



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

**MASTER**

En Génie Mécanique

Option : Modélisation

Thème :

**Etude de modélisation de l'influence du coefficient de frottement et l'usure sur des matériaux métalliques**

Proposé et dirigé par :

ELHADI ABDEL MALEK

Présenté :

Demmane Atika

*Année Universitaire : 2015 / 2016*

N° d'ordre : GM/...../2016

## Remerciements

***Ne dit-on pas que l'encre tracée sur une feuille de papier ne peut exprimer les plus sincères des sentiments, néanmoins, je pense qu'elle peut être un témoignage indélébile.***

\*\*\*\*\*

Je rends d'abord grâce à Dieu qui, dans son indéfinie bonté m'a permis de mener à terme ce travail.

Ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance à Monsieur, ELHADI ABDEL MALEK, Maître de Conférences à la Université Med Boudiaf de M'Sila Département de Génie Mécanique, d'abord pour l'avoir eu comme enseignant au cours de l'année théorique, pour son encouragement, ensuite pour m'avoir encadré et dirigé à élaborer ce travail.

Je voudrais dans le présent travail remercier tous ceux qui m'ont aidé à finir cette modeste étude de près ou de loin.

Mon respect et sincère remerciement à tous les enseignants qui ont assuré ma formation, les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter ce travail.

Je tiens ensuite à exprimer mes vifs remerciements à tous ceux qui m'ont apporté leurs soutiens et leurs aides précieuses tout au long de mes recherches.

Enfin, je remercie toute ma famille qui m'a motivé et m'a encouragé tout le long de ce travail surtout mon père.

\*\*\*\*\*

❖ Spécialement pour mon amie proche **Lebci Abdelkader**

❖ A toutes et à tous ; à mes camarades étudiants et à tous ceux, nombreux,  
(Nadia, Amel, khawla, Lamia, smail, hadjer, siham1, siham2, Fatima,  
israa, Iyad)

**Je dis du fond du cœur : MERCI.**

## SOMMAIRE

<i>Introduction Générale</i> .....	7
------------------------------------	---

### *Chapitre I*

#### *Généralités sur le contact des surfaces*

<b>I.1.Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>I.2. Rôle et importance de la tribologie</b> .....	<b>9</b>
<b>I.3. Etude des surfaces</b> .....	<b>10</b>
<b>I.4. Structure d'une surface usinée</b> .....	<b>11</b>
<b>I.5. Types de surface</b> .....	<b>13</b>
I.5.1. Surface d'un corps .....	13
I.5.2. Surface géométrique .....	14
I.5.3. Surface spécifiée .....	14
I.5.4. Surface réelle .....	14
I.5.5. Surface nominale .....	14
I.5.6. Surface mesurée.....	15
<b>I.6. Mesure des défauts</b> .....	<b>16</b>
<b>I.7. Rugosité</b> .....	<b>17</b>
<b>I.8. Mécanique du contact</b> .....	<b>17</b>
<b>I.8.1. Contact localisé</b> .....	<b>17</b>
I.8.1.1. Définition du contact localisé .....	18
I.8.2. Contact élastique .....	19
I.8.3. Contact ponctuel ou linéique .....	20
<b>I.9. Détermination de l'air de contact</b> .....	<b>20</b>
I.9.1. Contact extérieur entre deux sphères .....	21
I.9.2. Contact extérieur de deux cylindres parallèles .....	22

## ***Chapitre II***

### ***Frottement des matériaux métalliques***

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>22</b>
<b>II.2. Définition du Frottement.....</b>	<b>22</b>
<b>II.3. Mécanismes de Frottement.....</b>	<b>23</b>
<b>II.4. Nature de frottement.....</b>	<b>24</b>
II.4.1. Frottement sec.....	24
II.4.2. Frottement hydrodynamique.....	24
II.4.3. Frottement onctueux.....	24
<b>II.5. Force et coefficients de frottement.....</b>	<b>25</b>
II.5.1. Cône de frottement.....	26
<b>II.6. Frottement de glissement.....</b>	<b>27</b>
<b>II.7. Valeurs pratiques du coefficient de frottement.....</b>	<b>29</b>
<b>II.8. Modèle énergétique .....</b>	<b>29</b>
II.8.1. Energie de frottement cumulée.....	30
II.8.2. Puissance moyenne de frottement $P_f$ .....	31

## ***Chapitre III***

### ***Usure des matériaux métalliques***

<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>32</b>
<b>III.2. Définition de l'usure.....</b>	<b>32</b>
<b>III.3. Type de l'usure .....</b>	<b>33</b>
III.3.1. Usure adhésive.....	33
III.3.2.1. Modèle d'Archard.....	34
III.3.1.2. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers.....	35
III.3.2.3. Comment lutter l'usure adhésive.....	36
III.3.2. Usure par abrasion.....	37

III.3.2.1. Aspects tribologiques de l'usure abrasive .....	38
III.3.2.2. Influence de l'angle d'attaque sur l'usure abrasive.....	41
III.3.2.3. Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers.....	42
<b>III.4. Modélisation de l'usure abrasive .....</b>	<b>43</b>
<b>III.5. Circuit tribologique.....</b>	<b>44</b>

## *Chapitre IV*

### *Modélisation du frottement, chaleur et usure*

<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>46</b>
<b>IV.2. Application d'un effort normal .....</b>	<b>46</b>
<b>IV.3. Modélisation du coefficient de frottement .....</b>	<b>47</b>
IV.3.1. Courbes des coefficients de frottement bronze-graphite.....	48
IV.3.2. Courbes des coefficients de frottement cuivre-graphite.....	48
IV.3.3. Courbes des coefficients de frottement graphite-graphite.....	49
<b>IV.4. Modèle énergétique.....</b>	<b>50</b>
IV.4.1. Courbes de la chaleur de surface générée par le frottement du couple bronze-graphite et cuivre –graphite. ....	52
IV.4.2. Courbes de la chaleur de surface générée par le frottement du couple graphite-graphite.....	54
<b>IV.5. Courbes de la chaleur de surface générée par le frottement des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.6. Modélisation de l'usure.....</b>	<b>58</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>59</b>

## *Tableau de figure*

figure	titre	page
<b>I.1</b>	<b>Interaction entre les éléments de la tribologie</b>	9
<b>I.2</b>	<b>Composition schématique des couches superposées d'une surface</b>	11
<b>I.3</b>	<b>Coupe théorique d'une surface</b>	12
<b>I.4</b>	<b>Mesure du profil d'une surface</b>	14
<b>I.5</b>	<b>Schéma d'un profilographe</b>	15
<b>I.6</b>	<b>Schématisation des trois familles de contacts</b>	16
<b>I.7</b>	<b>Exemples de contacts localisés : a) Roulement à bille, b) Came poussoir</b>	17
<b>I.8</b>	<b>Contact ponctuel</b>	18
<b>I.9</b>	<b>Contact linéique</b>	18
<b>I.10</b>	<b>Déformation élastique de la surface de contact</b>	19
<b>I.11</b>	<b>Contact extérieur de deux sphères</b>	19
<b>I.12</b>	<b>Configuration du contact sphère-plan</b>	20
<b>I.13</b>	<b>Contact extérieur de deux cylindres parallèles</b>	21
<b>II.1</b>	<b>Corps solide sur un support horizontal</b>	23
<b>II.2</b>	<b>Endommagement d'un corps frottant</b>	24
<b>II.3</b>	<b>Force et coefficients de frottement</b>	25
<b>II.4</b>	<b>Cône de frottement</b>	26
<b>II.5</b>	<b>Aires de contact réel et apparent</b>	28
<b>III.1</b>	<b>Contact de deux corps solides</b>	33
<b>III.2</b>	<b>Transfert métallique adhésif (<math>\times 1000</math>)</b>	34
<b>III.3</b>	<b>Schémas des mécanismes d'usure abrasive : découpe, fracture, fatigue et arrachage</b>	37
<b>III.4</b>	<b>Usure abrasive à deux corps</b>	38
<b>III .5</b>	<b>Usure abrasive à trois corps</b>	39
<b>III .6</b>	<b>Effet d'une aspérité (a) outil de coupe ;(b) sillon d'abrasion</b>	39
<b>III.7</b>	<b>Mécanisme de l'abrasion par; (a) coupe ;(b) déformation plastique</b>	40
<b>III.8</b>	<b>Angle d'attaque <math>\alpha</math> d'une particule.</b>	41
<b>III.9</b>	<b>Section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque</b>	42
<b>III.10</b>	<b>Résistance à l'usure abrasive <math>\varepsilon</math> en fonction de la dureté due par traitement thermique des aciers au carbone</b>	42
<b>III.11</b>	<b>Couple cône (dur)-surface plus tendre.</b>	43

<b>III.12</b>	<b>Circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides</b>	<b>45</b>
<b>IV.1</b>	<b>Contact de Hertz</b>	<b>46</b>
<b>IV.2</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental du coefficient de frottement du couple Bronze-graphite en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>48</b>
<b>IV.3</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental du frottement du couple cuivre-graphite en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>49</b>
<b>IV.4</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental du frottement du couple Graphite - graphite en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>50</b>
<b>IV.5</b>	<b>Forme de contact pion-disque.</b>	<b>51</b>
<b>IV.6</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental de la chaleur de surface générée par le frottement en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>53</b>
<b>IV.7</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental de la chaleur de surface générée par le frottement en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>54</b>
<b>IV.8</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental de la chaleur de surface générée par le frottement en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>55</b>
<b>IV.9</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental de la chaleur générée sur la surface apparente des couples : (a), bronze-graphite, (b) cuivre-graphite ; (c) graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.</b>	<b>58</b>
<b>IV.10</b>	<b>Confrontation des courbes théorique et expérimental de l'usure du couple Bronze-graphite en fonction de la charge pour <math>V = 1</math> m/s.</b>	<b>59</b>

*Liste des tableaux*

tableau	titre	page
<b>I.1</b>	<b>Impacts de la tribologie sur la société</b>	<b>10</b>
<b>II.1</b>	<b>Valeurs des coefficients de frottement de glissement</b>	<b>29</b>
<b>IV.1</b>	<b>Résultats expérimentaux et théoriques des paramètres tribologiques.</b>	<b>47</b>
<b>IV.2</b>	<b>Valeurs du coefficient de frottement théorique, de la chaleur de surface générée sur la surface réelle des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.</b>	<b>52</b>
<b>IV.3</b>	<b>Valeurs du coefficient de frottement expérimental, de la chaleur de surface générée sur la surface réelle des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.</b>	<b>52</b>
<b>IV.4</b>	<b>Valeurs du coefficient de frottement théorique, de la chaleur de surface générée sur la surface apparente des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.</b>	<b>56</b>
<b>IV.5</b>	<b>Valeurs du coefficient de frottement expérimental, de la chaleur générée sur la surface apparente des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.</b>	<b>56</b>
<b>IV.6</b>	<b>Valeurs des taux d'usure expérimental et théorique et du coefficient d'usure k en fonction de la charge appliquée.</b>	<b>59</b>



## Introduction Générale

Tous les éléments de machines, les organes des dispositifs industriels qui sont en mouvement relatif sont forcément soumis à des sollicitations variables normales et tangentielles, qui induisent des interactions plus ou moins violentes entre matériaux antagonistes.

Il en résulte à la fois des pertes d'énergie par frottement (échauffement et abaissement du rendement) et une consommation de matière à l'interface d'autant plus sévère que les matériaux sont moins adaptés au frottement. La présence du frottement et d'usure dans les corps peut être l'origine d'une réduction de l'efficacité du système mécanique voire être responsable de l'invalidité de ce système.

La demande industrielle pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure de pièces, tant mécaniques que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans. Elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement et usure.

Les phénomènes tribologiques tels que le frottement dépend de plusieurs paramètres qui sont interdépendants les uns des autres comme l'effort normal, la vitesse linéaire de glissement, la dureté du matériau, etc. Ceci rend l'étude de ces phénomènes au niveau du laboratoire assez spécifique, puisqu'il est difficile de reproduire, du point de vue expérimental, les mêmes conditions que celles dans lesquelles évolue un équipement industriel.

Ce mémoire est une synthèse des études mécanique et thermomécanique des deux surfaces en contact à l'échelle microscopique d'un ensemble des couples des matériaux de différentes nuances. Lorsqu'un contact est établi entre deux surfaces, ces dernières se déforment à la pointe des sommets les plus élevés. La surface réelle de contact est très faible surtout pour les faibles chargements.

Les modèles analytiques développés dans la littérature s'appuient souvent sur des hypothèses simplificatrices. L'objectif de la présente étude est de faire une étude comparative entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux.

Le travail effectué dans ce cadre peut se décomposer en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente la tribologie et le contact dynamique des corps métalliques, il traite les surfaces du point de vue structure, topographie, ainsi que la géométrie des aspérités des surfaces et les différents contacts entre les corps métalliques.

Le second chapitre est décerné à une étude bibliographique concernant le frottement des surfaces solides.

Le troisième chapitre est consacré pour une étude sur le phénomène de l'usure entre les matériaux.

Quant à le dernier chapitre, il est destiné pour une étude comparative entre les résultats expérimentaux et le modèle de Bowden et Tabor a été également proposée, ainsi que le modèle énergétique.

## I.1.Introduction

Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost en 1966 et est basé sur le mot grec "tribos" qui signifie frotter [1], signifie science du frottement. Elle a été proposée en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autres, tous les domaines du frottement, de l'usure et de la lubrification [2].

## I.2. Rôle et importance de la tribologie

La tribologie s'intéresse aux diverses méthodes qui permettent de donner un « bon comportement » à ces contacts, sachant que les organes mécaniques « lâchent » bien plus souvent aujourd'hui par leurs surfaces que par leurs volumes. Son étude s'impose pour :

Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines,

Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes,

Améliorer le rendement et la longévité des machines,

Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le transport,

Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux liés aux contacts mécaniques.

La figure I.1 regroupe les différents éléments intervenant dans la tribologie et les phénomènes produits après le frottement et l'usure des matériaux en contact dynamique

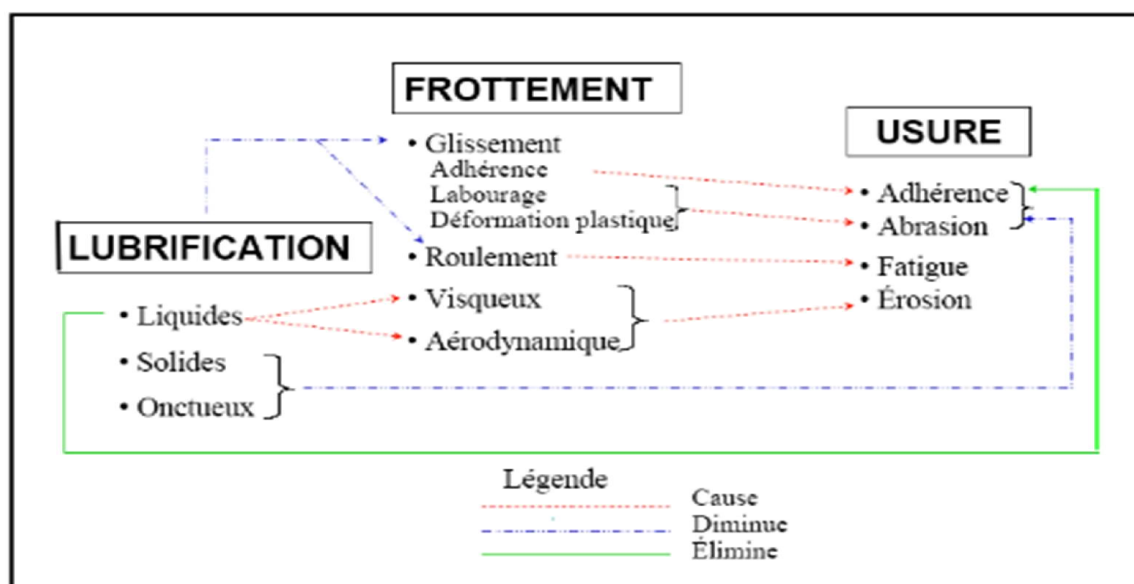


Figure I.1 : Interaction entre les éléments de la tribologie[3].

Systèmes mécaniques	Mise en œuvre des matériaux
<p><b>Vivant : animal, homme</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Membranes biologiques</li> <li>- Prothèses biomécaniques</li> <li>- Cartilages</li> <li>- Dentisterie</li> </ul> <p><b>Organes de machines</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Paliers, roulements</li> <li>- Segments</li> <li>- Cames, engrenages, freins</li> <li>- Joints</li> <li>- Systèmes électriques</li> <li>- Systèmes magnétiques</li> </ul> <p><b>Terre</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Génie civil</li> <li>- Mouvements des sols</li> <li>- Tremblements de terre</li> <li>- Ecoulement des glaciers</li> <li>- Ski</li> </ul> <p><b>Maintenance</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilité</li> <li>- Durée de vie</li> </ul>	<p><b>Types de matériaux</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Artificiels : métaux, polymères</li> <li>- Céramiques, Composites</li> <li>- Naturels</li> </ul> <p><b>Adhérence, collage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Composites, textiles, fibres matrices</li> </ul> <p><b>Déformations plastiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Laminage, filage, extrusion</li> <li>- Emboutissage, découpage</li> <li>- Outillages de coupe, polissage</li> </ul> <p><b>Lubrifiants</b></p> <p><b>Traitements des surfaces</b></p>

**Tableau I.1 : Impacts de la tribologie sur la société [4].**

### **I.3. Etude des surfaces**

L'étude des surfaces revêt de l'importance dans un grand nombre d'applications industrielles. Par exemple dans les procédés de fabrication par injection, le fini de surfaces du moule est un facteur important qui gouverne la qualité de la pièce. Dans certaines applications technologiques les qualités des surfaces doivent être meilleures pour garantir le bon fonctionnement du système (par exemple, le cas des pièces de frottement, d'étanchéité, de

précision...). En effet, l'usure d'un joint dynamique ou d'une garniture mécanique est souvent fonction de l'état géométrique de la surface sur laquelle il vient se frotter.

