

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE LA GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

THEME :

Etude de l'effet de la vitesse et de la pression sur le comportement tribologique du couple de frottement PTFE/Acier

Proposé et dirigé par :

Mr : BELDI Mustapha

Mme : MANSOURI Lila

Réalisé par :

M^{elle} : SEGHIR Ryma

Année universitaire : 2022/2023



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 «M^r BELDI» ainsi que M^{me} MANSOURI pour leurs précieux conseils, leurs encouragements et leur disponibilité 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 mes parents:

A ma très chère sœur et ses enfants : Fouad, Rania
et Ines

A mes frères et leurs enfants: Maroua, Bilal, Ishak,
Khadidja e Aymen

A mon amie Razika



Liste des symboles :

Ra : Rugosité moyenne

FN : Force normale

FT : Force tangentielle

μ : Coefficient de frottement

V : Vitesse

T : Température

P : Pression

PTFE : Polytétrafluoréthylène

Tg : Température de transition vitreuse

Pv : Pression *vitesse

Ef : Energie de frottement

L : Longueur

K : Taux d'usure

MoS₂ : Bisulfure de molibdène

Table des matières

Introduction générale.....	1
I. Chapitre I	4
I.1 Introduction	5
I.2 Le but de la tribologie.....	5
I.3 Lois empiriques du frottement.....	6
I.4 Paramètres tribologiques	6
I.4.1 Les paramètres opérationnels.....	7
I.4.2 Les paramètres structuraux	7
I.4.3 Les paramètres d'interaction.....	8
I.4.4 Les paramètres tribométriques	8
I.5 Mesures tribométriques	9
I.5.1 Le frottement.....	9
I.5.2 Les différents types de frottements	11
I.5.3 Frottement visqueux.....	13
I.5.4 Le troisième corps.....	13
I.6 L'usure.....	14
I.6.1 Les principales causes de l'usure	14
I.6.2 Types d'usure.....	15
I.7 La surface en tribologie	17
I.7.1 Etat de surface.....	18
I.7.2 Paramètres de rugosité	18
I.8 Tribologie des polymères	20
I.8.1 Mesure du frottement des polymères :	20
I.8.2 Classification.....	20
I.9 Valeur du produit $P \times V$	26
I.10 Conclusion	28
II. Chapitre II : La lubrification	29
II.1. Introduction :.....	30
II.2. La lubrification :.....	30
II.3. Les lubrifiants solides :	30
II.3.1 PTFE (Téflon)	31

II.3.2 Le Graphite.....	31
II.3.3 Bisulfure de molybdène MoS ₂ :.....	32
II.5.2 Les lubrifiants liquides	32
II.5 Le film de transfert	34
II.6 Recherches tribologiques.....	35
Conclusion	37
III. Chapitre III : Etude Expérimentale du Comportement Tribologique de PTFE	38
III.1 Introduction	39
III.2 Dispositif expérimental.....	39
III.2.1 Réglage de la vitesse de glissement	40
III.3 Réglage de la planéité du disque	41
III.4 Système d'acquisition des données	42
III.5 Etalonnage du capteur de force.....	45
III.6 Tests tribologiques.....	50
III.7 Mesure de la rugosité des disques	50
III.8 Coefficient de frottement.....	52
• Coefficient de frottement pour V=0.5 m/s et P=2 MPa.....	53
• Coefficient de frottement pour V=1 m/s pour différentes pressions	53
• Coefficient de frottement pour V=1.5 m/s pour différentes pressions	55
• Coefficient de frottement pour V=2 m/s et une pression P=1MPa.....	56
III.8.1 Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement	56
III.8.2 Influence de la pression sur le coefficient de frottement	58
III.9 • Perte de masse pour une vitesse de glissement $V_2=1 \text{ m.s}^{-1}$	62
III.10 Conclusion	64
Conclusion générale	65
Bibliographie	

Liste des figures

Figure I-1: Contact entre deux solides en présence de frottement	5
Figure I-2: Composants d'un tribo-système.....	7
Figure I-3 : Quatre types de configuration d'essais tribologique classique	11
Figure I-4 : Différents types de frottement.....	12
Figure I-5: Frottements secs, vue microscopique de la zone de contact.....	12
Figure I-6: Frottement visqueux, vue microscopique	13
Figure I-7 : Traces d'usure.....	15
Figure I-8 : a) Etat de surface présentant une usure par abrasion ; b) Mécanisme d'usure par abrasion.	16
Figure I-9: Usure corrosive sur portée de soupape moteur. Oxydation par les gaz chauds. (Grossissement 30).....	16
Figure I-10: Vue théorique en coupe d'une surface.....	17
Figure I-11: Paramètres de rugosité liés aux motifs.....	18
Figure I-12: Paramètres de rugosité liés à la ligne moyenne	19
Figure I-13: Hauteur du profil.....	19
Figure I-14: Structures des chaînes moléculaires.....	21
Figure I-15: Morphologie des thermoplastiques	23
Figure I-16: Morphologie des thermodurcissables.....	24
Figure I-17: Graphe «pression/vitesse de glissement» limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste Acier pour fer et bronze frittés.....	27
Figure II-1: (a)Formule chimique du monomère du PTFE (C ₂ F ₄) _n (b) sa structure moléculaire.	31
Figure II-2: Schéma montrant la structure du graphite.	32
Figure II-3 : Schéma montrant la structure De MoS ₂	32
Figure II-4 : Les 2 mécanismes de fonctionnement du film d'huile.	33
Figure II-5: Taux d'usure spécifique moyen du PTFE et des composites PTFE (adopté).	36
Figure II-6: Comportement en frottement du PTFE et des composites PTFE.	36
Figure II-7 : variation du coefficient de frottement du PTFE en fonction de la vitesse de glissement (pour une charge de 20 N) et à la charge appliquée (pour une vitesse de 0,32 m/s)...	37
Figure III-1. Tribomètre de type pion disque.	39

Figure III-2. Glissière de réglage du rayon de glissement.	40
Figure III-3. Supports disque pour le réglage de planéité.	41
Figure III-4. Réglage de planéité lors du montage du disque.	41
Figure III-5. Chaîne d'acquisition du signal de sortie.	42
Figure III-6. Capteur et les zones d'emplacement de la jauge.	42
Figure III-7. La carte ARDOUINO.	44
Figure III-8. Fenêtre du programme écrit sous labview.	45
Figure III-9. Fenêtre de lecture de données sur labview.	45
Figure III-10. Mécanisme d'étalonnage.	46
Figure III-11. Droite d'étalonnage de l'effort tangentiel.	47
Figure III-12. Géométrie du disque et le pion.	47
Figure III-13. Four électrique.	49
Figure III-14. Polisseuse de marque KNUTH-ROTOR (laboratoire SDM).	49
figure III-15. Duromètre de type WOLPERT DIA TESTOR RC.	50
Figure III-16. Rugosomètre.	51
Figure III-17. Signification des paramètres de rugosité [3].	51
Figure III-18. Evolution de l'effort normal en fonction du temps.	52
Figure III-19. Variation de coefficient de frottement à $V=0.5\text{m/s}$ et $P=2\text{MPa}$	53
Figure III-20. Variation de coefficient de frottement à $V=1\text{ m/s}$ et différentes pressions.	54
Figure III-21. Variation de coefficient de frottement à $V=1.5\text{ m/s}$ et différentes pressions.	55
Figure III-22. Variation de coefficient de frottement à $V=2\text{ m/s}$ et une pression $P=1\text{MPa}$	56
Figure III-23. Comparaison de coefficient de frottement en fonction de temps pour $P=1\text{MPa}$	57
Figure III-24. Comparaison de coefficient de frottement en fonction de temps pour $P=2\text{MPa}$	57
Figure III-25. Comparaison de coefficient de frottement en fonction de temps pour $V=1\text{m/s}$	58
Figure III-26. Effet de la variation de la vitesse et de la pression sur le coefficient de frottement.	59
Figure III-27. Balance électronique.	60
Figure III-28. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_1=0.5\text{ m.s}^{-1}$	61
Figure III-29. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_2=1\text{ m.s}^{-1}$	62
Figure III-30. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_3=1.5\text{ m.s}^{-1}$	63

Liste des tableaux

Tableau I-1: constituant structuraux des tribo-système usuels.....	8
Tableau I-2: Avantages et Inconvénients des thermodurcissables de façon générale	24
Tableau II-1 : Composition (vol. %) des matériaux.....	35
Tableau III-1. Paramètres de rugosité des surfaces des disques	51
Tableau III-2. Variation de la perte de masse en fonction de temps.....	61
Tableau III-3. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_2=1$ m.s-1.	62
Tableau III-4. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_3=1.5$ m.s-1.	63

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.

Afin de réduire le frottement et l'usure des surfaces en contact, on utilise les lubrifiants. Parmi ces lubrifiants on trouve les lubrifiants solides qui sont souvent déposés sous forme de revêtement de surface ou incorporés dans le matériau pour obtenir un matériau composite avec des propriétés optimales.

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 couple de frottement de type pion en polytétrafluoroéthylène (PTFE) sur disque en acier. 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 trois chapitres :

- Le chapitre est dédié à la recherche bibliographique sur la tribologie, le frottement, les mécanismes d'usure.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de différents types de lubrifiants solides.

