



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

En Génie Mécanique

Option : Productique

Thème :

---

---

### Contribution à la compréhension des modes d'action tribologique par usinage

---

---

Proposé et dirigé par :

M<sup>er</sup>. ROIBHI Youcef

Présenté :

DJEMAI Abdenasser

*Année Universitaire : 2015 / 2016*

N° d'ordre : GM/...../2016

# *Remerciements*

*Nous remercions Dieu qui nous a donné le pouvoir et nous a aidé à terminer ce modeste travail.*

*Pour cette occasion, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidé de loin ou de près à la réalisation et à la mise au point de ce travail, en particulier*

*M<sup>er</sup> l'encadreur : ROUABHI Youcef*

*Tous les étudiants du département de génie mécanique*

*A tous les enseignants du département de génie mécanique*

*A tous ceux qui nous ont apporté une aide ou une assistance durant notre travail, et notre formation tout au long du cycle*

*Avec l'expression de nôtres gratitude*

*A tous nous disons merci !*

# ***DEDICACE***

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère*

*A mon très cher père*

*A ma femme*

*A mes enfants Amina, Youcef*

*A mes sœurs Fatiha, Souria*

*Et mes frères Samir, Mohamed, Adel, Bilel*

*A mes amis Hakim, Mohamed, Sofiane, Younes*

*Ainsi mes amis de la promotion 2016*

# Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Introduction générale

**Chapitre I : Traitement de surface.**

I.1. Introduction .....	01
I.2. définitions et critères fonctionnels des surfaces.....	01
I.2.1. Propriétés spécifiques des surfaces.....	01
I.2.2. Critères fonctionnels des surfaces.....	02
I.2.2.1. Introduction.....	02
I.2.2.2. Critères physico-chimiques.....	02
I.2.2.3. Critères géométriques.....	02
I.2.2.4. Critères mécaniques.....	03
I.2.2.5. Critères métallurgiques .....	03
I.3. traitements mécaniques des surfaces.....	03
I.3.1. Abrasion à l'aide d'un papier abrasif.....	03
I.3.2. Abrasion par projection de particules (Sablage).....	04
I.3.2.1. Paramètres du traitement par sablage.....	05
I.3.2.2. Particules abrasives.....	06
I.4. nettoyage des surfaces.....	07
I.5. conclusion.....	07

**Chapitre II : Propriétés tribologique.**

II.1. introduction.....	10
II.2. surface.....	10
II.3. Outils conceptionnels en tribologie des interfaces.....	12
II.3.1. Le triplet tribologique et la notion de troisième corps.....	12
II.3.2. Accommodation de vitesse.....	14
II.3.3. Circuit tribologique.....	15
II.4. Dégradation des surfaces et usure.....	16
II. 4.1. Les différents types d'usure.....	16
II. 4.2. Evaluation de l'usure.....	17

**Chapitre III : Tribologie en usinage.**

III.1. Introduction.....	20
III.2. Généralité sur la formation du copeau.....	21
III.3. Analyse expérimentale de la coupe.....	23
III.3.1 Introduction .....	23
III.3.2. Etude du frottement en usinage par des essais de coupe instrumentés.....	24
III.3.3. Analyse mécanique de la coupe.....	25
III.3.4. Analyse thermique de la coupe.....	26
III.3.5. Essai de coupe interrompu.....	28
III.4. Etude du frottement en usinage par des essais tribologiques.....	29
III.4.1. Tribo-système fermes.....	30
III.4.2. Tribo système ouverts.....	31

III.5.les modèles de frottement en usinage.....	31
III.6.Conclusion.....	35

## **Chapitre IV : Tribologie par abrasion.**

IV.1.Principe et possibilités technologiques des méthodes des traitements abrasifs.....	37
IV.2.Classification des traitements abrasif.....	38
IV.2.1.Traitement vibratoire (TV <sub>i</sub> ).....	39
IV.2.2.Traitement centrifuge Rotatif (TCR).....	41
IV.2.3.Traitement à Jet Abrasif (TJA).....	43
IV.2.4.Traitement Turbo- Abrasif (TTA).....	44
IV.2.5 .Traitement au Tonneau (Tumbling process).....	46
IV.2.6.Traitement Abrasives libres condensés par des forces d'inerties (TALCFI).....	48
IV.2.7.Traitement Abrasif Magnétique (TAM).....	50
IV.3.Brève analyse des travaux dans le domaine du traitement abrasif.....	51
IV.4.Conclusion.....	57

## **Conclusion générale**

## **Bibliographie**

## Listes des figures

Figure I.1 - Rugosité d'un Polyéthylène, a) Sans traitement, b) Traitement avec un papier abrasif 320,c) Etat des surface après abrasion.

Figure I. 2 - Contrainte de cisaillement en fonction de différents grades de papier abrasif pour deux colles différentes. Essai de cisaillement à simple recouvrement substrat PE.

Figure I.3 - Micrographies MEB montrant l'état de surface avant et après traitement par sablage du PEEK ; a) Surface PEEK après polissage, b) Après traitement par sablage avec des particules d'oxyde d'aluminium (50 $\mu$ m) et c) Après traitement par sablage avec des particules d'oxyde.

Figure I.4 - Micrographies obtenues par MEB de particules de différentes formes et natures ; a) bille de verre (63-106  $\mu$ m), b) alumine anguleuse (106-125 $\mu$ m) et c)carbure de tungstène (212  $\mu$ m).

Figure I.5 - Vue en coupe d'une surface d'un matériau métallique schématisée.

Figure II.1 - Propriétés fonctionnelles d'une surface.

Figure II.2 - rapprochement des solides : effets et conséquences.

Figure II.3 - le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps.

Figure II.4- les aspects de tribologie.

Figure II.5 - sites et modes d'accommodation.

Figure II.6 - circuit tribologique de Berthier.

Figure III.1 - La coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière).

Figure III.2 - Les zones de sollicitation en coupe orthogonale.

Figure III.3 - Les configurations de la coupe orthogonale. (a) usinage d'un tube (coupe semi orthogonale). (b) usinage d'un palier (coupe orthogonale).

Figure III.4 - Instrumentation d'un dispositif de coupe orthogonale.

Figure III.5 - Principe d'identification de la fonction de transfert thermique.

Figure III.6 - Analyse de la coupe par des essais de QST.

Figure III.7 - Les essais tribologiques classiques : (a) pion stationnaire sur un disque rotatif. (b) pion stationnaire sur un cylindre rotatif. (c) pion à déplacement réciproque sur une plaque stationnaire.

Figure III.8 - Distribution des contraintes de contact le long de l'interface outil-copeau.

Figure III.9 - Vue schématique d'un outil coupé.

Figure.IV.1 - Classification des méthodes du traitement abrasifs libres selon le caractère de l'influence de la particule abrasive.

Figure.IV.2 - Schéma du procédé de traitement vibratoire : 1 - chambre de travail; 2 - ressorts; 3 - vibreur excentrique déséquilibré; 4 - fondement; 5 - tuyaux d'alimentation et de vidange du ST; 6 - pompe; 7 - réservoir-décanteur.

Figure.IV.3 - Schéma de procédé de traitement centrifuge rotatif : 1 - virole immobile ; 2 - rotor tournant ; 3 - flux toroïdal de granules et de pièces.

Figure. IV.4 - Schéma de principe du TJA : 1 - dispositif à jet, 2 - buse, 3 - pièce.

Fig.IV.5 - Schéma de principe du TTA: a) - rotation des pièces dans un plan vertical, b) - rotation des pièces dans un plan horizontal, 1- pièce, 2 - grain abrasif, 3 - réseau de distribution de gaz,

4 - écoulement d'air.

Figure.IV.6 - Schémas du traitement au tonneau : a - dans un tonneau rond incliné, b - dans un tonneau incliné à facettes, C- tonneau, A- pièce, D- milieu liquide, B - milieu granulaire.

Figure.IV.7- Schémas du traitement au tonneau : a) - dans un tonneau rond vertical avec des pièces fixes rotatives, b) - dans un tonneau à facette horizontale avec des pièces fixes rotatives.

Figure.IV.8 - Schémas du traitement des pièces dans un milieu abrasif libre condensé par des forces d'inertie : a - traitement de la surface extérieure de la pièce, b - traitement de la surface intérieure de la pièce, c - traitement simultané de la surface extérieure et intérieure de la pièce, d - traitement de la surface plane, 1 - tambour tournant; 2 - matière abrasive en suspension; 3 - pièce; 4 - mécanisme de rotation; 5, 6 - rouleaux tournants de pièces, 7 - rotor avec des palette tournantes.

Figure.IV.9 - Schéma du TAM de polissage des surfaces extérieures des corps de révolution :

1- pièce ; 2 - poudre abrasive magnétique ; 3 - bouts polaires de l'électro-aimant ;

4 - électromagnétique.

## Liste des tableaux

Tableau II.1 - différentes formes d'usure.

Tableau III.1 - Les modèles de frottement utilisés pour simuler le contact en usinage.

## Liste des abréviations

(PEEK) Poly Ether Ether Ketone.

(MEB) microscopie électronique à balayage.

(TVi) traitement vibratoire.

(TAT) traitement abrasive au tonneau.

(TCR) traitement centrifuge rotatif.

(TJA) traitement à jet d'abrasif.

(TTA) traitement turbo-abrasif.

(TALCFI) traitement avec abrasif libre condensé par des forces d'inerties.

(TAM) traitement abrasif magnétique.

(ST) solution technologique.

(TCR) traitement centrifuge rotatif.

(MG) le milieu granulaire.

(CT) la chambre de travail.

(TALCFI) traitement abrasif libre, condensé par des forces d'inertie.

(TMFV) traitement de masse finition vibratoire.

(MMFV) medias de masse finition vibratoire.

(EMFV) Equipement de Masse Finition Vibratoire.

## Résumé

La Tribologie est la science qui s'intéresse au frottement, à l'usure, à la lubrification et au contact. Les paramètres qui gouvernent le comportement tribologique d'un couple de matériaux sont très nombreux. Parmi ceux-ci, se trouvent les matériaux avec leurs propriétés spécifiques de surface.

Jusqu'à présent, la Tribologie concernait presque exclusivement les applications technologiques "dures". mais la Tribologie est maintenant de plus en plus concernée par des interactions avec les sciences d'autres matériaux. Dans ce cadre, on rencontre ainsi divers traitements de surface sur des matériaux différents, et qui ont été étudiés et comparés en condition de traitement afin de limiter d'une part les dégradations et d'une autre de réduire le coût de traitement tribologique.

L'objet de la présentation du travail sera de faire le point sur ces différents traitements tribologiques en s'appuyant sur des études réalisées et les avantages / inconvénients de chaque traitement.

**Mots-clés :** Tribologie, frottement, usure, lubrification.

## ملخص

علم الاهتراء هو العلم الذي يهتم بالاحتكاك والتآكل والتزبييت والتماس كذلك.

تتعدد المبادئ التي تحكم عملية الاحتكاك بين مادتين حسب خصائص السطوح من مادة لأخرى.

لحد الآن، كان هذا العلم يقتصر على التطبيقات التكنولوجية الصلبة. لكنه الآن يتداخل شيئاً فشيئاً مع علوم المواد الأخرى. وفي هذا الإطار نصادف كذلك تماسات متنوعة للسطوح مع مواد مختلفة وهي تماسات تمت دراستها ومقارنتها اثناء المعالجة، وذلك من اجل الحد من فقدان الطاقة من جهة، ومن جهة اخرى من اجل تقليص كلفة معالجة الاحتكاك بالتركيز على الدراسات المنجزة ومزايا ومساوي كل معالجة.

**كلمات مفتاحية:** الاهتراء، الاحتكاك، التآكل، التزبييت.

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Le nom tribologie a été créé en Angleterre ; il a été utilisé pour la première fois le 23 novembre 1965 au Ministre d'État pour l'éducation et de la science et publié en février 1966. Ce nom vient du grec (tribein : frotter) et (logos : parole, étude ou science); ainsi la tribologie est la science des frottements. Un 'frottement' intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. La notion même de frottement est en fait très intuitive à tout un chacun, essentiellement car nous pouvons ressentir - physiquement - ses effets dans la vie quotidienne : se frotter les mains pour se réchauffer, craquer une allumette, jouer du violon, glisser sur la glace, freiner en voiture, entendre un crissement craie sur le tableau, mettre de l'huile dans les gonds de porte, etc., on pourrait multiplier les exemples connus de tous. La plupart de ces phénomènes peuvent se comprendre sur la base des lois du frottement énoncées dès le 18ème siècle par Amontons et Coulomb (mais déjà mises en évidence par Léonard de Vinci 200 ans auparavant), à partir de la notion de coefficient de frottement. Pourtant l'évidence apparente de ce 'vieux problème' cache l'extrême complexité sous-jacente. L'origine du frottement fait intervenir une multitude d'ingrédients, couvrant un spectre très large de phénomènes physiques : rugosité des surfaces, élasticité, plasticité, adhésion, lubrification, thermique, usure, chimie des surfaces, humidité, etc.

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps.

Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées). L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement.

En fixant comme but : contribution à la compréhension des modes d'action tribologique par usinage, ce sujet sera abordé de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré aux toutes définitions et critères fonctionnels de surfaces, propriétés spécifiques des surfaces, comme des données d'entrées pour réussir tout traitement de surface.

Le deuxième chapitre sera consacré aux surfaces, et à l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence; mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact pour bien répondre aux propriétés tribologiques.

Le troisième chapitre sera consacré à la tribologie en usinage. Le problème de la tribologie en usinage des métaux a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le but de les maîtriser pour optimiser l'opération et améliorer la qualité du produit final. Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique concernant l'étude et la modélisation des phénomènes tribologiques produits durant l'opération d'usinage des métaux.

L'objet de la présentation du dernier chapitre sera de faire le point sur les différents traitements tribologiques par abrasion en s'appuyant sur des études réalisées et les avantages / inconvénients de chaque traitement.

# **Chapitre I**

## **Traitement de surface**

## **I.1. Introduction**

Un traitement de surface est une opération mécanique, chimique, électrochimique ou physique qui a pour conséquence de modifier l'aspect ou la fonction de la surface des matériaux afin de l'adapter à des conditions d'utilisation données. Les traitements de surface jouent un rôle éminent dans le domaine de la tribologie.

## **I.2. Définitions et critères fonctionnels des surfaces**

### **I.2.1. Propriétés spécifiques des surfaces**

#### **- L'énergie superficielle**

A l'intérieur d'une phase condensée, les interactions entre atomes ou molécules sont à courte portée. Ainsi, un atome placé à l'intérieur d'une phase interagit avec tous ses voisins, avec une énergie de cohésion  $u < 0$ . Mais les atomes placés au voisinage de la surface, eux, ne vont pas interagir de la même manière avec les atomes situés de l'autre côté de la surface, et se situent donc à un état d'énergie différente [1].

#### **- Reconstruction de surface**

Afin de minimiser l'énergie de surface, et de limiter le nombre de liaisons pendantes, les atomes ou les molécules s'assemblent d'une manière différente de l'intérieur du cristal. On appelle ce phénomène la reconstruction [1].

#### **- Adsorption**

La surface tend à concentrer les impuretés ; ceci est principalement dû à son caractère bidimensionnel. Un très faible nombre d'impuretés en volume sera suffisant pour occulter totalement une surface. Ainsi, l'étude des surfaces ne pourra se faire que sous ultravide (UHV pour Ultra-High Vacuum).

#### **- Autres propriétés**

Les propriétés des surfaces sont innombrables, on pourra cependant noter :

- leurs propriétés électroniques,
- les modes spécifiques de surface,
- la catalyse,
- l'adhésion (toute surface tendant à adhérer à une autre surface).

## I.2.2 Critères fonctionnels des surfaces

### I.2.2.1 Introduction

Dans la mesure où la surface industrielle est le résultat de conditionnements mécaniques (mise en œuvre par usinage, rectification ou déformation par différents types d'outillage), métallurgiques (traitement thermique ou thermochimique), en liaison avec différents types d'atmosphères gazeuses ou de lubrifiants, ses caractéristiques font appel à différents domaines de compétence pour les évaluer. Il faudra un appui métallurgique, pour connaître les évolutions de structure et les effets éventuels de texture apportés par les différentes gammes de traitements réalisés, il faudra également un appui mécanique pour mesurer les déformations et en déduire l'état des contraintes résiduelles, ainsi que la charge d'application en liaison avec des critères géométriques tels que le tracé du profil de rugosité qui permettra de définir la notion de portance. Il faudra enfin un appui de physicochimie, d'une part pour déterminer la réactivité d'une surface métallique réelle, en liaison avec les mécanismes d'adhésion, d'autre part pour connaître la nature des éléments chimiques présents en surface, leur concentration et dans la mesure du possible la nature de leur liaison [2].

### I.2.2.2 Critères physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des surfaces, liées à la présence de couches adsorbées et d'une sous-couche que l'on peut regrouper sous le nom de films superficiels jouent un rôle fondamental sur de nombreux phénomènes de dégradation des surfaces comme l'usure ou la corrosion. La formation de ces films superficiels est liée à des **critères chimiques**, comme la cinétique d'oxydation, les possibilités de réaction avec des films de polymères, des lubrifiants, ainsi que les affinités entre éléments d'alliages constituant les deux surfaces antagonistes. La formation de ces films est également liée à des **critères physiques** tels que la conductibilité thermique et le pouvoir réflecteur [2].

### I.2.2.3 Critères géométriques

La description complète de la géométrie réelle d'une surface est relativement complexe puisqu'elle doit faire intervenir l'ensemble des défauts identifiables depuis l'échelle de la pièce jusqu'à l'échelle atomique. La topographie d'une surface regroupe l'ensemble des facteurs caractérisant les irrégularités géométriques ou les écarts par rapport à la surface idéale qui vont du domaine microscopique défini plus généralement par la rugosité au domaine macroscopique correspondant à la géométrie de contact [2].

### I.2.2.4 Critères mécaniques

Ces critères sont à prendre en compte dans le contact de deux surfaces métalliques, où intervient la notion de portance, c'est-à-dire le contact entre sommets de rugosité. Il s'agit essentiellement du module d'élasticité, du niveau de dureté et de la résistance à la fissuration, ainsi que de l'état des contraintes résiduelles [2].

### I.2.2.5 Critères métallurgiques

La structure cristallographique de la surface d'un métal est également un critère déterminant pour son comportement au contact d'un autre métal, et cela en liaison avec les critères environnementaux comme la température ou la nature de l'atmosphère [2].

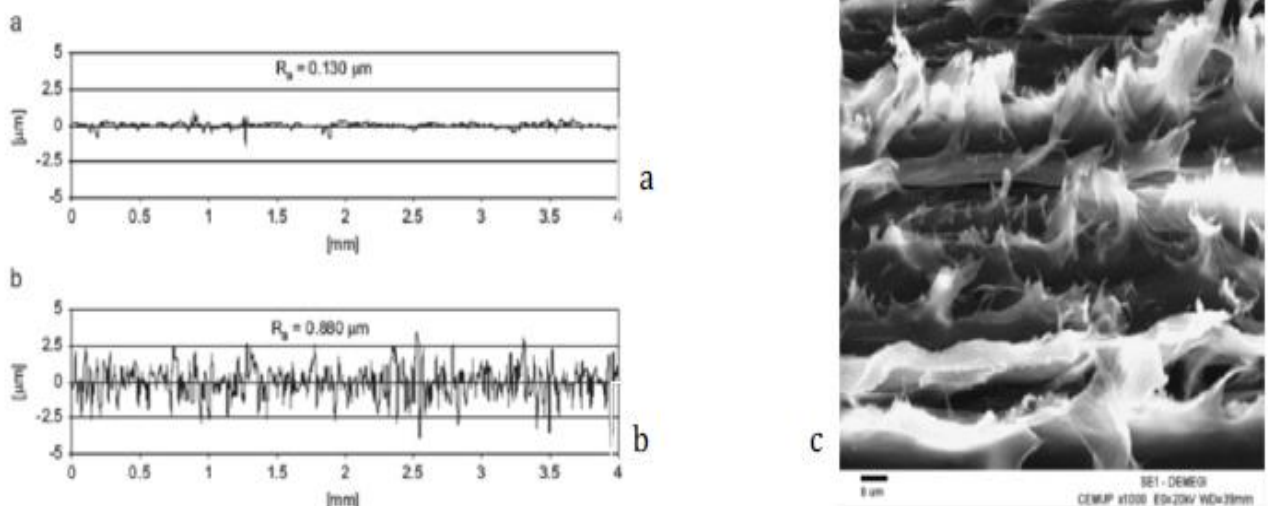
## I.3. Traitements mécaniques des surfaces

Ces modes de traitements consistent le plus souvent à faire subir une abrasion (traitement mécanique « léger » papier abrasif à différents grades) ou une projection de particules (traitement mécanique « dur » sablage particules à différentes granulométries) à la surface du substrat.