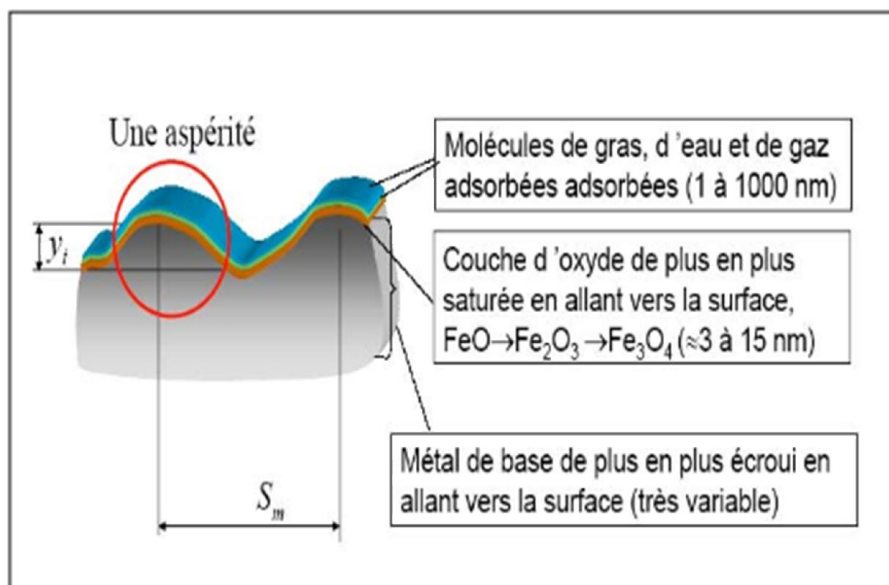
En tribologie, la caractérisation, la métrologie et la simulation numérique des surfaces rugueuses constituent une étude préalable et indispensable avant d'effectuer une approche déterministe ou stochastique des contacts lubrifiés. Les techniques de caractérisation ont pour but de décrire la microtopographie des surfaces afin de mieux comprendre leurs propriétés fondamentales.

#### **I.4. Structure d'une surface usinée**

Une surface tribologique n'est pas une séparation sans épaisseur entre un corps solide et le milieu ambiant. Elle possède également une épaisseur, qui s'étend de l'extérieur jusqu'à l'intérieur du solide [5]. Cette surface est définie comme la partie extérieure, visible, d'un corps, qui constitue la limite de l'espace qu'il occupe. La surface est un amalgame comprenant des zones avec des propriétés physico-chimiques dépendant de la composition du matériau et de l'environnement. Pour décrire une surface réelle, Schmaltz[6] a distingué :

Une couche interne : matériau massif, matériau écroui (épaisseur : 5-20  $\mu\text{m}$ ), des couches superficielles : oxydes (épaisseur : 15 nm), molécules adsorbées (épaisseur : 0,5 nm), contaminants (épaisseur : 5nm).

La figure I.2 illustre parfaitement la topographie et la composition de cette surface.



**Figure I.2 : Composition schématique des couches superposées d'une surface [7].**

À l'extérieur du solide, il se retrouve inévitablement une couche d'oxyde. Même des matériaux nobles comme l'or ou le platine forment une couche d'oxyde sur leur surface dans l'atmosphère. L'épaisseur et les propriétés mécaniques de la couche d'oxyde varient selon le matériau, le taux d'humidité et le temps d'exposition à l'atmosphère.

Cette couche d'oxyde joue un rôle important dans le frottement et l'usure de la surface; sans celle-ci, tous les matériaux se soudent les uns aux autres et les pièces en mouvement relatif grippent.

Sur la couche d'oxyde se trouve une couche adsorbée : eau, hydrocarbures gazeux ou liquides, azote, oxygène et toutes sortes d'autres composants qui se trouvent dans l'environnement.

Dans le solide, en partant des aspérités, se trouve une couche de matériau plus ou moins écroui. Le degré d'écrouissage et la profondeur de la couche écrouie dépendent du procédé de finition (le meulage ou l'usinage causent plus de perturbations sur une plus grande profondeur ; par électroérosion ou par enlèvement chimique causent peu d'écrouissage et ont une influence sur une faible profondeur, finalement, les procédés de finition par écrouissage comme le roulage ou le grenaillage laissent encore beaucoup plus de traces sur la surface).

Sur la couche écrouie existe souvent une couche métallique amorphe, ou de cristaux concassés, appelée couche de Bielby (1921) comme l'indique la figure I.3 elle est produite par la fusion du métal puis son auto trempage par la masse froide voisine lors des opérations de finition telles que rectification et polissage. Cette couche, épaisse de quelques dizaines d'angströms.

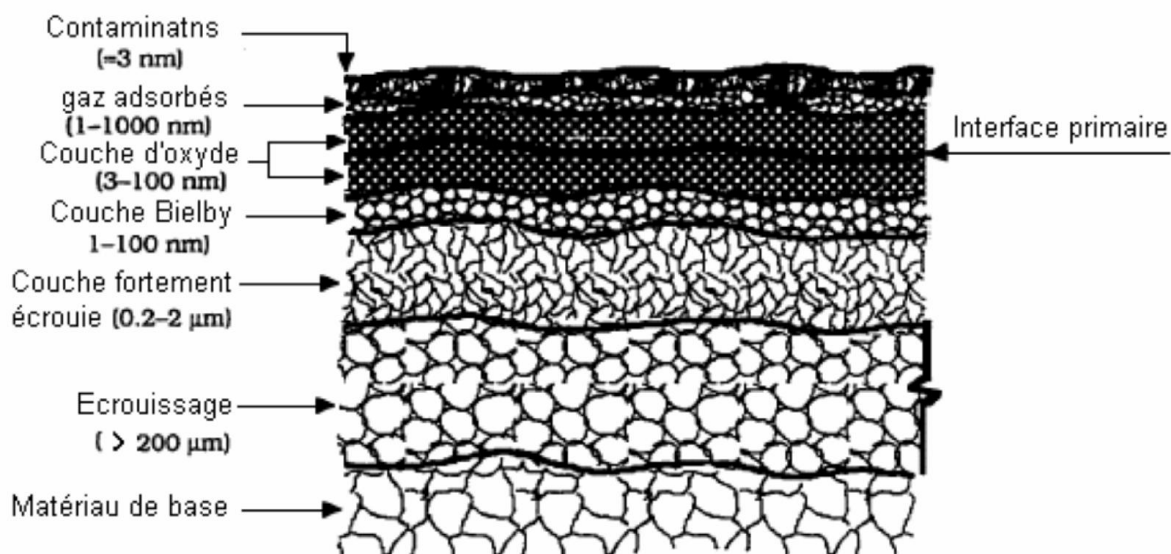


Figure I.3 : Coupe théorique d'une surface [8].

La surface d'un corps est la limite physique de son volume, le séparant du milieu extérieur. Elle correspond à une discontinuité dans l'arrangement périodique des éléments. Le terme de surface représente une couche d'épaisseur comprise entre  $10^{-2}$  mm. et  $10^{-6}$  mm, la composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone sont souvent différentes de celles du cœur du matériau. En effet la surface est l'endroit le plus perturbé d'une pièce Figure I.3.

### **I.5. Types de surface**

La normalisation précise les termes (types) de surface à utiliser [9] :

#### **I.5.1. Surface d'un corps**

Elle est constituée par l'ensemble des points qui délimitent la portion de l'espace où se trouve la matière de ce corps.

#### **I.5.2. Surface géométrique**

Les pièces mécaniques manufacturées sont limitées par des surfaces qui ne sont jamais conformes à celles géométriquement idéales représentées sur les dessins de définition et de fabrication. En effet, elles présentent des défauts de nature géométriques et physico-chimiques résultant du procédé de fabrication utilisé et du matériau constituant ces pièces.

Les caractéristiques de l'état de surface d'une pièce peuvent intervenir de façon prépondérante sur son aptitude à remplir une fonction donnée. Le terme état de surface englobe à la fois :

- l'état géométrique de la surface défini par l'ensemble des écarts géométriques de la pièce réalisée en fabrication par rapport à celle géométriquement idéale ;
- l'état physico-chimique défini par les diverses caractéristiques de la couche superficielle : structure et texture cristallines, adsorption, etc.

#### **I.5.3. Surface spécifiée**

C'est la surface géométrique affectée des tolérances de fabrication.

#### **I.5.4. Surface réelle**

Surface obtenue au cours de la fabrication.

#### **I.5.5. Surface nominale**

C'est une surface parfaite, elle est définie géométriquement par des cotes nominales.

#### **I.5.6. Surface mesurée**

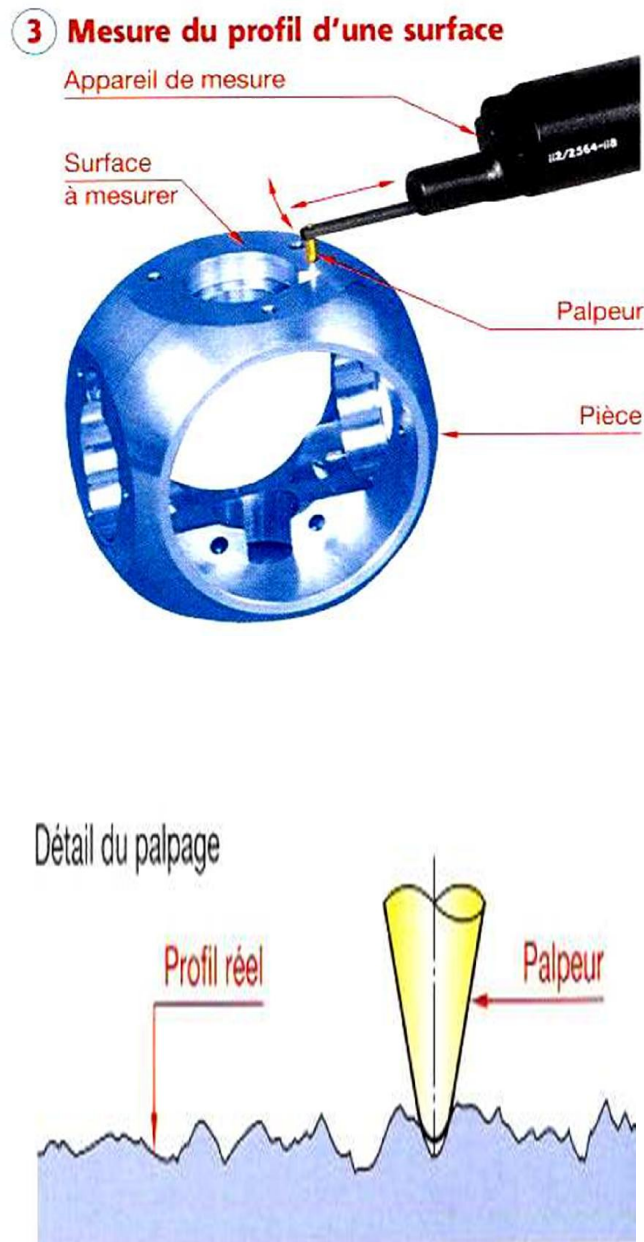
La surface mesurée est le résultat de l'exploration, à l'aide des instruments de mesure, de la surface réelle.

Par exemple, avec l'appareil (rugosimètre) représenté en figure I.4, il arrive que le palpeur ne touche pas le fond de la surface réelle.

C'est ce qui explique, en partie, la différence entre la surface réelle et la surface mesurée.

Les divers types d'instruments et les différentes techniques de mesure, peuvent donner à partir d'une même surface réelle, des surfaces mesurées dissemblables. C'est pourquoi il est nécessaire d'indiquer sur le plan ou sur le cahier des charges :

- l'appareil de mesure choisi ;
- les conditions d'exécution du contrôle.



**Figure I.4 : Mesure du profil d'une surface.**



### I.6. Mesure des défauts

L'étude des états de surface remonte aux années 30, avec le développement des appareils de mesure de profil. Le profil d'une surface est le résultat de la superposition de trois types de défauts précédents. Les défauts de forme sont facilement mesurés avec les instruments de métrologie classiques comme le micromètre ou le pied à coulisse parce que leur période en  $x$  est grande. La période des défauts d'ondulation et de rugosité étant plus petite, un palpeur capable de les détecter doit aussi être petit. L'appareil le plus utilisé pour cette tâche est le profilographe, dont un schéma est donné à la figure I.5. Cet appareil comprend un stylet durci (diamant), qui se déplace sur la surface à très basse vitesse (1mm/s). Le stylet est terminé par une petite pointe ( $\approx 0.5$  micromètre de rayon), qui agit un peu comme un filtre à haute fréquence, les contours plus petits que le rayon de la pointe du palpeur ne sont pas enregistrés [10].

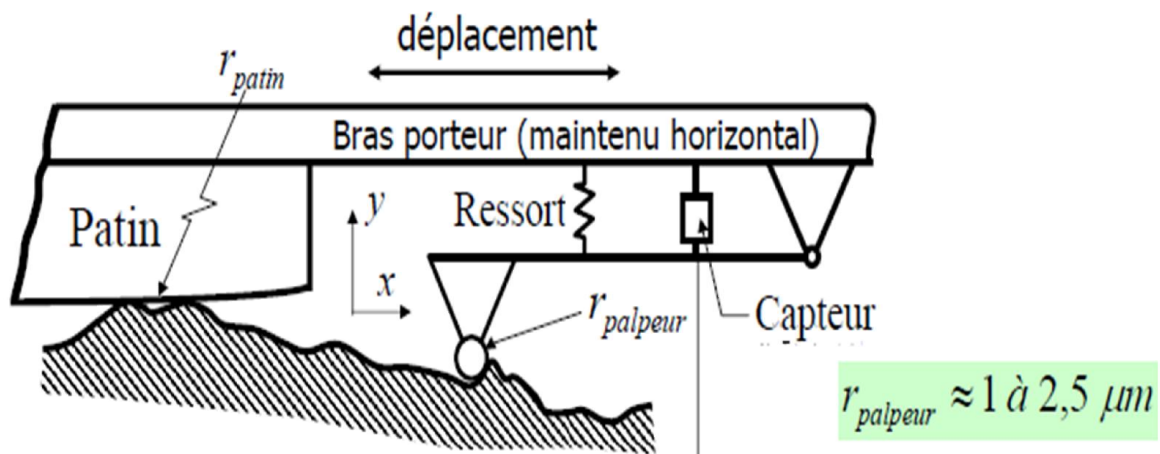


Figure I.5 : Schéma d'un profilographe [11].

Le déplacement du stylet sur le profil est transformé en signal électrique par le capteur, numérisé et ensuite traité par un ordinateur par des techniques statistiques.

### I.7. Rugosité

En tribologie, l'état de surface des corps en contact possède une importance critique. En effet, la nature et les défauts des surfaces génèrent l'adhérence, l'abrasion, la fatigue et/ou l'érosion. Les pièces métalliques sont usinées, forgées ou coulées. Leur surface, comme celle de la plupart des matériaux, est en général imparfaite, sur cette surface il existe des bosses et

des creux. Donc l'aire réelle de contact est très faible, elle représente 10% de la surface apparente du contact.

Tout d'abord les pièces peuvent manquer de rectitude ou de rondeur. Dans tous les cas, même si elles paraissent lisses au toucher et à la vue, les surfaces des pièces comportent des imperfections microscopiques à basse ou à haute fréquence (ondulation ou rugosité) [12].

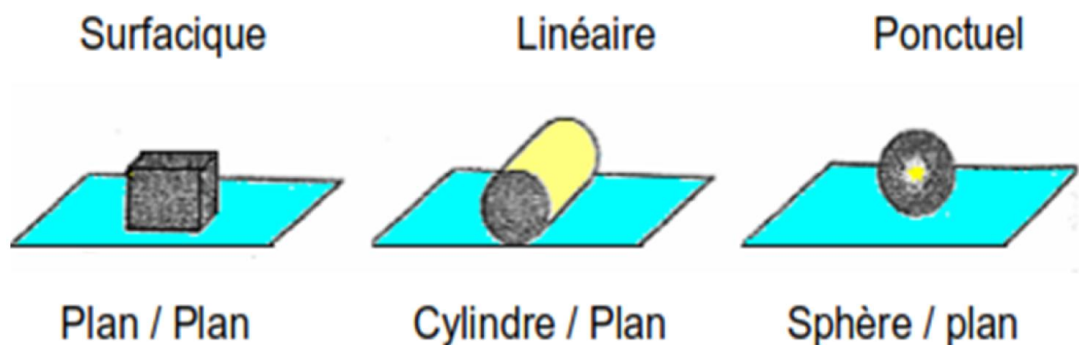
### **I.8. Mécanique du contact**

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront en particulier à l'évaluation du champ de contrainte imposé au contact. Par nature du contact, on entend la définition générale de ce qui constitue le contact :

solide/solide, liquide/solide, liquide+particule/solide, liquide+vapeur/solide, etc. la géométrie du contact caractérise la forme générale des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On constate que l'ensemble de contacts que l'on rencontre en génie mécanique peut se regrouper en trois grandes familles :

- Les contacts de type ponctuel (typiquement sphère/plan).
- Les contacts linéiques (typiquement cylindre/plan).
- Les contacts surfaciques (typiquement parallélépipède/plan).

Ces familles sont schématisées dans la figure I.6 [13] :



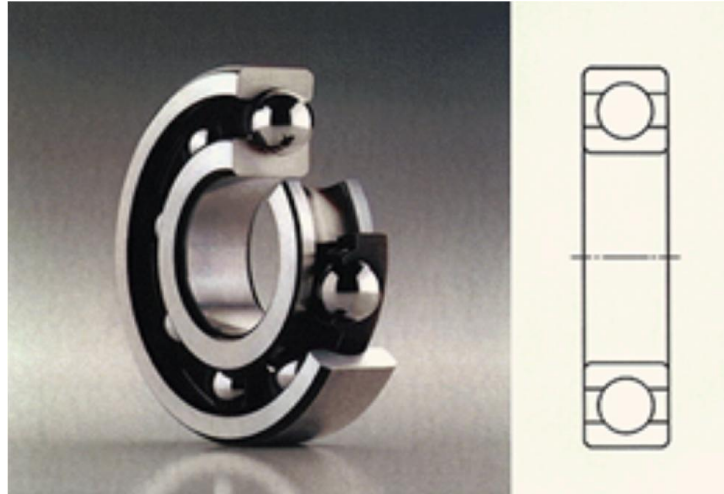
**Figure I.6 : Schématisation des trois familles de contacts. [4].**

#### **I.8.1. Contact localisé**

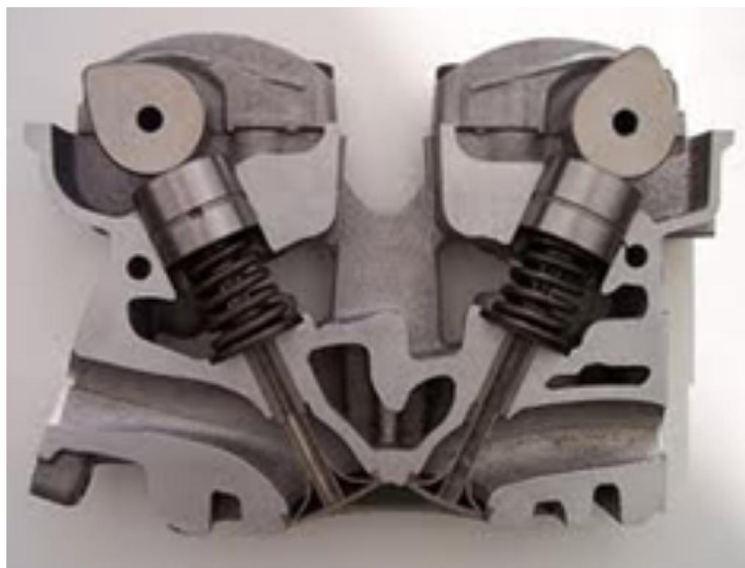
##### **I.8.1.1. Définition du contact localisé**

Un contact est dit localisé lorsque la zone de contact est un point ou une ligne. Ce type de contact est très courant en mécanique (figure I.7). On trouve des contacts ponctuels entre les billes et les bagues d'un roulement. Le contact entre une came et le poussoir d'une soupape de moteur se fait suivant une ligne. Dans l'hypothèse où les solides sont rigides et de forme

parfaite, l'aire de contact est nulle et donc la pression de contact infinie. Bien évidemment, cette conclusion n'est pas réaliste. Nous verrons dans ce chapitre comment calculer les aires et pressions de contact dans le cas d'un contact ponctuel.



