentes caractéristiques des pièces**

Notre travail consiste à relever les différentes caractéristiques des pièces avant et après le traitement par tribofinition. Les différentes caractéristiques sont la masse, la dureté, la rugosité et la structure microscopique.

### **Masse**

La pesée de la masse a été effectuée au laboratoire du département de génie minier en utilisant une balance électronique de précision de  $10^{-4} g$ .



Fig.4.6 : Balance digitale

### **Dureté**

Elle a été effectuée au laboratoire du département de métallurgie en utilisant un duromètre électronique. La mesure de dureté se fait après un léger polissage des pièces pour enlever la couche rouillée qui peut influencer la dureté de la pièce.



Fig.4.7 : Duromètre

### **Rugosité**

La mesure de rugosité a été effectuée au niveau du laboratoire de génie mécanique et développement en utilisant un rugosimètre portatif lié à un ordinateur et muni d'un palpeur qui, en glissant sur la surface de la pièce, mesure les différentes aspérités et pics de la pièce et donne les valeurs des paramètres de l'état de surface sur l'ordinateur par le biais du logiciel Rugosoft.

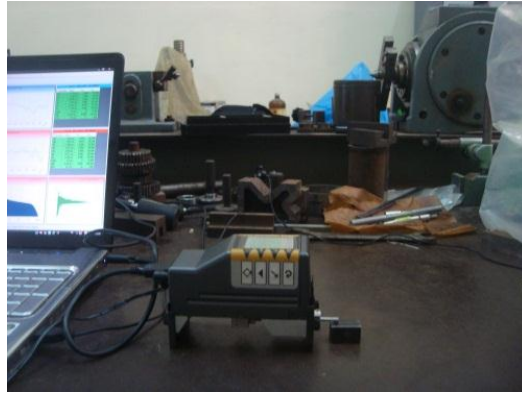


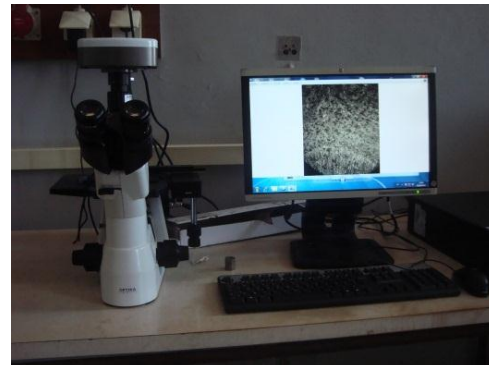
Fig.4.8:Rugosimètre portatif utilisée

### Structure microscopique

L'observation de la structure des pièces par le microscope optique nécessite une préparation par polissage en utilisant des papiers abrasifs d'épaisseur allant de 120  $\mu\text{m}$  jusqu'à 1200  $\mu\text{m}$  et finissant par le papier de finition avec de l'alumine pour donner à la pièce un aspect brillant et propre et ce pour pouvoir observer leur microstructure.



-a-



-b-

Figure 4.9 : Polisseuse-a- et microscope electronique à balayge -b-

#### 4. Résultats

<b>Matériau</b>	Avant tribo	Après tribo	Variation (%)	Sens de variation
<b>Acier mi-dur au carbone</b>				
Masse(g)	51.4725	51.2665	0.4	Diminution
Dureté HV	185.5	190.3	2.59	augmentation
Rugosité Ra (µm)	5.942	2.531	57.40	diminution
<b>Acier chrome-Nickel</b>				
Masse(g)	75.9158	75.7613	0.2	diminution
Dureté HV	190.4	194.4	2.1	augmentation
Rugosité Ra (µm)	5.540	4.443	19.8	diminution
<b>Acier rapide</b>				
Masse(g)	69.1591	68.9935	0.24	diminution
Dureté HV	718.63	720	0.19	augmentation
Rugosité Ra (µm)	4.118	2.050	50.22	diminution
<b>Fonte</b>				
Masse(g)	23.8264	23.8149	0.048	diminution
Dureté HV	230.4	235.37	2.16	augmentation
Rugosité Ra (µm)	1.651	1.179	28.59	diminution
<b>Aluminium</b>				
Masse(g)	76.3162	76.1626	0.2	diminution
Dureté HV	103.47	104.9	1.38	augmentation
Rugosité Ra (µm)	4.532	1.274	71.89	diminution

Tableau 7 :Résultats de mesure

## 5. Interprétation des résultats

### Masse :

La différence entre les masses des pièces avant et après le traitement par tribofinition est extrêmement faible, en effet, la diminution des masses des pièces est de l'ordre de 0.2%, ce qui signifie que cette différence représente le poids des bavures qui couvraient la surface extérieur des pièces, elles s'enlèvent sous l'effet des chocs induits par les médias et les autres pièces.