- Le troisième chapitre est la partie expérimentale où nous avons décrit le dispositif expérimental qui est un tribomètre pion/disque ainsi que les conditions d'essai, l'élaboration des échantillons nécessaires pour notre expérimentation.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives

Chapitre I

Généralités sur la tribologie

I.1 Introduction

Le mot tribologie a été proposé par Peter Jost en 1966 et est basé sur le mot grec "tribos" qui signifie frotter. Il s'agit donc de la science du frottement. Son but est de regrouper sous une seule terminologie l'ensemble des sciences du frottement :

- Contact des surfaces ;
- Frottement ;
- Usure
- Lubrification

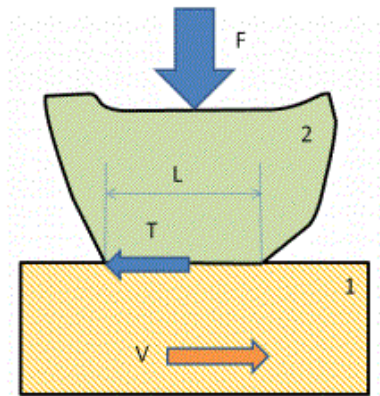


Figure I-1: Contact entre deux solides en présence de frottement. [1]

Une définition plus précise de la tribologie est l' "étude des interactions entre surfaces solides en mouvement relatif". Lorsque deux solides sont mis en contact sous l'action d'une force normale F , une force tangentielle T apparaît et s'oppose au déplacement relatif des deux solides (Figure I-1). Le frottement est très utile lorsque l'on cherche à immobiliser deux solides l'un par rapport à l'autre. Par exemple il facilite nos déplacements en nous permettant d'exercer, sans glisser, des forces de poussée tangentielle sur le sol pour nous propulser. En revanche, il présente un inconvénient dès lors que l'objectif est de mettre en mouvement relatif deux solides

I.2 Le but de la tribologie

La tribologie entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels : conservation de l'énergie, un compte rendu du département de l'énergie américain estimait que le développement de la tribologie pouvait réduire la consommation énergétique de ce pays de 11%. Elle veille aussi à assurer :

- Le bon fonctionnement et la fiabilité des machines.

- Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes.
- Améliorer le rendement et la longévité des machines.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine du transport.
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques [2].

I.3 Lois empiriques du frottement

Depuis quelques millénaires, on s'intéresse aux problèmes de frottement entre deux surfaces solides et à l'énergie dissipée par le frottement [4- 5-6]. Leonard de Vinci et Amontons ont été les premiers à étudier le frottement. Leurs résultats ont été confirmés par Coulomb. Ces résultats sont formalisés selon les lois classiques de frottement :

1. Le coefficient de frottement statique est le rapport entre la force tangentielle nécessaire pour provoquer le mouvement du frotteur et la force normale appliquée,
2. Le coefficient de frottement dynamique est le rapport entre la force tangentielle nécessaire pour maintenir le mouvement du frotteur et la force normale appliquée,
3. La force de frottement est proportionnelle à la charge normale appliquée. Le coefficient de frottement est constant pour un couple de matériaux en frottement,
4. Le coefficient de frottement est indépendant de la surface de contact apparente,
5. La force de frottement est indépendante de la vitesse de frottement,
6. Le coefficient de frottement statique est supérieur au coefficient de frottement dynamique. [7]

I.4 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 est donc caractérisé par les paramètres tribométriques, associés avec les conditions opérationnelles, les paramètres microstructuraux des

matériaux et les paramètres d'interactions dépendant de contact et des modes de lubrifications. [3]

I.4.1 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 . [3]

I.4.2 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)

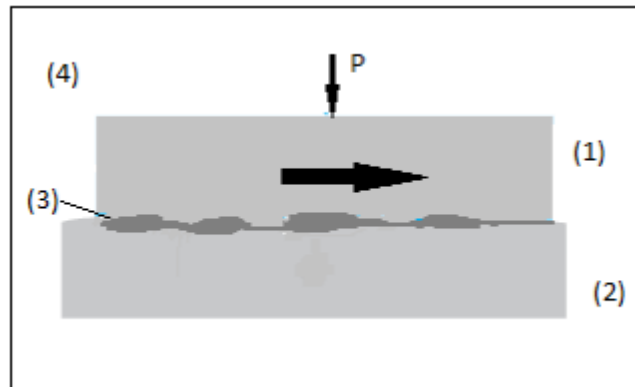


Figure I-2: Composants d'un tribo-système. [3]

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. [3]

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 ^{eme} 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. [3]

I.4.3 Les paramètres d'interaction

Ils caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants du tribosystème 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-chimie 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.

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. [3]

I.4.4 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.5 Mesures tribométriques

- Le coefficient de frottement μ
- L'énergie de frottement E_f .
- Le taux d'usure k .
- Le produit $P \cdot V$. [3]

I.5.1 Le frottement

En physique, le frottement 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 de frottement créé sur un corps est opposée au déplacement de ce corps [3].

a. Le coefficient de frottement

Le coefficient de frottement μ est le rapport de la force tangentielle de frottement F_T , lorsque les pièces glissent, à la force normale F_N qui les applique l'une sur l'autre [8].

$$\mu = F_T / F_N$$

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 μ), correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement. Le champ des contraintes mécaniques superficielles augmente 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'engrainement, 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. [9]

b. Essais tribologiques

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_r /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 le plan, avec mouvement alternatif ou continu.

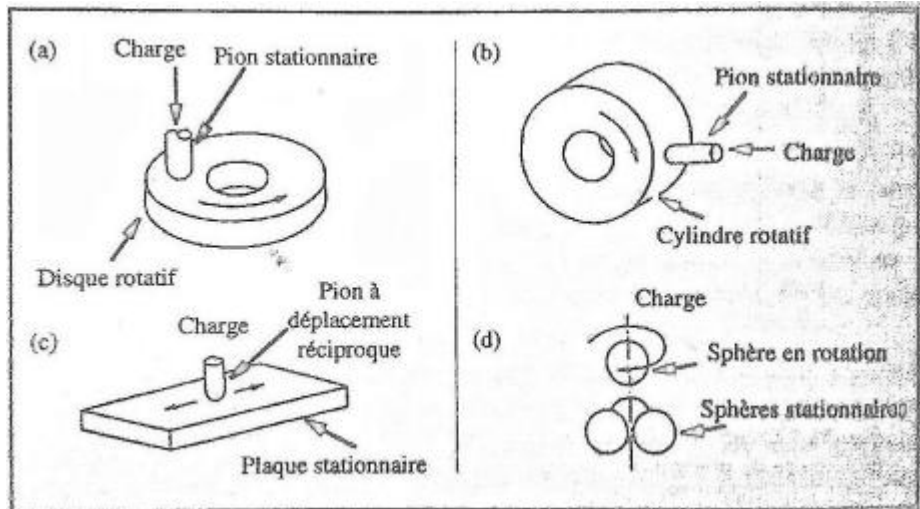


Figure I-3 : Quatre types de configuration d'essais tribologique classique. [3]

- (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]

c. Exemples d'essais

1- Essai d'usure abrasive à 2 corps : grains abrasifs solidaires d'une surface en contact, papier abrasif.

- Essai d'usure abrasive à 3 corps : grains abrasifs libres à l'interface des surfaces en déplacement relatif.

- 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.[3]

I.5.2 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 .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].

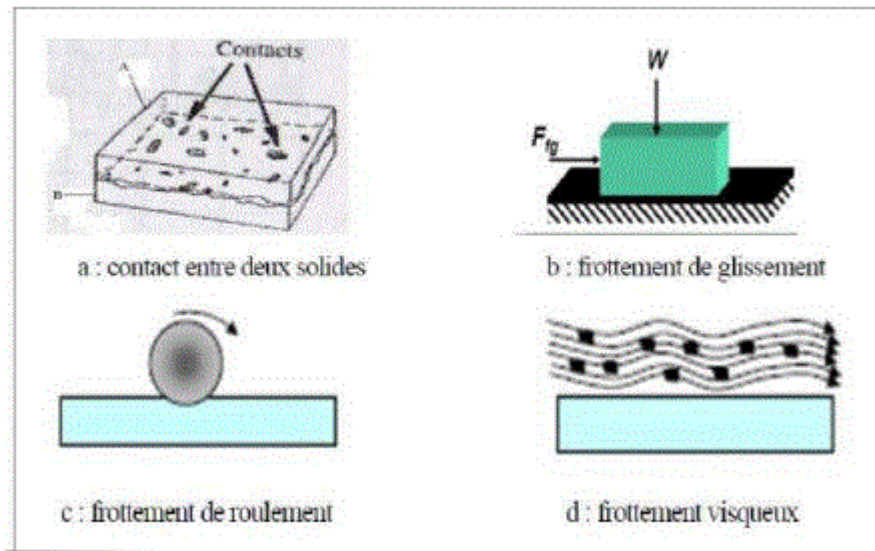


Figure I-4 : Différents types de frottement. [11]

d. Frottement sec

Le frottement sec est indépendant de la vitesse de glissement. il existe deux types de frottement sec :