(a)



(b)

**Figure I.7 : Exemples de contacts localisés : a) Roulement à bille, b) Came poussoir.**

**I.8.1.2. Contact élastique**

En 1881, Heinrich Hertz a proposé une théorie, bien connue en mécanique du contact, qui permet de calculer les caractéristiques d'un contact localisé élastique. Les hypothèses utilisées sont les suivantes :

Les surfaces sont continuës, lisses et non-conformes (c'est-à-dire que leurs rayons de courbure sont très différents) ;

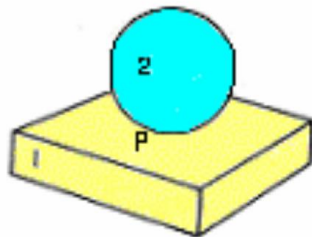
Les déformations et les déplacements sont petits ;

Chaque solide est un demi-espace infini élastique linéaire ;

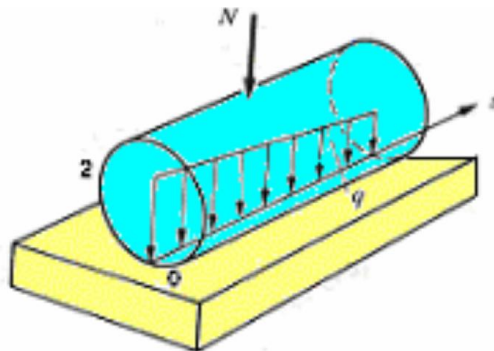
Le contact est sans frottement ;

**I.8.1.3. Contact ponctuel ou linéique**

Deux solides non conformes se touchent apparemment en un point, ou selon une ligne de contact. Si une force  $N$  est transmise de l'un à l'autre, on dit que la charge de contact est ponctuelle dans le premier cas (figure I.8), linéique dans le second (figure I.9). La charge de contact se répartit le long de la ligne de contact. Désignons par  $q$  la charge linéique répartie le long d'une ligne de contact de longueur  $l$  [14].



**Figure I.8 : Contact ponctuel.**



**Figure I.9 : Contact linéique**

Les dimensions de l'aire de contact, par exemple le rayon  $a$ , sont petites par rapport au rayon de courbure des surfaces ( $a \ll R$ ) (figure I.10).

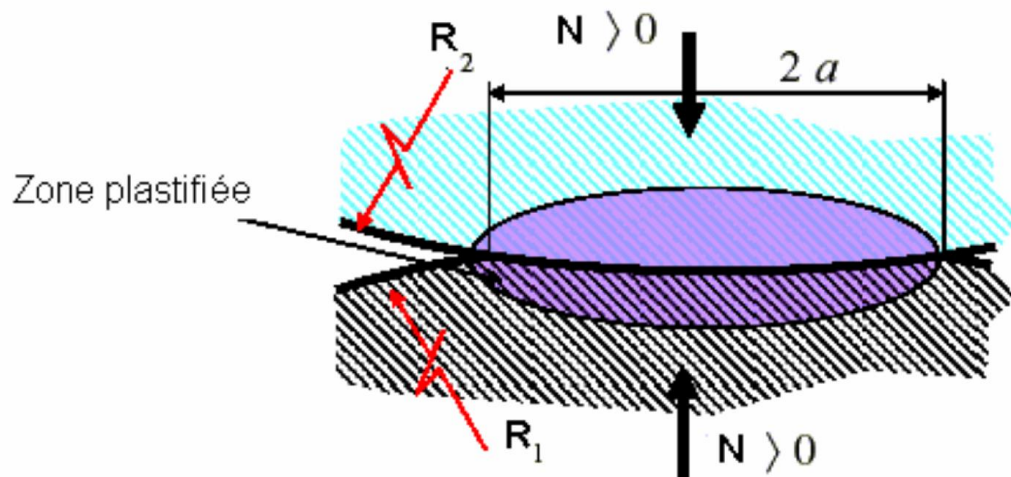


Figure I.10 : Déformation élastique de la surface de contact [15].

## I.9. Détermination de l'air de contact

### I.9.1. Contact extérieur entre deux sphères

Soit  $R_1$  et  $R_2$  le rayon de deux sphères (figure I.11),  $E_1$  et  $E_2$  les modules d'élasticité et  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  les coefficients de poisson de leur matériau.

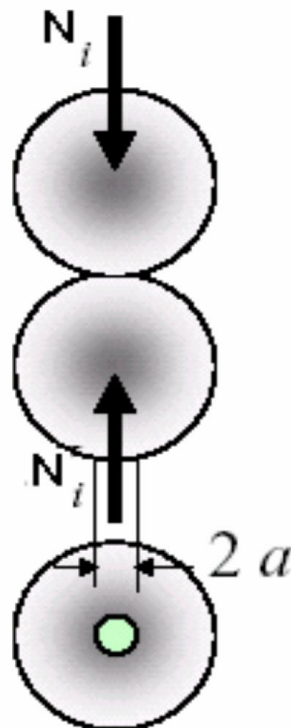


Figure I.11 : Contact extérieur de deux sphères.

- La surface de contact est un cercle de rayon

$$a = \left( \frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad \text{I.1}$$

- Le module d'élasticité équivalent :

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

- Le rayon équivalent :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{I.3}$$

Dans le cas particulier d'une bille (figure I.12) de rayon  $R_1$  sur un plan,  $R_2 = \infty$  donc  $R = R_1$

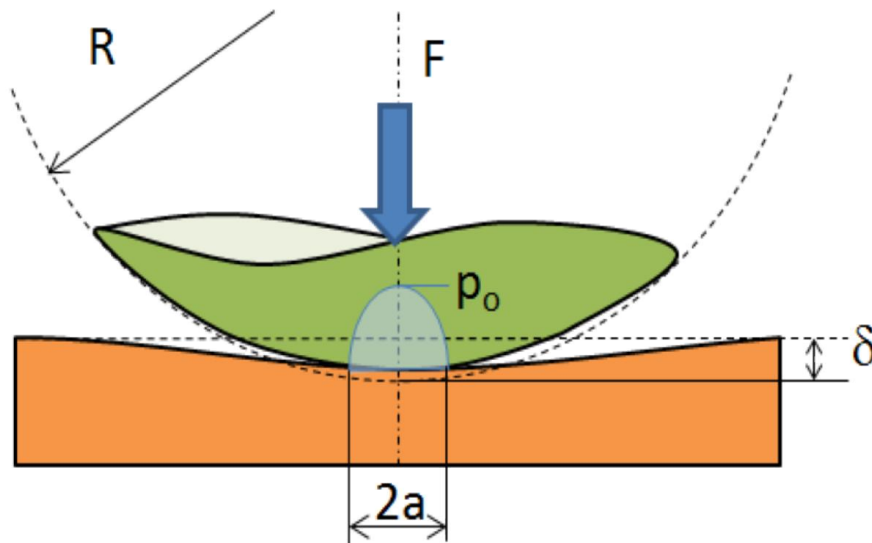
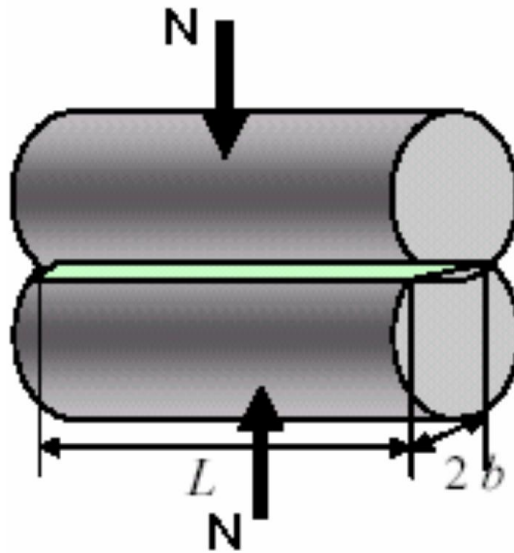


Figure I.12 : Configuration du contact sphère-plan.

Le rayon de contact a reste très petit, environ 2 :9% du rayon de la bille. Cette petite aire de contact conduit à une pression maximale de contact  $p_0$  gigantesque, proche de 1GPa. Cet exemple montre que des pressions de contact très élevées peuvent rapidement être atteintes dans les contacts localisés.

**I.9.2. Contact extérieur de deux cylindres parallèles**

La surface de contact est un rectangle de longueur  $L$  (longueur du cylindre le plus court) et de demi-largeur  $b$  (figure I.13).



**Figure I.13 : Contact extérieur de deux cylindres parallèles.**

➤ L'aire de contact  $A=2bL$

$$b = \sqrt{\frac{8F}{\pi \cdot L E \frac{1}{R}}} \quad \text{I.4}$$

**II.1. Introduction**

On peut considérer tous les aspects presque de nos vies sont affectés par les phénomènes de frottement, que ce soit de manières positive ou négative. Nous tenons en compte comme évident les effets positifs.

Rares sont les phénomènes qui sont conscients de l'importance du frottement dans la vie quotidienne. C'est le cas pour des opérations comme démarrer, arrêter, faire tourner une voiture, fixer des pièces, tenir un objet dans la main...etc.

**II.2. Définition du Frottement**

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui se manifeste lors du déplacement relatif de deux surfaces en contact [Rabinowicz, 1965].

Les normes définissent la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à un autre [16].

Le frottement est un processus dissipatif et l'énergie peut se manifester sous des formes variées : déformation (élastique, plastique); rupture (fissuration, émission de débris), échauffement, réactions chimiques (adhésion, oxydation), phénomènes acoustiques (vibrations, bruits), électricité statique, étincelles... [17].

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [18].

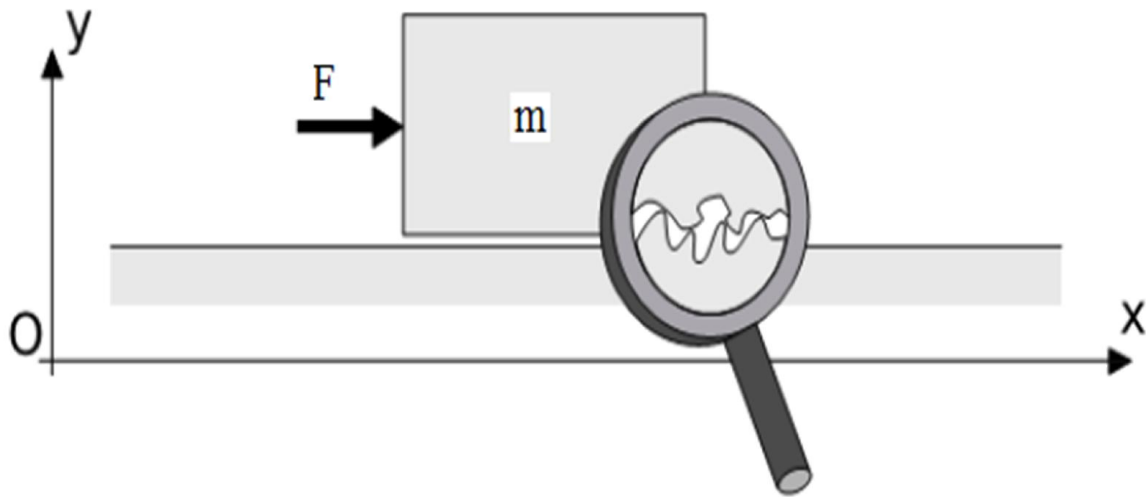
Pour présenter les différents phénomènes de frottements ainsi que leurs différents modèles, on s'intéresse à un mobile de masse  $m$  sur un plan horizontal. Il est soumis à son propre poids suivant l'axe (Oy) et subit une force  $u$  suivant l'axe (Ox). Comme sur la figure II.1, nous considérons un mouvement rectiligne.

Quel que soit le matériau d'un solide, sa surface n'est pas parfaitement lisse, elle est rugueuse, comportant des irrégularités dues à l'usinage de la pièce ou même à sa nature.

Lorsque deux pièces mécaniques en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre, ces aspérités se déforment et s'entrechoquent, dissipant ainsi de l'énergie.



Cette énergie est représentée de façon macroscopique par les frottements. Suivant les matériaux utilisés, il y aura soit plus de déformations élastiques soit plus de chocs pouvant aller jusqu'à arracher de la matière [19].



**Figure II.1 : Corps solide sur un support horizontal [20].**

Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [21].

### **II.3. Mécanismes de Frottement**

Sous l'effet des sollicitations tribologiques, une surface subit des modifications et endommagements dont les principales formes sont schématisées figure II.2. Les endommagements peuvent être décrits simplement en faisant appel à un nombre réduit de phénomènes élémentaires mécaniques, physiques ou chimiques.

Lorsque deux surfaces sont absolument pures elles adhèrent l'une contre l'autre dans le vide; il faut une certaine force de traction pour les séparer.

L'adhérence des métaux s'explique par la présence d'électrons libres à leur surface qui forment des filiations cristallines (jonctions cohésives) ou qui maintiennent les surfaces par des forces électrostatiques (jonctions adhésives).

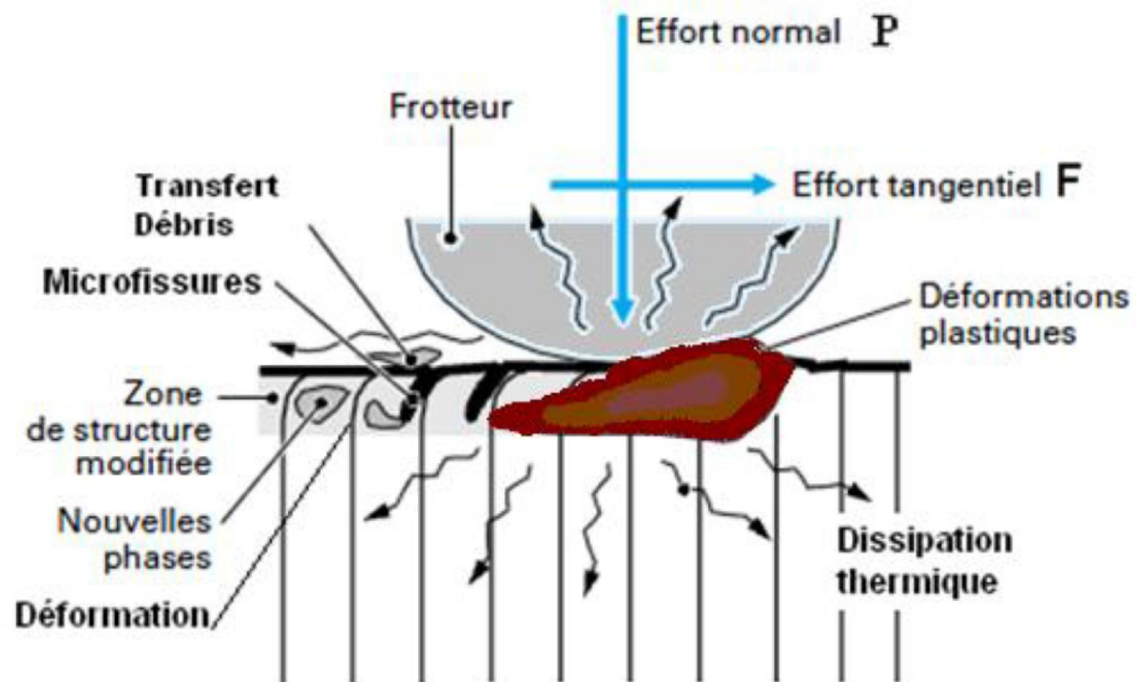


Figure II.2 : Endommagement d'un corps frottant.

## II.4. Nature de frottement

### II.4.1. Frottement sec

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans la zone de contact entre deux corps, en l'absence de lubrification, et qui s'opposent au glissement de ces corps. S'il y a glissement relatif entre les deux corps en contact, on parle du frottement dynamique, sinon le frottement est dit statique.

### II.4.2. Frottement hydrodynamique

Les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact par leurs aspérités parce qu'elles sont séparées par un épais film de lubrifiant. Le coefficient de frottement est faible et ce type de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [22].

### II.4.3. Frottement onctueux

C'est un frottement de niveau intermédiaire entre le frottement sec et hydrodynamique: le film du liquide absorbé en surface ou formé par réaction chimique est de faible épaisseur. Le

degré d'adhérence de ce film avec la surface détermine son efficacité. Ce régime offre un coefficient de frottement plus faible que le régime sec [22].

### **II.5. Force et coefficients de frottement**

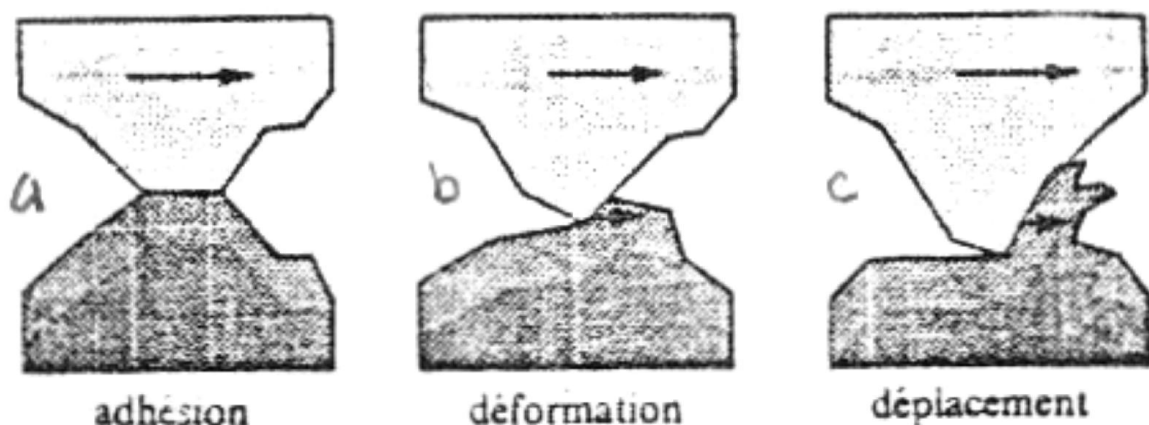
Les premiers travaux que l'on connaît sur le frottement sont ceux de Léonard de Vinci au début du 16ème siècle [23]. Mais, il faut attendre 200 ans pour que ces travaux aient un statut académique. En effet, Amontons, en 1699, puis Coulomb, en 1780, ont été les premiers à formuler les lois du frottement solide que nous connaissons actuellement.