Ces traitements permettent la modification de la topographie de surface des substrats en augmentant la surface réelle de contact. Aussi, ce traitement permet de supprimer les couches de faible cohésion faisant barrière entre le matériau à coller et l'adhésif.

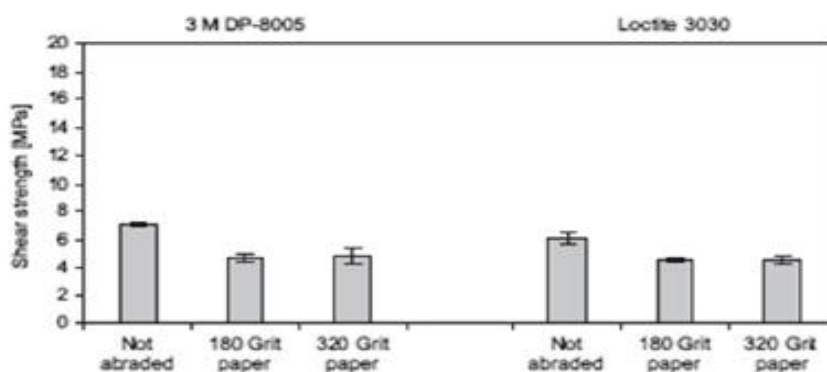
### I.3.1. Abrasion à l'aide d'un papier abrasif

Ce traitement consiste à froter manuellement ou par un système automatisé un papier abrasif à granulométrie bien définie sur la surface du substrat à coller [3]. Le contact et le frottement des particules abrasives du papier contre le substrat permet de modifier la topographie de surface (Figure I.1), en enlevant les couches indésirables et de la matière du substrat.



**Figure I.1** - Rugosité d'un Polyéthylène, a) Sans traitement, b) Traitement avec un papier abrasif 320, c) Etat de surface après abrasion [3].

Cependant, le traitement par papier abrasif seul ne permet pas d'avoir un joint de colle résistant, la résistance du joint de colle sans traitement étant souvent plus grande que dans le cas des joints traités par papier abrasif comme le montre la Figure I. 2 En effet, les cavités et les vallées créées sur la surface du substrat sont de formes très exiguës et peuvent ne pas être entièrement comblées par l'adhésif avant sa solidification en raison d'un manque de mouillage et de l'air qui reste emprisonné entre le substrat et l'adhésif [3]. Ce phénomène réduit la zone d'adhésion efficace et la création de contraintes inter-faciales (Petrie 2000) [3].



**Figure I. 2** - Contrainte de cisaillement en fonction de différents grades de papier abrasif pour deux colles différentes. Essai de cisaillement à simple recouvrement substrat PE. [3].

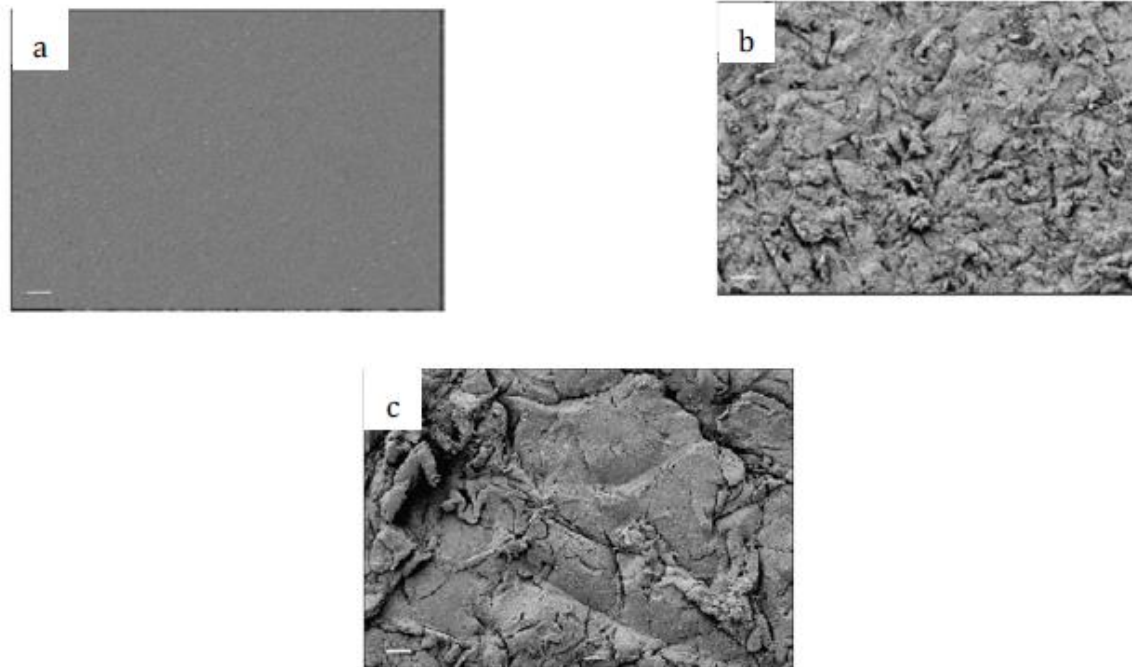
### I.3.2. Abrasion par projection de particules (Sablage)

Le sablage consiste à projeter sur une surface des fines particules abrasives de granulom définie dans le but de modifier l'état de surface et de créer des creux et des vallées de forme la moins exiguë possible, afin d'augmenter l'accrochage mécanique adhésif/substrat. De nombreuses recherches ont été effectuées sur l'effet du traitement par sablage sur la contrainte de cisaillement du joint de colle et la durabilité pour différents matériaux et colles [3].

Cependant, dans le cas des matériaux PEEK la littérature est peu fournie en ce qui concerne les corrélations entre le traitement par sablage et le comportement au collage. Schmidlin et. al. (2010) ont étudié récemment une comparaison de l'effet de différents traitements de surface incluant le sablage sur le comportement des assemblages par collage du PEEK sans renfort.

La Figure I.3 illustre l'état de surface du PEEK après un traitement par sablage en utilisant différentes granulométries de particules. Cette figure montre que le sablage modifie considérablement la morphologie de surface et que celle-ci est dépendante des conditions du traitement. Leurs résultats

mettent en évidence une amélioration après un traitement par sablage de la résistance du joint de colle en cisaillement, d'une valeur quasi-nulle pour les substrats non traités jusqu'à une contrainte de cisaillement de l'ordre de 13 MPa après traitement par sablage en utilisant des particules d'oxyde d'aluminium de 50 $\mu$ m de taille moyenne.



**Figure I.3** - Micrographies MEB montrant l'état de surface avant et après traitement par sablage du PEEK ; a) Surface PEEK après polissage, b) Après traitement par sablage avec des particules d'oxyde d'aluminium (50 $\mu$ m) et c) Après traitement par sablage avec des particules d'oxyde

Plus récemment, Hallmann et. al. Ont montré aussi que la combinaison d'un traitement par sablage (particules à taille moyenne de 50 $\mu$ m) et un traitement chimique conduisait à une nette amélioration du comportement au collage des matériaux à base de PEEK [3].

### I.3.2.1. Paramètres du traitement par sablage

La modification de l'état de surface par sablage est dépendante de la nature du substrat (fragile, ductile, amortissant à caractère viscoélastique, présence ou pas de renfort, nature du renfort, ...etc.) et des conditions du traitement (procédé). Les paramètres les plus importants dans ce type de traitement sont :

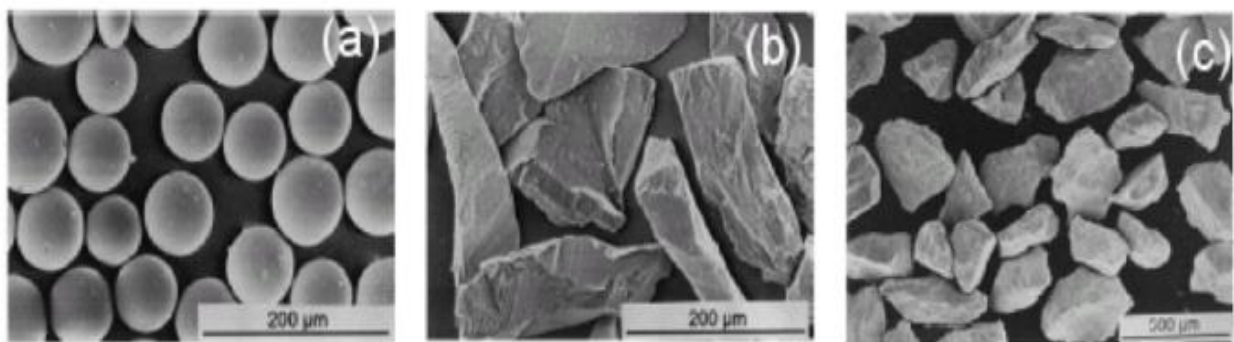
- ✓ La nature, la taille et la forme des particules ;
- ✓ Le temps de projection des particules ;
- ✓ La vitesse du flux des particules ;
- ✓ L'orientation de l'angle de projection des particules vis-à-vis du substrat ;
- ✓ La distance de projection des particules ;

- ✓ Le diamètre de la buse de projection ;
- ✓ ...etc.

### I.3.2.2. Particules abrasives

Les particules constituent un élément à prendre en considération avec intérêt dans un traitement de surface par sablage. Leur nature, forme et dimension déterminent les mécanismes d'abrasion d'un matériau. Il est évident que, pour avoir une modification d'état de surface les particules doivent être plus dures que les substrats et chimiquement inertes afin d'éviter une contamination supplémentaire des substrats ainsi que le matériels du traitement. Généralement, et d'après la littérature les particules les plus utilisées sont des particules d'alumine, de silice et de carbure de silicium. En effet, ces matériaux présentent des duretés supérieures à celles de la majorité des substrats à traiter [3].

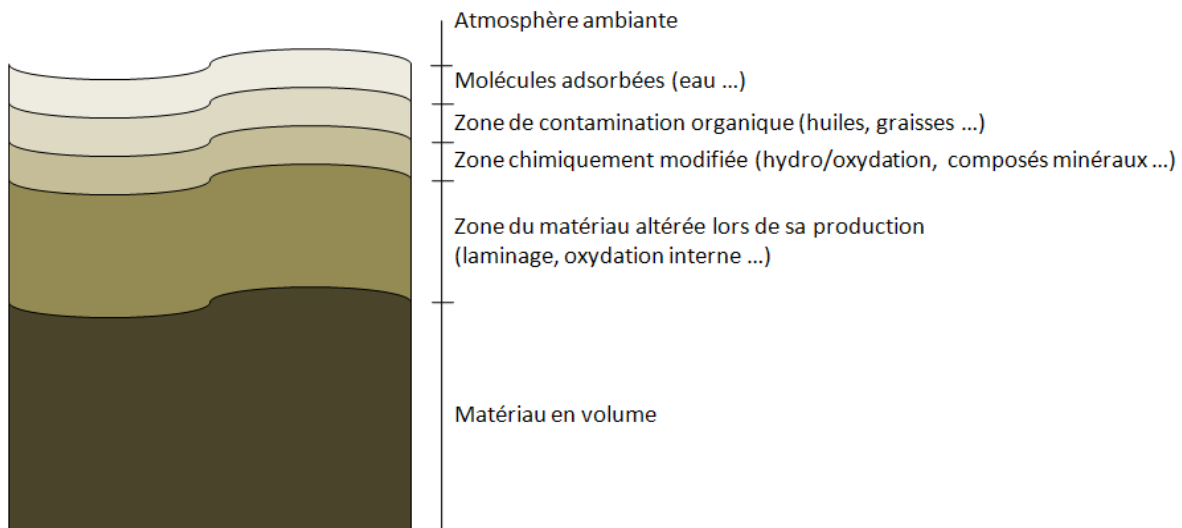
La forme et la dimension des particules peuvent être caractérisées par de nombreuses méthodes. Une approche quantitative, nécessite l'utilisation de méthodes à base de diffraction par laser ou d'analyses d'images des micrographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) [3]. Cependant, pour un traitement par sablage, une approche qualitative de la forme des particules suffit en considérant qu'elles sont soit sphériques, soit anguleuses [3]. La Figure I.4 illustre la diversité des formes des particules utilisées dans le traitement par sablage : des particules sphériques comme des billes de verre (a), des particules anguleuses d'alumine (b) et de carbure de tungstène (c). On remarque aussi, que des particules anguleuses ont des formes variées : certaines sont plutôt oblongues, d'autres plus « carrées » et d'autres enfin « pointues ».



**Figure I.4** - Micrographies obtenues par MEB de particules de différentes formes et natures ; a) bille de verre (63-106 µm), b) alumine anguleuse (106-125µm) et c)carbure de tungstène (212 µm). [3].

## I.4. Nettoyage des surfaces

Lors de la production de pièces d'alliages métallique (files, tôles, feuilles, ...), la surface de ces matériaux se trouve généralement modifiée. On peut voir se former à leur surface une couche d'oxyde ou encore y trouver des contaminants d'origine organique ou inorganique (voir figure I.5) cette modification de l'état de la surface engendre généralement une altération de ses propriétés limitant l'efficacité de traitements de surface ultérieurs (peinture, dépôt, diffusion,...) [4]. De plus, comme dans le cas du film d'aluminium alimentaire, bien que les lubrifiants utilisés dans ce cas soient approuvés comme compatibles pour l'utilisation alimentaire, certains éléments non désirés peuvent également se retrouver en surface et doivent donc être retirés de la surface avant que le produit ne se trouve sur le marché afin de prévenir tout risque éventuel pour la santé du consommateur [4].



**Figure I.5** – Vue en coupe d'une surface d'un matériau métallique schématisée (inspirée de [4]).

Il convient donc de préciser ce que l'on désigne par « nettoyage de surface ». Dans le cadre de ce chapitre, on s'intéresse ici uniquement à la suppression de la couche de contamination organique à la surface d'un alliage métallique due, par exemple, à l'utilisation de lubrifiants ou d'agents anticorrosion lors du laminage d'une tôle. L'objectif du nettoyage est donc l'obtention d'une surface chimiquement propre, permettant un traitement de surface ultérieur de qualité optimale.

## I.5. Conclusion

Les traitements de surface permettent en particulier l'aspect externe (rugosité, couleur, brillance,...). De maîtriser les performances d'une pièce (résistance à la corrosion). D'améliorer ou de modifier les propriétés mécaniques et physiques (conductibilité électrique, usure, frottement, ...) D'augmenter la durée de vie et la fiabilité d'un produit.

Après que nous avons présenté dans ce chapitre les définitions et les critères fonctionnels des surfaces et quelques propriétés de surface qui jouent un rôle fondamental en tribologie.

Nous présentons le prochain chapitre les propriétés tribologique.

# **Chapitre II**

## **Propriété tribologique**

## II.1. Introduction

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement.

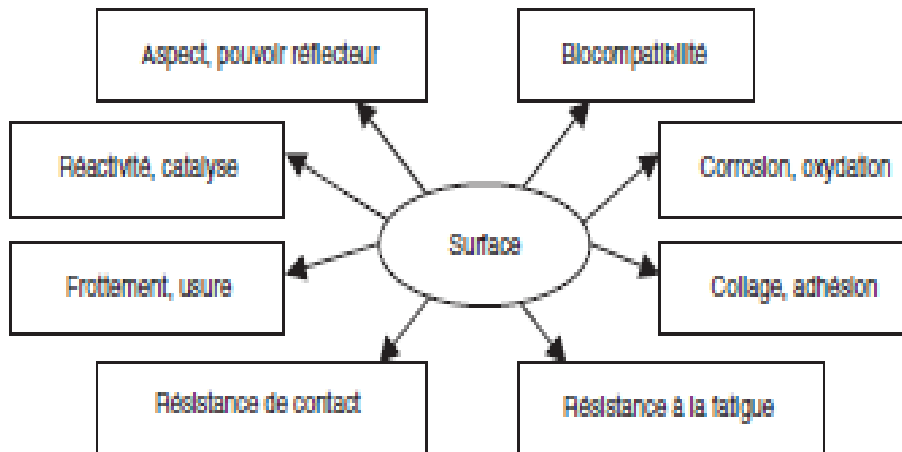
Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments interfaciaux dans un contact.

Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage).

Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure [5].

## II.2. Surface

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. Citons par exemple l'énergie superficielle : elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié au travers des phénomènes de mouillage et d'étalement [5].



**Figure II.1** – Propriétés fonctionnelles d'une surface.

La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance (figure II.2). La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Il faut aussi garder à l'esprit qu'un état poli miroir ne correspond pas forcément à la rugosité idéale des surfaces pour conférer une vie saine au système tribologique. Par exemple, dans le cas de deux matériaux frottant de dureté différente, la diminution de la rugosité du corps le plus dur est une bonne solution pour diminuer le frottement et l'usure par abrasion alors qu'une certaine rugosité du corps le moins dur facilite la rétention d'un lubrifiant et limite également le frottement et l'usure par adhésion.

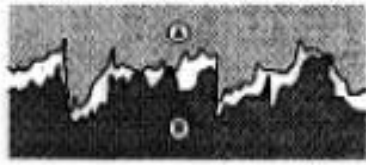
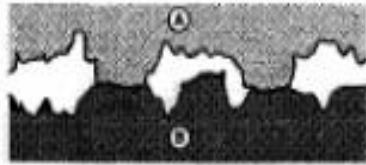
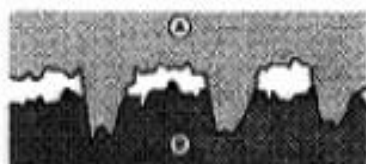

Effets		Schématisation du contact (rugosité, défauts de forme...)	Incidences prévisibles sur le frottement
Inbrication			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au déplacement</li> <li>- Déformations, ruptures... des aspérités</li> </ul>
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modification de la topographie : rugosité portance...</li> <li>- Ecrouissages</li> </ul>
	Pénétration (dureté de A > dureté de B)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au déplacement</li> <li>- Labourage de B par A</li> <li>- Transfert de B sur A</li> </ul>
Adhésion			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résistance au déplacement</li> </ul>

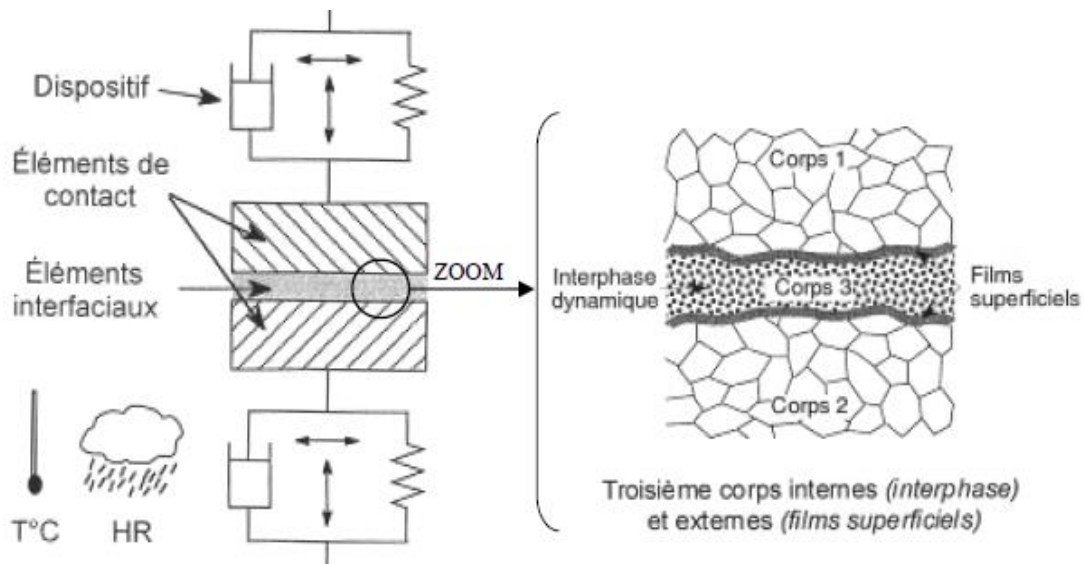
Figure II.2 - rapprochement des solides : effets et conséquences [6].

### II.3. Outils conceptuels en tribologie des interfaces

L'approche de la tribologie à travers le contact à trois corps constitue le cadre actuellement le plus général pour analyser et structurer une situation tribologique.

#### II.3.1 Le triplet tribologique et la notion de troisième corps

Le concept du triplet tribologique (mécanisme, premiers corps, troisième corps) Introduit par Godet et Berthier [5], implique la superposition de phénomènes à trois échelles différentes.



**Figure II3** - le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps [5].

Il se compose tout d'abord d'un mécanisme qui sollicite le contact et impose un chargement ( $F$ ), une cinématique ( $v$ ) et un environnement de frottement ( $HR$ ,  $T$ ). Viennent ensuite les deux premiers corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme. Le troisième corps est l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre.

Le troisième corps représente ainsi l'ensemble des éléments s'intercalant entre les deux premiers corps (figure II.3). Il est composé :

- de films superficiels (contaminants, molécules absorbées, films d'oxydes...),  
Induits par la réactivité des surfaces,
- de particules détachées (débris) s'accumulant lors du frottement, induits par les  
Processus de dégradation des surfaces [6].