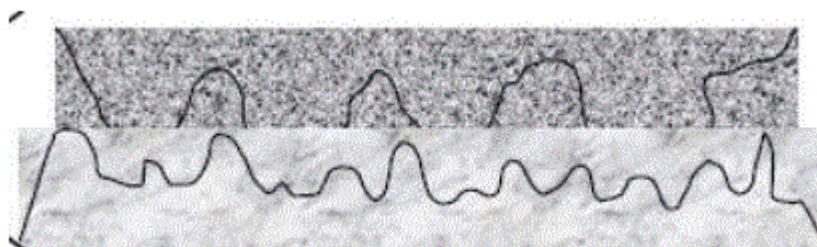


Figure I-5: Frottements secs, vue microscopique de la zone de contact. [11]

e. Frottement statique

Le frottement statique est une force (ou un couple) qui tend à garder un corps en état statique ou bien, qui empêche un mouvement de démarrer. C'est lui qui nous permet d'avancer en s'appuyant sur le sol. [11]

$$FFS_{max} = \mu_s \cdot F_N$$

f. *Frottement cinétique*

C'est la force qui tend à freiner un corps glissant sur une surface. Cette force FFC est égale et de sens opposé à la force motrice nécessaire pour maintenir le corps en mouvement uniforme. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{FFC} = \mu\mathbf{C} \cdot \mathbf{FN}$$

Le frottement cinétique est habituellement inférieur au frottement statique. Cela veut dire qu'il faut une force plus grande pour vaincre l'adhérence (due au frottement statique). Les frottements cinétiques contrairement aux frottements statiques, consomment de l'énergie puisqu'ils entraînent des déplacements. [11]

I.5.3 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. [11]

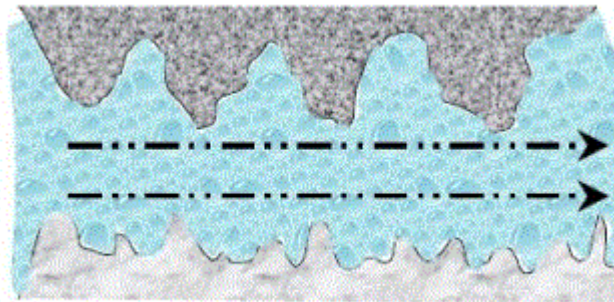


Figure I-6: Frottement visqueux, vue microscopique. [11]

I.5.4 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. [3]

I.6 L'usure

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 événement 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. [12]

I.6.1 Les principales causes de l'usure

Les causes possibles de l'usure sont extrêmement variées ; 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. [12]

I.6.2 Types d'usure

L'usure par transfert ou adhésion

Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique. [7]

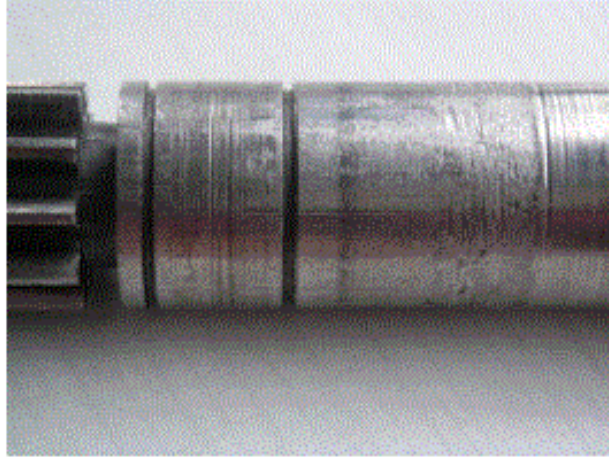


Figure I-7 : Traces d'usure. [1]

Ces débris peuvent être progressivement évacués du contact en laissant une surface très réactive siège d'un nouveau processus de dégradation. Si les débris restent piégés dans le contact, les aires réelles de contact s'accroissent et assurent un rôle de portance (effet de séparation des antagonistes, les débris supportent les pressions, l'usure et le coefficient de frottement sont moindres) [17].

L'usure par abrasion :

Elle se caractérise par la présence dans le contact d'un état de surface rugueux ou par pénétration dans le matériau le plus tendre de particules dures provenant des débris d'usure du contact ou lié à la pollution du milieu. Ce mécanisme de dégradation qui fait intervenir dans les premiers instants uniquement les corps antagonistes, devient rapidement une usure à trois corps (figure.5a). Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages, des arrachements de particules [17]

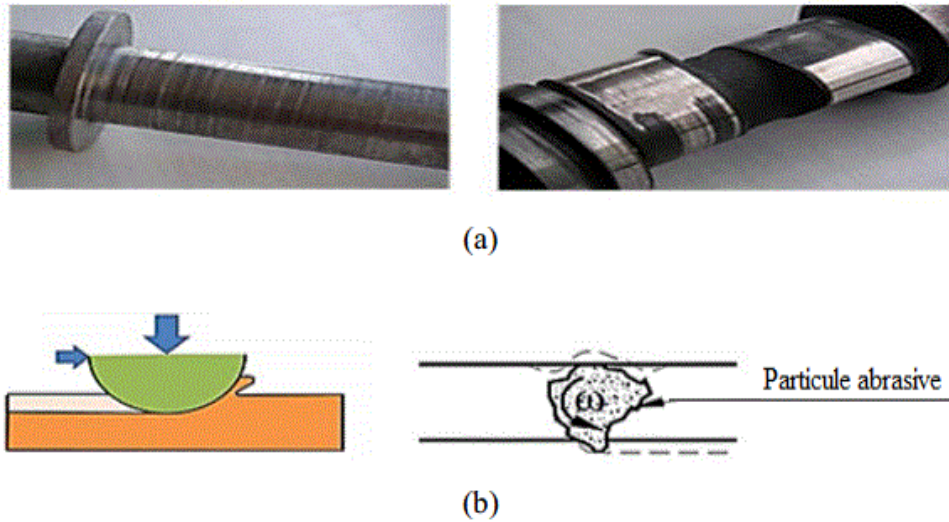


Figure I-8 : a) Etat de surface présentant une usure par abrasion ; b) Mécanisme d'usure par abrasion [12].

On distingue l'usure abrasive par l'enlèvement de matière à l'interface, on parle aussi d'abrasion à deux corps et à trois corps (figure. 8 b).

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. [7]

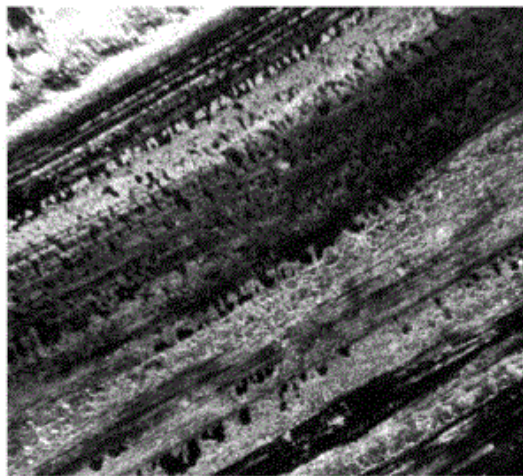


Figure I-9: Usure corrosive sur portée de soupape moteur. Oxydation par les gaz chauds. (Grossissement 30). [7]

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.

L'usure par fatigue

Elle est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. L'usure par fatigue se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique. Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales [17].

I.7 La surface en tribologie

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. Une surface peut être caractérisée par ces propriétés mécaniques, physicochimiques, topographiques ou structurales. L'ensemble de ces caractéristiques définit ce que l'on appelle l'état de surface. [3]

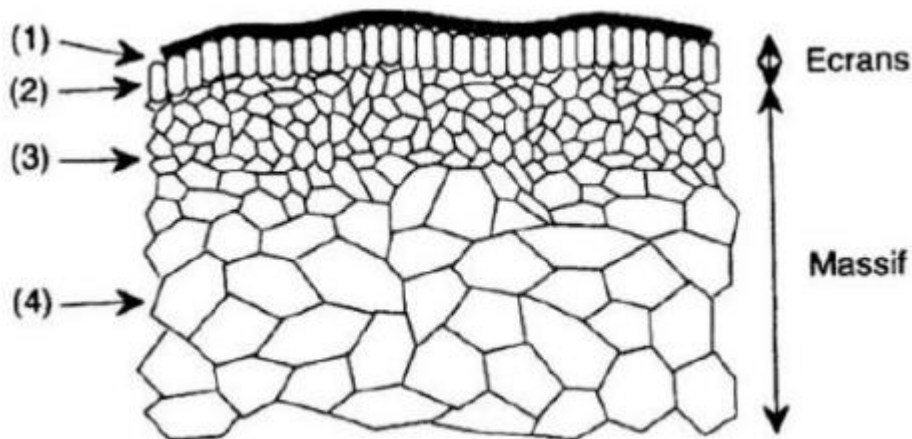


Figure I-10: Vue théorique en coupe d'une surface. [4]

I.7.1 Etat de surface

Une surface peut être caractérisée par ces propriétés mécaniques, physicochimiques, topographiques ou structurales. L'ensemble de ces caractéristiques définit ce que l'on appelle l'état de surface. [3]

I.7.2 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. [5]

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

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

Profondeur moyenne de rugosité R

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

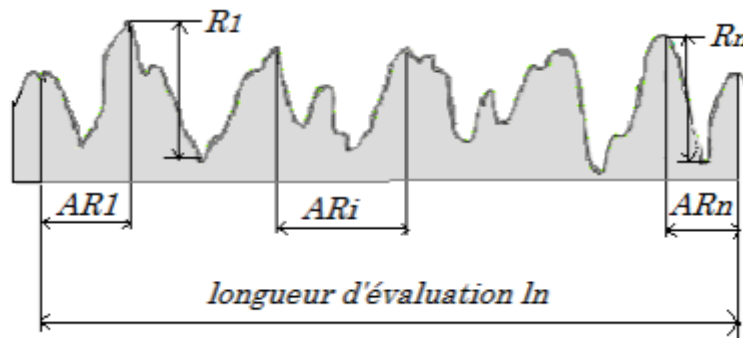


Figure I-11: Paramètres de rugosité liés aux motifs [3]

Paramètres liés à la ligne moyenne

Ecart moyen arithmétique du profil (R_a) R_a 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.