Les lois d'Amontons se résument en deux postulats:

- La force de frottement  $F_t$  est proportionnelle à la charge normale appliquée  $F_n$ .
- La force de frottement  $F_t$  est indépendante de la surface apparente de contact.

Trois phénomènes physiques bien distincts, provoquent des pertes d'énergie lors du frottement entre deux solides rugueux et influencent aussi sur la valeur du coefficient de frottement.

- Formation et rupture des jonctions d'adhésion aux lieux de contact (Figure II.3a).
- Déformation élasto-plastique des aspérités (Figure II.3b).
- Déplacement de matière par labourage (Figure II.3c).



**Figure II.3 : Force et coefficients de frottement.**

La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [24]

$$F_t = F_{ad} + F_{d\acute{e}f} + F_{d\acute{e}f}$$

II.1

$F_{ad}$  : dû aux phénomènes d'adhésion.

$F_{déf}$  : dû aux déformations élastiques et plastiques des aspérités.

$F_{pl}$  : dû au déplacement de matière par labourage.

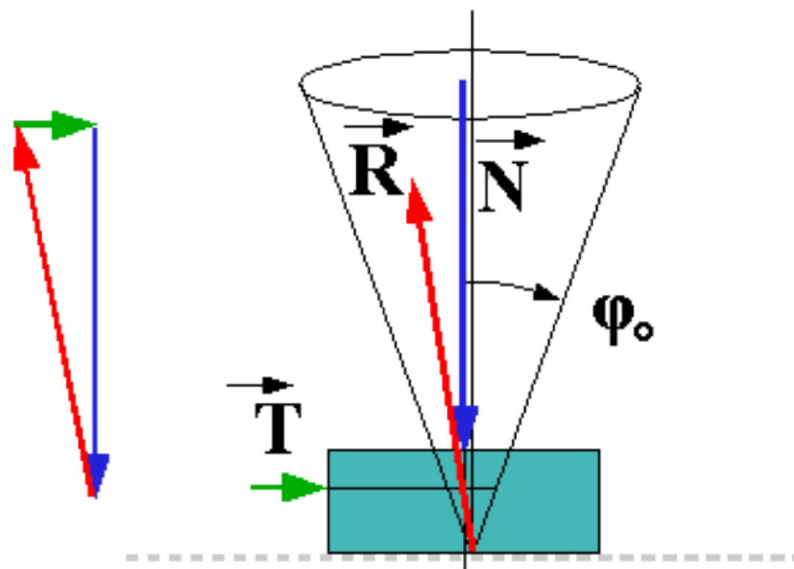
La première loi d'Amontons montre qu'il n'y aura pas de glissement entre deux solides en contact, tant que la force tangentielle  $F_t$ , nécessaire pour déplacer le solide, est inférieure à une force minimale  $F_s$ . Lorsque la force tangentielle atteint cette valeur seuil, la solide glisse.

$$F_s = \mu_s F_n \quad \text{II.2}$$

$\mu_s$  est appelé coefficient de frottement statique.

### II.5.1. Cône de frottement

Sur un cône d'axe normal au plan et de demi-angle au sommet  $r$ , que nous appelons cône de frottement (figure II.4).



**Figure II.4 : Cône de frottement.**

Retenons que :

- S'il y a un glissement, la force de contact est sur le cône de frottement, le coefficient de frottement correspond à une égalité :

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan \rho \quad \text{II.3}$$

(Le cône dans ce cas s'appelle cône d'adhérence).

- S'il n'y a pas de glissement, la force de contact est dans ou à la limite sur le cône, le coefficient d'adhérence correspond à une inégalité :

$$\mu_0 = \tan \rho_0 \geq \frac{F}{N} \quad \text{II.4}$$

### **II.6. Frottement de glissement**

Le frottement de glissement est le frottement qui se produit lorsqu'on déplace, sans la faire rouler, la surface d'un corps solide sur la surface d'un autre corps solide. C'est le type de frottement le plus fréquent : un piston glissant dans un cylindre, un arbre tournant à sec dans un palier et un traîneau glissant sur le sol produisent un frottement de glissement.

Lors de son étude, Léonard de Vinci a pu vérifier que la force de frottement de glissement  $F_{fg}$  est indépendante de l'aire de contact. Dans le contact surfacique c'est la rugosité des deux surfaces qui est considérée en premier lieu.

Lorsque deux corps sont mis en contact, les surfaces se touchent d'abord aux sommets des rugosités situées sur la crête des ondulations. Ceci établit un certain nombre de points de contact, ce qui définit l'aire apparente de contact ( $A_a$ ) et l'aire réelle de contact ( $A_r$ ). Dans la pratique  $A_r \ll A_a$ . Tel qu'illustré à la figure II.5 [25], [26].

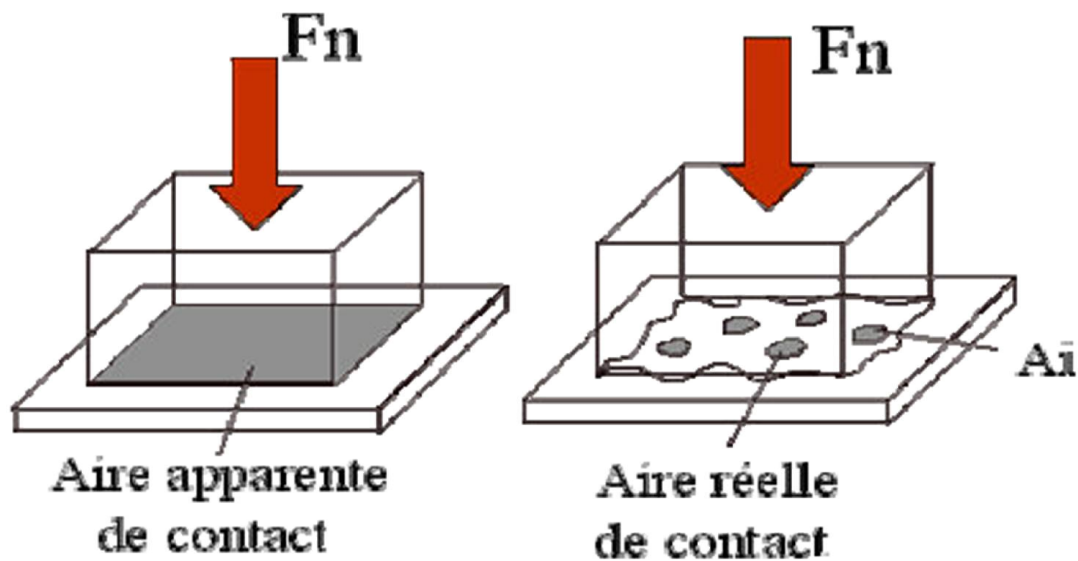


Figure II.5 : Aires de contact réelle et apparente.

Soit la surface réelle de contact  $A_r$  en présence d'une force tangentielle, on a la charge normale transmise par l'aspérité :

$$N = P_r A_r \quad \text{II.5}$$

$P_r$  : Pression de contact.

La force de cisaillement du film :

$$T = \tau_f A_r \quad \text{II.6}$$

$\tau_f$  : Contrainte de cisaillement du matériau le moins résistant.

La force normale peut être liée à la résistance à la pénétration

$$N = A_r H \quad \text{II.7}$$

$H$  : La dureté du matériau le plus mou.

Le coefficient de frottement

$$\mu = \frac{T}{N} = \frac{\tau_f \cdot A_r}{A_r \cdot H} = \frac{\tau_f}{H} \quad \text{II.8}$$

Ce résultat a été démontré par BOWDEN et TABOR (1950).

- si l'on veut avoir une force de frottement minimale, il est nécessaire de minimiser l'aire de contact réelle et la contrainte de cisaillement
- Pour minimiser l'aire de contact, on utilise les métaux durs, comme les aciers trempés.

Pour minimiser le cisaillement, on recouvre le contact d'un film mince réalisé avec un

- métal tendre comme le plomb ou l'argent.

### **II.7. Valeurs pratiques du coefficient de frottement**

L'étude théorique des mécanismes du frottement sec et mixte ne permet pas de prédire avec exactitude la valeur réelle du coefficient de frottement dans les couples cinématiques et dans les assemblages. Mais la compréhension du phénomène est précieuse pour choisir correctement les matériaux et savoir comment agir pour obtenir les caractéristiques de frottement souhaitées.

Le tableau II.1 donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux [27].

Matériau 1	Matériau 2	Statique	Dynamique
Acier doux	Acier doux	0.75	0.57
Acier doux	Fonte	0.75	0.23
Acier doux	Aluminium	0.60	0.47
Acier doux	Bronze	0.50	0.45
Acier durci	Acier durci	0.78	0.42
Acier durci	Régule	0.70	0.35
Fonte	Fonte	1.1	0.15
Aluminium	Aluminium	1.4	1.1
Téflon	Téflon	0.10	0.05
Téflon	Acier	0.05	0.05

**Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement.**

### **II.8. Modèle énergétique**

L'usure des matériaux en contact glissant contribue, avec l'échauffement, à dissiper l'énergie de frottement entre les deux matériaux. M. Z. Huq et al. [28] proposent une procédure pour corréler le volume d'usure de l'un des premiers corps à l'énergie dissipée, lors des essais de frottement bille-sur-disque. Ceci est appuyé par le fait que l'énergie dissipée par frottement peut conduire à une usure (fissuration, déformation plastique, réactions tribochimiques). Les mécanismes d'usure sont gouvernés par la température de contact, les transformations de

microstructure, la formation de films tribochimiques, les soudures des surfaces en contact, ou encore les ruptures liées aux contraintes thermiques et mécaniques. L'augmentation locale de la température et la perte de matière dans la piste de frottement résulteraient de l'énergie de frottement dissipée dans l'aire de contact.

Diverses méthodes de calcul de l'énergie dissipée dans différents contacts tribologiques sont proposées dans la littérature [29]. Les influences des divers paramètres des essais de frottement, par exemple mode de glissement, charge normale et combinaison de matériaux ont été examinées.

En fait, l'augmentation de la température locale et la perte de matière dans les pistes d'usure résultent d'une dissipation de l'énergie de frottement dans la zone de contact. La quantité de chaleur générée par le frottement, par unité de surface et de temps s'exprime sous la forme :

$$q = \frac{\mu \cdot N \cdot V}{Aa} \left[ \frac{\text{joule}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{ou} \quad \left[ \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{II.9}$$

Avec  $\mu$  le coefficient de frottement,  $N$  la charge normale appliquée sur le frotteur,  $V$  la vitesse de glissement et  $Aa$  l'aire apparente du contact [29].

L'équation peut aussi s'écrire de la façon suivante :

$$q = \mu \cdot pV \quad \text{II.10}$$

### **II.8.1. Energie de frottement cumulée**

Diverses méthodes de calcul de l'énergie dissipée dans différents contacts tribologiques sont proposées dans la littérature [30]. Les influences de divers paramètres des essais de frottement, par exemple mode de glissement, charge normale et combinaison de matériaux ont été examinées. En fait, l'augmentation de la température locale résulte d'une dissipation de l'énergie de frottement dans la zone de contact. Mohbacher [31] a introduit le concept d'énergie dissipée cumulée,  $E_d$  l'appliquant à des conditions de contact glissant.  $E_d$  étant proportionnelle à la force tangentielle, à la longueur du déplacement d'un cycle et au nombre de cycles accomplis, en fonction des cycles de déplacement :

$$E_d = \sum F_T d \quad \text{II.11}$$



**II.8.2. Puissance moyenne de frottement  $P_f$** 

Est le rapport entre l'énergie de frottement  $E_d$  et la durée  $t$  de l'essai :

$$P_f = \frac{E_d}{t} \quad \text{II.12}$$

**III.1 Introduction**

L'usure est un ensemble complexe des phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission des débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant des transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle est souvent définie par la perte de matière ou de fonction d'un mécanisme suite à une détérioration due au frottement. Il n'existe pas d'unité standard de l'usure : l'unité la plus souvent utilisée est le taux d'usure généralement exprimé par la masse perdue rapportée à la distance parcourue ou à la surface de contact. Ce taux d'usure peut être inadapté dans plusieurs cas à cause de la diversité des mécanismes, des sollicitations et des mécanismes de dégradation [32].

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

L'évolution de la perte de matière d'un organe mécanique en fonction du temps présente généralement trois phases distinctes [33].

- rodage : est une phase d'adaptation des surfaces souvent caractérisée par une usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante ;
- marche normale : correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. La perte de matière est faible, régulière et fonction sensiblement linéaire du temps ;
- vieillissement : traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée qui tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement (jeux exagérés, lubrification inefficace, efforts élevés et endommagement des surfaces).

**III.2. Définition de l'usure**

L'usure est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement relatif (l'une par rapport à l'autre) [34].

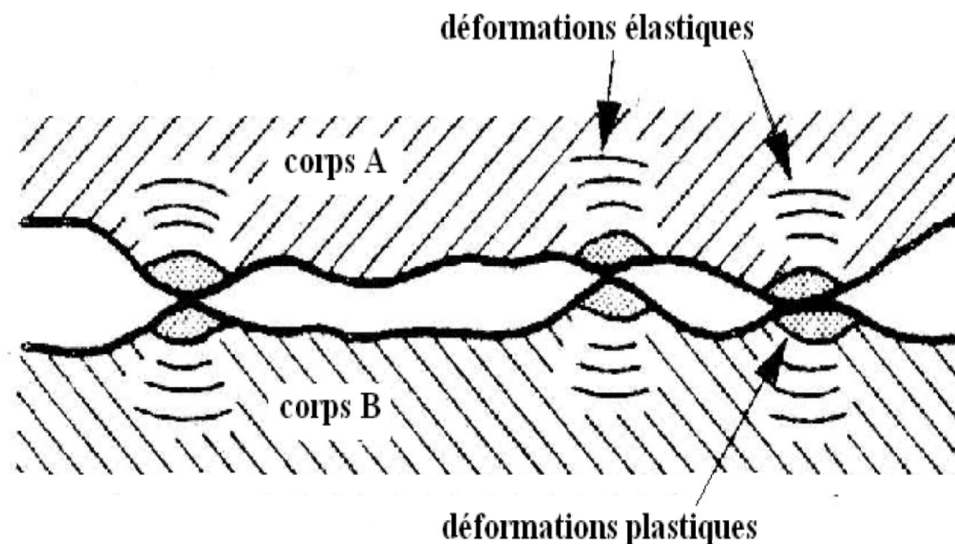
L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces [35].

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables tels que l'affûtage des outils, la finition d'une surface par rectification. L'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles [36].

### **III.3. Type de l'usure**

#### **III.3.1. Usure adhésive**

L'usure adhésive se caractérise par des jonctions interraciales qui s'établissent entre les aspérités des surfaces en contact. Ces aspérités sont soumises à des contraintes locales élevées et subissent des déformations élastiques et plastiques qui provoquent un rapprochement des atomes et la création de liaisons inter faciales (Figure. III.1).



**Figure III.1: Contact de deux corps solides [37].**

Ce type d'usure se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico chimique. Pour le transfert mécanique, plusieurs hypothèses ont été développées [38]. Les micro-aspérités présentes dans le contact peuvent conduire à la diminution des zones en contact et générer aux jonctions des énergies très élevées qui peuvent favoriser les réactions physico-chimiques (micro-soudage des aspérités en contact).

La (figure III.2) est un exemple de transfert métallique adhésif : une coupe métallographique, pratiquée dans la première gorge d'un segment de moteur Diesel, représente un fragment

d'alliage léger de piston (métal le plus tendre) transféré, après cisaillement d'une jonction adhésive, sur la surface dure du flan intérieur du segment en fonte à graphite lamellaire

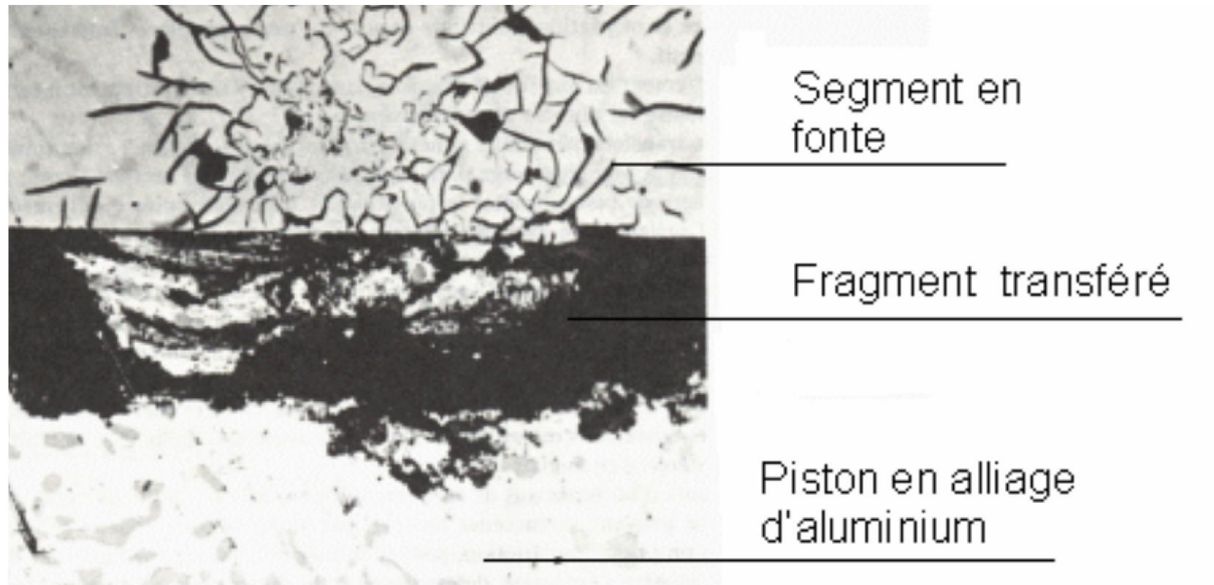


Figure III.2 : Transfert métallique adhésif ( $\times 1000$ ) [39].

## Modélisation de l'usure adhésive

### III.3.2.1. Modèle d'Archard

Le contact avec frottement entre deux corps entraîne une usure des surfaces en contact. Le modèle le plus souvent utilisé pour modéliser l'usure est la loi d'Archard [40]. Ce modèle permet de calculer l'évolution de l'usure dans le temps et ainsi modifier le déplacement des surfaces de contact en fonction de cette usure. En effet, Archard [40] a proposé une modélisation empirique de la phase linéaire de l'usure. Cette modélisation s'appuie d'une part sur le fait que le contact des surfaces ne se fait que par un nombre réduit d'aspérités réparties aléatoirement sur la surface et d'autre part que ces aspérités doivent supporter la charge et maintenir les déformations dans le domaine d'élasticité. Ils supposent donc que le volume usé est proportionnel à la charge appliquée à la distance parcourue et inversement proportionnel à la résistance mécanique des matériaux exprimée par la limite de fluage en compression assimilée à la dureté. Dans ce modèle, le volume d'usure  $V$  s'écrit sous la forme :

$$V = \alpha \frac{K}{3} \cdot \frac{NL}{H} \quad \text{III.1}$$

**$V$**  : Taux d'usure adhésive ou le volume arraché [ $\text{mm}^3$ ].

**$\alpha$**  : Coefficient caractérisant le type de frottement.  $\alpha = 1$  pour le frottement sec ou à très faible vitesse et  $1 < \alpha$  Pour le frottement lubrifié.

