

République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Ecole nationale polytechnique

Ecole doctorale matériaux et mécanique productique

Département de métallurgie

Laboratoire des génies de surfaces

## Mémoire de magister en métallurgie

Option : génie des surfaces

Présenté par :

Zouaoui Rafik

Ingénieur d'état en métallurgie de l'ENP

Intitulé

# CONCEPTION ET REALISATION D'UN TRIBOMETRE BILLE/PLAN A MOUVEMENT ALTERNATIF.

Soutenu publiquement le /06/2012 devant le jury composé de :

MR. E. SALHI

MR. N. MESRATI

MR. M. BOUABDALLAH

MR. M.E DJEGHLAL

M<sup>ME</sup>. L. CHOUKRANE

PROFESSEUR (ENP)

PROFESSEUR (ENP)

PROFESSEUR (ENP)

PROFESSEUR (ENP)

MAITRE DE CONFERENCE (USTHB)

PRESIDENT

RAPPORTEUR

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR

ENP 2012

Laboratoire Ecole Nationale Polytechnique (ENP)

10, avenue des frères Oudec, Hassen badi, BP.182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

[www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)

## ملخص:

التأثيرات الناتجة عن التفاعلات بين الوسط، المادة، الاجتهادات الميكانيكية هم ذات طبيعة معقدة، و آليات هذه التأثيرات لا تزال غير مفهومة إلى يومنا هذا. لهذا إن الفهم الجيد لهذه الظواهر ضروريا ليس فقط من أجل توقع السلوك التريبولجي، لكن أيضا من أجل تطوير مواد ذات مقاومة أكبر لهذا النوع من الضرر.

في هذا المقام، في هذه الدراسة قمنا أولا بتعريف المفاهيم الأولية للتريبولجيا بدأ بالتلامس بين السطوح، ثم الاحتكاك، التزيت، التآكل (بسيط أو مع الجسم الثالث) استعمال المواد الملائمة..... ثانيا قمنا في دراستنا التطبيقية بإنشاء تريومتر بالطريقة الهندسية التي تسمى: الكرية فوق السطح، بحركة نقل متناوبة من أجل التجارب المخبرية.

**الكلمات المفتاحية:** التريبولجيا، الاحتكاك، التآكل، تريومتر، الجسم الثالث، التزيت.

---

## Résumé :

Les effets dus aux interactions entre le milieu, le matériau et les sollicitations mécaniques sont de nature complexe et leurs mécanismes restent à ce jour mal compris. Une meilleure compréhension de ces phénomènes s'avère indispensable non seulement pour prévoir le comportement tribologique du couple frottant, mais aussi pour développer des matériaux plus résistants à ce type d'endommagement.

Dans ce contexte, notre étude fait le point sur la tribologie, le frottement et l'usure en relation avec les matériaux. Au cours de la présente étude nous avons présenté les notions de base de la tribologie passant par les surfaces, les contacts entre surfaces, les frottements, les différents modes d'usure (simple ou avec troisième corps) et les différents moyens pour y remédier tels que la lubrification, l'utilisation de matériaux compatibles et les revêtements. Notre partie pratique repose principalement sur la conception et la réalisation d'un tribomètre de géométrie de contact bille/plan, à mouvement de translation alternative pour effectuer des essais à l'échelle du laboratoire.

**Mots Clés :** Tribologie, Frottement, Usure, Tribomètre, Troisième corps, Lubrification.

---

## Abstract :

The effects result from the interactions between the surroundings, the material, and the mechanical solicitation are from complex nature and their mechanisms rest badly understood until this day. Better comprehension of these phenomena become indispensable not only to envisage the tribological behavior of the rubbing couple, but also to develop materials more resistant to this type of damage.

In this context, our study gives a progress report on tribology, friction and wears in relation to materials, during the present study we presented the basic notions of tribology passing by surfaces, the contacts between surfaces, frictions and the various modes of wear (simple or with third body) and different means to cure it such as lubrication, the use of compatible materials and the coatings. Our practical part rests mainly on the design and the realization of a tribometer of geometry of contact ball plan, with alternative translatory movement to carry out tests on the laboratory scale.

**Keys words:** Tribology, Friction, Wear, Tribometer, Third body, Lubrication.

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents ;*

*Ma chère femme ;*

*Mes frères ;*

*Ma sœur ;*

*Toute ma famille ;*

*Tous mes amis et mes collègues ;*

*Tous ceux que j'aime.*

*Rafik ZOULAOUI*

# Remerciements

**Je** remercie tout d'abord Dieu le tout puissant de m'avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à finir ce modeste travail.

**J'**exprime toute ma gratitude à mon Promoteur, Monsieur N. MESRATI pour l'aide précieuse et les conseils éclairés au cours de ce travail.

**Je** suis honoré que Monsieur E. SALHI ait accepté de présider mon jury. Je tiens à exprimer ma gratitude à Messieurs M.E. DJEGHLAL, M. BOUABDALLAH et MME. L. CHOUKRANE qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon mémoire.

**Je** tiens à remercier vivement Mr AZZOUZ qui m'a aidé à réaliser les pièces au sein de la SNVI Rouïba. Ainsi que Brahim, ami Omar et à toute l'équipe de l'atelier mécanique.

**Je** voudrais aussi remercier tous les enseignants du département de métallurgie qui ont participé à ma formation et tous les employés de l'ENP.

**Enfin**, je remercie tous mes amis, pour leur présence et leur soutien. A leurs tête **LADJALI OMAR** qui m'a été d'une aide très précieuse.

***Merci***

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I LA TRIBOLOGIE

<b>I. INTRODUCTION .....</b>	<b>3</b>
<b>II. LES SURFACES .....</b>	<b>3</b>
<b>III. LES DEFAUTS DE SURFACES.....</b>	<b>5</b>
<b>IV. CONTACTS ENTRE SURFACES.....</b>	<b>7</b>
<b>IV.1. Géométrie des aspérités .....</b>	<b>8</b>
<b>IV.2. Relations géométriques.....</b>	<b>8</b>
<b>IV.3. Contact sur une aspérité.....</b>	<b>9</b>
<b>IV.4. Déformation élastique de la surface de contact.....</b>	<b>9</b>
<b>IV.5. Contact ponctuel ou linéique.....</b>	<b>10</b>
<b>IV.6. Contact extérieur entre deux sphères.....</b>	<b>10</b>
<b>IV.7. Contact extérieur de deux cylindres parallèles .....</b>	<b>12</b>
<b>IV.8. Contact du cylindre sur un plan .....</b>	<b>13</b>
<b>IV.9. Contact plan .....</b>	<b>13</b>
<b>V. SURFACES DE CONTACT .....</b>	<b>14</b>
<b>V.1. Surface de contact nominale.....</b>	<b>14</b>
<b>V.2. Surface de contact réelle .....</b>	<b>15</b>
<b>V.3. Contact des aspérités .....</b>	<b>16</b>
<b>V.4. Surface de contact en présence d'une force de cisaillement .....</b>	<b>17</b>
<b>VI. LES FROTTEMENTS .....</b>	<b>18</b>
<b>VI.1. Définition .....</b>	<b>19</b>
<b>VI.2. Force et coefficient de frottement .....</b>	<b>19</b>
<b>VI.3. Comportement du coefficient de frottement.....</b>	<b>22</b>
<b>VII. USURE .....</b>	<b>25</b>
<b>VII.1. Usure par adhérence .....</b>	<b>25</b>
<b>VII.2. Usure par abrasion.....</b>	<b>26</b>
<b>VII.3. Usure par érosion .....</b>	<b>29</b>

VII.4. Usure par fatigue .....	31
VII.5. Usure par fretting .....	33
VII.6. Autres types d'usure.....	35

**CHAPITRE II**  
**LES DIFFERENTS TYPES DE TRIBOMETRES**

I. Introduction.....	36
II. Les différents types de tribomètres.....	37
II.1. Tribomètre à haute température .....	37
II.2. Tribomètre à atmosphère contrôlée .....	37
II.3. Tribomètre analytique sous ultravide .....	38
II.4. Tribomètre sous vide cryogénique.....	39
II.5. Tribomètre plongé dans un milieu agressif.....	40
II.6. Tribomètre de freinage .....	40
II.7. Tribomètre environnemental .....	41
II.8. Tribomètre linéaire à microbilles .....	42
II.9. Tribomètre à haute température .....	42
II.10. Tribomètre pour l'étude des biomatériaux.....	43
II.11. Tribomètre sous vide.....	44
II.12. Tribomètre environnemental du LTDS .....	44
III. Conclusion .....	45

**Chapitre III**  
**ETAT DE L'ART**

I. CONCEPTION ET REALISATION .....	46
III.1. Choix technologique.....	47
III.2. Présentation cinématique du mécanisme.....	48
III.3. Les composants du tribomètre.....	49
III.3.1. Le module porte échantillon .....	49
III.3.2. Le système de transmission du mouvement.....	52
III.3.3. Le système de chargement .....	54
III.3.4. Le système moteur .....	55

<b>III.3.5. Le système de lubrification .....</b>	<b>56</b>
<b>III.4. Mise en marche du dispositif .....</b>	<b>57</b>
<b>III.5. Déroulement des essais .....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.1. Contrôle des paramètres des essais .....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.2. Analyse des résultats.....</b>	<b>58</b>
CONCLUSION GENERALE .....	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	62

## **ANNEXES**

Annexe 1 .....	65
Annexe 2 .....	66

# **INTRODUCTION GENERALE**



## INTRODUCTION GENERALE

Des gestes simples comme nettoyer une surface, se frotter les mains pour se réchauffer, craquer une allumette, jouer du violon, glisser sur une Piste de ski mais aussi des aspects plus techniques comme le mouvement des articulations, le déplacement des billes dans un roulement, freiner en voiture ou encore la tectonique des plaques, tous ces systèmes impliquent des phénomènes de frottement. Des appareils domestiques à la machinerie utilisée dans les laboratoires et l'industrie, tous sont constitués d'une multitude d'éléments en mouvement les uns par rapport aux autres. Le domaine scientifique et technologique regroupant l'étude de ces phénomènes, frottement, usure et lubrification est la tribologie. Il s'applique à tout frottement intervenant lorsque deux surfaces solides sont en contact et en mouvement relatif [1].

Un 'frottement' intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. Au cours de l'histoire humaine, les efforts pour s'en affranchir ont d'ailleurs été un facteur de progrès considérable, depuis l'invention de la roue plus de 3000 ans avant Jésus-Christ, jusqu'aux développements technologiques les plus récents dans la recherche de nouveaux matériaux (par exemple les composites céramiques pour la réalisation de prothèses artificielles). L'augmentation des performances techniques passe souvent par le développement de matériaux spécifiques qui permettent de diminuer les efforts de frottement : on limite ainsi l'usure, tout en réduisant la consommation énergétique, et en limitant le vieillissement des pièces. Dans d'autres domaines, l'effort est inversement plutôt concentré sur une augmentation du frottement, par exemple dans les dispositifs de freinage, ou les composites constituant les freins [2].

Dans l'industrie, il existe un très grand nombre d'applications qui font appel à des mécanismes dans lesquels deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ces mécanismes sont souvent soumis à des phénomènes de frottement et d'usure qui touchent à titre d'exemple les pièces en mouvement tels que les roulements, les galets et les coussinets.

La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels. La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité pour de multiples raisons:

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

La présence 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.

Il faut noter que 11% de la consommation énergétique totale des Etats-Unis est perdue à cause du frottement. Stefan Korcek (Ford) et Masami Nakada (Toyota) estiment que choisir des technologies adaptées implique nécessairement la tribologie.

N'est-il pas étonnant par exemple de constater que sur 100 roulements ou galets détruits, 9 seulement l'ont été par le processus d'usure « naturel ». En effet, les deux tiers des avaries sont dus à des défauts de lubrification et de montage. De fait, depuis le milieu des années 90, la réduction de la consommation des moteurs a été particulièrement flagrante. Quand les frottements sont réduits de vingt pour cent, la consommation de l'énergie du véhicule est réduite de sept pour cent [3].

Nous avons consacré le premier chapitre de notre étude à une revue des concepts de base de la tribologie. Au début nous avons défini l'état de surfaces puis présenté le contact entre solides par la théorie de contact élastique de Hertz. Ensuite, nous avons abordé la théorie de jonction adhésive de BOWDEN et TABOR. Cette étude conjuguée avec les différentes approches de l'usure et le concept du triplet tribologique, montre d'une manière précise l'implication des différents facteurs dans l'accommodation des déplacements ainsi que les changements des propriétés superficielles conduisant à des transformations de phase et à des modifications structurales.

Le deuxième chapitre est une synthèse bibliographique, dans laquelle nous avons présenté divers modèles de tribomètres bille / plan développés par divers laboratoires à travers le monde.

Le troisième chapitre s'attache à la conception et à la réalisation d'un tribomètre bille plan à mouvement alternatif de translation. Pour ce faire nous avons fait une étude afin de définir nos besoins en matière d'équipements. S'ensuit la description du système en détail, du bâti au porte échantillon. Et à la fin de ce chapitre nous présentons quelques indications concernant la mise au point du tribomètre ainsi que les étapes à suivre pour une bonne manipulation du dispositif.

En guise de conclusion, on présente l'instrumentation, on expose les solutions technologiques adoptées : un manomètre de pression, un variateur de vitesse, un contrôleur du nombre de cycle et un système de lubrification et on décrit les performances de ce prototype.

Aussi, des perspectives et orientations que nous avons jugées intéressantes sont proposées pour donner plus de performance à notre dispositif réalisé.

## **CHAPITRE I**

# **LA TRIBOLOGIE**

## I. INTRODUCTION

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques, signifie science du frottement, créé à l'instigation des Anglais en 1968, n'apparaît qu'en 1974 dans le dictionnaire français.

La tribologie est la science et la technologie de surfaces solides en contact; elle traite des multiples aspects du frottement, de la lubrification, de l'usure et de l'adhérence [4].

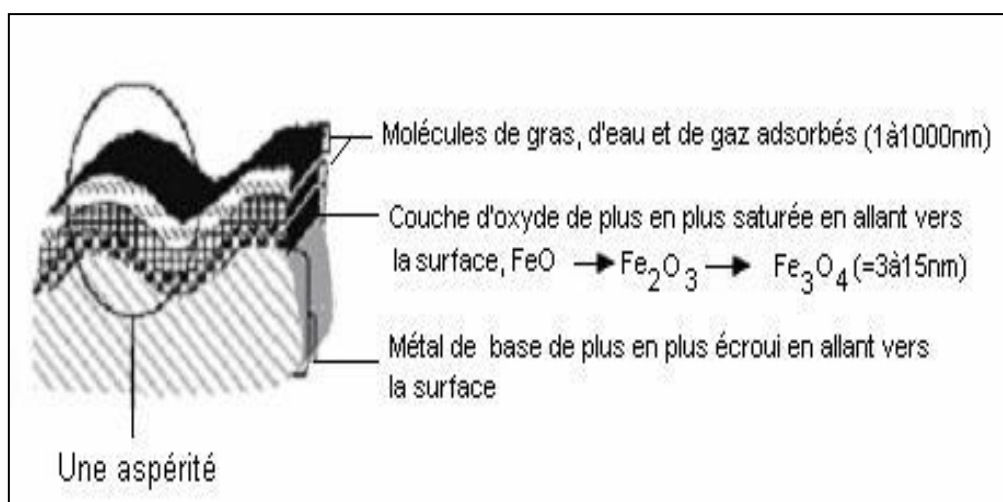
D'après G. Salomon (1968) la tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. Il recouvre, entre autre, tous les domaines du frottement proprement dit, de l'usure et de la lubrification [5].

On peut dire que, si la mécanique est la science du mouvement, la tribologie est la science qui permet le mouvement.

## II. LES SURFACES

La surface d'un solide le sépare du milieu ambiant, elle est caractérisée par sa structure physico-chimique et par sa géométrie.

Une surface usinée est une zone complexe qui recouvre la masse du solide comme une peau. Ses propriétés, différentes de celle du corps du solide, jouent un rôle fondamental dans le comportement tribologique d'un couple cinématique. Une surface possède également une épaisseur, qui s'étend de l'extérieur jusqu'à l'intérieur du solide. La figure I.1 illustre ce concept d'une façon schématique [6].



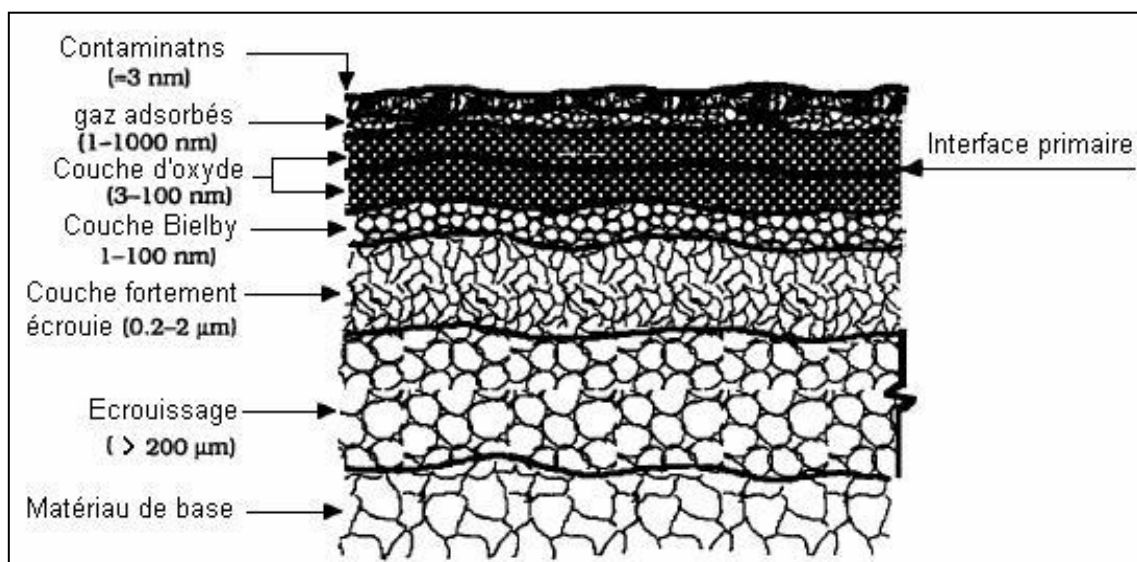
**Figure I.1** : Composition schématique des couches superposées d'une surface [6].

A l'extérieur du solide (surface extérieure), les atomes possèdent des valences non saturées créant ainsi un champ de force électrostatique. On retrouve inévitablement une couche d'oxyde sur le solide. 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 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, hydrocarbure gazeux ou liquide, azote, oxygène et toutes sortes d'autres composants qui se trouvent dans l'environnement immédiat de la surface et peuvent réagir avec le métal pour former des oxydes ou y diffuser.

L'adsorption d'huile ou de graisse joue un rôle intéressant en lubrification.

La couche adsorbée est très tenace, elle isole le métal de tout contact direct. 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.2. 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 est épaisse de quelques dizaines d'angströms[6].



**Figure I.2** : Schéma de la surface d'un solide [6].

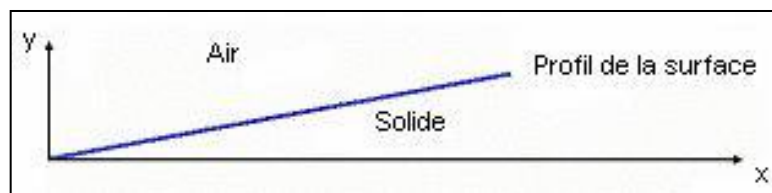
### III. LES DEFAUTS DE SURFACES

On sait que les cotes dimensionnelles des pièces sont sujettes aux tolérances, mais les surfaces proprement dites sont aussi affectées par des irrégularités qui jouent un grand rôle dans le fonctionnement des mécanismes. On a classé les irrégularités selon l'échelle qu'il faut choisir pour les observer.

- **Défauts de forme**

Les défauts de forme ou erreurs macro-géométriques, dites de premier ordre, proviennent des déformations de la pièce et de la machine-outil lors de l'usinage, telles que: les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité. La période  $x$  des défauts de forme est de plusieurs ordres de grandeur plus grande que leur amplitude  $y$  (figure I.3).

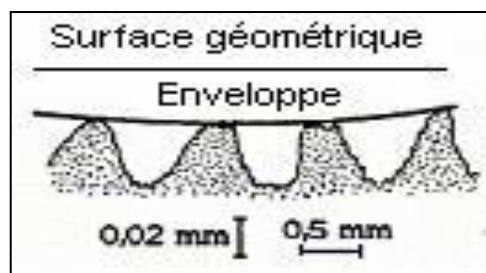
Les défauts de forme se rapportent à la surface géométrique. On les mesure avec les instruments de métrologie comme le pied à coulisse ou le micromètre [7].



**Figure I.3 :** Période des défauts de forme d'une surface géométrique [7].

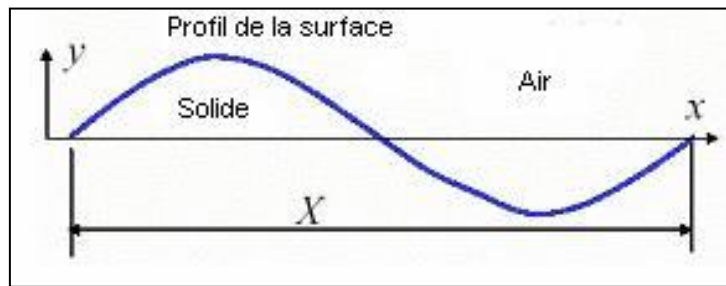
- **Défauts d'ondulation**

Les irrégularités du deuxième ordre (figure I.4) consistent en ondulations régulières engendrées par des vibrations de la pièce ou de la machine-outils, les ondulations sont apparentes à l'œil nu [7].



**Figure I.4 :** Défauts d'ondulation [7].

La période  $x$  des défauts d'ondulation (figure I.5) et de quelques ordres de grandeur plus grande que leur amplitude  $y$  soit de 0,1 à 50  $\mu\text{m}$  [7].

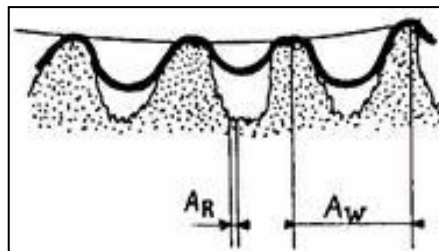


**Figure I.5** : Période de défauts d'ondulation [7].

- **Rugosité**

A plus petite échelle, visible seulement à la loupe ou au microscope, on rencontre la rugosité. Elle résulte de stries ou sillons 3<sup>ème</sup> ordre (figure I.6), défauts périodiques de pas  $A_R$  voisin de 0.1 mm et une période  $A_W$ . Ces stries formées par l'avance progressive de l'outil (tournage, rabotage).

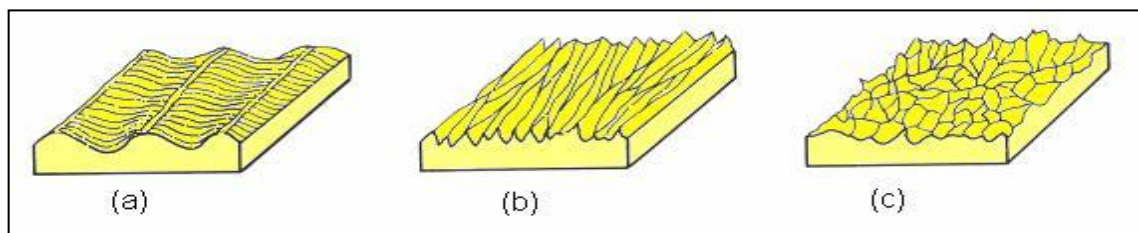
Le 4<sup>ème</sup> ordre ou les aspérités se forment lors de l'arrachage de la matière par les outils.