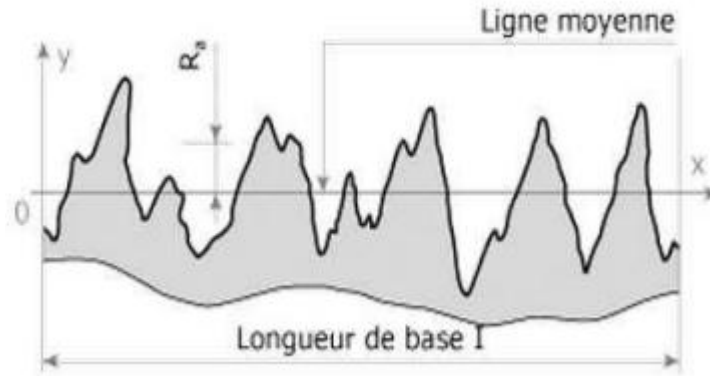


Figure I-12: Paramètres de rugosité liés à la ligne moyenne. [3]

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

Hauteur maximale du profil R_z :

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

Hauteur maximale des saillies R_p :

C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne. [5]

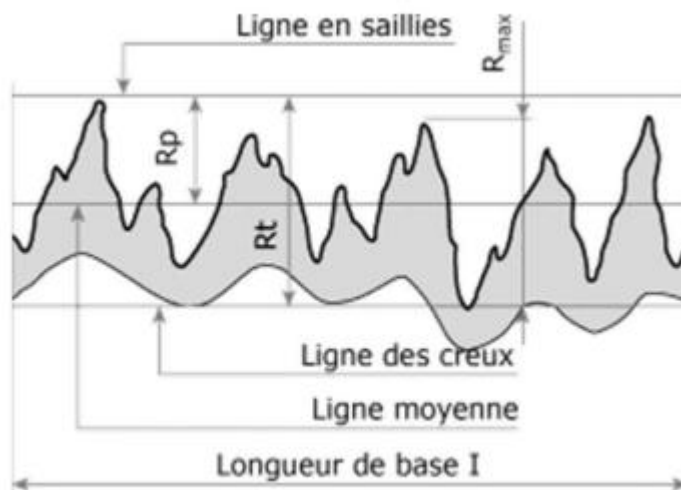


Figure I-13: Hauteur du profil. [5]

I.8 Tribologie des polymères

Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de L'enchaînement répété d'un même motif, le monomère (du grec monos : un seul ou une seule, et mérous : partie), reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes. [8].

Les polymères sont utilisés dans un grand nombre d'applications, où la résistance à l'usure et la corrosion, la légèreté, la facilité de mise en œuvre et de maintenance, le coût, sont les critères principaux qui orientent le choix. On retrouve en tribologie deux grandes familles de polymère utilisées en génie mécanique :

-Les polymères thermoplastique

-Les polymères thermoplastique [14]

I.8.1 Mesure du frottement des polymères :

La tribologie des contacts polymère/métal et polymère/polymère est plus complexe que la tribologie métal/métal ou métal/céramique en raison de la souplesse relative des polymères par rapport aux métaux. Mais plus important encore, la tribologie des polymères ne suit pas les lois du frottement, car les coefficients de frottement, varient en fonction de plusieurs paramètres tels que la température, la charge normale et la pression. Les polymères s'écoulent facilement à des pressions et des températures modestes. C'est pourquoi les polymères et les composites polymères sont utilisés à des charges, des vitesses et des températures relativement faibles, inférieures à celles des métaux et des céramiques. Les polymères ont généralement une faible conductivité thermique, ce qui se traduit par des températures d'interface élevées. Comme la tribologie des polymères ne suit pas les lois de frottement établies, un lieu de fonction PV doit être déterminé pour chaque nouvelle application de polymère. Les conditions de conception doivent rester à l'intérieur de l'enveloppe PV de chaque polymère [13].

I.8.2 Classification

Les polymères sont constitués de la répétition d'un grand nombre de motifs élémentaires :

les unités monomères. Dans le cas où les macromolécules ne contient qu'un type de monomères, il s'agit d'un homopolymère. Si les unités constitutives sont nombreuses, on parle alors de copoly-mère. il existe plusieurs types de copolymères :

- les copolymères alternés (chaîne A-B-A-B-A-....)
- les copolymères séquencés (chaîne A-A-A-B-B-B-....)
- les copolymères statistiques (chaîne A-B-B-A-B-A-B-A-A-....). [9]

La structure du polymère représente la façon dont les longues chaînes moléculaires de base sont reliées entre elles pour former le matériau. La disposition des chaînes entre elles ainsi que la densité des points de liaison vont modifier profondément les caractéristiques macroscopiques du polymère. Un polymère peut adopter trois structures moléculaires, présentées dans la (fig. I.9)

- **linéaire** : La macromolécule se présente sous la forme d'une longue chaîne ;
- **branchée** : Une longue chaîne sur laquelle viennent s'embrancher des chaînes de longueur variable, en général plus petites ;
- **en réseau** : Les chaînes sont reliées entre elles en plusieurs points formant un réseau

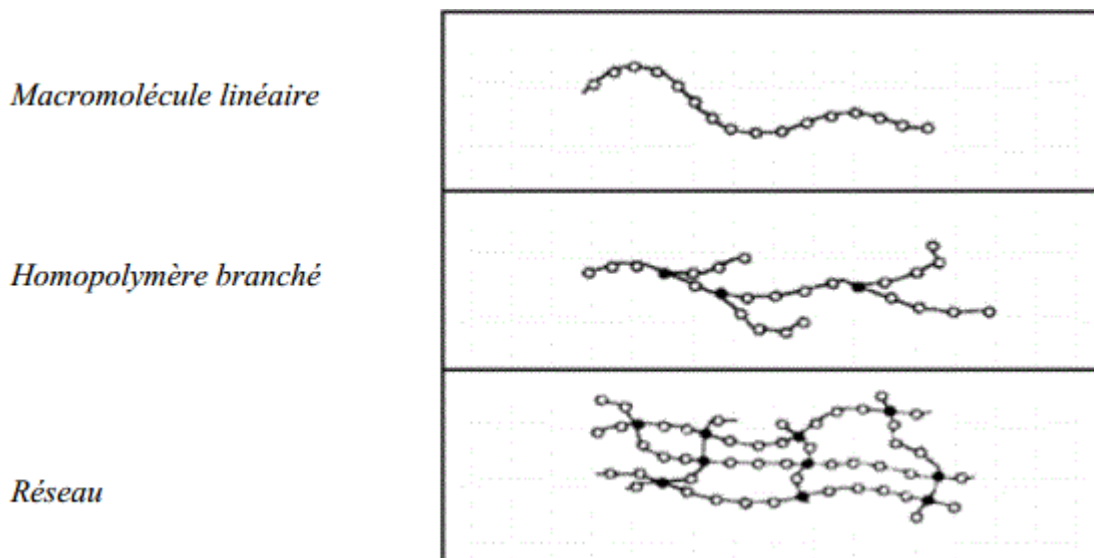


Figure I-14: Structures des chaînes moléculaires. [10]

Ces différentes structures vont permettre de classer les polymères en deux grandes catégories :
Les thermoplastiques et les thermodurcissables

g. Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des solides généralement souples, formés de chaînes distinctes bien compactées et plus ou moins linéaires. Ils présentent la particularité de s'écouler à la chaleur, ce qui facilite leur mise en forme. Ils sont repartis en trois grandes familles : les amorphes, cristallins et les semi-cristallins. Cette morphologie (fig. II.5) a une influence importante sur les propriétés des polymères thermoplastiques [10].

Polymères amorphes

Dans un polymère amorphe, les chaînes se présentent sous la forme de pelotes statistiques (fig. I.10). Les chaînes sont enchevêtrées et on note l'absence de structure ordonnée. Quand on chauffe un polymère amorphe, il subit une transition douce de l'état solide à l'état fluide, il n'y a donc pas de température de fusion. En effet, la structure des chaînes de macromolécule en pelote compacte et désordonnée empêche une transition brutale entre les états solide et liquide. Cependant, une brusque variation de mobilité moléculaire est observée à une température appelée température de transition vitreuse notée T_g . [10]

Polymères cristallins

Un polymère purement cristallin, quant à lui, présente des chaînes qui s'arrangent de façon ordonnée. Contrairement aux amorphes, les cristallins possèdent une température de fusion notée T_m . Cependant, un polymère totalement cristallin n'existe pas en réalité. Il reste toujours des défauts ou bien l'extrémité des chaînes qui ne peuvent adopter une structure cristalline. [10]

Polymères semi-cristallins

Les semi-cristallins présentent à la fois une partie amorphe ou les chaînes moléculaires sont désordonnées et une partie cristalline ordonnée (Figure I-15).