**3** : Facteur de forme pour une particule d'usure de forme hémisphérique, ce facteur est différent de 3 pour les autres formes de particule.

**$N$**  : Charge normale appliquée [N].

**$L$**  : Distance de glissement [m].

**$H$**  : Dureté du matériau le plus tendre dans le contact.

**$K$**  : Considéré comme le coefficient d'usure, varie de 0.1 à 0.01 pour l'usure sévère (frottement sec, contact métal-métal), il est de l'ordre de  $10^{-5}$  en régime d'usure modérée (frottement lubrifié, surfaces oxydées) et peut atteindre  $10^{-6}$  à  $10^{-7}$  pour un frottement bien lubrifié [41].

Le coefficient d'usure varie lui-même avec les autres paramètres tribologiques comme l'environnement, la nature des corps frottants, la vitesse de glissement, la charge normale.

D'après la loi d'Archard précédente on peut tirer le suivant :

- Le taux d'usure est généralement proportionnel à la charge normale  $N$  ;
- Le taux d'usure est généralement proportionnel à la distance de glissement  $L$  ;
- Le taux d'usure est généralement inversement proportionnel à la dureté de la surface  $H$ .

### **III.3.1.2. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers**

Les aciers au carbone, à l'état recuit, sont moins sujets à l'usure adhésive que les aciers austénitiques ou la ferrite, en effet, la structure perlitique des aciers limite l'adhésion, la soudure aura lieu seulement dans la phase ferrite ou dans la phase austénite. C'est pour cela, l'augmentation de la teneur en carbone qui a pour effet de réduire la ferrite et d'augmenter la dureté est utile.

Généralement, les structures : perlitique, martensitique et bainitique des aciers, très fines et pluriphasées se comporte mieux que les structures ferritique et austénitique monophasées et constituées de gros grains.

Une forte dureté et la présence de carbures métalliques dans l'acier augmentent la résistance à l'usure. Pour les aciers à outils, la résistance à l'usure dépend plus de la qualité des carbures précipités durant la trempe.

Les éléments d'additions tels que le Chrome Cr, le Vanadium Va, le tungstène Tu le molybdène Mo...etc, Contribuent à améliorer la résistance à l'usure des aciers par leurs effets sur l'affinage du grain et sur le durcissement structural de la matrice.

L'austénite résiduelle, produite par des fortes températures de trempe, a un effet néfaste [13].

### **III.3.2.3.Comment lutter l'usure adhésive**

Vu le grand nombre de paramètres qui influencent sur le frottement et l'usure, il est difficile de formuler des règles très précises. L'empirisme joue un grand rôle dans ce domaine.

. Au niveau de la conception technologique et géométrique des surfaces de contact, il est possible de prévenir l'usure adhésive en diminuant les échauffements inter faciaux dus au frottement par :

- La limitation de la distribution des pressions de contact et/ou des vitesses de glissement  $PV$
- L'assurance d'un refroidissement convenable des surfaces.

. Au niveau du choix des matériaux des surfaces en frottement sec ou limite, il y a intérêt à utiliser des couples de matériaux possédant de faibles interactions, donc une énergie d'adhésion  $abW$  faible c'est-à-dire des matériaux ne donnant pas lieu à des soudures en phase solide comme : bronze-acier, chrome-fonte, matériaux plastiques-métaux. On évite le contact de métaux identiques car ils tendent à se souder; un métal capable de céder des électrons se lie plus fortement au fer qu'un métal passif ou inerte. C'est pourquoi l'aluminium ; plus électropositif que le Chrome, risque fortement de gripper avec l'acier. Le plomb, l'étain, le cuivre et l'argent sont chimiquement peu actifs, on les utilise dans les coussinets.

Les matériaux à structure cristalline hexagonale présentent une adhérence petite que les matériaux à structures cubiques.

Les surfaces métalliques exposées à l'air se recouvrent rapidement d'un film d'oxyde environ 5nm d'épaisseur qui contamine assez la surface pour éviter l'adhésion.

En frottement mixte, les surfaces lubrifiées n'adhèrent pratiquement pas. L'usure se produit surtout par abrasion, l'interposition d'un film d'huile suffisamment résistant pour prévenir les contacts métal-métal.

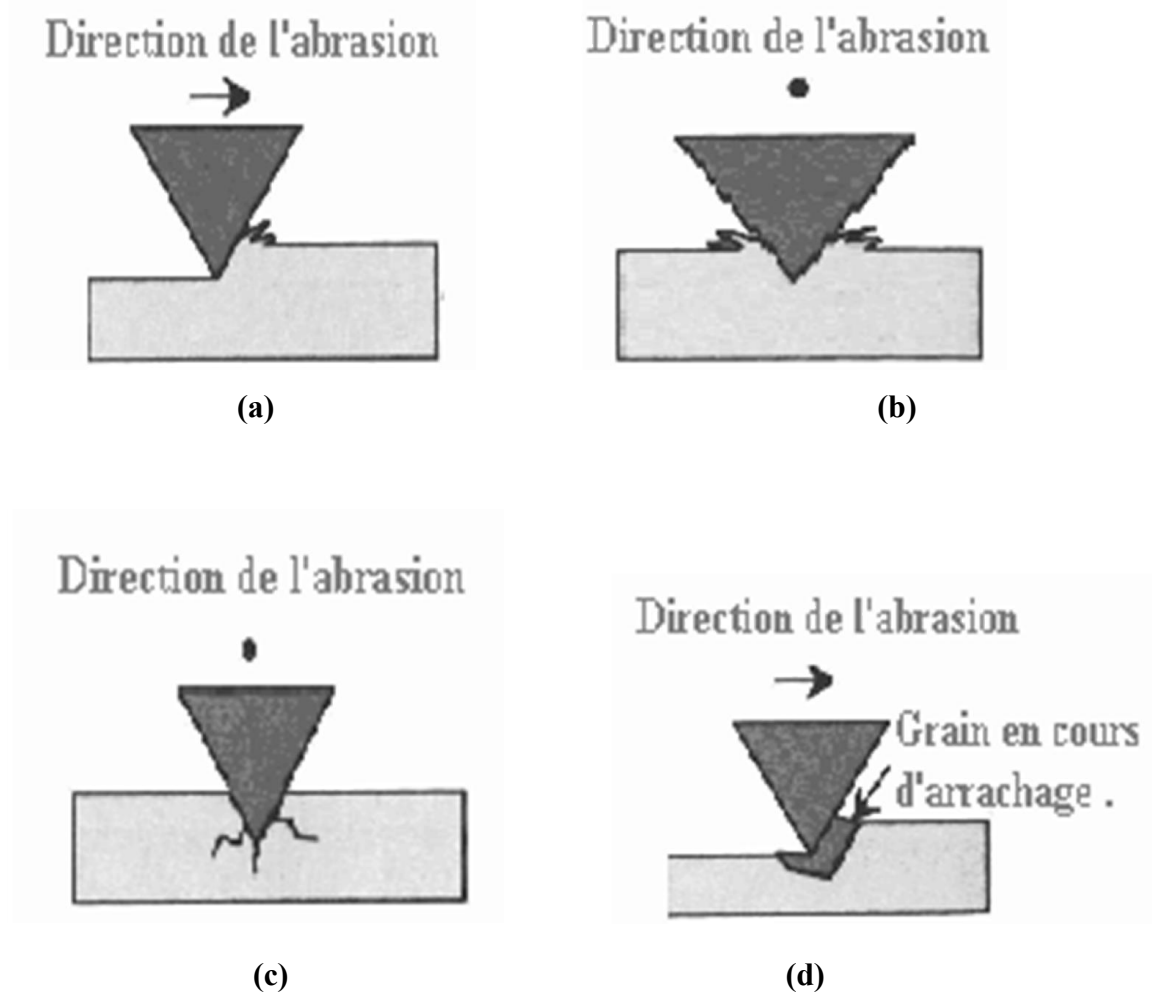
Il y a également intérêt à utiliser des matériaux durs afin de diminuer le taux d'usure. Ce qui explique l'utilisation des aciers trempés, cimentés, nitrurés et carbonitrurés.

**III.3.2. Usure par abrasion**

L'usure abrasive est due au contact par pénétration des aspérités du matériau dur dans le matériau le plus tendre provenant des débris d'usure, ou plus généralement un troisième corps introduit dans le contact.

L'endommagement subi par la surface se présente sous la forme de stries parallèles à la direction de glissement. En fonction de la sévérité du contact, plusieurs transformations de la surface abrasée se produisent. Elles dépendent des propriétés mécaniques et de la géométrie des matériaux en contact. Si la surface du solide sollicité est considérée comme parfaitement plane, les endommagements suivants peuvent être observés (Figure III.3) :

- coupe, si l'abrasif est suffisamment aiguïté (Figure III.3.a) ;
- repoussage de la matière en surface (Figure III.3.b) ;
- fracturation, si le solide est fragile (Figure III.3.c) ;
- enlèvement de grains, si le matériau est insuffisamment homogène (Figure III.3d).



**Figure III.3 : Schémas des mécanismes d'usure abrasive : a : découpe, b : fracture, c : fatigue, d : arrachage [42].**

Lors de l'abrasion d'une surface, l'abrasif provoque soit la formation d'un copeau qui enlève directement de la matière, il se produit alors de l'abrasion par découpe, soit la formation d'un bourrelet plastique sur les bords de la rayure et le passage répété d'aspérités enlève celui-ci : c'est l'abrasion par fatigue.

La fatigue de la surface d'un matériau abrasé est analogue à ce qui est observé pour les matériaux soumis à des sollicitations volumiques. Le passage répété de l'abrasif provoque la propagation des fissures dans le matériau à partir de défauts initialement présents dans celui-ci.

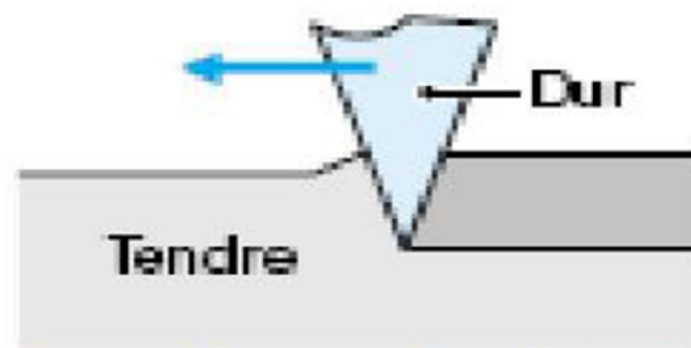
L'étude de l'écoulement de la matière en fonction des conditions de sollicitations permet de mieux comprendre l'usure abrasive. Elle dépend des propriétés mécaniques du matériau et de la géométrie de l'indenteur utilisé (celui-ci imposant une déformation et une vitesse de déformation). La mesure du coefficient de frottement permet aussi d'estimer la dissipation d'énergie dans le système lors du test de rayage, c'est pourquoi, pour modéliser le rayage, ont introduit des grandeurs telles que l'énergie d'abrasion ou la dureté à la rayure.

#### **III.3.2.1. Aspects tribologiques de l'usure abrasive**

Il convient de distinguer deux processus d'abrasion des surfaces de frottement :

- Usure abrasive se fait par les aspérités ou protubérances dures d'une des surfaces sur l'autre plus tendre, appelée "abrasion à deux corps" (figure III.4) Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

En général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région inter lamellaire où les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles [43].



**Figure III.4 : Usure abrasive à deux corps [44].**



Usure abrasive dite "à trois corps" provoquée par des particules dures (figure III .5) soit véhiculées entre les deux surfaces en contact, soit enchâssées dans l'un d'elles, généralement la plus tendre. L'accumulation de débris d'usure entre les corps finit par constituer une couche intermédiaire, le troisième corps. Selon Johnson, le cisaillement de la couche intermédiaire est la principale source de frottement. Le rodage, le polissage à la pâte ou à la poudre sont des genres d'usure abrasive à trois corps.

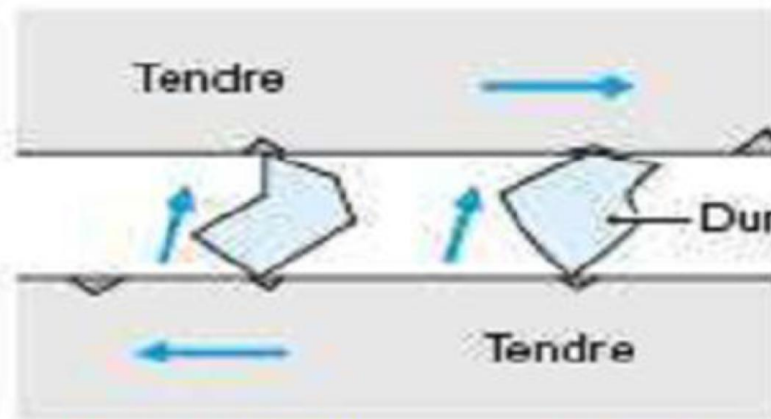


Figure III .5 : Usure abrasive à trois corps [46].

D'après TABOR, la dureté des particules est en moyenne de 20% supérieure à celle de la surface initiale [41].

La (figure III .6.a) montre l'effet produit par une aspérité dure ou le grain abrasif peut être assimilé à un outil de coupe élémentaire, il provoque sur la surface sur lequel il frotte une rayure (sillon d'abrasion) comme l'indique la (figure III .6.b).

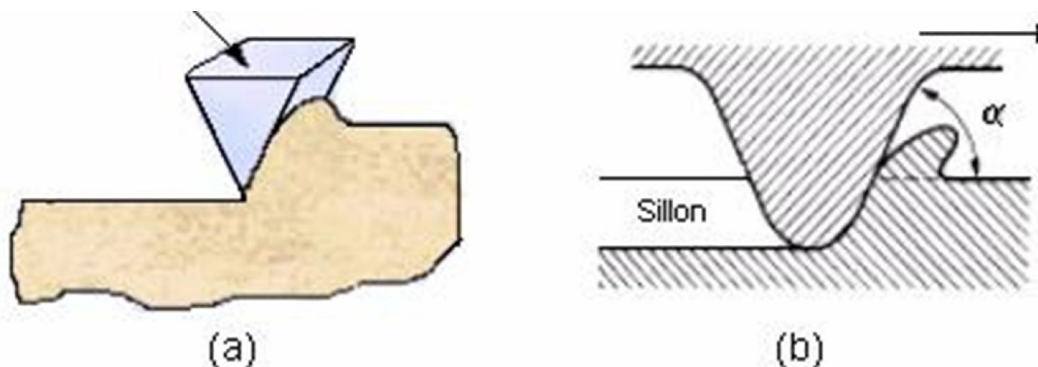
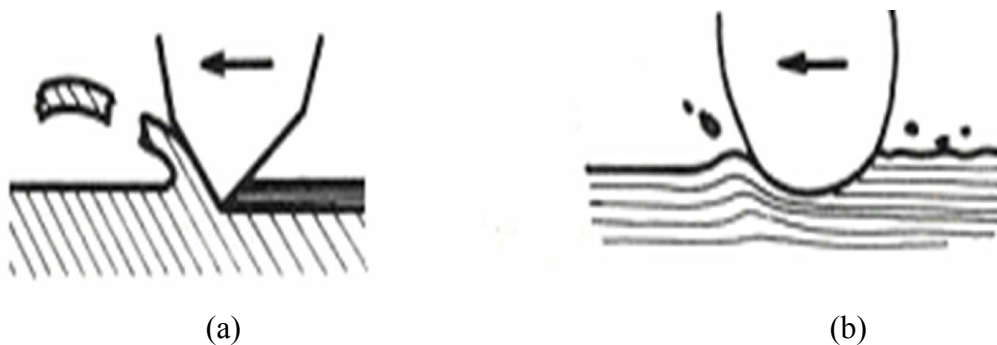


Figure III .6 : Effet d'une aspérité (a) outil de coupe ;(b) sillon d'abrasion [47].

La quantité du métal du sillon abrasif éliminé de la surface sous forme de particules d'usure par rapport à celle affectée par la déformation plastique est relativement faible, environ 10% à 20% en moyenne. Cette quantité enlevée dépend de nombreux paramètres et plus particulièrement par :

- La dureté relative de la surface abrasée et de l'abrasif. Lorsque la dureté de la surface rayée approche celle de l'abrasif, celui-ci s'émousse, diminuant son aptitude à la coupe.
- La forme de la partie active de l'abrasif, si elle présente des angles vifs, convenablement orientés par rapport au sens de glissement (figure III .7. a), l'abrasion sera analogue à un processus de coupe et la trace laissée sera désignée comme une rayure de microscope, contrairement, si elle est arrondie est polie, il y'aura un très peu de matériaux enlevé (figure III .7. b).



**Figure III.7 : Mécanisme de l'abrasion par; (a) coupe ;(b) déformation plastique [41].**

- Si les grains abrasifs roulent entre les deux surfaces provoquent moins d'usure que s'ils glissent ou s'incrudent dans l'une des deux surfaces.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'abrasif et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

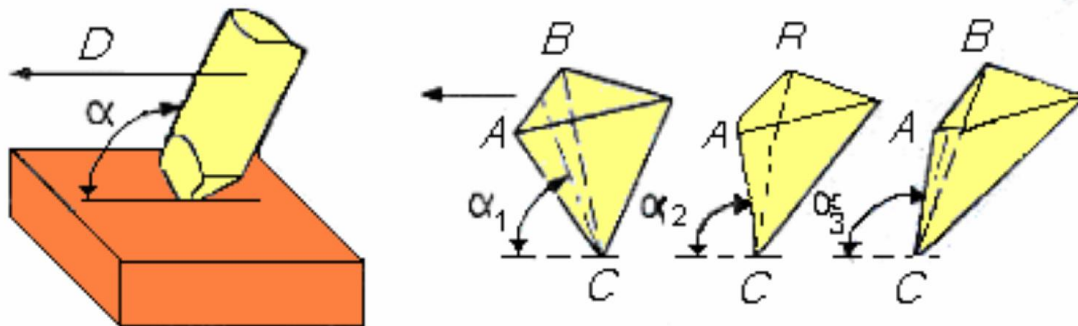
- S'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes.
  - S'ils sont isolés, et interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces se sont plus ou moins incrustées.
- . S'ils sont continus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre.
- . S'ils sont continus aussi et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure et sa surface de contact est rugueuse.

Pour rayer une surface il suffit d'une autre plus dure de 20% à 25%.

### III.3.2.2. Influence de l'angle d'attaque sur l'usure abrasive

La particule ou le grain abrasif doit avoir des angles aigus et être convenablement orienté. Cette condition est mise en évidence par l'expérience suivante :

Une tige à pointe pyramidale raye sous une charge donnée la surface plane d'un échantillon métallique (figure III.8).