L'ordre de grandeur caractéristique du troisième corps est le micromètre, alors que les écrans ont une épaisseur de quelques nanomètres. Ces derniers sont composés de dépôts artificiels ou de couches naturelles physisorbées, chimisorbées, oxydées, dépendant de l'historique de préparation des surfaces des premiers corps en contact (figures II.3 et II.5) [7].

Ainsi que les principaux aspects de tribologie généralement sont : Frottement, Usure et Lubrification.

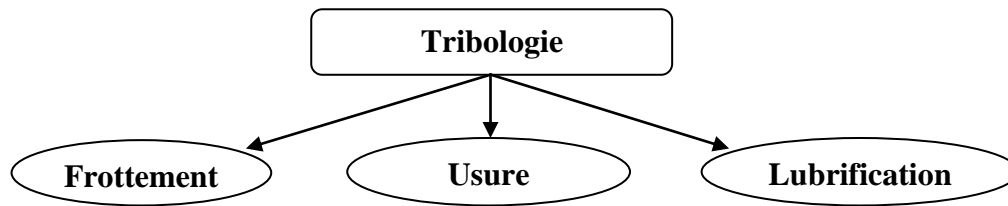


Figure II.4- les aspects de tribologie.

### II.3.2 Accommodation de vitesse

En suivant cette logique d'un système tribologique représenté par un contact à trois corps, Berthier [5], considère que l'étude du frottement et de l'usure passe par l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces. Ces mécanismes d'accommodation notés  $S_i M_j$ , sont définis par des sites  $S_i$  et des modes  $M_j$  qui indiquent respectivement le lieu d'accommodation de vitesse et la manière dont celle-ci s'effectue (figure II.5).

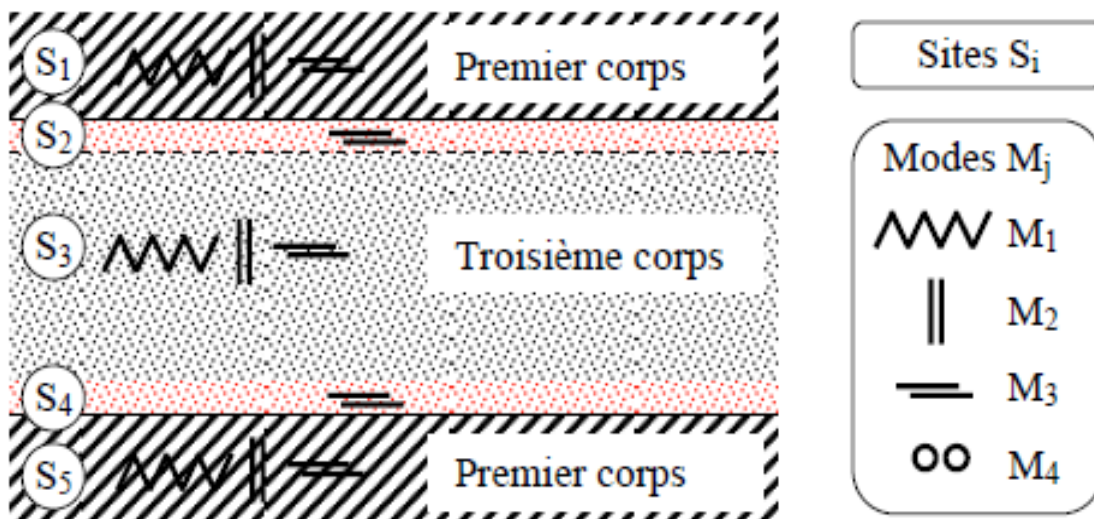


Figure II.5 - sites et modes d'accommodation [5].

Les premiers corps sont notés  $S_1$  et  $S_5$ , alors que la partie volumique du troisième corps constitue le site  $S_3$ . Cette identification introduit également la notion d'écrans notés  $S_2$  et  $S_4$  qui constituent la frontière entre premiers corps et troisième corps.

Les modes élémentaires d'accommodation sont répertoriés selon quatre types de comportements mécaniques : la déformation élastique  $M_1$ , la fissuration ou rupture normale  $M_2$ , le cisaillement  $M_3$  et le roulement  $M_4$ . Si nous définissons donc un mécanisme d'accommodation comme étant l'association d'un site et d'un mode d'accommodation, nous voyons qu'ils sont au nombre de vingt pouvant être activés en différents points de contact. Il faut garder à l'esprit le fait que tous ces mécanismes ne sont pas clairement identifiables (Modes élastiques dans le premier corps) bien qu'activés avec certitude. Ils n'aboutissent pas à la formation de débris et ne contribuent donc pas tous

à un taux d'usure correspondant à l'évacuation définitive de particules issues des débris hors du contact.

### II.3.3 Circuit tribologique

L'ensemble des détériorations de la surface et la perte de matériau donnent les caractéristiques de l'usure. Ce processus se traduit par un enchaînement d'événements liés essentiellement à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à l'établissement d'un régime stationnaire traduisant l'équilibre entre détachement et élimination des particules. Cet enchaînement demande de ne pas confondre particules détachées et particules d'usure, et est fortement influencé par la géométrie des premiers corps et la rigidité du mécanisme (« signature du tribomètre ») [5].

Le gradient de vitesse auquel sont soumis les débris qui constituent le troisième corps (Adhérent ou non après ouverture du contact) peut se traduire en termes de débits, dont les différentes composantes participent au processus d'usure défini comme le circuit tribologique de Berthier [5] (figure II.6).

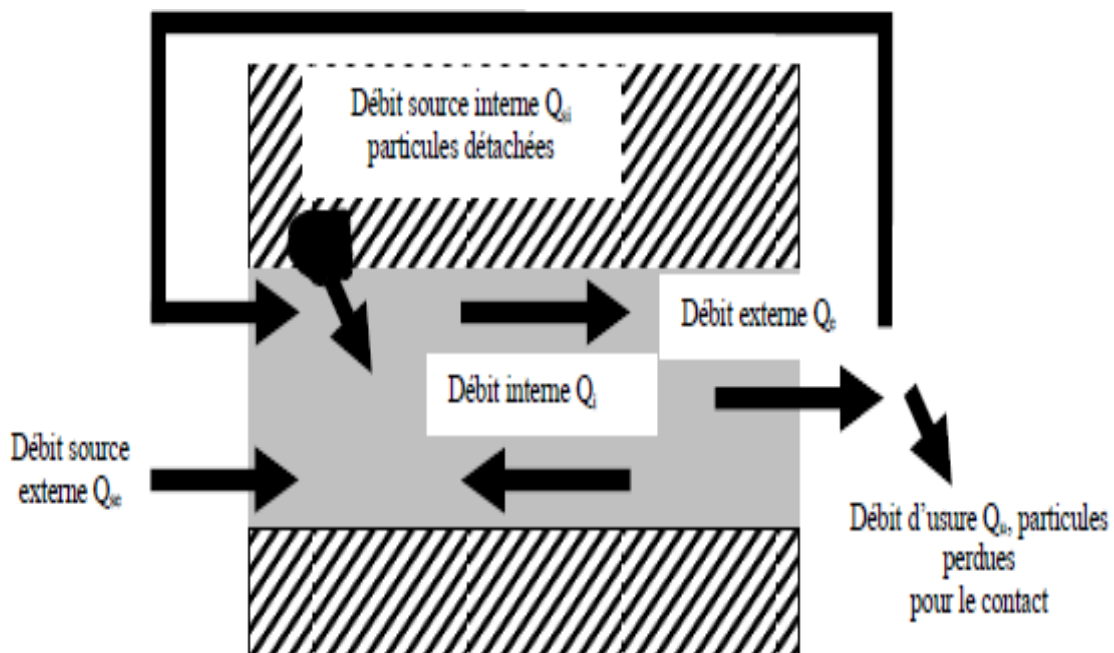


Figure II.6 - circuit tribologique de Berthier [5].

Le détachement de particules ou débit source interne ( $Q_{si}$ ) alimente le contact en troisième corps dont le mouvement se traduit par le débit interne ( $Q_i$ ). Les particules éjectées du contact constituent le débit externe ( $Q_e$ ) qui se partage à son tour en un débit de recyclage ( $Q_r$ ) qui permet la

réalimentation du contact et un débit d'usure ( $Q_u$ ) qui concerne les particules définitivement perdues par le système tribologique. Dans le cas de la lubrification liquide ou solide, il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe ( $Q_{se}$ ). Il apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé [5]. Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par  $Q_{se}=0$ , le terme de débit source ( $Q$ ) ne représente que le débit source interne. O.Dalverny [7] écrit ainsi les relations d'équilibre des débits pour différents types de circuits tribologiques (Conservation de la quantité de matière) :

$$\bullet \text{ Circuit ouvert : } \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\bullet \text{ Circuit fermé : } \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

## II.4. Dégradation des surfaces et usure

### II.4.1 Les différents types d'usure

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux et variés comme on peut le constater dans le tableau II.1. L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces [6].

Forme d'usure	Manifestation	Circonstances d'apparition
Usure par adhésion	Des particules sont transférées d'un corps sur l'autre ; si les matériaux sont de natures différentes, le transfert s'effectue préférentiellement du corps le plus tendre, ou le moins tenace, sur le corps le plus dur.	Frottement donnant lieu à des liaisons (jusqu'à la soudure) dont la résistance mécanique est supérieure à celle de l'un au moins des matériaux.
Usure par surcontraintes : -déformations plastiques -fractures, égrènements	-Modifications géométriques et dimensionnelles (en général sans perte de poids)  -Fissurations, décohésion-écaillage superficiel, émission de particules.	-Pressions moyennes élevées, ou surpressions locales, entraînant dépassement de la limite d'élasticité -Contraintes anormalement élevées par rapport aux caractéristiques mécaniques des matériaux.
Usure par fatigue des surfaces	Piqûres, cavités, pouvant intéresser des profondeurs de plusieurs dixièmes de millimètres.	Contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de chocs, ou de glissement en régime lubrifié.
Usure par abrasion-érosion	-Pertes de poids et/ou de cote -Rayures, sillons cavités... dus à des effets de coupe ou de déformation.	-Abrasion à deux corps : les rugosités, défauts de surface, labourent ou abrasent l'antagoniste ; -Abrasion à trois corps : des particules dures et pulvérulentes sont présentes à l'interface ; ces particules sont libres de se mouvoir entre les surfaces ou sont enchâssées dans l'une d'entre elles.
Usure par fretting corrosion	-Coloration des surfaces -Usure par abrasion avec perte de cote.	-Ensembles mécaniques soumis à vibrations ; -Pièces soumises à des mouvements relatifs alternés de faible amplitude.

Tableau II.1- différentes formes d'usure [6].

En réalité ces mécanismes, dits d'usure, sont des mécanismes de transformations tribologiques de surface avec ou sans détachement de particules ; et l'usure, au sens de la mécanique, se traduit par l'émission de débris hors du contact dans le respect de la conservation des débits.

#### II.4.2 Evaluation de l'usure

De nombreux auteurs [8,9] ont proposé des modèles pour décrire et évaluer l'usure. Les relations empiriques proposées se présentent sous la forme (loi d'Archard) :

$$V = K \frac{F \cdot L}{H} \quad (\text{II.3})$$

Où  $V$  est le volume de matière enlevée,  $K$  est le coefficient d'usure,  $L$  est la distance de glissement,  $F$  est la charge normale appliquée et  $H$  la dureté du matériau. Cependant, on observe quelques écarts par rapport à la relation empirique précédente, car le volume  $V$  n'est en général pas une fonction linéaire de la distance de glissement [10]. D'autre part, dans un couple frottant, la substitution d'un matériau de dureté  $H$  par un matériau ayant la même dureté ne conduit pas forcément à un volume d'usure identique. De plus, pour les matériaux fragiles, l'usure est contrôlée essentiellement par les mécanismes de rupture puisque l'enlèvement de matière se produit par l'intersection des fissures latérales ou par leur propagation jusqu'à la surface. Evans et al. [11], Moore et al. [12] ou encore Zum Gahr [13] ont établi des expressions pour déterminer le volume d'usure par rayage des matériaux fragiles sous la forme suivante :

$$V = \alpha \cdot K_c^n \cdot H^m \quad (\text{II.4})$$

Où  $\alpha$  dépend des conditions expérimentales et des caractéristiques mécaniques des matériaux, et où,  $-2 < n < -3/4$  et  $-1/2 < m < 1/2$ .

Ces relations ne font intervenir que certaines conditions de sollicitation (charge normale  $F$ , longueur glissée  $L$  ; autrement dit le produit vitesse par temps de frottement) ou encore que certaines propriétés volumiques des premiers corps (dureté  $H$ , ténacité  $K_c$ ) loin de représenter l'ensemble de paramètres prépondérants agissant dans un contact. Ces modèles ont cependant l'avantage d'introduire des grandeurs facilement identifiables et mesurables alors que l'approche par les débits de troisième corps est beaucoup plus délicate à évaluer quantitativement.

# **Chapitre III**

## **Tribologie en usinage**

### III.1. Introduction

La tribologie est le domaine de la science et de la technologie qui concerne l'interaction de surfaces en mouvement relatif. L'usure et le frottement ne sont pas des propriétés des matériaux mais des propriétés d'un système tribologique.

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps [14].

Les enjeux de la tribologie sont de plusieurs natures : assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines ou améliorer leur rendement et leur durée de vie, diminuer les bruits de fonctionnement liés aux contacts mécaniques, diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes, etc. Il est important de reconnaître le caractère pluridisciplinaire de la tribologie où le terme de couplage multi-physique prend tout son sens avec la science des matériaux, la physico-chimie des surfaces, la mécanique des solides et des surfaces, la thermique et la thermodynamique, la thermo-chimie et la thermo-métallurgie, etc. [15].

Par ailleurs, l'usinage par enlèvement de matière est une technique classique de génération de surface grâce à la combinaison de mouvements relatifs de l'outil coupant par rapport à la pièce usinée. Les interactions entre le couple outil/matière et les phénomènes physiques qui lui associées sont très complexes. C'est un processus thermomécanique fortement couplé dans lequel les déformations plastiques, la chaleur et les phénomènes de frottement jouent un rôle critique en termes d'usure [16]. Quand un outil pénètre dans une pièce métallique pour former un copeau, la matière située près de la surface est fortement cisailée. La déformation s'effectue à très grandes vitesses de déformation. Elle peut atteindre, d'après les travaux de [17, 18], 200 % avec des vitesses de déformation allant de 103 à 105 s<sup>-1</sup>. Le copeau se trouve en contact intime avec la face de coupe de l'outil dans un environnement très hostile. Outre ces phénomènes d'ordre mécanique et thermique, les interfaces **Outil / Copeau / Pièce** sont également le siège de réactions chimiques entre l'outil, la matière coupée et l'atmosphère environnante. Ceux-ci ayant lieu dans une région très petite autour de la pointe de l'outil, les phénomènes liés à la tribologie de la coupe sont très difficiles à étudier et à modéliser.

Le problème de la tribologie en usinage des métaux a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans le but de les maîtriser pour optimiser l'opération et améliorer la qualité du produit final.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une synthèse bibliographique concernant l'étude et la modélisation des phénomènes tribologiques produits durant l'opération d'usinage des métaux.

### III.2. Généralités sur la formation du copeau

L'enlèvement de matière se fait par action mécanique d'un outil coupant. Dans le cas de la coupe orthogonale en régime stationnaire, la force exercée par l'outil lors de son engagement dans la matière provoque, à l'échelle mésoscopique, une forte compression de la matière (une déformation plastique et un échauffement considérable) et engendre des zones de cisaillement entre les faces de l'outil et la matière. La compréhension de ces phénomènes n'est pas aisée parce qu'il s'agit d'un problème pluridisciplinaire (Figure III.1) faisant intervenir les sciences telles que [19] :

- La métallurgie (transformations structurales, dislocations, fissuration. . .) ;
- La thermodynamique (l'échauffement, écoulement) ;
- La tribologie (frottement, contact, usure. . .) ;
- La métrologie (dimensionnelle, macro et micro géométrique, intégrité des surfaces) ;
- La mécanique des matériaux (loi de comportements de type viscoplastique à des températures et des vitesses de déformation importantes) ;
- La mécanique des milieux continus (contraintes résiduelles, déformations, vitesse de déformation.).
- La mécanique des solides (efforts, dynamique, vibrations. . .).

Des études numériques et expérimentales ont montré que la formation de copeau se caractérise par l'apparition des quatre zones sollicitant l'outil [20] (Figure III.2).

**Zone 1** : C'est la zone de séparation en deux parties de la matière engendrée par l'arête de l'outil.

C'est dans cette zone que peut se former, si la vitesse de coupe est insuffisante, une arête rapportée. [17]

**Zone 2** : Elle est dite zone de cisaillement primaire. C'est la zone de formation du copeau : la matière change de direction et passe de la vitesse de coupe  $V_C$  à la vitesse d'écoulement du copeau  $V_{cop}$ . Elle est le siège de sollicitations intenses qui s'étendent de la pointe de l'outil jusqu'à la surface Libre du copeau et se manifeste sous forme d'importantes déformations plastiques créatrices de chaleur dont l'intensité conditionne une grande partie du flux de chaleur transmis à l'outil.

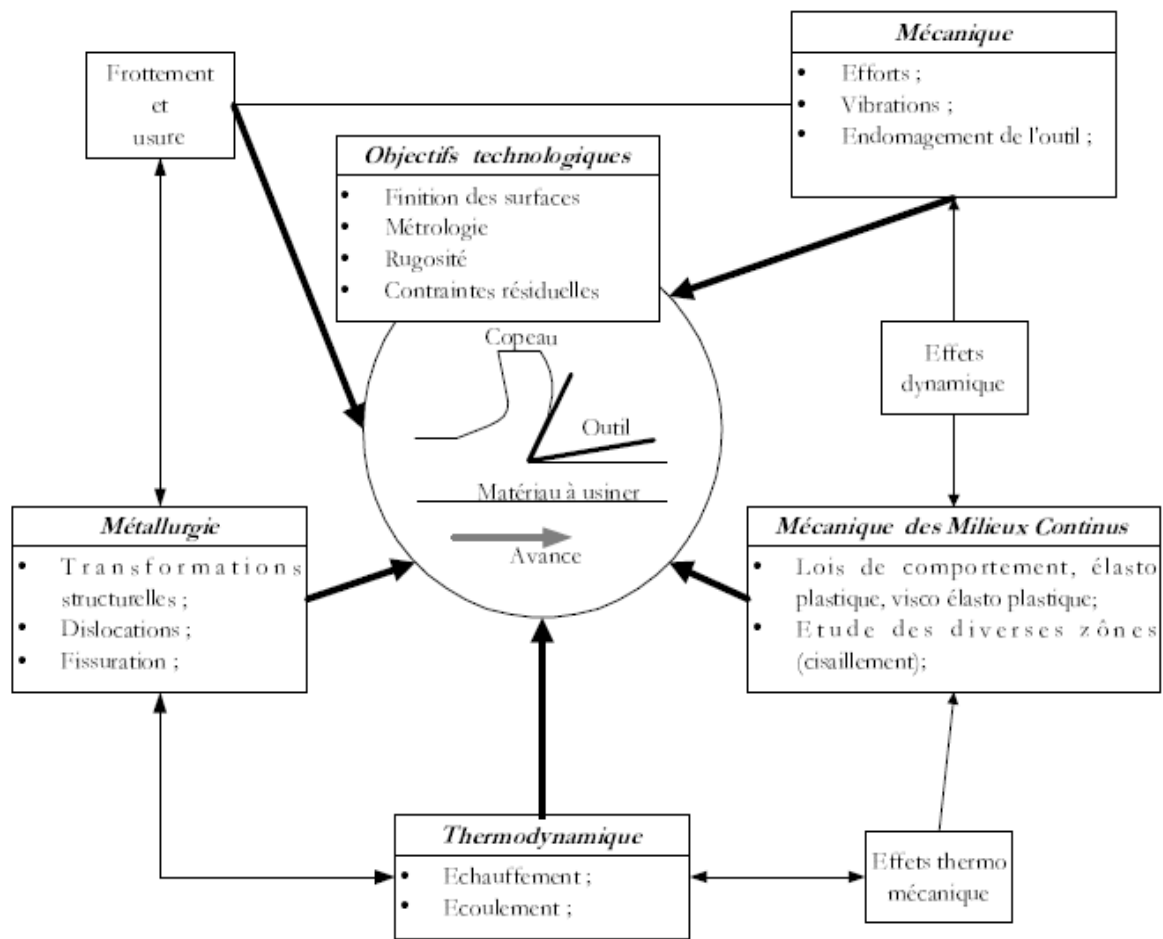


Figure III.1 - La coupe des matériaux à l'échelle mésoscopique (arête/matière) [19].