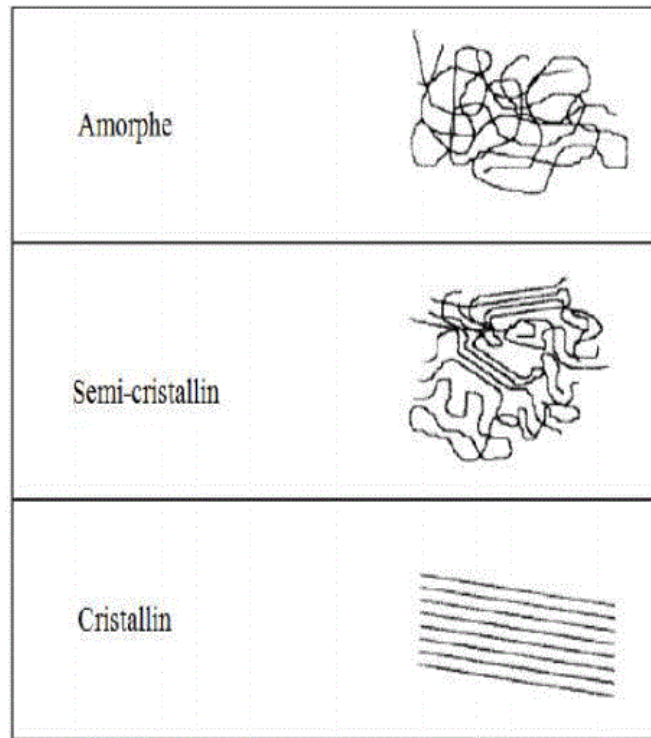


Figure I-15: Morphologie des thermoplastiques [10]

Ils présentent donc à la fois une température de transition vitreuse (correspondant à la mobilité de la phase amorphe) et une température de fusion (pour laquelle la phase cristalline se liquéfie). On a donc toujours $T_g < T_f$. Les polymères semi-cristallins peuvent être caractérisés par leur taux de cristallinité ce qui représente la fraction massique ou molaire d'unités structurales cristallisées par rapport à la totalité des unités présentes. [10]

Avantages		Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité dans le temps (pas de polymérisation au cours du temps) - Recyclable (on peut les liquéfier à nouveau) - Facile à réparer (par soudure ou collage) - Post-formable 		<ul style="list-style-type: none"> - Forte viscosité du fondu - Fluage
Amorphe	Cristallin	
<ul style="list-style-type: none"> - Bonne résistance aux impacts - module plus élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Moindre retrait au refroidissement - plus grande dureté 	

Tableau I.2: Avantages et Inconvénients des thermoplastiques de façon générale. [9]

h. 1.23.2 Thermodurcissables

Les thermodurcissables ou thermodurcis ont une structure en réseau tridimensionnel, ce qui rend leur fusion impossible. La rigidité ainsi que la stabilité thermique du polymère est liée au taux de réticulation, c'est à dire à la densité de points de liaison entre les chaînes macromoléculaires. [9]

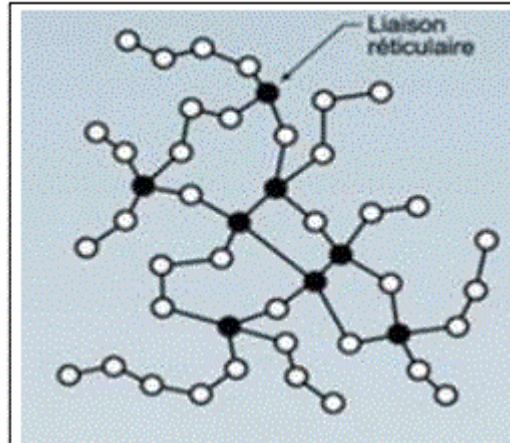


Figure I-16: Morphologie des thermodurcissables. [9]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Faibles viscosité de la résine - Bon mouillage des fibres - Bon stabilité thermique après polymérisation - Résistance aux agressions chimiques - Peu sensible au fluage 	<ul style="list-style-type: none"> - Cassant - Non recyclable par techniques standard - Non pas formable

Tableau I-2: Avantages et Inconvénients des thermodurcissables de façon générale [9]

i. Les élastomères

Les élastomères sont des solides souples et gonflables formés de chaînes peu compactées et (à température ambiante) très mobiles (matériau caoutchouteux)

Avantages et désavantages des polymères en tribologie :

- a) Les polymères sont viscoélastiques et beaucoup plus sensibles au fluage que les métaux
- b) Les résistances et les modules limites sont sensiblement inférieurs, généralement d'un facteur 10.

- c) Les coefficients de dilatation thermique sont relativement élevés, généralement de quelques dizaines de fois supérieures à ceux de l'acier, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité dimensionnelle.
- d)) Certains polymères absorbent facilement les fluides, y compris l'eau de l'environnement (par exemple, les nylons), ce qui peut également affecter la stabilité dimensionnelle.
- e) Les conductivités thermiques sont très faibles, d'un ordre important de celle de l'acier, et la dissipation de la chaleur de frottement est donc médiocre.
- f) Les températures limites associées au ramollissement, à la fusion, à l'oxydation, à la dégradation thermique sont toutes relativement faibles (<300°C).

Toutes ces caractéristiques constituent des limites à l'utilisation des polymères en tribologie, mais elles sont compensées es par un certain nombre d'avantages particuliers.

- g) Les propriétés physiques et mécaniques des polymères peuvent être variées sur une large gamme par un choix approprié de type de polymère et/ou de charges et de renforcements.
- h) Certains matériaux, notamment les thermoplastiques, sont bon marché et faciles à fabriquer des formes complexes.
- i) De nombreux polymères, en particulier les fluorocarbures, sont très résistants aux attaques chimiques des milieux agressifs, tels que les acides et les alcalis. ---
- j) Les coefficients de frottement lors d'un glissement non lubrifié contre eux-mêmes ou contre des métaux sont relativement faibles.
- k) Les taux d'usure lors du glissement contre des surfaces métalliques lisses sont également relativement faibles, et les polymères ne présentent normalement pas d'entaille ou de grippage.
- l) L'entretien périodique, c'est-à-dire la lubrification par des fluides, peut souvent être supprimée.
- m) En présence de lubrifiants fluides, les polymères subissent une lubrification élasto hydrodynamique plus facilement que les métaux [13].

I.9 Valeur du produit $P \times V$

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

- En effet, les valeurs du produit PV sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur PV en MPa. m/s est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème/contact. Selon les configurations, la pression est la pression hertzienne de contact (contact non conforme, bille/plan par exemple) ou la pression apparente (contact conforme, plan/plan par exemple).

- La valeur p_v multipliée par le coefficient de frottement : $p_v \mu$ (**W/mm²**), détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact A (Friction Power Intensité) ; 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 4), 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 :

- **La pression de contact** détermine directement la sollicitation mécanique de la pièce (effet de plastification locale, fatigue...) et de ses couches superficielles (rupture des films superficiels...) : avec le coefficient de frottement, elle détermine les contraintes de traction arrière qui peuvent provoquer la fissuration des couches superficielles fragiles.

- **La vitesse de glissement** est le facteur le plus influent sur les températures éclair, (flash température) c'est-à-dire les températures transitoires, mais très élevées sur les aires réelles de contact, où les deux corps ne sont séparés que par des films très minces, comme en frottement sec ou en régime mixte. L'élévation locale de la température de contact est susceptible de modifier la nature et les propriétés des surfaces (transitions de phase, ramollissement excessif, fusion... !) ainsi que la rhéologie de l'interface et surtout du lubrifiant liquide, et la réactivité

chimique des pièces et du lubrifiant (oxydation...).

Les températures éclair des surfaces sont peu prises en compte, car difficiles à calculer par manque de données sur les grandeurs thermo physiques, et leur évolution avec la température **T**, et sur la micro géométrie des aspérités des pièces. Elles ont toutefois une forte influence en frottement sec où l'augmentation de la vitesse amène la température de surface des pièces à des valeurs proches de la température de fusion ou de transition vitreuse du matériau (polymère).

Les domaines d'usure (douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans le plan (p, v) (voir figure 4) : 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 4 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 pv et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine. [13].