**Figure I.6** : Rugosité de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre [7].

Le 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> ordre correspondent respectivement aux structures cristallines et moléculaires.

Une surface réelle résulte de la superposition de la rugosité et des défauts de forme (figure I.7) [7].



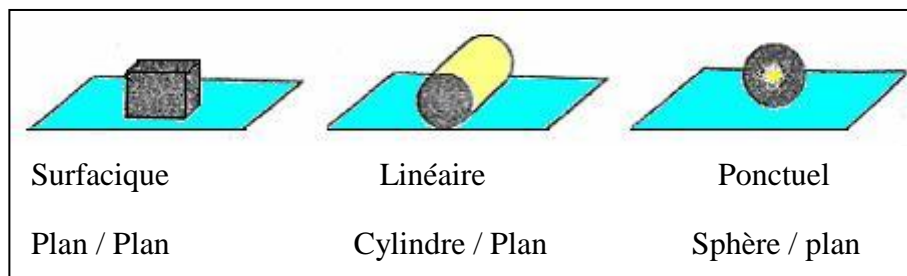
**Figure I.7** : Structure de surfaces (a) stries régulières ;(b) stries orientées ;  
(c) aspérités irrégulières [7].

#### IV. CONTACTS ENTRE SURFACES

Dans cette section, on considère le contact statique de deux corps chargés par une force normale unique. Les buts de ces études sont les suivants: il s'agit de calculer l'aire de contact entre deux solides, la pression de contact entre les solides et la distribution des contraintes à l'intérieur des solides, en utilisant les lois de la mécanique des milieux continus.

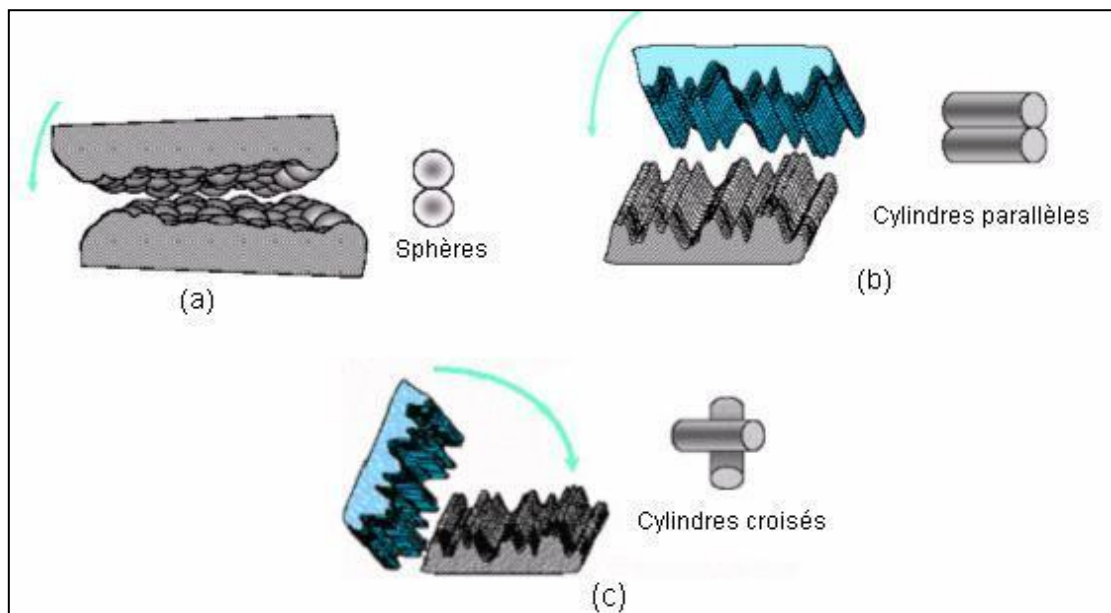
Les types de contact entre les surfaces varient avec la géométrie des solides en contact (plan/ plan, cylindre/ plan, sphère /plan). Ils se ramènent aux trois types suivants [4]:

Contact surfacique, contact linéaire et contact ponctuel (figure I.8).



**Figure I.8** : Types de contact [4].

Les surfaces en contact se touchent par le sommet de leurs aspérités. Si les aspérités sont représentées idéalement par des sphères ou des cylindres, on aura alors les situations possibles schématisées dans la figure I.9.

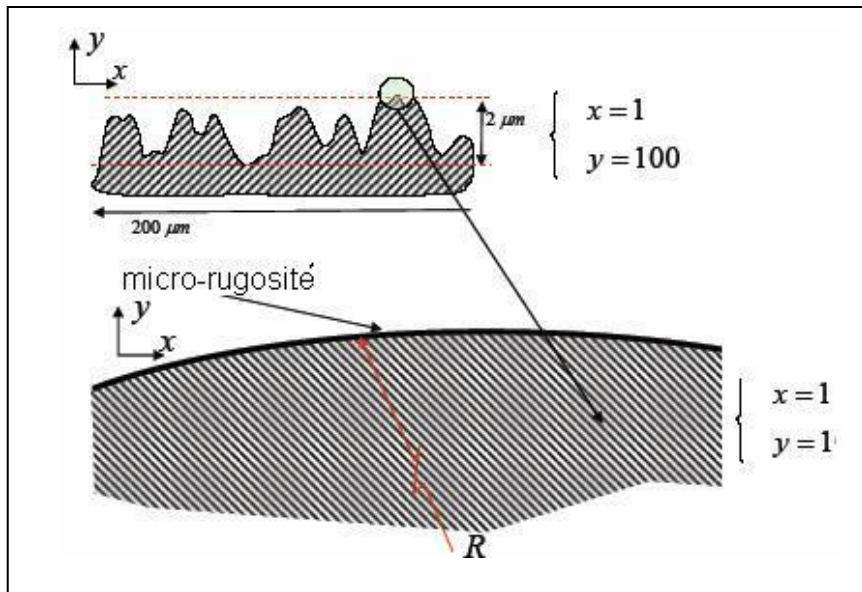


**Figure I.9** : Différentes situations des aspérités :(a) sphère ;  
(b) cylindres parallèles (c) cylindres croises [4].



**IV.1. Géométrie des aspérités**

En ramenant les facteurs d'amplification en x et y à la même valeur, le sommet des aspérités est arrondi et peut être supposé lisse (figure I.10).

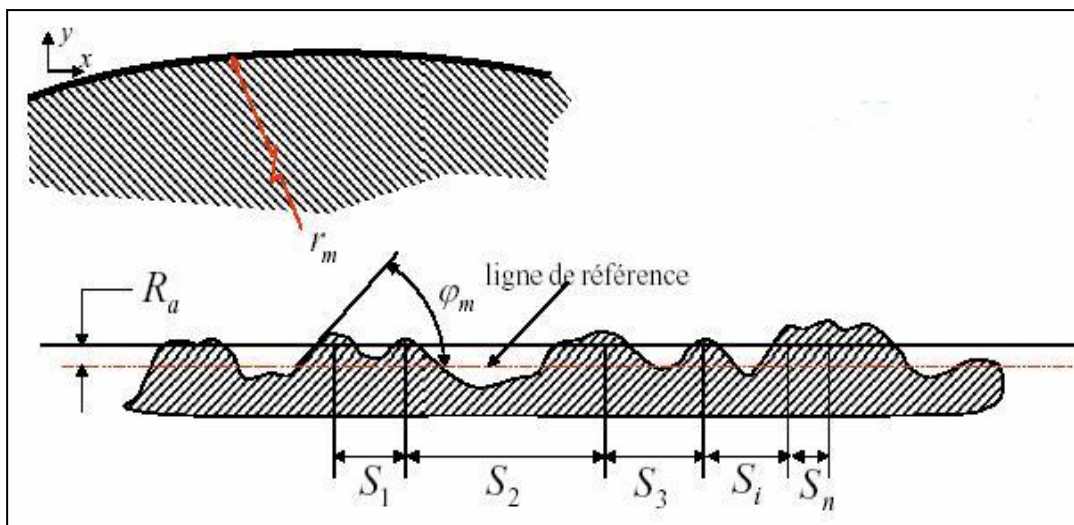


**Figure I.10:** Géométrie des aspérités [4].

**IV.2. Relations géométriques**

Le rayon moyen  $r_m$  peut être relié au paramètre  $R_a$  (figure I.11) par la relation empirique :

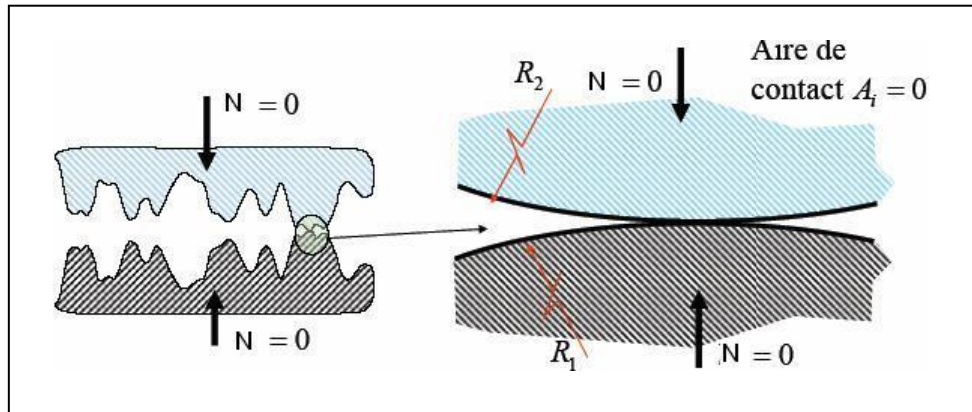
$$r_m \approx \frac{S_m^2}{4\pi^2 R_a} \tag{I.1}$$



**Figure I.11 :** Rayon moyen d'une aspérité [4].

### IV.3. Contact sur une aspérité

Quand deux solides sont en contact, ils se touchent par le sommet de leurs aspérités. Ils feront d'abord contact par une aspérité. Au début du contact,  $N=0$  et les deux aspérités vont tout simplement s'effleurer et se touchent par un point ou une ligne (figure I.12).



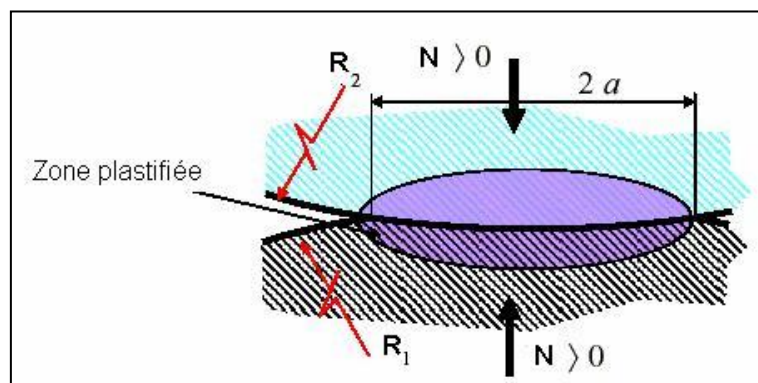
**Figure I.12** : Contact sur une aspérité [5].

### IV.4. Déformation élastique de la surface de contact

La déformation élastique repose sur les hypothèses suivantes [8]:

- ❖ Les solides sont soumis à de petites déformations sans dépasser leur limite.
- ❖ Les surfaces sont continues et non conformables.
- ❖ La déformation élastique est calculée en admettant que chaque corps en contact est un demi-espace élastique.
- ❖ Les surfaces sont sans frottement, les composantes de la force tangentielle dans le plan du contact sont nulles.

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.13).

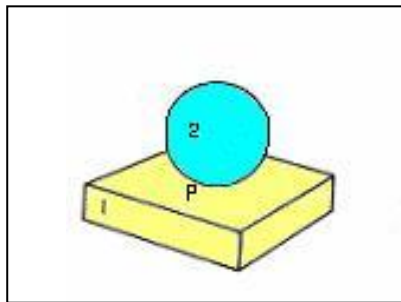


**Figure I.13** : Déformation élastique de la surface de contact [8].

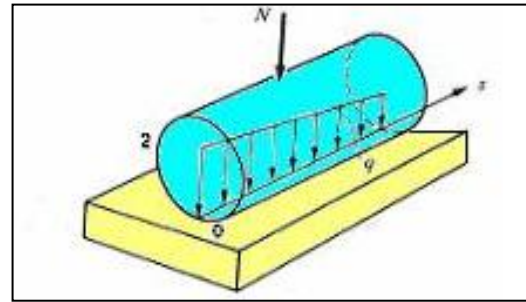
**IV.5. Contact ponctuel ou linéique**

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.14), linéique dans le second (figure I.15).

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  $l$  [9].



**Figure I.14 :** Contact ponctuel [9].



**Figure I.15 :** Contact linéique [9].

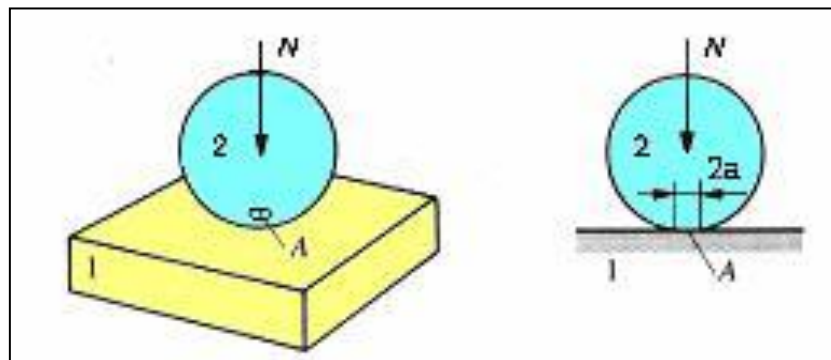
On a:

$$N = \int_0^l q(s) ds \tag{I.2}$$

La distribution  $q(s)$  dépend des déformations locales. L'aire de contact étant  $A$ , la pression de contact est :

$$P = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{N}{A} = \infty \tag{I.3}$$

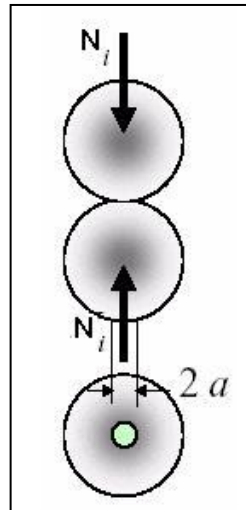
C'est un résultat évidemment absurde. En réalité, les solides se déforment au voisinage du contact de manière à former une surface d'aire finie (figure I.16).



**Figure I.16 :** Aire de contact d'une bille sur un plan [9].

**IV.6. Contact extérieur entre deux sphères**

Soit  $R_1$  et  $R_2$  le rayon de deux sphères (figure I.17),  $E_1$  et  $E_2$  les modules d'élasticité et  $\nu_1, \nu_2$  les coefficients de poisson de leur matériau [10].



**Figure I.17** : Contact extérieur de deux sphères [10].

La surface de contact est un cercle de rayon :

$$a = \sqrt[3]{\frac{3N}{2E} \frac{1}{\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)}} \quad (\text{I.4})$$

On a posé pour alléger l'écriture, le module d'élasticité réduit :

$$E = 2 \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (\text{I.5})$$

Les centres de sphères chargées par une force  $F$  se rapprochent de:

$$f = \sqrt[3]{\frac{9}{16} \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)^2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) F^2} \quad (\text{I.6})$$

Pour des matériaux dont le coefficient de poisson vaut 0.3 :

$$f = 1,231 \sqrt[3]{\frac{F^2}{RE^2}} \quad (\text{I.7})$$

Avec le rayon réduit :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{I.8})$$

Dans le cas particulier d'une bille de rayon  $R_1$  sur un plan,  $R_2 = \infty$  et  $R = R_1$  on tire la force en fonction de la déformation :

$$F = \frac{E\sqrt{R}}{1,365} f^{\frac{3}{2}} \quad (\text{I.9})$$

La pression hertzienne, au centre du cercle de contact:

$$P_0 = \frac{3F}{2\pi a^2} = 0,3644 \sqrt[3]{E^2 F \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^2} \quad (\text{I.10})$$

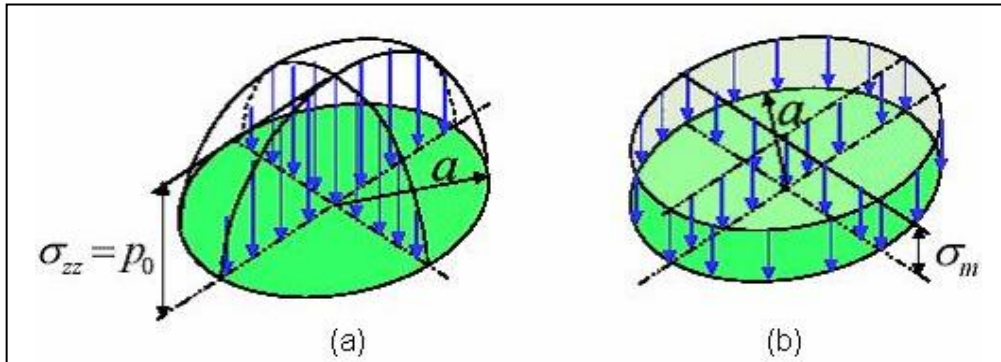
$P_0$  est aussi la contrainte maximale  $\sigma_{ZZ}$  comme indique la (figure I.18a).

On utilise aussi souvent le concept de pression moyenne  $\sigma_m$  sur la surface de rayon  $a$  (figure I.18b).

$$\sigma_m = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{2}{3} \sigma_{ZZ} \quad (\text{I.11})$$

Dans le cas du contact d'une sphère de rayon  $R$  et d'un plan de rayon infini, la pression est :

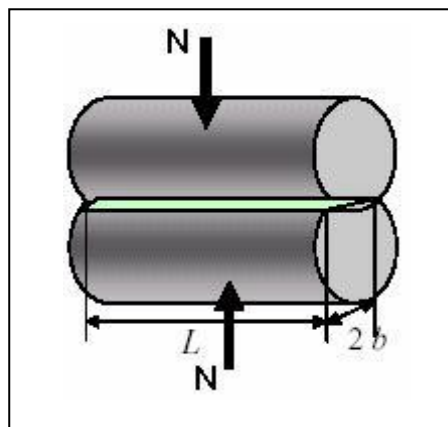
$$P_0 = 0,3644 \sqrt[3]{\frac{E^2 F}{R^2}} \quad (I.12)$$



**Figure I.18 :** Distribution des contraintes: (a) contrainte maximale; (b) pression moyenne [10].

#### IV.7. 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.19).



**Figure I.19 :** Contact extérieur de deux cylindres parallèles [10].

$$b = \sqrt{\frac{8F}{\pi \cdot l E \frac{1}{R}}} \quad (I.13)$$

L'aire de contact  $A = 2bL$

La pression hertzienne sur l'axe du rectangle de contact vaut :

$$P_0 = 0,3979 \sqrt{\frac{F}{l} E \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \quad (I.14)$$

$P_0 = \sigma_{zz}$  (la contrainte maximale)

La contrainte moyenne est :

$$\sigma_m = \frac{F}{2bL} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{F' \pi \cdot E}{R}} \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{I.16})$$

Et :  $F' = \frac{F}{L}$  est la charge par unité de longueur reprise par l'aspérité.

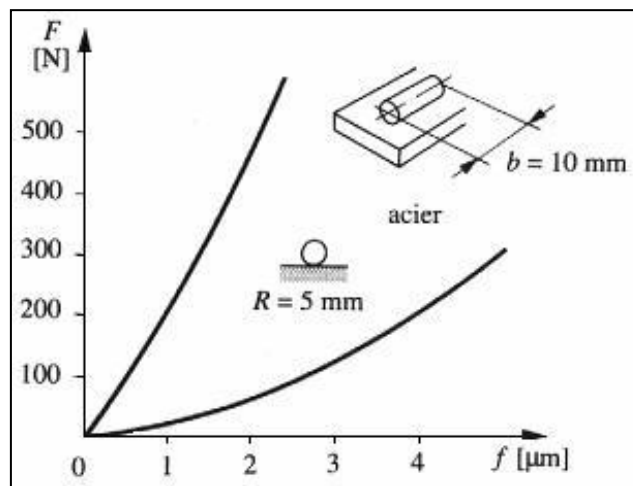
#### IV.8. Contact du cylindre sur un plan

La déformation ne peut pas se calculer par la théorie de HERTZ. Palmegreen donne un résultat empirique pour de l'acier [9] :

$$f = 1,53 \times 10^{-10} \frac{F^{0,9}}{b^{0,8}} \quad (\text{I.17})$$

Où  $F$  est la charge exprimée en [N] et  $b$  la longueur de la ligne de contact en [m].

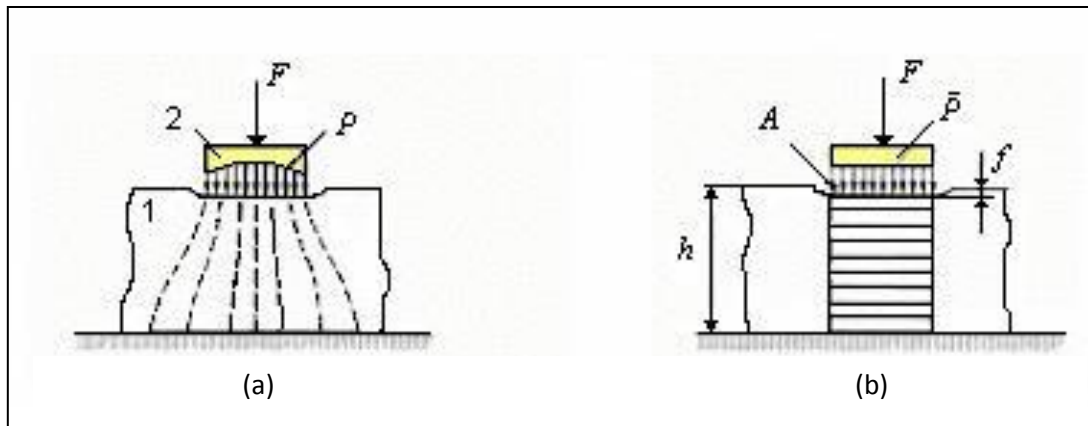
La figure I.20 représente la relation entre force et déformation d'un cylindre et d'une sphère sur un plan.



**Figure I.20** : Relation force-déformation d'un cylindre et d'une sphère sur un plan [9].

#### IV.9. Contact plan

Une pièce (2) supposée infiniment rigide est appliquée sur une plaque épaisse reposant elle-même sur une base rigide (figure I.21a). La pièce s'enfonce dans la surface de la plaque comme on peut l'observer facilement dans le cas d'un objet posé sur du sable, la pression de contact, maximale au milieu de la surface d'appui, diminue vers le bord [9].



**Figure I.21** : Enfoncement d’une pièce dans une plaque : (a) champ de force ; (b) modèle de calcul [9].

Le calcul de la distribution de la pression et des déformations est difficile, il a surtout été développé en mécanique des sols. Admettons pour simplifier (figure I.21b) que la pression soit uniformément répartie sur la surface d’appui d’aire  $A$  et qu’elle comprime une colonne imaginaire de même section.