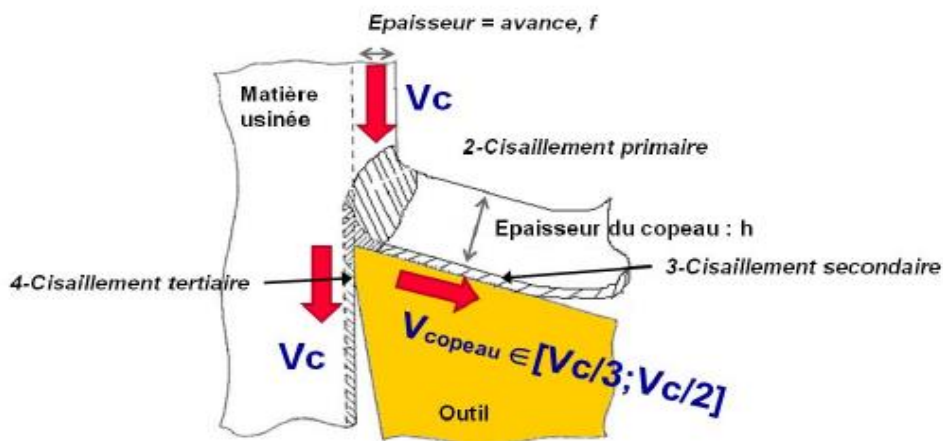


Figure III.2 - Les zones de sollicitation en coupe orthogonale.

**Zone 3** : D'un point de vue macroscopique, il doit être noté que la vitesse de frottement du copeau sur la face de coupe n'est pas égale à la vitesse de coupe. En effet, le copeau possède une section  $h$  différente de l'épaisseur initiale  $f$ . Le ratio entre les deux valeurs correspond au rapport de compression. Concrètement ce rapport est souvent compris entre 2 et 3, ce qui donne une vitesse  $V_{\text{copeau}} = V_c/3$  et  $V_c/2$ . A l'échelle microscopique, les phénomènes d'adhésion ralentissent encore d'avantage l'écoulement de la matière ce qui donne lieu à un cisaillement plastique de la matière.

Ce phénomène se dénomme 'cisaillement secondaire'. Dans cette zone, la matière est soumise à de forts taux de cisaillement et subit une forte élévation de température en plus de celle subie lors du passage dans la zone de cisaillement primaire. Cette zone donne lieu à divers phénomènes d'usure : une usure par abrasion, causée par la présence des particules dures à l'interface outil copeau, et une usure par diffusion des composés de l'outil vers le copeau qui est activée thermiquement. L'ensemble de ces deux phénomènes d'usure est responsable de l'apparition d'un cratère sur la face de coupe de l'outil [15].

**Zone 4** : Au niveau du rayon d'arête de l'outil et de sa face de dépouille, des phénomènes de frottement se produisent également. La vitesse de frottement macroscopique est ici égale à la vitesse de coupe. A l'échelle microscopique, les phénomènes d'adhésion conduisent là aussi à un cisaillement plastique important. Cette zone, dénommée 'cisaillement tertiaire'. Les phénomènes sont bien moins intenses que dans la zone 3, mais sont responsables de la qualité de la surface usinée et notamment de sa rugosité et des contraintes résiduelles.

Les contraintes mécaniques couplées avec l'élévation de la température sont des sources de plusieurs phénomènes physiques et chimiques. Ces derniers conduisent à des modifications de structures. Ces transformations dans les couches limites et les points de contact provoquent la dégradation rapide de l'outil. On note que ces phénomènes dépendent des conditions de coupe [20]. La température est gouvernée par les phénomènes tribologiques produits. L'évolution de l'usure d'un outil de coupe est liée étroitement à la distribution de la température le long de l'interface outil/copeau [19, 21, 22].

### III.3. Analyse expérimentale de la coupe

#### III.3.1 Introduction

La compréhension des différents phénomènes qui interviennent lors de l'usinage des métaux par enlèvement de la matière est complexe et pas encore maîtrisée. On distingue trois principales échelles d'étude en usinage. Une échelle macroscopique s'intéresse à l'analyse du comportement

dynamique du triplet outil/pièce/machine au cours d'une opération d'usinage. Elle englobe, la définition de la trajectoire de l'outil, la surveillance, la commande et l'adaptation de la machine.

Une échelle mésoscopique concerne généralement l'interaction entre le triplet Outil-Pièce-Copeau. A cette échelle d'observation, l'usure de l'outil, les efforts de coupe, la température, l'intégrité de la surface et la forme de copeau sont les principaux paramètres à contrôler. Une échelle microscopique traite les phénomènes physiques observés au niveau de l'arête de l'outil et copeau comme les mécanismes de transformations métallurgiques, de changement de textures cristallographiques et des contraintes résiduelles.

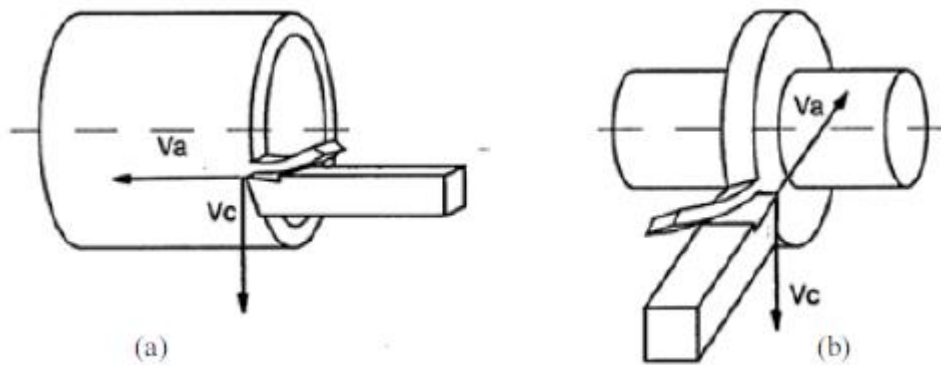
A l'échelle mésoscopique, l'analyse mécanique de la coupe se fait, en instrumentant des opérations d'usinages élémentaires tels que la coupe orthogonale, par la mesure des trois composantes de l'effort de coupe. L'aspect thermique peut être estimé en mesurant le flux thermique transmis vers l'outil et par des caméras thermiques infrarouges qui permettent d'estimer le champ de température de la zone de coupe. Pour compléter les mesures effectuées pendant la coupe, d'autres mesures sont effectuées a posteriori sur la pièce, le copeau et l'outil. L'étude de l'intégrité de surface de la pièce (rugosité, contraintes résiduelles, écrouissage...), du copeau (morphologie, transformations microstructurales). Et de l'outil (usure, dépôt métallique...) donne des indications supplémentaires sur la formation du copeau.

Toutes ces informations sont nécessaires pour remonter à l'analyse du frottement au niveau du contact entre l'outil/copeau et l'outil/pièce moyennant des études analytiques et/ou numériques.

La caractérisation du frottement dans ces zones peut être réalisée aussi en simulant ces contacts par des dispositifs tribologiques avancés [15].

### **III.3.2 Etude du frottement en usinage par des essais de coupe instrumentés**

La coupe des métaux, telle qu'elle est utilisée dans l'industrie, est très complexe à étudier. Généralement, dans une opération de chariotage, par exemple, deux arêtes de coupe sont actives. Par conséquent les zones de contact entre l'outil et la pièce sont très difficiles à limiter et dépendent généralement des conditions de coupe et aussi des paramètres de l'outil (orientation, forme, géométrie). Pour simplifier l'étude, la configuration de la coupe orthogonale est utilisée. Comme la montre la Figure III.3, une seule arête de coupe, qui est à la fois perpendiculaire à la direction de coupe et à la direction d'avance, est active [15].



**Figure III.3** - Les configurations de la coupe orthogonale. (a) usinage d'un tube (coupe semi orthogonale). (b) usinage d'un palier (coupe orthogonale).

Dans ce cas-là, la coupe orthogonale peut se ramener à un problème plan (écoulement plan de la matière) car l'épaisseur du copeau reste faible vis-à-vis de sa largeur (0.3 mm et 3 mm respectivement). Cette configuration est largement utilisée par les scientifiques puisqu'elle permet d'isoler la formation du copeau et ainsi faciliter la compréhension du phénomène et conduire à une grande simplification pour les simulations analytiques ou numériques de l'opération de coupe [15].

L'idée d'instrumenter l'outil de coupe pendant un essai de coupe orthogonale a permis d'évaluer des champs thermiques générés par la coupe aux interfaces outil/pièce/copeau et de déterminer la distribution des contraintes de contact sur les faces de l'outil. La Figure III.4 présente un exemple de dispositif de coupe orthogonale instrumenté.

Dans ce qui suit, nous présentons les différentes techniques utilisées pour l'analyse expérimentale in-situ de la coupe.

### III.3.3 Analyse mécanique de la coupe

La mesure des actions mécaniques de coupe, que ce soit type force ou type couple, se fait moyennant des plates-formes dynamométriques basées sur divers principes : pneumatique, extensomètre, piézoélectrique. Les capteurs piézo-électriques sont les plus précis et les plus pratiques. Ils délivrent une différence de potentiel proportionnelle aux charges qui leur sont appliquées. Ce signal est amplifié pour chaque voie et envoyé vers un système de traitement (Ordinateur).

Le système de mesure d'efforts doit posséder les caractéristiques suivantes [19] :

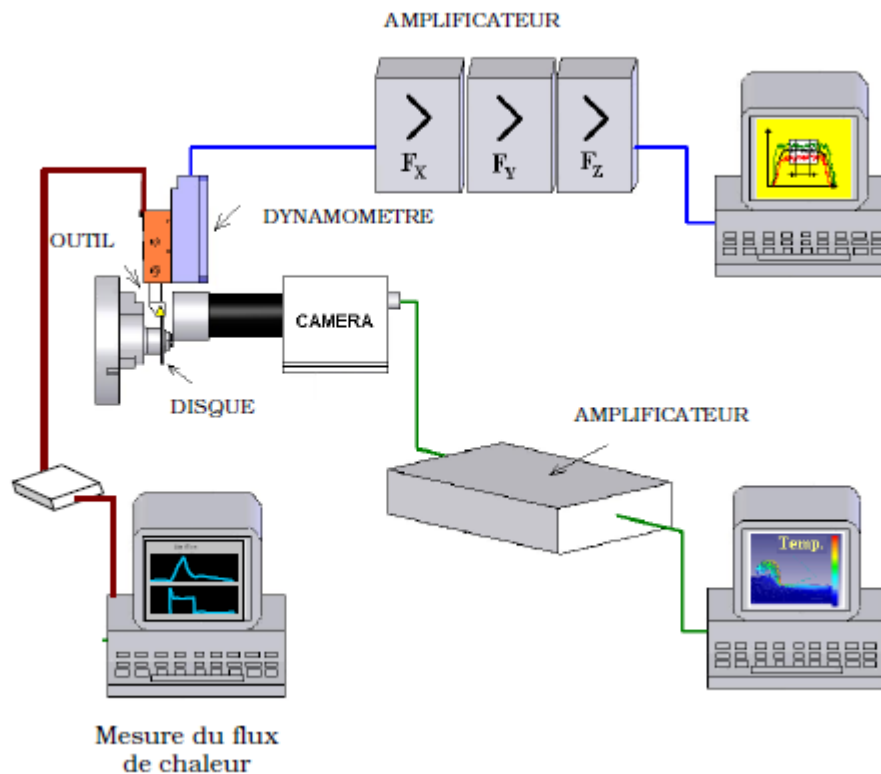


Figure III.4 - Instrumentation d'un dispositif de coupe orthogonale.

- Une rigidité très élevée évitant toute déformation pouvant changer les paramètres de coupe installés ;
- Une fidélité dans les relevés ;
- Une correction des interactions entre les voies de mesure ;
- Une possibilité de refroidissement pour éviter l'influence de la température.

La puissance de coupe  $P_c$  est une autre grandeur mécanique qui peut être mesurée au cours d'une opération d'usinage. C'est la puissance consommée par la broche pour couper le métal  $P_m$  sachant qu'il est nécessaire de soustraire les pertes à vide liées aux frottements et aux pertes électriques  $P_{à\ vide}$ .

$$P_c = P_m - P_{à\ vide} \quad (III.1)$$

### III.3.4 Analyse thermique de la coupe

La température de coupe, générée à l'interface outil - copeau, est le facteur le plus influent sur l'usinabilité des métaux [23]. En effet, l'élévation des températures de coupe entraîne d'une part une diminution de la résistance à l'abrasion des outils et active les phénomènes de diffusion des composés du substrat vers le copeau [17]. D'autre part, cette augmentation de la température est l'un des facteurs les plus influents sur l'intégrité de la surface usinée.

Alors, la connaissance et le contrôle de la température à l'interface de coupe outil/copeau a été souvent un centre d'intérêt primordial pour ceux qui s'intéressent à l'usinage. Plusieurs méthodes expérimentales sont utilisées : Des méthodes indirectes et des méthodes directes.

La mesure in-situ ou directe de la température au cours des essais de coupe se fait par l'instrumentation de l'outil par des thermocouples placés très près de la face de coupe [18, 24, 25]. Cette méthode nécessite des perçages de trous dans l'outil pour placer les thermocouples. Elle est la méthode la plus utilisée au départ vue la facilité de mise en place. Cependant, elle présente des nombreux d'inconvénients tels que, la fragilisation de la tête de l'outil lors de l'intégration des thermocouples. De plus, elle ne donne pas une cartographie de la distribution de la température des zones sollicitées. La valeur mesurée est une valeur moyenne, et étant donné que les gradients de température dans la zone de coupe sont très importants, une variation de position entraîne des différences très importantes de température. Parfois l'utilisation des thermocouples est accompagnée par d'autres traitements numériques ou analytiques pour remonter à la température à la pointe de l'outil. Cette méthode est connue sous le nom de "méthode inverse en thermique" [26].

Dernièrement, une nouvelle méthode a été mise en place par Battaglia et al. [27]. Le principe est de remonter au flux de chaleur transmis dans l'outil au cours de l'usinage à partir d'un relevé de température locale dans le porte-outil. La relation, liant le flux de chaleur traversant la face de l'outil et la température mesurée, est déterminée à partir d'une fonction de transfert thermique qui est caractéristique du couple outil/porte-outil.

Cette méthode a été utilisée essentiellement pour caractériser le comportement thermique des revêtements [28, 29, 30]. La Figure III.5 présente le principe d'identification de la fonction de transfert thermique reliant le flux traversant la face de coupe et la température du capteur).

Parmi les inconvénients de cette méthode, sa difficulté de mise en place est notable. De plus la fonction de transfert est spécifique au couple outil/porte outil, et par conséquent, une instrumentation spécifique est nécessaire. Une calibration préalable est obligatoire. Enfin l'usure de l'outil qui apporte des modifications au système, influe sur les résultats.

D'autres techniques de mesure de la température de coupe reposant sur des méthodes optiques ont été utilisées [18, 31]. L'utilisation des pyromètres optiques ou des caméras CCD-infrarouges a permis de mesurer la température de la zone de coupe sans contact avec l'outil. L'avantage de la caméra infrarouge, qui est de plus en plus employée, est sa possibilité de détecter de manière instantanée l'intensité lumineuse émise par le corps observé et par suite elle permet l'accès facile aux

gradients thermiques forts (en peau). Par contre, les pyromètres ne donnent que des informations ponctuelles.

La principale difficulté commune à ces techniques réside dans la connaissance des propriétés radiatives de l'objet considéré (émissivité) [31]. Hors, l'émissivité est un paramètre très instable puisqu'il est sensible à la rugosité de la surface mesurée, à l'oxydation éventuelle de la surface, à l'orientation de la surface par rapport à la caméra, etc...

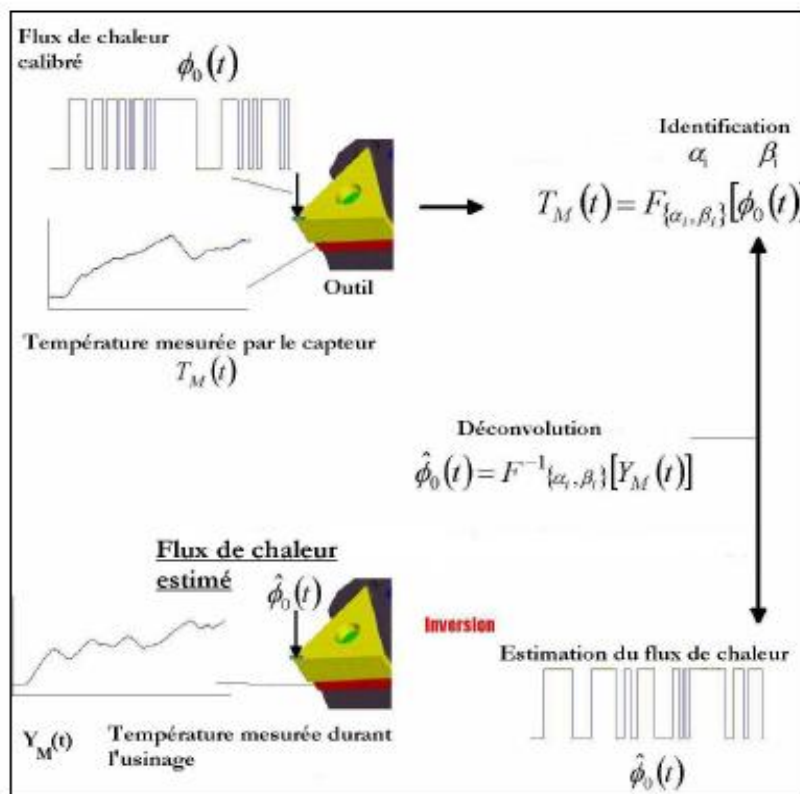


Figure III.5 - Principe d'identification de la fonction de transfert thermique [28].

### III.3.5 Essai de coupe interrompu

Actuellement, les essais de coupe brusquement interrompus, appelés aussi essais QST (Quick Stop Test) couplés avec des analyses analytiques sont très utilisés pour analyser la coupe des métaux. Cette technique consiste à éjecter l'outil de la pièce avec une vitesse supérieure à la vitesse de coupe pour garder la racine du copeau attachée à la pièce. Il est possible par la suite de visualiser, à des échelles microscopiques, l'influence des conditions de coupe sur l'écoulement de la matière et sur la morphologie du copeau. L'épaisseur de copeau, le rayon de courbure, la longueur de contact entre l'outil et le copeau sont les principales données fournies par cette méthode pour alimenter les modèles analytiques. Elle permet, également, de déterminer les phénomènes tribologiques aux interfaces outil

copeau et outil-pièce (adhésion, arêtes rapportées) [32]. La Figure III.6 présente le principe de la technique de la coupe brusquement interrompue.

### III.4. Etude du frottement en usinage par des essais tribologiques

Au cours de la coupe, l'outil subit un frottement sévère aux surfaces de contact entre le copeau et la face de coupe de l'outil et entre la surface fraîchement usinée de la pièce et la face de dépouille de l'outil. Les systèmes de la coupe orthogonale ont permis de simplifier l'étude en diminuant les Zones de contact.

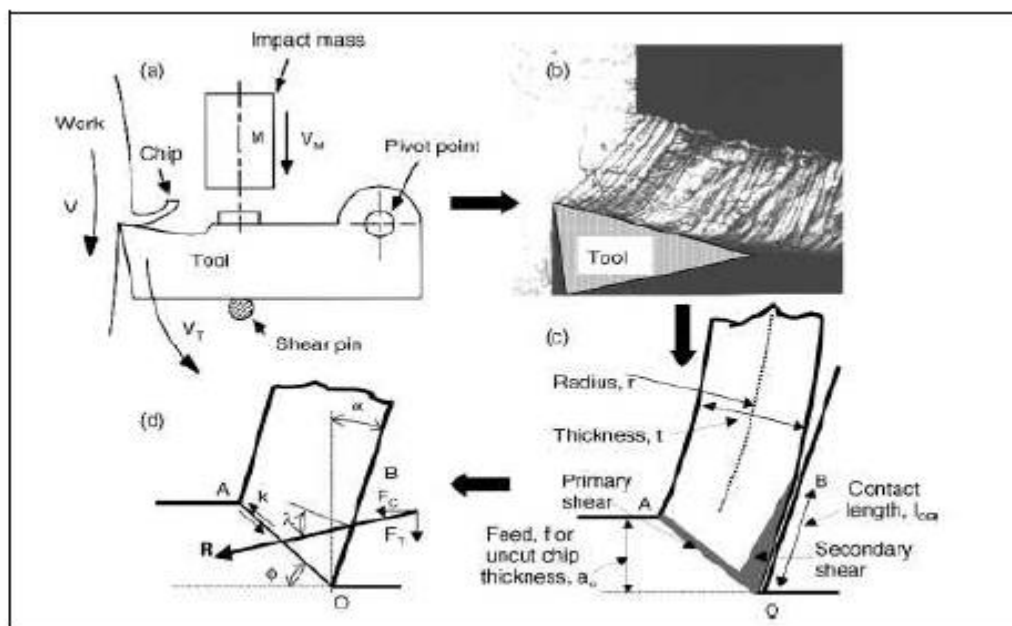


Figure III.6 - Analyse de la coupe par des essais de QST [33].