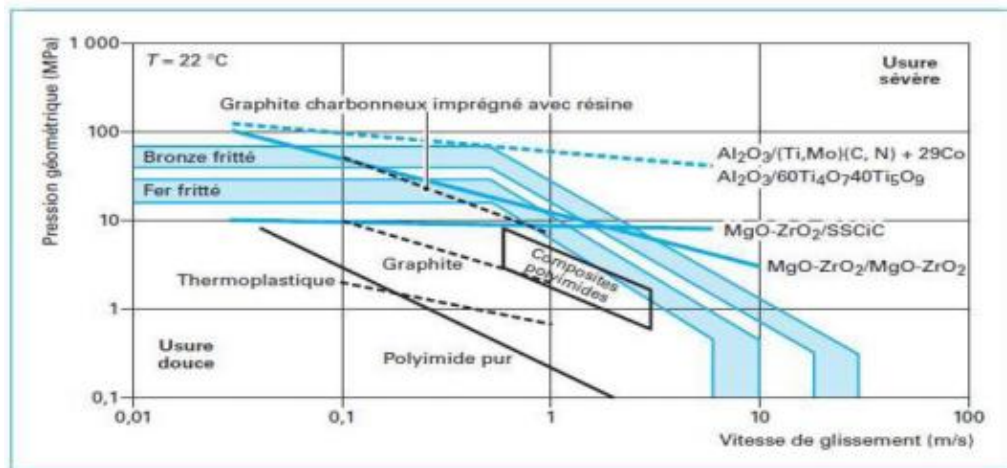


Figure I-17: Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste Acier pour fer et bronze frittés. [13].

Pour obtenir un meilleur matériau tribologique à base de polymères, on procède à l'adjonction de lubrifiants solides. [13].

I.10 Conclusion

L'état de l'art est la tribologie. Comme on l'a vu précédemment, il existe de nombreux types d'usure. Chacun de ces mécanismes se différencie par ses conditions d'apparition et par ses effets. Tous ont cependant en commun d'être difficiles à étudier de façon quantitative, car il faut pouvoir pour cela, distinguer ce qui est propre aux matériaux des corps en contact, de ce qui est propre aux aspects structures. Il en va de même pour la cinématique (géométrie des surfaces et nature du mouvement) qui engendre des champs thermomécaniques responsables de l'usure.

Chapitre II : La lubrification

II.1. Introduction :

Les problèmes de frottement préoccupaient l'humanité dès ses débuts, par exemple dans les tombes égyptiennes, les paliers des roues de chariot contenaient déjà une graisse animale lubrifiante et un bas-relief illustrant le transport d'un colosse égyptien, qui montre un homme versant un liquide dans le sillon du traîneau.

On peut dire que l'invention de la roue a été le premier pas vers la lubrification qui consiste à réduire le frottement et l'usure des surfaces en contact en introduisant un film entre les surfaces en contact glissant.

Les lubrifiants sont utilisés afin d'accroître la durée de vie des pièces frottantes et celles des mécanismes et réduire les coûts de maintenance.

II.2. La lubrification :

Un lubrifiant est un film de séparation de faible résistance au cisaillement agissant aux interfaces de deux surfaces en contact glissant et utilisé pour accomplir différents rôles. Sa fonction est de réduire le frottement et l'usure et de prévenir la défaillance des composants. [1]

Il est également utilisé pour :

_Refroidir les surfaces de frottement par la réduction de la chaleur générée par friction et de la convection dans la matière ;

→ Enlever les débris générés par le processus d'usure ;

→ Protéger les surfaces de l'eau en réduisant la corrosion ;

→ Neutraliser et protéger les surfaces métalliques des produits de combustion acides dans les moteurs.

II.3. Les lubrifiants solides :

Ils sont déposés en couches entre les solides en frottement ou comme additifs jouent le rôle d'un troisième corps qui peut se cisailer facilement peut réduire le frottement et limiter l'usure et pour la résolution des problèmes rencontrés dans le développement de matériaux avec une meilleure performance tribologique. Plusieurs facteurs influent l'efficacité des lubrifiants solides tels que : la température, l'humidité, la pression, la vitesse, ...etc. Les lubrifiants solides sont des

composés solides facilement cisailables, de structure lamellaire ou polymérique et de faible dureté. Les principaux lubrifiants solides permettant d'obtenir des coefficients de frottement maîtrisés (inférieurs à 0,20) au voisinage des températures ambiantes sont en nombre très limités. Les plus classiques sont le graphite, le bisulfure de molybdène MoS₂, tous deux d'origine naturelle et le PTFE obtenu par synthèse.

II.3.1 PTFE (Téflon)

Le PTFE (polytétrafluoréthylène) C'est un matériau thermoplastique semi-cristallin composé de fluor (F) carbone (C). et de n'ayant qu'une faible tendance à adhérer aux surfaces des autres matériaux et qui est caractérisé par un faible frottement. Température d'utilisation limitée à 300°C environ. Le téflon est utilisé en basses températures, de même que les nylons et divers polyamides. L'application des lubrifiants solides s'effectue : par frottage des surfaces avec une poudre sèche fine du lubrifiant, par incorporation à une résine ou à un liant (résines, sels métalliques, céramiques, ...etc.) sous forme de fine couches protectrices (0,02 mm), par réaction chimique avec le métal de base des surfaces à lubrifier. Par rapport aux huiles et graisses, les lubrifiants solides présentent des inconvénients. En effet, en plus du fait que le lubrifiant solide ne participe pas au refroidissement des surfaces en contact, le frottement reste assez élevé (0,02 à 0,3) et la durée de vie du filme lubrifiant est beaucoup moins importante. [16]

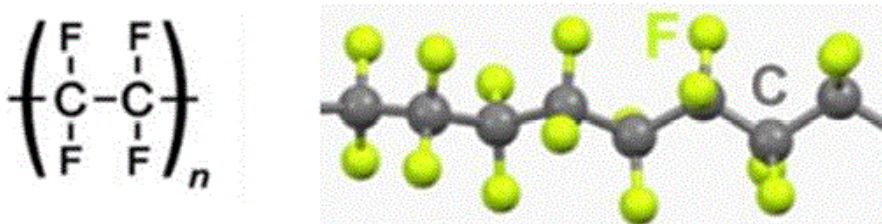


Figure II-1: (a)Formule chimique du monomère du PTFE (C₂F₄)_n (b) sa structure moléculaire.

II.3.2 Le Graphite

Son faible coefficient de frottement est dû sa structure cristalline lamellaire. Il se caractérise également par son caractère réfractaire, une conductibilité électrique élevée et une faible dureté. Au-dessus de 550°C il se combine avec l'oxygène. Le graphite peut être utilisé jusqu'à 400°C en présence d'air et jusqu'à 1900°C en atmosphère inerte. [16]

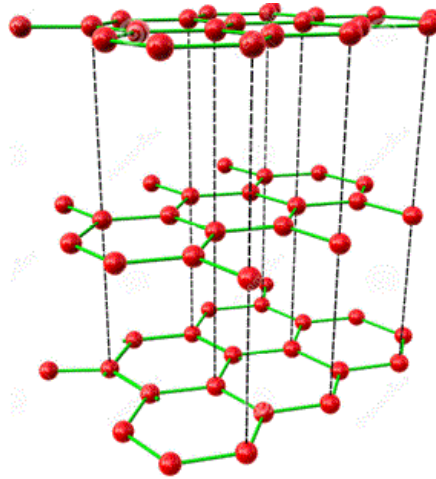


Figure II-2: Schéma montrant la structure du graphite.

II.3.3 Bisulfure de molybdène MoS_2 :

C'est un lubrifiant solide ou sec à structure en réseau à plusieurs couches (lamellaire comme le graphite) ayant une grande capacité portante et un faible coefficient de frottement. Non soluble, il reste sous forme de grains très fins en suspension (moins de $0,2 \mu\text{m}$ dans le cas de roulements) incorporés aux huiles, aux graisses, aux pâtes lubrifiantes extrêmes pressions et à des vernis de glissement. On le trouve à l'état naturel dans les mines de fer mêlé aux autres minéraux, au-dessus de 400°C il se combine avec l'oxygène (donne du MoO_3). Le bisulfure de molybdène peut être utilisé jusqu'à 450°C , au-delà il devient abrasif. [16]

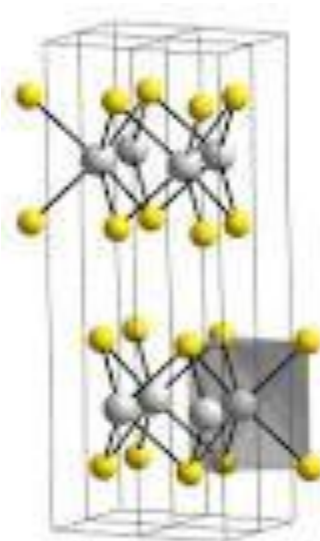


Figure II-3 : Schéma montrant la structure De MoS_2 .

II.5.2 Les lubrifiants liquides

Le lubrifiant liquide le plus utilisé est l'huile dont la composition est assez complexe :

- Environ 80 % de l'huile est constitué de ce qu'on nomme l'huile de base qui est un hydrocarbure avec une longueur de chaîne comprise entre 20 et 40 atomes de carbone lui conférant une viscosité intéressante (en dessous on trouve la famille des carburants (essence, gazole) avec des viscosités faibles, et au-dessus les goudrons, inutilisables en lubrification).
- Le reste, aux alentours de 20 %, est constitué d'un grand nombre d'additifs intervenant pour des fonctions spécifiques physiques, chimiques voire tribologiques pour améliorer, compléter les propriétés naturelles de l'huile de base. Un intérêt du lubrifiant liquide par rapport au lubrifiant solide réside dans son aptitude à évacuer la chaleur, et les faibles niveaux de frottement que l'on peut atteindre. Attention, une huile donnée va pouvoir proposer un large éventail de performances en frottement de valeurs modestes voisines de 0.10 jusqu'à des valeurs exceptionnellement basses (inférieures à 0.010). L'efficacité en frottement du film d'huile est directement liée à l'épaisseur du film formé entre les 2 pièces. En première approche, plus cette épaisseur se réduit plus le frottement augmente. Les 2 mécanismes extrêmes de fonctionnement du film d'huile (Figure II.5) sont les suivants [7].

