

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUE MAMMERI TIZI OUZOU**  
**FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**Master académique**  
**Option : construction mécanique**

**THEME:**

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA VITESSE ET DE**  
**L'EFFORT NORMAL SUR LES PROPRIETES TRIBOLOGIQUES DU**  
**POLYTETRAFLUORETHYLENE**

**Présenté par :**

**M<sup>lle</sup> BOUGUERROUMA KAHINA**

**Promoteur :**

**M<sup>r</sup> S.DJEBALI**

**Co-promoteur**

**Mr M.BELDI**

**Devant le jury composé de :**

**Président: Mr S.AZAM**

**Examineurs: Mme L.MANSOURI**

**Mr S.LARBI**

**2015/2016**

## *Remerciements*

*Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage et de bonne volonté pendant tout mon cursus universitaire.*

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude à mon promoteur « Mr DJEBALI » ainsi que Mrs Larbi et Bilek pour leurs précieux conseils, leurs encouragements et leur disponibilité.*

*Toute ma gratitude va à Mr Beldi qui m'a guidé au cours de ce travail.*

*Mon plus grand respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier ce travail.*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de ma mère*

*A ceux qui me sont si chers:*

*A mon père*

*A yaya, tata et à Zahra*

*A mes sœurs : Wassila, Nada, Malika, Amel, et Liza*

*A tous mes amis*

*KAHNA*

# SOMMAIRE

---

## Introduction générale

### Chapitre I : Eléments de tribologie

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition.....	3
I.3 Le système tribologique .....	4
I.4 Approches tribologiques .....	6
I.5 Le triplet tribologique .....	7
I.5.1 Le troisième corps .....	7
I.6 Paramètres tribologiques .....	8
I .6.1 Les paramètres opérationnels.....	8
I .6.2 Les paramètres structuraux .....	8
I .6.3 Les paramètres d'interaction .....	9
I .6.4 Les paramètres tribométriques.....	9
I .7 La surface en tribologie .....	10
I .7 .1 Définition .....	10
I .7.2 Etat de surface .....	10
I .7.2.1 Etat physico-chimique d'une surface .....	10
I .7.2.2 Etat topographique d'une surface .....	11
I .7.2.3 Profilomètre de surface .....	11
I .7.2.4 Paramètres de rugosité.....	11
I.7.2.5 Présentation des défauts géométriques de différents ordres d'une surface .....	11
I .7.2.6 Aspect géométrique des surfaces .....	11
I .7.2.7 Les ordres de défauts .....	11
I .7.2.8 Caractéristiques du profil.....	14
I .7.2.9 Paramètres liés aux motifs .....	16
I .7.3 Pression de contact .....	18
I .7.4 Les caractéristiques mécaniques des surfaces.....	18
I .8 Mesures tribométriques .....	18
I .9 Essais tribologiques .....	19
I .10 Exemples d'essais .....	20
I .11 Conclusion .....	21

### Chapitre II : frottement

II.1 Introduction .....	23
II.2 Définition .....	23
II.3 Lois empiriques du frottement.....	24
II.4 Théories du frottement .....	25
II.5 Caractéristiques physiques .....	27
II.5.1 Frottement sec .....	27
II.5.1.1 Frottement sec statique .....	27
II.5.1.2 Frottement sec cinétique (ou dynamique) .....	28
II.5.2 Frottement visqueux .....	28
II.5.2.1 Frottement visqueux de lubrification.....	29
II.6 Les différents types de frottements .....	29

II.7 Comportement du coefficient de frottement .....	33
II.7.1 Vitesse de glissement .....	34
II.7.2 Chemin de glissement parcouru .....	34
II.7.3 Etat de surface .....	35
II.7.4 Nature des matériaux .....	35
II.7.5 Charge normale appliquée .....	36
II.7.6 Température ambiante .....	36
II.8 Importance du coefficient de frottement .....	36
II.9 Manifestations du frottement .....	38
II.10 Choix de matériaux .....	39
II.11 Frottement des matériaux .....	40
II.11.1 Frottement des métaux .....	40
II.11.2 Frottement des polymères .....	40
II.11.3 Frottement des céramiques .....	41
II.12 Conclusion .....	41

### Chapitre III : Usure

III.1 Introduction .....	43
III.2 Définition .....	43
III.3 Les principales causes de l'usure .....	43
III.4 Les paramètres influents sur le taux d'usure.....	44
III.5 Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces .....	44
III.6 Phases de la vie d'un mécanisme .....	45
III.7 Problématique de l'étude de l'usure .....	46
III.8 Types d'usure, d'après Kragelsky .....	46
III.9 Formes d'usure .....	47
III.9 .1 Classification empirique.....	47
III.9.1.1 L'usure douce ou ultra-douce .....	47
III.9.1.2 L'usure sévère .....	47
III.9.1.3 L'usure catastrophique .....	47
III.9 .2 Classification technologique .....	47
III.9 .2 .1 Grippage et micro-grippage .....	47
III.9 .2 .2 Écaillage .....	48
III.9 .2 .3 Fretting-corrosion .....	48
III.9 .2.4 Polissage .....	48
III.9.3 Classification scientifique .....	48
III.9.3 .1 Usures liées au frottement .....	48
a. Usure adhésive .....	48
b. Usure abrasive .....	52
c. corrosif .....	54
d. par fissuration .....	56
e. par fretting .....	57
III.9.3.2 Autres formes d'usure.....	58
a. Usure par érosion .....	58
b. Usure par cavitation.....	59

c. Fatigue.....	60
d. Lubrifiants et fatigue de surface.....	61
e. Fatigue thermique.....	62
III.9.4 Mécanisme d'usure des polymères .....	62
III.9.5 Étude et quantification de l'usure .....	63
III.9.5.1 Paramètres à prendre en compte.....	63
III.9.5.2 Lois d'usure .....	64
a. Méthodes d'étude .....	64
III.10 Données et paramètres tribologiques .....	67
III.10.1 Taux d'usure .....	67
III.10.2 Valeur du produit $P \times V$ .....	68
III.10.3 Densité d'énergie de frottement .....	69
III.11 Conclusion .....	69

#### Chapitre IV: Partie expérimentale

IV.1 Introduction.....	71
IV.2 Dispositif expérimental .....	71
IV.2.1 Description du dispositif .....	71
IV.2.2 Nomenclature du banc .....	72
IV.3 Système d'acquisition. ....	72
IV.4 Convertisseur analogique-numérique.....	73
IV.5 Le capteur de force .....	75
IV.5.1 Les jauges de contraintes .....	75
IV.5.1.1 La mise en place des jauges de contraintes.....	76
IV.5.1.2 Les capteurs de force basés sur les jauges de contrainte .....	76
IV.5.1.3 Etalonnage du capteur de force .....	77
a. Etalonnage de la mesure de l'effort normal .....	77
b. Etalonnage de la mesure de l'effort tangentiel .....	78
IV.6 Matériaux et géométrie des éprouvettes .....	79
IV.6.1 Disque .....	79
IV.6.2 Pion .....	80
IV.6.2.1 Présentation du PTFE .....	80
IV.7 Traitement thermique des disques .....	82
IV.7.1 La trempe .....	82
IV.7.2 Revenu .....	82
IV.8 Polissage.....	83
IV.9 Essai de dureté.....	83
IV.10 Mesure de l'état de surface des disques .....	84
IV.11 Conditions des essais .....	84
IV.12 Essai d'usure .....	84
IV.12.1 Coefficient de frottement.....	84
IV.12.1 Perte de masse.....	85
IV.13 Résultats et discussions.....	85
IV.13.1 Coefficient de frottement .....	85
IV.13.2 Perte de masse.....	91
IV.13.3 Taux d'usure $k$ .....	95

IV.14 Conclusion .....	96
Conclusion générale.....	98





*Introduction  
générale*

## **Introduction générale**

Tout mouvement relatif nécessite un contact entre les différents composants d'une structure mécanique. Ce contact bien que bénéfique, engendre plusieurs phénomènes qui peuvent être parfois très nocifs pour cette structure tel que le frottement ; bien que primordial pour la transmission du mouvement ; mais, peut engendrer des dégradations au niveau de la surface de contact. Ces dégradations suscitent l'usure des structures, accentuent et amorcent les fissures et affectent ainsi leur durée de vie, leur efficacité et proportionnellement le coût d'exploitation.

Le développement des conceptions mécaniques et leur dimensionnement conduit à de nouvelles combinaisons de modes de défaillance. Pour limiter leur nombre et s'assurer de leur éradication, les composants font l'objet d'investigation de plus en plus complète. Ainsi des études sur le comportement thermique, thermodynamique, de fatigue, de flambage, vibratoire ou tribologique sont engagées sur les composants de toute structure mécanique.

Une conception intelligente permettant de contrôler la performance tribologique requiert une compréhension de la relation entre la microstructure et les processus de frottement et d'usure d'une part et entre les paramètres du matériau et son comportement tribologique global d'autre part.

Une telle information ne peut être obtenue que par des travaux expérimentaux exécutés dans des conditions attentivement contrôlées.

Dans ce cadre, nous avons mené une étude expérimentale sur l'influence de la variation de la vitesse et de l'effort normal sur les propriétés tribologiques du polytétrafluoréthylène (PTFE).

Le choix d'un polymère pour cette étude est motivé par l'utilisation croissante de ces matériaux dans l'industrie. La part grandissante de ces matériaux dans l'industrie est justifiée par leurs transformations et élaborations faciles et leurs excellentes propriétés tribologiques (résistance à l'usure, faible friction ...).

Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques, les plus courantes pour les études fondamentales utilisent des tribomètres de laboratoires : essai bloc sur cylindre, essai unidirectionnel, essai à mouvement alterné sur une plaque, l'essai des quatre sphères et l'essai pion-disque pour lequel nous avons opté ; disponible au sein du laboratoire du département. Ce type de tribomètre permet d'étudier le frottement de glissement des matériaux considérés comme pion sur un disque en acier en mode sec (non lubrifié), en variant la vitesse et l'effort normal

Ce mémoire se compose de deux parties principales:

Une partie théorique et bibliographique sur la tribologie, le système tribologique, les paramètres tribologiques, l'expérimentation en tribologie, le frottement et les mécanismes d'usure.

Une partie expérimentale qui décrit les dispositifs, les conditions d'essai, l'élaboration des échantillons nécessaires pour notre expérimentation.

*Chapitre I*

*Eléments de tribologie*

## **I.1 Introduction :**

Les phénomènes de frottement, d'usure, et tous ceux qui leur sont liés, ont été de tous temps mis à profit et étudiés à diverses fins. Le vocabulaire a beaucoup évolué au fil des époques, faisant écho aux évolutions des techniques industrielles et des théories scientifiques

La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, mais elle a également un but très concret dans tous les domaines qui touchent à la technologie : rechercher et codifier les méthodes qui permettent de donner un bon comportement aux contacts mécaniques, sachant que les organes qui constituent les machines « lâchent » aujourd'hui bien plus souvent par leurs surfaces que par leur volume. La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité

## **I.2 Définition :**

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques tribos qui signifie friction ou frottement, utilisé pour la première fois en 1966 en Grande-Bretagne par David Tabor à Cambridge. [1]

C'est une discipline regroupant les sciences et techniques qui s'intéressent aux interactions entre surfaces voire, le frottement, l'usure et la lubrification. (Figure I.1)

L'analyse des systèmes tribologiques permet de décrire les causes, de quantifier les effets et d'évaluer les conséquences des phénomènes inter-faciaux. [2]

Elle a pour objet de faire fonctionner les liaisons ou les mécanismes qui existent aussi bien dans toutes les machines, par exemple dans les transports et la production d'énergie, que dans les systèmes vivants.

Elle se doit d'élucider les aspects dynamiques des contacts que l'on rencontre dans tous les domaines. Elle a aussi pour but de supprimer l'usure et d'optimiser le frottement pour réduire les efforts.

Pour réaliser ces objectifs, une approche à base de la mécanique de contact et de la physico-chimie des surfaces a été conçue.

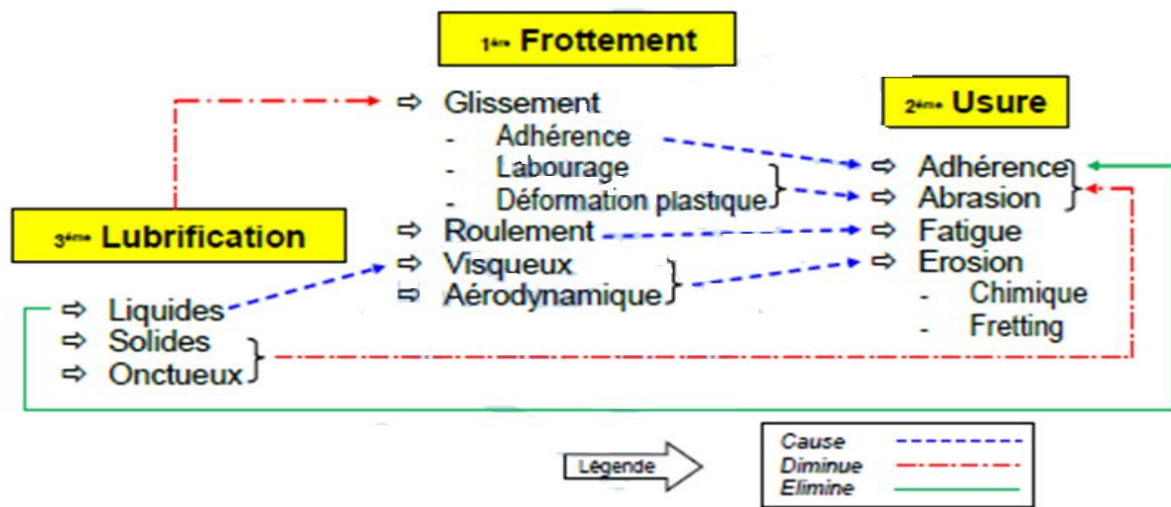


Figure I.1: Schéma général de la tribologie.

### I.3 Le système tribologique :

Un système tribologique ou tribo-système se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Ce dernier est considéré sur le plan tribologique comme étant un opérateur qui transmet la charge (la portance) d'un corps sur l'autre et accommode en s'écoulant d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Un système tribologique se caractérisera donc par un ou plusieurs contacts par lesquels transiteront les efforts, la chaleur...etc. [3]

Dans le cas le plus général, un contact tribologique est composé de quatre éléments principaux. (Figure I.2)

- les solides A et B correspondant aux corps en contact.
- l'environnement E.
- le milieu inter facial I défini sous le terme générique de troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...).

La notion de contact implique celle d'effort appliqué sur les solides, avec génération de contraintes mécaniques dont l'amplitude dépend des caractéristiques géométriques et topographiques des corps en présence. Le seul rapprochement des solides est à l'origine d'un certain nombre d'événements déterminants pour le comportement tribologique.

La notion de mouvement relatif introduit, quant à elle, celles de déplacement et de vitesse, avec comme manifestations les plus directes :

- une résistance au déplacement, due aux efforts résistants qui tendent à s'opposer au mouvement des solides (coefficient de frottement), d'où résultent de nouvelles contraintes (contraintes tangentielles).

- une dissipation d'énergie conduisant à un échauffement des surfaces (plus de 95 % de l'énergie dissipée dans le contact se transforme en chaleur). Les températures générées par frottement peuvent entraîner des modifications importantes des propriétés mécaniques, physiques, chimiques des matériaux, favorisant, par exemple les déformations élastiques ou plastique, les liaisons inter-faciales.

- des phénomènes de séparation des solides (portance) par le troisième corps.

Les paramètres du contact les plus significatifs peuvent être regroupés en quatre grandes familles :

- surface : matériaux constituant les corps en présence, topographie (rugosité), géométrie des contacts.
- Sollicitation du contact : charge, vitesse, température.
- Ambiance : environnement, lubrification.
- Mode de déplacement : [4]

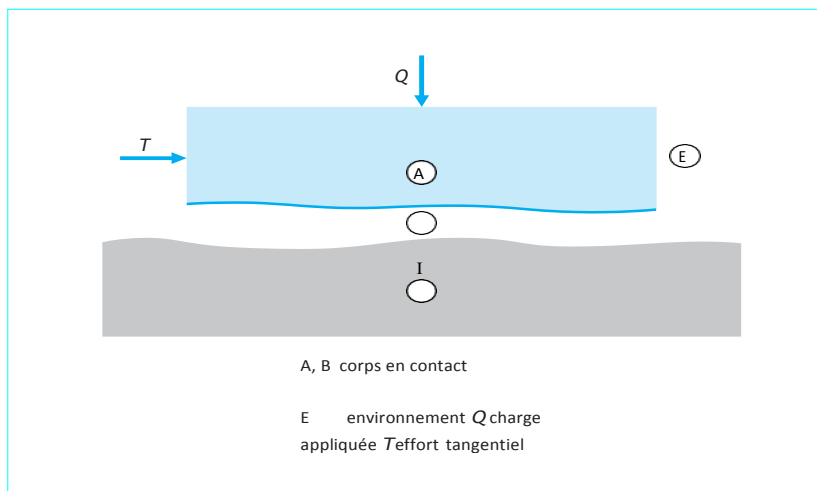


Figure I.2 : Principaux éléments du contact tribologique

L'organigramme suivant (Figure I.3) représente le schéma général d'un système tribologique :

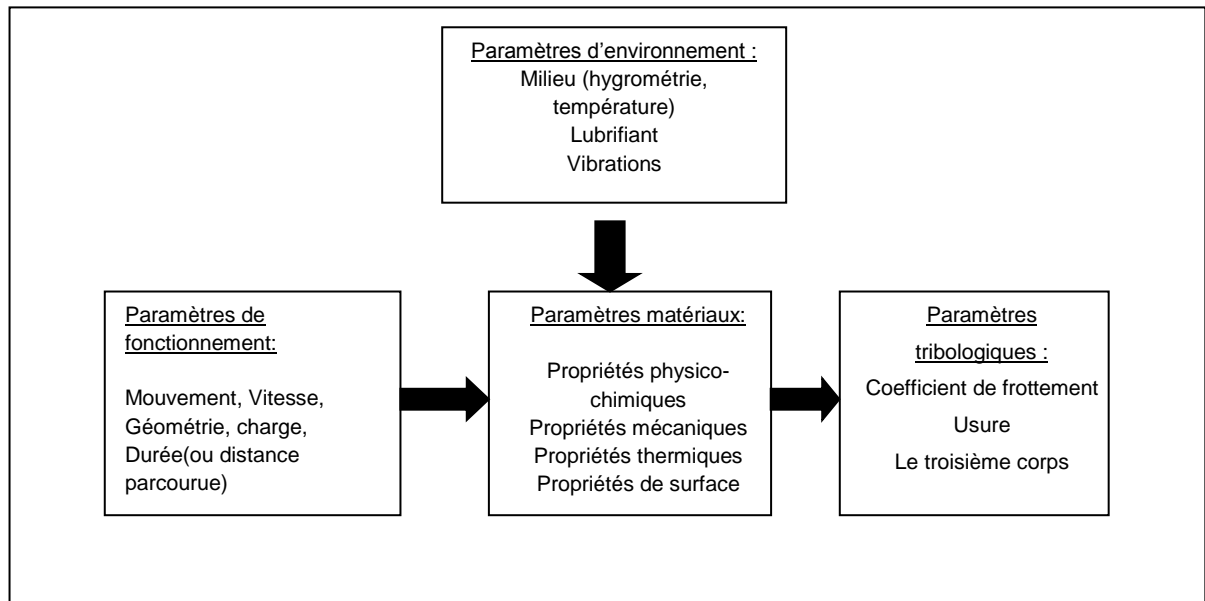


Figure I.3 : Synoptique général d'un système tribologique.

#### I.4 Approches tribologiques :

La tribologie a été successivement abordée sous trois angles différents lors des cinquante dernières années.

La première approche qui concerne en particulier la tribologie des volumes a permis la détermination de lois de comportement de frottement et d'usure. Elle repose avant tout sur les concepts de la mécanique et les matériaux sont réduits à quelques propriétés fondamentales intrinsèques (module de Young, coefficient de Poisson, dureté...). L'échelle considérée alors est d'ordre macroscopique.

La deuxième approche s'intéresse à la tribologie des surfaces et vise plus spécifiquement l'étude des matériaux. Grâce à la mise au point de moyens d'analyse de surface de plus en plus fins et à leur utilisation de plus en plus courante (ESCA, XPS, Auger, SIMS, SDL, AFM...), cela a mené à la physico-chimie des surfaces et donc à la compréhension des comportements tribologiques à l'échelle microscopique, voire nanoscopique.

La troisième approche a pour objet la tribologie des interfaces, elle induit une complémentarité mécanique/matériaux, soit un « mix » des deux premières approches. Elle tient ainsi compte de la notion d'écrans intercalaires statique et dynamique. Les trois outils conceptuels de base de cette dernière approche donnent un rôle déterminant à des éléments inter faciaux (troisième corps) bordant les deux massifs (premiers corps). Ces trois outils conceptuels sont :

- le triplet tribologique.
- les mécanismes d'accommodation de vitesse.
- le circuit tribologique.[5]

## I.5 Le triplet tribologique :

Le triplet tribologique est composé de trois éléments distincts qui constituent le contact et qui sont :

Le système mécanique, les premiers corps et le troisième corps (Figure I.4).

Le système mécanique comprend le contact en mouvement relatif. A l'échelle d'un laboratoire, ce système peut être un tribomètre pion-disque comme dans cette étude. A l'échelle industrielle, il peut s'agir d'une cage de laminage ou bien encore d'un contact roue-rail (boggie-voie) dans le cas du déplacement d'un train. Il intervient, au sens physico-chimique, par l'environnement qu'il impose et mécaniquement, par l'équilibre des forces internes et externes qu'il subit. Sur la Figure, nous pouvons voir que le système mécanique est représenté par la combinaison d'un ressort et d'un amortisseur. Ce système intervient donc à travers la raideur mécanique qu'il impose au contact. Par conséquent, le tribomètre impose sa signature au comportement tribologique des matériaux.

Les premiers corps sont les matériaux qui bordent le contact. Ils interviennent par leur géométrie et leurs propriétés thermo-élastiques et physico-chimiques, qui, pour les sollicitations transmises par le système mécanique, conduisent à leurs déformations qui vont alors définir les zones élémentaires de contact. L'intervention des matériaux est alors indirecte car elle s'effectue via la géométrie des premiers corps. En revanche, leur action est directe sur les zones élémentaires de contact ou cette fois les matériaux répondent aux sollicitations tribologiques telles que la force normale et le déplacement imposent à travers leur déformation, leur usure. Enfin, le troisième corps est défini comme étant le volume de matière qui sépare les premiers corps.

Les premiers corps et le troisième corps interviendront dans le concept tribologique en termes de sites d'accommodation, notion définie dans le paragraphe suivant.

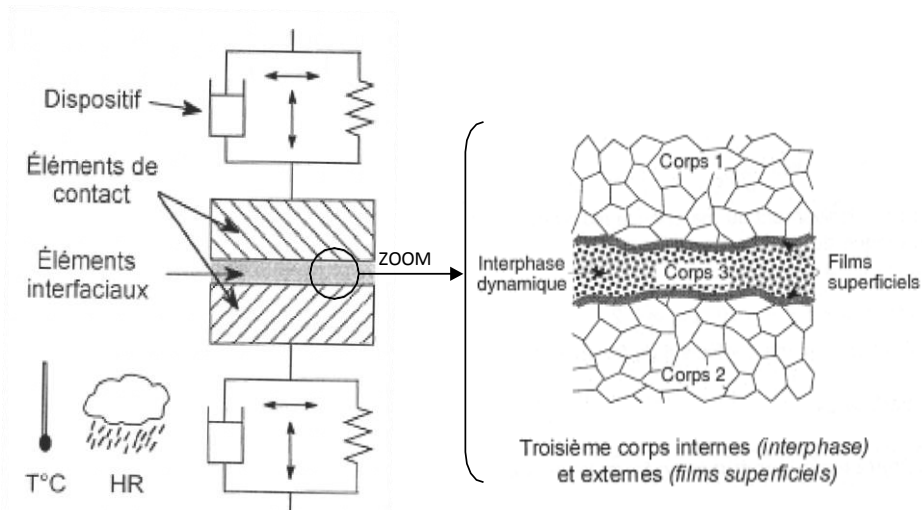


Figure I.4 Le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps

### I.5.1 Le troisième corps :

Dans le concept élaboré par l'équipe de Godet, d'un point de vue matériau, le troisième corps est défini comme étant la zone où la composition chimique est différente de

celle des constituants des premiers corps. D'un point de vue cinématique, le troisième corps est défini comme l'épaisseur dans laquelle la différence de vitesse entre les premiers corps est accommodée, ce qui met en avant son caractère lubrifiant.

Le troisième corps a quatre fonctions principales, qui sont :

- \_ La transmission de la charge normale aux premiers corps.
- \_ L'accommodation de la différence de vitesse entre les premiers corps.
- \_ La séparation des premiers corps, afin d'éviter leur interaction directe ce qui contribue à la diminution de leur dégradation.
- \_ La transformation de l'énergie cinétique en chaleur, qui est ensuite dissipée via les premiers corps ou via le débit de troisième corps.

## **I.6 Paramètres tribologiques :**

Les paramètres tribologiques sont caractéristiques des systèmes mécaniques qui ont des surfaces qui interagissent en mouvement relatif. La résistance au mouvement (friction) ou la résistance à l'endommagement des surfaces (usure) dans un environnement donné en relation avec l'action d'une ou plusieurs sollicitations. Un système tribologique et donc caractérisé par les paramètres tribométriques, associé avec les conditions opérationnelles, les paramètres microstructuraux des matériaux et les paramètres d'interactions dépendant de contact et des modes de lubrifications.

### **I .6.1 Les paramètres opérationnels :**

Ils caractérisent les conditions fonctionnelles d'un tribo-système. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests. Les principaux paramètres sont la charge appliquée **P**, la vitesse **V**, le temps **t**, et la température **T**.

### **I .6.2 Les paramètres structuraux :**

Ils sont liés aux mécanismes élémentaires des tribo-systèmes des produits et des machines. Le modèle classique d'un tribo-système est constitué de quatre composants principaux. (Figure I.5)

Le modèle classique d'un tribo-système est constitué de quatre composants principaux (figure I .5) :

la paire(1) et (2) des matériaux de contact, l'interface de contact(3) et le milieu environnant (4)

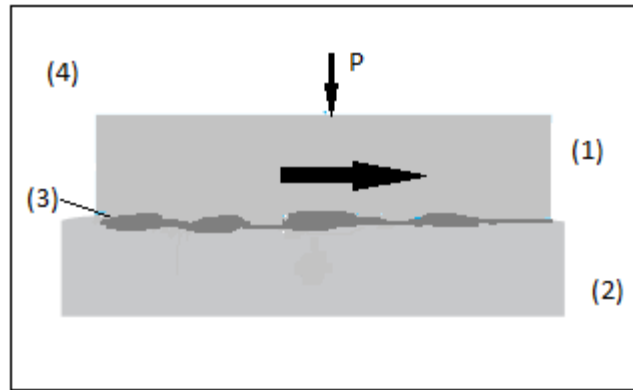


Figure I.5 : Composants d'un tribo-système.

Une distinction doit être faite entre les systèmes fermés (les composants sont soumis aux processus de frottement et d'usure de manière continue) et les systèmes ouverts (avec écoulement de matière à l'interface dans le cas de machines de mises en forme).

Le tableau I-1 donne la liste des principaux paramètres structuraux d'un tribo-système ouvert ou fermé.

Tribo-système	Elément(1)	Elément(2)	Interface (3)	Environnement (4)	Type de système
Boîte de vitesse	Engrenage (1)	Engrenage(2)	Lubrifiant	Air	Fermé
Roue /rail	Roue	Rail	3 <sup>eme</sup> corps	Air	Ouvert
Glissière	Glissière	Support	Graisse	Air	Ouvert
Roulement	Billes	Cage	Lubrifiant	Huile	Fermé
Pneu/route	Pneu	Sol	Sable, eau	Poussière	Ouvert
Moulin	Roue	Cage	Minerais	Air	Ouvert

Tableau I-1: constituant structuraux des tribo-système usuels.

### I .6.3 Les paramètres d'interaction :

Ils caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants du tribo-systèmes ainsi que le mode de contact (distribution des contraintes de contact) ou le type de lubrifiant pour un couple de matériaux donnés. Ces conditions peuvent être associées aux processus de frottement et d'usure (adhésion, abrasion...).

Les forces d'interactions entre les surfaces en contact en dépendent de manière complexe de la physico-chimique et des énergies des surfaces. Les contraintes de contact qui dépendent de la géométrie du contact de l'élasticité la viscoélasticité, plasticité ou dureté des métaux et de la force externe statique ou dynamique. Les modes de déformations au contact sont gouvernés par la topographie (état de rugosité) des surfaces.

### I .6.4 Les paramètres tribométriques :

Ce sont des valeurs qui résultent des mesures des interactions à l'interface de contact, donc des systèmes tribologiques. Le frottement sera décrit par des mesures de

force ou d'énergie et l'usure par des mesures de géométries modifiées ou de manière enlevées.

D'autres caractéristiques tribologiques peuvent offrir un intérêt : les vibrations induites au frottement, la caractérisation des débris d'usure, la composition et les caractéristiques des surfaces et le changement qu'elles subissent.[3]

## I.7 La surface en tribologie :

### I.7.1 Définition :

En tribologie la surface n'est pas le simple contour délimitant la matière dans l'espace mais elle comprend toutes les couches du corps considéré, qui interviennent dans les phénomènes tribologiques dont le frottement, le contact...etc.

La surface d'un solide délimite son volume et constitue le lieu où vont se développer les interactions entre ce solide et le milieu environnant.

### I.7.2 Etat de surface :

Une surface peut être caractérisée par ces propriétés mécaniques, physico-chimiques, topographiques ou structurales. L'ensemble de ces caractéristiques définit ce que l'on appelle l'état de surface.

#### I.7.2.1 Etat physico-chimique d'une surface :

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre  $10^{-2}$  et  $10^{-6}$  mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes. Dans le cas de métaux elle peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologique des corps en contact [6]

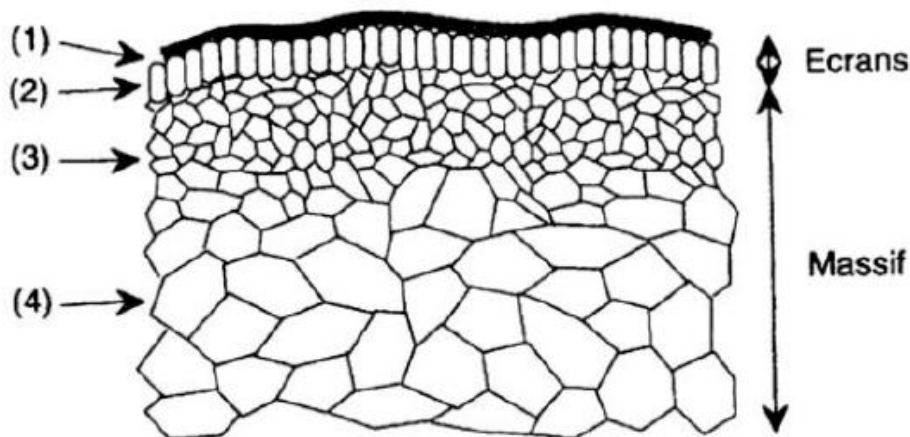


Figure I.6 : Vue théorique en coupe d'une surface

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone (1) est un film de contamination (0,2 - 8 nm) constitué de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes, elle peut atteindre 80nm. La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée (0,02 – 0,05mm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) est le matériau massif.

Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée «usure douce». Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement.

### I .7.2.2 Etat topographique d'une surface :

La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance (figure). La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Il faut aussi garder à l'esprit qu'un état poli miroir ne correspond pas forcément à la rugosité idéale des surfaces pour conférer une vie saine au système tribologique. Par exemple, dans le cas de deux matériaux frottants de dureté différente, la diminution de la rugosité du corps le plus dur est une bonne solution pour diminuer le frottement et l'usure par abrasion alors qu'une certaine rugosité du corps le moins dur facilite la rétention d'un lubrifiant et limite également le frottement et l'usure par adhésion.[7]


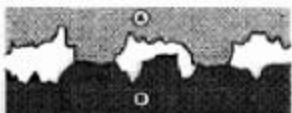


Effets		Schématisation du contact [rugosité, défauts de forme...]	Incidences prévisibles sur le frottement
Imbrication			- Résistance au déplacement - Déformations, ruptures... des aspérités
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		- Modification de la topographie : rugosité por- tance... - Ecrouissages
	Pénétration (dureté de A > dureté de B)		- Résistance au déplacement - Labourage de B par A - Transfert de B sur A
Adhésion			- Résistance au déplacement

Figure I.7 : Rapprochement des solides : effets et conséquences

### I .7.2.3 Profilomètre de surface :

La caractérisation d'une surface d'un échantillon est obtenue par des mesures profilométriques d'une zone représentative de cette surface. Ces mesures sont faites

usuellement avec un profilomètre constitué d'une pointe de diamant, avec un rayon d'extrémité de 2 µm, se déplaçant linéairement sur la surface. Les mouvements verticaux et horizontaux de la pointe sont amplifiés et enregistrés.

#### I .7.2.4 Paramètres de rugosité:

Deux paramètres de variation de hauteur  $z$  sont communément utilisés pour décrire la rugosité d'une surface : la valeur de rugosité moyenne  $R_a$ , définie comme la moyenne de la déviation verticale du profil par rapport à la ligne centrale et la valeur de la racine carrée moyenne de la rugosité  $R_q$  ou RMS, définie comme la racine carrée de la moyenne du carré des déviations

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2 dx}$$

#### I.7.2.5 Présentation des défauts géométriques de différents ordres d'une surface :

- Ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2nd ordre).
- Ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3ième et 4ième ordre).

#### I .7.2.6 Aspect géométrique des surfaces :

Les surfaces usinées sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. on sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions : guidage, étanchéité, ... quelque soit la qualité de la fabrication, il existe toujours une échelle suffisamment petite pour qu'ils soient mesurables.

#### I .7.2.7 Les ordres de défauts :

On appelle «profil mesuré» l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure.

Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique de mesure appliquée. De la précision de l'instrument de mesure utilisé.