Seules deux zones sont présentées : la zone de l'interface outil/ copeau et la zone en dépouille entre l'outil et la pièce. Cette dernière est souvent négligée et la majorité s'intéresse seulement à l'autre zone alors que le contact entre l'outil et la pièce est le siège d'une usure de type abrasif à grande vitesse sur une surface chimiquement activée. De plus les résultats obtenus (efforts, températures, flux) sont produits d'une part par le frottement dans les différentes zones et d'autre part, par le cisaillement ou l'arrachement de la matière avec des vitesses de déformation très sévères.

Pour découpler ces phénomènes et étudier avec plus de précision le frottement entre l'outil et la matière usinée, obligatoirement il faut enlever l'outil et reproduire ce frottement, dans les mêmes conditions, en utilisant des dispositifs tribologiques avancés.

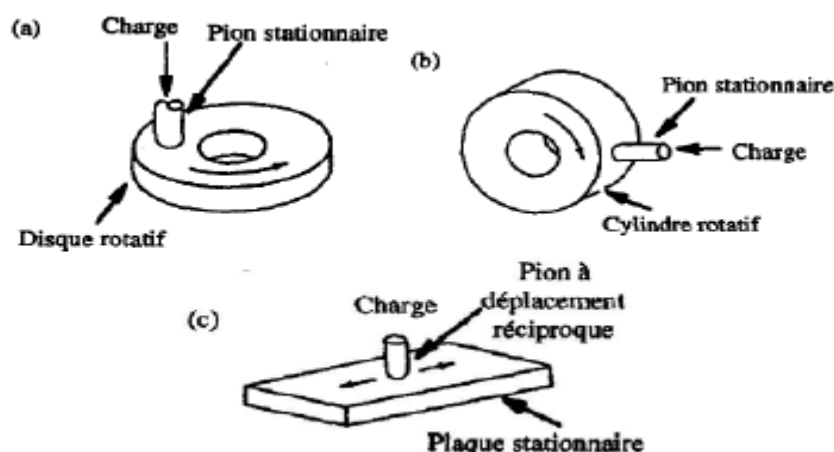
Généralement, les dispositifs tribologiques peuvent être classés en deux familles : les tribo-systèmes fermés et les tribo-systèmes ouverts. Ils sont tous basés sur le même principe : l'application d'une charge avec un pion sur le matériau à tester dans le but d'étudier le comportement tribologique du couple pion/matière (usure, mécanismes d'usure, frottement) et l'influence de l'environnement et les conditions d'essai sur le système tribologique.

#### III.4.1. Tribo-systèmes fermés

Ces types de dispositifs recyclent la surface de contact. En effet, le pion frotte sur la même piste pour tester en générale sa résistance à l'usure. Des débris issus de l'usure entraînent la formation d'un troisième corps. Donc, pour évaluer un coefficient de frottement apparent entre le pion et le disque, il est primordial de ne considérer que les mesures effectuées au début de l'essai, c'est-à-dire avant la dégradation de la surface [15].

Les dispositifs d'essai les plus répandus, dans le domaine de la tribologie, sont les essais de type "pion-disque", qui consistent en un frottement d'un pion de surface plane ou sphérique (contact plan/plan ou plan/sphère) sur un disque cylindrique, plan ou annulaire composé du matériau usiné (acier) comme l'illustre la Figure III.7.

Cette configuration ne peut pas simuler le contact lors d'une opération d'usinage, d'une part, parce que le contact entre l'outil et le copeau est renouvelé au cours de la coupe et d'autre part parce que les pressions atteintes restent très inférieures à celles rencontrées en usinage ( $< 10\text{MPa}$ ).



**Figure III.7** - Les essais tribologiques classiques : (a) pion stationnaire sur un disque rotatif. (b) pion stationnaire sur un cylindre rotatif. (c) pion à déplacement réciproque sur une plaque stationnaire [34].

Ce n'est pas une simulation raisonnable du contact entre l'outil et les débris. On note que dans ce cas, l'usinage est un tribo-système ouvert. Ce dispositif permet de réaliser des essais de frottement à des

vitesse de l'ordre de 180 m/min avec des efforts de contact relativement élevés (10 KN). Contrairement à ce dispositif, dans ce cas l'outil est en contact permanent avec une nouvelle surface "fraîche". Vu les différents inconvénients cités ci-dessus, d'autres tribo-systèmes ouverts sont développés [35].

#### III.4.2. Tribo-systèmes ouverts

Ces types de dispositifs recyclent la surface de contact. En effet, le pion frotte sur la même piste pour tester en générale sa résistance à l'usure. Des débris issus de l'usure entraînent la formation d'un troisième corps. Donc, pour évaluer un coefficient de frottement apparent entre le pion et le disque, il est primordial de ne considérer que les mesures effectuées au début de l'essai, c'est-à-dire avant la dégradation de la surface.

Ce type de dispositif, oblige le pion à frotter toujours sur une surface neuve pour surmonter les problèmes des systèmes présentés précédemment. [36, 35].

#### III.5. Les modèles de frottement en usinage

Bien que les conditions de contact en usinage soient très sévères, le frottement a été modélisé, dans la plupart des travaux, par la loi de Coulomb dont le coefficient de frottement reste toujours constant.

Cette hypothèse n'est pas réaliste d'après les travaux de Moufki [37], qui a montré la forte dépendance à la vitesse de coupe et à la température de l'interface. Le coefficient de frottement exprimé dans la loi de Moufki (III.2) est un coefficient apparent calculé à partir de la mesure des efforts de coupe qui résultent non seulement des interactions à l'interface outil-copeau, mais également des actions sur l'arrondi d'outil et des phénomènes de frottement entre la face de dépouille et la surface de la pièce.

$$\mu_{app} = \mu_0 \cdot \left( 1 - \frac{T_{int} - T_0}{T_f - T_0} \right)^\alpha \quad (III.2)$$

Avec :

$T_{int}$  : La température de l'interface

$T_f$  : La température de fusion

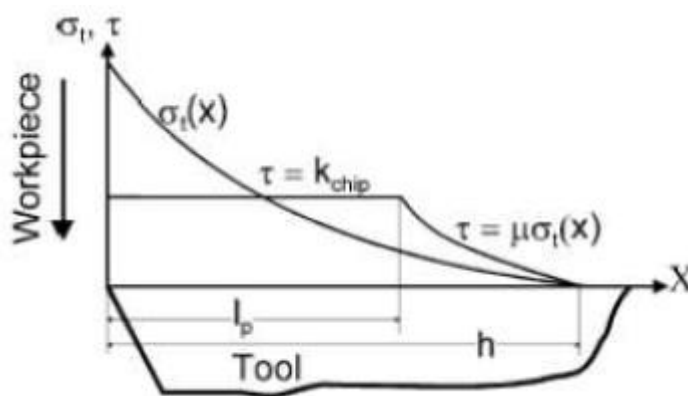
$T_0$  et  $\mu_0$  : Des valeurs de référence  $\alpha$  : Une constante

$\mu_{app}$  : Le coefficient de frottement apparent. Il est calculé à partir de la mesure des efforts de coupe lors d'un essai de coupe orthogonale

Pour une analyse plus fine de l'interaction entre l'outil et la matière en usinage, des lois locales de frottement doivent être établies. Le coefficient de frottement  $\mu$  doit être exprimé en fonction de la contrainte de cisaillement  $\tau$  et la contrainte normale à l'interface outil-copeau  $\sigma_n$ .

Plusieurs études expérimentales ont réussi à déterminer la distribution de ces contraintes à cette interface. On cite par exemple la photoélasticimétrie, qui est la technique la plus ancienne pour déterminer la distribution des contraintes dans les zones de coupe [32]. Cette méthode consiste à analyser les lignes isochrones et isoclines créées sur un outil photo élastique. Cependant cette méthode est limitée aux faibles vitesses et elle n'est pas applicable dans le cas de l'usinage des métaux.

Les résultats donnés par cette méthode [38] ont confirmé le modèle proposé par Zorev [39] dans lequel il suppose que le contact entre le copeau et la face de coupe d'un outil se subdivise en trois zones. (Figure III.8)



**Figure III.8** - Distribution des contraintes de contact le long de l'interface outil-copeau [39].

- Une première zone où le contact est de type collant ( $X < l_p$ ), conduisant à une saturation de la contrainte de cisaillement ( $\tau = K_{chip}$ )
- Une deuxième zone où le frottement est de type glissant ( $l_p < X < h$ ). Dans ce cas, la contrainte tangentielle  $\tau$  décroît proportionnellement à la contrainte normale  $\sigma_t$
- Une troisième zone où le copeau n'est plus en contact ( $X > h$ ), donc la contrainte tangentielle  $\tau$  est nulle

Les mêmes constatations ont été trouvées par la méthode de "l'outil coupé" (Figure III.9). Cette technique permet une analyse directe des contraintes de contact à l'interface outil-copeau lors d'un essai de coupe. Elle a été utilisée par Kato et al [40] et Shirakashi et al [41] lors de l'usinage du cuivre avec un outil en acier rapide et un outil en carbure P20.

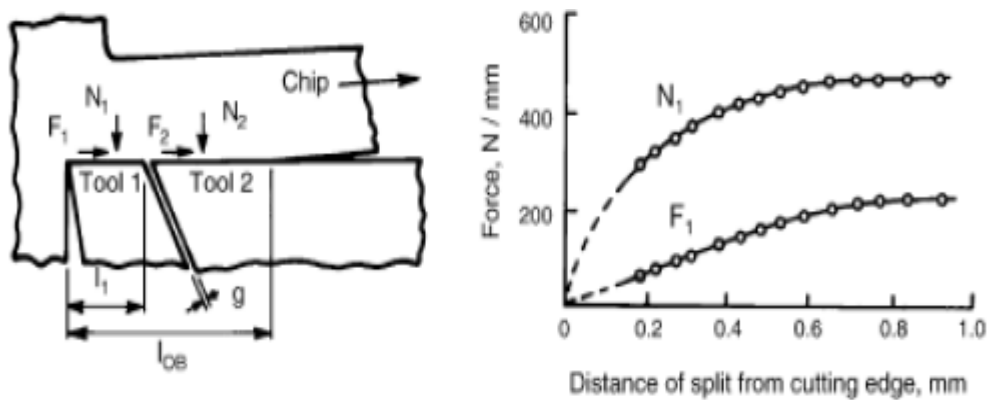


Figure III.9 - Vue schématique d'un outil coupé [33]

L'outil est fabriqué à partir de deux parties séparées par un petit jeu  $g$ . Les mesures des efforts  $F_1$  et  $N_1$ , en variant la longueur  $l_1$  par rectification de la face en dépouille de la partie 1, permettent de trouver les contraintes normales  $\sigma_n$  et les contraintes tangentielles de frottement  $\tau_{fric}$ .

Avec :

$$\sigma_n = \frac{dN_1}{dl_1} \quad (\text{III.3})$$

$$\tau_{fric} = \frac{dF_1}{dl_1} \quad (\text{III.4})$$

Les résultats obtenus par cette méthode ont montré la saturation de la contrainte tangentielle de  $\tau_{fric}$  à la valeur de la contrainte limite de cisaillement  $\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}$ .

$$\tau_{fric} = \mu\sigma_n \text{ pour } \mu\sigma_n < \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (\text{III.5})$$

$$\tau_{fric} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \text{ pour } \mu\sigma_n > \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (\text{III.6})$$

Pour se rapprocher de plus en plus des résultats expérimentaux, Shirakashi et Usui [41] ont proposé une loi de frottement non linéaire qui sera par la suite implantée dans certains codes de simulation numérique des procédés de mise en forme tel que le forgeage et l'usinage.

$$\tau_{fric} = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \left( 1 - e^{-\frac{\mu \sigma_n}{\bar{\sigma} \sqrt{3}}} \right) \quad (\text{III.7})$$

D'autres formes de loi de frottement ont été utilisées pour simuler le contact en usinage. Nous présentons dans le tableau III.1 une synthèse bibliographique sur les lois utilisées dans les codes de calcul actuels [42].

Modèle	Expression
Loi de Coulomb	$\tau_f = \mu \cdot \sigma_n$
Loi exponentielle	$\tau_f = \tau_e \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\mu \cdot \frac{\sigma_n}{\tau_e}\right) \right]$
Iwata et al. [Iwat-1984]	$\tau_f = \frac{H_v}{0.07} \cdot \tanh\left(\frac{0.07 \cdot \mu \cdot \sigma_n}{H_v}\right)$
Eldridge et al. [Eldr-1991]	$\tau_f = \tau_f(T_0) \cdot \exp\left(\frac{A}{T}\right)$
Wu et al. [Wu-1996]	$\tau_f = -\Omega \sigma_{eq}$
Sekhon et Chenot [Sekh-1993]	$\tau_f = -\alpha \cdot K \cdot   v_f  ^{p-1} \cdot v_f$

**Tab. III.1** - Les modèles de frottement utilisés pour simuler le contact en usinage.

La loi exponentielle a été développée par Shirakashi et Usui [41].  $\tau_e$  présente la contrainte Limite de cisaillement Iwata et al. [43] ont proposé une expression de la contrainte de frottement qui dépend du coefficient de frottement de Coulomb, la contrainte normale et la dureté de la pièce  $H_v$ .

Eldridge et al. [44] ont introduit la dépendance de la contrainte tangentielle de frottement à la température. Ils ont mis en évidence la chute du coefficient de frottement en fonction de la température.  $\tau_f(T_0)$  est la contrainte tangentielle à la température ambiante  $T_0$  et  $A$  est une constante.

Wu et al. [45] ont montré que la contrainte de frottement  $\tau_f$  est directement proportionnelle à la contrainte équivalente  $\sigma_{eq}$ .

Sekhon et Chenot [46] ont adopté la loi de frottement de Norton qui suppose que la contrainte de frottement est proportionnelle à la vitesse de glissement relative entre le copeau et l'outil.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, la formation du copeau ainsi que les phénomènes tribologiques qui entrent en jeu dans les différentes zones de coupe lors d'une opération d'usinage ont été brièvement rappelés. La chose la plus importante qu'on puisse retenir de cette étude est que les grandeurs thermomécaniques au niveau des interfaces Outil/Pièce/Copeau jouent un rôle primordial sur l'usure de l'outil (température, pression de contact, vitesse de glissement. . .). Dans ce contexte, plusieurs études numériques et expérimentales se sont intéressées à la détermination de la température et de la distribution des contraintes de contact sur la face de coupe de l'outil, qui est la plus sollicitée, dans le but d'optimiser l'opération.

Nous avons présenté deux moyens expérimentaux utilisés pour analyser la coupe des métaux : le premier, qui est le plus utilisé, consiste à instrumenter les opérations d'usinage élémentaires telle que la coupe orthogonale afin d'avoir des informations sur les efforts de coupe, la température à l'interface, le flux de chaleur, la morphologie des copeaux... l'autre méthode consiste à utiliser des dispositifs tribologiques avancés capables de simuler le contact produit dans ces zones.

Dans ce qui suit, Nous allons présenter notre approche expérimentale pour caractériser le frottement aux interfaces outil/pièce/copeau lors d'une opération d'usinage.

# **Chapitre IV**

## **Tribologie par abrasion**

### **IV.1. Principe et possibilités technologiques des méthodes du traitement abrasif libre**

Le développement de la production moderne a met des tâches pour accroître la productivité et la qualité des produits dans diverses industries. Dans l'ingénierie, l'un des moyens pour atteindre ces objectifs de plus en plus largement utilisé est le traitement avec des outils abrasifs. Le traitement assure l'exactitude et la qualité des pièces à haute performance, haute fiabilité et longévité des machines, de sorte que le volume et le rôle des opérations du traitement dans l'ingénierie moderne ne cesse d'augmenter. Le développement et la mise en œuvre de nouveaux procédés technologiques du traitement subordonnée au but général de continuer à améliorer la qualité des produits, tout en assurant une grande efficacité.

Selon le type de l'outil coupant, les méthodes connues du traitement peuvent être classées en traitement abrasif fixe (meulage, honing (pierrage), etc.), traitement abrasif libre (traitement vibratoire (TVi), traitement abrasive au tonneau (TAT), traitement centrifuge rotatif (TCR), traitement à jet d'abrasif (TJA), traitement turbo-abrasif (TTA), traitement avec abrasif libre condensé par des forces d'inerties (TALCFI), traitement abrasif magnétique (TAM), et ainsi de suite) [47].

Les méthodes les plus répandues sont le traitement abrasif fixe, fournissant de hautes performances et de précision géométrique des pièces, à faible rugosité de surface et une possibilité de traiter des matériaux très durs. Cependant, ces traitements ont un certain nombre d'inconvénients. Généralement sont utilisés pour le traitement des surfaces planes ou de révolution.

Le caractère dynamique de l'impact des grains amène à l'apparition des sursauts de températures, qui s'aggravent par la friction de la liasse sur la pièce et réduit les propriétés mécano-physiques, aux transformations structurelles indésirables (brûlure), etc. Cependant, 80 % du travail mécanique dépensé sur le procédé de meulage est convertie en chaleur. Le manque d'espace pour la collecte et l'enlèvement de copeaux de la zone de coupe, provoque un encrassement de l'abrasif, une réduction de l'efficacité de meulage qui est une source supplémentaire de l'augmentation de température. Résultat nécessitant une correction périodique du cercle à meule qui conduit à une consommation accrue de produits abrasifs [48].

Les procédés du traitement abrasifs fixes ont été suffisamment étudiés. La volonté de réduire les coûts du traitement ainsi que de séparer l'outil coupant du porte-outil, de la broche et de la machine (pour traiter des surfaces de formes complexes) a conduit à la création de nouvelles méthodes de traitement - traitement abrasifs libres, dans lequel l'outil n'a pas de lien mécanique avec la machine.

Durant le traitement abrasif libre, les grains utilisent pleinement leur capacité de coupe, car il y a une répartition égale de leurs arêtes coupantes relativement aux surfaces usinées, ainsi que la réorientation et le déplacement pendant le traitement. Telles procédés permettent, comparativement avec des simples schémas cinématiques de l'équipement, de traiter des pièces de configuration complexe de matériaux différents. Considérablement la température du procédé est réduite, puisque la vitesse de coupe est inférieure à la vitesse au meulage, et les zones de micro coupe se lavées abondamment avec une solution technologique (ST). Cela permet de recevoir une haute qualité de surface sans traces de brûlures, sans fissures et sans changements structurels indésirables. Le traitement peut subir des pièces de dimensions très variables, allant de quelques millimètres à quelques mètres.

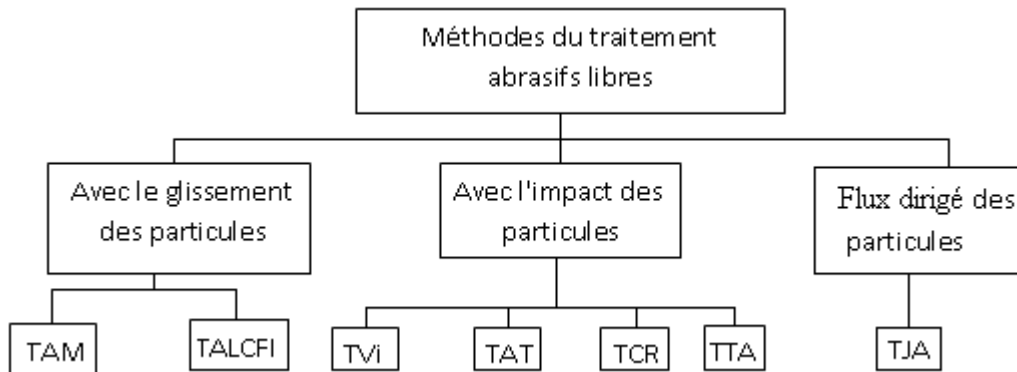
Larges possibilités technologiques de traitement abrasifs libres permettent de réaliser les opérations de meulage, polissage, ébavurage et flash, arrondissement des arêtes vives, durcissement et revêtement, ainsi que de produire des traitements combinés avec différents types d'énergie supplémentaire (chimiques, électriques, magnétiques, thermiques, etc.) [49].

## **IV.2. Classification des traitements abrasifs libres**

L'analyse préliminaire de la littérature et de l'expérience industrielle permet de faire une conclusion que des traitements abrasifs peuvent être unis en un seul groupe, et en vertu de l'approche commune de la nature de l'interaction entre les particules abrasives et la surface traitée créer une théorie généralisée du traitement abrasifs libres. La tâche de la recherche sera de découvrir la nature de découpage à l'abrasif libre, déduire les régularités générales et être en mesure de prévoir à l'avance les résultats du traitement.