$D$  : sens du déplacement  $A C B$  : face d'attaque

**Figure III.8 : Angle d'attaque  $\alpha$  d'une particule.**

Le déplacement de la tige est parallèle à la surface. Les courbes indiquées sur la figure III.9 montrent l'évolution de la section droite de la rayure en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  de la face d'attaque du frotteur par rapport au plan. On remarque, qu'à partir d'un angle critique  $\alpha_c$ , la largeur de la rayure s'augmente et correspond à l'apparition d'un copeau, c'est-à-dire le passage de la déformation par rayure à la production d'un copeau.

Si l'angle d'attaque  $\alpha$  est inférieur à  $\alpha_c$ , il n'y a pas de copeau.

Si l'angle d'attaque  $\alpha$  est supérieur à  $\alpha_c$ , il se produit de copeau.

Les deux courbes I et II représentent la formation d'une rayure par enlèvement de métal, par contre, la courbe III donne la production d'une rayure sans enlèvement de métal.

Les paramètres (facteurs) de l'usure appliqués sont : la charge est 2 N, la vitesse d'abrasion vaut 0,5 mm / s, la nature du matériau de frotteur est le carbure de tungstène et la piste est en plomb.

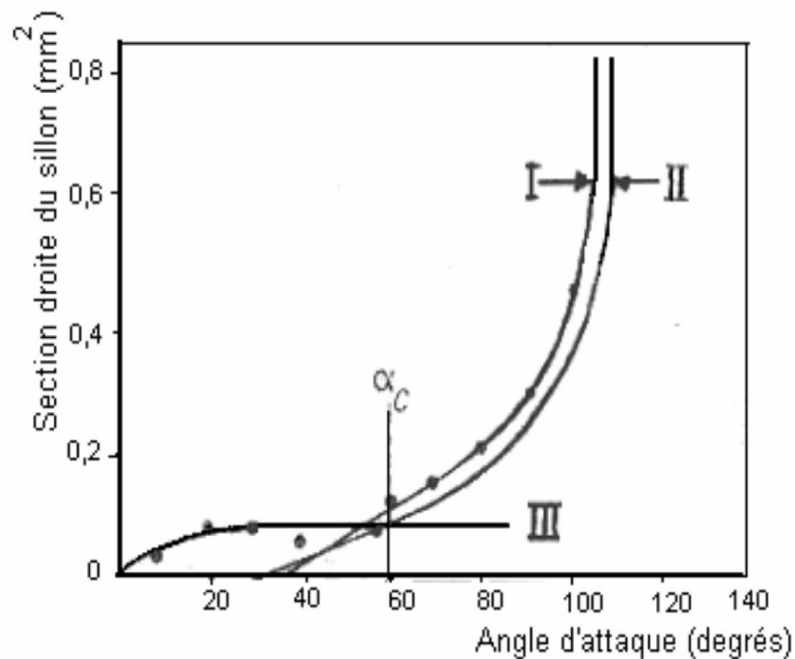


Figure III.9 : Section droite du sillon en fonction de l'angle d'attaque [15].

### III.3.2.3. Aspect Métallurgique de l'usure abrasive des aciers

Il est à noter que la résistance à l'usure des aciers recuits est proportionnelle à leur dureté, pour chaque type d'aciers trempés, la relation résistance à l'usure-dureté est linéaire mais possède une pente plus faible que celle des métaux recuit (figure III.10).

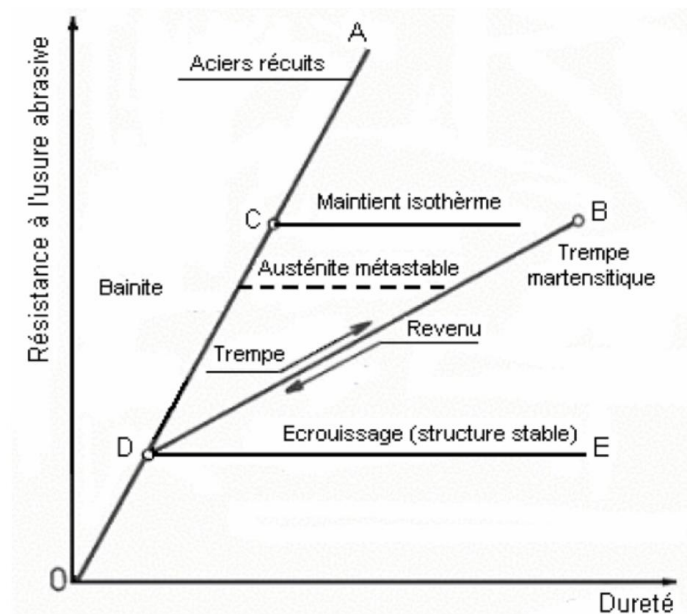


Figure III.10 : Résistance à l'usure abrasive  $\varepsilon$  en fonction de la dureté due par traitement thermique des aciers au carbone

### III.4. Modélisation de l'usure abrasive

Nous pouvons analyser un modèle simple d'usure par abrasion [46], en considérant un processus de microcoupure réalisé par une aspérité conique d'une surface dure dans la surface plus faible d'un second corps (Fig. III.11). Le sommet de la rugosité de la surface du corps (1) du couple de frottement pénètre dans la surface du matériau (2) de ce couple de dureté HB

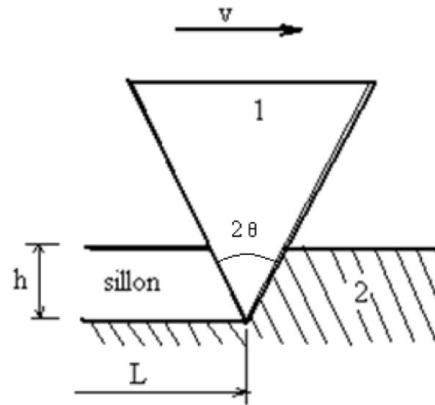


Figure III.11. Couple cône (dur)-surface plus tendre.

Les éléments géométriques du modèle présenté dans la figure III.11 sont :

- la profondeur  $h$  de pénétration de la pointe conique des aspérités dans la surface plus faible,
- le demi-angle  $\theta$  de la pointe du cône,
- la distance  $L$  parcourue lors du mouvement relatif.

Nous déduisons que :

$$h = \frac{r}{\tan \theta} [\text{mm}] \quad \text{III.2}$$

- Le volume de matériel enlevé par abrasion est :

$$\Delta V = \frac{2rh}{2} d = r \cdot h \cdot d = \frac{r^2 d}{\tan \theta} [\text{mm}^3] \quad \text{III.3}$$

Il y a usure entre le corps (1) et les  $n$  sommets supposés identiques du corps (2); le volume de matériel enlevé par abrasion est donc :

$$V = \frac{r^2 d}{\tan \theta} [\text{mm}^3] \quad \text{III.4}$$

En considérant que la rugosité provoque une déformation plastique de la surface du corps (2) (la pression de contact étant égale à la dureté HB) nous déduisons:

- pour un sommet:

$$P_i = \frac{\pi r^2}{2} HB \text{ [N]} \quad \text{III.5}$$

Où le rapport  $\pi r^2/2$  représente la projection sur le plan horizontal de l'aire de contact;

- pour les n sommets, la relation (III.5) devient:

$$P = n P_i = \frac{\pi r^2}{2} HB \text{ [N]} \quad \text{III.6}$$

Nous éliminons r en combinant les relations (III.4) et (III.6) nous obtenons:

$$V = \frac{2}{\pi \tan \theta} \frac{Pd}{HB} [\text{mm}^3] \quad \text{III.7}$$

Si nous considérons qu'une partie des aspérités du corps plus dur, représentée par une fraction k de la surface, réalise la microcoupure de la surface du corps le plus tendre, il en résulte:

$$V = \frac{2}{\pi \tan \theta} k \frac{PL}{HB} [\text{mm}^3] \quad \text{III.8}$$

Nous notons :

$$\frac{2}{\pi \tan \theta} k = k^* \quad \text{III.9}$$

Nous obtenons alors :

$$V = k^* \frac{PL}{HB} [\text{mm}^3] \quad \text{III.10}$$

C'est une relation analogue à celle déduite dans le cas de l'usure par adhésion, où k est le coefficient d'usure.

### III.5.Circuit tribologique

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumis à des gradients de vitesse. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de circuit tribologique, concept proposé par Y. Berthier [47] pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et

comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire (Figure III. 12).

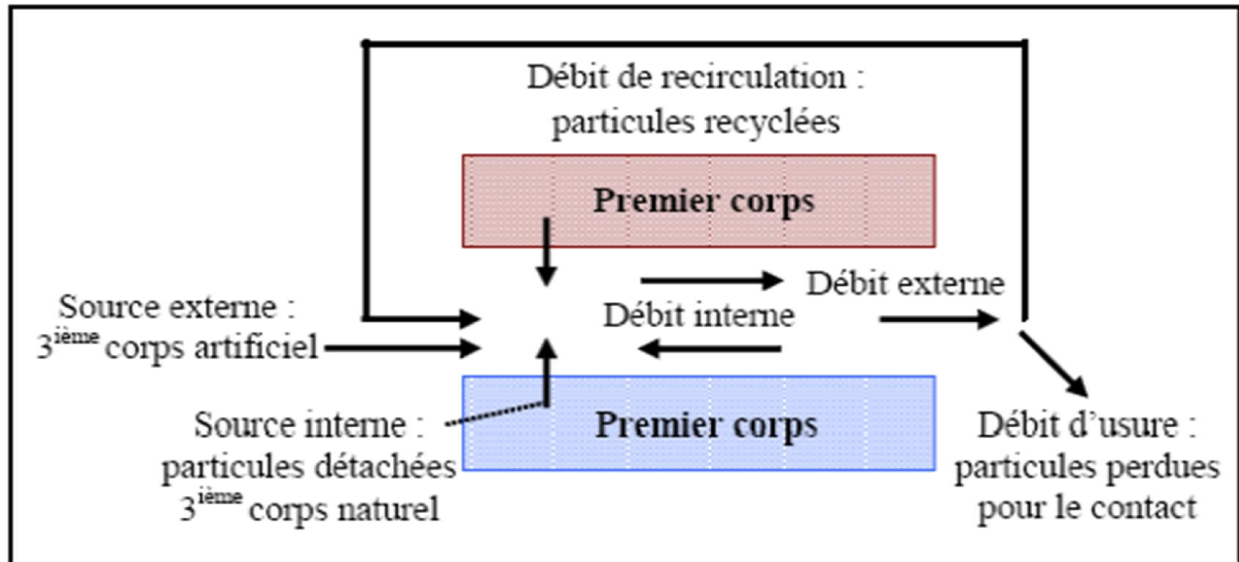


Figure III.12 : Circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides [47]

Suivant les mécanismes de dégradation de surface, des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation. Il s'agit d'une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne). L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe). Ces particules de troisième corps peuvent rester piégées dans le contact Ou bien être évacuées hors du contact. On parlera alors de débit interne et externe. Le débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact. Le débit externe est le débit de troisième corps qui s'échappe du contact. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse [48].

### IV.1.Introduction

Les méthodes analytiques ont essentiellement été développées et utilisées pour des contacts de géométrie simple de corps massifs. De plus, les études analytiques de contact ont souvent été réalisées en statique comme en dynamique. Des études analytiques menées donnent une bonne approximation des grandeurs globales telles que : la pression de contact maximale, l'aire de contact.

### IV.2.Application d'un effort normal

La théorie de Hertz montre que lorsque deux solides de révolution sphérique sont mis en contact sous l'effet d'un effort normal, l'aire de contact est un cercle (Figure.IV.1) Les relations de Hertz permettent d'établir différentes relations en fonction de l'effort normal, des propriétés élastiques et de la géométrie de contact. Considérons le contact sphère-plan à pression normale.

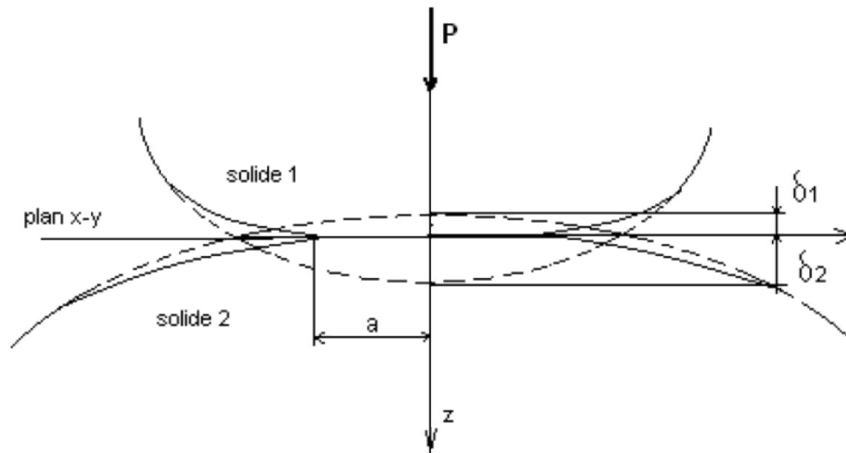


Figure IV.1 : Contact de Hertz

La pression maximale  $P_0$

$$P_0 = \left( \frac{6PE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad \text{IV.1}$$

Avec  $E^*$  est le module d'Young équivalent

$P$  est la charge normale appliquée.

Le rayon de contact  $a$  est donné par :



$$a = \left( \frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad \text{IV.2}$$

L'aire de contact réelle :

$$A_r = \pi a^2 \quad \text{IV.3}$$

Le coefficient de frottement théorique :

$$\mu_{th} = \frac{1,5 \tau_{max} A_r}{P}$$

Avec  $\tau_{max}$  est la contrainte maximale de cisaillement

### IV.3. Modelisation du coefficient de frottement

La construction du modèle théorique passe tout d'abord par l'analyse des résultats recherchés. Le modèle théorique doit répondre à certains critères de validation avant que nous puissions utiliser ses résultats dans le modèle de frottement. Il faudra alors vérifier la convenance du modèle vis-à-vis des résultats expérimentaux pour construire une simulation proche de la réalité.

Dans notre cas, nous avons calculé le coefficient de frottement Théorique en utilisant les équations précédentes

Le tableau IV.1 contient des résultats expérimentaux qui se fondaient sur des expériences réalisées sur un tribomètre de type pion-disque sur des couples des matériaux et des résultats théoriques déterminés à partir des données qui sont déjà calculées.

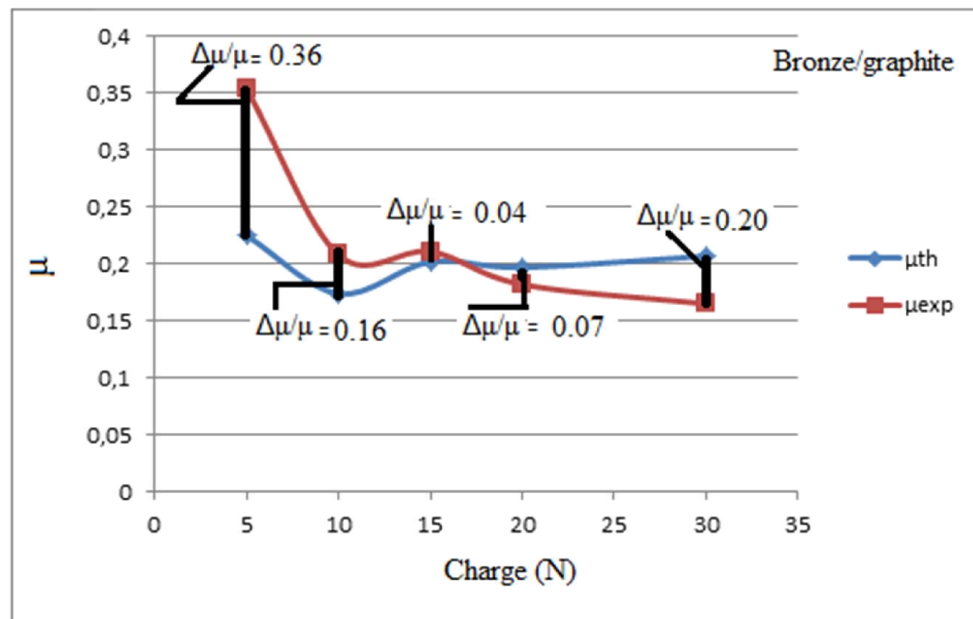
Charge P (N)	Bronze-graphite				Cuivre-graphite				Graphite-graphite			
	$\tau_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	$\mu_{exp}$	$\tau_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	$\mu_{exp}$	$\tau_{max}$ N/mm <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	$\mu_{exp}$
5	35,49	0,021	0,225	0,354	35,42	0,021	0,224	0,375	30,23	0,029	0,262	0,375
10	34,67	0,034	0,174	0,208	35,02	0,034	0,176	0,208	38,69	0,046	0,266	0,286
15	46,02	0,044	0,202	0,211	46,63	0,044	0,205	0,211	46,01	0,060	0,276	0,253
20	49,54	0,053	0,197	0,182	54,58	0,053	0,218	0,203	55,10	0,073	0,300	0,250
30	59,58	0,070	0,207	0,165	78,49	0,070	0,273	0,230	66,05	0,095	0,315	0,225

Tableau IV.1 : Résultats expérimentaux et théoriques des paramètres tribologiques.

## IV.3.1. Courbes des coefficients de frottement bronze-graphite

La (figure IV.2) montre la comparaison des résultats du coefficient de frottement théoriques et expérimentaux.

On remarque que l'écart entre les deux courbes expérimentale et théorique diminue avec l'augmentation de la charge en particulier à partir de 10 N où l'erreur relative se situe entre 4% et 20%. Nous remarquons aussi, que la courbe expérimentale est en dessus de celle théorique et suit la même allure.



**Figure IV.2 : Confrontation des courbes théorique et expérimental du coefficient de frottement du couple Bronze-graphite en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.**

## IV.3.2. Courbes des coefficients de frottement cuivre-graphite

Dans le cas du contact cuivre-graphite (Figure IV.3), pour une charge supérieure à 10 N, l'erreur relative se situe entre 3% et 15% et les deux courbes se croisent à la valeur de  $P = 16$  N.