La déformation de la colonne est donnée par la loi de Hooke:

$$f_0 = \frac{h}{EA} F = \frac{\bar{P}}{E} h \tag{I.18}$$

L’enfoncement réel  $f$  est plus petit que la déformation théorique parce que la colonne est encastrée dans la plaque. On écrit :

$$f = \Psi \frac{h}{EA} F = \Psi \frac{\bar{P}}{E} h = \Psi \cdot f_0 \tag{I.19}$$

Le facteur de correction ( $\Psi$ ) est plus petit que l’unité, il dépend de la forme de la surface d’appui, des proportions géométriques et du coefficient de Poisson.

Dans le cas d’une surface circulaire de diamètre  $D$  et d’un métal avec  $\mu = 0,3$

On a par exemple :  $D = 20 h, \Psi = 0,55$   $D = 2 h, \Psi = 0,65$

On voit toute l’importance de l’effet d’encastrement. La rigidité de la plaque vis-à-vis de l’écrasement vaut :

$$K = \frac{EA}{\Psi \cdot h} \tag{I.18}$$

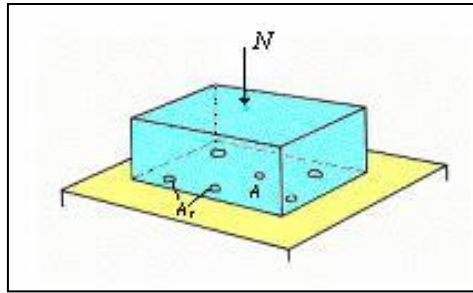
## V. SURFACES DE CONTACT

### V.1. Surface de contact nominale

Deux pièces conformes se touchent par une surface géométrique finie (figure I.22) leur contact est dit surfacique. L’aire  $A$  contenue dans le contour de contact apparent est appelée surface de contact nominale ou apparente. La force normale d’appui étant  $N$ , on définit la pression de contact nominale ou apparente [9].

$$P = \frac{N}{A} \tag{I.18}$$

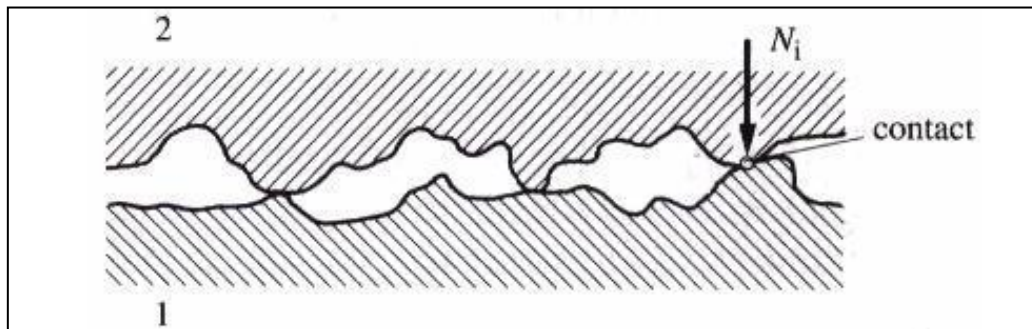
Ce serait la pression de contact qui régnerait entre les surfaces si elles étaient idéalement lisses et si les pièces étaient indéformables.



**Figure I.22** : Aires de contact [9].

## V.2. Surface de contact réelle

En agrandissant fortement la coupe de la surface de contact de deux corps (figure I.23). Même si les surfaces paraissent macro-géométriquement parfaitement polies, elles présentent chacune des aspérités dont certaines touchent ponctuellement la surface opposée [9].



**Figure I.23** : Contact de deux surfaces [9].

L'aire de la surface de contact effective des aspérités est appelée surface de contact réelle  $A_r$ . Elle est naturellement plus petite que la surface apparente, c'est pourquoi la pression de contact réelle  $P_r$  est beaucoup plus forte que la pression nominale  $P$ .

Une aspérité progressivement chargée par une force  $N_i$  subit tout d'abord une déformation élastique. En admettant que l'extrémité de l'aspérité soit sphérique, le matériau subit une déformation plastique et l'aspérité s'écrase en agrandissant l'aire de contact.

La pression de contact ne peut pas dépasser la pression de plastification  $P_e$  tant que l'aspérité n'est pas complètement aplatie. La surface de contact de l'aspérité est :

$$A_{ri} = \frac{N_i}{P_e} \quad (\text{I.19})$$

En état de déformation plastique, l'aire de contact d'une aspérité croît proportionnellement à la charge. La pression de plastification est en relation avec la limite élastique  $R_e$  du matériau. Pour les métaux et une aspérité sphérique on a :

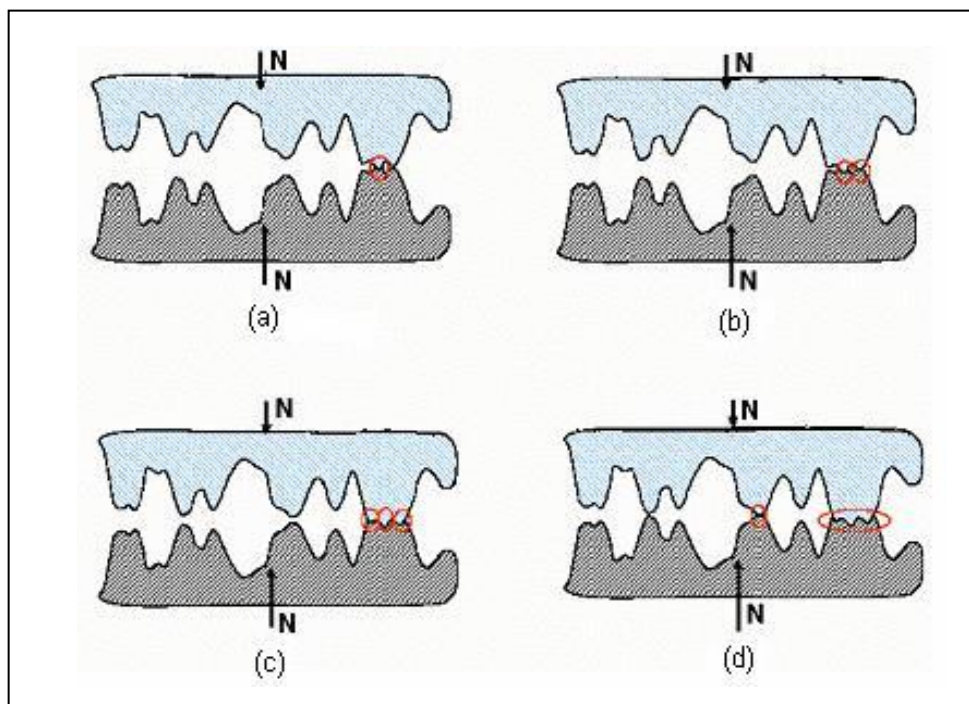
$$P_e \approx 3R_e \quad (\text{I.20})$$



On notera que, même si la pointe d'une aspérité est déformée plastiquement, la charge est transmise au corps de la pièce par une zone plus massive où les déformations restent le plus souvent dans le domaine élastique [9].

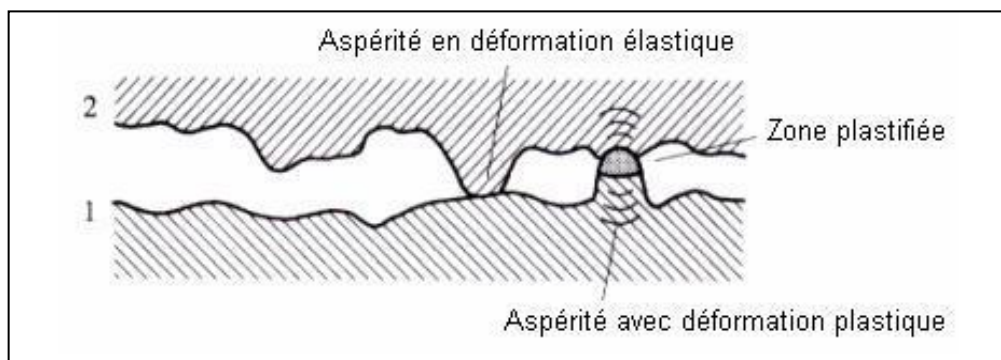
### V.3. Contact des aspérités

En considérant maintenant l'ensemble de la surface apparente de contact, on constate qu'à faible charge, les pièces ne se touchent que par les aspérités les plus élevées comme indique la figure I.24.



**Figure I.24** : Contact des aspérités : (a) sur une aspérité ;(b) sur deux aspérités; (c) sur trois aspérités ; (d) sur quatre aspérités [10].

Les aspérités s'écrasent et les pièces se rapprochent au fur et à mesure que la charge  $F$  augmente. En fin, la surface comprend des aspérités en état de déformation élastique et d'autre en état de déformation plastique (figure I.25).



**Figure I.25** : Surfaces en contact par leurs aspérités [10].

Des expériences ont prouvé que l'augmentation de la surface de contact réelle avec la charge est due à l'accroissement du nombre de points de contact autrement dit, à l'agrandissement des aspérités déjà écrasées. On peut raisonner comme si toutes les aspérités en contact se trouvaient en état de sollicitation plastique.

Comme  $N = \sum N_i$  l'aire de contact réelle est :

$$A_r = \frac{N}{P_e} \quad (\text{I.21})$$

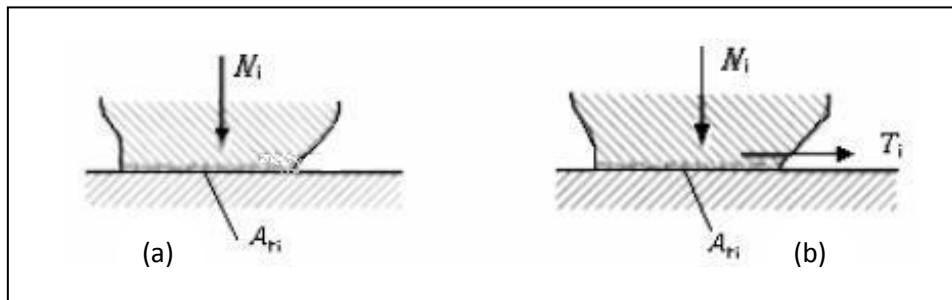
En exprimant la charge à partir de la pression apparente  $N=AP$

Calculons le rapport de la surface de contact réelle à la surface nominale

#### V.4. Surface de contact en présence d'une force de cisaillement

Supposons qu'une aspérité chargée par une force normale  $N_i$  soit plastifiée (pression d'écrasement plastique  $P_e$ ), elle est en contact par une surface d'aire  $A_{r,i}$  (figure I.26a).

$$A_{r,i} = \frac{N_i}{P_e}$$



**Figure I.26 :** Aire de contact d'une aspérité : (a) charge normale seule ; (b) avec force tangentielle  $T_i$  [9].

L'application d'une force tangentielle  $T_i$  provoque une déformation latérale qui accroît la surface de contact jusqu'à la valeur  $A_{r,i,T}$  (figure I.26b). Les sollicitations de la nouvelle surface de contact sont :

- Contrainte de compression :

$$P_{ri} = \frac{N_i}{A_{r,i,T}} \quad (\text{I.22})$$

- Contrainte de cisaillement :

$$\tau_{ri} = \frac{T_i}{A_{r,i,T}} \quad (\text{I.23})$$

Selon la théorie de Von Mises pour l'écoulement plastique des matériaux, la plastification intervient lorsqu'une relation de la forme suivante est satisfaite :

$$P_{ri}^2 + C\tau_{ri}^2 = R_{lim}^2 \quad (\text{I.24})$$

Où  $C$  est une constante et  $R_{lim}$  une limite caractéristique du matériau.

Si  $T = 0$  la plastification intervient lorsque  $P_{ri} \approx \square P_e$ . Donc  $R_{lim} = P_e$  et :

$$P_{ri}^2 + C\tau_{ri}^2 = P_e^2 \quad (I.25)$$

En introduisant l'expression des contraintes, cette équation fournit l'aire de la surface de contact avec des charges normales et tangentielles :

$$A_{ri.T} = \sqrt{\left(\frac{N_i}{P_e}\right)^2 + C\left(\frac{T_i}{P_e}\right)^2} \quad (I.26)$$

On sait que :

$$A_{ri} = \frac{N_i}{P_e}$$

Donc :

$$A_{ri.T} = A_{ri} \sqrt{1 + C\left(\frac{T_i}{N_i}\right)^2} \quad (I.27)$$

La constante "C" a été déterminée empiriquement, elle est comprise entre 12 et 27. On voit que la surface de contact d'une aspérité augmente lorsqu'elle est sollicitée par une force tangentielle [9].

## VI. LES FROTTEMENTS

Un « *frottement* » intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. La notion même de frottement est de fait très intuitive à tout un chacun, essentiellement car nous pouvons *ressentir* - physiquement - ses effets dans la vie quotidienne : se frotter les mains pour se réchauffer, craquer une allumette, jouer du violon, glisser sur la glace, freiner en voiture, entendre un crissement de craie sur le tableau, mettre de l'huile dans les gonds de porte, etc. [11].

On pourrait multiplier les exemples connus de tous. Le frottement est ainsi intimement associé à la perception de notre environnement immédiat. Au cours de l'histoire humaine, les efforts pour s'en affranchir ont d'ailleurs été un facteur de progrès considérable, depuis l'invention de la roue plus de 3000 ans avant Jésus-Christ, jusqu'aux développements technologiques les plus récents dans la recherche de nouveaux matériaux (par exemple les composites céramiques pour la réalisation de prothèses artificielles). L'augmentation des performances techniques passe souvent par le développement de matériaux spécifiques qui permettent de diminuer les efforts de frottement : on limite ainsi l'usure, tout en réduisant la consommation énergétique, et en limitant le vieillissement des pièces. Dans d'autres domaines, l'effort est inversement plutôt concentré sur une augmentation du frottement, par exemple dans les dispositifs de freinage, ou les composites constituant les freins [11].

Les sciences du frottement sont donc intimement liées au développement technologique, tournées vers l'application. Pourtant c'est un domaine qui continue de soulever de nombreuses questions au niveau le plus fondamental.

L'origine même du frottement reste largement incomprise et suscite de nombreuses études au niveau mondial, avec des découvertes récentes très prometteuses [12].

### VI.1. Définition

Le frottement peut être défini comme la force qui agit entre deux corps à leur surface de contact, de façon à freiner le déplacement de l'une par rapport à l'autre [12-13].

### VI.2. Force et coefficient de frottement

Une pièce (2) est appliquée contre une pièce plane (1) par une force  $N$  normale au point de contact (figure I.27). L'expérience montre qu'on peut appliquer à la pièce (2) une force  $T$  parallèle à la surface de contact sans qu'elle se mette en mouvement. Il existe donc une force  $F$  appliquée par le corps (1) à la pièce (2) capable de s'opposer à  $T$  et d'empêcher le mouvement.

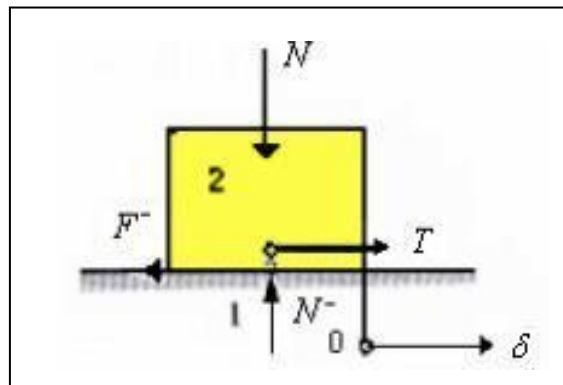
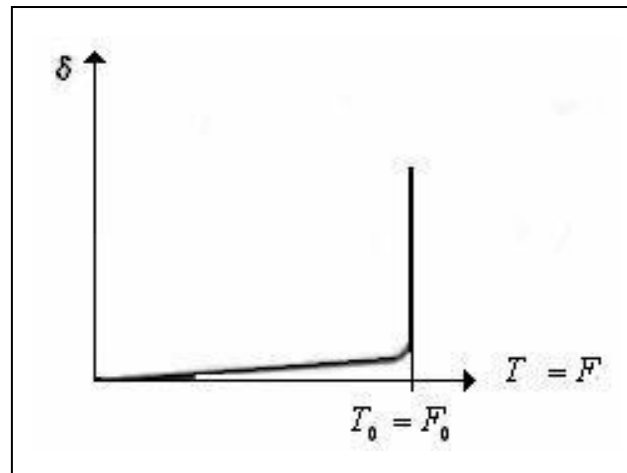


Figure I.27 : Force de frottement [9].

En observant le déplacement  $\delta$  du solide (2) à partir de sa position où  $T = 0$ , on observe d'abord un très petit mouvement qu'on appelle micro glissement lorsque  $T$  croît (figure I.28). Pour une certaine valeur  $T_0 = F_0$ , la pièce se met en mouvement, en supprimant la force tangentielle  $T$ , la pièce ralentit, puis s'arrête [9].



**Figure I.28 :** Mouvement de glissement [9].

Ces observations montrent qu'il existe un phénomène dans la surface de contact des pièces qui s'oppose à leur glissement relatif, c'est le frottement. On peut en donner la définition suivante : le frottement est un phénomène à la surface d'un corps qui empêche son glissement sur un autre corps (frottement statique) ou qui dissipe de l'énergie mécanique en cas de glissement (frottement dynamique). Par définition, le coefficient de frottement  $\mu$  est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale qui les applique l'une sur l'autre [9].

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (\text{I.28})$$

Où :  $F = T$  est la force nécessaire à un glissement permanent.

Et  $N$  la charge s'exerçant sur le solide (2) lors du déplacement.

La formule (I.28) est la loi d'AMONTONS qui est la seule formule actuellement disponible en frottement sec. La figure I.29 Représente la pièce (2) isolée. A l'équilibre statique :

- La réaction normale de la pièce (1) est égale et opposée à l'action de (2),  $N = -N$  ;
- La force de frottement est égale et opposée à la force tangentielle exercée sur (2),  $F = -T$  ;
- La réaction résultante de la pièce (1) est égale et opposée à la réaction de (2),  $R = -R$ .

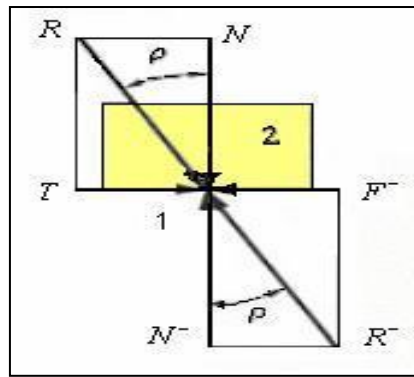


Figure I.29 : Angle de frottement [9].

L'angle de frottement indique l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à la surface, il vaut :

$$\rho = \arctan \frac{T}{N} = \arctan \frac{F}{N} \quad (\text{I.29})$$

Où :  $\mu = \tan \rho$

Le coefficient de frottement  $\mu$  n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique. C'est-à-dire que, par exemple, un couple graphite-graphite a un coefficient de frottement de 0,1 environ dans une atmosphère normalement humide alors que ce coefficient est supérieur à 0,5 si l'atmosphère ambiante est très sèche [9].

Nous constatons que, la résultante  $R$  d'après la figure I.30 est toujours inclinée du même angle de frottement  $\rho$  par rapport à la normale, c'est-à-dire qu'elle se trouve toujours sur un cône d'axe normal au plan et de demi angle au sommet  $\rho$ , que nous appelons cône de frottement.

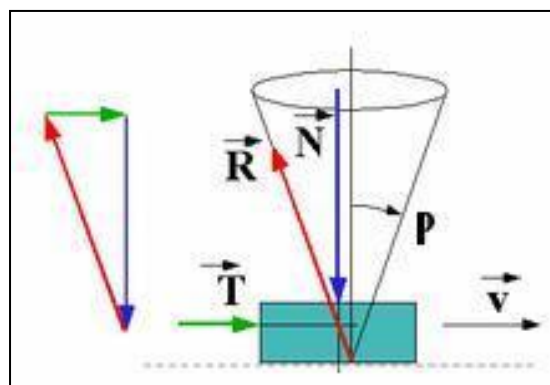


Figure I.30 : Cône de frottement [9].

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 (formule I.30) :

$$\mu = \frac{F}{N} = \tan \rho \quad (\text{I.30})$$

(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

$$\mu_0 = \tan \rho_0 \geq \frac{F}{N} \quad (\text{I.31})$$

### VI.3. Comportement du coefficient de frottement

Les principaux paramètres qui influencent sur le comportement du coefficient de frottement et par conséquent sa valeur sont :

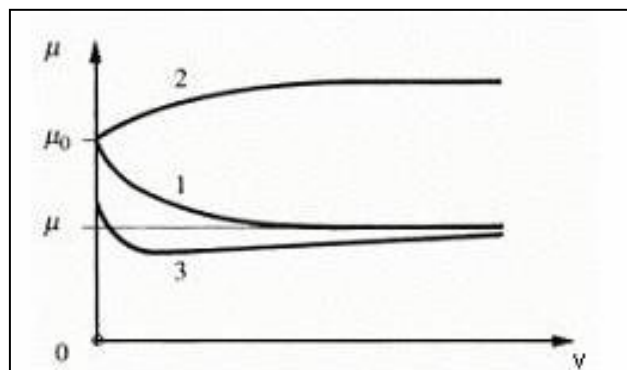
#### ❖ Vitesse de glissement

La valeur du coefficient de frottement est généralement différente à l'arrêt que lorsque les corps glissent l'un sur l'autre on distingue [4, 9]:

- Le coefficient de frottement statique (à l'arrêt)  $\mu_0$ .
- Le coefficient de frottement dynamique (avec glissement)  $\mu$ .

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure I.31, courbe 1), il atteint rapidement la valeur dynamique lorsque la vitesse dépasse quelques cm/s. A très grande vitesse, plus de 150m/s, le coefficient de frottement des métaux diminue fortement, il peut tomber jusqu'à 0.02, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant.

Certains matériaux non métalliques présentent au contraire une augmentation du frottement avec la vitesse, courbe 2.



**Figure I.31** : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement [9].

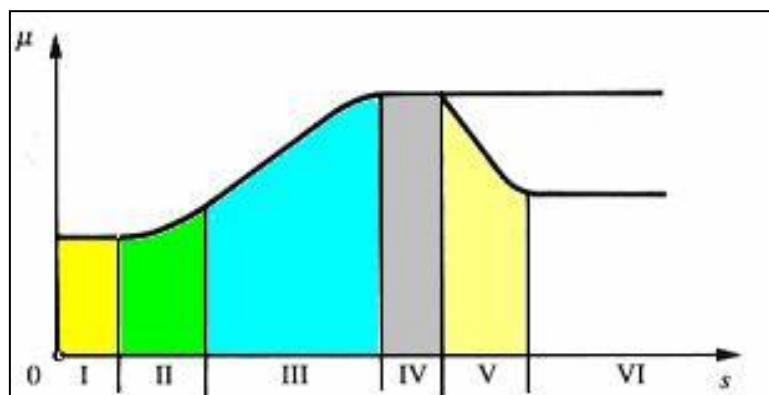
La différence entre le coefficient de frottement dynamique et le frottement statique est plus marquée avec les polymères qu'avec les métaux.

Si les surfaces sont abondamment lubrifiées en régime de frottement mixte (courbe 3), le coefficient de frottement statique est plus bas qu'en régime sec et diminue relativement moins avec le glissement, puis il augmente lentement du fait du cisaillement du liquide ou de la graisse.

On est habituellement intéressé par le frottement à des petites valeurs de vitesse 0,5m/s pour éviter l'échauffement et l'usure [9].

### ❖ Chemin de glissement parcouru

La figure I.32 représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement, SUH distingue six stades [9]:



**Figure I.32** : Evolution du frottement avec la distance de glissement [9].

**I** : Les surfaces sont initialement propres, le frottement résulte principalement de phénomènes de labourage et de déformation.