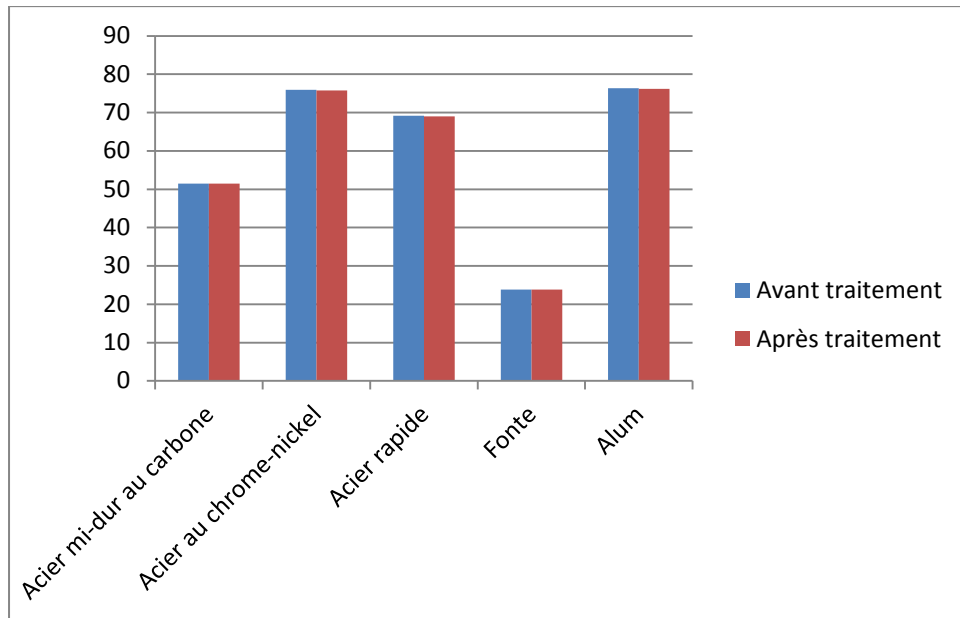


Figure 4.10 : Variation des masses des différentes pièces



Figure 4.11:Exemple d'enlèvement de la bavure

### Dureté :

On remarque que la dureté a légèrement augmenté, ceci est dû aux déformations plastiques subies par les pièces lors des vibrations.

Ces déformations à froid conduisent à des déformations plastiques résultant du glissement d'une partie du cristal par rapport à l'autre suivant certaines distances inter réticulaires. Ce type de glissement est favorisé par la formation, la multiplication et le déplacement de défauts linéaires mobiles dans le cristal (dislocations). Le mouvement des dislocations n'étant pas réversible, le métal ne reprend pas sa forme d'origine lorsque l'on supprime la contrainte.



Le nombre croissant de dislocations produites lors des déformations plastiques et leur interaction entre elles (ou avec des impuretés, précipités...) conduit à réduire leur mobilité : c'est le phénomène d'écrouissage d'où résulte un durcissement du métal.