Un palpeur sphérique explorant une surface vient successivement en contact avec les sommets des aspérités «saute de crête en crête». Pour mettre en évidence des défauts de plus en plus petits, il faut diminuer le rayon de ce palpeur, ainsi, l'enveloppe de ses positions successives et la trajectoire du centre du palpeur se rapproche du profil de la surface réelle.

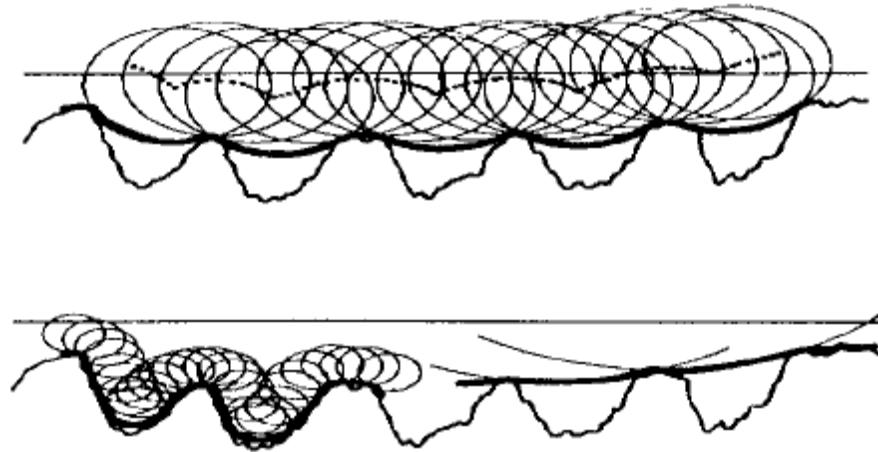


Figure I.8 : Profils mesurés.

1er ordre : écart de forme et de position : les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité se constatent avec un comparateur dont la touche de rayon  $R$  décrit une surface enveloppe appelée parfois surface apparente. On obtient l'écart du premier ordre par référence à la surface géométrique.

2em ordre : ondulation : l'écart des positions des deux palpeurs coaxiaux, dont l'un est le palpeur de rayon  $R$  précédemment utilisé pour déterminer le défaut de forme et l'autre une sphère de très petit rayon  $r$ , possède généralement une longueur d'onde moyenne ou pas moyenne  $A_W$ , dont l'ordre de grandeur est un petit nombre de millimètre. L'ondulation est l'oscillation de basse fréquence provenant essentiellement des imperfections des machines outils

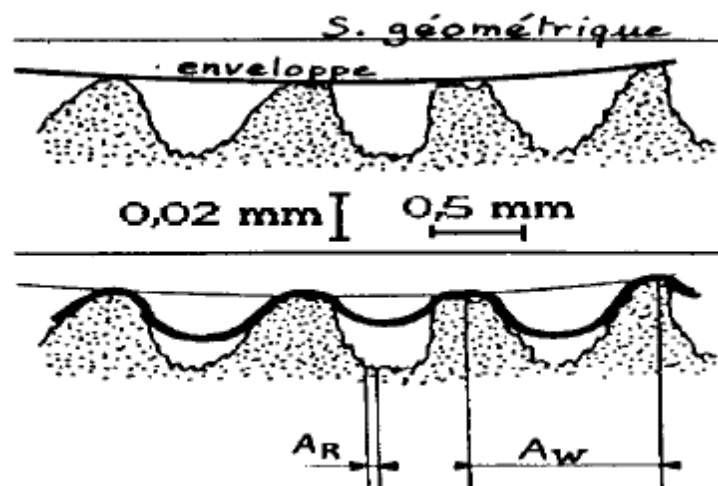


Figure I.9 : Ondulation et rugosité de 3em ordre

3em et 4em ordre : rugosité : ces micros ondulations, dues à des vibrations de haute fréquence, accompagnent le passage des outils coupants et l'enlèvement de la matière. Le 3em ordre correspond à des séries ou sillons, défauts périodiques ou pseudopériodiques de pas  $A_R$  voisin de 0,1mm, le 4em ordre provient des arrachements qui sont aperiodiques.

5em et 6em ordre : ils correspondent respectivement aux structures cristallines et moléculaires.

Le profil total est la somme des écarts du premier au quatrième ordre.

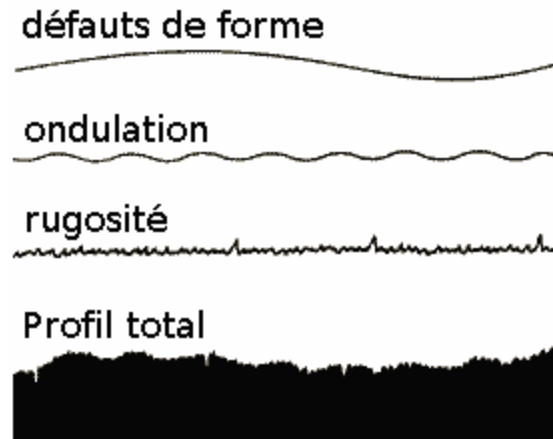


Figure I.10 : Profil total

### I .7.2.8 Caractéristiques du profil :

Si on coupe normalement une surface par un plan, on obtient une couche appelée profil de surface, c'est à partir de ce profil qu'on analyse les différents défauts de la surface. (Figure I.11)

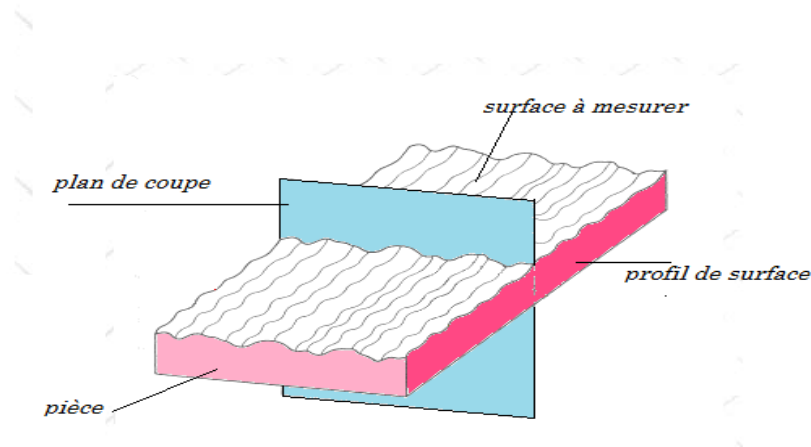


Figure I.11 : Profil d'une surface

#### Longueur d'évaluation $l_n$ :

Longueur, mesurée suivant la direction générale du profil.

#### Longueur de base $l_r$ :

Partie de la longueur d'évaluation utilisée pour séparer les irrégularités du profil



Figure I.12 : Longueur d'évaluation et de base

**Ligne enveloppe supérieure :**

Segment de droite joignant les points les plus hauts de la saillie local du profil.

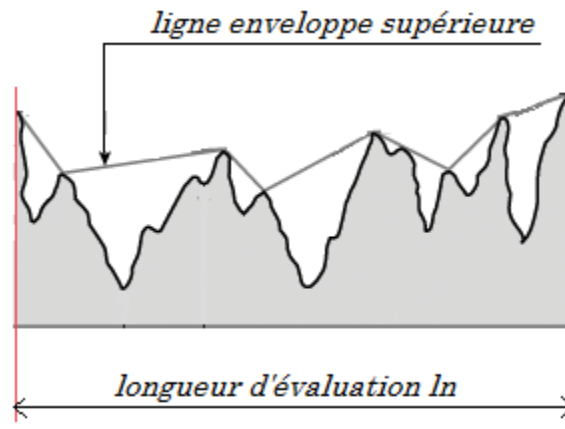


Figure I.13 : Ligne d'enveloppe supérieure

**Ligne moyenne :**

C'est une droite ayant une direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base, la somme des carrés des écarts de cette ligne soit minimale (ligne des moindres carrés).

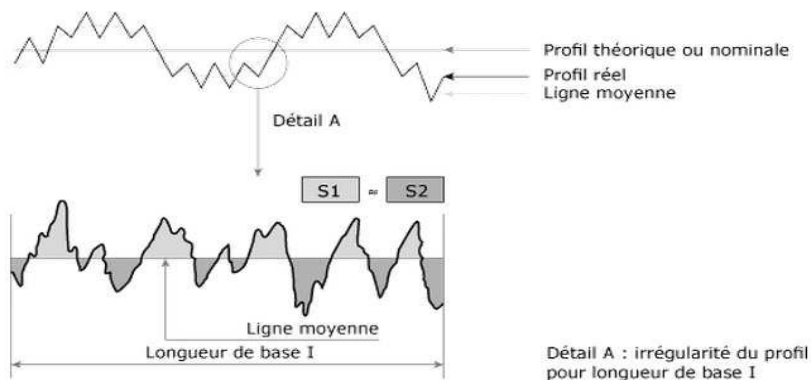


Figure I.14 : Ligne moyenne

### I .7.2.9 Paramètres liés aux motifs :

**Profondeur moyenne d'ondulations W :** C'est la moyenne des distances saillies creux des écarts du deuxième ordre.

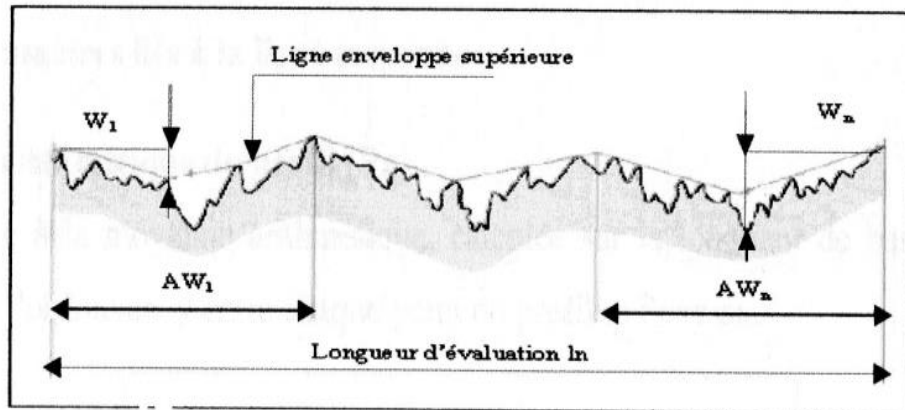


Figure I.15 : paramètres d'ondulation liés aux motifs

$$W \approx \frac{W_1 + \dots + W_n}{n} \text{ avec } n \geq 3$$

**Pas moyen d'enduction AW :**

C'est la moyenne des distances saillie-saillie des écarts du deuxième ordre

$$AW \approx \frac{AW_1 + \dots + AW_n}{n} \text{ avec } n \geq 3$$

**Profondeur moyenne de rugosité R :**

C'est la moyenne des distances saillie-creux des écarts du troisième et quatrième ordre.

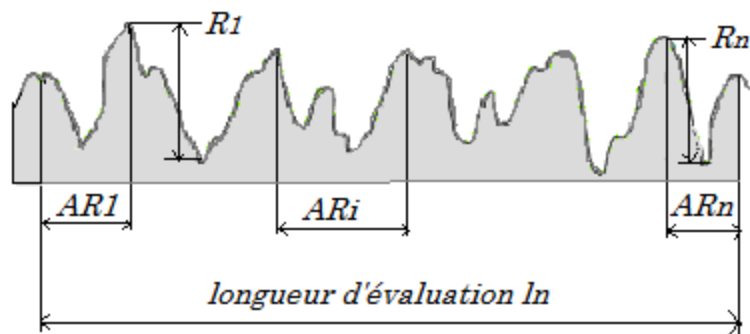


Figure I.16 : Paramètres de rugosité liés aux motifs

$$R \approx \frac{R_1 + \dots + R_n}{n} \quad \text{avec } n \geq 8$$

**Pas moyen de rugosité AR :**

C'est la moyenne des distances saillie-saillie des écarts de troisième et quatrième ordre.

$$AR \approx \frac{AR_1 + \dots + AR_n}{n} \quad \text{avec } n \geq 8$$

**Paramètres liés à la ligne moyenne :**

Ecart moyen arithmétique du profil (Ra)

Ra est égale à la moyenne arithmétique, calculé sur la longueur de base, de la valeur absolue de l'ordonnée Z entre chaque point du profil et l'axe OX.

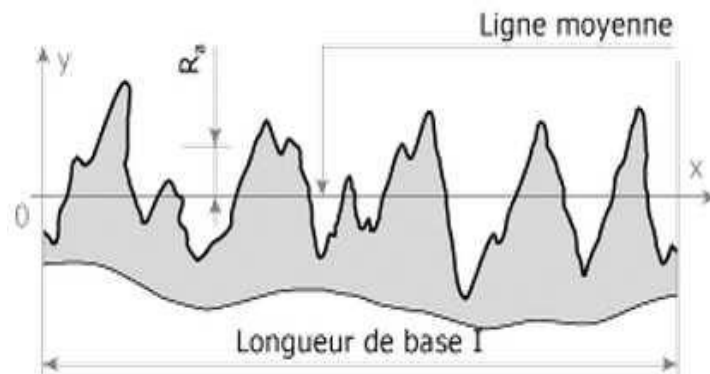


Figure I.17 : Paramètres de rugosité liés à la ligne moyenne

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx$$

**Hauteur maximale du profil Rz :**

C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

**Hauteur maximale des saillies Rp :**

C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne.

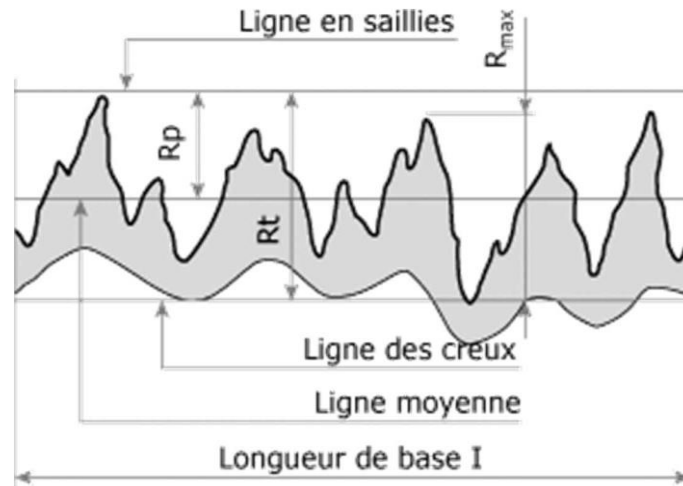


Figure I.18 : Hauteur du profil

### I .7.3 Pression de contact :

Les surfaces fonctionnelles utilisées en frottement sont uniquement des plans, des cylindres et des sphères.

Si les contacts théoriquement ponctuels comme celui d'une bille et d'un plan ou théoriquement linéique comme celui d'un cylindre monté dans un autre avec du jeu (palier cylindrique), l'étaient vraiment, ils subiraient en charge des pressions infinies, ce qui est impossible. En fait, les charges sont supportées par des aires de contact très petites, dont l'étendue dépend de la géométrie locale et de l'élasticité des matériaux. A leur niveau, les pièces subissent des contraintes dues à l'effort normal et d'autres, qui se superposent aux premiers, dues aux efforts tangentiels.

Lors des contacts surfaciques, plan contre plan par exemple, les zones réelles d'appui sont très restreintes. Il y en a au moins trois non alignées et l'expérience montre que leurs comportements est très proche de celui d'un contact bille sur plan.[7]

### I .7.4 Les caractéristiques mécaniques des surfaces :

Les propriétés mécaniques des couches superficielles des corps en contact sont : La dureté  $H$ , la limite d'élasticité  $R_e$ , la résistance à la traction  $R_m$ , le module d'élasticité  $E$ , le module de cisaillement  $G$ , les contraintes résiduelles  $\sigma_r$ , énergie élastique accumulée, la déformation plastique  $\epsilon$  et la ténacité  $k$ .

Les propriétés des surfaces proprement dites sont : réactivité chimique, adsorption moléculaire, énergie de surface, formation d'un film de surface (3<sup>ème</sup> corps) et la topographie.[3]

### I .8 Mesures tribométriques:

- Le coefficient de frottement  $\mu$  avec la condition statique  $\mu_s$  ou dynamique  $\mu_d$ , au glissement obtenu par le rapport entre la force tangentielle de résistance par friction  $F_T$  et la force normale  $F_N$ :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}$$

ou bien en roulement est dans ce cas  $\mu_r = \frac{T}{F_N R}$  / T : moment de torsion

R : rayon de la géométrie de surface

-La perte de masse  $\Delta w$ , la perte de volume  $\Delta v$  déterminé par l'enregistrement de variation géométrique mais souvent par une corrélation entre la masse spécifique et la perte de masse mesurée.

- L'énergie de frottement **E<sub>f</sub>**

- Le taux d'usure **k**

- Le produit **P\*V**.

## I .9 Essais tribologiques :

La stratégie d'un choix d'une méthode d'essais tribologique va dépendre des résultats espérés et définis par le test. Cette stratégie peut commencer par une recherche fondamentale théorique sur le processus physiques impliqués ces derniers définissent le test et aboutissent à la mesure expérimentale d'un paramètre tribométrique pour finalement développer un produit ou assurer une qualité. Il est important d'évaluer la validité de la simulation des conditions réelles de service ou les conditions requises pour optimiser des solutions existantes ou à créer.

Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques qui permettent d'obtenir une caractérisation du frottement, de la lubrification et de l'usure. Les études fondamentales du comportement tribologique des matériaux utilisent des concepts géométriques simples et les principaux types de géométrie des interfaces de contact sont représentés schématiquement dans la figure.

Ces contacts sont caractérisés des tests de frottement et d'usures au glissement ou au roulement et l'ensemble des paramètres tribométriques sont mesurés par ces types de tribomètres. La force de friction est mesurée par jauges de contraintes ou de déplacement. Dans certain cas (mesures dynamiques) des capteurs piézo-électriques sont utilisés pour mesurer cette force.

Les configurations des tribomètres de type pion sur disque sont les plus représentatives pour la mesure du frottement et de l'usure par glissement. Dans ce cas le contact initial peut être une surface (contact conforme), un point ou une ligne (contact concentré) suivant la forme et l'orientation des pions (sphère ou cylindre). Les conditions d'essais de mesure du frottement et de l'usure par glissement sont fixées par des normes.

Par exemple la norme américaine [ASTM G99] fixe les conditions pour l'essai pion sur disque :

Vitesse de rotation : 0.03 à 500 t<sub>r</sub>/min

Force normal : 1 à 60N

Dimensions :  $\varnothing=60\text{mm}$ ,  $h=15\text{mm}$

La normalisation des essais en tribologie présente de nombreuses difficultés en raison de la complexité des phénomènes de frottement et d'usure. Ces essais normalisés peuvent cependant servir par exemple à établir une base commune pour évaluer les performances d'un nouveau couple de matériaux pour le sélectionner ou comme certificat de contrôle de qualité.

Les méthodes d'essai sont classées en fonction du type de contact et des mouvements relatifs des corps en présence. La norme française NF T 51-108 présente les trois contacts (ponctuel, linéaire, surfacique) obtenus par combinaisons appropriées de sphères, de cylindres ou les plans, avec mouvement alternatif ou continu.

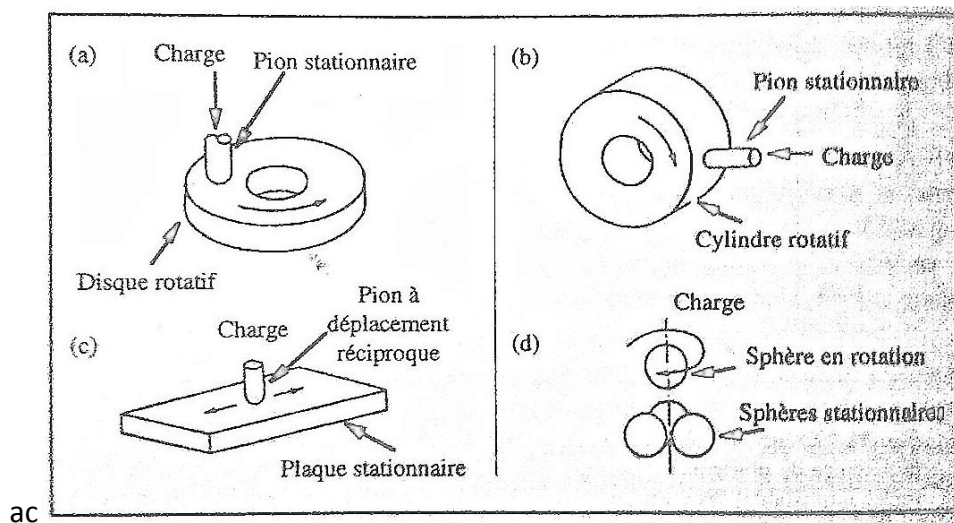


Figure I.19 : Quatre types de configuration d'essais tribologiques classiques

- (a) : pion stationnaire sur un disque rotatif.
- (b) Bloc stationnaire sur un cylindre rotatif.
- (c) Pion à déplacement réciproque sur plaque stationnaire.
- (d) Sphère en rotation sur 03 sphères stationnaires. [3]

### I .10 Exemples d'essais :

- 1- Essai d'usure abrasive à 2 corps : grains abrasifs solidaires d'une surface en contact, papier abrasif.
- 2- Essai d'usure abrasive à 3 corps : grains abrasifs libres à l'interface des surfaces en déplacement relatif.
- 3- Tests d'érosion :
  - a- le matériau à tester est placé dans l'impact d'un jet de particules accélérées par un flux gazeux ou liquide.
  - b- Le matériau est placé sur un bras en rotation coupant un flux de particules tombant par gravité.

**I .11 Conclusion :**

La tribologie est une science multidisciplinaire qui offre de nouveaux horizons aux concepteurs, en mettant en œuvre différents essais malgré les difficultés techniques afin d'optimiser les frottements et l'usure. Elle permet de mieux comprendre le comportement des matériaux ce qui conduira à un meilleur choix et un grand gain en matière et en coût.

*Chapitre II*  
*Frottement*

## **II.1 Introduction :**

Le problème des matériaux en contact en mouvement relatif s'avère de plus en plus important pour la durée de vie des équipements, la pollution et le coût en énergie perdue. Résultat du frottement dont les causes, telles qu'on les imagine de nos jours ; multiples et interdépendantes.

De tous les temps, on a cherché à comprendre ce phénomène, avec plus en moins de succès, par la spéculation intellectuelle et par l'expérience.

On retrouve, le long de l'histoire humaine de multiples traces de tentatives de compréhension et l'exploitation du phénomène et son contrôle. Des illustrations retrouvées dans les tombes égyptiennes mettent en évidence les problèmes de frottement. Les paliers des roues d'un chariot contenaient déjà une graisse animale lubrifiante et un bas relief illustrant le transport d'un colosse égyptien monte un homme versant un liquide dans le sillon du traîneau.

Par la suite, plusieurs scientifiques ont essayé de comprendre le phénomène, et leur précurseur fut le sir Léonard DE Vinci, qui étudie les principes et élabore, en 1508, deux énoncés : le premier stipule que la force de frottement est proportionnelle à la charge. Le second mentionne que la force de frottement est indépendante de l'aire de contact, comme il introduit le concept de coefficient de friction tandis que, deux à trois siècles plus tard, les français Amontons et Coulomb confirme le premier postulat.

C'est aux Anglais Bowden et Tabor que l'on doit (à partir de 1950) d'avoir énoncé pour la première fois des idées claires sur le sujet, mais il est intéressant de considérer les cheminements intellectuels qui ont été suivis au cours des siècles.

## **II.2 Définition :**

En physique, le frottement (ou friction) est une interaction qui s'oppose au mouvement relatif entre deux systèmes en contact. Le frottement peut être étudié au même titre que les autres types de force ou de couple. Son action est caractérisée par une norme et une orientation, ce qui en fait un vecteur. L'orientation de la force (ou du couple) de frottement créé sur un corps est opposée au déplacement de ce corps. La science qui étudie le frottement entre solides est la tribologie.

La tribologie est complexe par le fait que le frottement n'est pas dû à une interaction élémentaire, mais résulte de causes diverses, principalement des forces électromagnétiques et de l'interaction d'échange entre les atomes des surfaces en contact. Ces mêmes forces sont également en jeu dans l'adhérence, qui s'oppose à la création d'un mouvement, qui pour cette raison peut être étudiée conjointement. [6]

### II.3 Lois empiriques du frottement :

La première approche scientifique du frottement fut instauré par Leonard De Vinci (1452-1519) , puisque jusqu'ici, peu d'information à propos des développements et de la résolution des problèmes concernant le frottement existaient. (Figure II.1)

Cet esprit remarquable postula que la force que l'on doit appliquer pour permettre le glissement d'un corps et proportionnelle à la charge et ne dépend pas de la surface de contact.

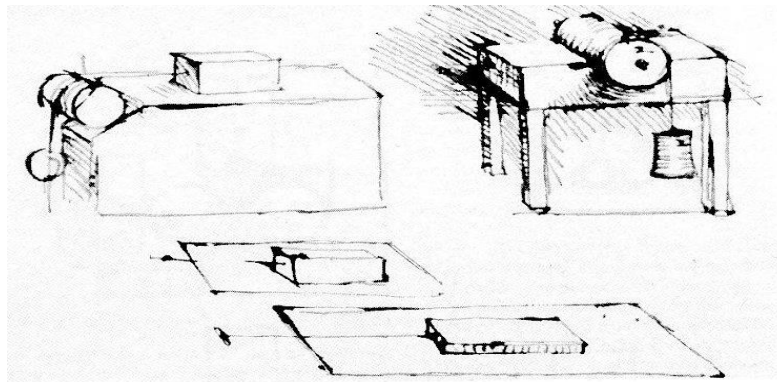


Figure II.1 : Tribomètre de Vinci (vers 1500)

Deux siècles plus tard, l'ingénieur français AMONTONS annonce ces deux lois, et les publie en 1699. Une troisième a été introduite par COULOMB en 1785 (Figure II.2) où il a postulé que le frottement cinétique est à peu près indépendant de la vitesse de glissement. Ces lois du frottement sont empiriques et aucun principe fondamental de la physique n'est violé dans le cas où ces lois ne sont pas respectées. Il n'existe pas jusqu'à ce jour de théorie unifiée de frottement basée sur des principes physiques.

#### Lois d'AMONTONS :

-La force de frottement  $F_t$  est proportionnelle à la charge normale  $F_N$  permettant de définir un coefficient de frottement  $\mu$  :  $F_t = \mu \times F_N$

-Le frottement est indépendant de la surface de contact.

#### Loi de COULOMB (1785) :

La force de frottement est indépendante de la vitesse de glissement [3]

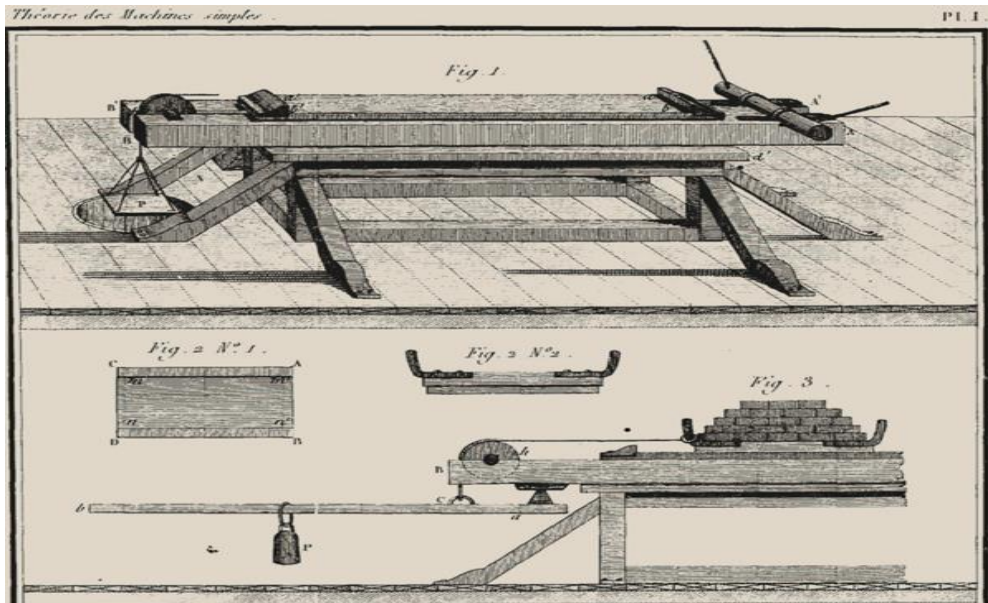


Figure II.2 : Experiences de C.COULOMB en 1785

#### II.4 Théories du frottement :

Le modèle classique du frottement par glissement admet que la force de frottement résulte de deux sources : une force d'adhésion et une force de déformation au niveau des aspérités des surfaces. Les aspérités en contact microscopique de la plupart des surfaces réelles sont déformées plastiquement sous la charge jusqu'à ce que la surface de tous les contacts soit suffisante pour supporter les charges. Avec cette hypothèse on peut écrire l'égalité suivante :

$$A \cdot P_0 = F_N$$

Où, A est la surface apparente du contact,  $P_0$ , la pression de transition plastique du matériau en contact. Pour tenir compte de la déformation nécessaire au labourage par les aspérités, on introduit le terme  $P_e$  à la force de frottement  $F_T$ , c'est-à-dire :

$$F_T = A \cdot \tau + P_e$$

Avec :

$\tau$  : contrainte de cisaillement nécessaire pour rupture des jonctions formées du contact.

$P_e$  : a été introduite pour tenir compte de la déformation nécessaire au labourage des aspérités et qui peut être négligeable en première approximation. On peut écrire :

$$F_T = A \cdot \tau = \frac{F_N \cdot \tau}{P_0} = \mu = \frac{F_N}{F_T} = \frac{\tau}{P_0}$$

Ainsi ce modèle donne une explication des lois du frottement, et montre que ce dernier est indépendant de la surface apparente de contact et proportionnel à la charge. Et on définit  $\mu$  étant le coefficient de frottement, qui est une propriété du système tribologique. Ce modèle néglige l'influence de force tangentielle sur la surface de contact réelle.

Si maintenant, une force tangentielle  $F_T$  est appliquée, un écoulement plastique supplémentaire surviendra, ce qui provoque une augmentation additionnelle de l'aire de contact par la suppression de la contrainte normale tangentielle. Le contact résulte sous ces forces ou contraintes sera de la forme :

$$A^2 = \left(\frac{F_N}{P_0}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F_T}{P_0}\right)^2$$

Où  $\frac{F_N}{P_0}$  est l'aire dérivée du modèle simple ne considérant que l'effort de la charge normal et le terme  $\left(\frac{F_T}{P_0}\right)^2$  représente la contribution de la force de frottement ou de cisaillement.

Beaucoup de matériaux ont un mince film contaminé à la surface qui possède une contrainte critique de cisaillement  $\tau_f$  différente de celle du reste du métal de masse. Donc on peut écrire

$\tau_f = C \cdot \tau_{\max}$  Où  $\tau_{\max}$  désigne la contrainte critique de cisaillement de la masse du métal et C un paramètre inférieur à 1. Le film de métal cisillera lorsque  $F_T = \tau_f(A)$ , dans ce cas peut prendre la forme suivante :

$$\mu = \frac{C}{\sqrt{\alpha(1-C^2)}}$$

Où  $\alpha$  est le rapport  $\left(\frac{P_0}{\tau_{\max}}\right)^2$  : pression de transition élastique-plastique / contrainte critique de cisaillement.

Dans le processus de labourage, les aspérités du matériau le plus dure pénètrent dans le matériau le plus doux et ça par labourage majeur. En prenant une aspérité qu'on assimile à un cône de demi-angle  $\theta$  on peut obtenir la formule :

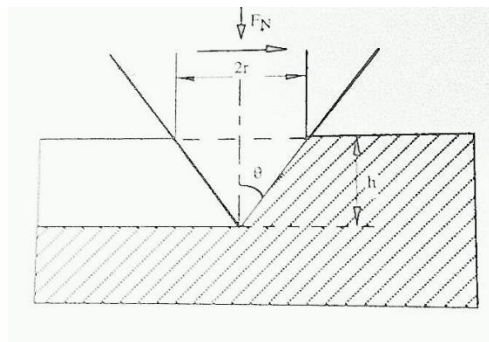


Figure II.3 : modèle pour la composante de déformation du frottement : labourage d'une surface déformée plastiquement par une aspérité conique dure

$$\mu = \frac{2}{\pi} * \cotg \theta$$

Cette dernière est semblable à celle d'un plan lisse.

D'autres chercheurs ont fait intervenir l'énergie de surface. [3]

## II.5 Caractéristiques physiques :

On distingue deux principaux types de frottements:

### II.5.1 Frottement sec :

Le frottement sec est indépendant de la vitesse de glissement. Il se décompose en deux situations issues de la loi de Coulomb.

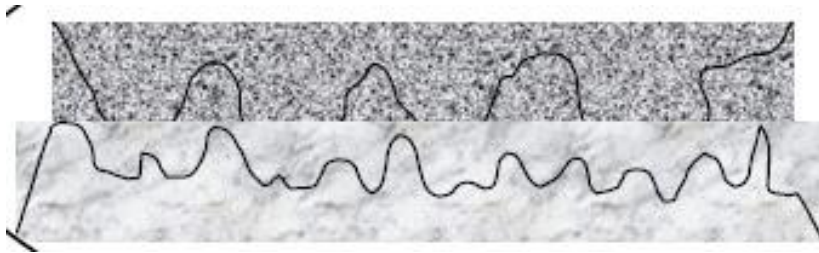


Figure II.4 : Frottements secs, vue microscopique de la zone de contact

#### II.5.1.1 Frottement sec statique :

Le frottement statique est une force (ou un couple) qui tend à garder un corps en état statique.

Lorsqu'une force est appliquée sur un objet reposant sur une surface (considérée comme immobile), la composante de cette force qui est parallèle à la surface est compensée par une force de frottement statique opposée, qui maintient l'objet immobile pour autant que la composante parallèle de la force appliquée ne dépasse pas une valeur maximale<sup>4</sup>. L'observation expérimentale montre que, en première approximation, cette valeur maximale ne dépend que du poids apparent du corps et d'un coefficient de frottement statique, mais pas de l'aire de contact. Le coefficient de frottement statique, lui, dépend de la nature des surfaces en contact.