**II** : Le frottement commence à croître lentement à cause de petits arrachages de matière. Avec des surfaces lubrifiées, le stade I persiste longtemps et le stade II peut faire défaut.

**III** : Le coefficient de frottement croît parce que les débris d'usure entre les surfaces s'incrustent dans l'une ou l'autre des surfaces en provoquant un intense labourage.

**IV** : Le coefficient de frottement se stabilise lorsque le nombre de nouveaux débris d'usure est égal au nombre de débris qui quittent la surface.

**V** : On observe parfois qu'un matériau dur se polit lorsqu'il frotte contre une surface tendre. Le coefficient de frottement diminue parce que le labourage est moins intense.

**VI** : Si les deux surfaces se polissent et que les débris d'usure sont enlevés ou assez profondément incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure, le coefficient de frottement prend une valeur constante de fin de rodage.

Ces stades dépendent des matériaux, des conditions expérimentales, de la contamination des surfaces et des conditions ambiantes.



### ❖ Etat de surface

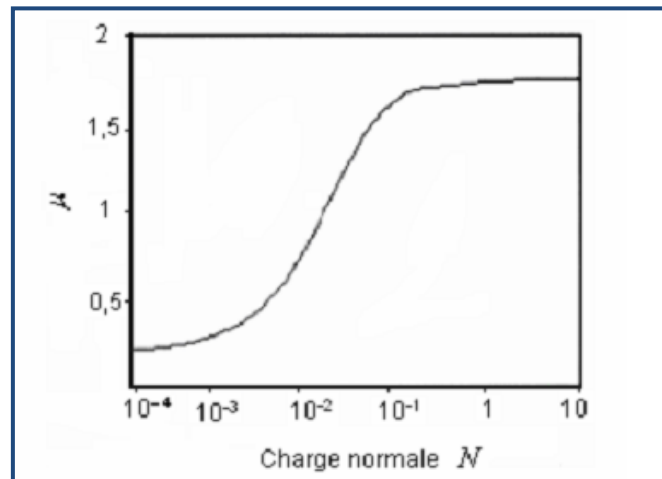
Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses [4, 9, 12].

### ❖ Nature des métaux

Le frottement diminue lorsqu'un des matériaux du couple tribologique est tendre, car l'effort de labourage est faible. C'est pourquoi on revêt les surfaces d'une fine couche d'un matériau tendre ou d'un film d'oxyde [4].

### ❖ Charge normale appliquée

La figure I.34 donne un exemple de la variation du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la charge normale appliquée  $N$  pour du cuivre glissant sur du cuivre dans l'air et sans lubrification pour un essai pion-disque [9].



**Figure I.34:** Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale [9].

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1 à 10 nm) qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant une augmentation progressive du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal [9, 12].

### ❖ Température ambiante

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève; puis, au-delà de 500 °C à 800 °C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue [9].

Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà [4, 9].

## VII. USURE

Un certain nombre de classifications des modes d'usure sont disponibles dans la littérature. Aucune norme n'existant à l'heure actuelle sur le sujet, nous choisirons d'utiliser une classification inspirée de celle de Stachowiak et al. [14]. Elle distingue : l'usure due à l'action d'une particule sur la surface d'un solide (usure par abrasion, érosion ou cavitation), l'usure due au passage répété d'un solide sur une surface (usure par fatigue), et l'usure due aux forces d'attraction entre les atomes de deux surfaces (usure adhésive). Viennent ensuite des modes d'usure plus spécifiques, comme l'usure corrosive ou l'usure par fretting.

### VII.1. Usure par adhérence

La composante adhésive du frottement est due à la formation et à la rupture de liens entre les deux surfaces [19]. Ces liens résultent de forces interatomiques interfaciales qui dépendent du degré d'interpénétration des aspérités et de la composition des surfaces. Lors de la mise en glissement, la force de frottement doit cisailer le plan le plus faible afin de permettre le mouvement. Elle se caractérise généralement par un fort taux d'usure et un coefficient de frottement instable. Cette forme d'usure peut entraîner une destruction rapide des surfaces frottantes, pouvant aller jusqu'à l'arrêt du mouvement à cause de trop grandes valeurs de coefficient de frottement. Les particules d'usure créées ont une distribution de taille assez large et sont souvent transférées sur l'un des solides en contact.

Trois aspects caractérisent alors la force de frottement :

- ⊗ Un aspect microscopique (adhésion) lié aux propriétés physiques et chimiques (structure atomique, liaisons pendantes, défauts, etc.) à l'échelle atomique des matériaux en contact,
- ⊗ Un aspect géométrique lié à la variation de l'aire réelle de contact lors du frottement,
- ⊗ Un aspect macroscopique (adhérence) qui englobe les deux points précédents ainsi que le comportement mécanique volumique des matériaux de l'interface.

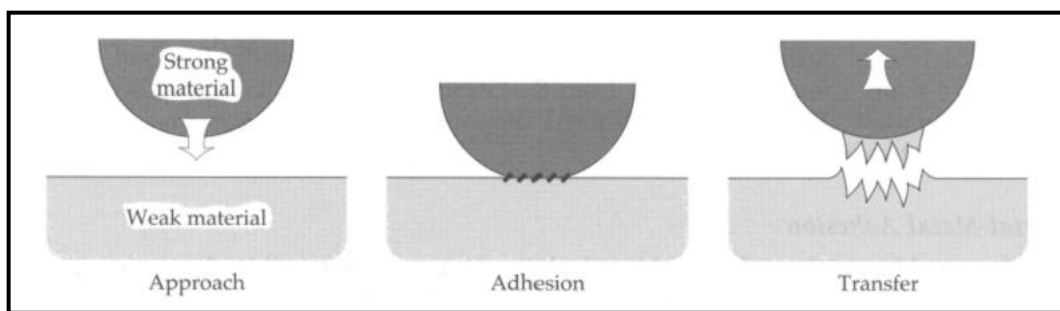


Figure I.35 : Procédé de transfert de matière par adhésion [14].

L'usure par adhérence est toujours la première à apparaître, même en l'absence d'abrasifs ou de produits d'usure. Elle se divise en deux classes [12]:

- ❖ l'usure *douce (soft)* qui produit des débris petits, plats, minces et formés principalement d'oxydes. L'usure douce laisse les surfaces lisses et polies, augmente la capacité de charge.
- ❖ l'usure *sévère (hard)* caractérisée par des débris grossiers, anguleux, nombreux, formés d'un mélange d'oxydes et du matériau de base crée de la rugosité. L'usure sévère conduit éventuellement au grippage du mécanisme.

#### **Pour limiter l'usure par adhérence :**

- Utiliser des surfaces dures.
- Favoriser un profil adéquat pour la surface.
- Utiliser des charges raisonnables pour la dureté et le fini (par expérience ou en estimant l'aire réelle de la surface portante).
- Favoriser la formation des films d'oxydes (vitesse raisonnable) :
- Utiliser des matériaux tribologiquement compatibles (voir **annexe 1**).
- Les facteurs d'usure servent à comparer des situations semblables (*Tribology Data Handbook, E.R. Booser, Press, 1997*).
- Pour les matériaux durs et fragiles comme les **céramiques**, il faut limiter la charge à une valeur que l'on appelle la charge critique.
- Pour les **polymères**, la résistance à l'usure est inversement proportionnelle à la ténacité que l'on peut associer à la déformation à la rupture,  $\theta_v$ .

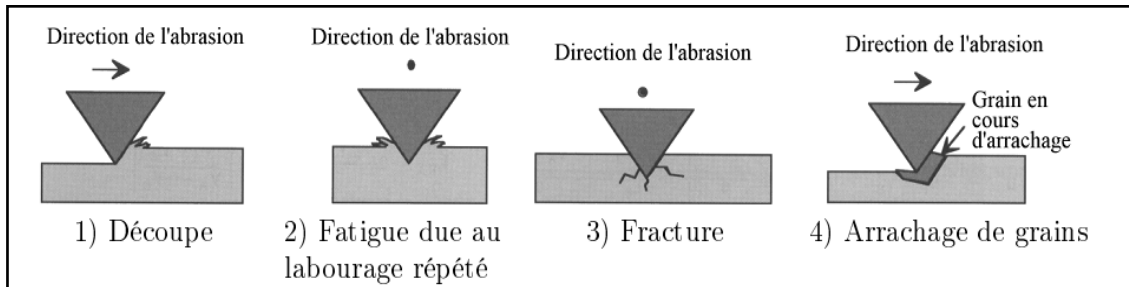
#### **VII.2. Usure par abrasion**

L'usure abrasive est due au contact entre une aspérité et la surface d'un solide. Cette aspérité peut être un pic de rugosité sur une des surfaces, une particule ayant été détachée de l'une des deux surfaces, ou bien un troisième corps introduit dans le contact. Cette aspérité peut dégrader la surface du solide selon différents mécanismes présentés sur la figure I.36. La sévérité du contact dépend des propriétés et de la géométrie des matériaux en contact.

L'aspérité peut [39] :

- ✚ Couper, si elle est suffisamment aiguisée
- ✚ Repousser la matière en surface (labourage),
- ✚ Provoquer une fracture, si le solide est fragile,
- ✚ Enlever des grains, si le matériau est insuffisamment homogène.

La nature de l'usure abrasive est précisée par le mode d'acheminement de l'aspérité dans le contact : soit l'aspérité est fixée à l'une des surfaces, et l'on parle alors d'abrasion à deux corps, soit l'aspérité est mobile par rapport aux deux surfaces, et l'on parle alors d'abrasion à trois corps [4].



**Figure I.36** : Schémas des quatre modes d'usure abrasive : découpe, fatigue, fracture et arrachage de grain, extraits de [4].

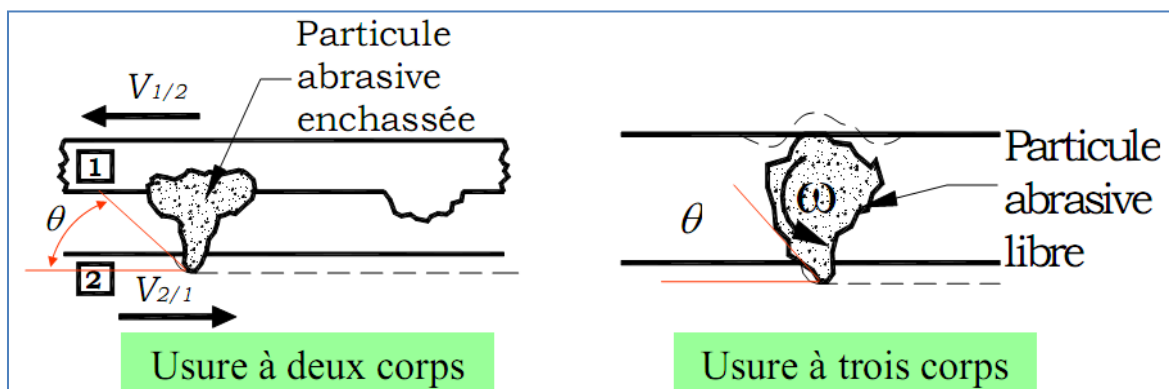
Le passage de l'aspérité sur la surface peut produire : soit un copeau qui enlève de la matière - c'est l'abrasion par coupe, soit un bourrelet plastique sur les bords de la rayure qui va peu à peu disparaître sous le passage répété des aspérités, c'est l'abrasion par fatigue.

Dans ces deux cas, le faciès d'usure est constitué de rayures fines parallèles à la direction de glissement. Un mécanisme de fracturation peut se produire lors du frottement, surtout si l'un des matériaux en contact est fragile. Cette fracturation est initiée par la contrainte de traction présente à l'arrière du contact, et se produit en surface ou en sous-couche [4].

Le mécanisme d'**usure par abrasion** suit naturellement celui par adhérence dès qu'il y a formation de débris d'usure.

C'est le mécanisme d'usure qui prévaut dans toutes les machines, le plus sévère et celui qui cause le plus de pertes de matériau [4, 9].

L'usure par abrasion peut se faire à deux ou à trois corps :



**Figure I.37**: Exemples d'usure par abrasion [12].

Le mécanisme d'usure par abrasion conduit à une équation d'usure de la forme :

$$V_a = K_1 K_2 \frac{W}{H} L \quad (\text{formule d'ARCHARD}) \quad (\text{I.32})$$

Où :  $V_a$  est le volume d'usure,  $W$  : la force normale,  $H$  : la dureté du matériau,  $L$  : la longueur glissée,  $k_1$  est identique au coefficient d'usure par adhérence Et  $k_2$  est fonction de l'angle des particules abrasives.

$$K_2 = \frac{\pi}{2 \tan \theta} \quad (\text{I.33})$$

Pour les métaux :

$V_a$  augmente régulièrement quand la charge  $W$  augmente et la dureté  $H$  diminue.

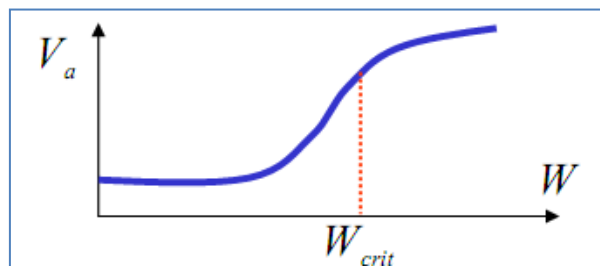
Pour une bonne conception, il faut garder :

$$\frac{H_s}{H_a} > 1,2$$

$H_s$  = dureté de la surface;  $H_a$  = dureté de la particule abrasive.

Pour les céramiques :

- L'usure par **abrasion** est faible ( $k_1$   $k_2$ ) à cause de leur grande dureté en général,
- $V_a$  augmente brusquement à une valeur de  $W$  appelée  $W_{crit}$ .
- Au delà de  $W_{crit}$ , il y a écaillage de la surface à cause de la fragilité (dureté) du matériau; l'usure devient *sévère* avec apparition de gros fragments d'usure et des surfaces rugueuses.



**Figure I.38** : L'évolution du volume d'usure en fonction de la force normale [12].

Pour les polymères :

- Ces matériaux sont très sensibles à l'usure à cause de leur faible dureté.
- Leur résistance à l'usure semble régie par une relation de la forme :

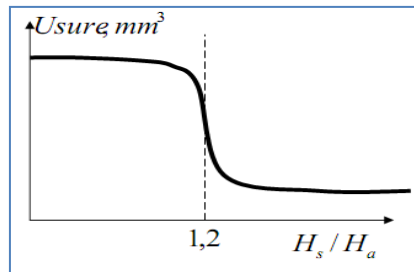
$$V_a \propto \frac{1}{\epsilon_u S_u} \quad (\text{I.34})$$

$\epsilon_u$  = la déformation à la rupture.

$S_u$  = la limite ultime

- $\varepsilon_u S_u$  est proportionnel à l'aire sous la courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$ .
- Les élastomères (caoutchouc) et le UHMWPE sont des exemples de matériaux pour lesquels le produit  $\varepsilon_u S_u$  est grand et qui sont remarquablement résistants en usure par abrasion.

**La dureté de surface est primordiale :**



**Figure I.39 :** L'évolution du volume d'usure en fonction du rapport de dureté [12].

On veut que  $H_s / H_a > 1,2$

- $H_a$  est la dureté de l'abrasif.
- $H_s$  est la dureté de la surface.

Il faut favoriser l'élimination des débris d'usure en prévoyant des micro-canaux dans la surface ou en utilisant des surfaces avec des vallées profondes.

### VII.3. Usure par érosion

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre une surface solide. Ce mécanisme dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact, et de la taille de la particule.

Plusieurs types d'érosion sont observés [14] :

- ✚ Découpe,
- ✚ Fatigue,
- ✚ Repoussage ou fissuration,
- ✚ Fusion,
- ✚ Erosion à l'échelle atomique.

Ce mode d'usure présente de nombreuses similitudes avec l'usure abrasive.

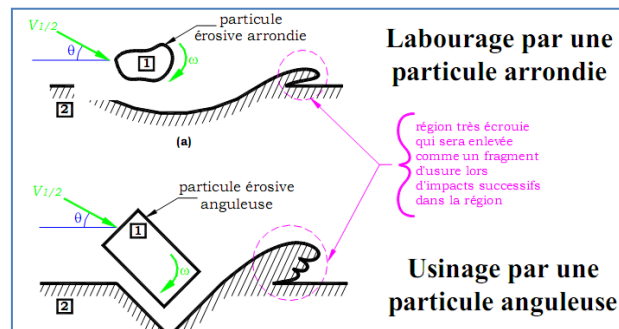
$$W_0 \propto V^m ; W_0 = \frac{W}{V_a} \quad (\text{I.35})$$

Où  $W_0$ , le rapport  $W/V_a$  du volume de matériau enlevé par unité de temps sur le volume  $V_a$  des particules abrasives qui frappent la surface par unité de temps, est proportionnel à la vitesse du fluide abrasif. L'exposant  $m$  varie entre 2,05 et 6,5 selon l'angularité de la

particule, sa vitesse de rotation (et son sens), son angle d'incidence, sa dureté relative comparée avec la surface frappée et la ductilité de cette surface.

Le nombre de variables étant grand, la constante de proportionnalité est d'autant plus difficile à cerner.

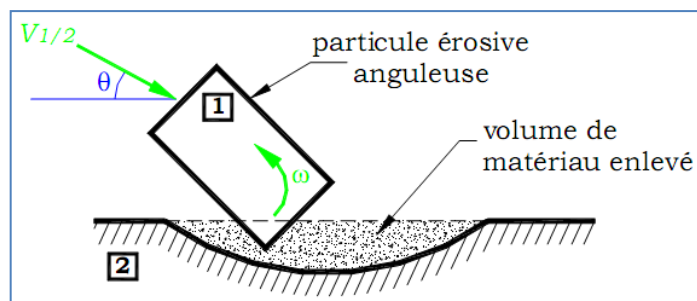
La particule anguleuse a plus d'action abrasive que la particule arrondie.



**Figure I.40** : Action abrasive d'une particule arrondie et d'une particule anguleuse [12].

La vitesse angulaire de la particule est dans le même sens que sa vitesse par rapport à la surface : l'action érosive est moins importante.

La vitesse angulaire de la particule est dans un sens contraire à celui de sa vitesse relative par rapport à la surface fixe : l'action érosive est plus importante.

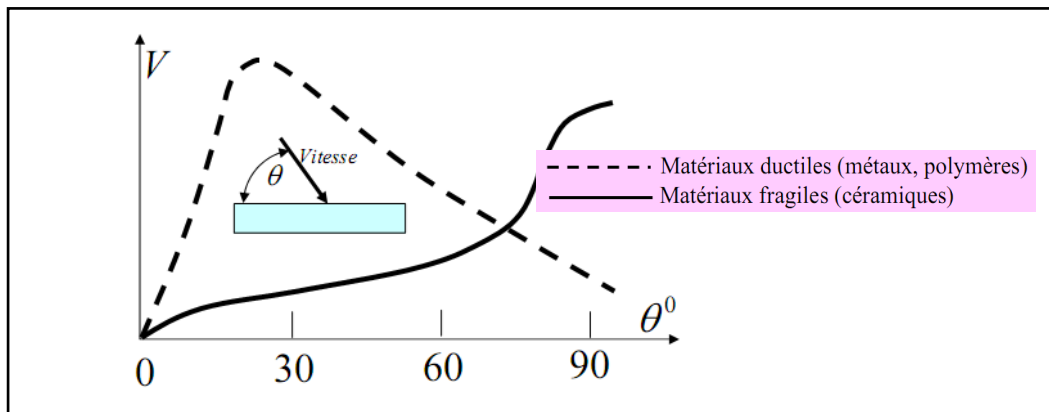


**Figure I.41**: La particule est dans un sens contraire à celui de sa vitesse relative [12].

#### ❖ Effet de l'angle d'incidence $\theta$ sur le volume d'usure $V$ d'un matériau fragile et d'un matériau ductile

A un faible angle d'incidence, la particule ricochera contre la surface dure d'un matériau fragile. Par contre, à un angle fort, toute l'énergie de la particule sera transformée en déformation élastique qui va fissurer la surface et engendrer un débris d'usure.

Avec un matériau ductile, l'énergie de la particule sera transformée en déformation plastique.



**Figure I.42:** L'évolution du volume d'usure en fonction de l'angle d'incidence  $\theta$  [12].

#### ❖ *Limiter l'usure par érosion*

- Comme l'abrasion, il faut  $H_s / H_a > 1,2$ .
- L'angularité des particules est importante.
- L'angle et la vitesse d'incidence est à considérer comme en abrasion.
- Limiter l'énergie de la particule avec les matériaux fragiles.

Utiliser des matériaux tenaces ; une mesure de la ténacité est la déformation  $\varepsilon_u$  à la rupture.

#### **VII.4. Usure par fatigue**

Le contact entre les aspérités d'un solide et une surface antagoniste entraîne l'apparition de contraintes locales très fortes, qui, associées à un passage répété, peuvent provoquer l'apparition et la propagation de fissures dites de fatigue. Ces fissures se traduisent à terme par un enlèvement de matière par délamination au bout d'un certain nombre de cycles.

Les surfaces usées présentent un important taux de déformation plastique dans le cas de forts coefficients de frottement (autour de 1), se traduisant par une réorientation de la structure dans la direction du mouvement sous l'action de la force de frottement [14]. Cette réorganisation n'est pas observée lorsque le coefficient de frottement est plus faible.

L'amorçage de fissures par fatigue à partir d'un point faible de la surface peut lui permettre ensuite de se propager le long de plans de glissement par exemple. La propagation de ces fissures et leur rencontre entre elles, ou avec une fissure préexistante sous la surface créent les particules d'usure. Si le mécanisme de réorientation de la surface a pu prendre place auparavant, les plans de glissement sont alors orientés parallèlement à cette surface et des particules d'usure de forme aplatie sont alors produites. Influence de l'oxygène. Ce mode d'usure apparaît comme étant très dépendant du taux d'oxygène en présence pour les



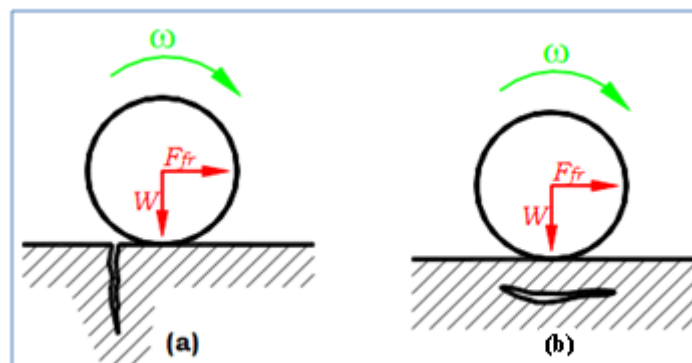
matériaux réactifs comme le nickel, et indépendant de celui-ci pour les métaux nobles [14].

Ceci peut s'expliquer par le fait que les métaux réactifs ont tendance à former un oxyde dès leur contact avec l'air, donc par exemple à l'ouverture d'une fissure. Lorsque la fissure se referme, sous l'action d'une contrainte opposée à celle ayant permis son ouverture ou lors de l'enlèvement de cette contrainte, de la matière excédentaire due à la formation de l'oxyde empêche toute cicatrisation de la structure par recollement partiel de la fissure, contrairement aux métaux nobles. Diminuer le taux d'oxygène permet de ralentir ce processus. Fissuration en sous couche. De la fissuration en sous couche peut également se produire pendant le glissement des deux surfaces l'une sur l'autre.