Afin de systématiser les recherches menées et de généraliser leurs résultats ainsi que réussir l'application pratique des régularités, il est nécessaire d'élaborer une classification des méthodes de traitement abrasifs libres. De larges possibilités technologiques et un grand nombre de paramètres de processus permettent de classer les méthodes présentées pour plusieurs raisons : type du milieu abrasif, nécessité de fixation des pièces, mouvement principal, nombre d'éléments traités simultanément, caractère d'influence de l'outil, direction des traces du traitement. Sur la base de l'analyse des travaux dans le domaine du traitement abrasif ainsi que dans des domaines contigus, tels que la théorie de découpage théorie de la friction et l'usure, et d'autres, la classification était basée sur

le caractère de l'influence des particules abrasives sur la surface de la pièce traitée (glissement, impact, direction de l'écoulement) [50]. La classification est présentée dans la figure IV.1.



**Figure. IV.1** - Classification des méthodes du traitement abrasif libre selon le caractère de l'influence de la particule abrasive.

De toute évidence, l'essence physique le plus proche est les procédés unis en sous-groupe des effets de l'impact des particules, juste après on trouve les procédés qui adhèrent les opérations d'influence de flux dirigé des particules et avec quelques différences le sous-groupe de glissement des particules.

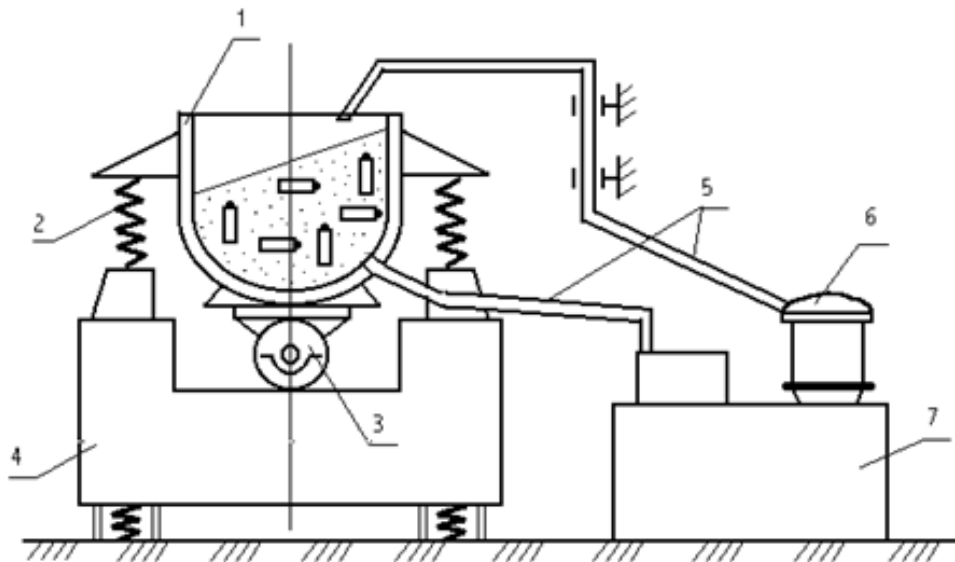
Les méthodes du traitement abrasif libre sont élaborées relativement et récemment et sont moins étudiées que les méthodes du traitement abrasif fixe. Les bases théoriques ne sont pas élaborées pour toutes les méthodes et les normes de sélection des modes de traitement sont pratiquement absentes. Les documents référentiels ne sont pas rassemblés en une seule unité, aucune tentative pour créer une théorie généralisée du traitement abrasif libre. Cela ne permet pas de passer à l'optimisation des paramètres technologiques et à l'automatisation de la conception des processus de fabrication.

Pour résoudre du problème scientifique complexe d'optimisation de la conception technologique du traitement abrasif libre il est nécessaire d'analyser les particularités physico-technologiques des méthodes examinées. Ce pendant les particularités et les régularités générales permettront de créer des conditions d'élaboration pour une théorie commune, et les particularités individuelles permettront d'élaborer une méthodologie de sélectionner la méthode concrète du procédé de traitement.

#### IV.2.1. Traitement Vibratoire (TVi)

La méthode la plus répandue du traitement abrasif libre est le Traitement Vibratoire (TVi). Traitement vibratoire en fonction du caractère du milieu de travail appliqué représente un procédé

mécanique ou chimico-mécanique d'enlèvement de fines particules de métal et d'oxyde de la surface traitée, ainsi que l'effacement des micro-irrégularités dû à leur déformation plastique par le milieu du travail se produisant durant le procédé un mouvement oscillatoire [51].



**Figure.IV.2** - Schéma du procédé de traitement vibratoire : 1 - chambre de travail; 2 - ressorts; 3 - vibreur excentrique déséquilibré; 4 - fondement; 5 - tuyaux d'alimentation et de vidange du ST; 6 - pompe; 7 - réservoir-décanteur

Les pièces sont chargées dans la chambre de travail remplie par un milieu de travail avec des caractéristiques demandées. La chambre de travail établie sur une suspension élastique peut vibrer dans diverses directions (Fig.IV.2).

Bloc d'entraînement de la chambre de travail reçoit du vibreur d'inertie une fréquence allant jusqu'à 50 Hz une amplitude de 0,5 à 6 - 8 mm. Au cours de traitement les pièces et le milieu du travail se déplacent relativement, faisant deux types de mouvements : fluctuations et rotation lente de toute la masse de la charge (mouvement circulaire). Depuis les murs de la chambre, les vibrations se transmettent aux couches adjacentes du milieu de travail, qui les communiquent aux couches suivantes, etc. Ce pendant les pièces occupent diverses positions dans le milieu de travail, qui prévoit un traitement assez uniforme de toutes les surfaces.

Un grand nombre de micro-coups agissant sur la pièce traitée simultanément dans de diverses directions, contribue dans un certain degré à sa rétention dans un état d'équilibre, excepté des grossières entailles et des endommagements. Cela permet de traiter des pièces de faible rigidité. Suite à la circulation le traitement se produit dans toutes les zones de la chambre et il est plus effectif près du fond de la chambre où la pression du milieu est plus haute.

La plupart des opérations de TVi est effectuées avec une présentation continue ou périodique d'une solution technologique (ST). ST assure l'éloignement des produits de l'usure (particules métalliques et abrasifs) de la surface des pièces et des particules (granules) du milieu de travail, elle lave les pièces et le milieu, contribue à leur séparation, avec une distribution égale des pièces dans le milieu et au refroidissement de ces pièces. Les structures des machines vibratoires permettent d'utiliser différentes combinaisons des composants du milieu (solides, liquides et mélanges), cela crée des conditions de déroulement des procédés chimiques et électrochimiques. TVi se produit dans une activité relativement élevée de la surface traitée, en conséquence le nettoyage de ses oxydes, ses contaminations et l'application de ST appropriée.

Le volume de la chambre peut changer de  $0,1 \text{ dm}^3$  jusqu'à quelques  $\text{m}^3$ , qui permet de traiter des diverses pièces de différentes dimensions (aiguilles des soupapes à l'aile d'avion) [52].

Durant le traitement se forment de bonnes conditions pour l'éloignement du copeau et du schlamm (saleté), pénétrant librement entre les particules du milieu et les ST emportées à travers des trappes perforées au réservoir-décanteur.

Les principaux facteurs technologiques sont l'amplitude et la fréquence de vibration, les caractéristiques du milieu de travail, les matériaux utilisés et le temps du traitement.

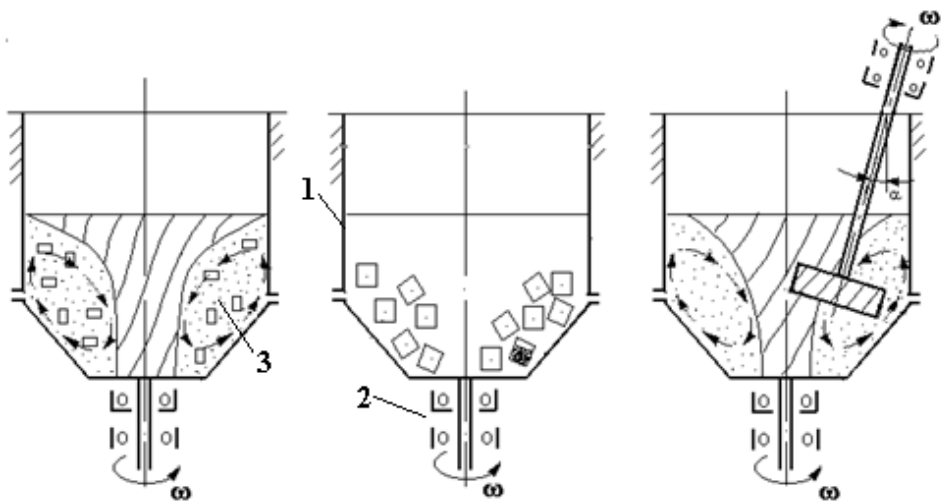
Les particularités de TVi - traitement simultané d'une grande quantité de pièces sans fixation, possibilité du traitement des pièces de différentes dimensions, possibilité du traitement des pièces de faible rigidité.

Le traitement s'effectué principalement dans la limite du profil de la rugosité initiale, c'est-à-dire se présente « sans dimension », néanmoins, si nécessaire, d'enlever la couche défectueuse (après le moulage, estampage, emboutissage, etc.), on peut retirer une grande surépaisseur en augmentant le temps du TVi.

#### **IV.2.2. Traitement Centrifuge Rotatif (TCR)**

Le procédé de traitement de volume centrifuge rotatif (TCR) est défini par le milieu granulaire (MG) et les pièces qui se déplacent avec un mouvement giratoire autour de l'axe vertical de façon à acquérir une forme de tore, dans lequel les granules se déplacent selon un trajet hélicoïdal. Le schéma du procédé est présenté dans la figure IV.3 flux toroïdal 3 est assuré par la conception de la chambre

de travail (CT), composé d'une virole immobile 1 et d'un rotor tournant adjacent 2 ayant généralement une forme d'une assiette.



**Figure.IV.3** - Schéma de procédé de traitement centrifuge rotatif : 1 - virole immobile ; 2 - rotor tournant ; 3 - flux toroïdal de granules et de pièces.

Les pièces sont chargées dans la CT "en vrac," et elles se déplacent ensemble avec le MT. L'enlèvement du métal est effectué au dépend du déplacement relatif et de l'interaction des granules abrasifs avec des pièces mouillées par un ST présenté en continu dans la CT. Ainsi, des pièces de différentes formes géométriques ayant une rigidité suffisante peuvent être traitées pour ne pas se déformer dans le flux toroïdal. TCR est aussi « sans dimension » [53].

TCR permet de recevoir une haute intensité du traitement aux frais de grandes vitesses du déplacement des composants du flux toroïdal. Le déplacement libre et la circulation des pièces au flux contribuent à leur traitement uniforme. ST assure l'éloignement du copeau et du schlamm (saleté) de la surface des pièces et des particules du MT, il les mouille et contribue au refroidissement des pièces.

L'intensité du TCR dépend de la vitesse de la rotation de rotor et de la durée du traitement, des caractéristiques de la granulométrie de MT, du volume de la CT, des propriétés mécaniques du matériau des pièces usinées, etc.

La conception de machines pour TCR permet d'appliquer aussi bien différentes combinaisons de composants solides et liquides ainsi que de créer des conditions pour le déroulement des procédés chimiques et électrochimiques.

Les particularités TCR : une haute intensité du traitement, une usure accrue de MT, traitement simultané d'une partie de pièces, traitement de pièces de petite taille, possibilité de déformation des pièces de petite rigidité.

### IV.2.3. Traitement à Jet Abrasif (TJA)

Mode de traitement à jet abrasif (TJA) consiste en l'utilisation de l'effet d'impact du matériau des particules sur le matériau de la surface traitée. La représentation physique du procédé est similaire à l'usure des matériaux, se trouvant sous l'effet du flux des particules. Cependant, à l'exception de l'enlèvement du métal à partir de la surface, on observe son durcissement et un changement de sa micro-géométrie, et dans les couches superficielles fines apparaissent des contraintes résiduelles de compression [54].

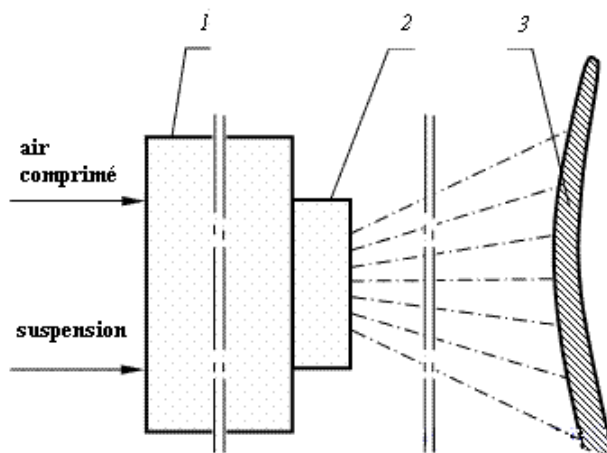


Figure. IV.4 - Schéma de principe du TJA : 1 - dispositif à jet, 2 - buse, 3 - pièce

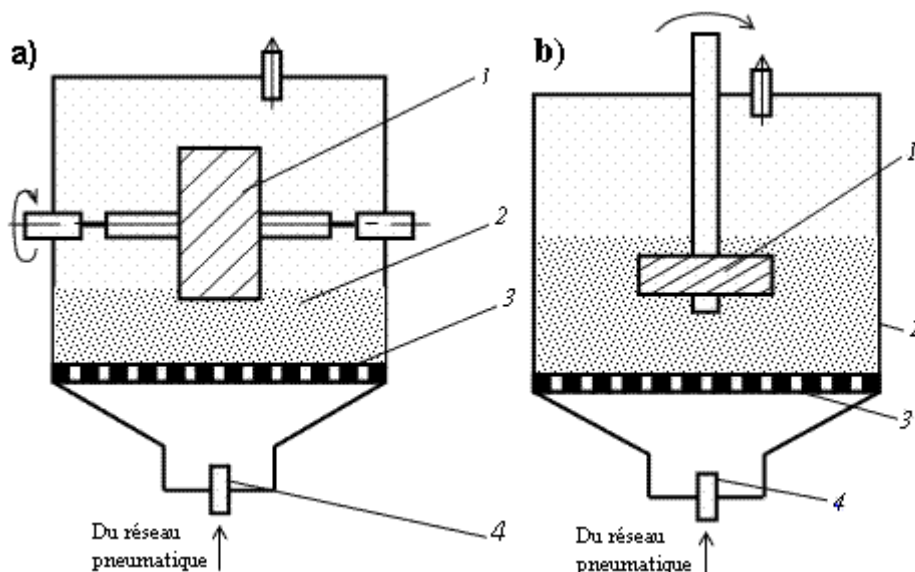
Les particules abrasives mélangé avec une solution et un adjuvant anticorrosion entrent dans l'appareil à jet 1, où au moyen d'une énergie de l'air comprimé sont dispersés à une vitesse de 100 à 200 m/s et pulvérisés via la buse 2 en forme d'un jet. Le jet se dirige vers la pièce 3 et il la traite par l'impact sur la surface. Les principaux facteurs technologiques influençant sur les résultats du traitement sont : pression de l'air comprimé, type de grains abrasifs et sa granulation, concentration et la composition de la suspension, angle d'attaque du jet, longueur du jet et le temps du traitement.

Sur l'efficacité du procédé influe la conception de l'appareil à jet. La productivité du TJA et la qualité de surface traitée dépendent des facteurs indiqués ci-dessus, ainsi que de l'état initial de la pièce (micro-géométrie, propriétés mécaniques). Le traitement est aussi "sans dimension".

Les particularités TJA - traitement d'une ou plusieurs pièces fixées, nécessité de déplacer la buse le long des pièces, traitement des pièces de différentes dimensions, nécessité de dispositif pour recueillir et retourner les particules à appareil TJA [55].

#### IV.2.4. Traitement Turbo-Abrasif (TTA)

Procédé de traitement turbo-abrasive (TTA) est fondé sur l'utilisation de la technique de la fluidification des matériaux pulvérulents et il consiste en la création d'une couche d'abrasif fluide (pulvérulente), dans laquelle on met la pièce à usiner, en donnant en fonction de sa forme, différents types de mouvement [56].



**Figure.IV.5** - Schéma de principe du TTA: a) - rotation des pièces dans un plan vertical, b) – rotation des pièces dans un plan horizontal, 1- pièce, 2 - grain abrasif, 3 - réseau de distribution 4 - écoulement d'air

Dans un récipient de forme cylindrique ou rectangulaire, dont le fond est une grille spéciale de distribution de gaz 3, on entasse une couche de grains abrasifs 2, puis traverse la grille distributive servant à l'écoulement d'air ascendant 4. Avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement d'air, les particules commencent à faire des déplacements de pulsation dans les directions verticale et horizontale, en se mélangeant intensément, grâce à la turbulence de l'écoulement d'air. Lors de la

collision, les particules reçoivent une rotation, ce qui est la cause de l'apparition de la force transversale déplaçant le grain perpendiculairement à la direction d'écoulement de l'air, et étant la source du mouvement chaotique des particules dans la couche. La vitesse critique de la fluidification à laquelle la couche se remet en suspension est une caractéristique importante de la couche fluidisée. Dans telle couche de grains abrasifs on peut mettre des pièces de n'importe quelle configuration 1 et lors de la collision des grains avec la surface de la pièce, l'enlèvement de métal sera atteint par micro-coupe ou rupture par fatigue. La petite vitesse des grains dans la couche fluidisée (environ 0,1-1 m/s) et la faible force de collision déterminent le caractère cryogénique du procédé, et le grand nombre de collisions avec chaque partie de la surface de la pièce afin d'obtenir un microrelief de surface uniforme. Cependant, avec une pièce immobile, immergé dans la couche, la productivité du traitement est très petite, un tel procédé est économiquement inefficace.

L'augmentation significative de la productivité est atteinte par voie de communication à la pièce d'un mouvement, rotationnel ou vibratoire, et en outre le dernier est moins efficace car sa vitesse est limitée par les forces d'inertie (15 - 20 m/min).

Les principaux facteurs influençant sur la productivité de TTA sont : la vitesse de rotation de la pièce, la vitesse d'écoulement d'air, le type et la granulation du milieu abrasive (MA), les propriétés mécaniques du matériau de la pièce. La surface traitée après TTA a un microrelief cratériforme comprenant une grande quantité des éraflures courtes, ce qui crée une surface mate. La précision dimensionnelle et la forme des pièces ne peuvent être soulevées de manière dirigée, à cause de l'outil assez rigide, ayant une forme définie. Il faut arrondir obligatoirement les arêtes vives lors du traitement TTA, qui dans certains cas peut être considéré comme un facteur positif.

Les particularités TTA :

- Le traitement d'une ou plusieurs pièces,
- La nécessité de fixation et de rotation des pièces,
- Le traitement des pièces de petite dimension,
- La nécessité de prévention d'envolement des particules abrasives dans l'atmosphère.

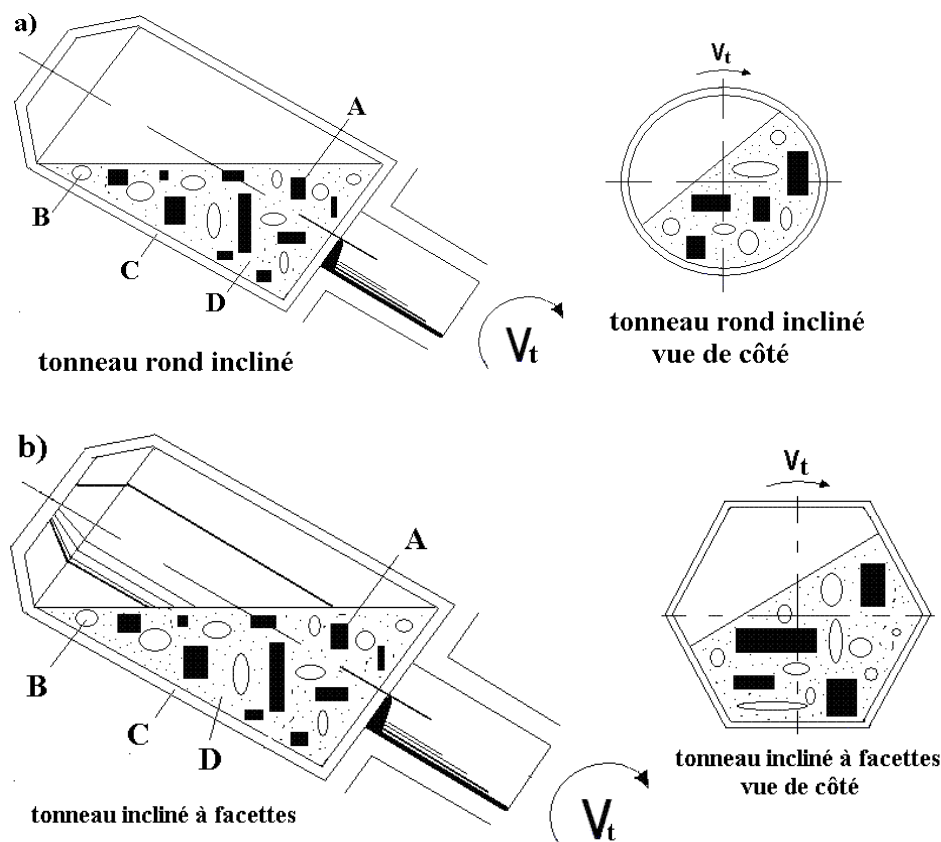
### IV.2.5. Traitement au tonneau (Tumbling process)

Avec les méthodes du traitement au tonneau (Tumbling process) [50] on peut effectuer des opérations de polissage, meulage sans dimension (extensible), de durcissement, d'ébarbage et de nettoyage.