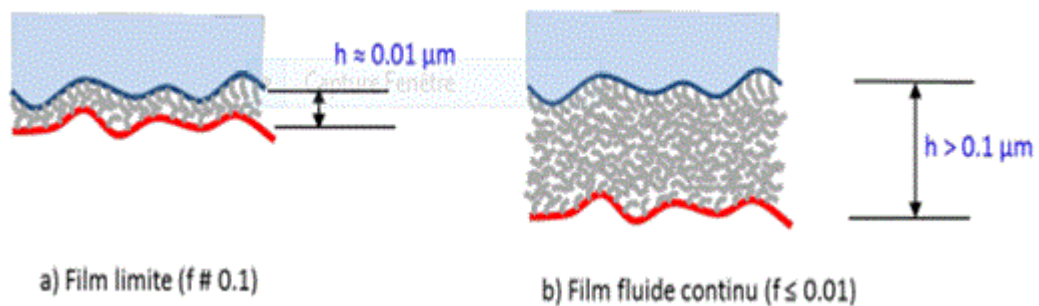


Figure II-4 : Les 2 mécanismes de fonctionnement du film d'huile.

Les huiles se caractérisent par :

- **La densité:** Les valeurs courantes de densité des huiles minérales varient entre 0.85 et 0.95 et sont en première approximation peu dépendantes de la température.
- **La couleur:** La couleur des huiles peut être affectée par la présence de pigment coloré ce qui permet de faciliter la distinction entre des huiles à performances très différentes lorsqu'elles doivent être utilisées dans un même mécanisme (par exemple des huiles hydrauliques de couleur rouge et des huiles lubrifiantes de couleur marron clair dans les automobiles).

- **Conductivité thermique:** On peut prendre comme valeur moyenne pour les huiles minérales 0.14 W/mK. Viscosité Figure 1 : C'est une des propriétés capitales des huiles de graissage qui doivent fonctionner avec un film fluide (cas b). Sa forte sensibilité à la température impose de réaliser des dimensionnements intégrant les températures extrêmes de fonctionnement.
- **L'onctuosité :** C'est la propriété d'adhérence du lubrifiant avec les surfaces des pièces en contact. Elle conditionne la solidité du film limite (Cas a). Cette propriété est essentielle dans les régimes de frottement onctueux et mixte.
- **Compressibilité :** Les huiles sont pratiquement incompressibles dans la mesure où elles sont exemptes de gaz dissous.
- **Coefficient de viscosité-pression :** Si la pression croît, la mobilité des molécules diminue et la viscosité augmente selon une loi exponentielle. Pour une huile minérale classique, la viscosité double dès que la pression augmente de 350 bars. Dans le cas de contacts localisés en mouvement sous très fortes charges, comme dans les engrenages, il faut tenir compte de cet accroissement de la viscosité sous l'effet de la pression.

II.5 Le film de transfert

La possibilité de protéger les deux surfaces antagonistes contre l'usure adhésive est l'interposition entre les deux surfaces d'un film lubrifiant ou autolubrifiant à faible résistance au cisaillement. Le film peut être (dépôts superficiels) :

-un métal mou (Sn, Cu, In) déposé en faible épaisseur sur un substrat très dur (coussinets minces, garnitures d'antifricction etc.), -des sels métalliques autolubrifiants tels que les sulfures, les chlorures, les phosphates apportés soit par traitement de surface (sulfinisation) soit par formation, par action d'additive extrême pression incorporée dans le lubrifiant (additifs soufrés, chlorés et phosphorés essentiellement),

- des composés possédant une structure favorable, se cisillant facilement par clivage tels que graphite, bisulfure de molybdène (MoS₂).

-Des matières plastiques, tels que les matériaux stratifiés (permaloy, céleron, textolite), ce sont des matériaux constitués de couches de papier, tissu, bois, etc., imprégnés de résine synthétique, fortement comprimés et agglomérés par polymérisation ou polycondensation de la résine. Le nylon et le rilsan sont des résines synthétiques possédant une grande résistance mécanique, une

grande résistance à l'usure, un faible coefficient de frottement, une marche silencieuse. Le téflon (polytétrafluoréthylène) possède un faible coefficient de frottement, une grande résistance à l'usure, une grande inertie chimique et une résistance à la chaleur et au froid.

II.6 Recherches tribologiques

Suite aux bonnes performances tribologiques que présente le PTFE, nous avons consacré dans ce chapitre, une partie bibliographique pour présenter quelques travaux scientifiques réalisés sur la tribologie de PTFE où ce dernier a été utilisé comme matrice de base et comme additif.

Le comportement tribologique du PTFE et de ses composites avec des matériaux de remplissage tels que des particules de carbone, des flocons de graphite et des fibres de verre (tableau1) a été étudié par Khedkar et al. [8]. Les expériences ont été réalisées sous une charge normale de 5N et une vitesse de glissement de 0,1m/s. Ils ont constaté que les ajouts de charges utilisés augmentent la résistance à l'usure de tous les composites étudiés. La résistance a été trouvée pour le composite contenant 18 vol. % de carbone et 7 vol. % de graphite (Fig. II.). Les valeurs du coefficient de frottement sont comprises entre 0,11 et 0,16 (Fig. II.). Ce comportement peut être attribué à la présence de particules de carbone dur, qui sont intégrées dans la matrice et confèrent une résistance supplémentaire au composite. Les tests d'usure et l'analyse SEM ont montré que l'abrasion à trois corps est probablement le mode de défaillance dominant pour le PTFE + 18 vol. % carbone + 7 vol. % graphite composite.

La désignation	Matériel	Caractéristique du matériau de remplissage
UN	PTFE pur	Poudre de PTFE pur à 99 %
B	75 % PTFE + 18 % carbone amorphe + 7 % graphite hexagonal	Particules de carbone (diamètre : 10 – 25 μm) ; paillettes de graphite (taille : 25 – 50 μm)
C	85 % PTFE + 15 % verre E	Fibres de verre E (diamètre : 10 μm ; longueur : 50 – 75 μm)
D	75 % PTFE + 25 % verre E	

Tableau II-1 : Composition (vol. %) des matériaux.

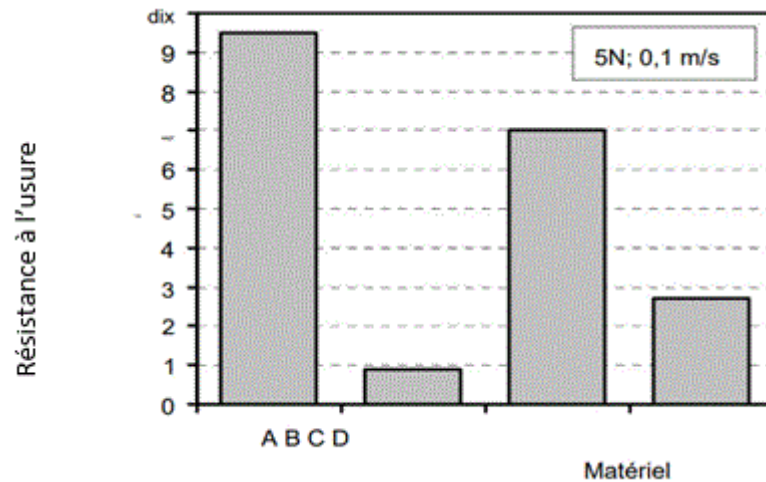


Figure II-5: Taux d'usure spécifique moyen du PTFE et des composites PTFE (adopté).

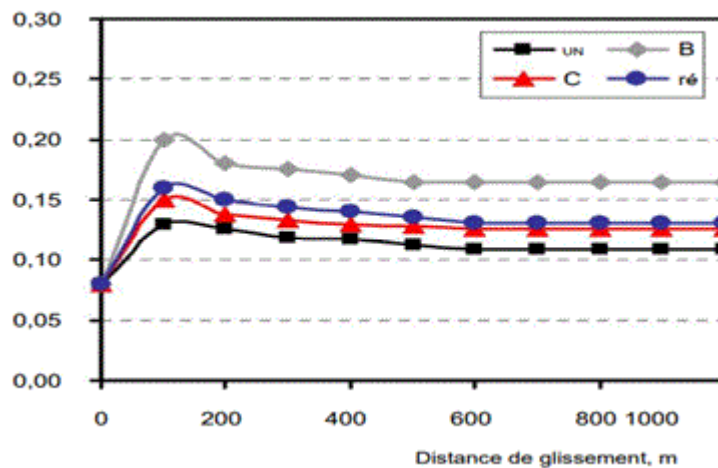


Figure II-6: Comportement en frottement du PTFE et des composites PTFE.