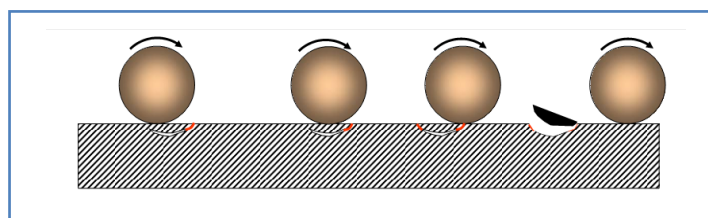
Les surfaces peuvent alors paraître non usées alors que des mécanismes de fissuration sont en cours en sous couche. Si elle n'est pas possible en surface, la fissuration peut trouver son origine sur des impuretés ou des défauts présents sous la surface comme le montre la figure I.43.

Les contraintes normales vont engendrer des microfissures en surface alors que les contraintes de cisaillement créent des fissures sous la surface.

Les fissures sous la surface vont se propager et éventuellement détacher un fragment de la surface, créant un débris d'usure et laissant un cratère dans la surface, appelé pitting figure I.44 [12].



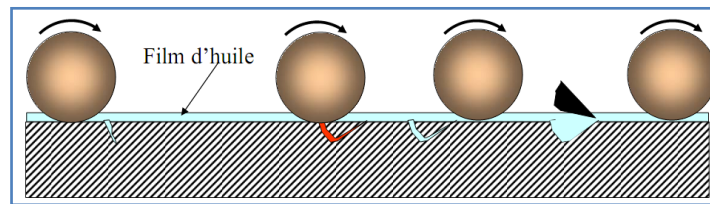
**Figure I.43:** Formation de fissures : en roulement pur (a) et en roulement glissant (b) [12].



**Figure I.44:** Mécanisme de création du pitting (frottement sec) [12].

Ce mécanisme d'usure est commun dans les roulements, les engrenages, les cames, les chaînes.

Ce mécanisme est inévitable et fortement fonction de la probabilité des défauts dans la structure cristalline du matériau sous la surface, là où les contraintes de cisaillement sont maximales.



**Figure I.45:** Mécanisme de création du pitting (frottement lubrifié) [12].

Les fissures en surface s'emplissent d'huile. Quand l'élément roulant passe au dessus de la fissure, il la ferme et y comprime fortement l'huile emprisonnée (plusieurs centaines de MPA). La fissure avance dans le matériau, se courbe et éventuellement rejoint la surface plus loin que son point d'origine. C'est ainsi qu'il se forme un fragment d'usure et qu'il reste un cratère dans la surface « pitting » figure I.45.

### **Limiter l'usure par fatigue**

L'usure par fatigue est inévitable : tous les matériaux cristallins ont des défauts de structure susceptibles d'engendrer des fissures qui conduisent inéluctablement à la fatigue. Le phénomène est aussi fortement lié à la probabilité qu'un défaut se trouve au bon endroit pour développer une fissure [4,12].

Pour limiter l'usure par fatigue, il faut :

- ❖ Limiter la charge. Les manufacturiers de roulements appellent cette charge la *limite de fatigue*, qui est en général 20 fois plus faible que la charge normale.
- ❖ Utiliser des matériaux très purs, ayant peu de défauts.
- ❖ Fermer les fissures de surface (par grenailage par exemple).

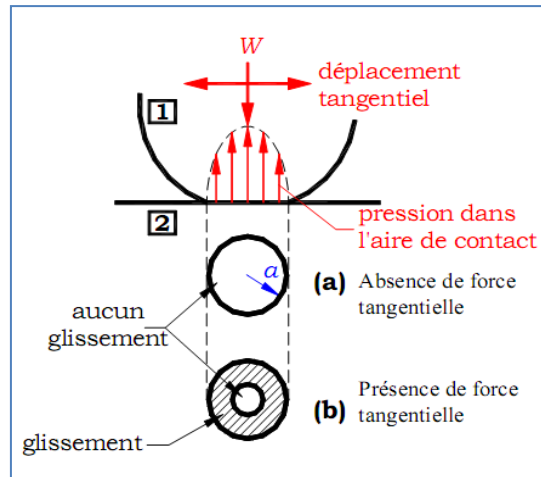
### **VII.5. Usure par fretting**

Le fretting est un mouvement oscillatoire de faible amplitude qui peut se produire entre deux surfaces en contact. Le contact est souvent en glissement partiel, c'est à dire que les deux solides n'ont pas de mouvement relatif dans la partie centrale du contact, mais ils glissent sur un anneau en périphérie du contact [16]. Les cycles de sollicitation provoquent la fissuration des matériaux et la formation de débris qui peuvent accélérer l'usure quand ils restent dans le contact.

Le fretting est un mécanisme d'usure par adhérence qui résulte du frottement de glissement sans qu'il y ait de mouvement apparent entre les deux solides. Dans un contact de

Hertz, la pression présente une distribution elliptique, nulle aux extrémités et maximale au centre.

La force de frottement est fonction de la normale et de la pression; elle est nulle aux extrémités et maximale au centre. En l'absence de force externe, il y a adhérence sur toute la surface de contact [12].



**Figure. I.48:** Distribution de la pression dans un contact de Hertz [12].

En présence d'une force externe qui cause seulement un mouvement microscopique entre les solides (vibration), un certain mouvement relatif peut exister entre les solides sur le pourtour du contact, sans qu'il n'y ait de mouvement apparent entre les deux solides.

Ce déplacement cause du glissement sur le pourtour et de l'usure d'adhérence. Les fragments d'usure microscopiques s'oxydent et restent dans le contact; il s'ensuit de l'usure par abrasion. Les fragments d'usure sont très oxydés et forment une poudre de rouille (rouge  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou brune  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). La surface moins oxydée est tachée en noir ( $\text{FeO}$ ).

### Limiter l'usure par fretting

L'usure par fretting se produit dans les montages serrés ou entre les pièces de machines au repos. Dans les montages serrés, il faut s'assurer que le serrage est suffisant pour prévenir le mouvement entre les pièces jointes, comme dans les joints glissement boulonnés ou les montages à interférence.

Dans les machines au repos, il faut laisser un film de lubrifiant entre les pièces pour éviter l'adhérence au contact.

**VII.6. Autres types d'usure****⊗ Usure corrosive et oxydative.**

Les différents matériaux ont une réactivité à l'environnement plus ou moins grande. Des réactions chimiques entre la surface d'un matériau et l'environnement peuvent se produire lors du frottement, voire être favorisées par l'augmentation locale de la température dans la zone de contact.

La modification des propriétés de la surface due à cette réaction (de corrosion ou d'oxydation) implique un comportement tribologique différent du système, et dans certains cas une dégradation de ce comportement : on parle alors d'usure corrosive ou oxydative.

**⊗ Usure par cavitation.**

La cavitation est un phénomène apparaissant lorsqu'un liquide atteint au voisinage d'une surface solide sa pression de vapeur saturante. Il se crée alors une cavité instable qui implose et induit une onde de choc près de la surface du solide.

Cette implosion augmente localement le niveau de contrainte à la surface du solide, laissant le plus souvent une empreinte en forme de cratère.

## **CHAPITRE II**

### **LES DIFFERENTS TYPES DE TRIBOMETRES**

## I. Introduction

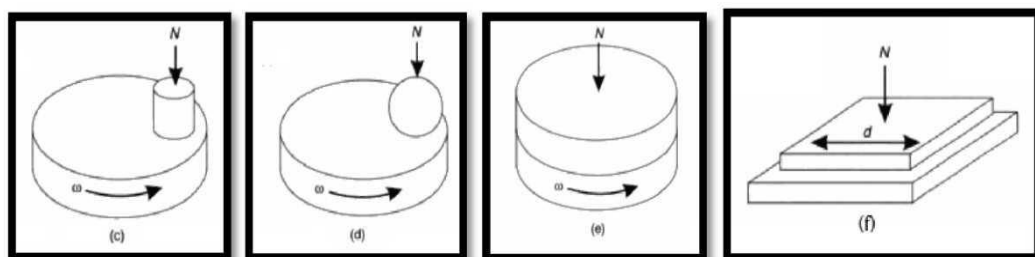
Malgré le grand nombre de travaux expérimentaux et théoriques consacrés à l'étude des contacts, les phénomènes régissant le comportement rhéologique et physico-chimique des matériaux dans l'interface sont loin d'être parfaitement compris. La compréhension de ces phénomènes implique de connaître de façon locale les paramètres physiques (pression, contrainte de cisaillement, température) existant dans le contact. Généralement, ces paramètres ne sont déterminés que de façon globale. On mesure par exemple la force de frottement moyenne sur l'ensemble du contact, mais on ne connaît pas sa distribution dans la zone de contact [7].

Les tribomètres sont spécialement conçus pour la mesure précise des forces mises en jeu. Les instruments peuvent assurer un déplacement rotatif ou alternatif de l'échantillon. Un point particulier de ces instruments repose sur la possibilité d'interrompre le test dès que le coefficient de frottement atteint une valeur prédéfinie, ou, lorsqu'un nombre de cycles est réalisé. De plus, plusieurs tribomètres sont équipés d'une enceinte de confinement afin d'utiliser l'instrument dans des conditions atmosphériques de température contrôlées. Des instruments spécifiques ont été développés pour des applications haute température en mode rotatif, ou en vide primaire ou secondaire.

L'utilisation de tribomètre est également possible en présence de lubrifiants pour étudier le frottement lubrifié ou en présence de milieux corrosifs pour étudier la tribocorrosion. Les différents tribomètres que nous citerons si dessous, nous montrent que, suivant le montage choisit, nous obtenons différents types de renseignements [9].

En tribométrie, une bille, une pointe ou un plan est placé en contact avec la surface de l'échantillon sous une charge. Le contact est donc selon la configuration comme suit [12]:

- pion-disque (figure c),
- bille-disque (figure d),
- disque-disque qui piège et recycle ces débris (figure e),
- plan-plan dont l'un des plans peut être remplacé par du saphir permet une observation direct du contact (figure f).



**Figure II.1** : Les différentes configurations de contact outil-échantillon [12].

## II. Les différents types de tribomètres

### II.1. Tribomètre à haute température

Pour étudier les phénomènes d'usure et de frottement **M.G. GEE** et al. [17] groupe de travail du *Laboratoire Nationale de Physique de Eddington* en Grande-Bretagne adaptèrent une installation expérimentale sous vide et à haute température (à environ 1200° C) travaillant aux mêmes conditions que la chambre de combustion de l'automobile et/ou de l'engin hypersonique.

A la même période, **H.E SLINEY** et al. [18] chercheurs du département de Mécanique et de la Technologie Avancée de Cleveland aux Etats-Unis travaillèrent sur un montage similaire sous les mêmes conditions pour déterminer le comportement tribologique de la céramique.



**Figure II.2 :** Tribomètre sous vide à haute température [17].

### II.2. Tribomètre à atmosphère contrôlée

Pour contourner le problème de l'étanchéité dynamique, **NAKAYAMA** a utilisé un accouplement magnétique [19]. Les caractéristiques de ce tribomètre sont les suivantes (figure II.3):

- ❖ la configuration (verticale) du contact est de type pion hémisphérique sur disque avec un diamètre de la piste de frottement d'environ 23 mm,
- ❖ l'enceinte peut atteindre un vide secondaire d'environ 10<sup>-6</sup> mbar avec la possibilité d'injection de l'azote,
- ❖ la vitesse de rotation peut varier entre 5 tr/min et 600 tr/min,
- ❖ le chargement est appliqué par gravité et ne dépasse pas 20 N.

Il est clair que l'adoption d'un accouplement magnétique a permis de surmonter une grande contrainte technologique. Ceci dit, le faible chargement est une caractéristique qui peut constituer un handicap si l'on opte pour une configuration pion cylindrique sur disque. Il est à noter que l'emploi de roulements pour assurer le guidage en rotation ou en translation impose une plus grande dimension des pièces, et donc un couple résistant plus

important pour vaincre l'inertie du système.

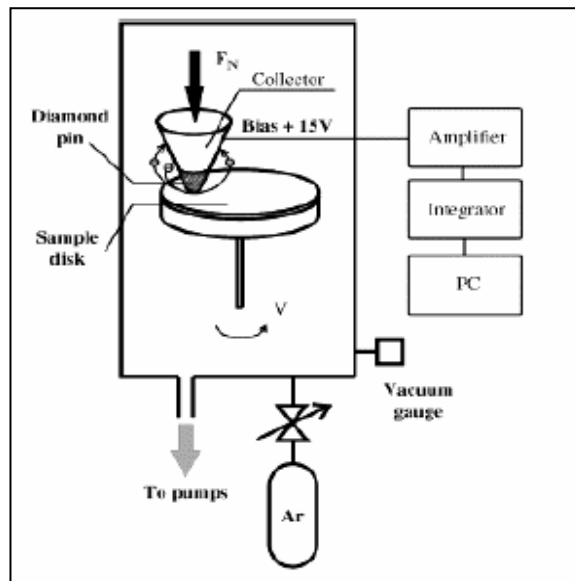


Figure II.3 : Installation Expérimentale pour Triboémission [19].

### II.3. Tribomètre analytique sous ultravide

Pour améliorer la qualité des lubrifiants et afin de percevoir les réactions et les interactions de ces derniers avec les additifs, **J-M. MARTIN et al.** [20] groupe de travail du Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes de l'École Centrale de Lyon (LTDS), a conçu un tribomètre analytique UHV (ultra high vacuum) et a intégré un dispositif muni d'une platine chauffante afin d'analyser in situ les traces de frottement par spectrométrie Auger (AES) et de photoélectrons (XPS) (figure II.4).

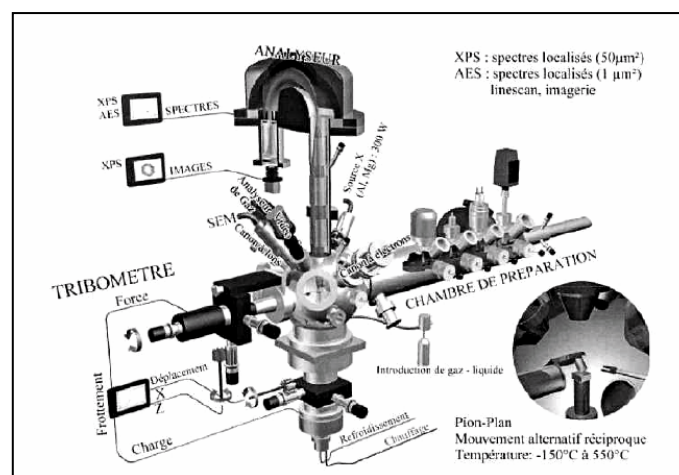


Figure II.4 : Tribomètre analytique sous ultravide-LTDS [20].

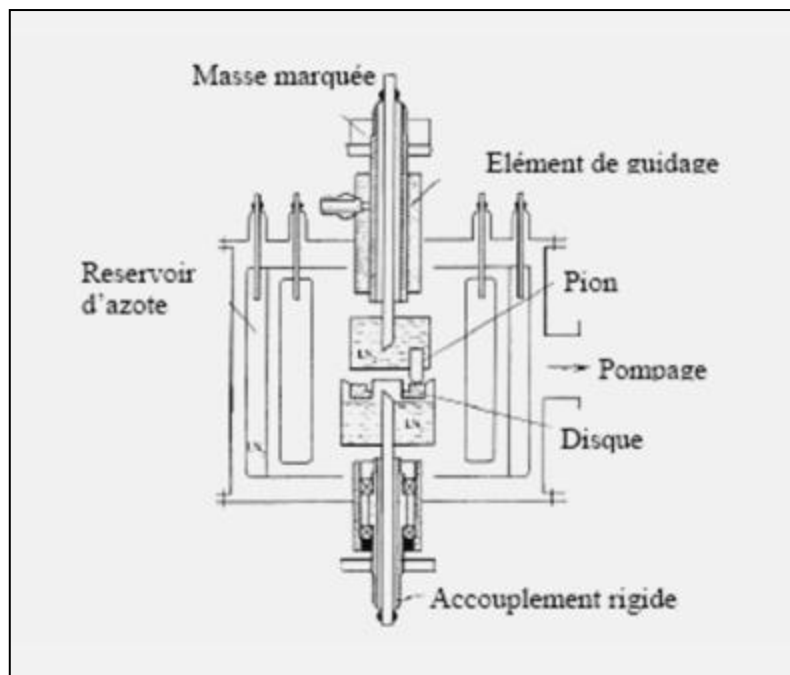
Outre la possibilité de travailler sous différentes pressions partielles de gaz, sa spécificité est de permettre des essais sous ultra vide ( $< 10^{-8}$  Pa). Il fonctionne également sur une large plage de températures (150 - 550°C).



#### II.4. Tribomètre sous vide cryogénique

UDENKO et al. ont développé un dispositif basé sur le concept D'OSTROVSKAYA [21] pour étudier le comportement tribologique sous vide à basse température (environ 77 K). Le tribomètre (figure II.5) se caractérise par :

- la configuration (verticale) du contact est de type pion hémisphérique disque,
- l'enceinte sous vide contenant les éléments en contact, peut atteindre une pression de  $2.10^{-7}$  mbar (par pompage),
- la température est obtenue par équilibre thermique avec un réservoir d'azote liquide (77 K) à l'intérieur de l'enceinte,
- le mouvement de rotation est transmis par un accouplement rigide et guidé par des paliers lisses (vitesse variant de 0,01 à 5 m/s),
- le chargement est effectué par gravité via un arbre qui joue également le rôle de porte échantillon (charges pouvant varier jusqu'à 100 N).

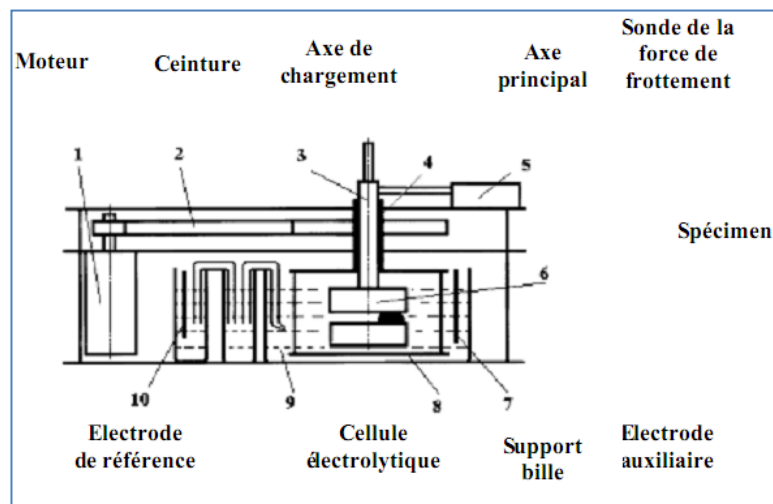


**Figure II.5** Schéma du tribomètre cryogénique [21].

La particularité du tribomètre réside dans l'emploi de l'azote hydrogéné qui circule en permanence dans l'enceinte afin d'évacuer l'humidité et l'oxygène résiduels. Cette solution est justifiée par l'emploi d'un entraînement en rotation du disque par un accouplement rigide. Il y a cependant de grands risques de fuite ainsi qu'un important problème d'étanchéité dynamique [21].

### II.5. Tribomètre plongé dans un milieu agressif

Dans le but d'améliorer la compréhension des mécanismes de tribo-corrosion intervenant sur des métaux passifs, et de perfectionner les techniques d'études ainsi que les critères de sélection des matériaux **Y. HUANG** et al. [22] équipe de travail au Laboratoire de Corrosion et Protection Marine, de l'Institut de l'Océanologie à l'Académie Chinoise des Sciences a développé un montage tribologique à configuration bille/plan modifié en utilisant une solution acide (figure II.6). L'avantage d'un tel dispositif expérimental est qu'il permet de séparer les paramètres mécaniques des paramètres électrochimiques.



**Figure II.6 :** Schéma du tribomètre Bille/plan dans un milieu agressif [22].

### II.6. Tribomètre de freinage

**Y. DESPLANQUES** et al. [23] groupe de chercheurs du Laboratoire de Mécanique de Lille ont conçu un tribomètre de freinage original (figure II.7), destiné à l'étude tribologique des matériaux de friction, à une échelle réduite.

Afin d'apporter des perspectives nouvelles, ils ont proposé un programme de recherche PREDIT appelé "Frein à Performances Améliorées", qui permet d'étudier le remplacement du système existant par un refroidissement actif.

Les intérêts d'une telle application seraient multiples notamment par un gain de capacité d'évacuation d'énergie, une diminution de l'usure et une réduction des masses non suspendues.

Cette équipe présente le comportement tribologique d'un couple disque acier/pion (composite à matrice métallique fritté sous des conditions de freinage à moyenne énergie), d'un point de vue macroscopique en termes de coefficient de frottement et d'usure et, d'un point de vue microscopique par les mécanismes physiques mis en jeu lors du contact.

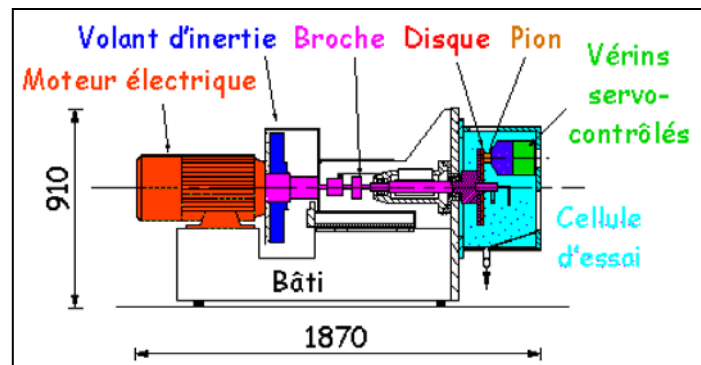


Figure II.7 : Schéma du tribomètre de freinage [23].

### II.7. Tribomètre environnemental

ADAMOU [24] a utilisé dans ses travaux de recherche un nouveau tribomètre environnemental à configuration pion/disque (figure II.8) développé en collaboration avec l'équipe de "transformation de phases" du Centre Interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux de Toulouse (CIRIMAT). Ce tribomètre répond aux spécificités techniques suivantes :

- ❖ la configuration du contact adoptée est du type pion plan fixe / disque rotatif,
- ❖ une enceinte à vide de l'ordre de  $10^{-6}$  mbar avec possibilité d'injection de gaz,
- ❖ la température des échantillons est prévue varier entre l'ambiante et  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- ❖ la capacité de charge est de 1 à 100 N,
- ❖ la vitesse de glissement peut varier de 0,01 et 1,5 m/s.