Mathématiquement, le frottement statique  $\vec{f}_s$  est opposé à la composante tangentielle  $\vec{f}_{\text{tangentielle}}$  de la force appliquée, et son intensité est inférieure ou égale au coefficient de frottement statique  $\mu_s$  multiplié par le poids apparent  $N$  :

$$\vec{f}_s \parallel -\vec{f}_{\text{tangentielle}}$$

Dès que la force tangentielle dépasse la valeur maximale du frottement statique, l'objet se met à glisser, entraîné par la force appliquée.

$$f_s \leq \mu_s \cdot N$$

Le même raisonnement peut se transposer dans le cas de couple de frottement.

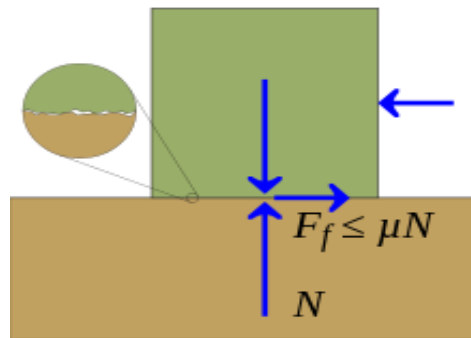


Figure II.5 : Le frottement  $F$  s'oppose au mouvement relatif entre les deux corps

### II.5.1.2 Frottement sec cinétique (ou dynamique) :

Lorsqu'un objet glisse sur une surface, la force de frottement est appelée frottement cinétique. Ce frottement tend à ralentir l'objet. L'observation expérimentale montre que, en première approximation, l'intensité du frottement cinétique varie en fonction du poids apparent de l'objet et du coefficient de frottement cinétique, mais pas de l'aire de contact ni de la vitesse. Le coefficient de frottement cinétique, tout comme le coefficient de frottement statique, varie selon le type de matériaux en contact.

Mathématiquement, le frottement cinétique  $f_c$  n'est plus nécessairement opposé à la composante tangentielle de la force appliquée (qui peut d'ailleurs devenir nulle), mais est opposé à la vitesse de l'objet, et son intensité est égale au coefficient de frottement cinétique  $\mu_c$  multiplié par le poids apparent  $N$ .

$$\begin{aligned} \vec{f}_c & \parallel -\vec{v} \\ |f_c| &= \mu_c \cdot N \end{aligned}$$

Le même raisonnement peut se transposer dans le cas de couple de frottement.

### II.5.2 Frottement visqueux :

Un frottement visqueux est une force (ou un couple) de frottement qui dépend de la vitesse relative des deux corps en mouvement. Il s'exprime différemment selon qu'il s'agisse du contact entre deux solides lubrifiés ou du déplacement d'un corps dans un milieu fluide.

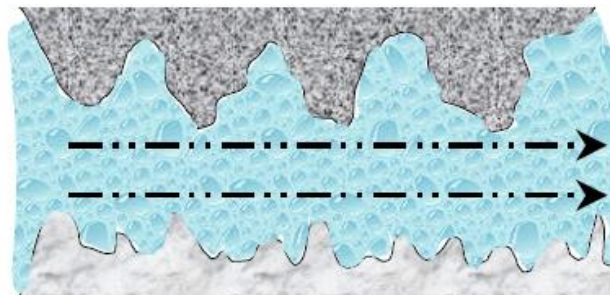


Figure II.6 : Frottement visqueux, vue microscopique

### II.5.2.1 Frottement visqueux de lubrification :

Étant données deux surfaces séparées par un liquide visqueux, le frottement suit une loi de Stribeck.

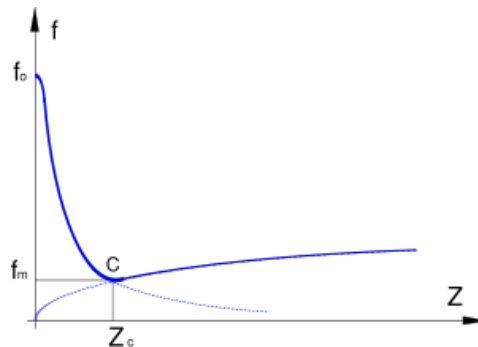


Figure.II.7 : Courbe de Stribeck

### II.6 Les différents types de frottements :

Lorsque deux solides A et B sont en contact figure. a, on peut distinguer deux types de frottement :

Si A et B glissent l'un par rapport à l'autre, il apparaît un frottement de glissement figure b, lorsque A roule sur B figure II.c, on parle de frottement de roulement. Quand un corps se déplace dans un fluide (un gaz ou un liquide), on parle de frottement visqueux ou frottement fluide figure d. En générale le contact entre deux corps aux surfaces rugueuses provoque une grande force de frottement qui joue le rôle d'obstacle, et freine le mouvement relatif entre les deux surfaces[3].

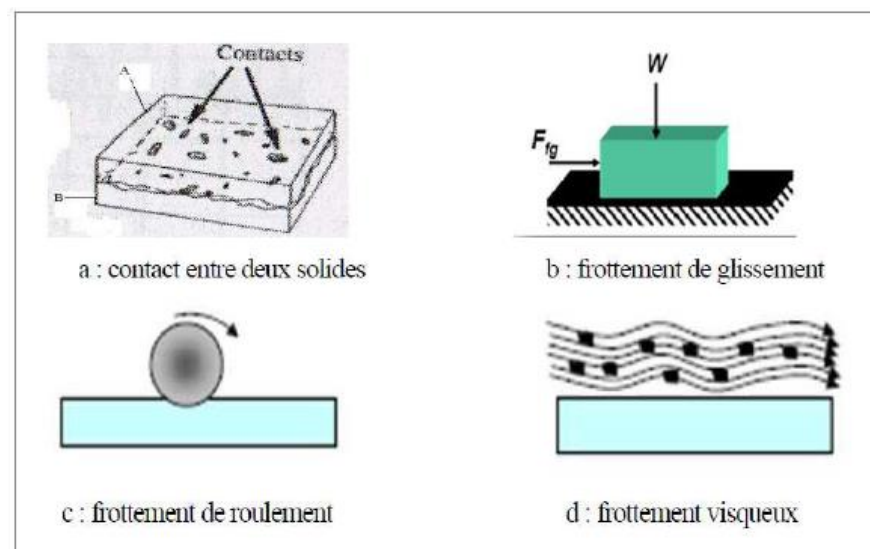
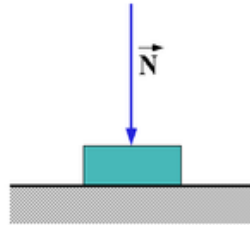


Figure II.8 : Différents types de frottement

• **Adhérence et glissement :**

Un bloc parallélépipédique est pressé sur un plan par une force normale  $N$  (son poids ou toute autre force imposée). Naturellement, cette force est compensée par l'ensemble des actions exercées par le plan sur le bloc, actions qui n'ont pas été dessinées ici puisque le bloc n'est pas isolé.



Appliquons maintenant au bloc une force  $T$  parallèle au plan.

Cette fois, le bloc a été isolé, ce qui nous permet de dessiner la résultante  $R$  de toutes les petites forces élémentaires qu'il reçoit de la part du plan. Tant que  $T$  reste faible, rien ne bouge, le bloc est en équilibre : les trois forces ont des supports coplanaires, concourants, et leur somme est nulle. Remarquons en passant que le point d'application de la résultante  $R$  n'est pas au centre du bloc mais légèrement décalé « vers l'avant ».

Le fait que la poussée  $T$  ne provoque aucun mouvement ne prouve qu'il existe dans le contact des forces suffisantes pour maintenir le bloc immobile. On dit alors qu'il y a adhérence (et non pas *adhésion*, terme utilisé dans le cas du collage).

La résultante  $R$  est dans le même plan que  $N$  et  $T$ , elle est située, par rapport à la normale, du côté qui lui permet de contrebalancer l'effet de  $T$ .

L'angle de  $R$  avec la normale n'a pas une valeur fixe, il est d'autant plus grand que la poussée  $T$  est plus forte mais il ne peut en aucun cas dépasser une certaine valeur  $\Phi_0$  dite angle limite d'adhérence ou plus simplement angle d'adhérence.

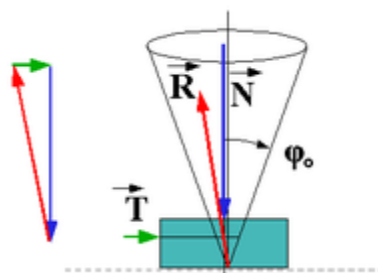


Figure II.9 : Poussée sans glissement

Si l'on fait tourner la direction de  $T$  autour de la normale,  $R$  « suit le mouvement » et la conclusion est la même. Il s'ensuit que la résultante  $R$  se trouve dans ou à la limite sur un cône de révolution dont l'axe est perpendiculaire au plan et dont le demi-angle au sommet vaut  $\Phi_0$ . Ce cône est appelé cône d'adhérence.

Le facteur d'adhérence  $f_0$ , ou coefficient d'adhérence, est la limite supérieure du rapport des normes de l'effort tangentiel et de l'effort normal (ce facteur caractérise la limite entre adhérence et glissement, entre système statique et système dynamique) :

$$f_0 = \tan \Phi_0 \geq \frac{\|\vec{T}\|}{\|\vec{N}\|}$$

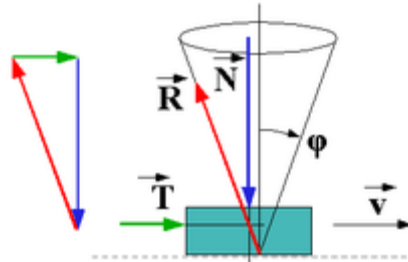


Figure II.10 : glissement

Supposons maintenant que nous poussions suffisamment fort pour faire glisser le bloc. Si celui-ci a une vitesse constante  $v$ , alors nous pouvons à nouveau faire comme s'il était en équilibre, c'est-à-dire que les trois forces  $N$ ,  $T$  et  $R$  qui s'exercent sur lui sont toujours coplanaires, concourantes, et leur somme est nulle.

Nous constatons cette fois que la résultante  $R$  est toujours inclinée du même angle de frottement  $\phi$  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  $\phi$ , que nous appellerons cône de frottement.

Le facteur de frottement ou coefficient de frottement  $f$  est cette fois égal au rapport (constant) des normes de l'effort tangentiel et de l'effort normal :

$$f = \tan \Phi \geq \frac{\|\vec{T}\|}{\|\vec{N}\|}$$

- **Frottement de pivotement :**

Il s'agit d'un cas particulier du frottement de glissement, avec une vitesse de glissement variable dans la zone d'appui.

Une bille, qui repose ici dans une alvéole en forme de calotte sphérique, est chargée verticalement par une force  $\vec{F}$ . Pour la faire tourner à la vitesse  $\vec{\Omega}_p$  par rapport au support, il faut lui appliquer un couple  $\vec{C}_p$ .

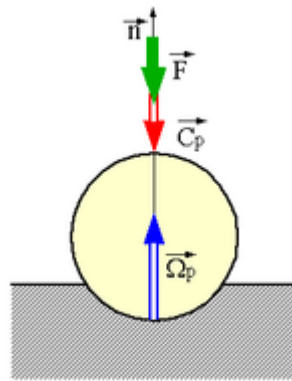


Figure II.11 : Frottement de pivotement

Ce couple, créé par les résistances passives, freine d'autant plus la rotation que le facteur de frottement est plus élevé et que l'appui est plus étendu et plus chargé. Il dépend en outre de la façon dont se répartissent les pressions de contact entre la sphère et le support.

Il est toujours possible d'écrire le couple de frottement de pivotement sous la forme suivante :

$$\vec{C}_p = R \vec{F}$$

Tout se passe comme si le contact des deux objets se faisait sur une couronne circulaire de rayon moyen R.

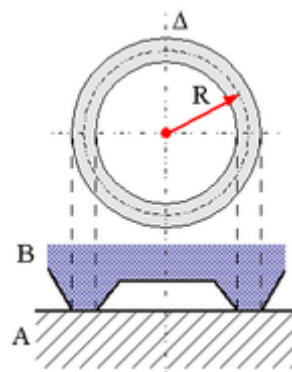


Figure II.12 : Rayon de pivotement

Ce rayon fictif R est le facteur de frottement de pivotement.

Si le couple « moteur » est insuffisant, la bille ne tourne pas, il y a adhérence, dans ce cas :

$$|\vec{C}_p| \leq R |\vec{F}| = C_{p0}$$

- **Frottement de roulement :**

Une bille ou un rouleau qui roule sans glisser sur un plan horizontal, sans recevoir d'énergie extérieure, ralentit et finit par s'arrêter sous l'effet des frottements internes aux pièces. On

peut maintenir la vitesse constante par application d'un couple  $C$  parallèle à l'axe de la rotation.

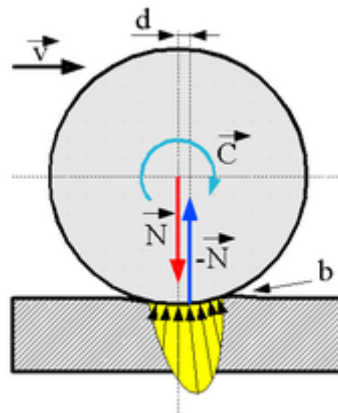


Figure II.13 : Roulement

La zone d'appui, plus ou moins étendue, subit des pressions qui peuvent être relativement faibles (pneumatiques automobiles ...) ou très élevées (couramment 3000 à 3500 MPa dans les roulements à billes ou à rouleaux). Le corps roulant (supposé, sur ce schéma, moins déformable que le support) et la piste s'affaissent toujours plus ou moins lors de la mise en contact, puis reprennent leur forme initiale, du moins si les déformations sont restées élastiques. Dans le cas contraire, le corps roulant laisse une « ornière » dans la piste, comme fait une roue qui parcourt un sol meuble.

Comme les matériaux réels ne sont jamais parfaitement élastiques, le retour à la forme initiale, même quand il est total, n'est pas instantané. Un « bourrelet » (b) se forme à l'avant du corps roulant, tandis qu'à l'arrière les surfaces se séparent un peu trop vite ; tout se passe comme si le corps roulant montait une pente sans fin. De ce fait, les forces de contact sont plus élevées à l'avant de la zone de contact qu'à l'arrière et leur résultante  $\vec{-N}$  n'est pas directement opposée à la charge normale  $\vec{N}$  mais décalée vers l'avant d'une certaine distance  $d$  telle que :

$$C=N.d \text{ où } d=\frac{C}{N}$$

Les valeurs de  $C$  et  $N$  sont ici, bien évidemment, des normes. La distance  $d$  est le facteur de frottement de roulement, ou encore coefficient de frottement de roulement.

## II.7 Comportement du coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement dynamique, dans un glissement à sec (sans lubrification), est affecté par un nombre de paramètres plus important que le coefficient de frottement statique et a peu de signification sans une définition précise des conditions de frottement. Les principaux paramètres qui interviennent sont :

### II.7.1 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 :

- 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 II.14 , 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) de la figure.

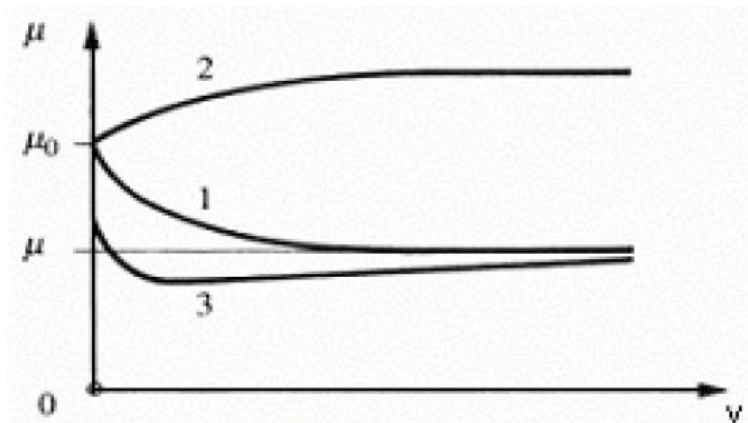


Figure II.14 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.

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) de la même figure, 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.

### II.7.2 Chemin de glissement parcouru :

La figure représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement.

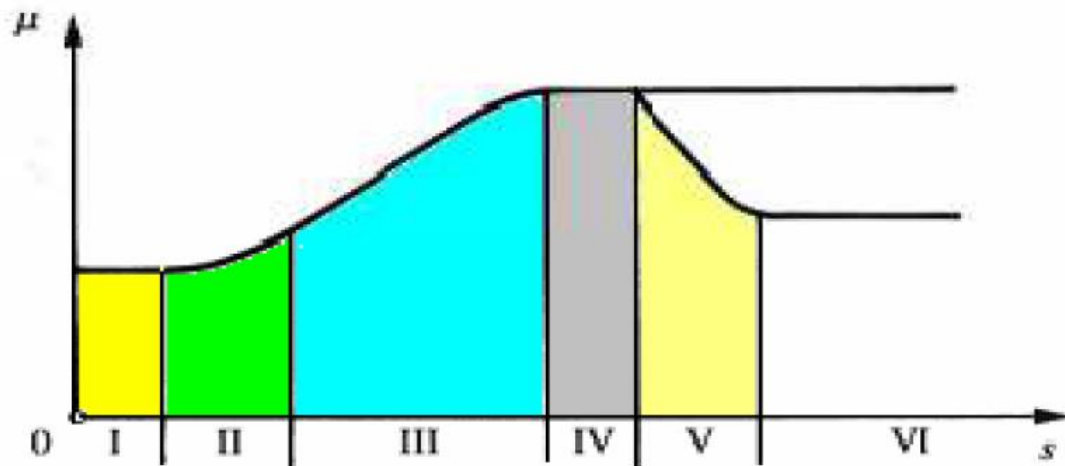


Figure II.15 : Evolution du frottement avec la distance de glissement.

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'incrusteront 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.

### II.7.3 Etat de surface

Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses.

### II.7.4 Nature des matériaux :

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.

### II.7.5 Charge normale appliquée :

La figure II .16 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.

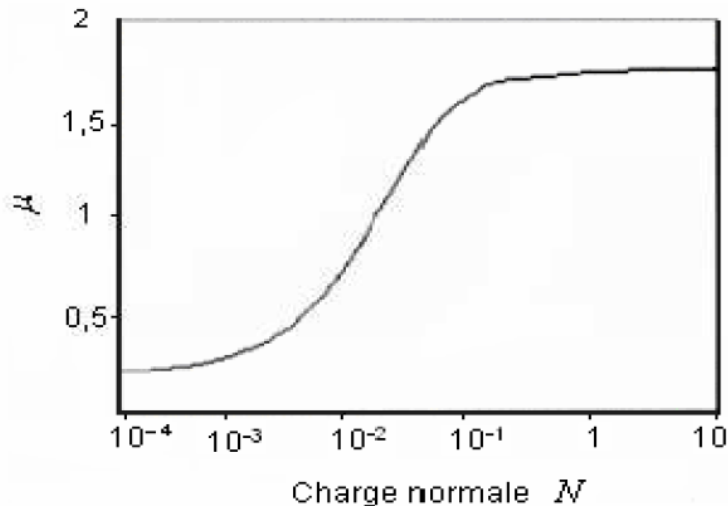


Figure II .16 : Variation du coefficient de frottement  $\mu$  en fonction de la charge normale  $N$ .

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1à10nm) 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.

### II.7.6 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.

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

### II.8 Importance du coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs ( $F_n$ ,  $V$ , et  $\mu$ ), correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement. Le champ des contraintes mécaniques superficielles augmente dangereusement avec l'accroissement du coefficient de frottement. Sauf dans le cas particulier de l'utilisation positive du frottement, par exemple pour accroître les caractéristiques d'adhérence entre deux corps (mécanismes d'engrènement, assemblage frettés, ...) ou pour absorber de l'énergie (freinage), on cherche donc à abaisser le plus possible le coefficient de frottement. La maîtrise du coefficient de frottement est un critère déterminant pour la fiabilité et la

sécurité de fonctionnement de certains composants tels que les assemblages frettés, vissés. Ainsi le rôle de certains traitements de surfaces est principalement dévolu au contrôle des couples de serrage sur les éléments de visserie, de boulonnerie. [7]

## L'aire réelle de contact entre deux solides

L'importante contribution de l'École Française représentée au cours des années par Amontons [1699], Coulomb [1785] et Morin [1835] fut de bien mettre en évidence que le contact entre les surfaces des solides n'est réalisé qu'en des points discrets, à savoir au niveau des aspérités les plus hautes. Toutefois, ces éminents savants considéraient les surfaces des solides comme infiniment rigides de sorte que l'étendue de la zone de contact ne dépendait, d'après eux, que de la dimension des solides et de la géométrie des aspérités. Il a fallu attendre les travaux de Verkhovskii datant de 1926, cités par Kragelskii [1965], ceux de Holm [1946] et de Bowden et Tabor [1950, 1964] pour bien comprendre que les aspérités de la surface, comme les solides eux-mêmes, sont susceptibles de se déformer suivant les lois classiques régissant la déformation élastique ou la déformation plastique de sorte que la dimension de l'aire réelle de contact dépend étroitement à la fois de la topographie de la surface et du mode de déformation des rugosités superficielles.

Il existe à l'heure actuelle des dispositifs très sensibles et précis, équipés de palpeurs mécaniques ou optiques, que l'on peut appeler «microscopes à balayage mécanique», capables de décrire très finement la topographie de la surface, de la représenter en trois dimensions et de fournir un très grand nombre de paramètres [Thomas, 1981] permettant une exploitation théorique [Greenwood, 1984, 1992a, 1992b]. Deux conclusions pertinentes, dont la première est certainement la plus importante, ressortent des différents travaux menés dans ce domaine :

- il n'existe pas de liste exhaustive de paramètres décrivant totalement la topographie, on sait que la frontière de la surface de contact est fractale mais aussi que sa caractérisation dépend de l'échelle utilisée ou de l'étendue de l'échantillon de surface analysé ;
- le paramètre le plus important, quant à ses conséquences sur les propriétés de déformation de la surface solide, est la pente moyenne des rugosités.

A titre d'exemple, considérons le modèle de contact entre un solide dont la surface est plane, idéalement lisse, rigide et indéformable et un autre solide dont la surface est rugueuse et déformable. Au fur et à mesure que la force de compression appliquant un des solides contre l'autre est augmentée, les zones de contact existantes sont élargies tandis que d'autres points de contact apparaissent et croissent à leur tour. Pour une distribution exponentielle des hauteurs d'aspérités, Greenwood et Williamson [1966] ont montré que la surface de contact moyenne rapportée au nombre de zones de contact reste constante, en d'autres termes, le doublement de la force de compression multiplie par deux à la fois le nombre de points de contact et la surface totale d'appui. Si l'on considère une distribution gaussienne des hauteurs, le résultat précédent n'est pas retrouvé exactement, toutefois, on peut annoncer avec une bonne approximation que l'aire réelle de contact est, d'une part, proportionnelle à la force d'appui et, d'autre part, indépendante de la dimension des solides en contact. [10]

## II.9 Manifestations du frottement :

### Résistance passive :

Le frottement et l'adhérence engendrent des efforts mécaniques (des forces et des couples) dont la principale caractéristique est de contrarier systématiquement ou d'empêcher les mouvements relatifs et les déformations des objets. Ces efforts prennent naissance non seulement au niveau des surfaces en contact, mais aussi au sein même des matériaux solides ou fluides qui se déplacent ou se déforment.

### Echauffement :

L'énergie mécanique perdue par frottement, transformée en chaleur, est généralement irrécupérable et parfois très difficile à évacuer. Les calories produites par le frottement d'un crayon sur une feuille de papier n'empêchent personne de dormir, mais il n'en est pas de même lors de la conception des freins d'un train à grande vitesse ou a fortiori d'un avion de ligne. Les aspects thermiques du frottement peuvent avoir des conséquences inattendues.

### Usure :

L'usure, multiforme, souvent paradoxale, ne peut être réduite à une simple perte de matière. Sous ce terme se cachent des phénomènes extraordinairement diversifiés, qui provoquent un ensemble de transformations géométriques et physicochimiques des couches superficielles soumises au frottement.

L'usure provoque des pertes économiques énormes mais elle n'est pas toujours nuisible. Les usinages par abrasion (affûtage, meulage, rectification, rodage pris dans ce sens) ne sont rien d'autre que de l'usure ; on cherche alors à enlever le maximum de matière avec un minimum d'énergie, tout en laissant sur les pièces des surfaces utilisables.

### Bruits et son musicaux :

Les vibrations dues au frottement sont un phénomène très banal. Les portes qui grincent, les freins de poids lourds qui hurlent dans la nuit, l'excitation de la chanterelle d'un violon par l'archet du Maître, en sont des exemples.

En 1829, Gustave-Gaspard Coriolis a indiqué que la production de vibrations est particulièrement forte quand le frottement produit peu d'usure, et inversement. Le bruit des pièces en frottement peut devenir très gênant lorsque l'on se trouve dans l'impossibilité d'y échapper.

### Réactions chimiques :

Les surfaces subissent de nombreuses transformations, y compris diverses sortes de corrosion amorcées ou favorisées par frottement. Il y a là de nombreux pièges dans lesquels ne manquent pas de tomber les novices et qui de toute manière donnent toujours du fil à retordre aux gens d'expérience.

Triboélectricité :

La triboélectricité (électricité dite statique) produit facilement des tensions très élevées, redoutables en raison des risques d'incendie, de destruction de composants électroniques ... Elle se produit avec les solides mais aussi avec des liquides coulant dans des conduites ou des gaz.

**II.10 Choix de matériaux :**

Le choix d'un matériau de frottement est un problème d'optimisation de l'équilibre entre des qualités souvent contradictoires :

- propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement, amortissement des vibrations et des chocs.
- propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion, mouillabilité par les lubrifiants, aptitude aux traitements, reprise d'humidité.
- propriétés anti-usure : facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et au grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion et à la cavitation, à la corrosion par les lubrifiants.
- propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, autoréparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident, comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support.
- propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités de lubrification, problèmes de pollution ou contamination.
- propriétés « socio-économiques » : coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, dépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques.

Il faut signaler que plusieurs matériaux dotés de propriétés tribologiques très intéressantes sont désormais interdits ou en passe de l'être, en raison de leur toxicité pour l'homme ou des risques qu'ils font courir à l'environnement. Parmi ces matériaux, on peut citer l'amiante, le cadmium, le plomb...et La chasse aux solutions de substitution est ouverte ...

Voici des indications sur l'usage, dans le domaine du frottement, de divers matériaux spécifiques ou non. La liste n'en est évidemment pas exhaustive. Un choix judicieux de matériaux de frottement doit tenir compte de facteurs très divers :

- la sécurité de fonctionnement, qui est primordiale,
- la durée de fonctionnement sans intervention,
- la facilité de remplacement des pièces d'usure et de réparation,
- le mode de graissage,
- l'ambiance,
- le coût de revient, compte tenu de l'achat, du montage, du rodage, de l'entretien, etc.[8]

## II.11 Frottement des matériaux :

### II.11.1 Frottement des métaux :

Les surfaces métalliques propres, placées dans le vide ou des atmosphères, présentent généralement une adhésion marquée. L'absence de contamination fait que des liaisons inter-faciales fortes s'établissent entre les surfaces, ce qui induit des facteurs de frottement élevés ( $\mu > 1$ ). Des microsoudures peuvent s'établir, conduisant au grippage épidermique qui, en se généralisant, peuvent amener la soudure complète des deux solides en contact (grippage généralisé). Bien que le frottement ne soit pas considéré comme une propriété intrinsèque des matériaux, leur structure cristalline et leurs propriétés font apparaître des différences dans leur comportement. C'est ainsi que le terme d'adhésion est fortement dépendant de la structure cristalline. En présence d'air, la plupart des métaux s'oxydent naturellement en formant des films de 1 à 10nm d'épaisseur. Ces films jouent un rôle déterminant dans le comportement tribologique, dans la mesure où les conditions de fonctionnement permettent leur maintien ou leur renouvellement. En effet le travail d'adhésion des oxydes est bien inférieur à celui des métaux, ce qui réduit le terme d'adhésion du facteur de frottement, limitant l'apparition des liaisons inter-faciales. En général, le frottement métal oxydé/ métal oxydé est inférieur à celui métal nu/métal nu. Les conditions de charge et de vitesse d'une part, les propriétés mécaniques et physico-chimiques des métaux et des oxydes d'autre part, régissent le comportement global.

Lorsque la température du contact augmente, on observe plusieurs effets :

-Les propriétés mécaniques des matériaux évoluent : ductilité et écrouissage par exemple pour les métaux à structure cubique à faces centrées, transition fragile/ductile pour les métaux à structure cubique centrée ; ces évolutions conduisent à des variations du coefficient de frottement.

-La précipitation de la réactivité physico-chimique des matériaux qui abaissent largement les facteurs de frottement.

### II.11.2 Frottement des polymères :

Les polymères sont utilisés dans un grand nombre d'applications, où la résistance à l'usure et à la corrosion, la légèreté, la facilité de mise en œuvre et de maintenance, le coût, sont les critères principaux qui orientent le choix. Proposés par les firmes spécialisées sous forme de poudre, paillettes, granules, bondes, ils peuvent être mis en forme par moulage, extrusion ou usinage, ce qui facilite la mise en œuvre de composant tribologique élémentaire : coussinets, engrenages, composant de roulement. De plus, il est relativement facile de leur associer des charges métalliques, minérales ou organiques, sous forme de poudre, fibres ou tissus, qui améliorent à la fois leurs propriétés mécaniques, thermiques ou

tribologiques : métaux conducteurs tels que le cuivre ou le bronze, fibres minérales de verre ou fibre de carbone, lubrifiant solide tels que le graphite ou le bisulfure de molybdène....

On retrouve en tribologie les deux grandes familles de polymères utilisées en génie mécanique:

- Les polymères thermoplastiques, dont la structure se caractérise par des chaînes linéaires dans lesquelles le motif de base se répète plusieurs milliers de fois.

L'arrangement des chaînes peut leur conférer une structure soit amorphe, soit semi-cristalline.

Ils sont mis en forme par fusion et moulage. Il n'y a pas de réaction chimique lors de l'opération, qui est réversible.

-Les polymères thermodurcissables, qui sont constitués par un réseau moléculaire bidimensionnel ou tridimensionnel. Une réaction chimique de réticulation se produit lors de l'opération de mise en forme.

### **II.11.3 Frottement des céramiques :**

Les céramiques techniques forment une classe de matériaux qui inclut une grande variété de composés réfractaires inorganiques, qui sont pour la plupart mis en œuvre par frittage ou compression isostatique à chaud. Il en résulte des matériaux qui combinent une masse volumique plus faible que celle des métaux avec d'excellentes propriétés mécaniques, notamment une grande dureté, une bonne résistance chimique, et, dans certaines situations, une plus grande résistance à l'usure que les métaux.

Le glissement à sec céramique/céramique se caractérise par un frottement relativement élevé.

Les valeurs de frottement dynamique classiquement mesurées dans l'air se situent entre 0,3 à 1.

Dans le vide ou en présence de gaz sec, on observe des valeurs situées entre 0,5 à 0,9, mais ces valeurs sont généralement plus faibles que celles observées pour les métaux dans les mêmes conditions, du fait de la moindre aptitude des céramiques à développer des liaisons adhésives.

### **II.12 Conclusion :**

Le frottement est un phénomène complexe et varié qui régit notre quotidien, mais malgré ça, une approche ou une explication finie reste indisponible.

Le contrôle du frottement soit en choix de matériaux ou autre permettra de réduire l'usure et la détérioration des mécanismes.

*CHAPITRE III :*  
*Usure*

### III.1 Introduction :

L'expérience montre que, pour faire glisser deux corps solides l'un sur l'autre, il faut exercer une force dans la direction du mouvement relatif dite force de frottement ; en outre, l'observation des corps après un mouvement relatif important révèle le plus souvent que leur volume a diminué dans la zone de contact : c'est le phénomène d'usure. Usure et frottement sont donc deux phénomènes étroitement liés, étudiés par la tribologie, mais leurs relations mutuelles sont loin d'être toutes comprises actuellement et dépendent fortement, et souvent de manière peu intuitive, des conditions de contact (pression, vitesse relative...), de l'environnement (température, humidité...) et des matériaux impliqués : ainsi le changement d'un des deux matériaux peut amener une baisse du frottement, mais une augmentation de l'usure. Ces deux phénomènes sont très importants sur le plan pratique.

L'usure ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, dans des rapports pouvant aller parfois de 1 à 100 000 ou plus, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies.

Elle est la conséquence directe et néfaste, économiquement parlant, de conditions très sévères de frottement, et c'est vraisemblablement pourquoi aujourd'hui c'est plutôt l'étude de l'usure que celle du frottement qui est entreprise en pratique pour déterminer la fiabilité mécanique et économique d'un système tribologique particulier

### III.2 Définition :

On définit l'usure comme une détérioration d'une chose suite à l'usage qu'on en fait. L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact.

Selon la plupart des glossaires et définitions appartenant à la littérature technique spécialisée, l'usure correspond à la « perte progressive de matière de la surface active d'un corps, par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface ».

Du point de vue du mécanicien, la notion d'usure est beaucoup moins restrictive car elle s'applique plus généralement à tout évènement conduisant à une perte de fonction des composants ou systèmes, ce point de vue corroborant d'ailleurs les définitions plus communes qui associent à l'usure la détérioration due à l'usage.[11]

### III.3 Les principales causes de l'usure :

Les causes possibles de l'usure sont extrêmement variés ; les différents types de phénomènes pouvant intervenir, séparément ou simultanément, appartiennent à deux groupes de facteurs :

— effets du contact: interactions mécaniques, chimiques, métallurgiques, entre les deux corps en présence.

— effets de l'environnement (atmosphère, lubrifiant...) :

- actions physicochimiques dues à la composition du milieu,
- actions mécaniques induites par la nature, la propreté de ce milieu (par exemple caractère abrasif d'une ambiance polluée).

La diversité des formes et causes possibles d'endommagement des surfaces explique l'étendue des moyens d'action à disposition, par exemple en termes de matériaux.

#### III.4 Les paramètres influents sur le taux d'usure:

- La force de contact.
- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression.
- L'aire de contact.
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxydes).
- Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté).
- L'absence ou la présence d'un lubrifiant.

#### III.5 Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces :

Sous l'effet des sollicitations tribologiques, une surface subit des modifications et endommagements dont les principales formes sont schématisées figure III.1 .