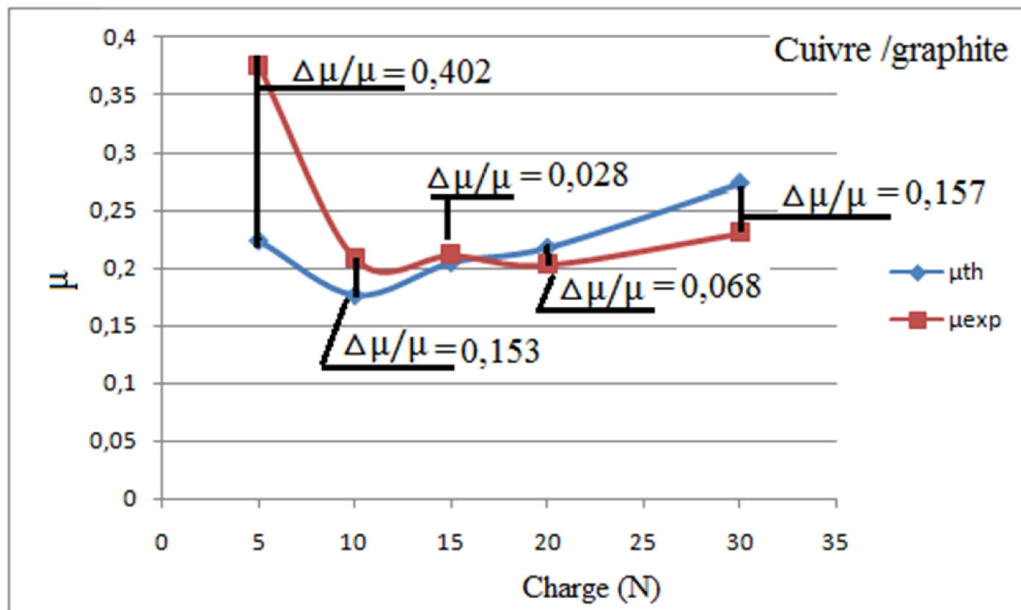


Figure IV.3 : Confrontation des courbes théorique et expérimental du frottement du couple cuivre-graphite en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.

#### IV.3.3. Courbes des coefficients de frottement graphite-graphite

Pour une charge comprise entre 10 N et 20 N, l'erreur relative se situe entre 7% et 16%. Nous remarquons que les deux courbes se concourent à la valeur de  $P = 12$  N.

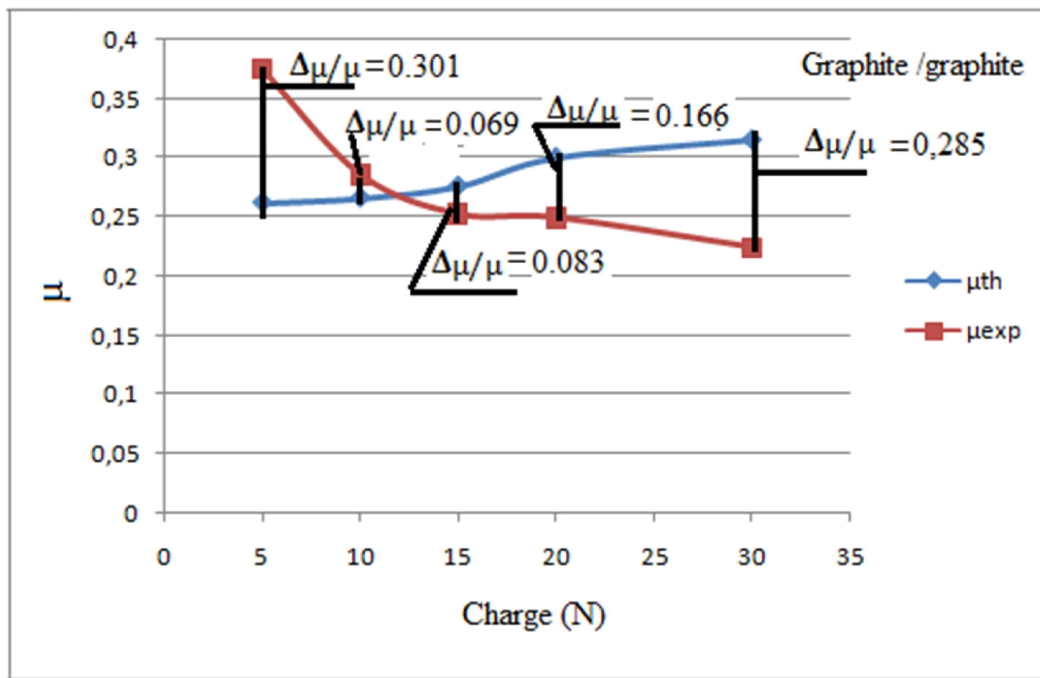


Figure IV.4 : Confrontation des courbes théorique et expérimental du frottement du couple Graphite-graphite en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.

#### IV.4.Modèle énergétique

La température à l'interface joue un rôle déterminant sur le comportement tribologique. Elle change d'une manière significative les propriétés physiques et mécaniques des matériaux en contact. Elle gouverne les phénomènes mis en jeu à l'interface surtout l'oxydation qui favorise l'usure rapide des deux antagonistes. Il existe des modèles qui proposent une procédure pour déterminer l'énergie dissipée par frottement. En fait, l'augmentation de la température locale et la perte de matière dans les pistes d'usure résultent d'une dissipation de l'énergie de frottement dans la zone de contact.

Considérons la surface de contact entre le pion et le disque, circulaire de rayon  $a$  figure IV.5. La chaleur dissipée dans le contact peut être assimilée à celle provenant de deux sources : une source fixe transmettant une quantité de chaleur par unité de temps  $Q_d$  du disque mobile et une source mobile transmettant une quantité de chaleur par unité de temps  $Q_p$  du pion fixe.

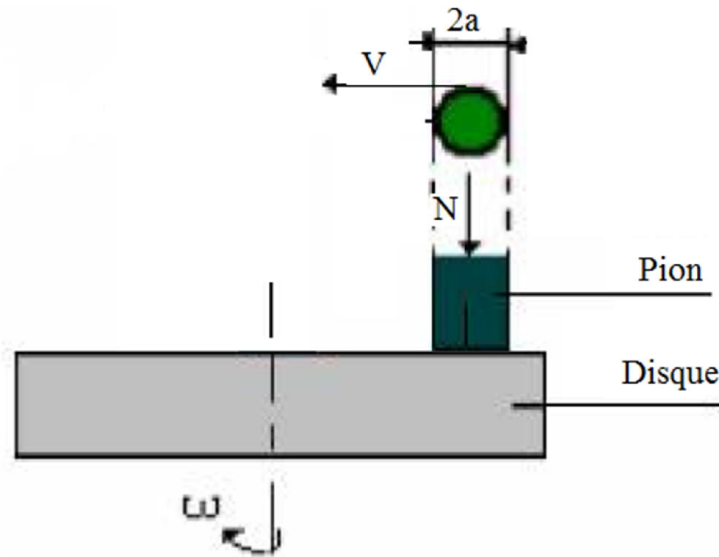


Figure IV.5 : Forme de contact pion-disque.

La chaleur de surface générée par le frottement (la densité surfacique de puissance de frottement) :

$$Q = \frac{\mu \cdot N \cdot V}{A} \left[ \frac{\text{watt}}{\text{m}^2} \right] \quad \text{IV.5}$$

On considère les cas suivants :

- **Aire de contact réelle avec le coefficient de frottement théorique ( $V=1\text{m/s}$ )**

Les tableaux IV.2 et IV.3 contiennent les valeurs du coefficient de frottement théorique, de la chaleur de surface générée sur la surface réelle des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.

Charge P (N)	Bronze-graphite			Cuivre-graphite			Graphite-graphite		
	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	Q <sub>th</sub> 10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	Q <sub>th</sub> 10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	Q <sub>th</sub> 10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup>
5	0,021	0,225	53,57	0,021	0,224	53,33	0,029	0,262	45,17
10	0,034	0,174	51,17	0,034	0,176	51,76	0,046	0,266	57,82
15	0,044	0,202	68,86	0,044	0,205	69,88	0,060	0,276	69
20	0,053	0,197	74,33	0,053	0,218	82,26	0,073	0,300	82,19
30	0,070	0,207	88,71	0,070	0,273	117	0,095	0,315	99,47

**Tableau IV.2 : Valeurs du coefficient de frottement théorique, de la chaleur de surface générée sur la surface réelle des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.**

- Aire de contact réelle avec le coefficient de frottement expérimental ( $V=1\text{m/s}$ )

Charge P (N)	Bronze-graphite			Cuivre-graphite			Graphite-graphite		
	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{exp}$	Q <sub>exp</sub> 10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{exp}$	Q <sub>exp</sub> 10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup>	Ar mm <sup>2</sup>	$\mu_{exp}$	Q <sub>exp</sub> 10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup>
5	0,021	0,354	84,28	0,021	0,375	89,28	0,029	0,375	64,65
10	0,034	0,208	61,17	0,034	0,208	61,167	0,046	0,286	62,17
15	0,044	0,211	93,08	0,044	0,211	93,08	0,060	0,253	63,25
20	0,053	0,182	68,67	0,053	0,203	76,60	0,073	0,250	68,49
30	0,070	0,165	70,71	0,070	0,230	98,57	0,095	0,225	71,05

**Tableau IV.3: Valeurs du coefficient de frottement expérimental, de la chaleur de surface générée sur la surface réelle des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.**

#### IV.4.1. Courbes de la chaleur de surface générée par le frottement du couple bronze-graphite et cuivre –graphite.

On remarque que les courbes de la chaleur expérimentale (figure IV.6.) et (figure IV.7.) prennent des fluctuations à partir de la valeur 5N jusqu'à la charge 17N ses valeurs sont au-dessus des valeurs des courbes théoriques. Elles se croisent avec les courbes théoriques à la charge 17N, puis se stabilisent et deviennent sous les courbes théoriques.

Les allures des courbes sont presque identiques puisque le comportement tribologique du cuivre et du bronze sont plus proches.

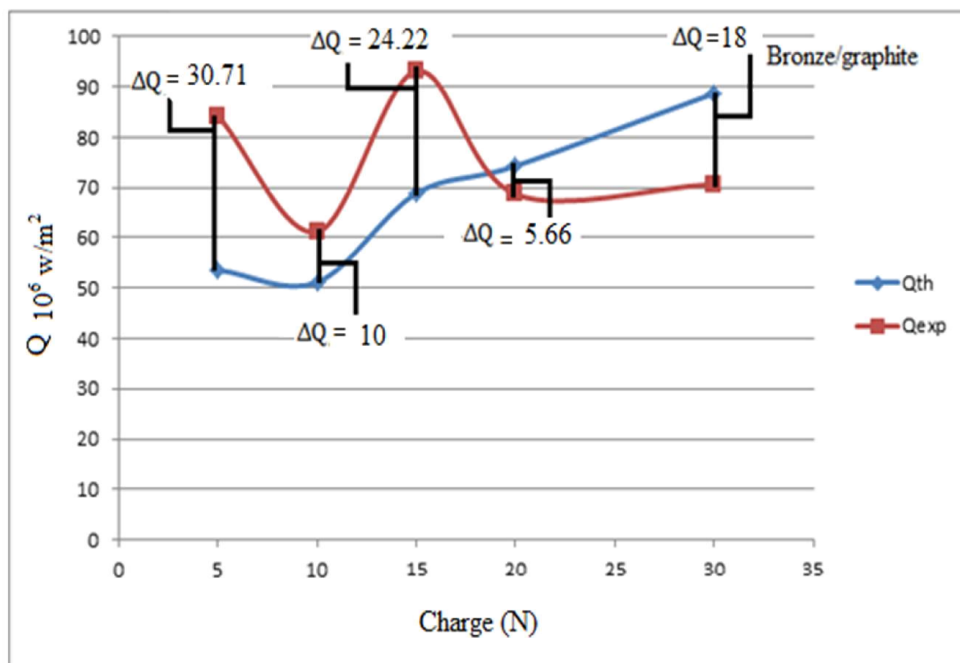
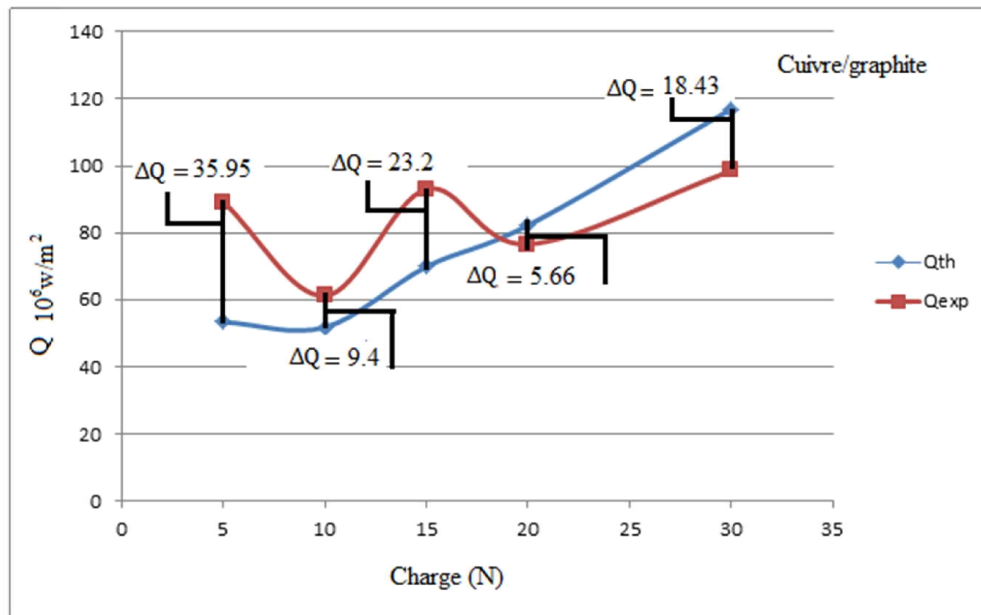


Figure IV.6 : Confrontation des courbes théorique et expérimentale de la chaleur de surface générée par le frottement en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.

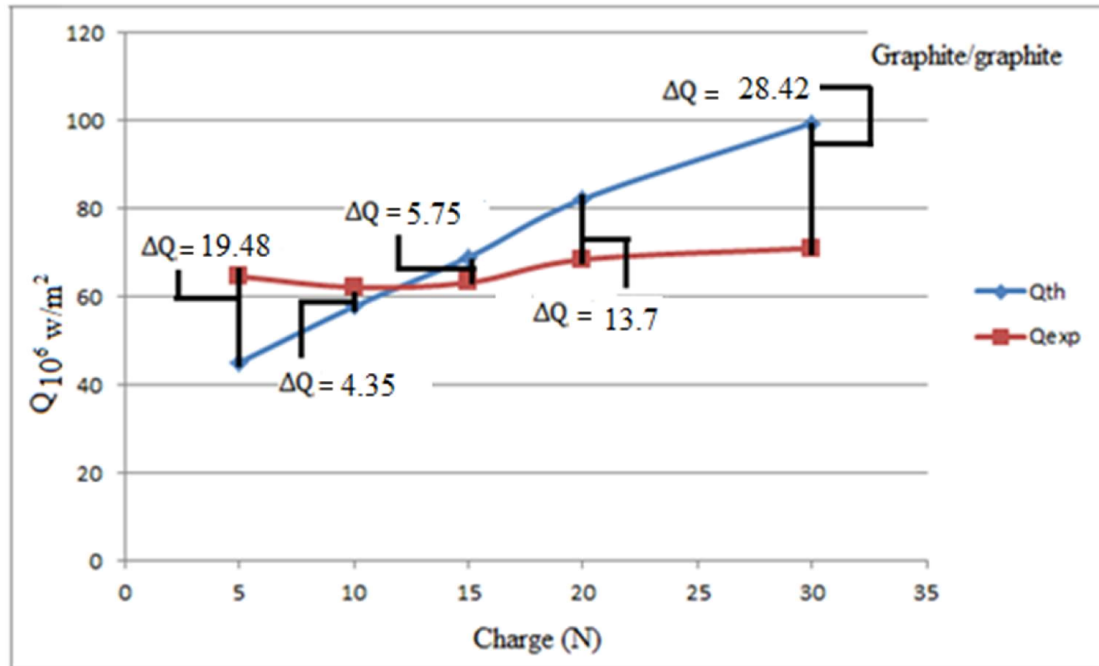


**Figure IV.7 : Confrontation des courbes théorique et expérimental de la chaleur de surface générée par le frottement en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.**

#### IV.4.2. Courbes de la chaleur de surface générée par le frottement du couple graphite-graphite

La (figure IV.8) montre que la différence des valeurs entre les deux courbes se manifeste au début à la charge (5N) et à la fin à la charge 30N (l'erreur est assez remarquable). L'accroissement des courbes est à la charge 12N.





**Figure IV.8:** Confrontation des courbes théorique et expérimental de la chaleur de surface générée par le frottement en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.

- Aire de contact apparente avec le coefficient de frottement théorique ( $V = 1$  m/s)

Calcul de l'aire de contact

$$A_{ap} = \pi r^2 \quad \text{IV.6}$$

$r$  : rayon de surface contact du pion ( $r = 4$  mm).

Les tableaux IV.4 et IV.5 contiennent les valeurs du coefficient de frottement théorique et le coefficient de frottement pratique respectivement, de la chaleur de surface générée sur la surface apparente des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.