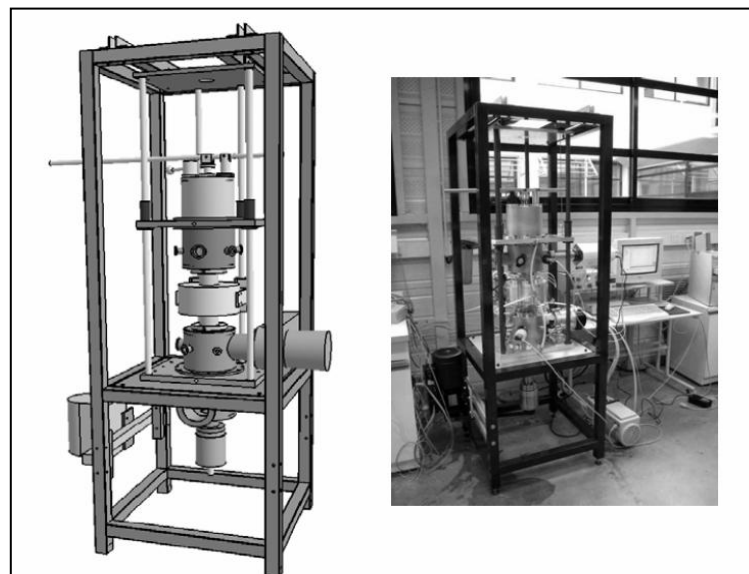
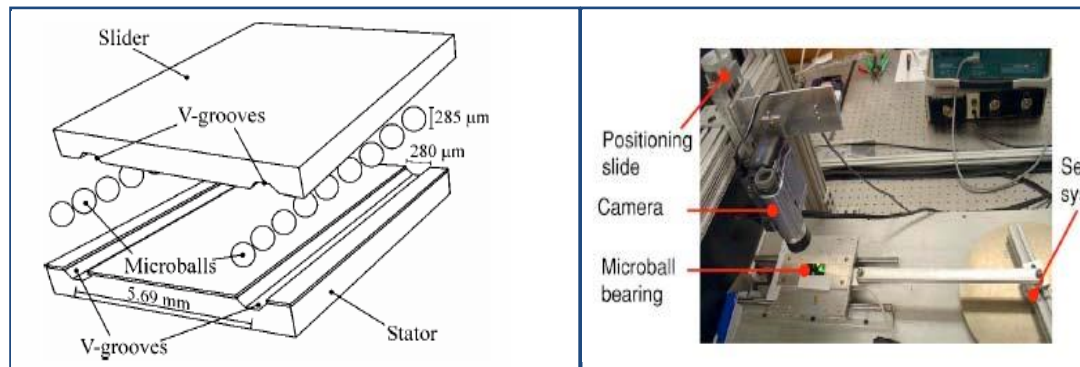


Figure II.8 : Vue générale du tribomètre environnemental [24].

### II.8. Tribomètre linéaire à microbilles

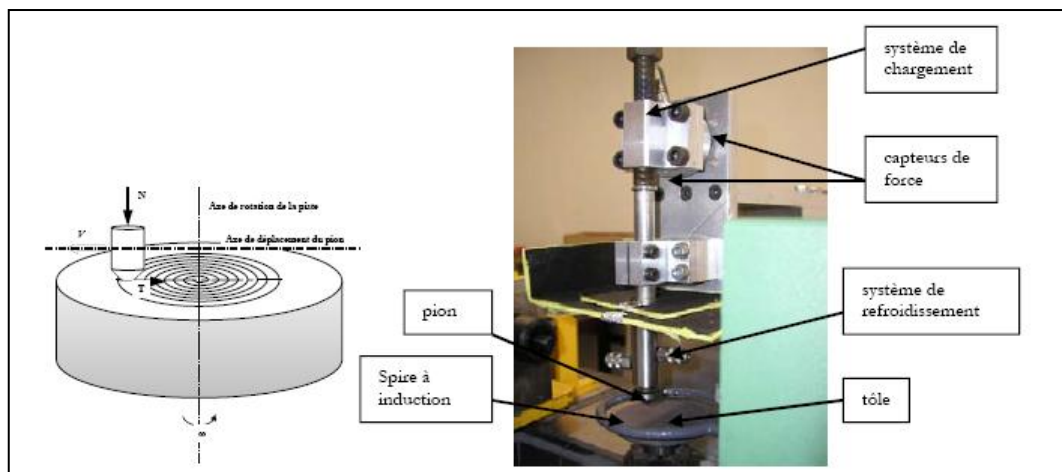
X. TAN et al. [25] groupe de chercheurs du Département Electric et du Génie Informatique, du département de la Technologie Aérospatial de l'institut recherche de systèmes de l'Université du Maryland, ont développé un dispositif tribologique pour la caractérisation du frottement dans des roulements linéaires à microbilles utilisés dans les micromoteurs et des micro-générateurs (figure II.9).



**Figure II.9 :** Schéma du montage des roulements linéaires à microbilles [25].

### II.9. Tribomètre à haute température

L'usure des outils lors de l'emboutissage à chaud est une préoccupation importante dans l'industrie. C'est dans cette optique que M. MARZOUKI et al. [26] chercheurs du Laboratoire de Mécanique Roberval, Université de Technologie de Compiègne (France), ont conçu et réalisé un tribomètre pion sur disque à haute température (figure II. 10).



**Figure II.10 :** Schéma et vue générale du tribomètre [26].

L'originalité de ce tribomètre réside dans son contact ouvert sur une surface continuellement renouvelée. Il permet ainsi la simulation de l'interface outil/produit lors du procédé d'emboutissage des tôles à haute température [27].

### II.10. Tribomètre pour l'étude des biomatériaux

E. SAJEWICZ et al. [28] présentent un tribomètre à contact bille/plan développé pour l'étude du comportement tribologique des matériaux et tissus dentaires. Le dispositif illustré sur la figure II.11 simule les conditions cinématiques et les chargements produits pendant le processus masticator. Le montage est équipé d'un vérin pneumatique et est commandé par un ordinateur muni d'un logiciel spécial appelé TOOTHY. Ce dernier permet l'ajustement facile des paramètres de chargements appliqués facilitant ainsi l'analyse d'usure possible sous différentes situations.

Le dispositif a deux jauges de contraintes pour la mesure des forces de chargement et de frottement, par lesquelles le coefficient de frottement est déterminé.

L'utilisation du tribomètre est illustrée par une étude comparative du comportement tribologique de l'émail humaine soumise au frottement de deux et/ou trois corps, et sous différents modèles de chargement.

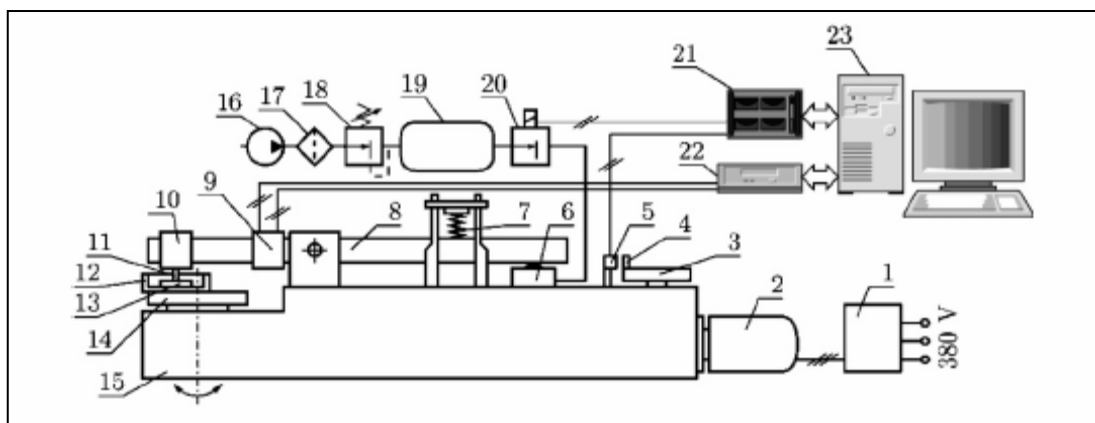


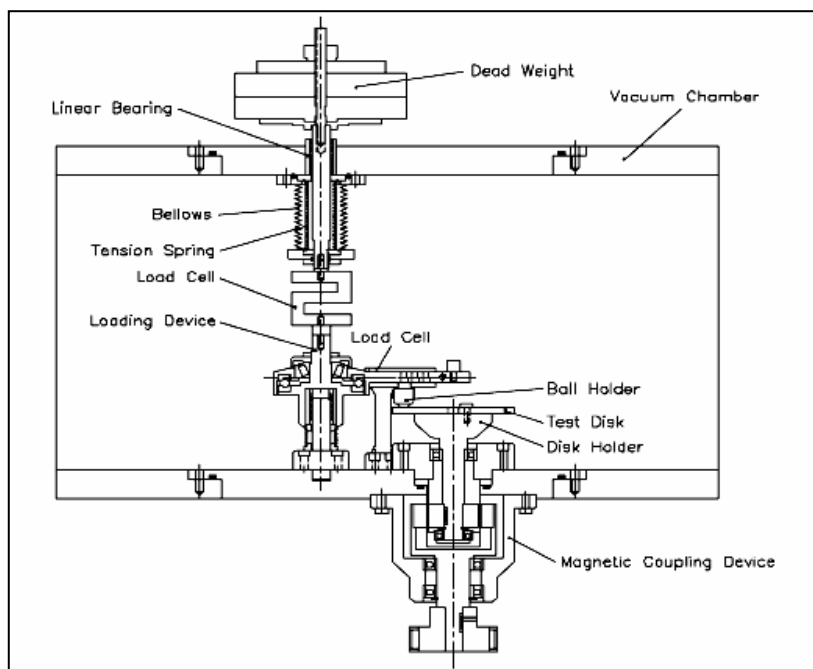
Figure II.11 : Schéma du tribomètre biologique [28].

(1) inverseur; (2) moteur à engrenages; (3) disque de rotation; (4) aimant permanent; (5) détecteur de proximité; (6) pneumatique déclencheur; (7) déchargement du ressort; (8) faisceau de chargement; (9) jauges de contrainte; (10) support témoin; (11) sampler; (12) récipient; (13) contre sampler; (14) disque d'oscillation; (15) armature; (16) compresseur d'air; (17) filtre comprimé d'air ; (18) récipient pressurisé par valve; (19) réservoir de pression; (20) régulateur de pression proportionnel; (21) Pcl-carte de 818 hectogrammes; (22) amplificateur Spider-8 ; (23) ordinateur.

### II.11. Tribomètre sous vide

**S-H.YANG et al.** [29] ont utilisé le tribomètre représenté par la figure II.12 pour déterminer le comportement tribologique et l'effet de l'environnement sur le dépôt Si-DLC (Silicium incorporé dans le Diamant-Like Carbone) en contact avec une bille en acier. Le dépôt a été réalisé par projection d'un jet de plasma produit par une décharge radiofréquence (RF) dans une enceinte à atmosphère contrôlée remplie de gaz mixte (Benzène ( $C_6H_6$ ), Silane ( $SiH_4+H_2$ )).

Les essais ont été effectués sous vide ( $8.10^{-3}Pa$ ), en air sec et ambiant. S-H.YANG et al. Ont constaté que le film Si-DLC a fortement réagi aux conditions d'essai, de sorte que le coefficient de frottement a diminué de façon significative en passant du vide à l'air sec.



**Figure II.12 :** Une vue schématique de l'installation expérimentale [29].

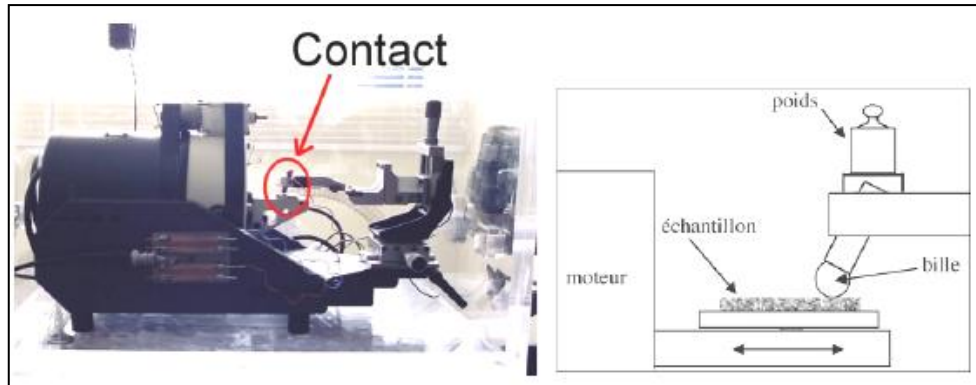
### II.12. Tribomètre environnemental du LTDS

**SOUCHET** [27] a travaillé sur le tribomètre environnemental du LTDS à contact sphère/plan alternatif sous différentes atmosphères (figure II.13). Le mouvement alternatif est imposé par un pot vibrant au plan qui se déplace par rapport à la bille. Une force normale  $F_N$  est appliquée sur le contact, la force de frottement  $F_T$  et la résistance électrique de contact  $R_C$  sont mesurées en continu.

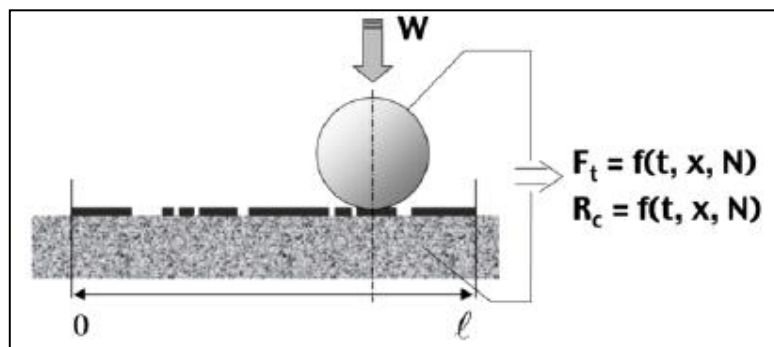
Ce tribomètre permet la mesure cycle par cycle de la force tangentielle  $F_T$  due au frottement, et de la résistance électrique du contact  $R_C$  entre la bille et le plan lorsque

ceux-ci sont conducteurs (figure II.14).

La force tangentielle est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur piézo-électrique, et la résistance électrique de contact par la différence de potentiel entre le porte bille et le porte plan sous l'application d'un courant faible ( $\approx 3\text{mA}$ ).



**Figure II.13 :** Le tribomètre environnemental du LTDS [27].



**Figure II. 14 :** Contact bille/plan : les grandeurs mesurées sont la force de frottement  $F_t$  et la résistance électrique de contact  $R_c$ , en fonction du nombre de cycles  $N$  et de la position  $x$  dans la trace sur le plan [27].

### III. Conclusion

Les difficultés rencontrées par les ingénieurs pour prédire l'usure et pour sélectionner des couples de matériaux résultent essentiellement du fait que le frottement et l'usure ne sont pas directement des propriétés intrinsèques des matériaux et que les sollicitations du système tribologique sont en général complexes (pression, vibrations,... etc.). Dans ce cas, l'ingénieur doit acquérir une culture de généraliste lui permettant d'aborder le problème dans sa globalité.

L'objectif fondamental de la tribologie est donc lié au succès de son application, à la conception des machines et des produits en général. Ceci fait l'objet du chapitre suivant où l'on présente un moyen d'essai conçu et réalisé lors de cette étude.

# **Chapitre III**

## **ETAT DE L'ART**



I. CONCEPTION ET REALISATION

Pour optimiser la conception et la mise en place du dispositif d'essai (tribomètre), nous avons tout d'abord réalisé une analyse préliminaire afin d'identifier et définir les besoins d'expérimentation, les configurations d'essai appropriées et les paramètres susceptibles d'influencer les résultats de la campagne expérimentale.

La méthode d'analyse utilisée est la méthode des **5M**, qui est une approche systématique permettant d'identifier et de quantifier les causes pouvant perturber les résultats d'une campagne expérimentale. Le dispositif peut alors être adapté dès la conception pour mieux répondre à ces nécessités. Pour chaque paramètre recensé dans la check-list présentée à la (Figure 4). Sous la forme du schéma d'Hishikawa, une manière de le traiter a été définie si son potentiel d'influence a été apprécié comme élevé.

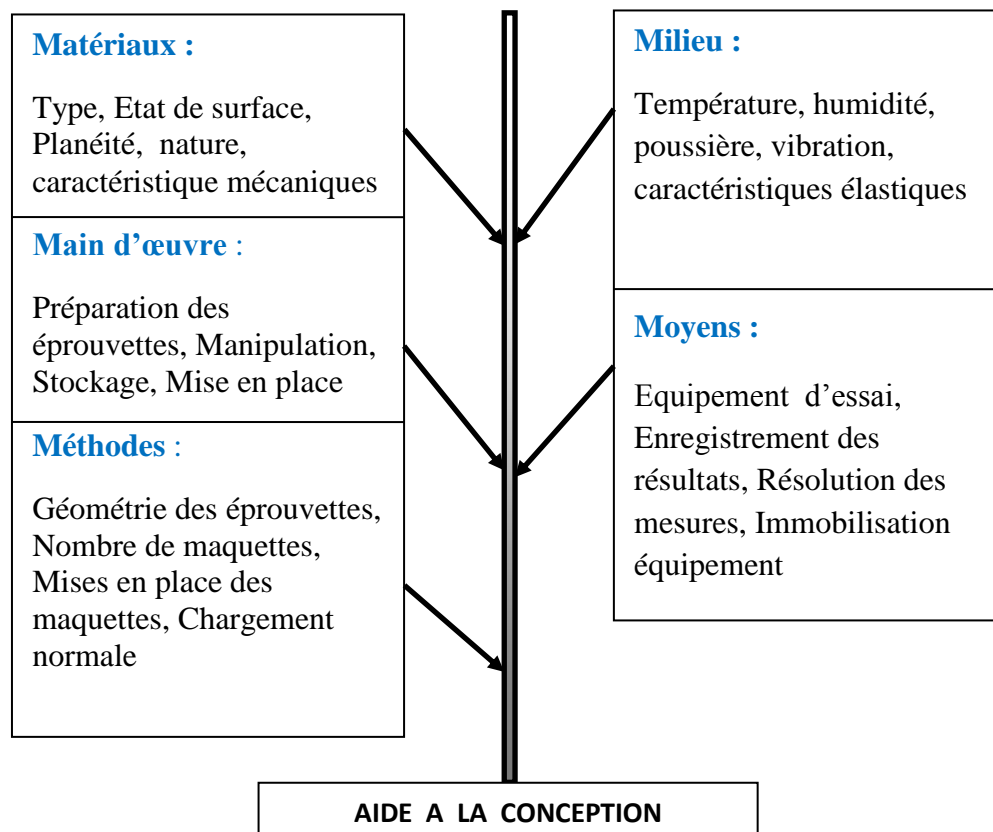


Figure 4 : Schéma de la méthode des 5M

La méthode **5M** (Matériaux, Milieu, Main d'œuvre, Moyens et Méthode d'essai) est couramment utilisée dans le calcul d'incertitudes pour recenser tous les facteurs susceptibles d'intervenir dans le déroulement d'une campagne expérimentale.

### III.1. Choix technologique

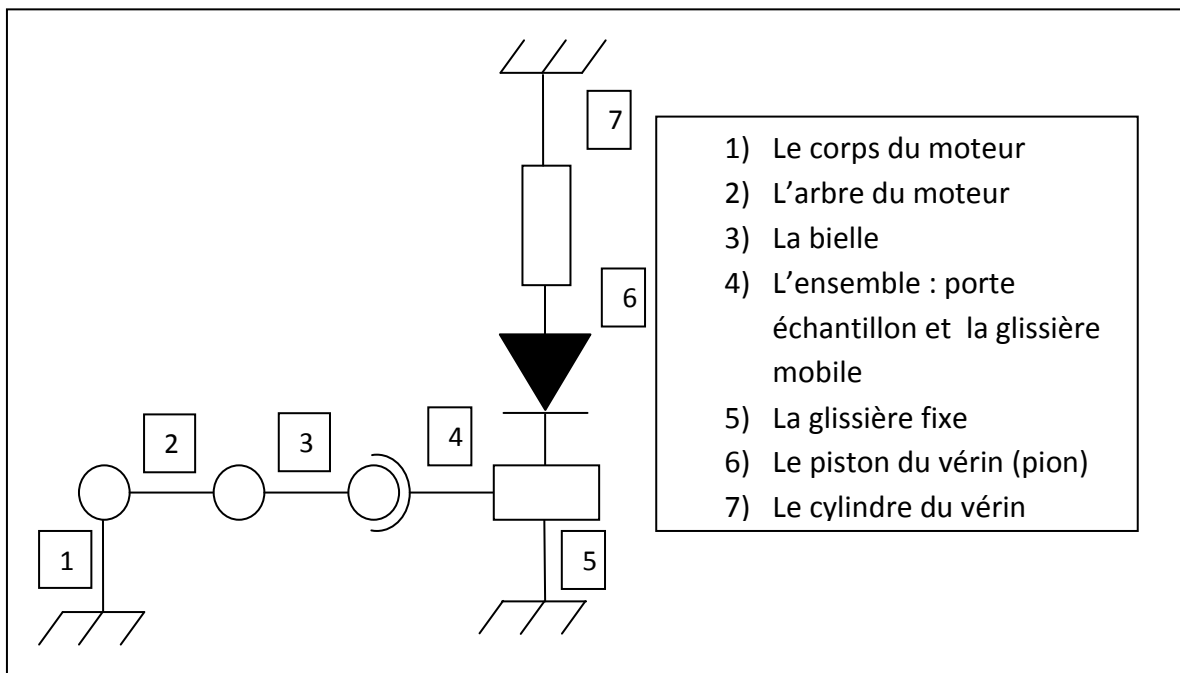
Compte tenu de l'analyse effectuée sur les paramètres à considérer, on a choisit :

- Le system bielle manivelle pour la translation de la partie supérieure (échantillon, porte échantillon et la glissière.)
- Le system du vérin hydraulique pour l'application de l'effort normal sur l'ensemble porte frottant.
- L'appareil (variateur de fréquence) pour varier la vitesse de rotation du moteur et de ce fait la vitesse de translation de l'échantillon.
- Une pompe hydraulique pour actionner le vérin et un manomètre pour la lecture de la pression exercée sur l'échantillon.
- Ce tribomètre répond aux spécificités techniques suivantes :
  - La configuration du contact adoptée est de type bille/plan.
  - Capacité de charge est supérieure à 300N.
  - La vitesse de rotation du moteur est de l'ordre de 10 à 1000tr/min.
  - La distance de glissement est de 24mm.
- En réponse à ces paramètres, et afin de réaliser un dispositif ayant une architecture compacte et rigide, nous avons opté pour une configuration cinématique simple, tels que :
  - Le déplacement suivant l'axe X se reproduit par un moteur à courant continu qui transmet le mouvement de rotation (à la vitesse  $\omega$  variable) au système bielle manivelle et favorise ainsi la translation (à la vitesse  $V_a$ ) en va et vient du chariot porte échantillon.
  - La puissance du moteur de marque siemens est de 0,25 kW et de vitesse maximum de 860 Tr / min.

### III.2. Présentation cinématique du mécanisme

- Pour simplifier la compréhension du fonctionnement du mécanisme conçu, nous avons recensé les classes d'équivalence du mécanisme, en modélisant les liaisons entre ces classes d'équivalences. Par la suite, nous avons représenté ces liaisons et les classes d'équivalences par un schéma cinématique minimal en tenant compte des particularités du mécanisme (figure 5) :

- ❖ La liaison  $R_{2/1}$  entre 2 et 1 est modélisée par une liaison pivot donc le mouvement de 2 est une rotation.
- ❖ La liaison  $R_{2/3}$  entre 3 et 2 est une liaison pivot car 2 tourne par rapport à 3.
- ❖ Une liaison articulaire  $R_{3/4}$  entre 4 et 3.
- ❖ Une liaison glissière  $R_{4/5}$  entre 4 et 5.
- ❖ Une liaison glissante avec un contacte ponctuel entre 4 et 6.
- ❖ La liaison  $R_{6/7}$  qui est entre 6 et 7 est glissante.



**Figure 5** : Le schéma représentant la chaîne cinématique du tribomètre réalisé.

### III.3. Les composants du tribomètre

#### III.3.1. Le module porte échantillon

Le module porte échantillon (fig.6) sert à fixer les échantillons à traiter lors du déroulement des essais se compose d'une vise sans fin bloquée en translation et guidée en rotation, d'un mors mobile et un mors fixe, d'une tablette de glissement et d'une poignée de serrage.