Les endommagements peuvent être décrits simplement en faisant appel à un nombre réduit de phénomènes élémentaires mécaniques, physiques ou chimiques :

- déformations plastiques, lorsque les contraintes créées par le contact glissant dépassent la limite d'élasticité ; ces déformations plastiques induisent des modifications de géométrie des surfaces frottantes ;
- fissurations, sous l'effet de contraintes dépassant la limite à la rupture, ou de phénomènes de fatigue ;
- transformations physicochimiques de surface : transformations structurales sans intervention de l'environnement ou réaction tribochimique entre les corps frottants et cet environnement ;
- adhésion entre les corps frottants, conduisant à la formation de transferts d'un des matériaux sur l'antagoniste.

Ces différents phénomènes élémentaires peuvent se produire simultanément ou successivement dans un contact donné. La description de la chronologie des événements correspond à celle d'un processus d'usure. [11]

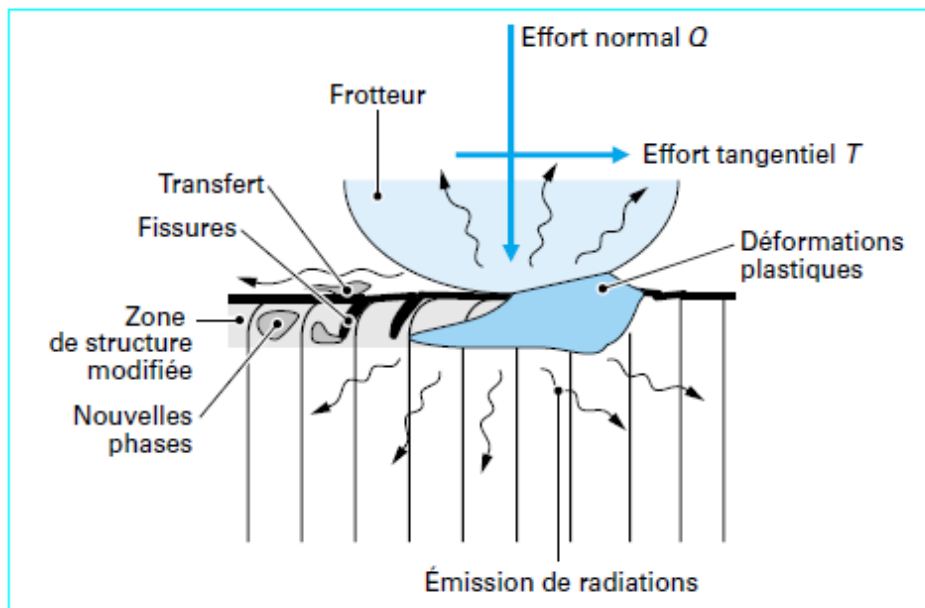


Figure III.1: Endommagements d'un corps frottant

### III.6 Phases de la vie d'un mécanisme :

Un mécanisme passe normalement par trois phases d'usure successives :

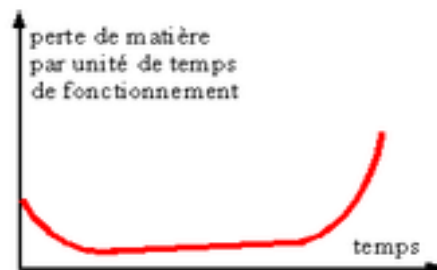


Figure III.2: Courbe de perte de matière durant le temps

- **Rodage :**

Les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

- **La vie utile :**

Correspond au régime d'usure douce : la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît.

- **La vieillesse :**

Elle se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage[12].

### III.7 Problématique de l'étude de l'usure :

La principale difficulté à surmonter dans l'analyse d'un problème tribologique réside dans la phase de hiérarchisation des paramètres qui doit conduire à la définition des facteurs prépondérants, pour la situation de frottement concernée. Cette démarche de travail, qui s'avère notamment indispensable lorsqu'une simulation expérimentale du problème est nécessaire, s'appuie en effet sur un raisonnement plutôt déductif, analogique, en prenant en compte des informations plus souvent qualitatives que quantitatives. Cette partie de l'analyse sera toujours facilitée en utilisant les acquis antérieurs et retours d'expérience, par exemple l'expertise des contacts après fonctionnement en contexte réel. Dans les cas les plus difficiles, il pourra être utile de faire appel aux experts dont le métier repose sur l'accumulation d'une certaine expérience dans la pratique de cette démarche.

L'étude des problèmes de frottement-usure en mécanique fait appel au concept de système tribologique dont les principales composantes sont les différents éléments en présence (propriétés et interactions) et les variables opératoires (solllicitations).

Les paramètres du contact, dont l'étude fait appel à des disciplines aussi diverses que la mécanique, la métallurgie, la physique du solide, la chimie, sont très nombreux et sont liés par un réseau de relations complexes. Aussi, les propriétés tribologiques, telles que les caractéristiques de frottement, la résistance à l'usure, ne peuvent s'exprimer par des critères et valeurs simples, ni se modéliser facilement, contrairement à certains domaines telles que la résistance des matériaux. La tribologie n'étant pas une science exacte, il s'ensuit également que :

- la résolution des problèmes de frottement-usure ne repose que sur des lois générales, souvent empiriques ;
- l'étude de ces problèmes, même au stade de l'approche industrielle (sélection, validation des solutions...), fait largement appel à l'expérimentation ;
- les résultats d'expérience sont difficilement extrapolables d'une situation à l'autre.[12]

### III.8 Types d'usure, d'après Kragelsky :

- **La déformation élastique** du matériau par les saillies du corps antagoniste a lieu si les contraintes ne dépassent pas la limite d'écoulement dans la zone de contact. L'usure n'est alors possible que par fatigue, le passage répété du corps frottant produisant des microfissures de traction perpendiculaires à la surface.

- **Un repoussage plastique** se produit si les contraintes de contact atteignent la limite d'écoulement et si le matériau contourne les saillies du corps antagoniste. L'usure résulte dans ce cas, après un petit nombre de cycles, de la fatigue provoquée par le contact frottant.
- **La micro-coupe** survient si les contraintes dans la zone de contact atteignent la limite de rupture ou si le contournement des saillies par le matériau déformé s'interrompt. La détérioration a lieu alors au début de l'interaction. La coupe est due aux aspérités, aux particules détachées et aux arêtes des cavités déjà formées.
- **La rupture par cisaillement** de l'interface de friction ne provoque pas de détériorations immédiates mais s'ajoute aux contraintes et aux déformations agissant au contact, favorisant les processus de fatigue.
- **La rupture par arrachement** a lieu quand la résistance de l'interface dépasse celle du matériau sous-jacent, ce qui peut conduire au grippage. Comme dans le troisième cas, l'usure intervient dès les premières étapes de l'interaction. L'adhésion des aspérités est favorisée par les déformations plastiques et le raclage des couches oxydées et contaminées.

### III.9 Formes d'usure :

À partir des phénomènes élémentaires qui viennent d'être évoqués, de nombreux processus d'usure ont été établis qui peuvent être classés de différentes façons.

#### III.9.1 Classification empirique :

Cette classification s'appuie sur un constat plutôt global du comportement du système frottant ; on définit alors :

##### III.9.1.1 L'usure douce ou ultra-douce :

Le système s'use peu, les surfaces des corps restent lisses et la taille des particules émises ne dépasse pas quelques micromètres.

##### III.9.1.2 L'usure sévère :

La durée de vie du système est faible, les surfaces des corps sont profondément modifiées et les particules d'usure sont d'une taille pouvant dépasser 100  $\mu\text{m}$ .

##### III.9.1.3 L'usure catastrophique :

La durée de vie est très réduite ; cette situation correspond le plus souvent à un grippage généralisé du système.

#### III.9.2 Classification technologique :

Cette seconde classification s'appuie sur l'état de dégradation du système et sur le faciès (morphologie) des pièces usées. On parle alors par exemple de :

##### III.9.2.1 Grippage et micro-grippage :

Dans le cas de blocage de mécanismes par soudure, de transfert d'un matériau sur l'autre. Il existe différents termes pour qualifier ce type de dégradation ; en dehors du cas où

l'avarie correspond au stade ultime du blocage, on parle de brunissage, scuffing (grippage), scoring, galling (écaillage) (cités approximativement dans l'ordre croissant de l'intensité ou de la sévérité des endommagements). C'est ainsi que l'on distingue par exemple le *scuffing* des chemises de moteur à explosion, du *scoring* et du *galling* des engrenages et des roulements à billes...

#### III.9 .2 .2 Écaillage :

Qui correspond à des pertes locales de matière sous forme d'écaillés. Cet endommagement est dû à un phénomène de fatigue du matériau, initié par les sollicitations répétitives exercées en cours de frottement, et conduisant à une propagation de fractures parallèles à la surface frottante ; cette forme de dégradation est typique des contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de choc, ou de glissement en régime lubrifié (cames, engrenages...).

#### III.9 .2 .3 Fretting-corrosion :

Type d'usure associé à des oscillations tangentielles de faible amplitude se produisant lors d'un contact *quasistatique* en présence d'un milieu corrosif, et se manifestant dans sa phase finale par la création de débris qui agissent alors comme abrasif. Cette usure peut être rencontrée sur des pièces soumises à vibrations, des assemblages frettés, des liaisons cannelées, etc.

#### III.9 .2.4 Polissage :

Qui correspond à une diminution importante de la rugosité initiale.

### III.9.3 Classification scientifique :

Cette dernière classification est basée sur la nature des phénomènes à l'origine des dégradations. Les cinq principaux types d'usure sont décrits ci-après, en distinguant ceux pouvant être initiés dans d'autres circonstances que le frottement proprement dit (usure par érosion, par cavitation).[11]

#### III.9.3 .1 Usures liées au frottement :

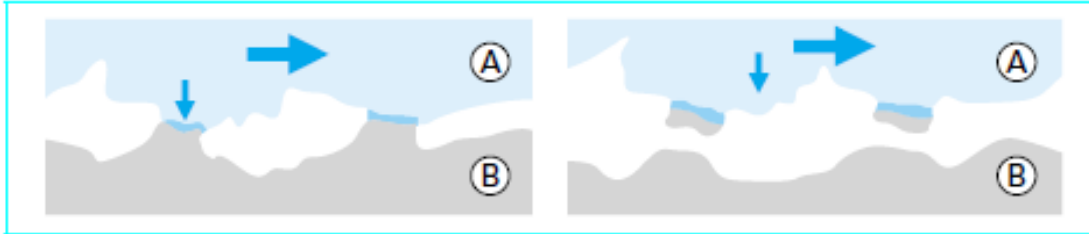
##### a. Usure adhésive :

Lorsque deux corps en contact sont en glissement, des jonctions élémentaires sont formées au niveau des points de contact sous l'effet du déplacement. À un instant donné, la charge appliquée est supportée par l'ensemble des jonctions existantes. Au niveau de chaque jonction, des phénomènes d'adhésion peuvent se produire créant ainsi une liaison adhésive. La résistance mécanique de chaque jonction est fonction de l'énergie localement dissipée ; à l'extrême, une soudure (grippage) peut être créée par fusion des surfaces frottantes.

Lorsque le mouvement se poursuit, la jonction est soumise à un cisaillement et deux situations peuvent alors exister :

— la jonction est peu résistante : les deux corps se séparent avec peu ou pas de modification.

— la jonction dispose d'une résistance mécanique supérieure à celle de l'un au moins des matériaux : il y a alors formation d'une fissure dans le corps le plus tendre, ou le moins tenace, puis arrachement et transfert sur l'antagoniste. Ce cas est représenté sur la figure III.3.



**Figure III.3: Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive : formation de transfert**

Le transfert initial peut ensuite évoluer et créer une dégradation plus importante par effet « boule de neige ».

Les particules d'usure sont dans ce cas de taille relativement importante et de nature composite (composées des deux corps en présence).

L'usure adhésive est favorisée entre autres par :

- L'accroissement de la pression de contact, de la vitesse (produit  $p \times v$ ).
- Le frottement à sec ou en lubrification aléatoire (frottement hors régime hydrodynamique).
- L'absence ou l'élimination des films superficiels constitués de couches adsorbées, d'oxydes.
- L'accumulation de matière devant les aspérités du frotteur qui augmente l'aire réelle du contact.
- L'échauffement.
- Les paramètres dépendant des matériaux sont principalement : la composition (nature métallique ou non), la structure, la dureté, la température de fusion, la nature des films superficiels, les propriétés de rétention des lubrifiants. [11]



**Figure III.4: Le roulement d'une turbine d'hélicoptère**



**Figure III.5: Grippage sur une dent d'engrenage**

## Prévention

Il faut choisir des couples de matériaux n'offrant aucune possibilité de filiation cristalline résistante. Les suivants sont couramment utilisables en atmosphère non oxydante (attention, l'argent et le cobalt sont compatibles mais pas leurs oxydes). [12]

### Couples de métaux compatibles

Acier	Argent, Antimoine
Chrome	Argent, Cadmium, Or
Molybdène	Argent, Cuivre, Or, Palladium
Tungstène	Argent, Cuivre
Argent	Cobalt, Rhénium

En fonction des circonstances, on peut essayer d'autres couples. Les données de l'ambiance (milieu chimique, lubrifiant, ...) sont ici très importantes.

### Couples de métaux à essayer

Acier	Cadmium, Étain, Plomb, Indium, Or, Thallium
Chrome	Étain, Plomb, Cuivre, Platine, Rhénium
Molybdène	Étain
Tungstène	Étain
Nickel	Plomb, Thallium
Titane	Argent
Aluminium	Cadmium, Indium, Thallium, Plomb
Cuivre	Thallium, Plomb

On peut métalliser les pièces, en se méfiant de la fragilisation par l'hydrogène lors des dépôts électrolytiques.

Deux métaux incompatibles peuvent devenir compatibles par l'action d'un troisième élément : ainsi la présence d'étain dans l'aluminium rend ce dernier compatible avec l'acier, au point que l'on fabrique des coussinets en alliage aluminium-étain. De même, l'acier sulfuré frotte correctement sur l'aluminium alors que le frottement acier-aluminium est catastrophique.

Pour les métaux ferreux, les structures martensitiques, perlitiques ou encore bainitiques conviennent mieux que les structures continues ferritiques ou austénitiques. Les traitements thermiques de durcissement sont favorables : trempe, cémentation, nitruration, carbonituration ...

La fonte secrète son propre manteau protecteur en graphite, mais doit être usinée correctement. Ainsi, la finition par pierrage des chemises de moteurs impose des choix difficiles : avec les outils au carbure de silicium, de minuscules arêtes tranchantes coupent le métal d'une façon très franche. Les lamelles de graphite affleurent, la qualité frottante est bonne, mais l'outil ne reste tranchant que grâce à l'usure qui amène à sa surface de nouvelles arêtes : il faut donc le re-profiler régulièrement.

Les outils diamantés ont une durée bien supérieure mais leurs arêtes plus ou moins émoussées refoulent le métal plus qu'elles ne le coupent : la pression chasse le graphite et forme une couche de métal écroui. Une telle surface dite « manteau de tôle » (en allemand Blechmantel), « peau en écailles de poisson » (en anglais fishscale skin), frotte mal, surtout quand le glissement prend les écailles « à rebrousse-poil ». Elle augmente la consommation d'huile, mais reste cependant tolérable si les segments sont métallisés au molybdène.

Deux surfaces à stries aléatoires perpendiculaires au sens de la marche ne peuvent frotter que par cisaillement, quelles que soient leurs structures cristallines, ce qui répartit l'usure et augmente les portées. Dans le cas contraire l'état de surface ne s'améliore pas, l'échauffement est concentré sur des zones étroites et le contact est prolongé, ce qui favorise le grippage. Les surfaces bombées, comme les dents d'engrenages, ne sont par contre jamais assez polies.

L'utilisation de métaux de duretés trop voisines augmente l'aire de contact et les risques de grippage. Une haute limite d'élasticité, une différence de dureté d'au moins 100 Hv et des structures différentes limitent l'adhésion. Le matériau le plus dur doit être le mieux poli pour ne pas limer l'autre mais aussi pour limiter la déformation des aspérités. Les matériaux monophasiques grossiers résistent moins bien que les polyphasiques à grains fins.

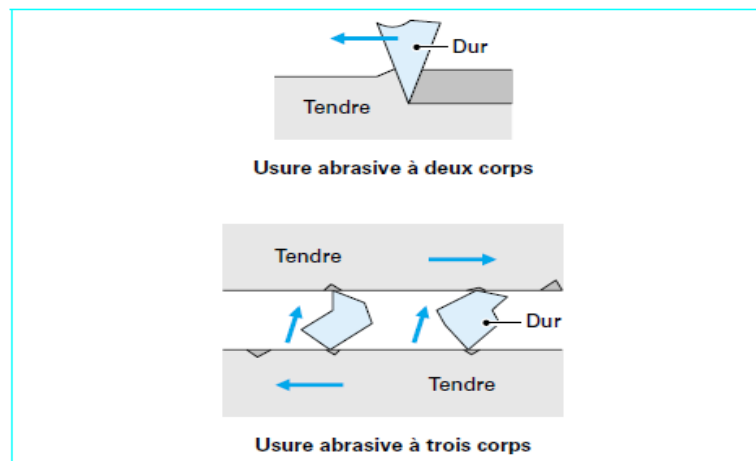
On peut faciliter le frottement par cisaillement entre les pièces avec des métaux mous déposés en faible épaisseur sur un support dur (coussinets minces), des sels métalliques apportés par traitement (sulfuration, phosphatation) ou des lubrifiants, surtout avec des additifs « extrême pression » formant in situ des sels organométalliques adhérents.

**b. Usure abrasive :**

L'usure abrasive correspond au cas où un corps dur déforme plastiquement, avec ou sans enlèvement de matière, un corps plus mou. On distingue:

- L'usure abrasive à deux corps : des sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement, par les aspérités du corps le plus dur.

- L'usure abrasive à trois corps : des particules dures présentes dans l'interface déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes.



**Figure III.6: Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive à deux et trois corps**

Suivant les cas, l'usure abrasive peut engendrer des endommagements par déformation plastique, des enlèvements de matière par phénomène de coupe et/ou par fatigue superficielle.

L'usure abrasive est favorisée :

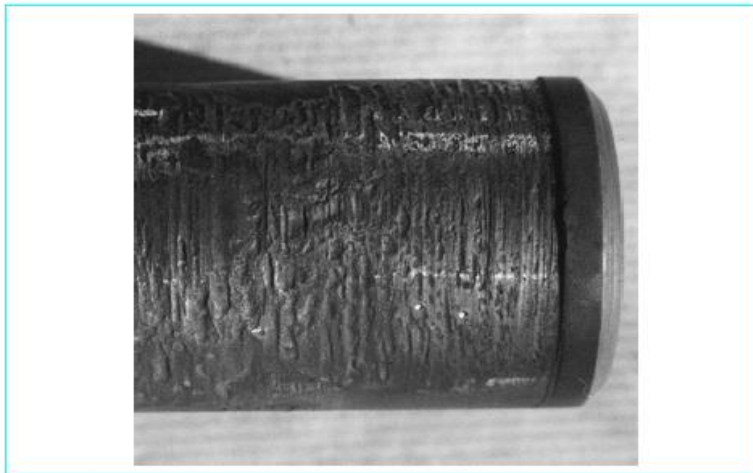
- Par l'accroissement de température.
- Par l'humidité, l'agressivité chimique de l'ambiance (lorsque l'abrasion agit par effet de coupe).

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, la nature et l'acuité des phénomènes dépendent des formes, granulométries des particules abrasives, de la vitesse relative et de l'angle d'attaque de l'abrasif sur le substrat.

L'usure abrasive mettant en jeu, au niveau élémentaire, des phénomènes d'ordre mécanique, les paramètres dépendant des matériaux sont notamment : la dureté ou la limite d'élasticité, les contraintes résiduelles, la ténacité, la structure (homogénéité, taux d'écroutissage...), les propriétés thermomécaniques dans le cas de sollicitations en température.

La dureté respective des corps en présence est un élément déterminant. Des règles simples de choix de matériaux ou de traitement de surface peuvent donc permettre d'optimiser un

usinage par abrasion ou une lutte contre l'usure abrasive d'un élément de mécanisme donné. [11]



**Figure III.7:Usure abrasive à trois corps : arbre en acier nitruré frottant sur coussinet en acier 100 Cr 6, en ambiance d'eau chargée de sable**

**Prévention :**

L'abrasion est une usure typique des systèmes télescopiques : tiges de vérins, broches de machines- outils, certains paliers ... Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses.

Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact et faire l'autre aussi « tendre » que possible pour qu'elle puisse « enliser » les particules abrasives. Un coussinet trop dur incrustant des corps étrangers use davantage l'arbre.

Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

L'usure des matériaux purs est à peu près inversement proportionnelle à leur dureté mais le rapport de proportionnalité varie avec leur structure. Généralement on diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante. Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs, l'écrouissage augmente la dureté et la résistance à l'usure.

Il y a 30 ans on n'utilisait que les fontes et les aciers spéciaux, avec le chrome comme élément d'alliage privilégié. Depuis, la palette s'est élargie à certaines matières plastiques et céramiques.

Pour les métaux ferreux on peut utiliser des structures martensitiques ou apporter un fort pourcentage de phases dures, carbures ou nitrures. On trouve, par ordre de résistance décroissante :

- fonte blanche traitée : nitruration, sulfinuz, ténifer,
- fonte blanche à haute teneur en chrome,

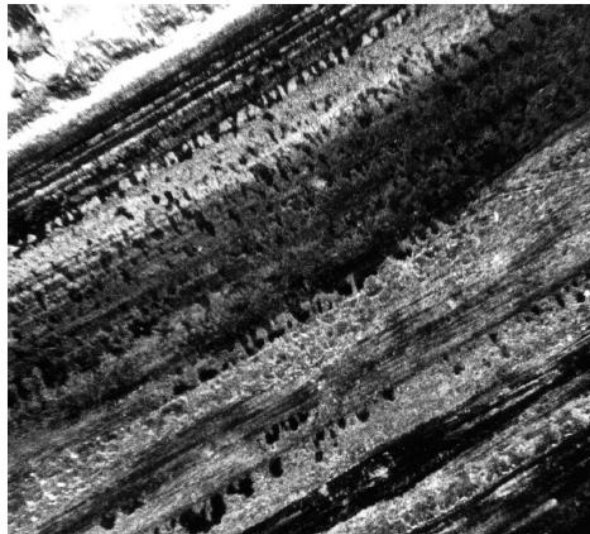
- aciers Hadfield ( aciers austénitiques formant une couche martensitique dure par écrouissage ),
- aciers martensitiques,
- aciers bainitiques.

Certains polymères résistent bien à l'abrasion, car ils absorbent beaucoup d'énergie avant de se fragmenter. Les revêtements durs sont souvent une solution. Cependant, si l'abrasif n'est pas trop dur, on peut parfois utiliser un matériau tendre protégé par des inclusions de matériau très dur[12].

### c. Usure corrosive ou tribochimique

Cette forme d'usure intervient lorsque le frottement se produit dans un environnement réactif (atmosphère, lubrifiant...) pour les matériaux en présence. Dans ce type de situation, l'usure peut être initiée ou accentuée par la réaction chimique entre l'environnement et les surfaces frottantes. Cette réaction, qui peut être créée ou activée par l'énergie dissipée en frottement dans l'interface, conduit à la formation d'une couche superficielle (film réactionnel) solide, non soluble dans l'environnement, de faible épaisseur, adhérente aux substrats, qui protège généralement les surfaces de l'usure adhésive.

L'usure se manifeste alors lorsque les sollicitations de frottement au contact conduisent à l'élimination des couches formées.



**Figure III.8: Usure corrosive sur portée de soupape moteur. Oxydation par les gaz chauds. (Grossissement 30)**

La cinétique du phénomène est gouvernée par la compétition entre la formation des produits de réaction et leur consommation par usure. La réactivité du milieu présente un optimum car elle doit être suffisamment élevée pour former rapidement un film tribochimique capable d'éliminer l'adhésion, mais pas trop forte pour ne pas consommer excessivement du corps frottant par réaction chimique.

Un contact fonctionnant dans des conditions sévères nécessitera donc l'emploi d'un milieu relativement très réactif pour éliminer l'usure adhésive ; c'est cette règle qui gouverne en partie le choix d'un lubrifiant pour lutter contre l'usure. [11]

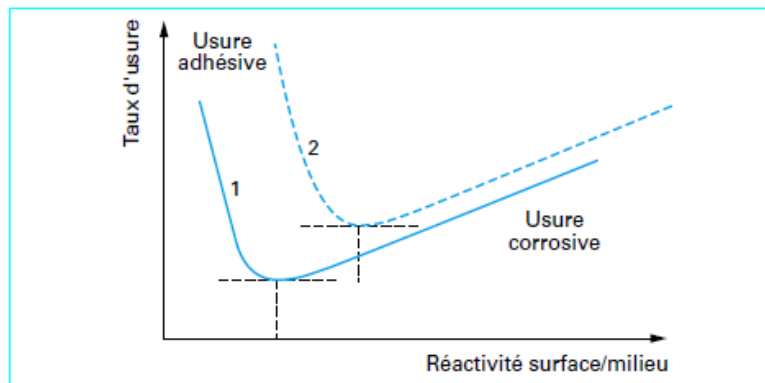


Figure III.9: Compétitivité entre usure adhésive et usure corrosive.

La courbe 2 correspond à des conditions plus sévères que la courbe 1

#### Prévention :

Il faut éviter l'adhésion par des matériaux compatibles et en plus lutter contre l'oxydation par des revêtements de métaux mous et nobles (cuivre, argent, or, nickel, molybdène) ou des traitements (sulfurisation, nitruration, pour l'aluminium grenailage et oxydation anodique). Pour les métaux ferreux on doit préférer les structures martensitiques. Parmi les solutions éprouvées on note le frottement fonte sur fonte (le graphite assurant une bonne protection), les revêtements de phosphate ou de lubrifiants solides du style Molykote, ou l'acier laminé à froid sur lui-même.

On utilise aussi des revêtements plastiques ou des matières plastiques inertes (P.T.F.E.) frottant sur des placages d'or ou un chromage dur.

L'introduction entre les surfaces d'un troisième corps approprié peut être une solution intéressante. La lubrification retarde seulement la corrosion de contact, en diminuant l'oxydation qui transforme les débris en abrasifs. Le bisulfure de molybdène dans la graisse graphitée peut donner de bons résultats, ainsi que d'autres lubrifiants solides, des poudres d'oxydes, etc.. Choisir des huiles fluides ou des graisses inoxydables avec des savons d'aluminium, en évitant les dopes.

On peut aussi chercher à diminuer les petits mouvements alternés de diverses manières : remplacement du glissement par le roulement ou par des liaisons élastiques, augmentation du jeu, tracé de pièces courtes et rigides, augmentation des pressions de contact et de l'adhérence (assemblages plus serrés), changement des fréquences propres pour éviter les résonances, dispositifs antivibratoires, immobilisation des pièces et des éléments de machines pendant le transport, etc.

Une rectification est plus mauvaise qu'un usinage classique mais paradoxalement, une super finition diminue le phénomène. [12]

#### d. Usure par fissuration

Les contraintes mécaniques générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures, selon des processus différents en fonction du type de matériau considéré.

— Dans le cas des matériaux ductiles (typiquement la plupart des matériaux métalliques), on parle d'usure par fatigue superficielle ou par délamination; on peut classiquement distinguer les phases d'initiation et de propagation de fissures en sous-couche (à une profondeur correspondant approximativement au point de cisaillement maximal de Hertz, qui conduit, à terme, à la formation d'écailles dans les zones de frottement Cet endommagement apparaît en général pour des nombres de cycles de sollicitations élevés.

— Pour les matériaux à comportement fragile (typiquement les céramiques), et pour lesquels on parle d'usure par fracturation, les fissures se produisent dans les zones les plus contraintes en tension. Elles ne sont pas associées à un phénomène de fatigue superficielle mais à un dépassement d'un seuil de rupture. Situées classiquement à l'arrière du contact, elles sont en forme de « fer à cheval » et se propagent perpendiculairement à la surface. Ce type d'usure peut se produire pour des nombres de cycles très faibles (phénomène à caractère *brutal* par opposition au phénomène *cumulatif* décrit précédemment).

L'usure par fissuration est bien évidemment favorisée par l'accroissement des contraintes mécaniques superficielles (contraintes normales et tangentielles) et, dans une moindre mesure, par la réactivité chimique de l'environnement, qui est susceptible d'agir sur les processus de propagation de fractures.

Les principaux paramètres dépendant des matériaux sont, outre les propriétés mécaniques macroscopiques (limite d'élasticité, résistance à la rupture, ténacité), la présence de défauts ou points faibles préexistants (homogénéité structurale, liaisons revêtement/substrat...), les contraintes résiduelles. [11]

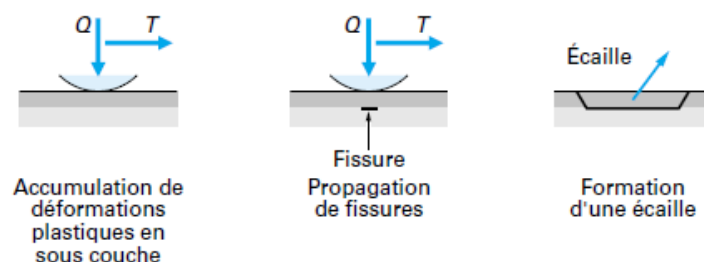


Figure III.10: Schéma du processus d'usure par fatigue superficielle

**e. Usure en fretting :**

Une situation d'usure en fretting correspond au contact de deux corps soumis à un déplacement relatif de faible amplitude, générant des débris et/ou des dégradations de surfaces à l'intérieur du contact par des processus mécaniques, adhésifs... Dans certains cas, des fissures orientées perpendiculairement à la surface de frottement peuvent apparaître à l'extérieur du contact, pour un nombre de cycles élevé aussi bien pour des matériaux ductiles que fragiles (phénomène de fatigue de surface). Si les débris d'usure générés dans l'interface ne peuvent pas être évacués rapidement à l'extérieur (contacts fermés cf. [BM 5 066]), ils peuvent créer des dysfonctionnements ou des dégradations particulières (difficulté de démontage des assemblages due au colmatage des interfaces, usure abrasive...). Dans le cas d'une atmosphère créant une corrosion des débris d'usure, on parle de *fretting-corrosion*.

L'usure par fretting se rencontre dans de nombreux systèmes mécaniques et assemblages en construction mécanique. L'influence du phénomène sur l'abaissement de la tenue à la fatigue (fretting fatigue) est particulièrement bien illustrée dans le cas des câbles où il peut être responsable de ruptures prématurées (câbles de ponts, de téléphériques, de renfort de pneus de poids lourds...) [11].



**Figure III.11: Exemple de fretting-corrosion. Douille d'assemblage en acier.**

**Prévention :**

Limiter le niveau des contraintes:

- Géométrie de contact appropriée limitant les concentrations de contraintes.
- Abaissement du facteur de frottement.
- Mise en œuvre de revêtements permettant d'accommoder les faibles débattements (Cu-Ni-In-Si).

–Réduire l'influence des contraintes :

- Mise en œuvre de matériaux ayant des propriétés mécaniques suffisantes ( $\sigma_d$ , E...).
- Introduction de contraintes résiduelles de compression par des traitements de surface thermiques ou mécaniques [12].

### III.9.3.2 Autres formes d'usure

#### a. Usure par érosion

L'usure par érosion résulte de l'enlèvement de matière par un fluide chargé de particules en contact avec la surface d'un matériau ; elle conduit à la création d'impacts et de rayures sur les surfaces.

Dans les applications mécaniques, ce type d'usure intervient notamment sur les systèmes soumis à un flux de produits liquides ou pâteux chargés d'abrasif, et circulant à vitesse élevée : pièces de robinetterie, de pompes par exemple[11].



**Figure III.12:** Érosion par un fluide chargé inoxydable usée par érosion  
Piston de pompe véhiculant un fluide à base d'alumine



**Figure III.13:** Virole d'acier

#### Prévention :

On peut traiter les surfaces ou les revêtir de métaux ou alliages durs mais le mieux est d'empêcher les impacts par tous les moyens possibles.

En érosion par impact comme en abrasion sous faibles contraintes, l'emploi de certaines matières plastiques ou élastomères est possible, par exemple des polyuréthanes spéciaux utilisés sous forme de revêtements. Un certain nombre de matériaux souples sont connus par leurs noms commerciaux : RILSAN<sup>®</sup>, PEBAX<sup>®</sup>, ABCITE<sup>®</sup>, HYPSTAR<sup>®</sup>.

Dans tous les autres cas c'est la dureté superficielle du matériau qui intervient : il faut opposer à l'abrasif une surface plus dure que lui et peu fragile[12].

### b. Usure par cavitation

L'usure par cavitation est un phénomène d'usure associé à une fatigue superficielle du matériau sous l'effet des ondes de choc dues à l'implosion de bulles de vapeur (variation de pression très forte).

Elle peut conduire à la formation d'écailles, de cavités dans des zones particulières de haute température ou de dépression, des trous, à peu près hémisphériques, apparaissent hors de la zone frottante ou à sa limite, puis l'ensemble de la surface est rongé. La destruction, souvent catastrophique, est très rapide et très bruyante. C'est la cavitation que l'on entend lorsque l'eau « chante » dans une bouilloire[11].



Figure III.14: impulseur de pompe centrifuge rongé par la cavitation.

#### Prévention :

La première chose à faire est d'améliorer le tracé des pièces pour éviter autant que possible les dépressions. Il faut ensuite diminuer les « germes » : filtrer les huiles, améliorer l'état des surfaces et leur intégrité cristalline.

D'après Hammit, un matériau supporte bien la cavitation si sa charge de rupture, sa limite d'élasticité, sa résilience et sa limite de fatigue sont élevées. Il doit de plus être ductile et à grain fin. La résistance dépend aussi de la capacité d'amortir les ondes de choc et nécessite une tenue minimale à la corrosion et à l'oxydation. Il y a de nombreuses exceptions.

Les meilleurs matériaux sont les stellites et certains polyuréthanes non chargés (polyuréthane prend deux « n », c'est un nom commercial). Comme pour l'érosion, on peut conseiller des matériaux souples connus par leurs noms commerciaux RILSAN<sup>®</sup>, PEBA<sup>®</sup>, ABCITE<sup>®</sup>, HYPASAR<sup>®</sup>.

On utilise aussi des rechargements au plasma avec des métaux résistants à la corrosion comme le molybdène ou les alliages à base de cobalt ou de nickel.