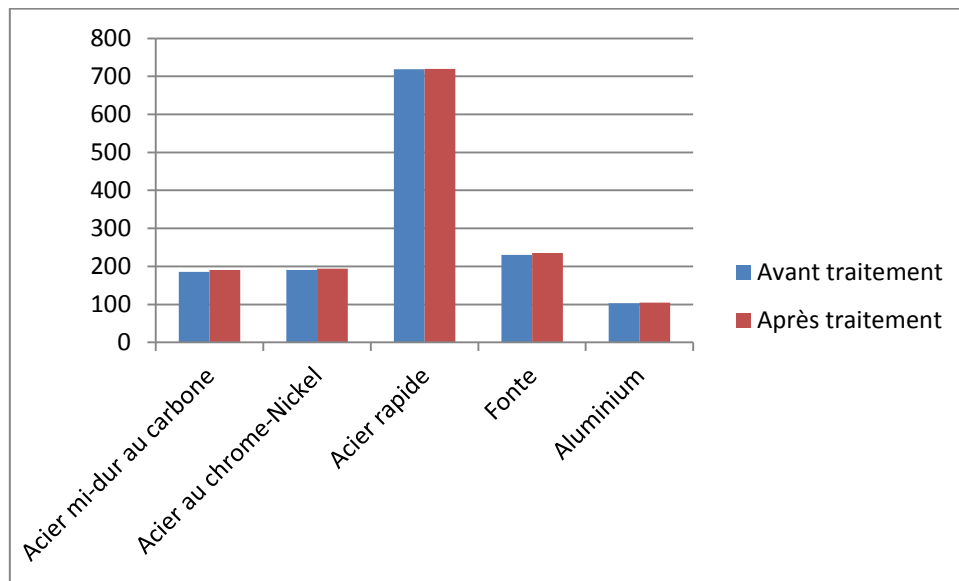


Figure 4.12 : Variation de la dureté des différentes pièces

**Etat de surface :**

En comparant les valeurs de la rugosité des pièces avant et après le traitement, on constate qu'il y a une diminution de la rugosité (amélioration de l'état de surface), ceci est dû aux chocs et frottements au niveau de la surface extérieure des pièces qui enlève les aspérités sur la surface d'une épaisseur de quelques micromètres.

**Structure microscopique :**

Acier mi-dur au carbone

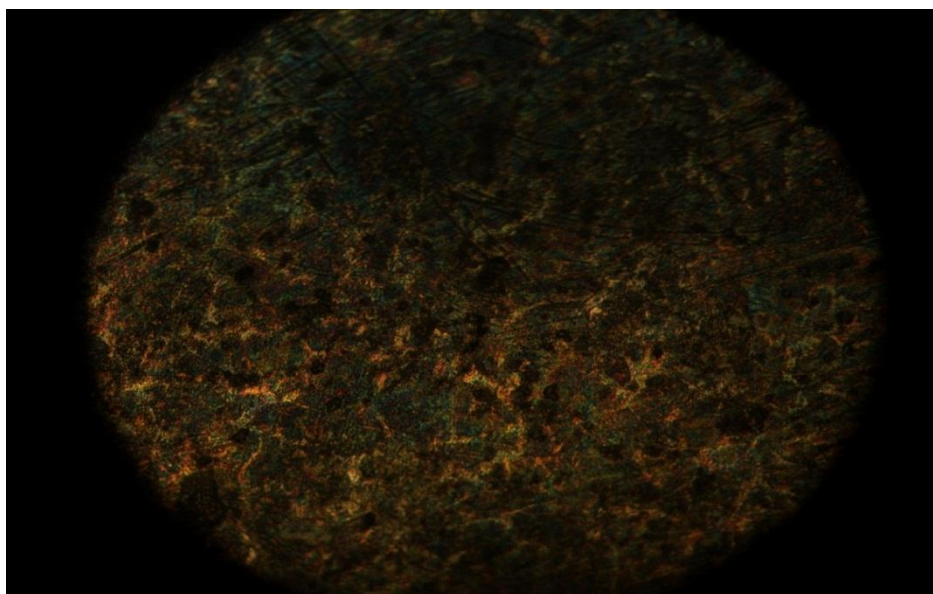


Figure 4.13 : structure microscopique de l'acier mi-dur (×500)

Dans cette image, on peut observer la ferrite en couleur claire sous forme de lamelles et la perlite en couleur sombre, les points noirs qui figurent sur la photo représentent des porosités (vides) dans la structure du matériau .Le taux de carbone est de 0.02% dans la ferrite et 0.85% dans la perlite.