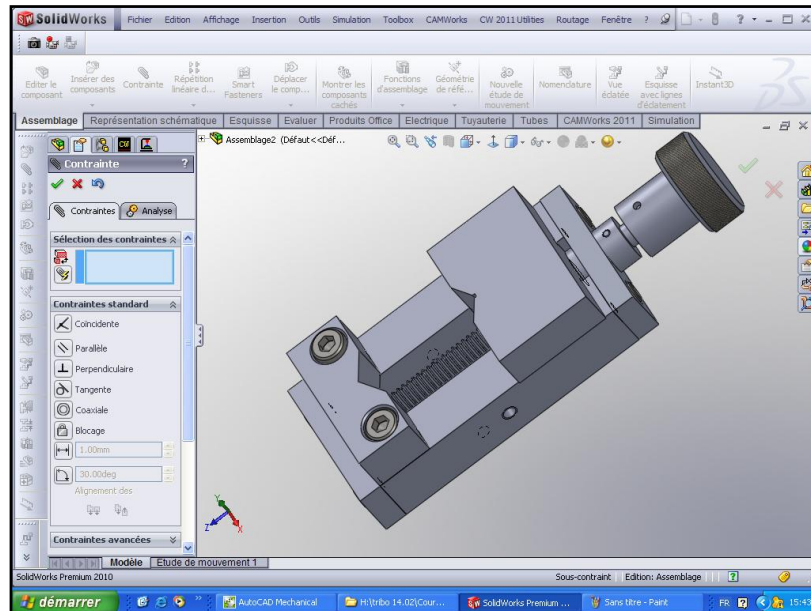


Figure 6 : Vue d'ensemble du module porte échantillon.

Le mors fixe (fig. 7) est doté d'une forme en v afin de lui permettre de fixer aussi bien les formes carrées et rectangulaires que celles cylindriques.

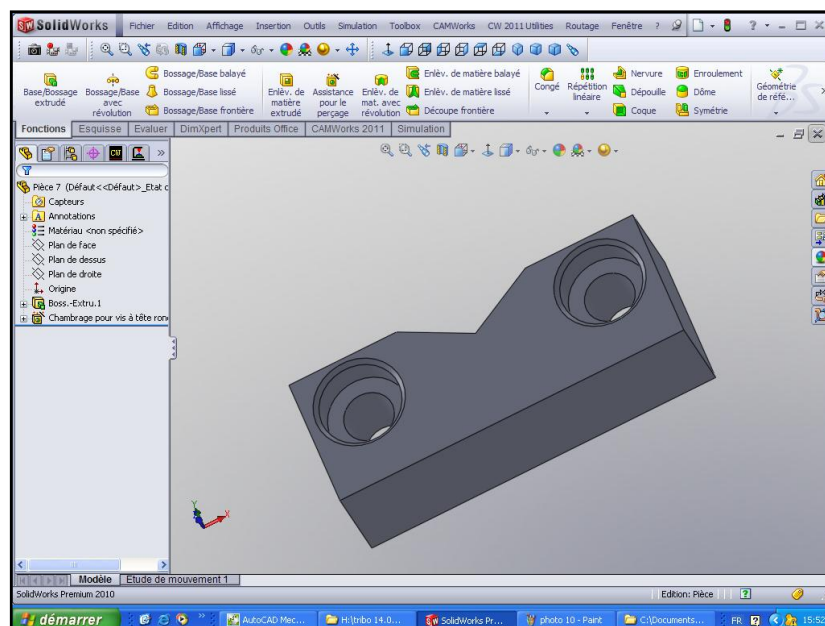


Figure 7 : Le mors fixe.

Le mors mobile (fig.8) est aussi doté de la forme en v en plus d'avoir un taraudage pour glisser sur la vis sans fin.

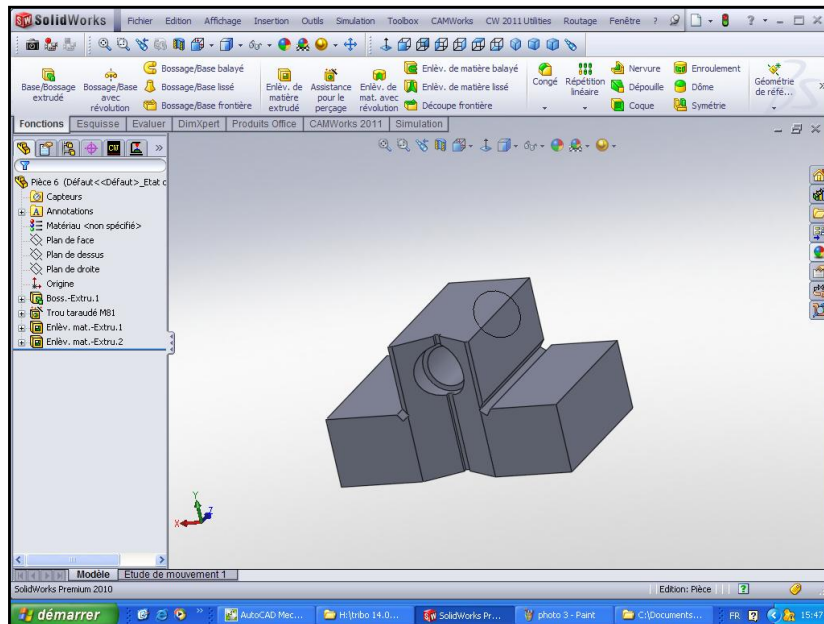


Figure 8 : Le mors mobil.

La vis sans fin (fig.9) étant bloquée des deux cotés et guidée en rotation transmet le mouvement de translation au mors mobile de part son filetage fin pour une meilleure tenue.

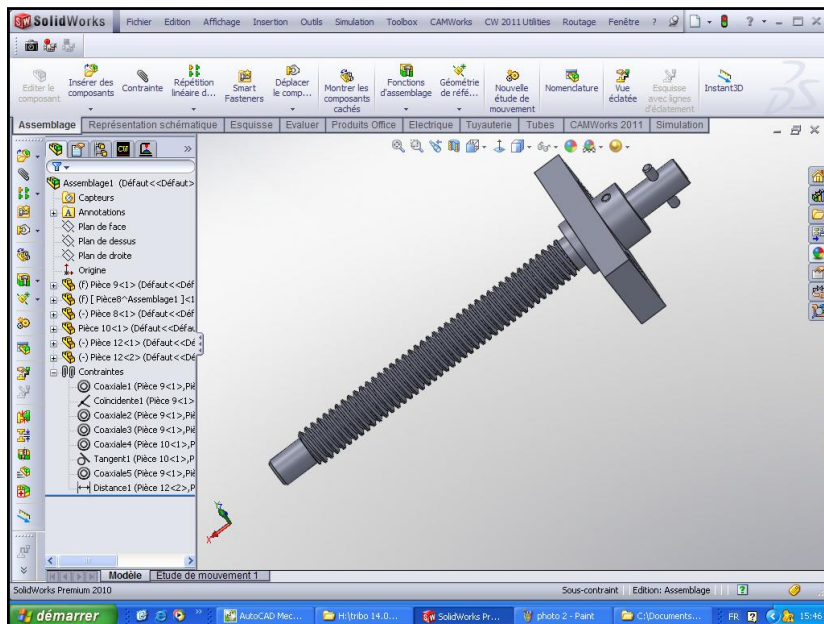


Figure 9 : La vis sans fin.

La poignée de serrage (fig.10) a été moletée afin de permettre une bonne adhérence lors du serrage.

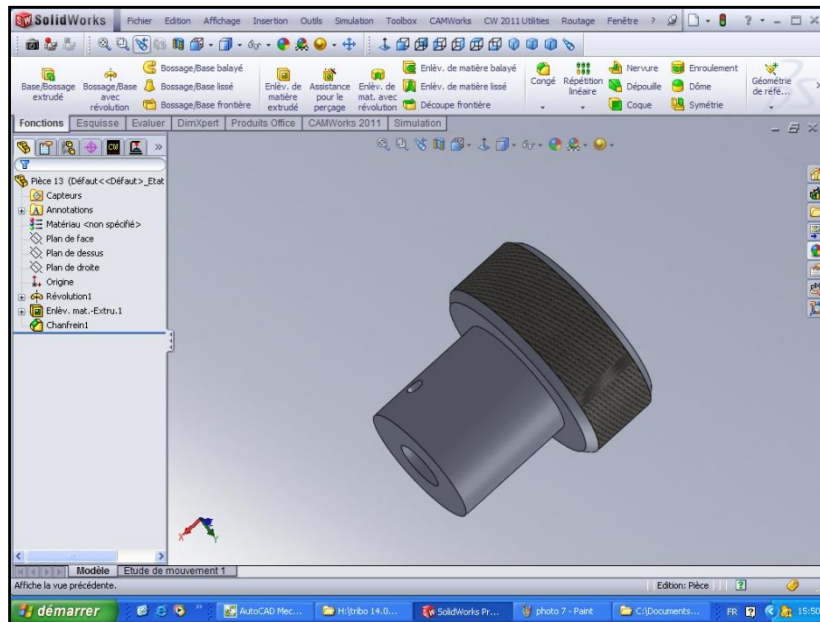


Figure 10 : La poignée de serrage.

La glissière (fig.11) est la pièce de base (support) du porte échantillon où vont se fixer les autres pièces, elle sert aussi au guidage pour le mors mobil.

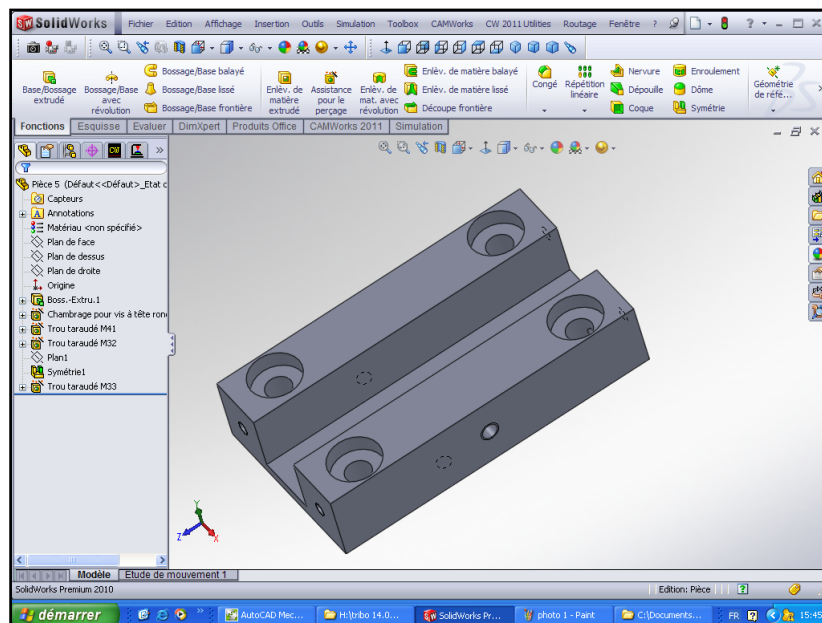
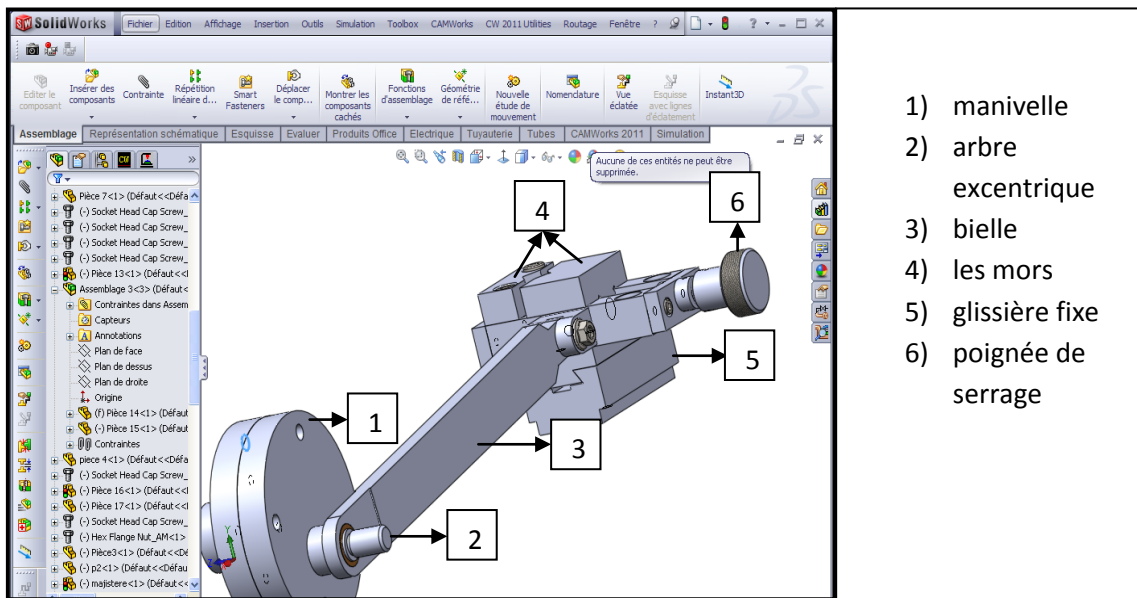


Figure 11 : La glissière.

**III.3.2. Le système de transmission du mouvement**

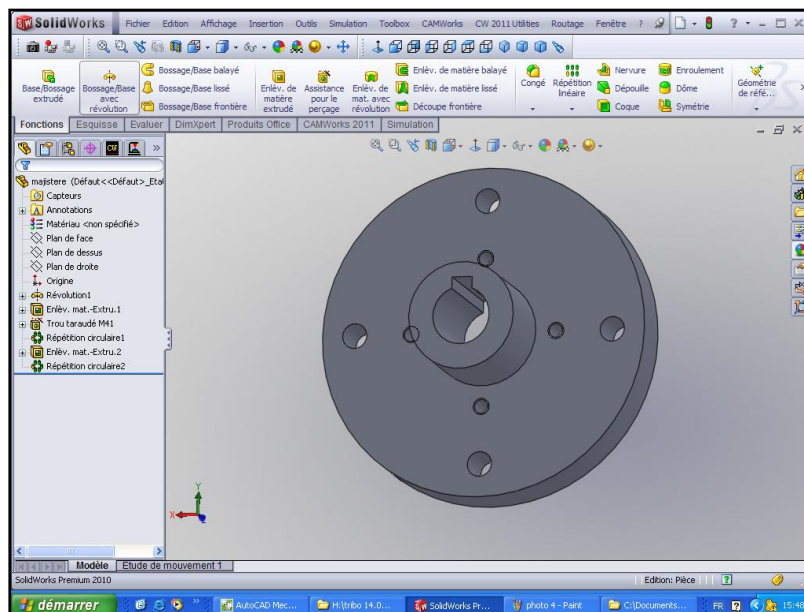
Le system bielle manivelle (fig.12) assure la transformation du mouvement de rotation de l'arbre du moteur en un mouvement de translation du porte échantillon relié à la bielle par une chape.



- 1) manivelle
- 2) arbre excentrique
- 3) bielle
- 4) les mors
- 5) glissière fixe
- 6) poignée de serrage

**Figure 12 :** Vue générale du system bielle manivelle.

Nous avons réalisé trois pièces qui composent la manivelle. La première poulie (d'entraînement) (fig.13) est celle qui se monte sur l'arbre du moteur, elle est bloquée en rotation à l'aide d'une clavette, en translation, d'un coté par une visse et de l'autre par une rondelle spécialement conçue a cette effet.



**Figure 13 :** La poulie d'entraînement.

La deuxième pièce (fig.14) est une poulie ayant un arbre excentrique qui joue le rôle du vilebrequin, elle se fixe sur la poulie d'entraînement par quatre boulons avec écrous pour un blocage en translation et en rotation

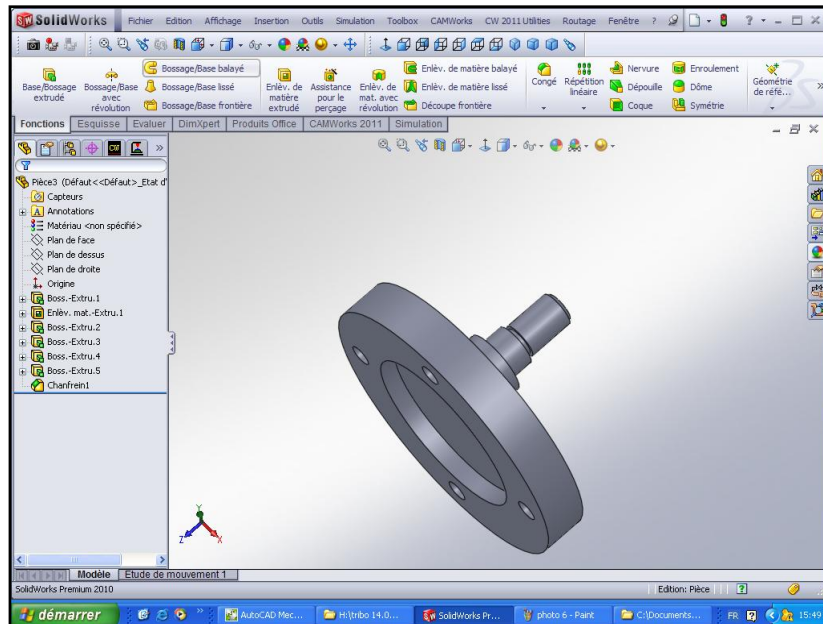


Figure 14: La poulie vilebrequin.

La chape (fig.15) étant fixée au module porte échantillon, permet la jonction (articulaire) avec la bielle en la guidant en rotation à l'aide d'une vis avec écrou (fig.16).

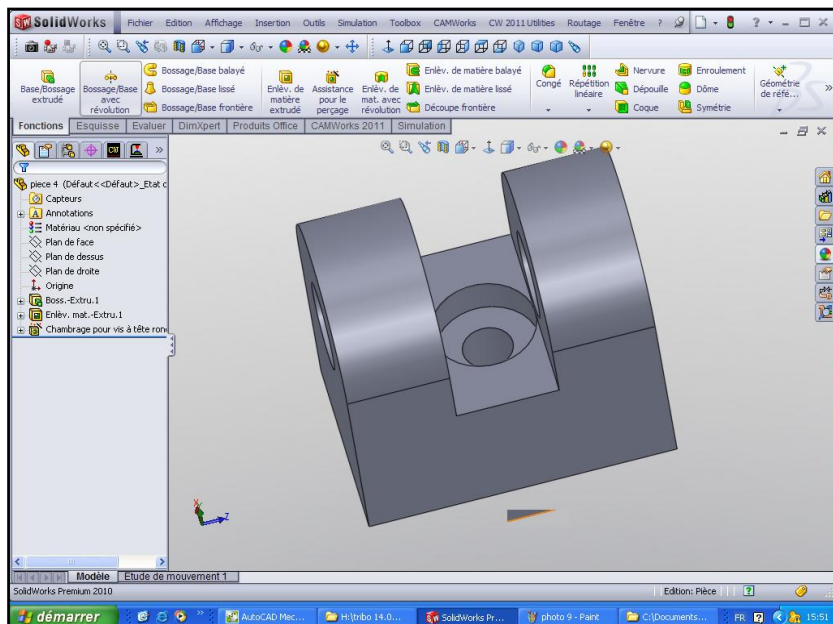
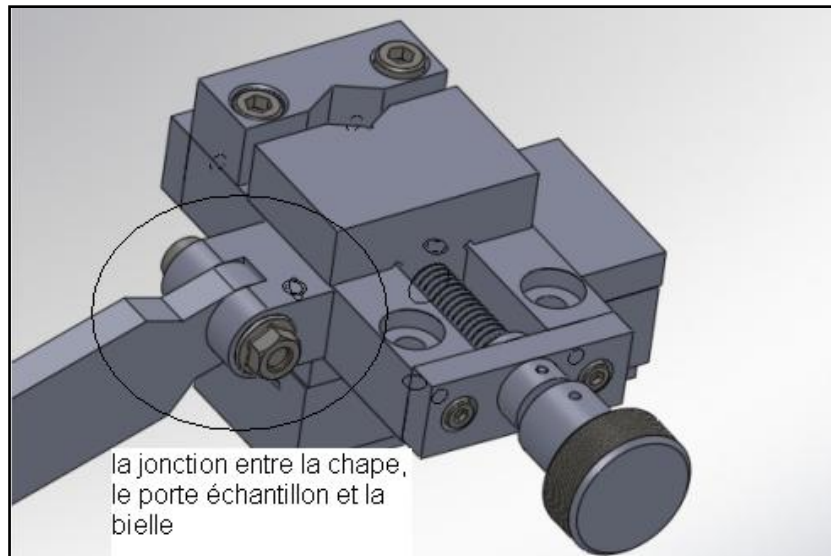


Figure 15: La chape.

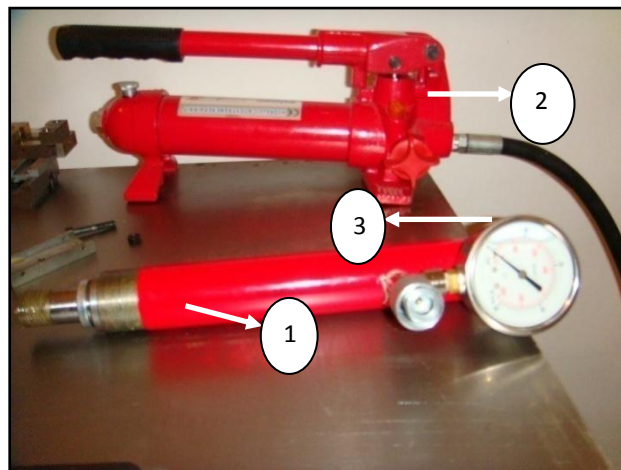




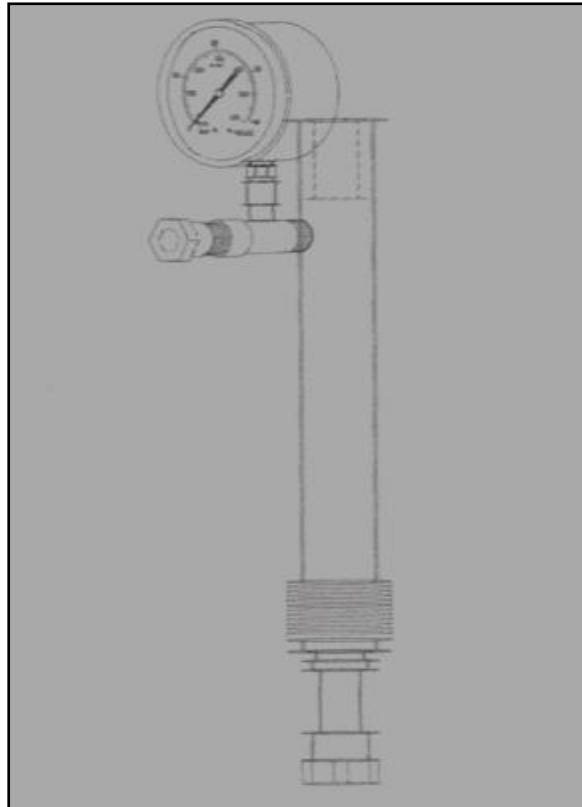
**Figure 16** : Vue générale du montage bielle, chape et porte échantillon.

### III.3.3. Le système de chargement

Le vérin (1) est mis en place afin d'exercer la force nécessaire sur l'échantillon en fonction des essais, celui-ci est alimenté par une pompe hydraulique manuelle (2), cette dernière est reliée au vérin par un flexible haute pression. La lecture (en 'psi' et en 'bar') de la pression est assurée par un manomètre de pression (3).