Les contraintes résiduelles de compression, les traitements de surface de type nitruration, sulfuration, sont favorables[12].

### c. Fatigue :

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

Une longue phase de vieillissement précède les accidents visibles. Une pièce peut être atteinte irrémédiablement tout en gardant jusqu'au dernier moment une apparence intacte. Il existe cependant un certain nombre de manifestations extérieures qui permettent, dans certains cas, un suivi des pièces en service.

Il y a en fait deux sortes d'avaries distinctes :

#### ✓ la fatigue superficielle par écaillage :

Elle est due aux contraintes maximales de traction ou de compression : le premier signe visible est une apparence brunie, un éclat lustré du métal et la disparition des marques d'usinage. L'incubation est assez courte, survenant même dans des contacts peu chargés, puis de petites piqûres se forment, alignées le long des aspérités initiales.

L'accident typique est le pitting, ou piquage, des engrenages : le point de cisaillement maximal étant situé à la surface, des fissures se développent perpendiculairement à la direction du glissement, prenant parfois la forme d'un V pointant dans la direction du mouvement. Elles ne sont véritablement dangereuses que si le métal est apte à les propager.

Des micro-écailles ou « pits », de quelques centièmes de mm dans la direction de la surface et en profondeur, sont émises. Les piqûres sont facilement reconnaissables à leur forme en éventail. La pointe est généralement tournée vers le pied des dents motrices et vers le sommet des dents menées, l'angle va de 60 à 120° et l'autre extrémité est toujours largement arrondie.

#### ✓ La fatigue profonde ou écaillage :

Après un long temps de vieillissement se produit une émission brutale de particules dont la surface atteint quelques mm<sup>2</sup>, la profondeur quelques dixièmes de mm, et dont la taille est sans rapport avec la structure du métal. L'usure s'étend par le bord des zones écaillées, découvrant progressivement les sous-couches dont l'aspect est poli.

Les aspérités recevant des pressions cycliques se dégradent par fatigue, même lorsqu'elles sont séparées par un lubrifiant. Les pièces bombées qui reçoivent des contraintes bien plus fortes que les pièces planes s'usent beaucoup plus.

L'endommagement créé par les déformations plastiques, en surface ou en profondeur selon les conditions, provoque des transformations métallurgiques (par exemple, il transforme la martensite en troostite plus fragile) et l'amorçage de fissures. Dans le cas du pitting, l'émission des microécailles est relativement rapide. Dans le cas de la fatigue profonde,

amorcée à partir du point de cisaillement maximal, les défauts étalés sous la surface font que cette dernière se comporte comme un véritable placage.

Lors du contact de deux corps bombés, en effet, le cisaillement est maximal à une certaine profondeur sous la surface. Dans les contacts roulants, cette zone de cisaillement profond se déplace sous la surface, créant un endommagement progressif à partir de défauts localisés ou de joints de grains. Dans un premier temps, rien ne paraît à la surface mais vient un moment où se créent des fissures normales à la surface. L'écaillage se produit alors par flambage brutal de la peau de la pièce. Les cavités ont des bords rugueux et un fond lisse qui témoigne du frottement des couches superficielles sur le substrat, avant qu'elles ne se détachent.

Les détériorations par écaillage concernent au premier chef les roulements et les engrenages. Elles dépendent de nombreux paramètres : vitesse de glissement, rugosités, nature et microstructure des matériaux, duretés, contraintes de Hertz, inclusions, lubrifiant et additifs. Parfois, les contraintes dues à la flexion ou à la torsion peuvent accélérer le processus [11].

### **Prévention**

Il faut avant tout diminuer les contraintes de contact par une géométrie appropriée, réduire le frottement en évitant absolument l'adhésion. On doit aussi utiliser des matériaux avec aussi peu de défauts que possible, comme les aciers dégazés ou refondus sous vide dont sont faits aujourd'hui les roulements. On choisira des traitements augmentant la dureté et engendrant des contraintes résiduelles de compression : nitruration, cémentation, trempe superficielle, par exemple. La profondeur traitée doit dépasser le point de plus fort cisaillement, sinon le remède peut être pire que le mal [12].

#### **d. Lubrifiants et fatigue de surface**

La viscosité intervient au niveau du coefficient de frottement et donc des contraintes, mais bien d'autres effets sont dus à la réactivité physicochimique avec les matériaux. Voici quelques résultats obtenus lors des deux phases successives d'amorçage et de propagation des fissures de fatigue, avec des additifs placés dans une huile minérale à tendance paraffinique.

- **Effet des additifs sur l'amorçage des fissures**
  - paraffine chlorée à 51 % de chlore : le meilleur effet est obtenu à 0,1 %, le pire vers 2 %.
  - phosphite de diphényle : meilleur effet bénéfique autour de 1,25 %, de plus en plus néfaste à partir de 2 %.
  - isobutylène soufré, polysulfure de ditertiododécyle : se comporte mieux que le précédent. Effet bénéfique à faible concentration, 0,1 %, effet néfaste maximum vers 0,25 %. Les produits chlorés ou phosphorés engendrent un phénomène proche de la corrosion à partir d'une certaine concentration, pour les produits soufrés il y a combinaison avec le matériau.
- **Effet des lubrifiants sur la propagation des fissures :**

La présence d'huile a un effet bénéfique sur la propagation des fissures en réduisant la variation des contraintes, mais elle peut aussi multiplier par 10 cette propagation à cause d'autres effets : ouverture des fissures par pression hydraulique, pollution par des produits

provoquant une corrosion, eau dissoute entraînant une fragilisation par l'hydrogène, etc. Globalement, le lubrifiant accélère la propagation des fissures de fatigue, les additifs ne semblent pas agir notablement sur ce phénomène.

#### e. Fatigue thermique

C'est une dégradation par alternance d'échauffements et de refroidissements, qui touche des pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge ... mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions.

La fissuration finale a un aspect caractéristique de mosaïque, dit de « faïençage ». Les fissures sont plus ou moins polygonales et suivent les joints de grains et s'enfoncent dans les matériaux perpendiculairement à la surface. Les contraintes par flash thermique font alterner très vite compressions et tractions. Les premières déforment plastiquement les surfaces, les secondes descendent les grains par cisaillement, surtout si les joints sont oxydés. Le faïençage peut exister avant ou après frottement. Les contraintes résiduelles de traction, ou les contraintes de traction provoquées par le frottement, facilitent la dégradation.

#### Prévention

Il faut utiliser des surfaces présentant un bon compromis entre la dureté et l'allongement à la rupture et introduire par traitement des contraintes de compression, à condition que ces dernières ne s'estompent pas dans le temps. La résistance à l'oxydation doit être bonne.

Naturellement, on diminue les risques de faïençage en diminuant les chocs thermiques par tous les moyens classiques [12].

### III.9.4 Mécanisme d'usure des polymères:

L'usure est plus complexe que pour les métaux en raison d'une plus grande sensibilité à la température et de la nature spécifique des matériaux, dont la structure cristalline dépend entre autres des appareils de moulage. Après 10<sup>6</sup> cycles les poids moléculaires des couches de surface diminuent jusqu'à 30 %, parfois la destruction du matériau forme une sorte de matière grasseuse. La structure semble d'abord se réorganiser lors du frottement, puis elle se détruit.

L'interaction avec les métaux mérite une attention particulière. La dissolution de ces derniers peut être sélective : ainsi, le laiton frottant contre le polyéthylène s'enrichit superficiellement en cuivre par suite de la dissolution du zinc. L'enlèvement du métal peut former de véritables excroissances sur le polymère, ce que l'on rencontre fréquemment dans les engrenages à contact mixte.

Si les produits de destruction du polymère sont des matières actives, le métal est fragilisé et l'usure s'accroît. Cet effet a été particulièrement étudié par le chercheur soviétique P.A.REHBINDER. Le coefficient de frottement dépend alors beaucoup du temps de maintien en contact et l'adhésion augmente lors des arrêts répétés.

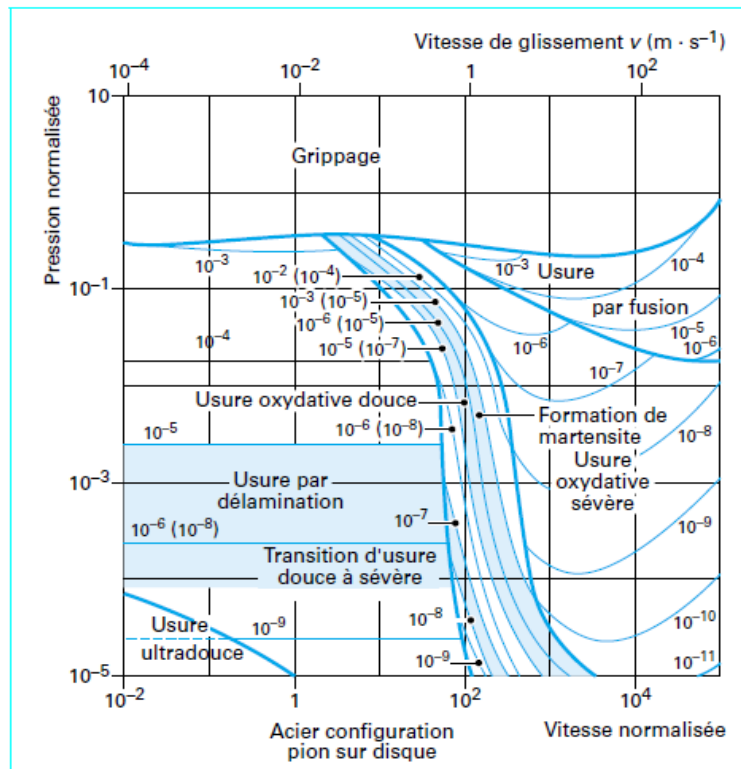


Figure III.15: Carte d'usure de Lim et Ashby montrant les domaines de phénomènes d'usure

### III.9.5 Étude et quantification de l'usure :

D'énormes progrès ont été réalisés dans les dernières décennies par les laboratoires de recherche en tribologie, grâce à la possibilité d'utiliser un matériel de saisie informatique de plus en plus performant.

C'est ainsi qu'il a été possible, en combinant les tribomètres classiques avec de puissants capteurs, de mieux appréhender les processus d'usure et de frottement.

Ces études de l'usure sont également d'un grand intérêt quant à la compréhension des durées de vie de différents mécanismes et ce, en prévision d'éventuelles avaries ou dans l'optique de tester de nouveaux matériaux.

#### III.9.5.1 Paramètres à prendre en compte

Les paramètres de l'usure, ou variables opératoires, sont nombreux et il apparaît nécessaire de bien les connaître pour une analyse précise d'un problème tribologique. Les principaux sont :

- les caractéristiques du mouvement relatif entre les corps composant le mécanisme : cinématique, vitesse, amplitude...
- la charge normale appliquée.
- le mode de contact (surfaccique ou ponctuel).
- l'environnement (atmosphère, température...).

### III.9.5.2 Lois d'usure :

Dans de nombreuses situations industrielles, les utilisateurs et les concepteurs désirent disposer de lois d'usure afin de prédire le comportement et la durée de vie d'un système. Cette question est très délicate car les lois permettant de décrire quantitativement l'usure sont très imprécises et peu fiables. Ces approches sont par ailleurs en général très fortement critiquées par les scientifiques qui peuvent mettre en avant de nombreux contre-exemples. Malgré cela, il est utile de disposer de certaines lois que l'ont sait être imprécises mais qui permettent néanmoins d'analyser des situations de façon très grossière.

Dans ce sens, ARCHAD a établi une loi d'usure en considérant comme paramètres tribologiques la charge appliquée au contact  $Q$ , la dureté  $H$  du corps auquel on s'intéresse et la distance parcourue  $D$ . Le volume usé  $U$  est donné par la relation :

$$U = k \frac{Q \cdot D}{H} \quad \text{avec } k \text{ coefficient d'usure.}$$

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

Sa valeur est aussi reliée à la nature de l'usure. À titre de référence, on peut considérer les valeurs indicatives de coefficient d'usure des figures

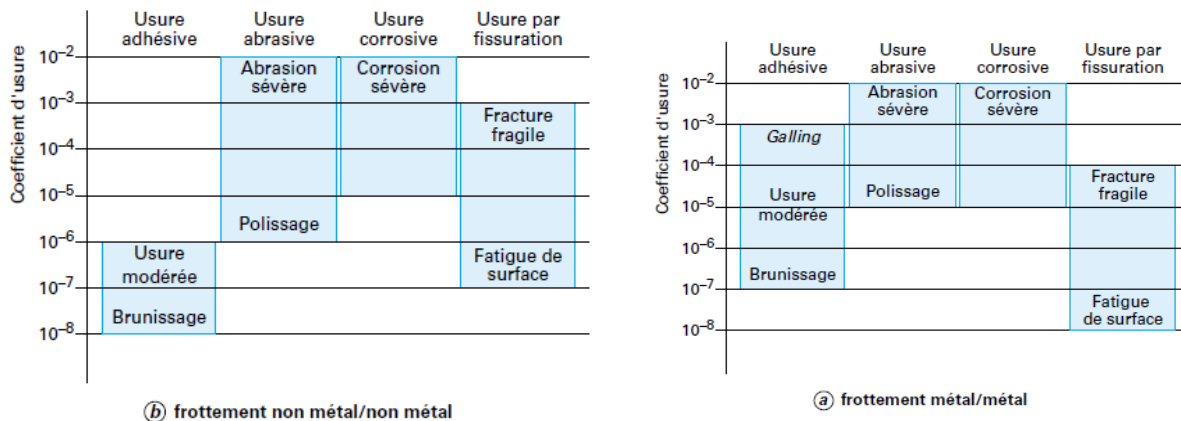


Figure III.16: Valeurs du coefficient d'usure

#### a. Méthodes d'étude :

- Analyse qualitative

Une analyse qualitative de l'usure repose principalement sur l'étude des surfaces usées et des particules d'usure.

On peut effectuer des observations morphologiques des surfaces et de leurs éventuelles dégradations grâce à des moyens d'observation classiques : binoculaire, microscope optique ou électronique.

Ces outils renseignent sur la morphologie de la surface frottante (texture, coloration...) et permettent dans certains cas d'en déduire le type d'usure correspondant.

L'étude morphologique des particules d'usure est en général plus délicate mais elle peut aussi apporter beaucoup d'informations. Les techniques employées sont la microscopie optique, électronique à balayage ou à transmission.

L'observation des surfaces et des particules peut aussi être associée à des analyses chimiques grâce aux techniques d'analyse de surface.

Le tableau montre les relations qui existent en général entre le type d'usure et les caractéristiques des surfaces usées et des particules d'usure.

Type d'usure	Surface usée	Particules d'usure
Adhésive	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transferts, en général du corps le plus tendre sur le matériau le plus dur</li> <li>- Déformations plastiques</li> <li>- Transformations métallurgiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taille relativement importante (<math>\geq 10 \mu\text{m}</math>)</li> <li>- Agglomérats <i>composites</i> (constituants des deux corps)</li> </ul>
Abrasive à deux corps	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surface d'aspect texturé</li> <li>- Rayures parallèles à la direction du déplacement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microcopeaux</li> </ul>
Abrasive à trois corps	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surface d'aspect aléatoire</li> <li>- Indentations</li> <li>- Déformations plastiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Écailles</li> <li>- Métal fortement déformé plastiquement (écrouissage)</li> </ul>
Corrosive	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Films de surface colorés</li> <li>- Aspect non uniforme (îlots)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lames minces de produit de réaction chimique</li> </ul>
Délamination-fatigue (matériaux ductiles)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fractures parallèles à la surface</li> <li>- Piqûres, écaillages</li> <li>- Déformations plastiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Particules en feuilles ou écailles</li> <li>- Écrouissage</li> </ul>
Fracturation (matériaux fragiles)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fractures en « fer à cheval » perpendiculaires à la surface de frottement</li> <li>- Faciès de fracture fragile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grosses particules</li> <li>- Particules anguleuses, d'aspect fracturé</li> </ul>
Fretting	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trace d'usure localisée</li> <li>- Fractures de profondeur variable, s'initiant en surface</li> <li>- Coloration (fretting-corrosion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agglomérats en périphérie de la zone de contact</li> <li>- Oxydation (fretting-corrosion)</li> </ul>
Erosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aspect aléatoire</li> <li>- Traces d'impacts, rayures, sillons</li> <li>- Déformations plastiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microcopeaux</li> </ul>
Cavitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cavités</li> <li>- Défauts dans des zones de dépression</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microécailles</li> </ul>

- **Analyse quantitative :**

- **Perte de masse :**

Cette méthode consiste à faire fonctionner un mécanisme pendant un temps connu puis à extraire la pièce à étudier et à la peser afin de déterminer sa perte de masse. La précision de la mesure effectuée peut être de l'ordre du dixième de milligramme pour des pièces d'une masse inférieure à 200 g. Néanmoins, cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- elle n'est pas valable pour de lourdes pièces.
- elle nécessite un nettoyage poussé et reproductible car on pèse en même temps les oxydes et les poussières se trouvant sur la pièce ou dans ses porosités.
- elle ne permet pas de quantifier l'usure qui ne correspond pas à une perte de masse.

- **Perte de cote :**

Cette méthode est employée dans le cas des usures entraînant un changement de géométrie qui peut être quantifié par une mesure dimensionnelle.

- **Approche énergétique**
  - **Perte de matière**

On peut aborder les phénomènes tribologiques sous un aspect énergétique en considérant que le frottement est un processus dissipatif.

L'énergie dissipée en frottement est alors utilisée par différents processus qui peuvent pour certains conduire à de l'usure. Le schéma figure illustre les différentes façons de considérer cette énergie dissipée.

Pour quantifier l'usure, on peut représenter l'évolution du volume usé ( $U$ ) en fonction de différents paramètres et en particulier du travail de l'effort normal  $Q$  ainsi que le propose la loi d'Archard. On détermine alors un coefficient d'usure  $K_u$  tel que :

$$K_u = \frac{U}{(D \cdot Q)} \quad \text{avec } D \text{ distance parcourue.}$$

Cette formulation n'intègre pas le coefficient de frottement ; or il est courant de constater que l'usure est d'autant plus importante que ce facteur est élevé.

Par ailleurs, l'effort normal est par définition appliqué perpendiculairement à la direction de glissement et par conséquent son travail est nul. Aussi, il apparaît plus judicieux de remplacer l'effort normal  $Q$  par l'effort tangentiel  $T$ . On détermine alors un coefficient d'usure tel que :

$$\alpha_u = \frac{U}{(D \cdot T)}$$

Cette relation appliquée aux sollicitations de frottement est équivalente à :  $E_d$

$$\alpha_u = \frac{U}{\sum E_d} \quad \text{avec } \sum E_d \text{ énergie totale dissipée durant l'essai.}$$

On compare le volume dégradé à la quantité d'énergie associée au travail de l'effort tangentiel qui est dissipé durant l'essai de frottement.

Des travaux réalisés par S. Fouvry et H. Morhbacker confirment expérimentalement une relation linéaire entre ces deux grandeurs. Ainsi, le paramètre  $\alpha_u$  est défini comme un coefficient énergétique d'usure exprimé en  $\text{m}^3$  de matière usée (ou moles de matière) par Joule dissipé dans le contact. On note que si le coefficient de frottement reste constant, alors cette approche est équivalente à celle d'Archard.

Cette approche peut permettre une comparaison de différentes combinaisons de matériaux du point de vue de l'usure de façon indépendante de la valeur du coefficient de frottement. Le comportement en usure d'un matériau est alors caractérisé par son coefficient  $\alpha_u$ . La figure montre un exemple de résultats pouvant être obtenus de cette façon.

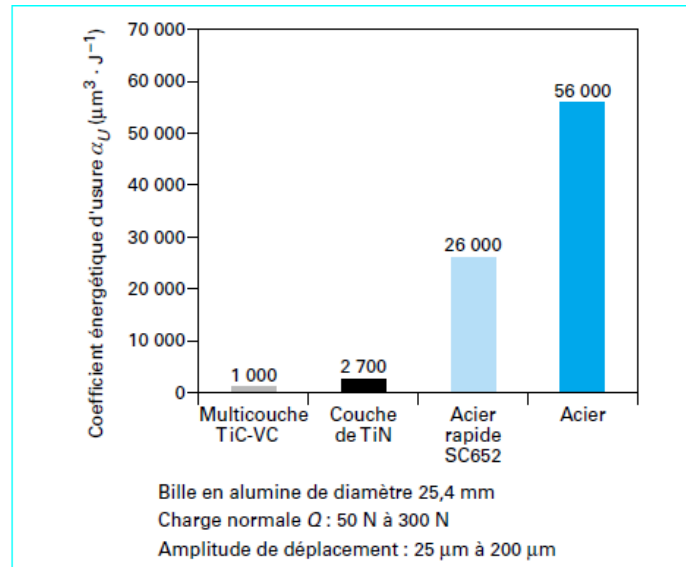


Figure III.17: Exemple de comparaison du comportement en usure de différents matériaux lors d'un essai de fretting

### III.10 Données et paramètres tribologiques:

#### III.10.1 Taux d'usure:

La norme DIN EN 50324 définit le taux d'usure comme «le volume perdu divisé par la charge normale et la distance »

Le taux d'usure  $k$  (ou rapport de proportionnalité) est dérivé de la loi d'Archard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume  $V$  est proportionnelle à la charge normale  $F_N$  et à la distance de glissement  $L$  parcourue.

$$V = K \cdot F_N \cdot L$$

Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de perte de matière après le rodage initial et avant l'apparition d'un mécanisme secondaire comme par exemple la fatigue, qui dépend fortement de la topographie des pièces usinées. Les différentes écoles tribologiques soulignent toujours que la notion de taux d'usure pose divers problèmes et doit être précisée pour chaque mécanisme d'usure. Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation. Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribo-système.

En ce qui concerne la quantification de l'usure, il faut bien admettre que l'application de lois ou de modèles d'usure à l'usage général est très limitée, en général par manque de connaissance des propriétés des matériaux et de leur évolution avec la température ; mais la modélisation de l'usure ou la prévision d'un taux d'usure sont des sciences qui débutent. Quoi qu'il en soit, pour une application industrielle, l'usure et le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques ; la connaissance de

la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important.

Il n'y a aucun doute, que tous les tribo-systèmes, que ce soit dans une application industrielle ou une machine d'essai, possèdent un taux d'usure, qui est défini par le couple de matériaux, la configuration du système et la sollicitation et qu'on peut le déterminer en fin de vie. Le taux d'usure est la « Réponse » du tribo-système à une sollicitation. Le taux d'usure volumétrique  $K_V$  s'exprime le plus souvent en  $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$  et se calcule à partir du volume d'usure ou de la perte de volume (ou de masse), de la charge normale et de la distance de glissement parcourue. Ces trois valeurs sont parfois difficiles à déterminer ou simplement à connaître.

### III.10.2 Valeur du produit $P \times V$ :

La pression de contact et la vitesse de glissement sont les deux paramètres clés de la sollicitation des matériaux dans un tribo-système. Elles interviennent de diverses manières, et d'abord de manière globale.

- En effet, les valeurs du produit  $p_v$  sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur  $p_v$  en  $\text{Mpa}\cdot\text{m/s}$  (pour les anglo-saxons en  $\text{psi}\cdot\text{ft}/\text{min}$ ) est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribo-système/contact.
- La valeur  $P.V$  multipliée par le coefficient de frottement :  $P.V. (\text{W}/\text{mm}^2)$ , détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact  $A$  (Friction Power Intensity) ; cette énergie est évacuée principalement par conduction thermique, uniformément dans les deux corps, une faible partie étant véhiculée par le lubrifiant. Elle correspond à la puissance thermique générée par frottement et la température de volume des pièces en est une fonction croissante. L'effet de la pression et de la vitesse ne dépend pas que de la valeur de leur produit : quand l'une de ces grandeurs dépasse une valeur limite, il peut y avoir transition d'un mode d'usure douce ( $k$  faible) à un mode d'usure sévère ( $k$  élevé) (figure), car les matériaux ou le lubrifiant ne peuvent plus supporter les sollicitations thermiques ou mécaniques et « répondent » par un changement de mécanisme d'usure qui peut aller jusqu'au grippage.

Les domaines d'usure (douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans

le plan  $(p,v)$  (voir figure) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit  $PV$  à prendre en considération :

- Les matériaux présentés dans la figure possèdent tous un domaine de faible taux d'usure, mais pour des valeurs de  $p$  et  $v$  sensiblement différentes ;
- En dehors de ce domaine, le taux d'usure dépend fortement de la valeur du produit  $p_v$  et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine.

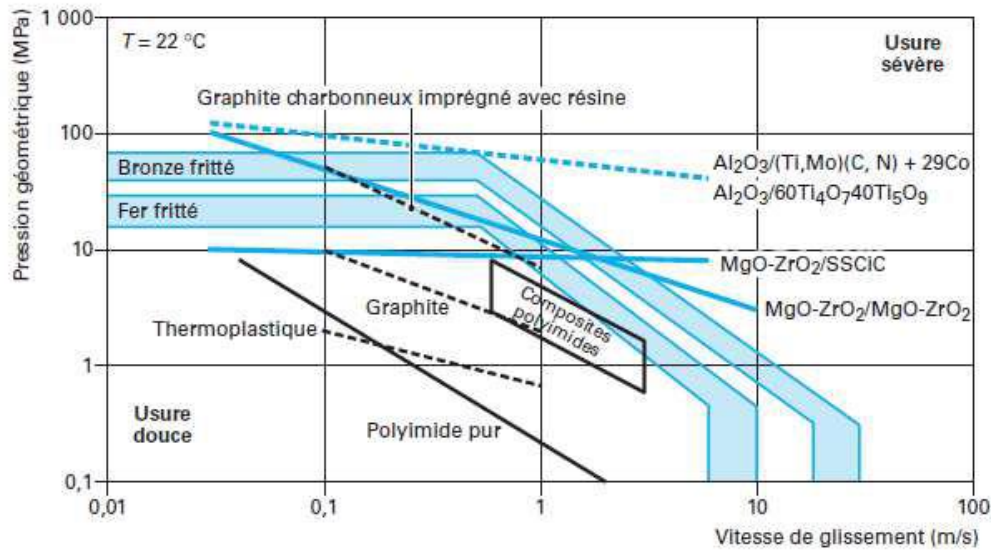


Figure III.18: Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés)

### III.10.3 Densité d'énergie de frottement:

Le modèle initialement développé par Fleischer utilise des formules simples. La perte énergétique  $E_f$  due au frottement s'écrit :

$$E_f = \mu \cdot F_N \cdot L$$

Avec  $\mu$  coefficient de frottement de Coulomb Le produit  $\mu \cdot F_N$  représente la force de frottement. La grande similitude entre l'expression de l'usure et cette formule (expression de l'énergie de frottement) est évidente ; elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre  $ef^*$  de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :

$$ef^* = \frac{E_f}{V} = \frac{\mu}{K_v}$$

La densité d'énergie de frottement apparente  $ef^*$  correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribo-système. [12]

### III.11 Conclusion :

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible, omniprésent et dépendant de plusieurs paramètres ; et les modèles et les efforts fournis tentent de réduire ce phénomène néfaste afin de préserver les différentes conceptions.

***CHAPITRE IV:***  
*Partie expérimentale*

## IV.1 Introduction :

L'objectif de notre étude est la contribution à l'étude de l'influence de la vitesse et de l'effort normale sur les propriétés tribologiques du polytétrafluoréthylène (PTFE).

Dans cette partie nous présentons les moyens expérimentaux et les matériaux utilisés et exposons les résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

## IV.2 Dispositif expérimental :

### IV.2.1 Description du dispositif :

Le dispositif utilisé est un tribomètre pion-disque vertical. Il permet d'étudier le frottement et l'usure des couples de matériaux. Son principe consiste à appliquer une charge verticale sur un pion immobile (9) en contact avec la face plane d'un disque en rotation (8). Lors de l'essai de frottement un capteur à jauges de contrainte (7) enregistre les valeurs de l'effort tangentiel et de l'effort normal grâce aux déformations des jauges. Ce tribomètre permet la variation de la vitesse linéaire en changeant le rayon de la piste de glissement du pion (9) sur le disque (8) grâce à la liaison glissière (14) d'une plaque coulissante (2) avec le bâti (1) et il sera muni d'un variateur de vitesse électronique pour pouvoir atteindre plusieurs paliers de vitesse. Le dispositif est muni d'un système de compensation avec des masses mortes (11) qui assure la mise à zéro du système de mesure en tenant compte du poids du mécanisme de chargement. Il dispose d'un moteur électrique (15) d'une puissance de 220W tournant à 1400 tr/min qui entraîne la broche porte disque.

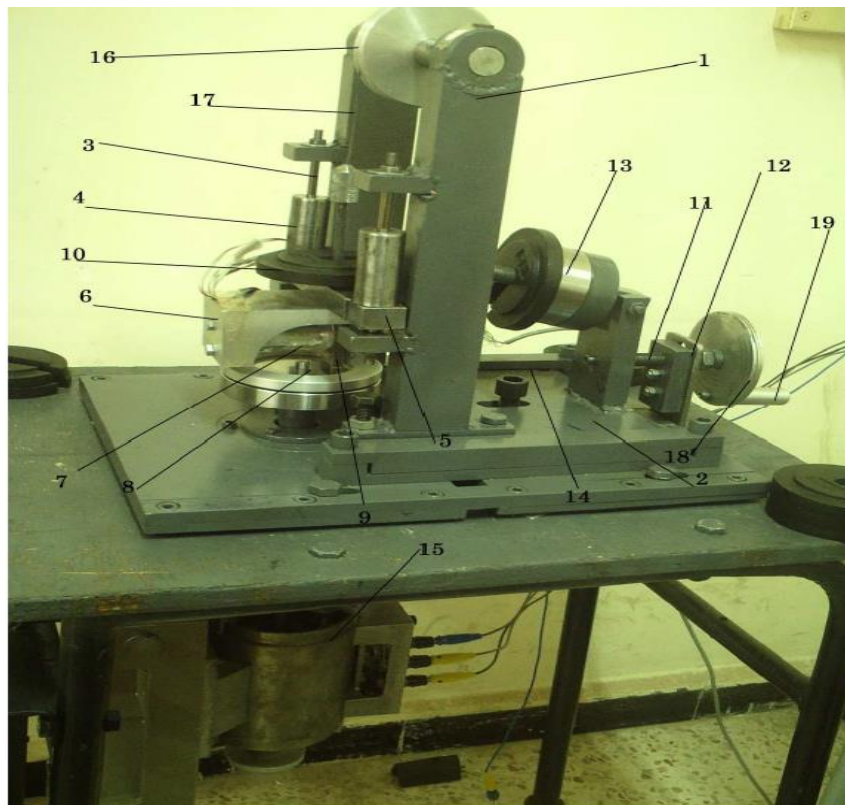


Figure IV.1 : Vue du tribomètre

#### IV.2.2 Nomenclature du banc:

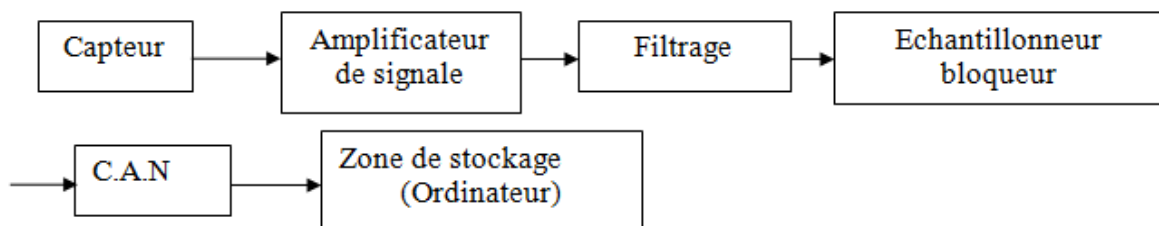
1-Bâti, 2- Plaque coulissante, 3- axes, 4- bague de guidage, 5- Poutre, 6- Porte capteur, 7- Capteur de force, 8- Disque, 9- Pion, 10- Charge, 11- vis de manœuvre, 12- Plaque, 13- masse morte, 14- liaison glissière, 15- moteur électrique, 16- poulie, 17- Câbles, 18- volant, 19- Poignée.

#### IV.3 Système d'acquisition :

Le système d'acquisition est le système d'enregistrement et de traitement du signal depuis sa sortie du capteur de force jusqu'à sa représentation sur un ordinateur



Figure IV.2 : Système d'acquisition.



La chaîne d'acquisition utilisée, de fabrication « vischay micromesure », est constituée de dix entrées analogiques et dix sorties. Le conditionnement de nos capteurs permet la mise à zéro, l'équilibrage des ponts, l'amplification et le gain de signal d'entrée.



Figure IV.3 Chaîne d'acquisition « vischay micromesure »

Elle contient deux faces :

- a) La face avant nous renseigne sur les différentes manipulations que peut offrir la chaîne.
- b) La face arrière nous montre le positionnement des connecteurs de j'auges- capteurs

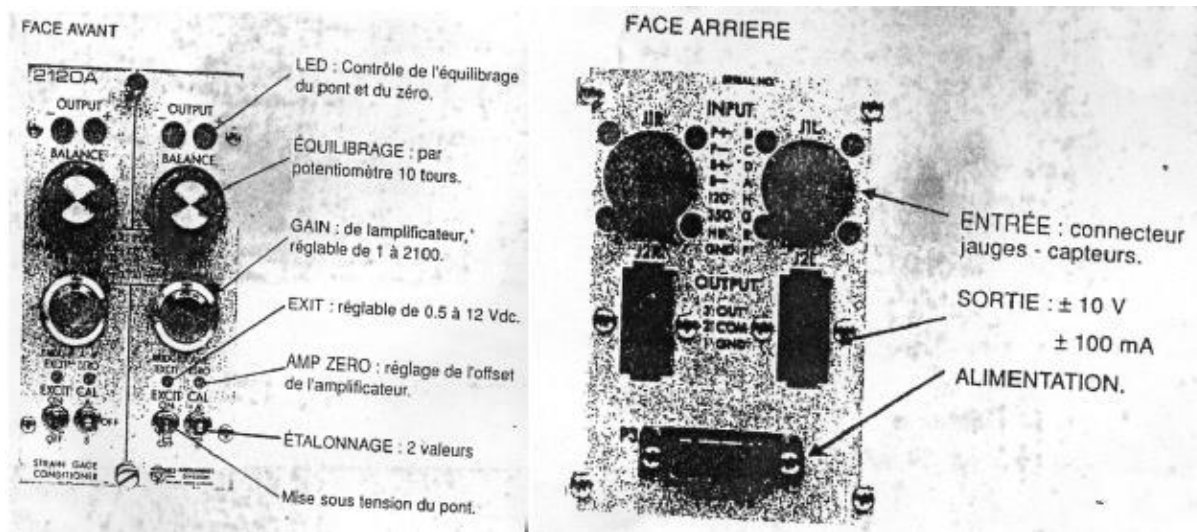


Figure IV.4 Face avant et arrière de la chaîne d'acquisition : a) Face avant, b) Face arrière

#### IV .4 Convertisseur analogique-numérique :

Un convertisseur analogique – numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique. Les convertisseurs se présentent généralement sous forme de carte. Il existe plusieurs sortes de convertisseurs de différentes marques. Celui qu'on a utilisé pour traiter et analyser nos résultats est la carte « ARDOUINO uno »

L'Arduino est une famille de cartes électroniques à microcontrôleur open-source née en Italie en 2005. C'est un circuit imprimé comportant tous les composants électroniques nécessaires pour faire fonctionner un microcontrôleur, il est associé à une interface USB lui permettant de communiquer avec un ordinateur.