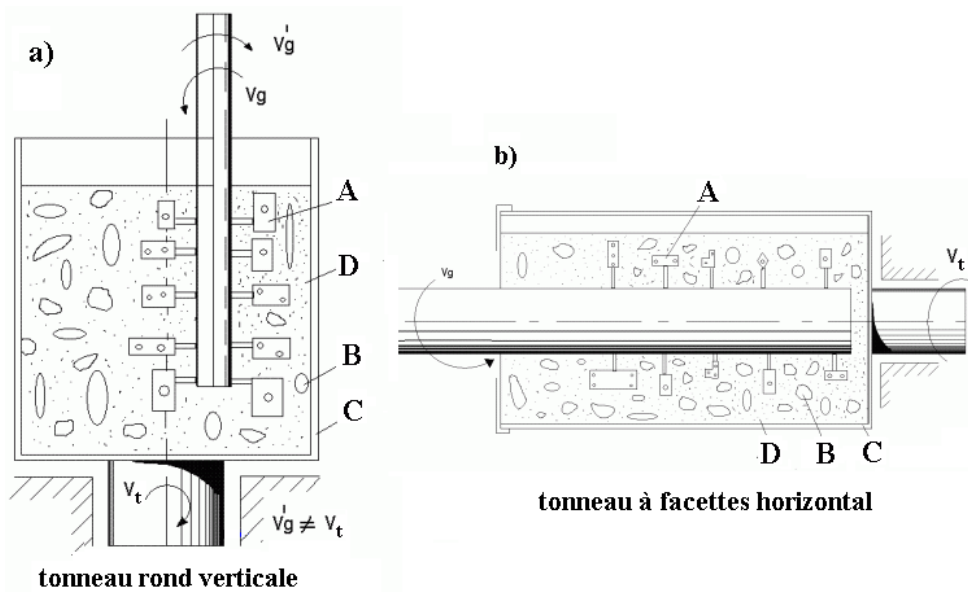
Durant le procédé suite à l'interaction de la masse (matière) de remplissage et les pièces chargées dans le tonneau et lors de sa rotation se passe une collision, glissement et micro-coupe des surfaces des pièces, en conséquence l'enlèvement de la matière. Les forces de pression des pièces sur les particules de la charge sont faibles, alors l'élimination des métaux est également faible, c'est pourquoi les opérations au tonneau sont longues et continuent de 5 à 100 heures [57].

Les schémas du traitement sont variés, en fonction des tonneaux ; ronds ou à facettes rotatifs autour d'un axe vertical, horizontal ou incliné (Fig.IV.6, IV.7).

Dans des tonneaux ronds et à facettes parfois il y a des petites nervures transversales qui améliorent le mélange de pièces afin d'intensifier le procédé du traitement.



**Figure.IV.6** - Schémas du traitement au tonneau : a - dans un tonneau rond incliné, b - dans un tonneau incliné à facettes, C- tonneau, A- pièce, D- milieu liquide, B - milieu granulaire



**Figure IV.7-** Schémas du traitement au tonneau : a) - dans un tonneau rond vertical avec des pièces fixes rotatives, b) - dans un tonneau à facette horizontale avec des pièces fixes rotatives

Les pièces sont généralement chargées dans le tonneau en vrac. Pour l'intensification du procédé de traitement parfois on fixe les pièces sur un axe séparé et on leur communique une rotation supplémentaire.

En qualité d'outil-coupant on applique plusieurs sont différents :

- Pour le nettoyage et le décapage des pièces on utilise ; des déchets abrasifs, des granules abrasifs, des masses de remplissage métallique et non métallique etc.,
- Pour le polissage sans dimension (extensible) ; un milieu granulaires abrasifs avec une liasse céramiques ou vulcanite, quartzite, etc.,
- Pour des pièces à polir ; grain abrasif, poudres et micro-poudres à partir de M10 à M50, boules en bois, macérâtes de maïs, restes du cuir, des fibres et des billes en acier d'un diamètre de 0,4 à 0,9 mm, etc.

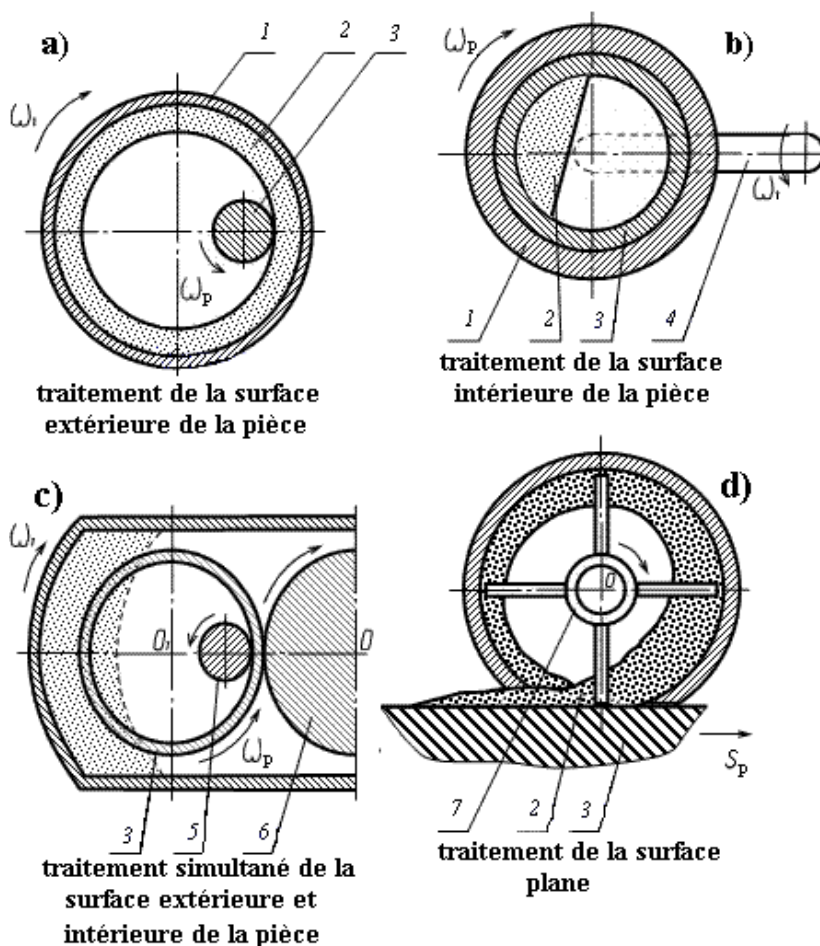
Sur la productivité et la qualité des surfaces polies influent : le volume total de la masse chargée dans le tonneau et son rapport avec les pièces usinées, matériaux abrasifs et non abrasifs, composition des solutions technologiques et les caractéristiques de la masse de remplissage non abrasifs.

Avantages de la méthode - possibilité du traitement des petites pièces et des pièces qui sont difficiles à traités avec les machines de polissage ou d'autres méthodes connues [58].

Inconvénients du traitement sont - l'impossibilité du traitement des pièces de très petites tailles et épaisseurs ; des pièces de haute précision, l'intensité irrégulière d'enlèvement du métal de la surface, ce qui aboutit à une mauvaise aptitude au traitement des zones et des surface inaccessibles (rainures, approfondissements, passages, surfaces internes, etc.)

#### IV.2.6. Traitement Abrasives Libres Condensés par des Forces d'Inerties (TALCFI)

La méthode du traitement abrasif libre, condensé par des forces d'inertie (TALCFI) est un procédé dans lequel le traitement se passe suite à l'interaction du contact de la surface traitée condensé par des forces d'inertie avec la couche de l'abrasif libre à leur déplacement relatif. La Fig. IV.8 montre des schémas du procédé de traitement abrasif libres de différents types de surfaces de pièces condensés par des forces d'inertie [59].



**Figure IV.8** - Schémas du traitement des pièces dans un milieu abrasif libre condensé par des forces d'inertie : a - traitement de la surface extérieure de la pièce, b - traitement de la surface intérieure de la pièce, c - traitement simultané de la surface extérieure et intérieure de la pièce, d - traitement de la surface plane, 1 – tambour tournant; 2 - matière abrasive en suspension; 3 – pièce; 4 - mécanisme de rotation; 5, 6 - rouleaux tournants de pièces, 7 - rotor avec des palette tournantes.

Selon le schéma fig.IV.8 a), l'abrasif libre se condense dans le tambour tournant 1 sous l'effet des forces d'inertie la matière abrasive en suspension se serre contre la surface intérieure du tambour et forme l'anneau 2, qui en régime établi tournera simultanément avec le tambour, un tel anneau maintient la forme de la rotation, et le degré de condensation des particules est déterminée par la vitesse angulaire de rotation du tambour. Dans ce cas, l'espace inter-granulaire dans l'anneau abrasif condensé sera rempli par la suspension fluide.

Puisque les particules solides de la couche tournante condensée de l'abrasif possèdent une énergie cinétique, à l'introduction dans cette couche la pièce 3, sa surface éprouvera une influence dynamique par la masse des particules. Au coup sur la surface et au glissement les particules abrasives retireront les impalpables du métal.

La couche abrasive condensée possède une élasticité (flexibilité) définie et entoure étroitement la surface de la pièce, en copiant exactement la forme de son profil. Ceci assure une pression pratiquement homogène sur toutes les surfaces. Au traitement des surfaces internes des pièces de révolution peuvent former une couche abrasive condensée à l'intérieur de la cavité des pièces (Fig. IV.8.b). Cette solution très perspective pour traiter simultanément les surfaces internes et externes des pièces (Fig.IV.8.c). La (Fig.IV.8.d) montré le schéma de l'installation dans laquelle l'abrasif est condensé par des forces d'inertie de la rotation du rotor avec des palettes. La couche abrasive condensée se dirige à travers la fenêtre dans le corps du tambour vers la surface de la pièce traitée.

Cette méthode assure une combinaison organique du procédé de traitement, de lubrification et de refroidissement qui se déroulent simultanément et indissolublement. ST se trouve dans la zone de traitement sous pression constante centrifuge qui assure sa pénétration effective à tous les micropores et les fissures dans les surfaces des pièces à usiner. La possibilité de la circulation ST assure une évacuation efficace de la chaleur et rend le traitement cryogénique.

La méthode assure la possibilité du réglage dans de grandes limites du procédé par l'influence abrasive sur la surface traitée, aux dépend du changement des régimes du traitement. Selon les caractéristiques qualitatives la méthode TALCFI se rapporte aux méthodes "sans dimension (extensibles)" délicates du traitement de finition des pièces, mais c'est l'application la plus effective lors du traitement des surfaces des pièces de profil complexe. Les principaux facteurs technologiques influençant sur les résultats du traitement sont : la vitesse de rotation du système et du container, la durée du traitement, la granulation de l'abrasif et la présence des mouvements oscillatoires supplémentaires des pièces.

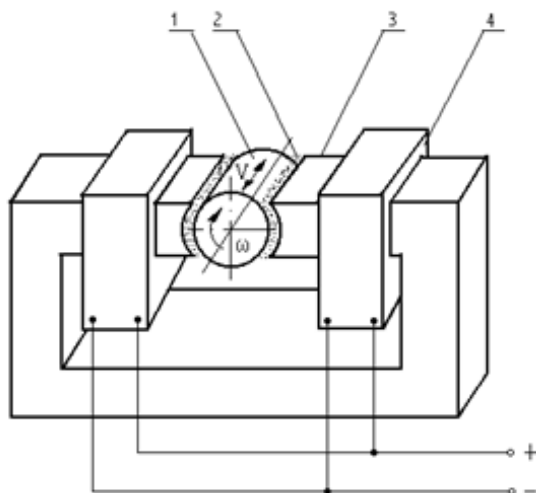
Les particularités TALCFI :

- Le traitement d'une ou plusieurs pièces,
- La nécessité de la fixation et la rotation de pièces,
- Le traitement principalement des corps de révolution, faible intensité du traitement,
- La nécessité de l'hermétisation de dispositif,
- Le traitement des pièces de petites dimensions.

#### IV.2.7. Traitement Abrasif Magnétique (TAM)

L'essence de la méthode du traitement abrasif magnétique (TAM), selon le schéma motorisé représenté dans la (Fig.IV.9) est que la surface traitée ou la poudre avec des propriétés magnétiques et abrasives sont placés dans un champ magnétique, communiquent de l'un à l'autre un mouvement forcé. L'enlèvement du métal se réalise suite à une action de force de la poudre sur la surface et à ces mouvements relatifs [60].

La particularité de la méthode proposée T.S. Shuleva, consiste en l'utilisation d'un champ magnétique pulsé, radial relativement à l'axe de la disposition des pôles et d'oscillation des pièces le long de l'axe. La pièce à traiter se place entre les bouts polaires de l'électro-aimant avec un certain jeu, qui sert à mettre la poudre possédante de propriétés magnétiques et abrasives. L'entraînement mécanique communique à la pièce un mouvement rotationnel et d'oscillation le long de l'axe. Grâce aux forces du champ magnétique, les grains de la poudre se retiennent dans les jeux, se serrent contre la surface de la pièce et produisent son traitement. Les jeux sont alimentés par des ST (émulsion, kérosène, etc.).



**Figure IV. 9** – Schéma du TAM de polissage des surfaces extérieures des corps de révolution :  
1- pièce ; 2 – poudre abrasive magnétique ; 3 – bouts polaires de l'électro-aimant ; 4 – électromagnétique.

De toute évidence, la rotation du système magnétique de la pièce, accomplissant seulement un mouvement oscillatoire ne change pas le caractère des forces magnétostatiques agissantes sur la poudre, applique un champ non constant, mais tournant.

Les résultats du traitement dépendent des facteurs technologiques suivants : l'amplitude de l'induction magnétique dans les jeux, les matériaux de la poudre abrasive magnétique et de la pièce, la valeur dimensionnelle du jeu, la vitesse relative de la poudre et la pièce, la présence du mouvement auxiliaire (mouvement oscillatoire), l'état de la surface initiale (les propriétés physico-mécaniques et les caractéristiques micro-géométriques), la présence et le type du ST, la granulation des grains de la poudre. La méthode fait partie aussi au type « sans dimension (extensibles) ».

Les particularités du TAM : - traitement par pièce, - principalement des corps de révolution, - la nécessité de la fixation et de la rotation des pièces, - le traitement des pièces de petite et moyenne taille.

### **IV.3. Brève analyse des travaux dans le domaine du traitement abrasifs libres**

Les larges possibilités technologiques des méthodes du traitement abrasif libre, la haute productivité, la possibilité du traitement des pièces de configuration complexe, ainsi qu'une bonne qualité de la surface traitée, permettent de les insérer dans le type des méthodes les plus prospectifs du traitement des pièces de machines. Cela provoque une nécessité des études approfondies contribuant à une large introduction des méthodes du traitement abrasif libre dans la production.

À présent, la méthode la plus étudiée du traitement abrasif libre est le traitement vibratoire Tvi et ses variétés [61].

Ces études ont porté l'essence et les possibilités technologiques de Tvi, certains résultats d'études théoriques et expérimentales ont cité l'influence des paramètres technologiques du procédé sur l'enlèvement du métal et rugosité de la surface traitée. Le plus grand intérêt de dans ce domaine est présenté dans les travaux de : A.P. Babichev, J.V. Dimov, A.P. Sergiev, Y.M. Samodoumsky, M.E. Chainsky, V.A. Vlasov, V.A. Ampilogov (représentants le Labo SOVIETIQUE), Matsunaga M., W. Hagiudy (Labo Japonnais), K. Vellingera (Labo Allemagne), Brandt, R.K. Gillespie, D. Davidson (Labo Americain, USA), etc.

La plupart des investigateurs croient que le procédé du Tvi exige une recherche détaillée et une définition précise de deux principaux paramètres, caractérisant la productivité et les possibilités technologiques du procédé :

- 1) l'enlèvement du métal de la surface de la pièce et
- 2) la rugosité de la surface traitée. Cependant, les résultats obtenus par différents investigateurs ne sont pas les mêmes, et parfois se contredisent.

Ainsi A.P. Babichev a mené des études sur la vitesse et sur les forces de collisions des particules du milieu de travail (MT) et les pièces traitées, ainsi que les contraintes de contact et de température dans la zone de collision et d'opération de la micro-coupe par la formation de la couche superficielle, l'intensité d'enlèvement du métal, la rugosité de surface et la profondeur de la couche calomniée, il a obtenu des dépendances pour calculer les paramètres technologiques du procédé. Il a établi que la vitesse des particules du MT se définit par l'amplitude et la fréquence d'oscillations de la chambre de travail qui atteint de 0,3 à 1,0 m/s, l'accélération change de 15 – 20 à 100 -150 m/s<sup>2</sup>. Les forces des micro-coups des particules du MT atteignent 15 – 40 N, la valeur des pressions de contact allant de 0,0003 à 0,01 Pa. La température moyenne dans la zone d'opération des micro-coups change de 50 – 80 jusqu'à 500 – 700° C, la température moyenne dans la chambre généralement n'excède pas 35–50° C.

Suite aux études expérimentales approfondies du procédé il a établi les dépendances caractérisant l'influence : de l'amplitude et de la fréquence d'oscillations du MT, du volume de chargement, des dimensions et de la granulation des grains sur la productivité du procédé et la rugosité de la surface traitée.

Y.M. Samodumsky a indiqué, que le profil travailleur du granule abrasif est constitué de grains réalisant la micro-coupe et la déformation plastique, et de grains qui ne participent pas aux travaux, ne donne pas cependant des recommandations sur la définition de la quantité de grains dans chaque groupe et ne prend pas en considération la disposition des grains sur la surface des granules à la conclusion des dépendances théoriques [47].

K.R. Gillespie AP Babichev ont établi des résultats sur les nombreuses études expérimentales basées sur l'influence de divers facteurs sur le procédé de la formation de la rugosité de surface dans le Tvi. Il a étudié en détail l'influence de : l'amplitude et la fréquence d'oscillations, les dimensions des granules et la granulation des grains composant la granule, ainsi que les propriétés mécaniques du matériau de la pièce. Ils ont proposé un modèle de calcul semi-empirique de ces paramètres.

Le procédé du traitement centrifuge rotatif a été étudiée en détail par K.R. Gillespie, dans son livre *Mass Finishing* où il a exposé l'essence et les possibilités technologiques du TCR et a mené des résultats théoriques et expérimentales sur l'influence des paramètres du procédé et sur la productivité et la qualité du traitement, il a même montré quelques indices d'optimisation.

Il a élaboré des modèles mathématiques qui a permis analytiquement de déterminer les caractéristiques cinématiques et dynamiques du TCR, et d'analyser l'influence des régimes et les conditions du traitement sur les paramètres de sortie, ainsi que de recevoir la dépendance pour calculer les paramètres cinématiques, de force et géométriques de l'équipement. Il a constaté que TCR conduit aux importants changements de la topographie et des propriétés physico-mécaniques de la couche superficielle, à l'augmentation de la micro-dureté de la surface usinée et à la formation de contraintes résiduelles de compression dans la couche superficielle. Cela conduit à de meilleures performances des propriétés des pièces usinées.

Le procédé du traitement à jet abrasif est largement utilisé dans l'industrie, grâce à la haute productivité, au rendement économique et à la simplicité dans l'exploitation. Les travaux de d. Davidson ont indiqués l'essence physique, et ont donnés les schémas et les structures des installations appliquées, aussi ont indiqué les principales informations sur ce traitement. Ils ont étudié en détail l'influence de la granulation de l'abrasif, l'angle d'attaque et la composition du ST sur le procédé de la micro-coupe.

Ils ont établi que la plus grande productivité est atteinte à la signification de l'angle d'attaque  $40^\circ$ , la meilleure rugosité dans la plage de  $30^\circ$  à  $60^\circ$  et la granulation dans la plage de 100 à 500 enlèvement du métal à l'unité de temps est directement proportionnelle au diamètre des grains abrasifs

La méthode du traitement abrasif libre condensé par des forces d'inertie, est élaborée par A.N. Martynov [47]. Il a décrit la méthode et ses possibilités technologiques. Il a exposé les schémas de la réalisation des méthodes du traitement. La recherche a permis d'établir les dépendances décrivant l'influence des facteurs technologiques et les conditions du traitement sur la productivité et la rugosité de la surface traitée, l'augmentation de la micro-dureté de la couche superficielle et la formation des contraintes de compressions résiduelles. Il a montré que la couche abrasive condensée à cause de son élasticité et sa souplesse aligne les pressions de contact sur toutes les zones du profil complexe, ce qui provoque un enlèvement de métal régulier sur toute la surface de la pièce traitée.