Charge P (N)	Bronze-graphite			Cuivre-graphite			Graphite-graphite		
	$A_{ap}$ mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	$Q_{th}$ 10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup>	$A_{ap}$ mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	$Q_{th}$ 10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup>	$A_{ap}$ mm <sup>2</sup>	$\mu_{th}$	$Q_{th}$ 10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup>
5	50,24	0,225	0.022	50,24	0,224	0.022	50,24	0,262	0.026
10	50,24	0,174	0.034	50,24	0,176	0.035	50,24	0,266	0.052
15	50,24	0,202	0.060	50,24	0,205	0.061	50,24	0,276	0.082
20	50,24	0,197	0.078	50,24	0,218	0.086	50,24	0,300	0.119
30	50,24	0,207	0.123	50,24	0,273	0.163	50,24	0,315	0.188

**Tableau IV.4 : Valeurs du coefficient de frottement théorique, de la chaleur de surface générée sur la surface apparente des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.**

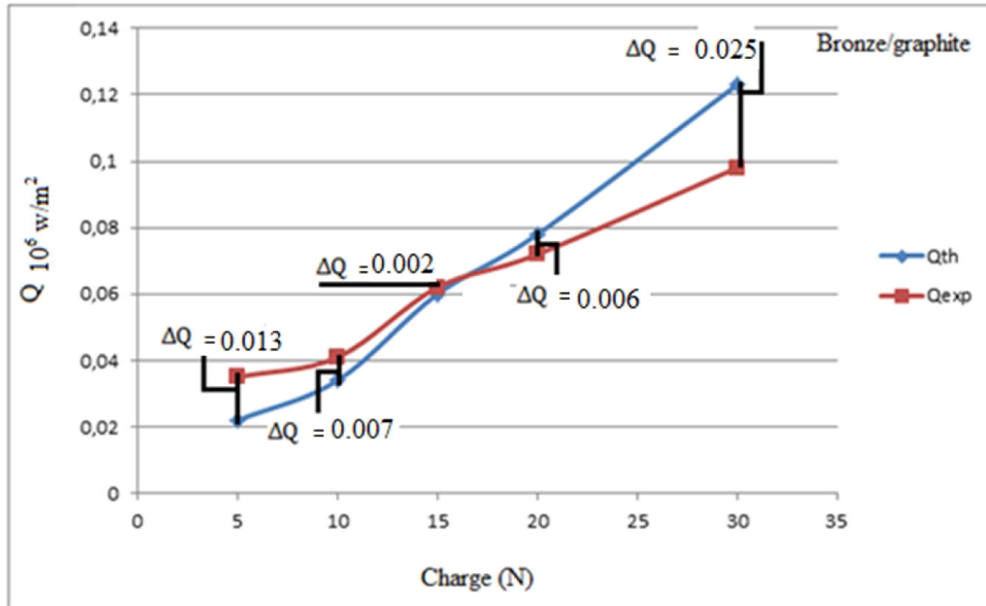
**Aire de contact apparente avec le coefficient de frottement expérimental**

Charge P (N)	Bronze-graphite			Cuivre-graphite			Graphite-graphite		
	$A_{ap}$ mm <sup>2</sup>	$\mu_{exp}$	$Q_{exp}$ 10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup>	$A_{ap}$ mm <sup>2</sup>	$\mu_{exp}$	$Q_{exp}$ 10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup>	$A_{ap}$ mm <sup>2</sup>	$\mu_{exp}$	$Q_{exp}$ 10 <sup>6</sup> w/m <sup>2</sup>
5	50,24	0,354	0.035	50,24	0,375	0.037	50,24	0,375	0.037
10	50,24	0,208	0.041	50,24	0,208	0.041	50,24	0,286	0.056
15	50,24	0,211	0.062	50,24	0,211	0.062	50,24	0,253	0.068
20	50,24	0,182	0.072	50,24	0,203	0.080	50,24	0,250	0.099
30	50,24	0,165	0.098	50,24	0,230	0.137	50,24	0,225	0.134

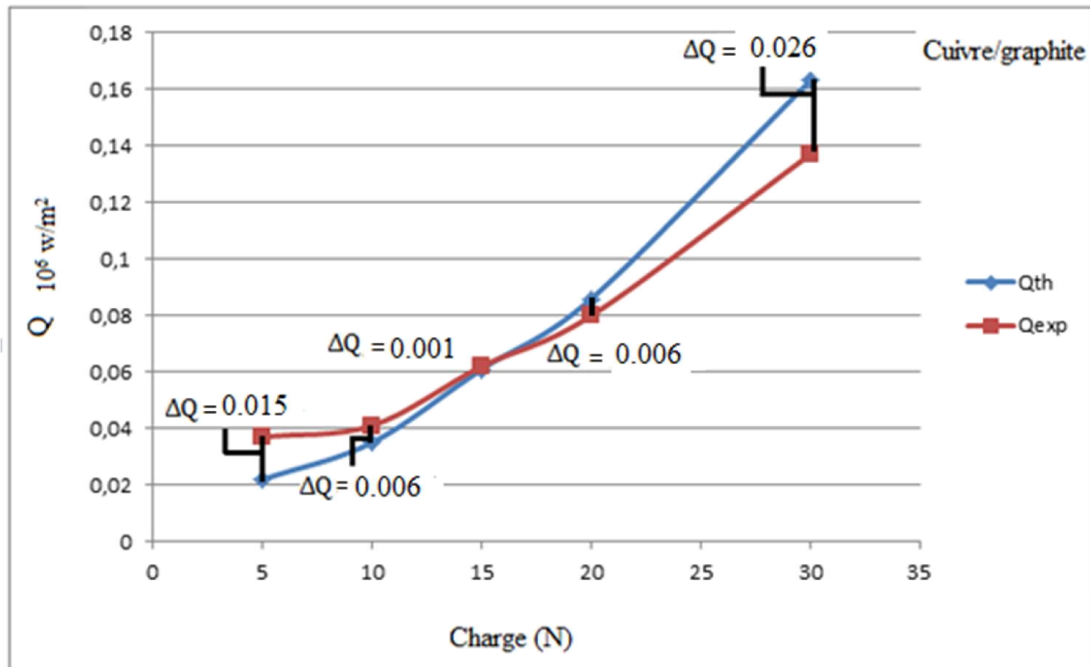
**Tableau IV.5: Valeurs du coefficient de frottement expérimental, de la chaleur générée sur la surface apparente des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.**

#### IV.5. Courbes de la chaleur de surface générée par le frottement des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite

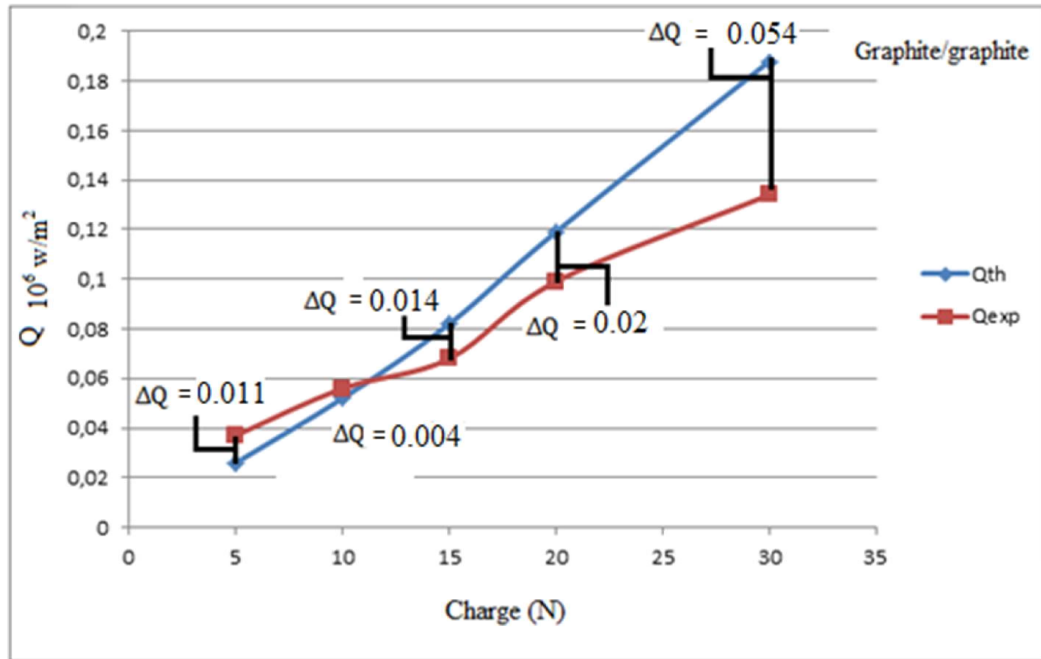
Les allures de toutes les courbes illustrées dans les figures ci-dessous sont identiques. L'erreur prend une valeur maximale à la charge 30N.



(a)



(b)



(c)

**Figure IV.9 : Confrontation des courbes théorique et expérimentale de la chaleur générée sur la surface apparente des couples : (a), bronze-graphite, (b) cuivre-graphite ; (c) graphite-graphite durant l'essai de frottement pion-disque.**

#### IV.6.Modélisation de l'usure

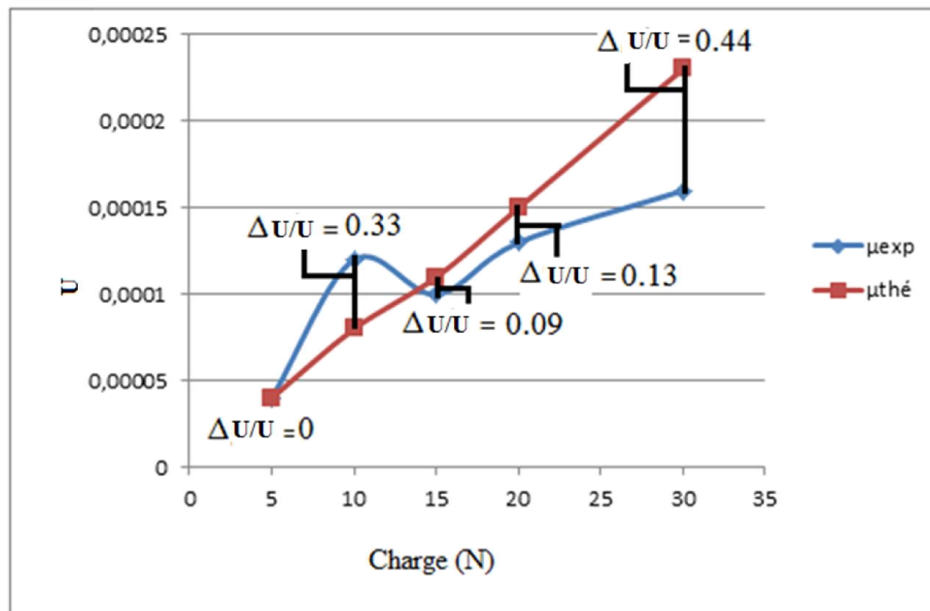
On a cité auparavant la formule qui permet de déterminer le volume usé du pion contre un disque comme une fonction d'une constante d'usure par la force normale et la distance de glissement (loi d'Archard). La modélisation se fait en adaptant la méthode basée sur l'approche globale d'Archard.

On fait l'étude sur le couple bronze/graphite avec les mêmes conditions que ceux des essais précédents et on a obtenu les résultats dans le tableau IV.6.

Charge P (N)	Bronze-graphite		
	$\mu_{\text{exp}}$ mg/m	K	$\mu_{\text{thé}}$ (mg/m)
5	0,00004	8,7E-16	0,00004
10	0,00012	1,3E-15	0,00008
15	0,00010	7,4E-16	0,00011
20	0,00013	7,1E-16	0,00015
30	0,00016	6,0E-16	0,00023

**Tableau IV.6 : Valeurs des taux d'usure expérimental et théorique et du coefficient d'usure k en fonction de la charge appliquée.**

On remarque sur la (figure IV.10), que le modèle théorique est linéaire conformément aux formules utilisées pour la courbe théorique. Par contre, la courbe expérimentale présente un taux d'usure qui augmente au début jusqu'à une charge de 15 N, à partir de cette charge le taux d'usure augmente linéairement avec l'augmentation de la charge appliquée. L'écart entre les deux courbes se situe entre 9 % et 44%.



**Figure IV.10 : Confrontation des courbes théorique et expérimental de l'usure du couple Bronze-graphite en fonction de la charge pour  $V = 1$  m/s.**

## ***Conclusion générale***

Le travail réalisé vise à apporter une étude de la modélisation des phénomènes tribologiques à l'interface.

Il a été montré que le frottement est dû à l'adhérence des surfaces et au labourage d'une surface molle par des aspérités enchevêtrées de la surface dure opposée. Les mécanismes qui gouvernent les principaux modes d'endommagement outre du frottement, la diffusion de chaleur au niveau des surfaces antagonistes des couples ainsi que la perte de masses.

Le travail présenté nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Les résultats obtenus montrent que le tribomètre utilisé est généralement crédible, les résultats expérimentaux sont proches aux résultats établis par les modèles théoriques.

La confrontation des résultats expérimentaux et théoriques, du modèle de détermination du coefficient de frottement, montre que le modèle est généralement optimiste.

Une augmentation de l'énergie dissipée au niveau des surfaces de contact avec l'augmentation de la charge appliquée pratiquement ou théoriquement.

La variation de l'usure est une fonction linéaire avec la charge normale appliquée.

La loi d'usure est en bonne corrélation avec les résultats de perte de matière pour les essais sur les pions.

## **Bibliographiques**

- [1]: Q.J. Wang and Y-W. Chung, editors. Encyclopedia of Tribology. Springer, 2013.
- [2]: JEAN-MARIE GEORGE "Frottement, usure et lubrification". Eyrolles, 2000.
- [3]: GEORGES J.M., frottement ; usure et lubrification : la tribologie ou science des surface, Edition Eyrolles, Paris 2000.
- [4]: MEMOIRE de Magister « Modélisation Numérique du Contact et du Champ des Contraintes du Couple Tribologique Cuivre-Acier » 29 Avril 2010
- [5]: WILLIAMS J.A., Engineering tribology, Edition Cambridge, Exford Université Press, 1992, 210 p.
- [6]: PEGNA J., TROCHU F, Eléments de la tribologie, Cours Théoriques sur le frottement, l'usure et la lubrification, 2003.
- [7]: PEGNA J., TROCHU F, Eléments de la tribologie , Cours Théoriques sur le frottement , l'usure et la lubrification, 2003.
- [8]: José Castillo “Dynamic changes of surface films un derboundarylubrication : A study using Ellipsometry”. Thèse de Doctorat, Université de Michigan, 1997.
- [9]: MEMOIRE de Magister « INFLUENCE DES PARAMETRES MECANQUES LORS DE L'ENDOMMAGEMENT PAR LES PHENOMENES TRIBOLOGIQUES DES COUPLES DES MATERIAUX XC48/XC55 ET A60/XC55 » Présenté par ELHADI ABDELMALEK 2006.
- [10]: DROUIN et al "Manuel éléments de machines" Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [11]: Intitulé du projet «Homogénéisation des Equations de Reynolds Newtonienne et Non Newtonienne : Application à la résolution des problèmes des écoulements de films minces visqueux compressibles et incompressibles entre parois rugueuses.» Université 8 mai 1945
- [12]: thèse DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE « Influence de la rugosité et des traitements d'anodisation sur la tenue en fatigue des alliages d'aluminium aéronautiques 2214 et 7050 » 18 Mars 2011
- [13]: THÈSE « Modélisation Numérique du Contact et du Champ des Contraintes du Couple Tribologique Cuivre-Acier » 29 Avril 2010
- [14]: GEORGES SPINLER "Conception des machines". Principe et application, 1 Statique 1997.
- [15]: K. L. JOHNSON "Contact Mecanics". Cambridge, 1996.
- [16]: ASTM, 1990 Norme G40-90A

- [17]: Stick-slip motion in boundary lubrication, Tribology Series, 7, Elsevier, Amsterdam.
- [18]: RABINOWICZ, E., friction and wear of materials, John Wiley and sons Inc., New York - London - Sydney (1965)
- [19]: R. NOUAILLETAS, Modélisation hybride, identification, commande et estimation d'états de système soumis à des frottements secs – Application à un embrayage robotisé, thèse de doctorat, Grenoble INP, 2009
- [20]: H.B.ABDELOUNIS, dynamique et vibroacoustique du contact rugueux: expérimentation et modélisation, thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 2010
- [21]: ASTM: Norme G40-90A(1990)
- [22]: N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007
- [23]: D. DOWSON, History of Tribology, Longman, New York, 1979
- [24]: G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et contacts, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998
- [25]: PEGNA J., TROCHU F, Eléments de la tribologie, Cours Théoriques sur le frottement, l'usure et la lubrification, 2003.
- [26]: WIKIBOOK, Cours de tribologie, Encyclopédie Wikipédia, 2004, <http://fr.Wikibooks.org>.
- [27]: Site Internet Elément de tribologie (<http://www.cours.polymtl.ca>).
- [28]: M. Z. Huq, J. P. Celis, Evaluation of Fretting Wear Under Oscillating Normal Force, Wear, 252, p. 375-383, 2002
- [29]: JEAN-MARIE GEORGE "Frottement, usure et lubrification". Eyrolles, 2000.
- [30]: M. Z. HUQ, J. P. CELIS "Wear".212, 1997.
- [31]: H. MOHRBACHER, J. P. CELIS, J. R. ROOS Tribol. Int, 28, 1995.



[32]: Thèse « MAGISTER Tenue à l'usure d'un acier ordinaire à dépôt d'alumine par plasma 30 /06 /2012 »

[33]: B. Bhushan et B.K. Gupta, McGraw-Hill, Handbook of Tribology, INC. 1991.

[34]: Glossary of terms and definition in the field of friction, Organization for economic cooperation and development (1969)

[35]: P. KAPSA, M. CARTIER, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001

[36]: O. BARRAU, Etude tribologique de revêtement en régulation de turbines, Rapport de stage Turboméca, ENIT, 1999

[37]: T.E. TALLIAN, Failures Atlas for Hertz Contact Machine Elements, ASME Press, New York, 1992.

[38]: C. Colombie, Y. Berthier, A. Floquet, L. Vincent et M. Godet ; Portance des particules d'usure. Analogie avec les lubrifiants solides : Matériaux Mécanique Electricité : N° 411. pp. 29-36. 1985.

[39]: J. AYEL "Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure" Institut Français du Pétrole, 1979.

[40]: Thèse MAGISTER « ANALYSE TRIBOLOGIQUE ET THERMIQUE D'UN MATERIAU COMPOSITE CARBONE-CARBONE DANS UN CONTACT ELECTRIQUE »

[41]: J. AYEL "Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure". Institut Français du Pétrole, 1979.

[42]: Thèse MAGISTER « ETUDE DES REVETEMENTS DURS ET APPLICATIONS SUR OUTIL DE COUPE 2010 »

[43]: HTML / french / introduction.fr.html

[44]: P. KAPSA, M. CARTIER, Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure, Techniques de l'Ingénieur BM5067, p. 1-13, 2001

[45]: Technique de l'ingénieur, BM5 067, 2005.

[46]: J. F. Archard, Contact and rubbing of flat surfaces, Appl. Phys., vol. 34, pp. 981-988, 1953.

[47]: Y. BERTHIER, Experimental evidence for friction and wear modeling, *Wear*139, p. 77-92, 1990

[48]: M. DELQUÉ, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Ecole des Mines de Paris, 2007

## Résumé

Le travail consiste à étudier le comportement tribologique sec des couples bronze-graphite, cuivre-graphite et graphite-graphite dans un contact glissant. Dans notre étude, nous nous sommes appuyés sur des résultats obtenus.

Les essais expérimentaux ont pour but de déterminer le coefficient de frottement, la température au voisinage des surfaces de contact pion-disque, en tenant compte la variation de l'aire de contact du pion en fonction de la charge appliquée ainsi que l'usure résultante.

A partir des formules données, on a calculé le coefficient de frottement théorique et on l'a comparé avec le coefficient de frottement expérimental pour chaque point expérimental.

Nous avons suivi la même procédure pour faire la modélisation de l'énergie dissipée par frottement (modèle énergétique) et l'usure en utilisant le modèle d'Archard.

## Mots-clés

Contact dynamique, charge de contact, frottement, énergie de surface, usure.

## ملخص

يتعلق العمل بدراسة السلوك التريبولوجي الجاف لمجموعة من الأزواج: غرافيت / برونز نحاس / برونز و غرافيت / غرافيت لتلامس منزلق و اعتمدنا في هذه الدراسة على نتائج متحصل عليها. النتائج التجريبية تهدف إلى تعيين معامل الاحتكاك ' الحرارة بالقرب من أسطح التلامس للساق و القرص مع الأخذ بعين الاعتبار تغير مساحة السطح للساق بدلالة القوة المطبقة العمودية و كذا دراسة تغيير التآكل الناتج. انطلاقاً من قوانين نظرية قمنا بحساب معامل الاحتكاك و قارناه بمعامل الاحتكاك المتحصل عليه في التجارب ' اتبعنا نفس الطريقة في نمذجة الطاقة (الحرارة) المنطلقة من أسطح التلامس و كذا التآكل باستعمال قانون ارشارد.

## الكلمات المفتاحية

التلامس الديناميكي- القوة العمودية- الاحتكاك- طاقة السطح- التآكل.