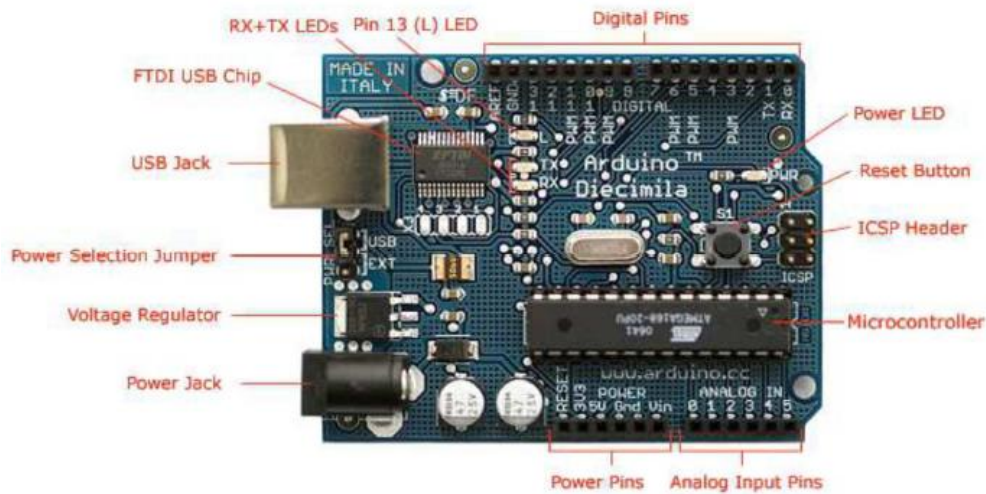


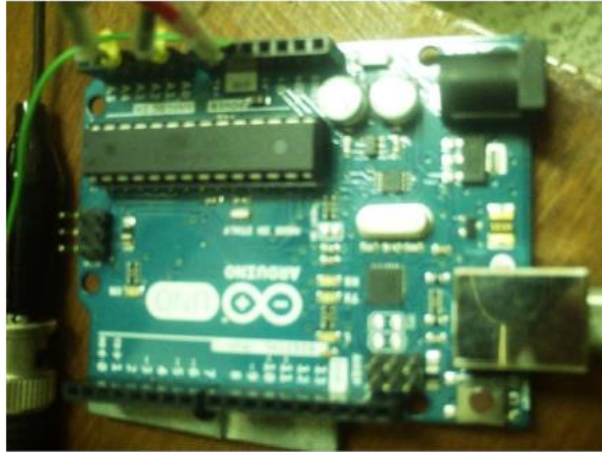
Figure IV.5 : La carte ARDOUINO

Un microcontrôleur est l'équivalent d'un petit ordinateur. Il contient un microprocesseur (unité centrale) associé à différentes mémoires et des interfaces lui permettant de communiquer avec l'extérieur, et bien sûr une horloge pour cadencer l'ensemble.

L'alimentation électrique peut être fournie par le port USB ou une alimentation externe qui délivre **5V**.

Arduino peut être utilisée pour construire des objets interactifs indépendants (prototypage rapide), ou peut être connecté à un ordinateur pour communiquer et superviser en utilisant des logiciels de programmation (flash, labview, etc).

La carte "ARDUINO uno" que nous avons utilisée assure une liaison entre la chaîne d'acquisition et l'ordinateur pour acquérir les données des essais tribologiques. Elle dispose de 14 broches ("pin" en anglais, numérotées de 0 à 13) qui peuvent être configurées en "entrées digitales" ou en "sorties digitales" susceptibles de délivrer une intensité maximale de 40mA sous une tension égale à 0V ou 5V. Elle possède également 6 entrées analogiques (notées A0 à A5) permettant de mesurer des tensions comprises entre 0V et 5V grâce à un convertisseur A/N à 10 bits.



**Figure IV.6 : Représentation de la carte « Arduino uno »**

#### **IV.5 Le capteur de force:**

Un capteur de force (ou d'effort) est un dispositif utilisé pour convertir une force (par exemple un poids) appliquée sur un objet en un signal électrique. Le capteur est généralement construit en utilisant des jauges de déformation connectées en un pont approprié. Un amplificateur est nécessaire pour lire le signal délivré par le transducteur.

##### **IV.5.1 Les jauges de contraintes :**

Les jauges d'extensométrie (ou jauge de contrainte) sont les capteurs résistifs les plus employés lorsqu'il s'agit de déterminer les faibles déformations d'une structure soumise à des contraintes mécaniques. Autrement dit les jauges de contraintes sont des fils électriques dont la résistance varie avec les déformations subies. Une des difficultés de l'utilisation des jauges d'extensométrie réside dans leur sensibilité à la température. En effet, cette grandeur d'influence peut engendrer sur une jauge, des variations de résistance de la jauge du même ordre de grandeur que celles engendrées par les déformations à mesurer.

Aussi, la correction des effets de la température est un des points clés de la qualité des mesures par jauges d'extensométrie.

La résistance électrique d'une jauge cylindrique est donnée par :

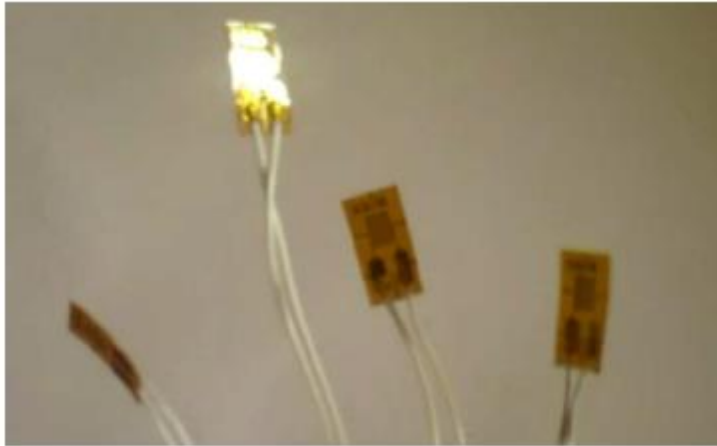
$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi}$$

Avec :

- $\rho$ : résistivité du conducteur
- $l$  : sa longueur
- $A$  : l'aire de sa section
- $D$  : le diamètre de la section.

Donc après déformation de la jauge, on obtient :

$$R_0 + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) \frac{4(1+\Delta l)}{\pi (D + \Delta D)^2}$$



**Figure IV.7 : Les jauges de contraintes**

#### **IV.5.1.1 La mise en place des jauges de contraintes:**

Pour le collage des jauges sur le corps d'épreuve (capteur) on a eu besoin de quelques instruments et de beaucoup de minutie pour ne pas rater l'adhésion et détruire les jauges.

Les instruments utilisés :

- Liquide nettoyeur pour nettoyer la piste de collage.
- Matière gluante (colle) pour faire adhérer la jauge sur corps d'épreuve.
- Ruban adhésif (scotch) pour protection la jauge.
- Des fiches pour tester le fonctionnement des jauges.

#### **IV.5.1.2 Les capteurs de force basés sur les jauges de contrainte:**

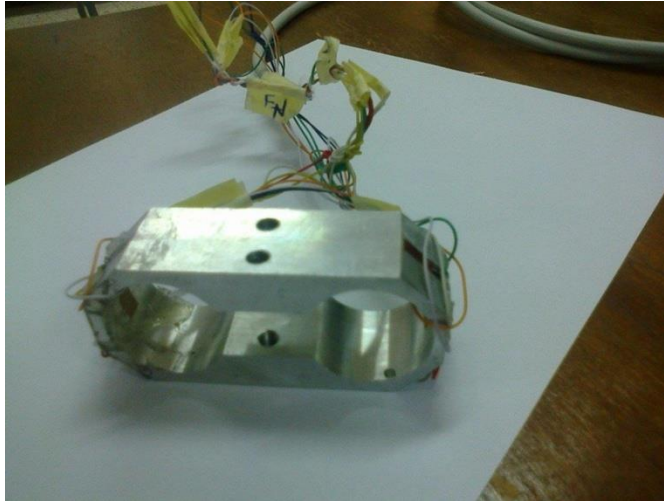
Les capteurs de force équipés de jauges de contrainte sont construits sur le principe d'un corps d'épreuve travaillant comme un ressort sur lequel les forces à mesurer sont appliquées.

L'élément sensible se déforme et la contrainte se produit en surface. La déformation du corps d'épreuve suite à l'application de l'effort normal est captée par les jauges de contrainte. Le signal électrique correspondant à la déformation du corps d'épreuve est recueilli sur la chaîne d'acquisition.

De nombreuses propriétés des capteurs de force sont définies par le choix du matériau et de la conception du corps d'épreuve.

L'élément sensible du capteur est la jauge de contrainte (SG), qui se compose d'une grille de mesure disposée sur un support et recouverte d'une couche protectrice. Ces jauges de contrainte sont collées sur le corps d'épreuve aux endroits appropriés.

Les jauges sont reliées dans un montage dit «pont de Wheatstone». Un pont de Wheatstone doit être alimenté par une tension d'alimentation.



**Figure IV.8 : Le corps d'épreuve (capteur)**

#### **IV.5.1.3 Etalonnage du capteur de force:**

##### **a. Etalonnage de la mesure de l'effort normal:**

Le capteur est fixé de sorte à pouvoir appliquer des efforts normaux et tangentiels variables.

Les résultats de la mesure des efforts normaux sont donnés dans le tableau suivant :

Charge appliquée(N)	Signal affiché ( $\mu\text{v}$ )
5	1,21
10	1,6
15	1,91
20	2,31
25	2,64

**TableauIV.1 : le signal correspondant à l'effort normal**

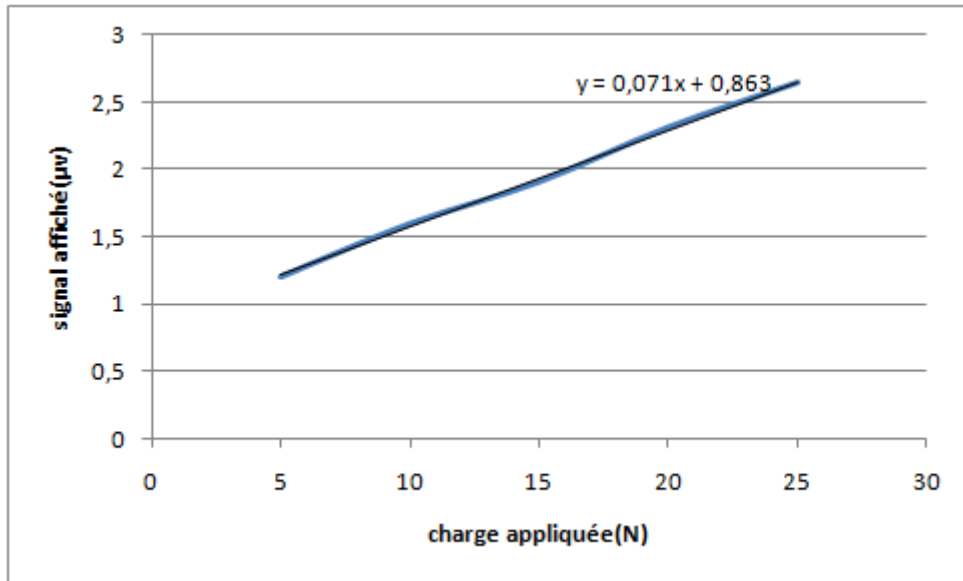


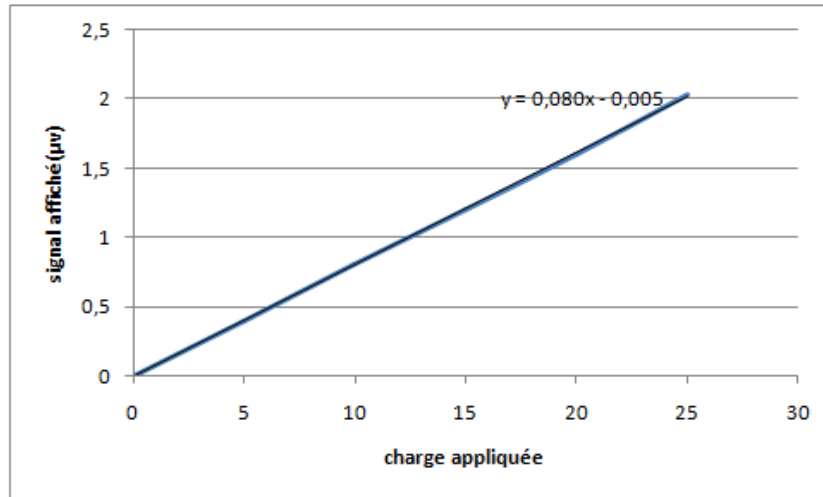
Figure IV.9 Représentation du signal de sortie en fonction de l'effort normal

**b. Etalonnage de la mesure de l'effort tangentiel:**

Les résultats de la mesure des efforts tangentiels sont donnés dans le tableau suivant :

Charge appliquée(N)	Signal affiché (µv)
0	0
5	0,4
10	0,8
15	1,2
20	1,6
25	2,03

Tableau IV.2 : le signal correspondant à l'effort normal



**Figure IV.10 : Représentation du signal de sortie en fonction de l'effort normal.**

Les courbes d'étalonnage de l'effort normal et de l'effort tangentiel décrivent une variation linéaire de la réponse du capteur.

Les équations des courbes d'étalonnage sont :

- effort normal :  $y=0,071x + 0,863$

-effort tangentiel :  $y=0,080x - 0,005$

## **IV.6 Matériaux et géométrie des éprouvettes :**

**IV.6.1 Disque :** le disque est un plateau de forme cylindrique de diamètre 60 mm et d'une épaisseur de 10mm, il possède un trou de diamètre 10 mm au centre obtenu à partir de barres laminées en acier XC48 à l'état recuit. C'est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone), du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore, (Norme NFA356554).

Les disques ont subi un traitement thermique (trempe +revenu) pour augmenter leurs caractéristiques mécaniques.

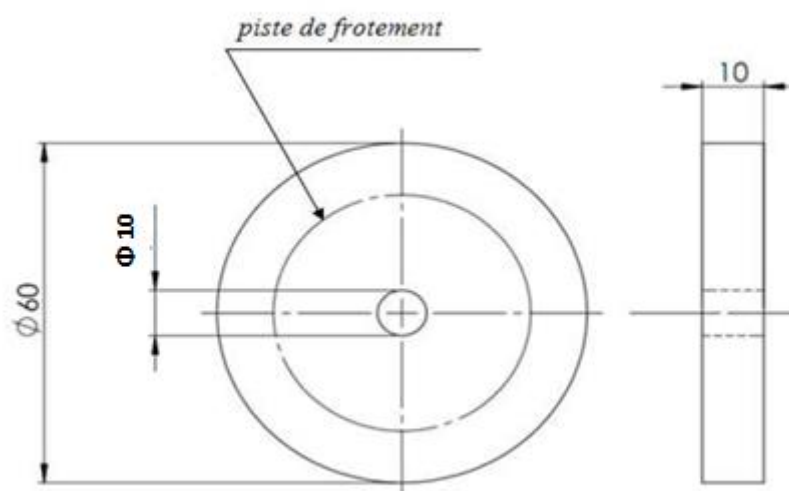


Figure IV.11 : Géométrie du disque

**IV.6.2 Pion** : les échantillons pion ont été réalisés à partir de barre de polytétrafluoréthylène (PTFE) découpée en disque de 6mm d'épaisseur puis en pions parallélépipédiques de dimensions de 6\*6\*17 mm.

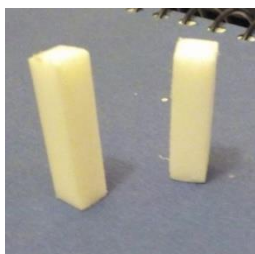


Figure IV.12 Vue des échantillons

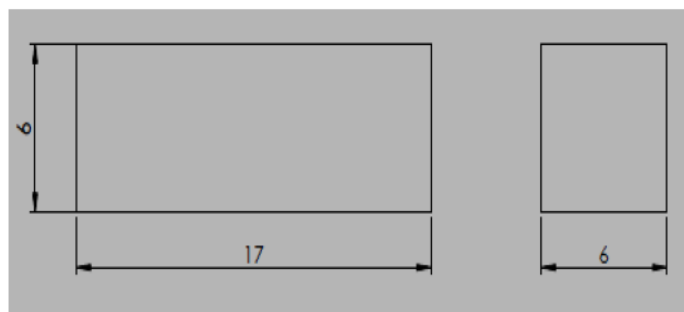


Figure IV.13 géométrie des échantillons

#### IV.6.2.1 Présentation du PTFE :

Le polytétrafluoroéthylène (sigle PTFE), est un fluoropolymère issu du tétrafluoroéthylène, un matériau tendre, facilement déformable, semi-cristallin, opaque, blanc et non toxique. Son allongement est élevé (propriétés mécaniques de type élastomère) et sa résistance aux contraintes et aux radiations est faible. Il présente une remarquable résistance à la plupart des produits chimiques, un coefficient de frottement extrêmement faible et reste stable à température élevée (jusqu'à 327 °C). Ces propriétés inhabituelles lui confèrent une valeur inestimable pour un grand nombre d'applications. Le PTFE représente environ 90 % de la consommation de fluoropolymères, soit ~ 20 000 t/an.

Dans l'industrie, il est utilisé dans les roulements, les joints, l'isolation électrique à hautes températures, les revêtements et garnitures non adhésives pour les cuves, etc. Dans la vie courante, il constitue le revêtement de certains ustensiles de cuisine et s'utilise en ruban afin d'assurer l'étanchéité de montages filetés.

### Propriétés

Formule brute	$C_2F_4$ [Isomères]	
Masse molaire <sup>2</sup>	100,015 ± 0,0016 g/mol C 24,02 %, F 75,98 %,	
<b>Propriétés physiques</b>		
T° transition vitreuse	environ 120 °C, mais -100 °C selon certains auteurs <sup>3</sup> .	
T° fusion	327 °C <sup>4</sup>	
Solubilité	Insoluble	
Paramètre de solubilité $\delta$	12,7 MPa <sup>1/25</sup>	
Masse volumique	2,16 g·cm <sup>-3</sup> <sup>4</sup>	
Conductivité thermique	0,25 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-16</sup>	
<b>Propriétés électroniques</b>		
Constante diélectrique	2,1	(60 Hz) <sup>6</sup>
	2,1	(1 kHz, 25 °C)
	2,1	(1 MHz, 25 °C)
	2,1 (1 GHz, 25 °C) <sup>7</sup>	
<b>Cristallographie</b>		
Structure type	semi-cristalline	
<b>Propriétés optiques</b>		
Indice de réfraction	$n^{20}$ 1,35 <sup>6</sup>	
Transparence	opaque sauf films très minces amorphes <sup>8</sup>	

### Inconvénients :

- La mise en œuvre est difficile et particulière : ne pouvant être transformé par fusion (il est formé par une méthode de frittage).
- Le PTFE se dégrade à 400 °C, proche de sa température de transformation (380 °C), avec dégagement d'acide fluorhydrique (corrosif) et de monomère gazeux (dépolymérisation).
- Propriétés mécaniques faibles.

- Coût élevé (polymère technique) et donc utilisation relativement peu développée.

#### **IV.7 Traitement thermique des disques :**

Le traitement thermique est réalisé au laboratoire de science des matériaux du département de génie mécanique.

##### **IV.7.1 La trempe :**

Nous avons fait subir une trempe à nos disques, son rôle est généralement de permettre d'obtenir des structures hors équilibre dans les conditions où nous les rencontrons, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique.

La trempe augmente la dureté et la résistance à la rupture mais diminue la résilience et l'allongement.

Nous avons installé les échantillons sur des tiges filetées et nous les avons mis dans un four électrique de puissance 11 kW dont la température maximale est 1200°C. Le processus de la trempe est comme suit :

- Chauffage lent ( $\approx 400$  °C), puis rapide avec une vitesse de chauffage ( $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) à une température d'austénitisation en fonction du pourcentage de carbone. Dans notre cas nous avons chauffé les échantillons à une température de  $850^{\circ}$
- Maintien à cette température pendant une heure (1h) pour permettre la dissolution des carbures.
- Refroidissement rapide dans l'eau froide.



**Figure IV.14 : Four électrique.**

##### **IV.7.2 Revenu :**

Le revenu est pratiqué après la trempe pour supprimer les tensions internes qui ont pris naissance au moment du refroidissement brutal et diminuer la fragilité du métal (augmentation de la résilience  $K$ ).

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- Chauffage à  $250$  °C
- Maintien en température (la durée est de 2h minutes).
- Refroidissement lent (à l'air libre).

#### **IV.8 Polissage :**

Les surfaces des disques et des pions ont été polies au niveau du laboratoire des sciences des matériaux au sein du département. Le polissage nous offre des avantages tel que :

- la qualité très élevée des états de surfaces.
- l'uniformité de la couche de matière enlevée.
- une meilleure résistance à la corrosion pour les disques en acier.



**Figure IV.15 : Polisseuse de marque KNUTH-ROTOR (laboratoire SDM)**

#### **IV.9 Essai de dureté :**

L'essai de dureté nécessite une préparation des échantillons sur la face à étudier. Cette préparation consiste tout d'abord à faire un polissage.

Les mesures de la dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide de duromètre de type «WOPERT DIA TESTOR RC »



**Figure IV.16 : Duromètre de type << WOPERT DIA TESTOR RC >>**

## Résultat :

La dureté moyenne des disques est de 14 HRC (200 Hv)

## IV.10 Mesure de l'état de surface des disques :

### Rugosité des surfaces de frottement des disques :

Le rugosimètre sert à déterminer rapidement la rugosité des surfaces. Le rugosimètre mesure la profondeur de la rugosité moyenne Rz et la valeur de l'écart arithmétique moyen Ra en  $\mu\text{m}$ . Ce rugosimètre, d'utilisation facile, permet un contrôle rapide des surfaces. Il entre en contact avec la surface en quelques secondes et mesure directement Ra ou Rz.



Figure IV.17 : Rugosimètre à palpeur.

## IV.11 Conditions des essais :

Température : ambiante.

Pression : atmosphérique.

Chargements :

P1=20 N

P2=30N

P3=40N

Vitesses :

V1=0.63 m/s

V2=0.89 m/s

V3=1.15 m/s

## IV.12 Essai d'usure :

### IV.12.1 Coefficient de frottement

Pour chaque combinaison des ces paramètres, une série de trois essais a été réalisée.

#### IV.12.2 Perte de masse

Pour quantifier la perte de masse et le taux d'usure, les échantillons (pions) ont été pesés avant et après chaque expérience à l'aide d'une balance électronique dotée d'une précision de  $10^{-4}$  g.



Figure IV.18 Balance électronique.

#### IV.13 Résultats et discussions :

##### IV.13.1 Coefficient de frottement :

A partir des mesures enregistrées lors des essais, nous traçons les courbes  $F_N(t)$  de l'effort normal « $F_N$ » et  $F_T(t)$  de l'effort tangentiel de frottement « $F_T$ » en fonction du temps (voir annexe). De ces courbes nous déduisons la courbe  $\mu(t)$  donnant l'évolution du coefficient de frottement fonction du temps en utilisant le logiciel d'acquisition labview. Ceci en faisant le rapport entre  $F_N(t)$  et  $F_T(t)$ .

Les courbes  $\mu(t)$  donnant le coefficient de frottement en fonction du temps sont :