Cependant, l'absence de la méthode du calcul de la rugosité de la surface traitée complique l'optimisation des régimes du traitement

L'analyse du schéma de la coupe du traitement MAO montre que le procédé du contact des bords coupants avec la surface traitée a un caractère discret, et la réorientation des grains dans l'espace du jeu de travail se réalise aux dépend de l'action du moment de torsion, les faisant rouler. La méthode permet de 10 – 120 c à faire un enlèvement de métal de 0,02 à 0.5 mm, à réduire la rugosité  $R_a = 10$  à 40 jusqu'à 0,08 à 0,32 et 0,32 à 1,25 ou  $R_a = 0,01$  à 0,08 microns et à diminuer l'ondulation de 8 à 10 fois.

Dans le travail on admet les dépendances empiriques caractérisant l'influence du temps du traitement, la rugosité initiale, les vitesses de la rotation de la pièce, la valeur du jeu de travail, les valeurs de l'induction magnétique et la granulation de la poudre sur le changement des dimensions et les caractéristiques géométriques de la surface.

Ayant examiné les résultats de recherche théorique et expérimentale des méthodes du traitement abrasifs libres, ainsi que leur utilisation dans diverses industries, on peut noter une série de régularités essentielles des méthodes examinées :

1. Le milieu outil-coupant technologique représente un ensemble de particules abrasives libres (grains et granules abrasifs composées de différentes liasses).
2. L'enlèvement du métal se réalise par les saillies et les micro-saillies des grains abrasifs grâce à la micro-coupe, confirmé par la présence du copeau.
3. L'absence d'une liaison rigide cinématique de l'outil-coupant et de la pièce.
4. Le caractère général de l'usure des abrasifs (pas de gros clivages à cause de grandes collisions, etc.)
5. Bonnes conditions pour le placement et l'enlèvement du micro-copeau retiré.
6. un traitement de caractère cryogénique.
7. La présence du ST, son admission libre à la zone du traitement, la possibilité de l'introduction des substances chimiquement et superficiellement actives.
8. L'absence des défauts de température de la surface traitée (traces de brûlures, microfissures, etc.).
9. Le schéma général de la formation du profil de la rugosité de la surface usinée en raison de l'application multiples et l'intersection des égratignures (éraflures) abrasifs. Le changement de la rugosité a un caractère exponentiel en fonction de la valeur établie.

10. L'enlèvement initial de sommets du profil initial de la rugosité, ce qui crée une possibilité du traitement sommet-plat avec la préservation des poches d'huile.
11. La rugosité établie dans la plupart des cas a un caractère isotrope.
12. Le tronçon initial de la courbe d'appui du profil de la rugosité a un aspect aplani.
13. Lors du traitement, il se peut qu'il y a une formation des surfaces juvéniles, conduisant à un processus mécano-chimique.
14. Après le traitement, on observe une augmentation de la micro-dureté de la couche superficielle.
15. Dans la couche superficielle de la pièce usinée se forment des contraintes résiduelles de compression.
16. Après le traitement la résistance à la fatigue de la pièce augmente.
17. Les possibilités technologiques : réalisation de la rectification, de polissage, de nettoyage, de lavage, d'ébavurage, etc.
18. La possibilité du traitement des pièces de forme complexe.
19. La possibilité du traitement des pièces de différents matériaux (tous matériaux).
20. L'élimination totale du métal peut être calculée par l'enlèvement du métal de la particule séparée en tenant compte de la probabilité de la micro-coupe par le rapport de l'unité de temps et l'unité de surface.
21. L'augmentation proportionnelle de l'enlèvement du métal en fonction de l'augmentation de la durée du traitement.
22. La généralité de l'influence des principaux paramètres technologiques du processus : la vitesse de l'interaction, la granulation, la grosseur des particules, la forme de pièces, les propriétés mécaniques du matériau de la pièce, etc.
23. La possibilité du traitement des pièces « sans dimension (extensible) » et avec de dimension (à une durée suffisante).
24. L'inégalité du traitement des zones de pièce, ayant une différente forme, principalement arrondir les arêtes vives (bords aigus) et les saillies des surfaces extérieures.

25. La présence du schlamm (saleté) dans la zone de traitement, la nécessité d'une régénération du milieu et solutions technologiques.

L'analyse des résultats des méthodes de recherche du traitement abrasifs libres ci-dessus conduit aux conclusions suivantes :

1. Les résultats de nombreuses études révèlent des grandes possibilités des méthodes, reçoivent des dépendances empiriques définissant l'influence des principaux paramètres technologiques sur la productivité du traitement et sur la qualité de la surface traitée.

2. Les modèles théoriques reçus dans une grande mesure ne reflètent pas l'essence physique de l'influence abrasive et ne prennent pas en considération l'influence de la granulation sur la surface réelle du contact des grains abrasifs et la pièce à l'interaction unitaire.

3. Énoncer des hypothèses sur la possibilité de la création d'une théorie commune pour certaines méthodes des traitements abrasifs libres, à défaut d'un développement ultérieur.

4. L'analyse théorique incomplète de l'influence des principaux paramètres technologiques sur les résultats du traitement.

5. l'élaboration insuffisante des méthodes analytiques du calcul des paramètres technologiques des méthodes du traitement abrasifs libres, qui ne permet pas de juger l'optimisation des processus de fabrication appliqués.

La résolution des tâches indiquées ci-dessus sur cette base, une augmentation significative de la productivité et de l'efficacité des méthodes du traitement abrasifs libres est impossible sans une étude approfondie de l'essence physique des phénomènes et les régularités principales définissant les mécanismes de l'interaction des abrasifs libres avec la surface traitée, le mécanisme d'enlèvement du métal et la formation de la rugosité. Il est utile d'appliquer une approche généralisée pour l'étude des méthodes de traitement.

Pour fixer les objectifs il est nécessaire d'analyser les recherches dans les domaines d'études connexes (polissage, frottement et usure).

#### **IV.4. conclusion**

Après avoir analysé les résultats de l'étude des méthodes de traitement abrasifs libres, ci-dessus, ainsi que l'expérience de la recherche présentée de matériaux des granules et les procédés de frottement et d'usure, on peut formuler le but et les objectifs de la recherche qui permettront de résoudre des problèmes scientifiques complexes de détermination et d'optimisation généralement des procédés technologiques du traitement abrasif libre et particulièrement du traitement de masse finition vibratoire (TMFV).

Le but de la recherche est de dévoiler et de développer une approche systématique fondée sur des bases scientifiques du traitement abrasif libre, en établissant des principes scientifiques et méthodologiques de la formalisation de la conception de solutions à des problèmes scientifiques complexes d'optimisation des procédés technologiques du traitement abrasif libre – traitement de masse finition vibratoire (TMFV).

Pour atteindre cet objectif on répond aux tâches suivantes :

1. Analyse des procédés existants de traitement vibratoire.
2. Etude théorique et l'argumentation des schémas appliqués du traitement.
3. Élaboré des recommandations pour les paramètres du procédé, sont mises comme base de nouveaux procédés technologiques de finition avec des granules libres.
4. Recommandations sur les paramètres de conception de la machine utilisée.
5. L'élaboration du modèle de la surface de coupe de la granule (medias de masse finition vibratoire) (MMFV) comme outil-coupant.
6. Les recherches théoriques des mécaniques de la relation et de l'interaction des MMFV, CMFV, Equipement de Masse Finition Vibratoire (EMFV) avec la surface des pièces.
7. Simulation théorique et expérimentale du procédé d'enlèvement de métal par les MMFV.
8. L'élaboration du modèle de la formation des paramètres et de la qualité de la couche superficielle comme résultat final.

9. L'élaboration des méthodes de calcul et d'accréditrice technologique des paramètres donnés de la rugosité de la surface traitée.

10. L'élaboration des bases méthodiques (théoriques et expérimentales) de l'optimisation des procédés technologiques du TMFV.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Au cours de ce travail et les observations exprimés nous ont permis de conclure et nous nous sommes attachés à montrer l'intérêt des méthodes de type tribologique du traitement de surfaces, pour apprendre ce phénomène, sans en cacher les nombreuses limitations (inconvenients), ainsi que les avantages de chaque méthode. En particulier, Chapitre IV fait le point sur les nombreux traitements tribologiques, que l'on doit surmonter pour obtenir des états de surfaces de haute qualité de finition. Pour atteindre cet objectif on conclure :

1. Analyse des procédés existants de traitement tribologique ;
2. Etude théorique et l'argumentation des procédés appliqués de tribologie ;
3. qu'il existe une différence au niveau de la tenue à l'usure entre les différentes structures ;
4. qu'il existe une corrélation entre le coefficient de frottement et la température de contact ; cette corrélation confirme bien que l'évolution de la température, est gouvernée par des phénomènes de surfaces ;
5. que pour des conditions de chargement sévères, on note un changement de comportement au niveau du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement.

**BIBLIOGRPHIE**

- [1] Physique des Surfaces et des Interfaces, Josselin MOUETTE, d'après le cours d'Elisabeth CHARLAIX 4 mai 2002.
- [2] Traitements et revêtements de surface des métaux, Robert lévêque DUNOD, PARIS, 2007.
- [3] Réda el hak ourahmoune, Thèse de doctorat (2012) Contribution à la compréhension de la fonctionnalisation mécanique de surface des composites à matrice thermoplastique (PEEK) destinés à l'assemblage par collage.
- [4] Cédric NOEL, Thèse de doctorat (2009), Plasmas micro-ondes d'argon à la pression atmosphérique : diagnostic et applications au nettoyage des surfaces
- [5] ETCHVERRY Bernard, Thèse de doctorat (2006), Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites NIP – TALC multifonctionnels à empreinte écologique réduite.
- [6] M.CARTIER, P.KAPSA, Usure des contacts mécaniques, Techniques de l'Ingénieur, BM5065 à BM5061 (2001).
- [7] O.DALVERNY, Vie tribologique à chaud et température interfaciale des contacts céramiques, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, (1998).
- [8] J.F.ARCHARD, Contact and rubbing of flat surfaces, Journal of Applied Physics, volume 24, Issue 8, (1953), pp.981-988. des traitements de surface appliqués aux problèmes de frottement, Edition Tec&
- [9] M.CARTIE, Guide d'emploi Doc, (2000).
- [10] H.HOUMID BENNANI, Contribution à l'étude de l'adhérence et des caractéristiques mécaniques et tribologiques de quelques couches minces dures, U.F.R. des Sciences et Technologies de l'université de Franche Comté, (1998).
- [11] A.G.EVANS, M.C.LU, S.SHMAUDER, M.RUHLE, Some aspects of mechanical strength of ceramic / metal bonded system, Acta Metallurgica, volume 34, Issue 8, (1976), pp.1643-1655.
- [12] R.A.MOORE, F.S.KING, Abrasive wear of brittle solids, Wear, volume 60, (1980), pp.123-140.
- [13] K.H.ZUM GAHR, Microstructure and wear of materials, Tribology series 10, Elsevier (1987).
- [14] O. Barrau. Etude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.
- [15] ZEMZEMI Farhat (thèse de doctorat 2007), Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce – outil – copeau en usinage : application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718.

- 
- [16] G. Liste. Etude des mécanismes d'endommagement des outils carbure wc-co par la caractérisation de l'interface outil-copeau application à l'usinage à sec de l'alliage d'aluminium aéronautique AA2024 T351. PhD thesis, ENSAM-Bordeaux, 2004. N° d'ordre : 2004-41.
- [17] E.M. Trent. Metal Cutting. ISBN 0-7506-1068-9. 1991.
- [18] G. Bittes. Contribution à la connaissance des mécanismes fondamentaux liés à l'usinabilité des aciers de construction. PhD thesis, l'université de Toulon, 1993.
- [19] J. P. Cordebois and coll. Fabrication par usinage. ISBN 2 10 005586 0. Dunod, Paris, 2003.
- [20] Jawahir I.S. and Van luttervell A.C. Recent developments in chip control research and application,. In Annals of CIRP, volume 42, pages 659–693, 1993.
- [21] F.W Taylor. On the art of cutting metals. In Trans ASME, volume 28, pages 31–248, 1907.
- [22] B.T. Trigger, .K.J and. Chao, J. Dupond, and A.M. Le Duc. The mechanism of crater wear of cemented carbide tools». In Trans. ASME, volume 78, pages 326–346, 1956.
- [23] F. Lorey. Endommagement des outils de coupe. Les techniques d'ingénieur, traité mécanique et chaleur B7042 2, 1993.
- [24] Y Matsumoyo and D. Chin Hsu. Workpiece temperature rise during the cutting of AISI 4340 steel. Wear, 116 :309–317, 1987.
- [25] W. Grzesik, Z. Zalisz, and P. Nieslony. Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications. Surface and Coatings Technology, 155 :37–45, 2002.
- [26] T.I EL-Wardany and M. A El Bestawi. Cutting temperature of ceramic tools in high speed machining of difficult-to cut materials. Journal of Machine, Tools Manufacturing, 36 (5) :611–634, 1996.
- [27] J-L. Battaglia, O. Cois, L. Puigsegur, and A. Oustaloup. Solving an inverse heat conduction problème using a non-integer identified model. International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 :2671–2680, 2001.
- [28] J. Rech. Contribution à la compréhension des modes d'actions tribologiques et thermiques des revêtements en usinage. Application au cas du taillage de dentures à la fraise-mère à grande vitesse. PhD thesis, 2002.
- [29] J. Rech. Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool-chip interface in orthogonal dry cutting. Surface and Coatings Technology, 200/16-17 :5132–5139, 2006.
- [30] L. Puigsegur. Caractérisation thermique d'un procédé d'usage par tournage approche analytique et identification de système non entier. PhD thesis, Université de Bordeaux I école Doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, 2002.

- [31] R. M'Saoubi. Aspect thermique et microstructuraux de la coupe. Application à la coupe orthogonale des aciers austénitiques. PhD thesis, ENSAM Paris, 1998.
- [32] T.H.C. Childs, K. Maekawa, T. Obikawa, and Y. Yamane. Metal Machining : theory and applications. Arnold, 2000.
- [33] T.H.C. Childs. Friction modelling in metal cutting. *Wear*, 260 :310–318, 2006.
- [34] G. Zambelli and L. Vincent. Matériaux et Contact – Une approche tribologique. ISBN 9-782880-743383. Presses polytechniques et universitaires romandes édition, 1998.
- [35] M. Meiller Etude expérimentale du frottement outil-pièce en coupe orthogonale, (2002), PhD thesis.
- [36] N. Mesnier Caractérisation tribologique des aciers 27MnCr5 à usinabilité améliorée, rapport de master, (2006), 132 pages.
- [37] A. Moufki, A. Molinari, and D. Dudzinski. Modelling of orthogonal cutting with a temperature dependent friction law. *Journal of Mechanical Physics of Solids*, 46 :2103–2138, 1998.
- [38] H. Chandrasekaran and D.V. Kapoor. Photoelastic analysis of tool-chip interface stresses. *Transactions of the ASME Journal of Engineering for Industry*, 87 :495–502., 1965.
- [39] N.N. Zorev. Inter-relationship between shear processes along tool face and shear plane in metal cutting. *International Research in Production Engineering ASME*, pages 42–49, 1963.
- [40] S. Kato, Y. Yamaguchi, and M. Yamade. Stress distribution at the interface between chip and tool in machining. *Trans. ASME J. Eng. ind...* 94 : 683–689, 1972.
- [41] T. Shirakashi and E. Usui. Friction characteristics on tool face in machining. *J. JSPE*, 186 : 966–972, 1973.
- [42] Jr. Vaz. On the numerical simulation of machining processes. *Journal of Brazilian society of mechanical sciences*, 22 (2), 2000.
- [43] K. Iwata, K. Osakada, and Y. Terasaka. Process modelling of orthogonal cutting by the rigid plastic finite element method. *J. Engng. Ind. trans. ASME*, 106 :132–138, 1984.
- [44] K.F Eldridge, O.W Dillon, and W.Y. Lu. thermo-viscoplastic finite element modelling of machining under various cutting conditions. *Transaction of NAMIR/SME*, XIX : 162–169, 1991.
- [45] J.S. Wu, Dillon Jr., and W.Y. Lu. Thermo-viscoplastic modelling of machining process using a mixed finite element method. *J. Manuf. Sci. Engng. Trans. ASME*, 118 :470–482, 1996.
- [46] G.S. Sekhon and J.L. Chenot. Numerical simulation of continuous chip formation during nonsteady orthogonal cutting. *Engng. Comp.* 10 :31–48, 1993.
- [47] Briggs John, Enceram, Giese Ted, 2007. The abrasive industry in Europe and North America, Abrasive Engineering Society USA, ISBN 1871677521, pp 300.
- [48] Baghbanan M.R., Yabuki A., Timsit R. S., Spelt J. K., August 2003. Tribological behaviour of aluminum alloys in a vibratory finishing process, *Wear* Volume 255, Number 7, pp. 1369-1379(11).

- [49] Carson J., C., 2005. Abrasive Blasting: Understanding the Basics of media Selection, products finishing journal USA, pp. 4, ISBN: B000ALSDCQ. <http://www.pfonline.com/articles/0605qf1.html>
- [50] Carson J., C., 2005. Abrasive Blasting: Understanding the Basics of media Selection, products finishing journal USA, pp. 4, ISBN: B000ALSDCQ.
- [51] Davidson David A., 2008. Vibratory finishing: versatile, effective, and reliable. Metal finishing journal, vol. 106, Issue 5, pp. 30-34
- [52] Chiancola Mark, December 1995, choosing the rights media to meet mass finishing Goals, Journal of Metal Finishing, vol. 93, Issue 12, pp. 37-39,
- [53] Davidson David A., august 2006, precision finishing processes in centrifugal barrel equipment: methods promise faster cycling in select applications, Journal of Metal Finishing, vol. 104, issue 7-8, pp. 65-67
- [54] Gillespie LaRoux K., 1999. Deburring and Edge Finishing Handbook, publisher: Society of Manufacturing Engineers Dearborn, Michigan USA, SME ID 10030633, ISBN 0-87263-501-5. pp 404.
- [55] Wang S., Timsit R. S., Spelt J. K., Experimental investigation of vibratory finishing of aluminium, Wear, Volume 243, Number 1, 28 August 2000 , pp. 147-156(10),
- [56] Murphy Michael, 1997, Mass Finishing, Journal of Metal Finishing USA, vol. 95, Issue 2, page 20
- [57] Yabuki A., Baghbanan M. R., Spelt J. K., Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher, Wear Volume 252, Number 7, April 2002 , pp. 635-643(9), ISSN 0043-1648.
- [58] Gillespie LaRoux K., 2006. Mass Finishing Handbook, publisher: Society of Manufacturing Engineers Dearborn, Michigan USA, SME ID 10030633, ISBN 10(0-8311-)3257-4, pp 528.
- [59] Davidson David A., 2003. Developments in mass finishing technology, metal finishing journal, vol. 101, Issue 7-8, pp. 49-56,
- [61] Babichev A. P., 1994. Basis of vibrating technology. Manual Part 2. publisher: Don State Technical University, Russia pp 89. ISBN 5-230-08690-4, DOI 621.9.048.6

## Résumé

La Tribologie est la science qui s'intéresse au frottement, à l'usure, à la lubrification et au contact. Les paramètres qui gouvernent le comportement tribologique d'un couple de matériaux sont très nombreux. Parmi ceux-ci, se trouvent les matériaux avec leurs propriétés spécifiques de surface.

Jusqu'à présent, la Tribologie concernait presque exclusivement les applications technologiques "dures". mais la Tribologie est maintenant de plus en plus concernée par des interactions avec les sciences d'autres matériaux. Dans ce cadre, on rencontre ainsi divers traitements de surface sur des matériaux différents, et qui ont été étudiés et comparés en condition de traitement afin de limiter d'une part les dégradations et d'une autre de réduire le coût de traitement tribologique.

L'objet de la présentation du travail sera de faire le point sur ces différents traitements tribologiques en s'appuyant sur des études réalisées et les avantages / inconvénients de chaque traitement.

## ملخص

. علم تداخل السطوح هو العلم الذي يهتم بالاحتكاك والتآكل والتزييت والتماس كذلك

.تتعدد المبادئ التي تحكم عملية الاحتكاك بين مادتين حسب خصائص السطوح من مادة لأخرى

لحد الآن، كان هذا العلم يقتصر على التطبيقات التكنولوجية الصلبة. لكنه الآن يتداخل شيئاً فشيئاً مع علوم المواد الأخرى. وفي هذا الإطار نصادف كذلك تماسات متنوعة للسطوح مع مواد مختلفة وهي تماسات تمت دراستها ومقارنتها أثناء المعالجة، وذلك من أجل الحد من فقدان الطاقة من جهة، ومن جهة أخرى من أجل تقليص كلفة معالجة الاحتكاك بالتركيز على الدراسات المنجزة ومزايا ومساوي كل معالجة