**Figure 17.a** : Le vérin et la pompe hydraulique.



**Figure 17.b :** Le vérin.

Nous avons réalisé un filetage au bout du vérin pour fixer l'outil (bille en **100Cr6** de **10mm** diamètre) à l'aide d'un écrou doté d'un orifice pour permettre à l'extrémité de la bille de sortir.

#### **III.3.4. Le système moteur**

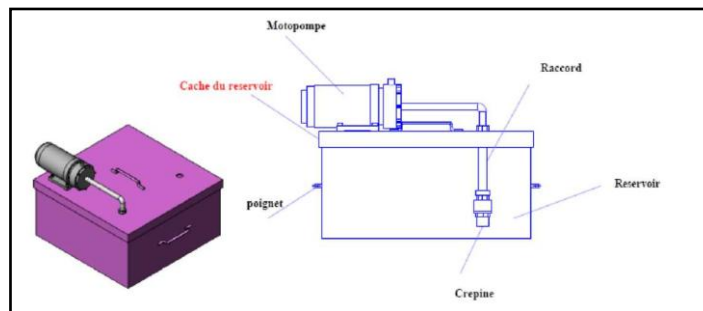
- Le mouvement de rotation est généré par un moteur a courant alternatif de marque 'siemens' dont la puissance est de 0,25 kW et la vitesse maximum atteinte de 860 Tr / min.
- Afin de varier le paramètre « vitesse » lors des essais afin d'obtenir des résultats variés, nous avons relié le moteur à un variateur de vitesse (fig.18) de marque télémécanique et d'ont la puissance est de 0,37 kW, celui-ci permet de varier la vitesse de 0 à 860 tr/min.



**Figure 18 :** Moteur et variateur de vitesse.

### III.3.5. Le système de lubrification

Après la mise en place du système mécanique, nous avons procédé à la conception du système de lubrification (figure 19) dont le circuit est desservi par une motopompe aspirant le lubrifiant d'un réservoir par le biais des tuyaux souples.



**Figure 19 :** Système de lubrification.

## III.4. Mise en marche du dispositif



**Figure 20** : Photo du tribomètre.

Les étapes suivantes sont nécessaires au bon déroulement des essais :

- La mise en place de l'échantillon sur le module et sa fixation entre les mors de serrage.
- L'application de la force normale à l'aide de la pompe hydraulique en regardant le manomètre afin de régler la pression à la valeur souhaitée (une vis de relâchement se trouvant sur la pompe nous permet d'ajuster la pression de service).
- La Mise en marche de la pompe de lubrification pour les essais avec lubrifiant.
- Le réglage de la vitesse sur le variateur.
- La mise en marche du moteur d'entraînement.
- Donner le top chronos pour le calcul du nombre de cycles.

### III.5. Déroulement des essais

#### III.5.1. Contrôle des paramètres des essais

Le dispositif a été conçu de telle manière à ce que les essais soient divers et pour des résultats variés, cela n'est possible qu'en variant différents paramètres à savoir :

- ***La force normale :***

La pression peut être variée à l'aide de la pompe et la lecture s'effectue sur le manomètre

- ***La vitesse de translation :***

Le réglage de la vitesse se fait par le biais du variateur de vitesse qui dispose d'un écran d'affichage pour la lecture de la valeur de cette dernière

- ***Le temps (nombre de cycles)***

Le dispositif est muni d'un chronomètre que nous actionnons au début de l'expérience pour calculer le temps de l'essai.

- ***La lubrification (avec ou sans) :***

Pour les essais qui nécessitent une lubrification, une pompe a été mise en place pour assurer la lubrification lors des essais, nous avons aussi doté l'appareil d'un réservoir pour contenir le lubrifiant et un bac de rétention sous le module porte échantillons.

#### III.5.2. Analyse des résultats

Après les tests en frottement-usure, les échantillons peuvent subir différentes analyses à savoir :

- ✚ ***L'analyse qualitative et quantitative de la trace d'usure :*** les échantillons seront soumis à des analyses microscopiques au niveau de la trace d'usure afin de déterminer les éventuels changements structuraux ou déformations subies pour définir le taux d'usure

- ✚ ***Le calcul de la perte en poids :*** les échantillons sont pesés avant le début de l'essai et nous refaisons la même chose à la fin de l'expérience pour ensuite calculer la différence au niveau du poids qui se traduit par une perte de matière et donc un taux d'usure.

✚ *Le calcul du volume d'usure :*

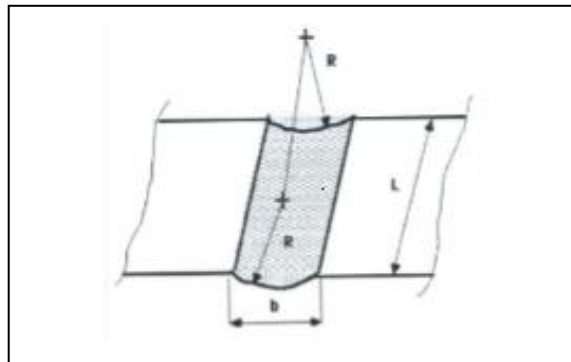
- a. Le volume d'usure peut être calculé à l'aide de la formule I.32 :

$$V_a = K_1 K_2 \frac{W}{H} L \text{ (formule d'ARCHARD)}$$

Où :  $V_a$  est le volume d'usure,  $W$  : la force normale,  $H$  : la dureté du matériau,  $L$  : la longueur glissée,  $k_1$  est identique au coefficient d'usure par adhérence Et  $k_2$  est fonction de l'angle des particules abrasives.

$$K_2 = \frac{\pi}{2 \tan \theta}$$

- b. Il est déterminé aussi sur la base des dimensions et de la géométrie de la trace d'usure (figure 21) par la formule III.1.



**Figure 21 :** Représentation schématique de la trace d'usure [30].

$$V = L \left( R^2 \sin^{-1} \left( \frac{b}{2R} \right) - \frac{b}{4} (4R^2 - b^2)^{1/2} \right) \quad \text{(III.1)}$$

Où :  $L$  est la longueur de la trace.

$R$  le rayon de l'antagoniste et  $b$  la largeur de la trace.

**CONCLUSION GENERALE**  
**ET**  
**PERSPECTIVES**

### CONCLUSION GENERALE

En tribométrie, une bille, une pointe ou un plan est placé en contact avec la surface de l'échantillon sous une charge prédéfinie. L'expérimentation est un moyen de progresser efficacement dans la compréhension des phénomènes de couplage mécanique thermique environnemental sur la réactivité au niveau des surfaces et des interfaces où les conditions de contact sont parfaitement contrôlées (en termes de pression partielle d'oxygène, d'humidité ou sous vide, et de température)

Notre dispositif est monté sur un bras de levier, et associé à un vilebrequin à axe excentrique pour assurer une trace d'usure de 24mm de longueur, un vérin et sa pompe de chargement pour le contrôle de la pression exercée, un moteur doté d'un variateur de vitesse et d'un système de lubrification.

Les taux d'usure pour la bille et le plan seront calculés en déterminant la perte de volume durant le test. Cette méthode simple facilite l'étude des mécanismes de frottement pour une grande variété de couple de matériaux avec ou sans agent de lubrification. En outre, le contrôle des paramètres de test tels que la vitesse, la pression de contact, la séquence, la durée de test ainsi que les paramètres environnementaux (température, hygrométrie, lubrification), permettent de reproduire les sollicitations réelles d'utilisation de ces matériaux.

Notre tribomètre est spécialement conçu pour la mesure précise des forces mises en jeu. Les instruments prévus peuvent assurer un déplacement alternatif de l'échantillon. Un point particulier de notre instrument repose sur la possibilité d'interrompre le test dès que le coefficient de frottement atteint une valeur prédéfinie, ou lorsqu'un nombre de cycles est réalisé. De plus, notre équipement peut être équipé d'une enceinte de confinement afin d'utiliser l'instrument dans des conditions atmosphériques de température et d'hygrométrie contrôlée. On peut aussi équiper notre dispositif de capteur de profondeur afin de connaître en temps réel les propriétés abrasives du système.

En guise de perspective et en continuité à notre travail les éléments qui suivent apporteront un plus à notre dispositif

- Une carte d'acquisition : pour convertir les signaux électriques envoyées par les gauges de contraintes.



## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

- Une enceinte pour le contrôle de l'atmosphère (sous vide ou a atmosphère contrôlée) avec des températures contrôlées ...
- Un thermocouple
- Jauge de profondeur
- Temporisateur : déterminer le nombre de cycles
- Jauges de contraintes pour le calcul des forces tangentielles.
- Eventuellement utiliser des pions de formes différentes (plan, cylindre)

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **L. CIZIAIRE**. Lubrification limite par les nanoparticules, Ecole Central de Lyon 2003.
- [2] **D. DOWSON**. « History of Tribology », Longman, New York, 1979.
- [3] **A. ELHADI**. Influence des paramètres mécaniques lors de l'endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55. Mémoire du magister. Université Med Boudiaf de M'Sila, 2006
- [4] **J.-M. GEORGE**. "Frottement, usure et lubrification". Eyrolles, 2000.
- [5] **M. GODET**. "Les fondements mécaniques de la tribologie". In : Mécanique Matériaux Électricité, 1972.
- [6] **J. CASTILLO**. "Dynamic changes of surface films under boundary lubrication: A study using Ellipsométrie". Thèse de Doctorat, Université de Michigan, 1997.
- [7] **J. DERRIEN**. "Surface des solides, propriétés électroniques". Techniques de l'Ingénieur, notice A245, 2, 1997.
- [8] **K. L. JOHNSON**, "Contact Mechanics". Cambridge, 1996.
- [9] **G. SPINLER**, "Conception des machines". Principe et application, tome 1, 1997.
- [10] **DROUIN et AL**, "Manuel éléments de machines" Editions de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.
- [11] **L. BOCQUET**. "La tribologie – approche physique du frottement" Université Lyon 1-IUF, 2003.
- [12] **A. CORNET et J.-P. DEVILLE**. "Physique et ingénierie des surfaces", monographie de matérialogie, EDP Sciences, 1998
- [13] **J. DHERS**, "Usure, avaries et corrosion". Facteur de destruction des matériels industriels. Ed 1978.
- [14] **G.W. STACHOWIAK and A.W. BATCHELOR**. Engineering Tribology (2<sup>nd</sup> Edition). Butterworth Heinemann, 2001.
- [15] **F.P. BOWDEN and D. TABOR**. Friction and lubrication of solids, Part I. Clarendon Press, Oxford, 1950.
- [16] **B.D. MINDLIN and H. DERESIEWICZ**. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. Journal of Applied Mechanics, pp. 327-344, 1953.
- [17] **M.G. GEE et AL** "The measurement of sliding friction and wear of ceramics at high temperature" Wear, Vol 138, pp. 169-187, 1990.
- [18] **H.E SLINEY and CH. DELLACORTE**, A new machine for measuring friction and wear in controlled atmospheres to 1200°C, lubricating engineering, vol. 47, pp 314-319, 1991.

- [19]. **K. NAKAYAMA, H.ASHIMOTO**, "Triboemission, Tribochemical reaction and friction and wear in ceramic under various N-butane gas pressures". Tribology International, vol.29, pp. 385-393, 1996.
- [20]. **M. BOEHM, C. GROSSINOD, T. Le MOGNE, J.M Martin**, "An analytical ultra high vacuum tribometer application to tribochemistry in metal rolling". Tribology international, vol. 32, pp. 617-626, 1999.
- [21]. **L.Y. OSTROVSKAYA et al**, "Low temperature Tribology at the B. Verkin institute for low temperature physics and engineering (historical review)". Tribology International, vol. 34 n°04, pp. 265-276, 2001.
- [22]. **Y. HUANG, X. JIANG, S. LI**, "Pure mechanical wear loss measurement in corrosive wear". Indian Academy of sciences, bull. Mater. SG. , vol. 23, n°:6, pp. 539-542, 2000.
- [23]. **R. COPIN G. DEGALLAIS, Y. DESPLANQUES, Y. BERTHIER**, "A tribometer for the study of materials under railway Braking conditions" Actes du 27<sup>ème</sup> Leeds-Lyon Symposium on Tribology sous presses, Lyon, 2000.
- [24]. **A. ADAMOUCHE**, "Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et à haute température". Thèse doctorale, Institut National Polytechnique de Toulouse, p. 35, 2005.
- [25]. **X. TAN, A. MODAFE, R. HODSI**, "Measurement and Modelling of dynamic rolling friction in linear microball bearings". IEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, n°03, 2004.
- [26]. **M. MARZOUKI, C. KOWANDJ, C. RICHARD**, "Experimental simulation of tool product interface during drawing". Wear, vol. 262, pp. 235-241, 2007.
- [27]. **A. SOUCHET**, "Comportement tribologique d'une phase max. Transition et effets d'échelles sur différents Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>". Thèse doctorale, Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [28]. **E. SCJEWISZ, Z. KULEZI**, "A new tribometer for friction and wear studies of dental materials and hard tooth tissues". Tribology International, vol. 40, pp. 885-895, 2007.
- [29]. **S. H. YANG, H. KONG, R.R. LEE, S. PARK, D.E. KIN**, "Effect of environment on the tribological behaviour of Si-incorporated diamond-like carbon films". Wear, vol. 252, pp. 70-79, 2002.
- [30] **R. TRABELSI et AL.** Relationship Between Mechanical Properties and Wear Resistance of alumina-zirconia ceramic composite. J.EUR. ceram. Soc. Lubrication Engineers Tribology Trans.32. pp. 77-84. 1989

# **ANNEXES**

## Annexe 1

**Tableau 1** - Coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux usuels.

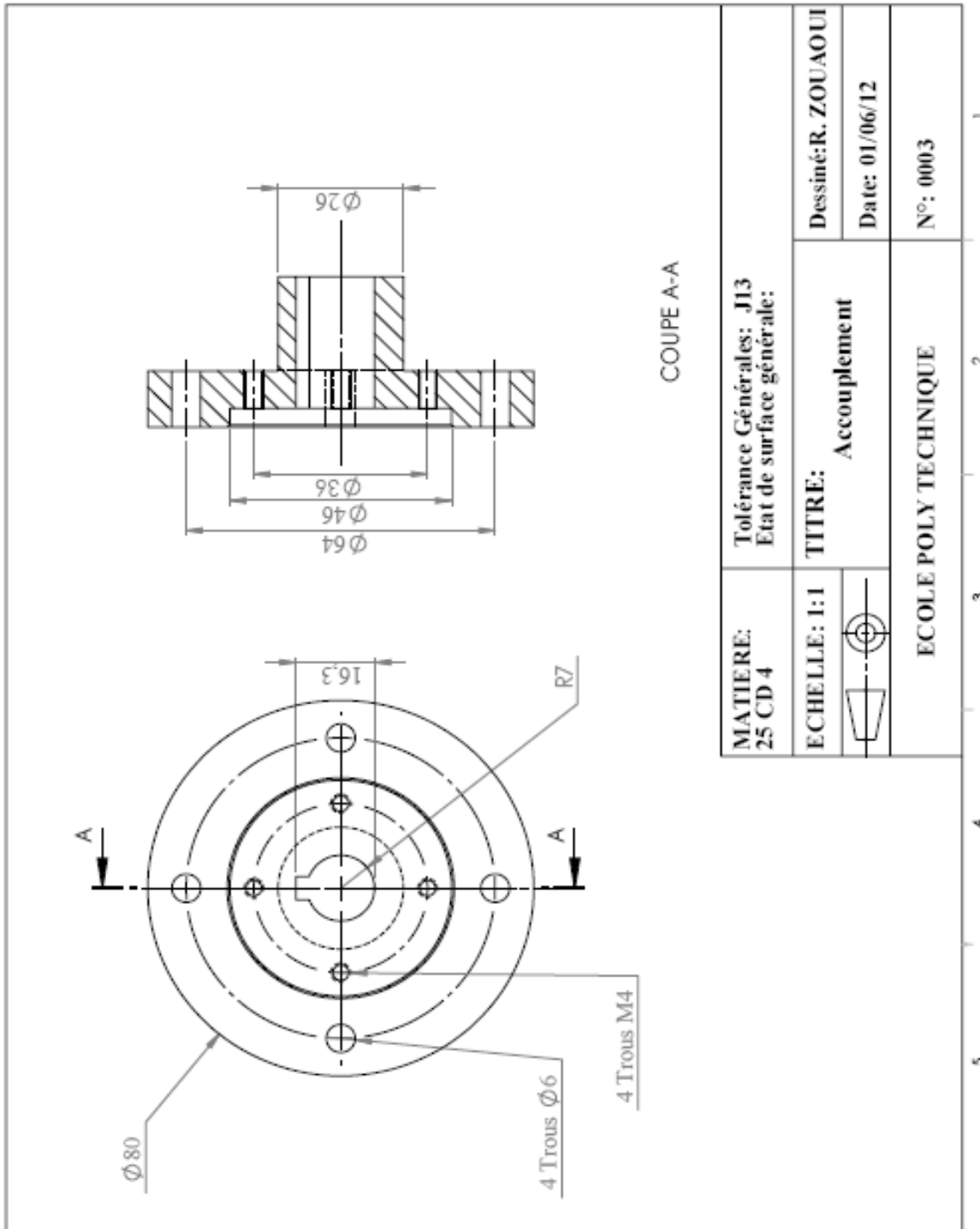
<i>Matériau 1</i>	<i>Matériau 2</i>	<i>Statique</i>	<i>Dynamique</i>
Acier doux	Acier doux	<i>0,75</i>	<i>0,57</i>
Acier doux	Fonte	-	<i>0,23</i>
Acier doux	Al	<i>0,60</i>	<i>0,47</i>
Acier doux	Bronze	<i>0,50</i>	<i>0,45</i>
Acier durci	Acier durci	<i>0,78</i>	<i>0,42</i>
Acier durci	régule	<i>0,40-0,70</i>	<i>0,35</i>
Téflon	Téflon	<i>0,10</i>	<i>0,05</i>
Téflon	Acier	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>
Fonte	Fonte	<i>1,10</i>	<i>0,15</i>
Fonte	bronze	-	<i>0,2</i>
Al	Al	<i>1,1</i>	<i>1,4</i>
Diamant	Diamant	<i>0,15</i>	-
Diamant	Acier	<i>0,10</i>	-
Nylon	Acier	-	<i>0,2</i>
Nylon	Nylon	-	<i>0,2</i>
Polystyrène	Acier	-	<i>0,03</i>
Polystyrène	Polystyrène	-	<i>0,50</i>
Verre	Acier	-	<i>0,60</i>
Verre	verre	-	<i>1,0</i>
Carbone	Acier	-	<i>0,15</i>
Carbone	Carbone	-	<i>0,2</i>
Graphite	Acier	-	<i>0,1</i>
Chêne	Chêne(1)	<i>0,6</i>	<i>0,48</i>
chêne	Chêne(2)	<i>0,55</i>	<i>0,30</i>
Chêne(1)	Cuir	<i>0,6</i>	<i>0,5</i>
Cuir	Fonte	-	<i>0,55</i>
Caoutchouc	Acier	-	<i>0,30</i>
Caoutchouc	Caoutchouc	-	<i>0,43</i>

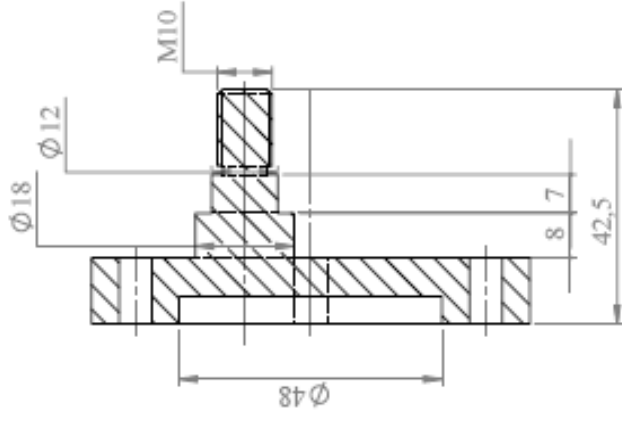
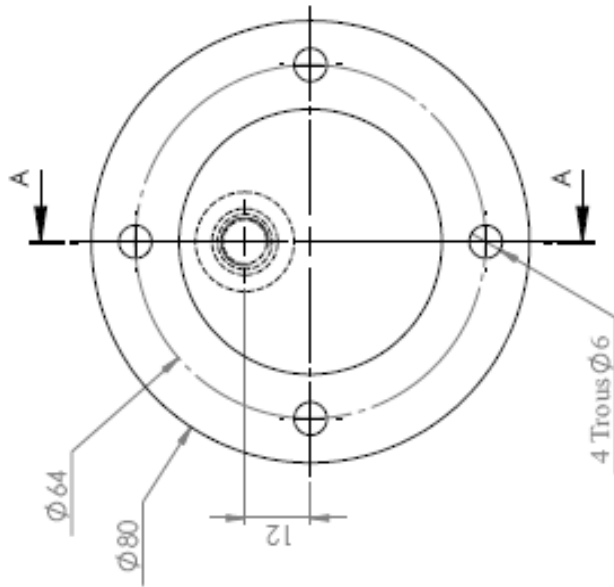
(1) Parallèle au grain;

(2) Perpendiculaire au grain.


## Annexe 2

Les différentes pièces constituant le tribomètre :

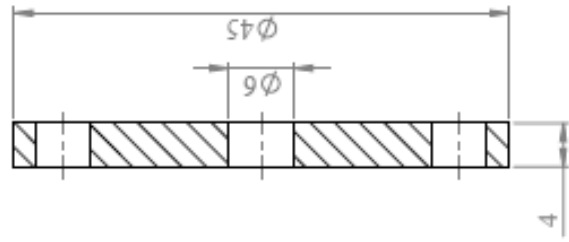
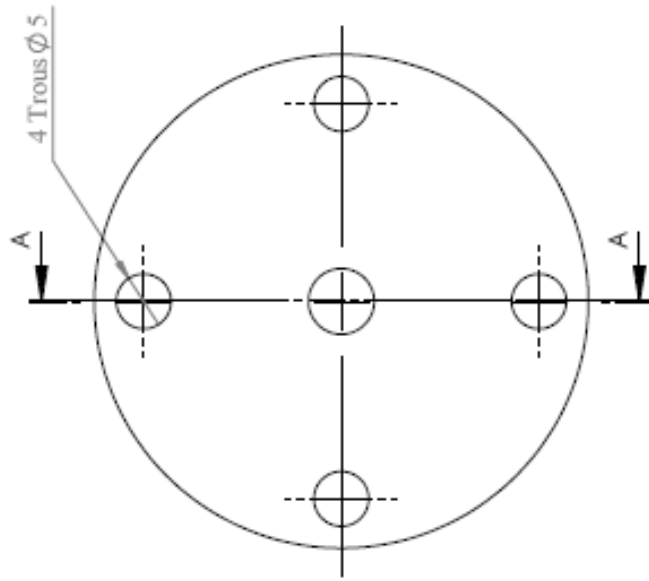





COUPE A-A  
ECHELLE 1 : 1

Matière: 25 CD 4	Tolérance Générales: J13 Etat de surface générale:		Dessiné par: R. ZOUAOUI Date: 01/06/12
	ECHELLE: 1:1	TITRE: Axe Excentrique	
		ECOLE POLY TECHNIQUE N°: 0001	





COUPE A-A

MATIERE: 25 CD 4	Tolérance Générales: J13 Etat de surface générale:		Dessiné: R. ZOUAOUI
ECHELLE: 1:1	TITRE: Support		Date: 01/06/12
		N°: 0002	
ECOLE POLY TECHNIQUE			