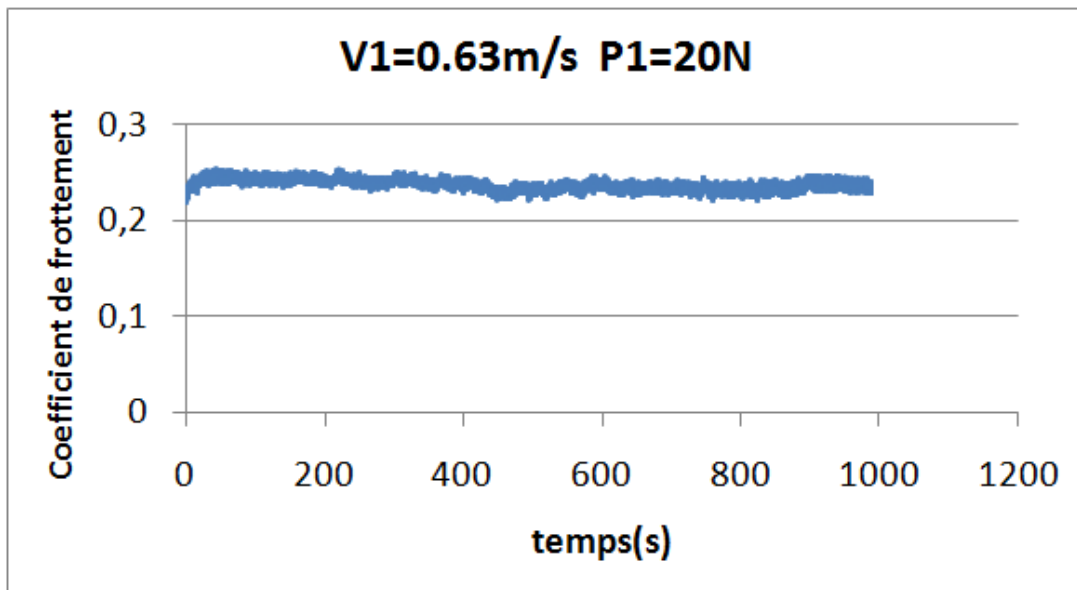


Figure IV.19 : Coefficient de frottement en fonction du temps

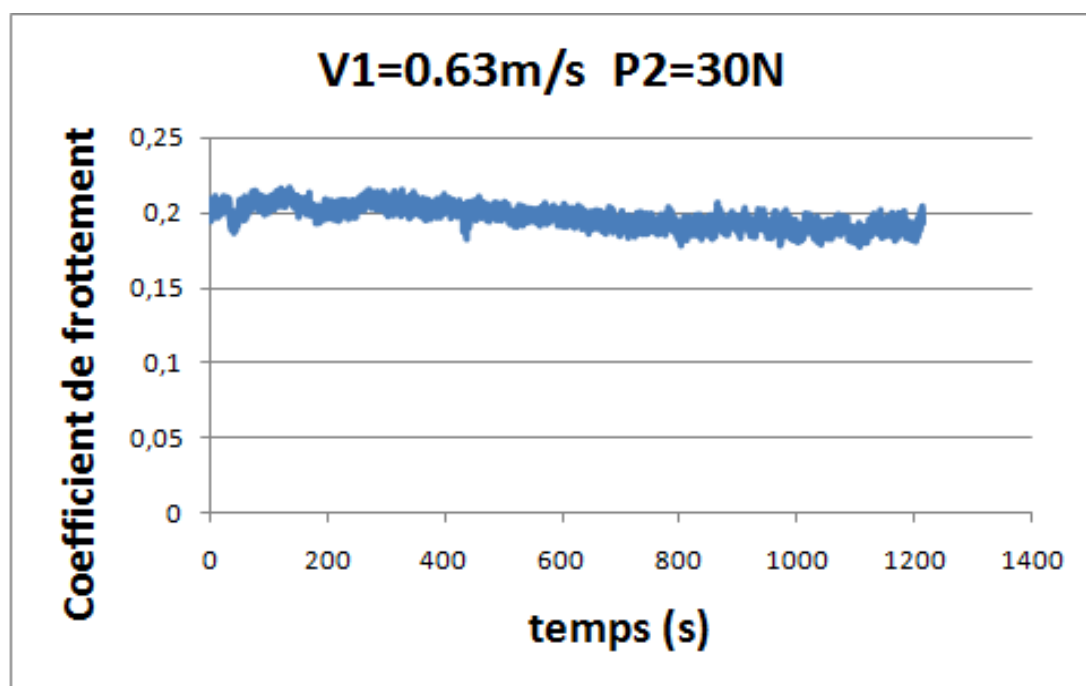


Figure IV.20 : Coefficient de frottement en fonction du temps

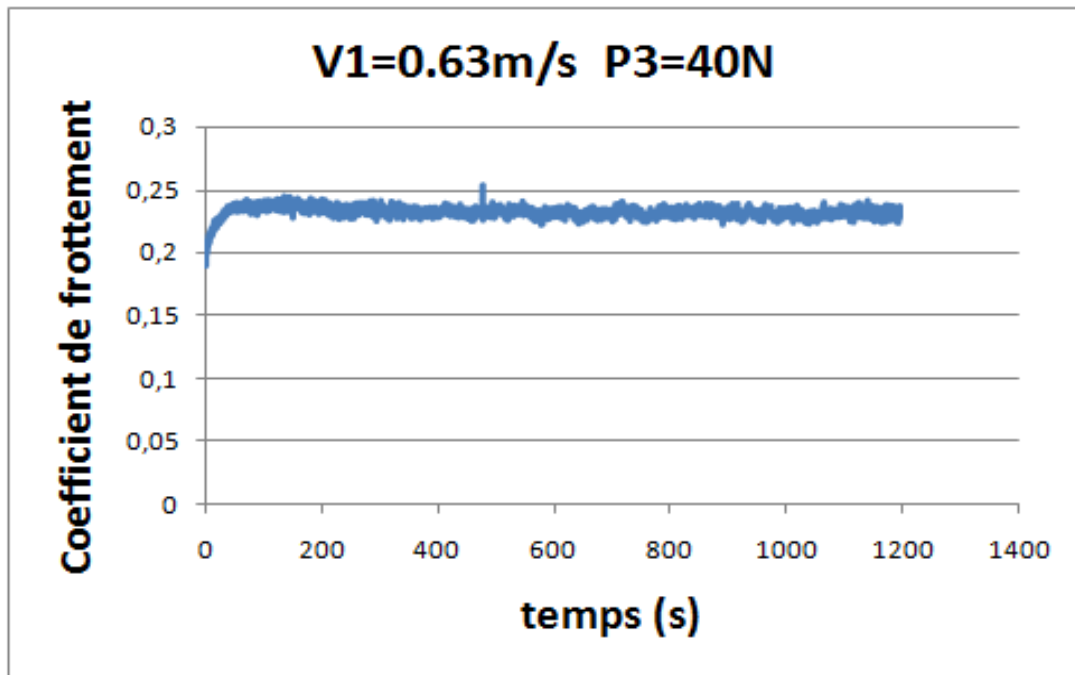


Figure IV.21 : Coefficient de frottement en fonction du temps

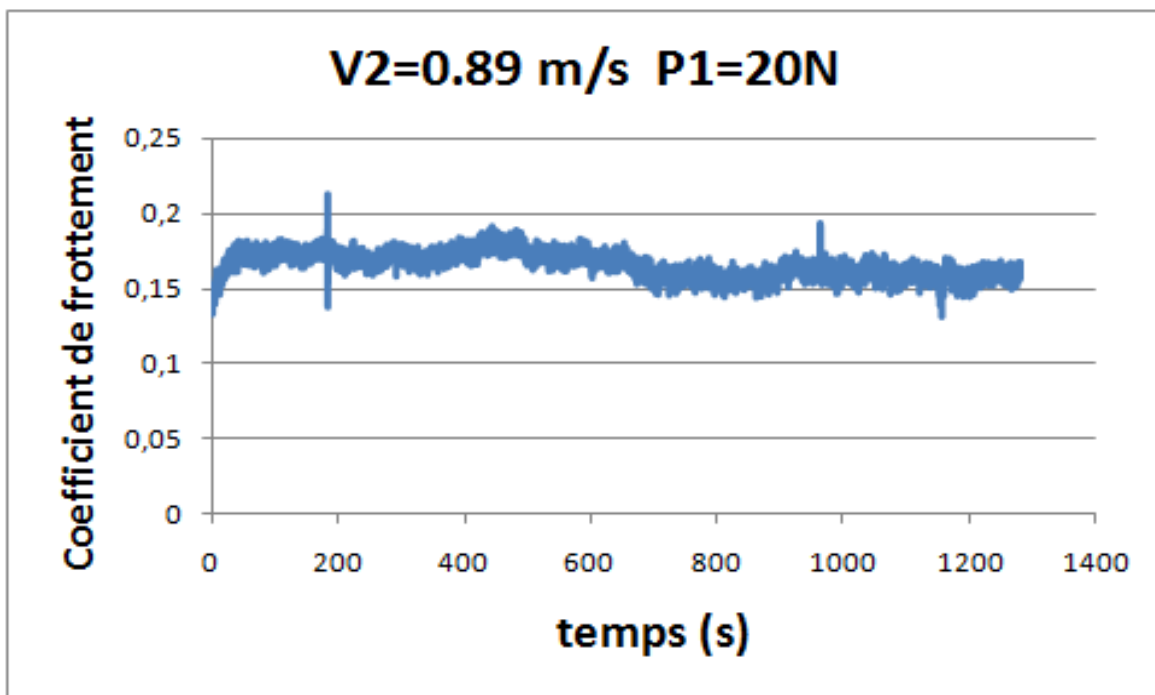


Figure IV.22 : Coefficient de frottement en fonction du temps

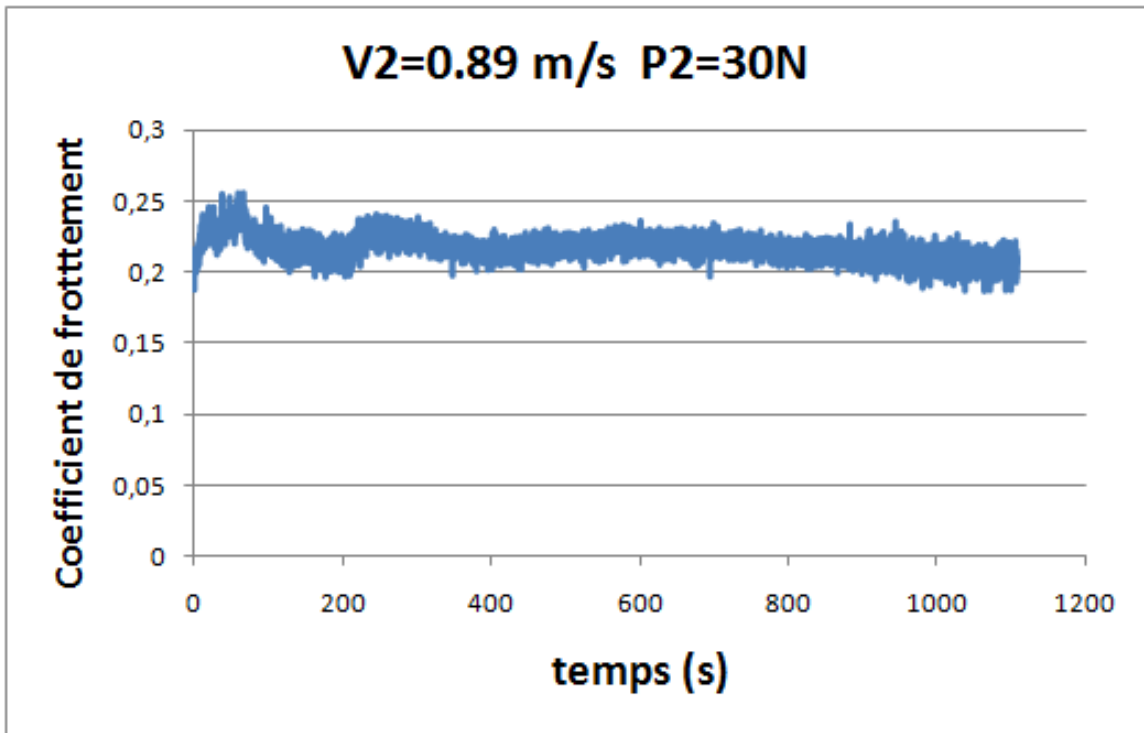


Figure IV.23 : Coefficient de frottement en fonction du temps

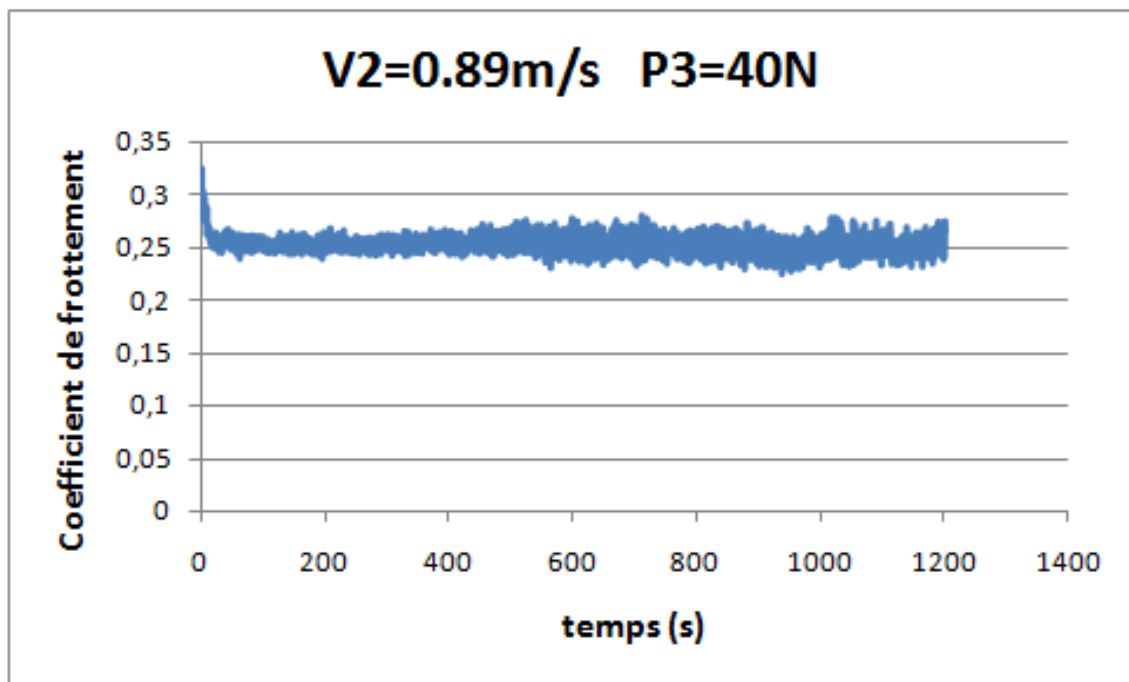


Figure IV.24 : Coefficient de frottement en fonction du temps

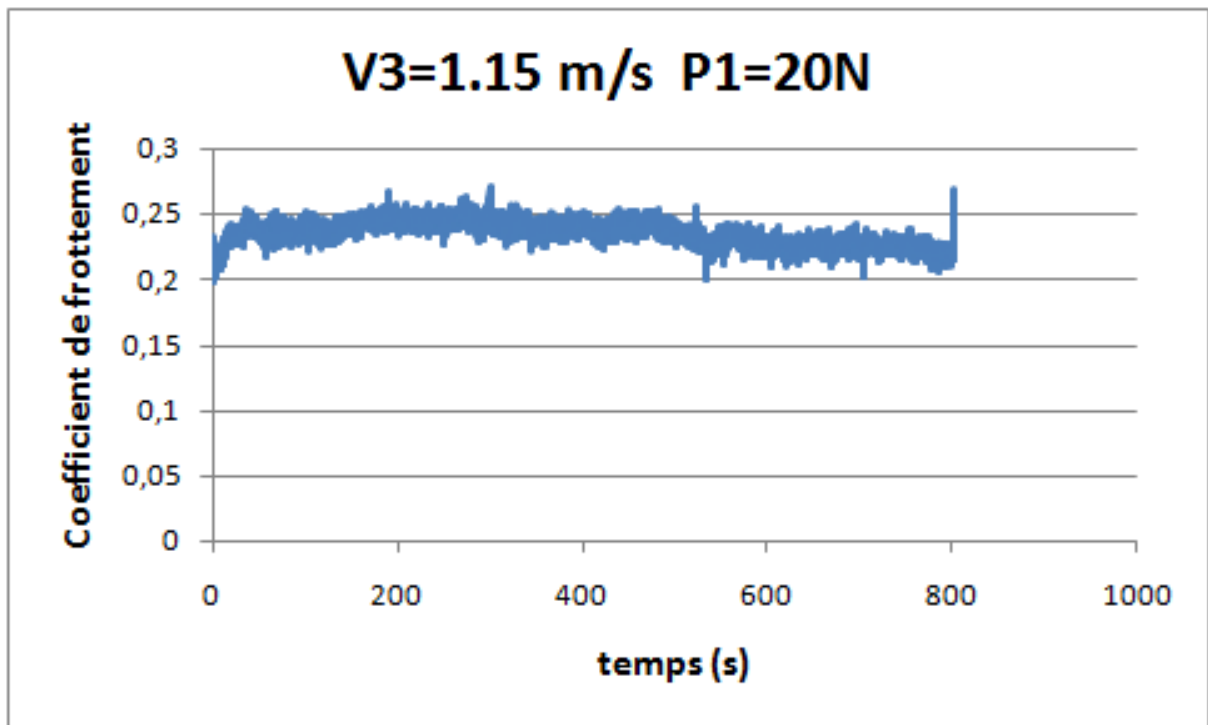


Figure IV.25 : Coefficient de frottement en fonction du temps

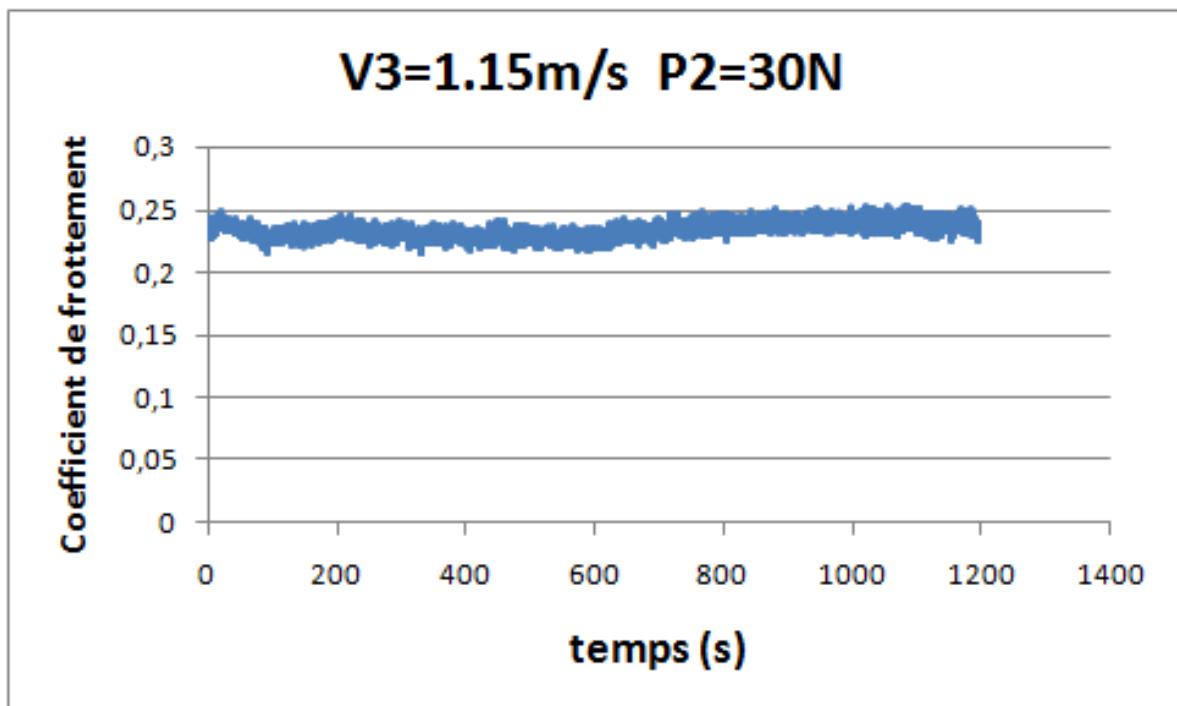
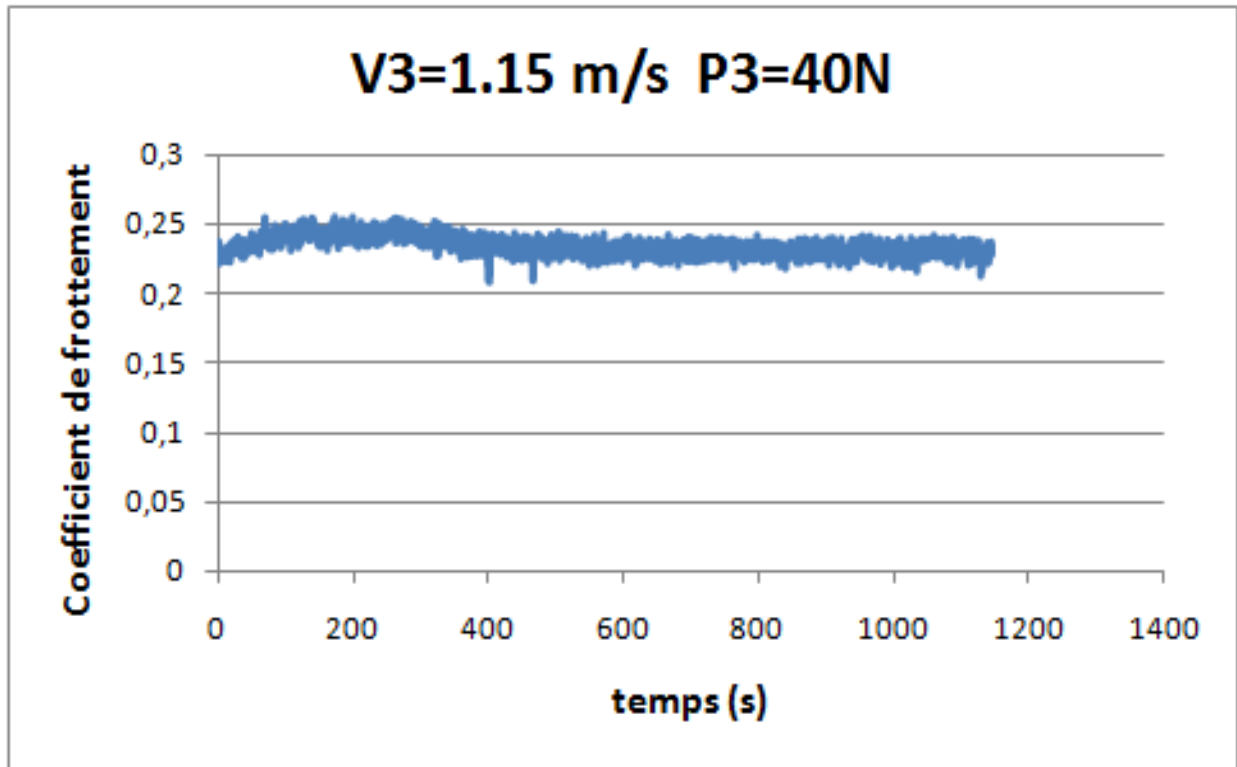


Figure IV.26 : Coefficient de frottement en fonction du temps



**Figure IV.27 : Coefficient de frottement en fonction du temps**

**Observations :**

Au cours de l'expérience, on observe un détachement de matière provenant du pion, et s'échappant du contact. Une partie de la matière arrachée du pion se colle sur le disque au niveau de la piste de glissement. Ceci est le signe d'une usure par abrasion.

Un échauffement des disques à différentes température en fonction de la charge et de la vitesse est observé.

**Observations et discussion des graphiques :**

Tous les graphes se caractérisent par deux phases ; une première instable relative à la phase de rodage, et l'autre qui est relativement stable ; c'est la phase de fonctionnement normale.

L'historique décrivant la variation des coefficients de frottement en fonction de la charge et de la vitesse est tracé à partir des courbes précédentes :

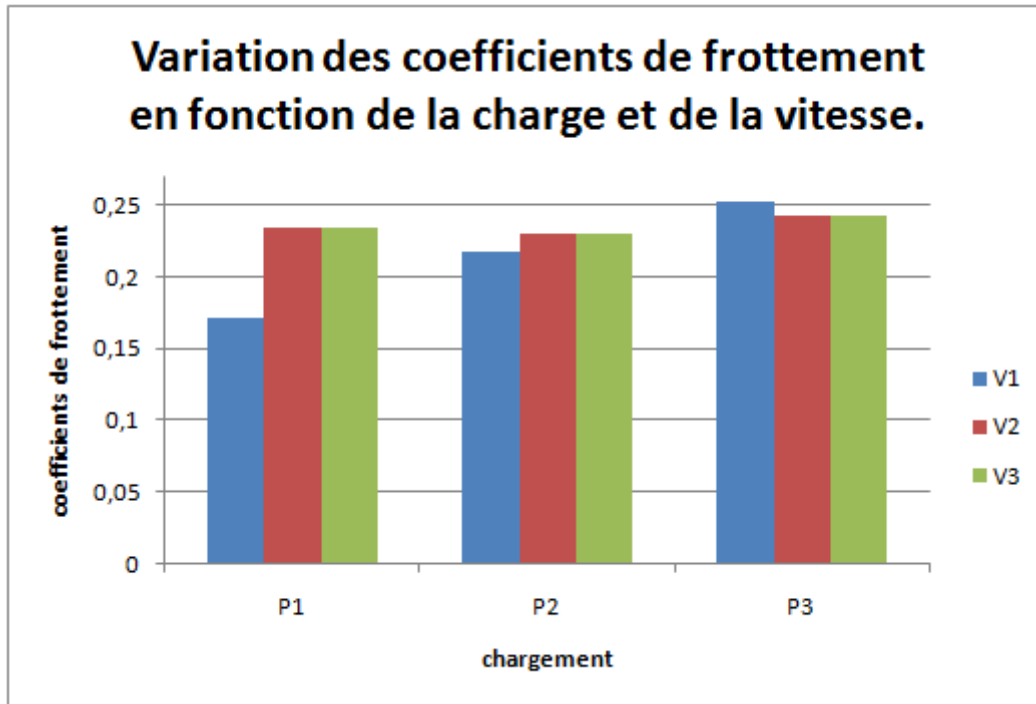


Figure IV.28 : Variation des coefficients de frottement en fonction de la charge et de la vitesse.

**Analyse :**

Le coefficient de frottement croît avec l'augmentation de la charge appliquée et varie très faiblement avec l'augmentation de la vitesse.

**IV.13.2 Perte de masse :**

Pour évaluer la perte de masse en fonction du temps nous avons effectué des pesées chaque 5 minutes. Les valeurs des pesées sont consignées dans les tableaux ci-dessous pour les différents efforts normaux :

Ces essais nous permettent d'étudier la variation de la perte de masse en fonction du temps.

	Charge P1=20N		
Temps(mins)	0	10	20
Vitesse(m/s)			
V1	0	0,0132	0,027
V2	0	0,01834	0,03868
V3	0	0,0139	0,02786

Tableau IV.3 : variation de la perte de masse en fonction du temps et de la vitesse pour l'effort normal P1=20N

	Charge P2=30N		
Temps(mins)	0	10	20
Vitesse(m/s)			
V1	0	0,01567	0,03328
V2	0	0,01851	0,03697
V3	0	0,03072	0,05912

**Tableau IV.4 : variation de la perte de masse en fonction du temps et de la vitesse pour l'effort normal P2= 30N**

	Charge P3=40N			
Temps(mins)	5	10	15	20
V1	0,01117	0,02117	0,03117	0,04117
V2	0,01457	0,03457	0,05457	0,07457
V3	0,01555	0,02555	0,03555	0,04555

**Tableau IV.5 : variation de la perte de masse en fonction du temps et de la vitesse pour l'effort normal P1=20N**

La perte de masse globale est obtenue par le cumul des différentes pertes de masse. Ces valeurs sont regroupées dans le tableau suivant :

Vitesse(m/s)	Perte de masse (g)		
	P1=20	P2=30	P3=40
V1=0.63	0,027	0,03328	0,06008
V2=0.89	0,05027	0,06744667	0,07916
V3=1.15	0,02786	0,05912	0,08626

**Tableau IV.6 : variation de la perte de masse en fonction du temps et de la vitesse pour l'effort normal P1=20N**

Les graphiques suivants représentent l'évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse et du chargement.

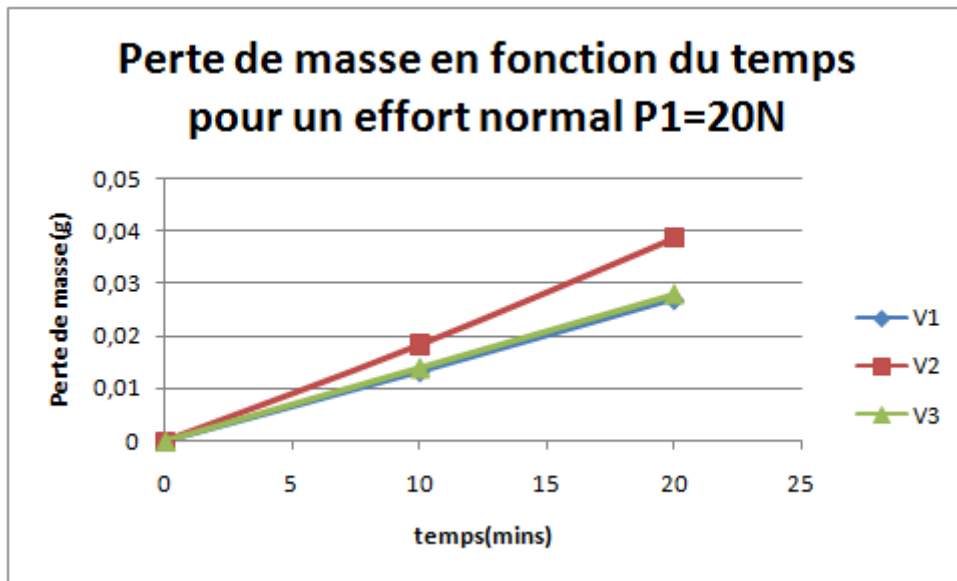


Figure IV.29 : Perte de masse en fonction du temps.

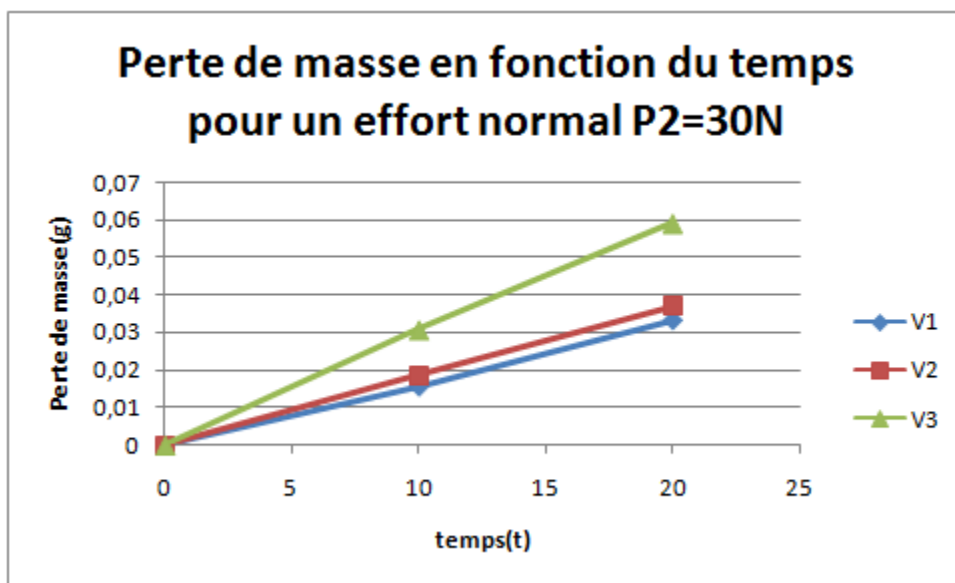


Figure IV.30 : Perte de masse en fonction du temps.

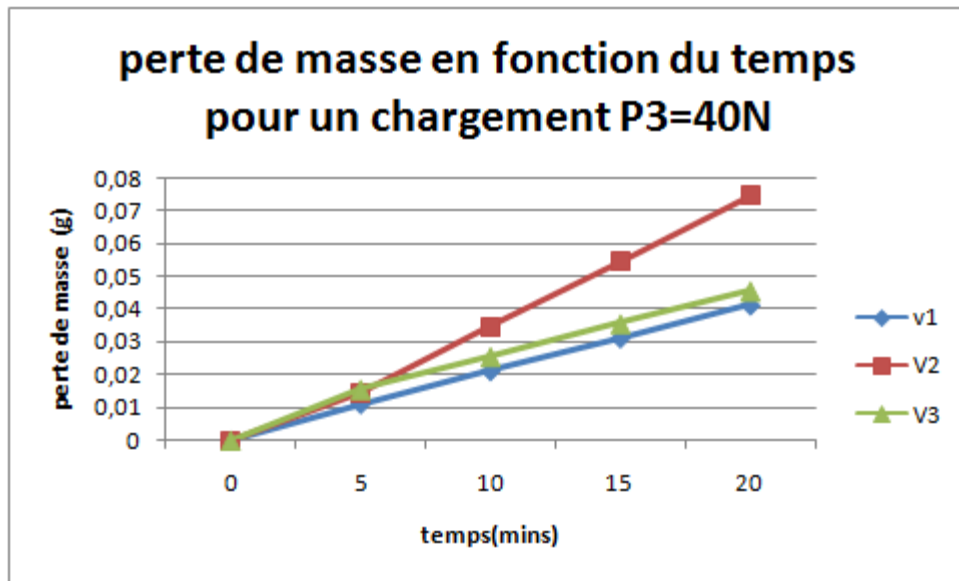


Figure IV.31 : Perte de masse en fonction du temps

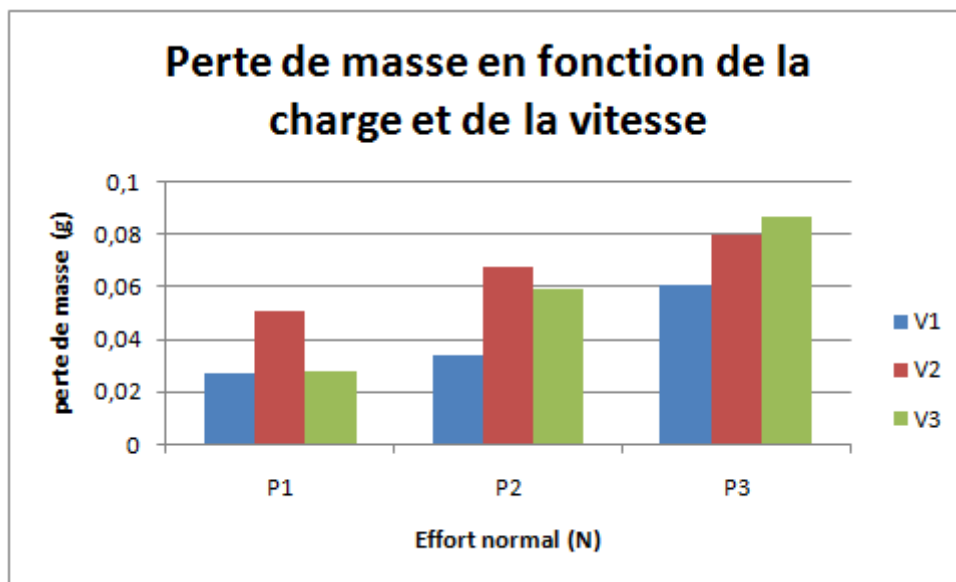


Figure IV.32 : L'évolution de la perte de masse en fonction de la vitesse et du chargement.

D'après les graphiques de la perte de masse et les calculs des taux d'usure, on peut conclure que ces propriétés tribologiques croissent proportionnellement à l'augmentation de l'effort normal  $F_N$ , tandis qu'elles varient faiblement avec la vitesse. Notons cependant que l'augmentation de  $\Delta m$  ne se produit que pour les faibles vitesses V1 et V2. Pour l'effort normal P3, la perte de masse augmente en fonction de la vitesse (pour les trois vitesses: V1, V2, V3). Nous constatons aussi que l'effet de l'augmentation de l'effort normal est prépondérant par rapport à celui de la vitesse.

#### IV.13.3 Taux d'usure k :

La norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure par le rapport du volume de matière perdu et l'effort normal  $F_N$  et la distance parcourue  $L$ .

Le taux d'usure  $K$  (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard

et suppose que la perte de volume  $\Delta V$  est proportionnelle à l'effort normal  $F_N$  et à la distance de glissement  $L$ . Le taux d'usure ( $K$ ) est donné par l'équation suivante :

$$K = \frac{\Delta V}{F_N \cdot L} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F_N \cdot L}$$

$F_N$ : Effort normal [N] ;  $L$  : distance parcourue [m] ;  $\Delta m$  : perte de masse [g] ;  $\rho$ : masse volumique [g/cm<sup>3</sup>]

La longueur parcourue est calculée à partir de la vitesse de glissement et de la durée de l'essai.

$$V = \frac{L}{t} \quad \longrightarrow \quad L = v \cdot t$$

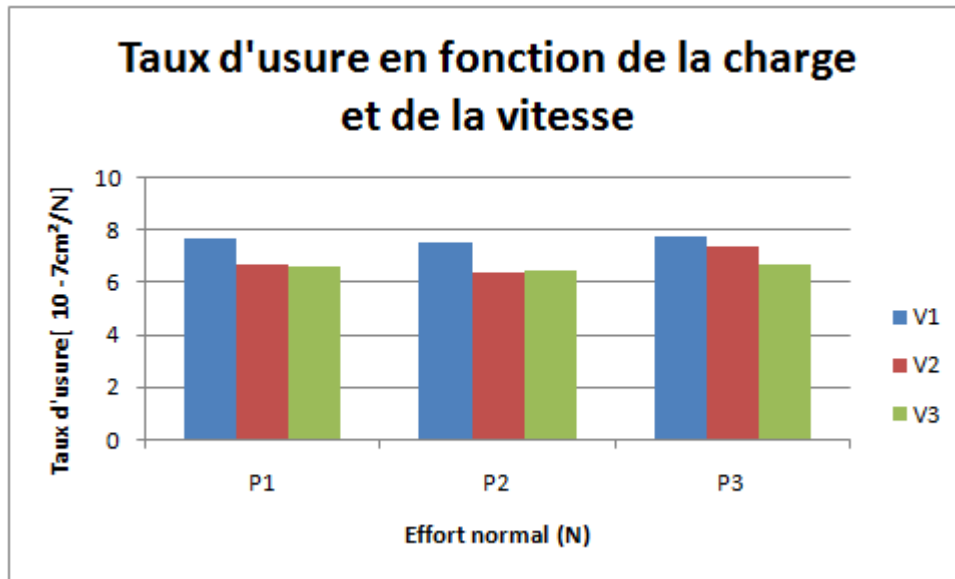
Vitesse (m/s)	Longueur(m)
V1=0,63	756
V2=0,89	1068
V3=1,15	1380

**Tableau IV.7 : Longueurs de glissement**

Les résultats du calcul du taux d'usure  $K$  en fonction de la charge pour les trois différentes vitesses sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Taux d'usure $K$ [ $10^{-7}$ cm <sup>2</sup> /N]			
Chargement [N] Vitesse [m/s]	P1=20	P2=30	P3=40
V1=0,63	7,67	7,48	7,69
V2=0,89	6,61	6,33	7,30
V3=1,15	6,55	6,42	6,63

**Tableau IV.8 : Taux d'usure  $K$  en fonction de l'effort normal et de la vitesse**



**Figure IV.33 : Evolution du taux d'usure en fonction de l'effort normal et de la vitesse.**

Le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la charge et diminue avec l'augmentation de la vitesse. Ces résultats concordent bien avec ceux rencontrés dans la littérature spécialisée.

#### **IV.14 Conclusion :**

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques tribologiques (le coefficient de frottement et la perte de masse et le taux d'usure) du PTFE dépendent de l'effort normal et de la vitesse de glissement.

Le coefficient de frottement croît avec l'augmentation de la charge appliquée et varie très faiblement avec l'augmentation de la vitesse.

La perte de masse et les taux d'usure augmentent proportionnellement avec l'effort normal  $F_N$  tandis qu'elles varient faiblement avec la vitesse. Notons cependant que l'augmentation de  $\Delta m$  ne se produit que pour les faibles vitesses V1 et V2. Pour l'effort normal P3, la perte de masse augmente en fonction de la vitesse (pour les trois vitesses: V1, V2, V3). Nous constatons aussi que l'effet de l'augmentation de l'effort normal est prépondérant par rapport à celui de la vitesse.

Le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la charge et diminue avec l'augmentation de la vitesse. Ces résultats concordent bien avec ceux rencontrés dans la littérature spécialisée.



# *Conclusion générale*

## *Conclusion générale*

### **Conclusion générale :**

Cette étude nous a permis de découvrir la diversité de la tribologie comme science ainsi que ses différents volets d'études comme l'usure et le frottement.

Le long du travail, nous avons acquis des connaissances sur le frottement et l'usure; phénomènes qui se manifestent quotidiennement dans tous les mécanismes existants et dont la compréhension nécessite non seulement des connaissances théoriques mais aussi expérimentales.

Afin de comprendre ces phénomènes tribologiques nous avons mené des expériences à l'aide d'un tribomètre vertical disponible au sein du département et avons choisi le couple de matériaux : polytétrafluoréthylène (PTFE) pour ses propriétés tribologiques (bas coefficient de frottement, autolubrification ...) et l'acier XC48.

Le coefficient de frottement croît avec l'augmentation de la charge appliquée et varie très faiblement avec l'augmentation de la vitesse.

De même nous avons constaté que la perte de masse qui se manifeste par des détachements de débris du côté du PTFE, évolue elle aussi dans le sens de la variation de la charge (augmentation) et diminue quand on augmente la vitesse de glissement.

Le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la charge et diminue avec l'augmentation de la vitesse. Ces résultats concordent bien avec ceux rencontrés dans la littérature spécialisée.

Ces deux résultats ; qui sont successivement relatifs au frottement et à l'usure nous renseignent sur ces deux phénomènes étroitement liés, étudié par la tribologie dans le but de préserver les conceptions mécaniques et autres structures.