### Fonte

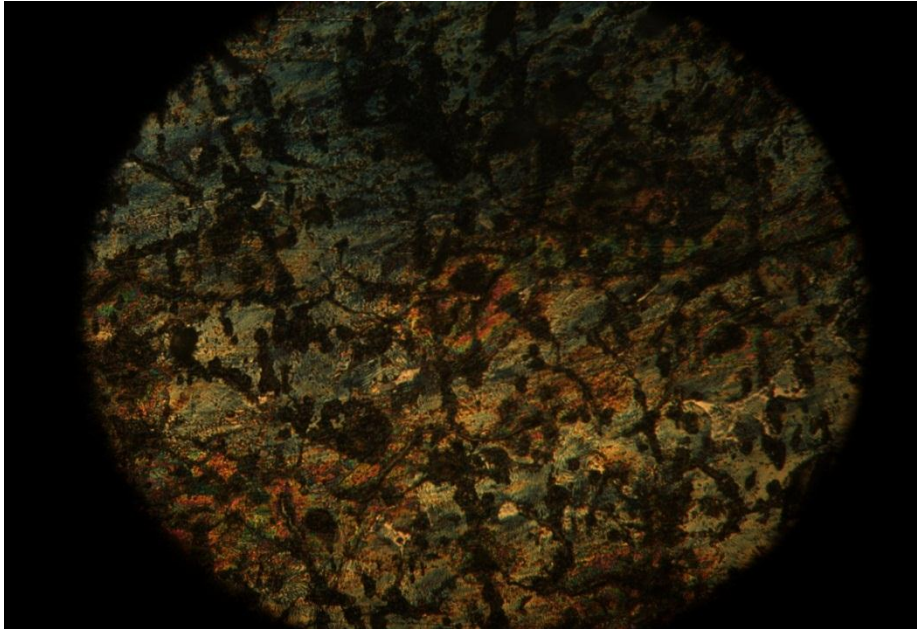


Figure 4.14 : structure microscopique de la fonte ( $\times 500$ )

Dans cette figure, la perlite apparait en couleur jaune et le graphite en couleur noir. Le fait d'avoir en présence le graphite, veut dire qu'il ne s'agit pas d'une fonte blanche, d'un autre côté, le graphite se présente d'une manière aléatoire (pas sous forme de lamelle ni sphéroïdale) donc il s'agit d'une fonte truitée (malléable) :perlite + carbure+ graphite.

Il est à noter que l'opération de tribofinition n'a aucune influence sur la structure microscopique du matériau, car son principal effet est au niveau de la structure cristalline du matériau (grains, joints de grains, plans atomiques), c'est pour raison qu'on ne peut observer de variation entre la micrographie des matériaux avant et après la tribofinition.

## CONCLUSIONS

La tribofinition est une technique utilisée pour préparer les pièces à l'usinage en enlevant les bavures sur leurs surfaces extérieures

Parmi les phénomènes qui accompagnent cette technique on trouve : augmentation de la dureté.

La technique de tribofinition constitue l'une des solutions utilisées pour améliorer les propriétés mécaniques et géométriques des différents matériaux, et par conséquent, des différentes pièces mécaniques qui entrent dans les différents procédés de construction mécanique de par sa simplicité et, relativement, de ses faibles coûts, seulement, le problème que pose cette technique est l'incapacité de prédire avec exactitude l'état de ces propriétés après traitement, par exemple, si l'on veut avoir un certain état de surface, on n'est pas sûr que cet état souhaité sera atteint ou pas. C'est pour cette raison qu'on propose de faire une étude dans laquelle on essayera de donner un modèle mathématique à l'aide d'un logiciel de simulation afin de pouvoir se rapprocher le plus possible du cas réel. Ceci, une fois fait, constitue une avancée très importante pour cette méthode.

## Bibliographie

- [1] I. Lakhtine : Métallographie et Traitement Thermique des Métaux, éditions Mirs, Moscou 1978.
- [2] Fouad BOUKLI HACENE : Cours Vibrations et Ondes Mécaniques, Université Hassiba BENBOUALI Chlef.
- [3] A.P. BABICHEV, M.D.MOTRENKO : Exploitation de la technologie de vibration pour l'amélioration de la qualité de surface et les caractéristiques, Russie 2006.
- [4] A.P. BABICHEV, I.A. BABICHEV : Principe de la technologie de vibration, Russie 1999.
- [5] Suzanne Degallaix et Bernhard Ilchner : Traité des matériaux, T2 : Caractéristiques expérimentales des matériaux, Presse polytechnique et universitaire 2007.
- [6] Mohamed Bouaziz : Cours Science et techniques des mesures : ENP, Génie Mécanique, 2012.
- [7] Karima Dob : Etude de la résistance à la corrosion d'un acier au carbone en milieu aqueux influencé par des traitements thermiques, thèse de Magister, université 20 Août 1955 Skikda, 2012
- [8] Athman Tala Bouzrou : Etude et expérimentation des différents matériaux par le procédé de Vibro Abrasion, PFE, ENP, Juin 2011
- [9] Saïd Bouzini : Etude de la résistance à la fatigue des pièces traitées par le procédé de tribofinition, PFE, ENP, Juin 2012
- [10] Zoheir Sellidj : Détermination des contraintes résiduelles dans les cordons de soudure en acier inoxydable, mémoire de Magister, ENP, Métallurgie 2009
- [11] Sylvie Pommier : Science des Matériaux, université Pierre et Marie Curie, Paris, 2006
- [12] Bouhelli Abdeldjalil : Etude et analyse du traitement des pièces mécaniques par la technique de vibro-impact, Thèse de Master, USTHB 2011