# *Annexe*

Les courbes des efforts normaux et tangentiels pour les différents efforts appliqués et différentes vitesses :

**V1=0,63 m/s P1=20N :**

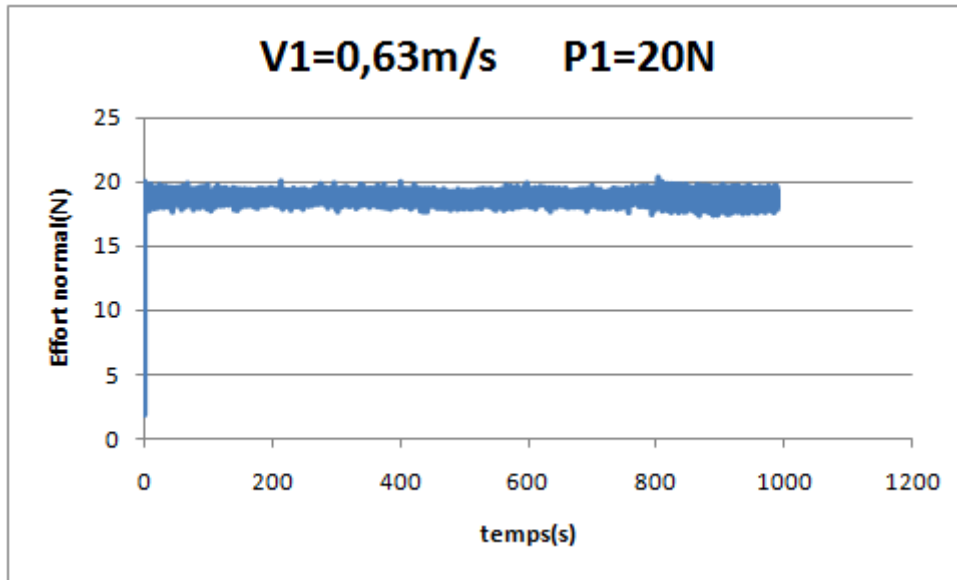


Figure A.1 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

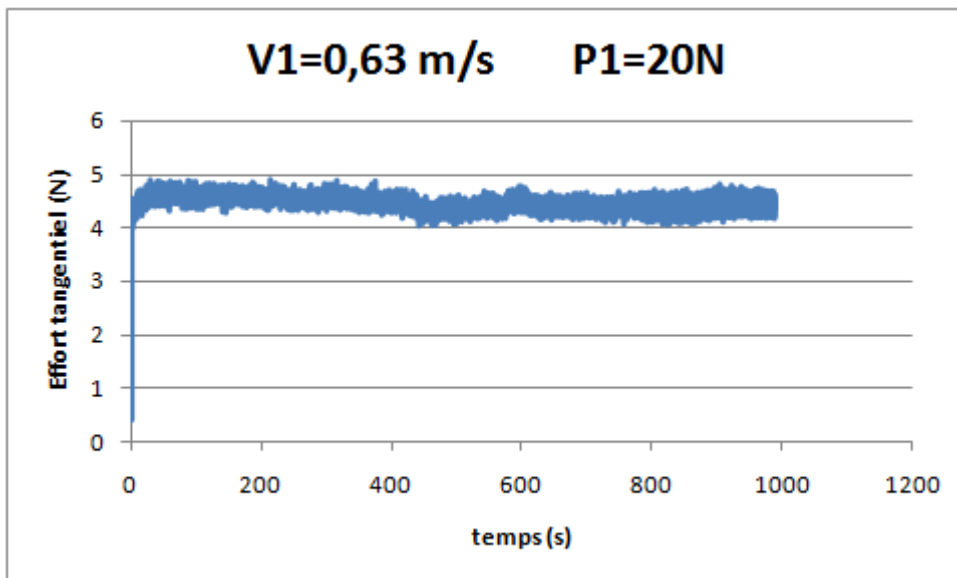


Figure A.2 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

V1=0,63 m/s P2=30 N

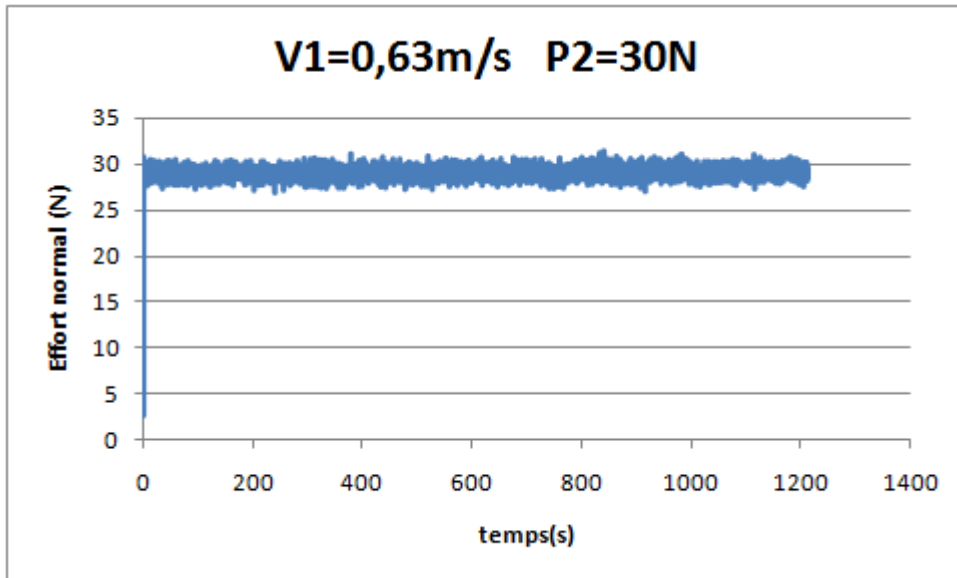


Figure A.3 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

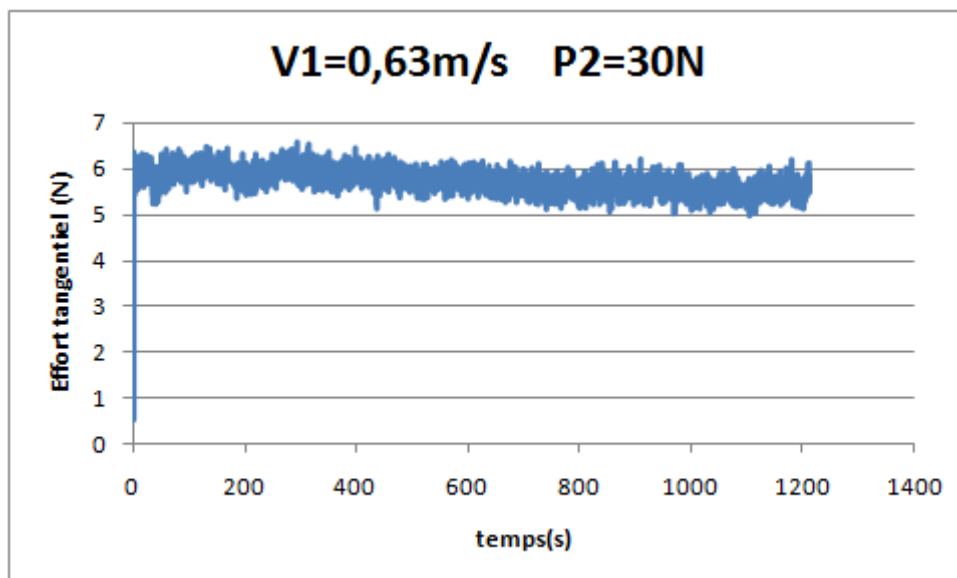


Figure A.4 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

V1=0,63 m/s P3=40 N :

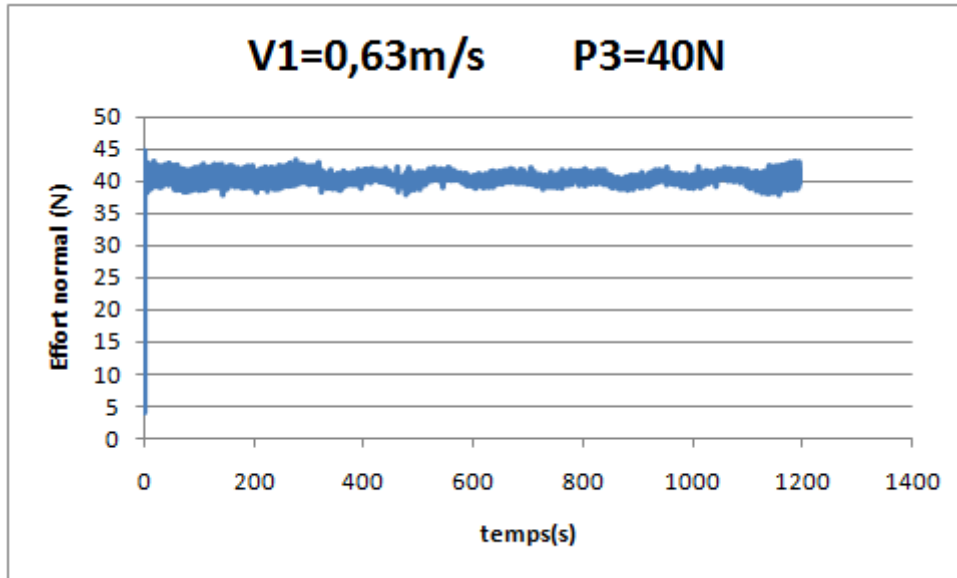


Figure A.5 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

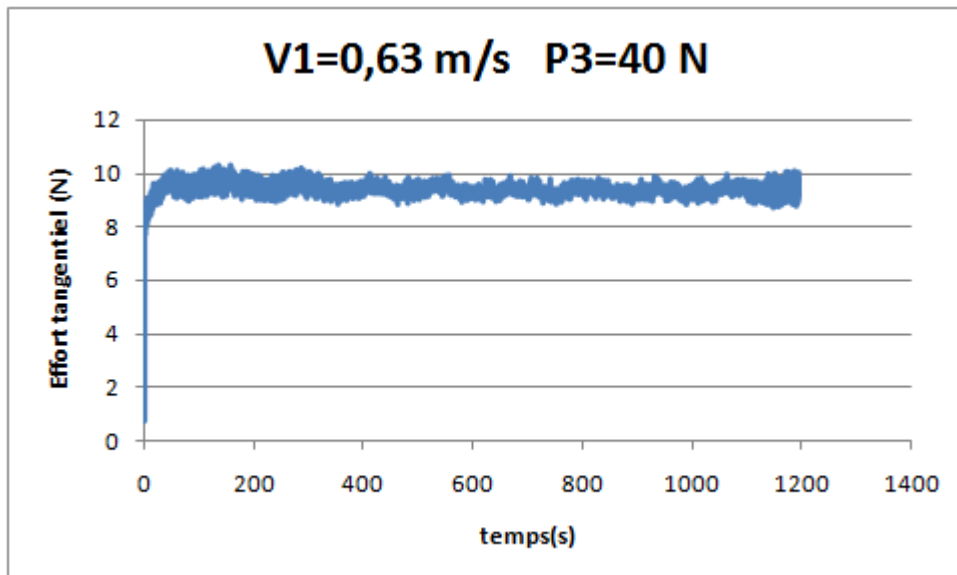


Figure A.6 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

V2=0,89 m/s P1=20 N :

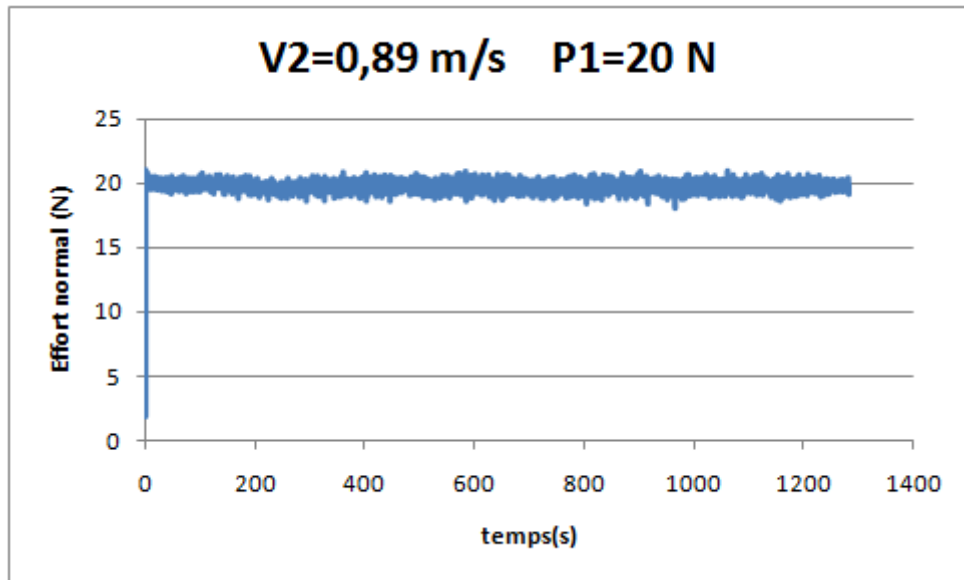


Figure A.7 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

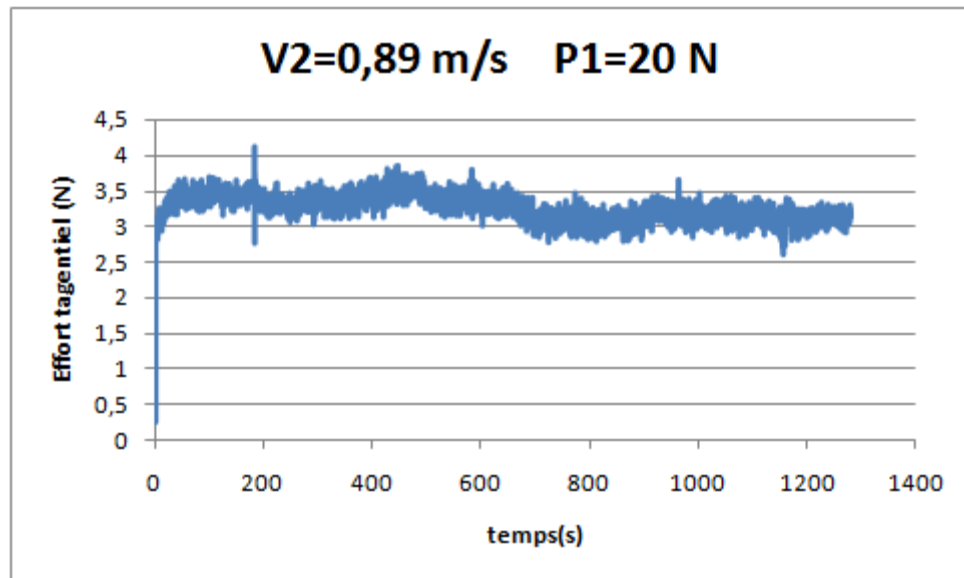


Figure A.8 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

V2=0,89 m/s P2=30N :

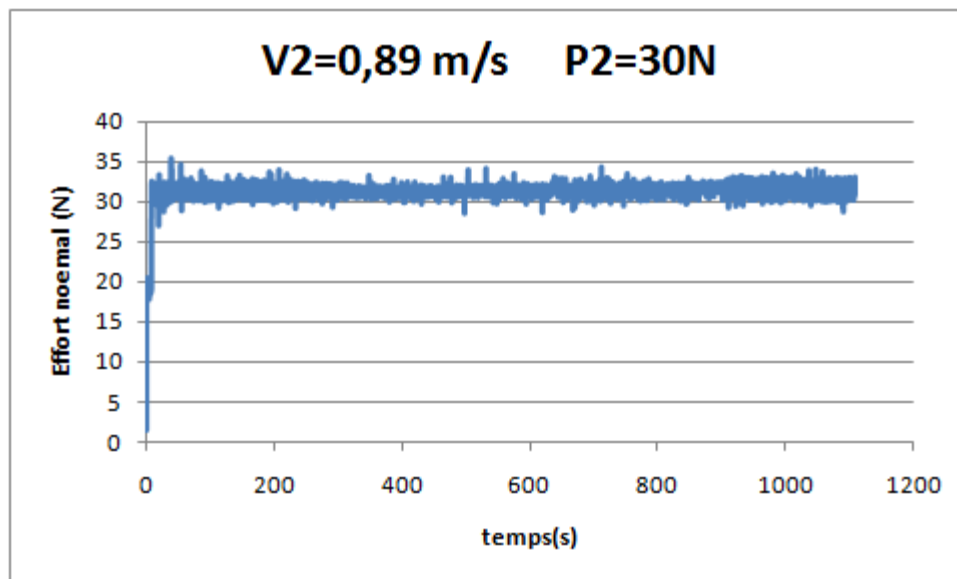


Figure A.9 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

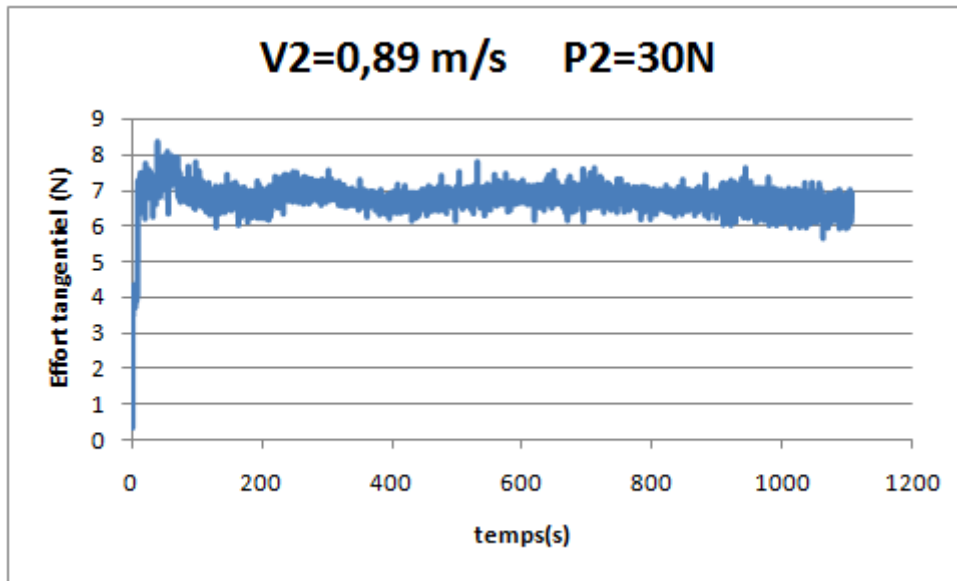


Figure A.10 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

$V2=0,89 \text{ m/s}$   $P3=40 \text{ N}$  :

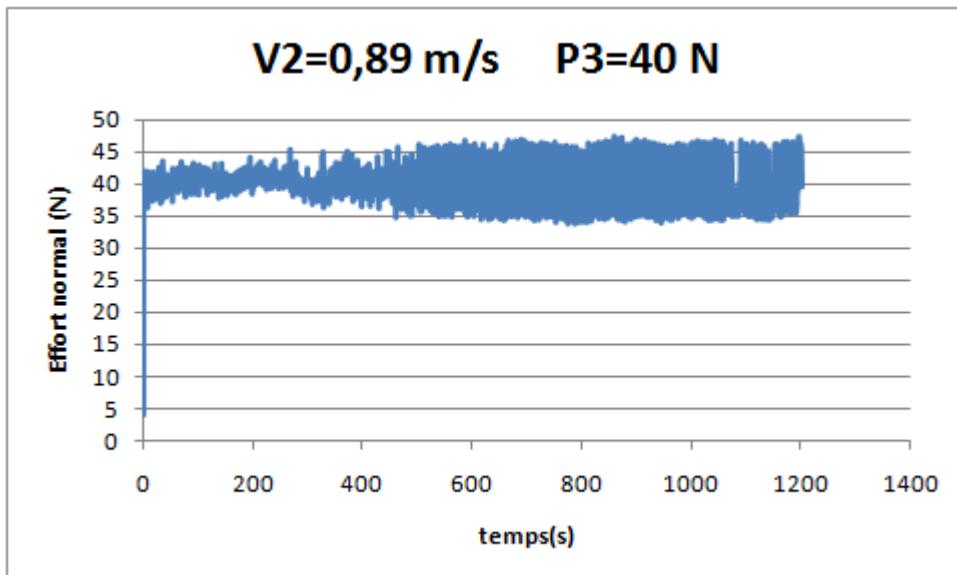


Figure A.11 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

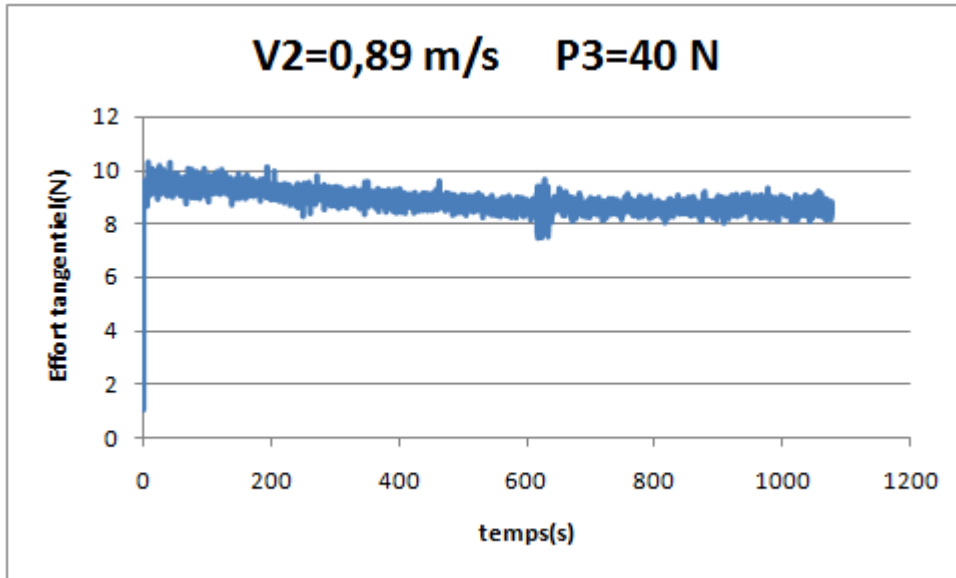


Figure A.12 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

V3=1,15 m/s    P1=20 N :

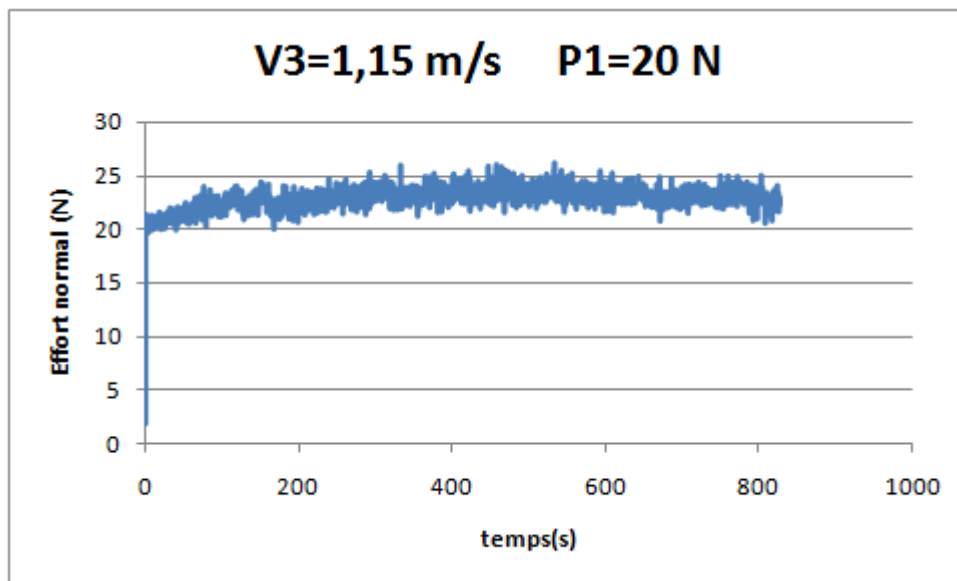


Figure A.13 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

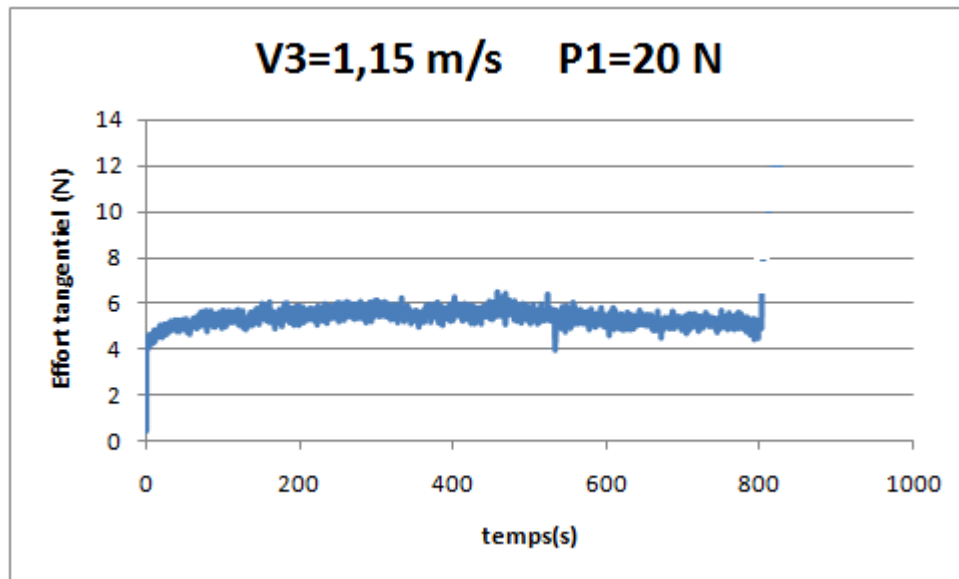


Figure A.14 : évolution de l'effort tangential en fonction du temps

V3=1,15 m/s P2=30 N :

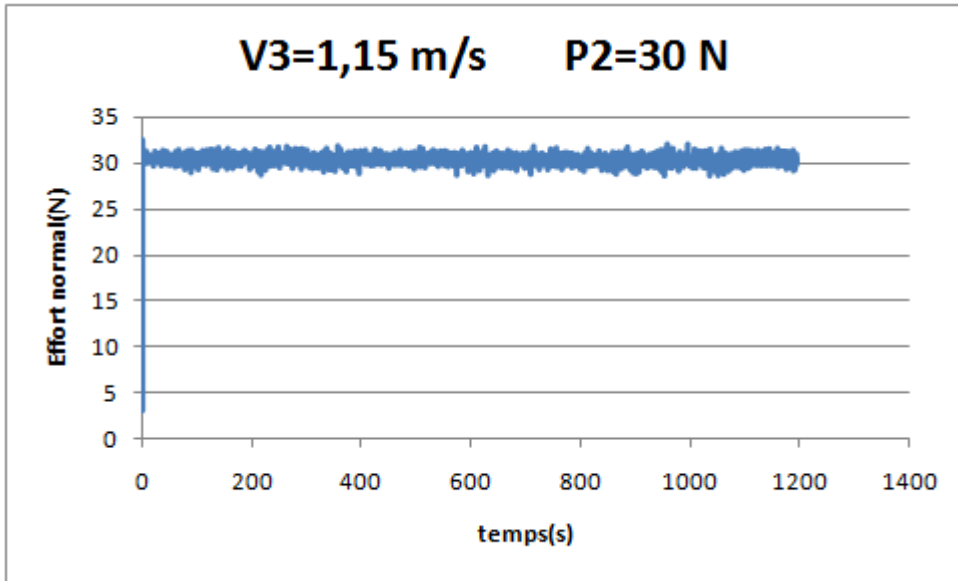


Figure A.15 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

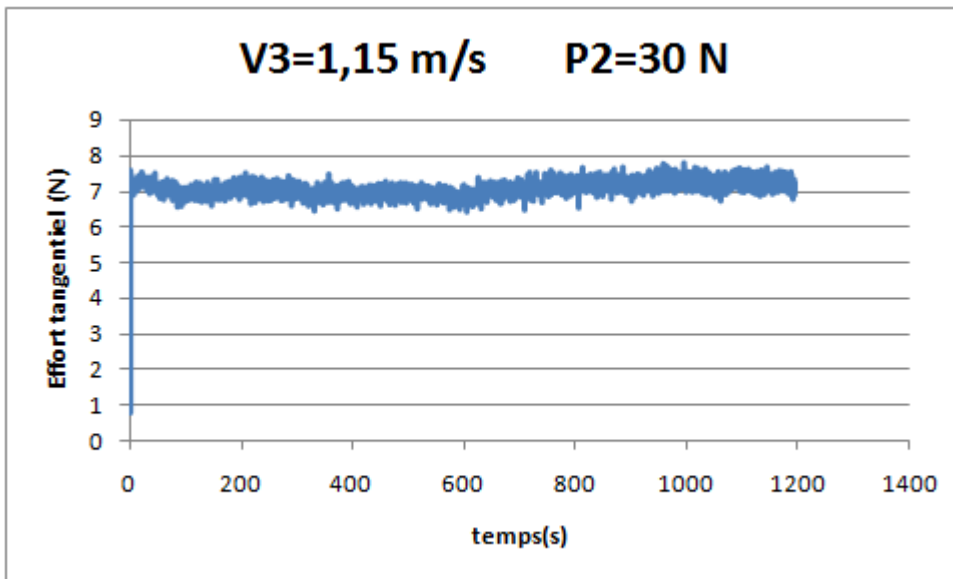


Figure A.16 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

V3=1,15 m/s P3=40 N :

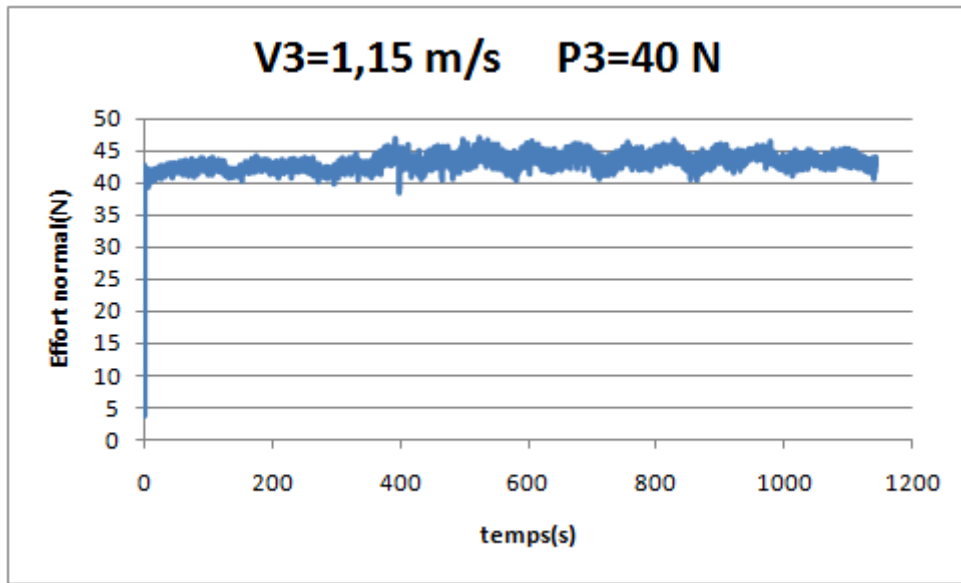


Figure A.17 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

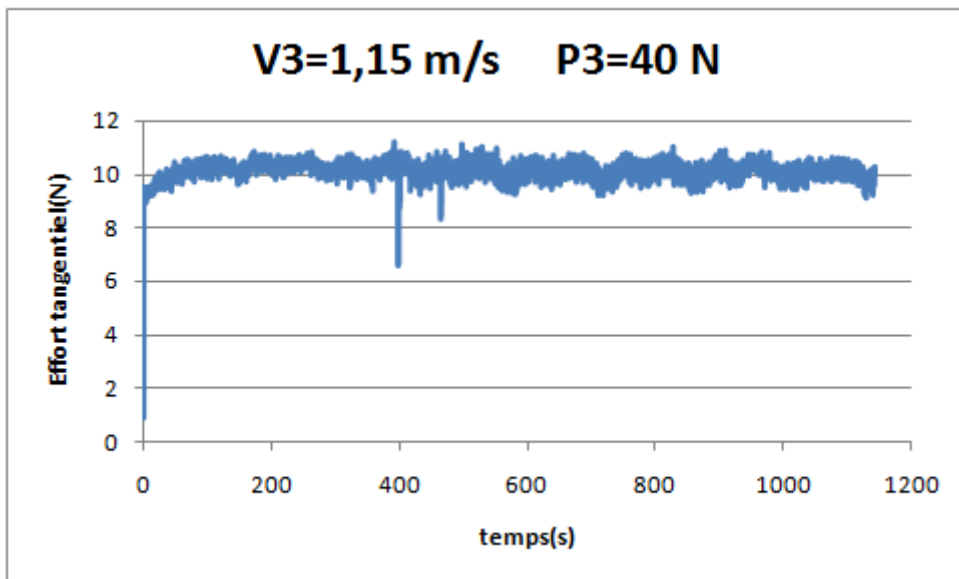


Figure A.18 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

**Rugosité des disques :**

DISQUE	R <sub>a</sub>	R <sub>v</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>q</sub>
A <sub>1</sub>	0,39	3,84	2,36	0,55
A <sub>2</sub>	0,24	2,68	4,56	0,38
B <sub>1</sub>	0,24	2,35	1,35	0,33
B <sub>2</sub>	0,37	3,47	2,12	0,50
C <sub>1</sub>	0,54	3,55	2,30	0,70
D <sub>1</sub>	0,63	4,67	2,95	0,83
D <sub>2</sub>	0,48	3,46	2,41	0,62
E <sub>1</sub>	0,40	3,44	2,17	0,53
F <sub>1</sub>	0,44	3,91	2,60	0,61
F <sub>2</sub>	0,26	2,67	1,52	0,38
G <sub>1</sub>	0,47	3,71	2,45	0,65
H <sub>1</sub>	0,36	2,65	1,61	0,47
H <sub>2</sub>	0,52	4,57	2,77	0,72
K <sub>1</sub>	0,53	4,57	2,96	0,76
K <sub>2</sub>	0,46	3,36	2,09	0,59
J <sub>1</sub>	0,62	5,54	3,49	0,86
J <sub>2</sub>	0,21	1,41	0,94	0,26
L <sub>1</sub>	0,86	6,53	3,87	1,21

# *Bibliographie*

**Bibliographie :**

- [1] : matériaux et surfaces en tribologie, Jamal Takadoum, LA VOISIERE, 2007.
- [2] : Analyse des systèmes tribologiques, Meziane Rabahallah, UMMTO.
- [3] : Matériaux et contacts-une approche tribologique, G. Zambelli, L. Vincent, Suisse, PUR (1998).
- [4] : Usure des contacts mécaniques, éléments de tribologie, M. CARTIER., P. KAPSA, Techniques de l'ingénieur, BM 5066
- [5] : Débris d'usure Indices connexes en tribologie, RICHARD Caroline, Techniques de l'ingénieur, 2013.
- [6] : Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites NiP – Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite, B. ETCHEVERRY , thèse de doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2006.
- [7] : validation d'un tribomètre pion-disque vertical, mémoire master, Chekir Nabila, UMMTO, 2016.
- [8] : Tribologie /applications pratiques, un livre de Wikibooks,  
www : [wikibooks.org/tribologie/application pratique](http://wikibooks.org/tribologie/application_pratique).
- [9] : Etude des propriétés tribologiques du composite polyester insaturé chargé de poudre de graphite en frottement avec un antagoniste en acier XC48 traité, mémoire master, Kelloud Youcef, UMMTO, 2012.
- [10] : Bulletin de l'union des physiciens, Michel Barquins, directeur de Recherche au CNRS, N° 764, 1994.
- [11] : Usure des contacts mécaniques, manifestation de l'usure, M. CARTIER., P. KAPSA, Techniques de l'ingénieur, BM 5 069.
- [12] : [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)