Unal et al. [11] ont étudié des composites PTFE chargés de fibres de verre (17 %), de bronze (25 %) ou de carbone (35 %). Les expériences ont été réalisées dans une plage de charge de 5 à 30 N (0,18 à 1,06 MPa) et une plage de vitesse de 0,32 à 1,28 m/s. Les résultats ont montré que, pour le PTFE pur et ses composites, le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la charge. Pour les gammes de charge et de vitesse utilisées dans cette étude, le coefficient de frottement a montré une très faible sensibilité à la vitesse de glissement et une grande sensibilité à la charge appliquée, en particulier à des valeurs de charge élevées. La figure II.8 montre cette sensibilité pour le PTFE pur, mais elle est également similaire pour les composites. L'ajout de fibres de verre, de bronze et de charges de carbone au PTFE s'est avéré efficace pour réduire le taux d'usure. Les réductions maximales du taux d'usure et du coefficient de frottement ont été

obtenues par du PTFE renforcé avec 17 % de fibres de verre. Le taux d'usure spécifique du PTFE + 17 % de fibres de verre est inférieur à celui du PTFE pur. Au moyen de la microscopie, on remarque que le PTFE chargé de fibres de verre forme un bon film de transfert mince et uniforme qui a une influence positive sur le taux d'usure.

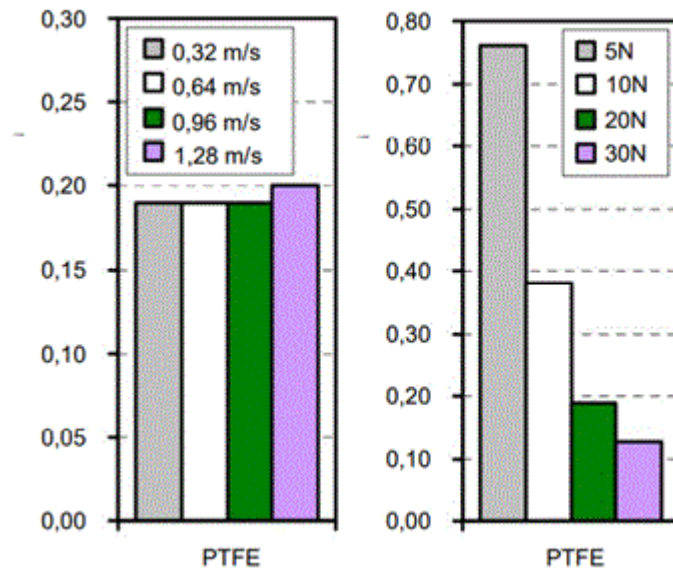


Figure II-7 : variation du coefficient de frottement du PTFE en fonction de la vitesse de glissement (pour une charge de 20 N) et à la charge appliquée (pour une vitesse de 0,32 m/s).

Conclusion

La lubrification solides et liquides tels que le graphite, le PTFE et le MoS₂ sont très importante, elle permet d'avoir un bon fonctionnement de machines. Néanmoins, dans la majorité des entreprises la mise en place d'une gestion efficace de lubrification est négligée. Le développement de nouveaux lubrifiants requiert une connaissance du rôle que joue la tribologie dans l'amélioration des performances des éléments de machine, en contribuant à la longévité des organes tout en minimisant l'énergie.

Chapitre III : Etude Expérimentale du Comportement Tribologique de PTFE

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la partie essentielle de notre travail qui consiste à étudier expérimentalement le comportement tribologique d'un polymère PTFE. Ce travail a pour but de déterminer les paramètres tribologiques de matériau sous différentes vitesses et pressions afin d'évaluer leur effet sur la variation de coefficient de frottement.

Pour atteindre notre objectif, plusieurs démarches ont été suivies. Tout d'abord, nous décrivons le tribomètre pion-disque utilisé durant notre étude et son mode de fonctionnement afin de pouvoir effectuer facilement nos tests d'usure et de récupérer les données en temps réel. Par la suite, nous présentons notre matériau d'étude et détaillons les conditions d'essais choisies. Enfin, nous avons regroupé les résultats des expériences qui nous ont permis de déterminer les caractéristiques tribologiques mécaniques du matériau qui seront analysées et interprétées.

III.2 Dispositif expérimental

Le dispositif utilisé est un tribomètre pion-disque vertical (voir figure III.1). 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.

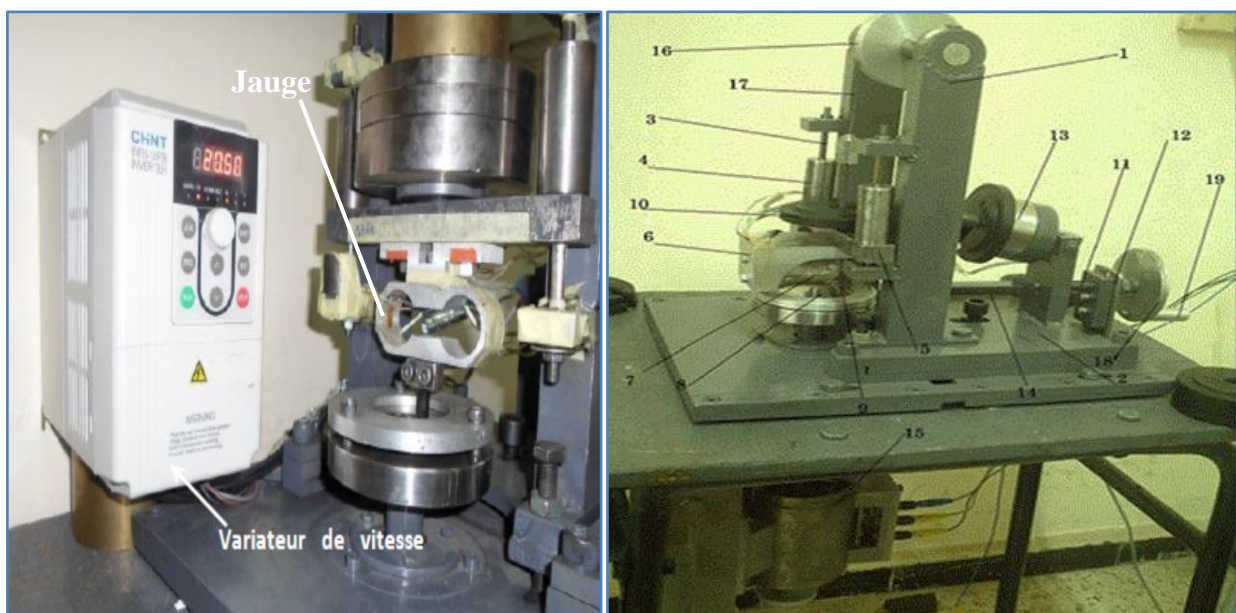


Figure III-1. Tribomètre de type pion disque.

Avec

1- Bâti	7- Capteur de force	13- Masse morte
2- Plaque coulissante	8- Disque	14- Liaison glissière
3- Axes	9- Pion	15- Moteur électrique
4- Bague de guidage	10- Charge	16- Poulie
5- Poutre	11- Vis de manœuvre	17- Câbles
6- Porte capteur	12- Plaque	18- Volant
		19- Poignée.

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 entraine la broche porte disque.

III.2.1 Réglage de la vitesse de glissement

Le tribomètre est doté de deux mécanismes distincts permettant le réglage de la vitesse de glissement. Le premier permet de régler la variation de la vitesse linéaire en changeant le rayon de la piste de glissement du pion (09) sur le disque (08) grâce à la liaison glissière (14) de la plaque coulissante (02) (figure III.2).

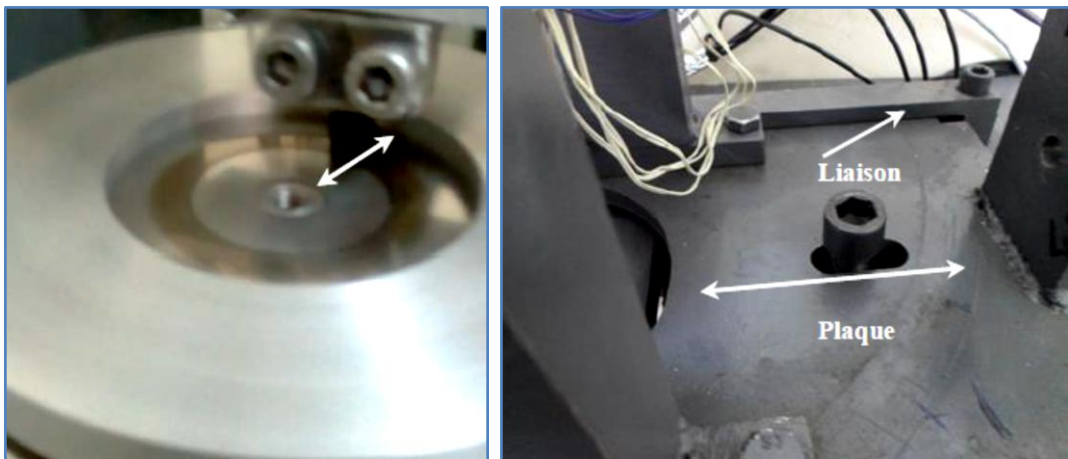


Figure III-2. Glissière de réglage du rayon de glissement.

Le deuxième c'est le variateur de vitesse CHINT série NVF2G permettant la variation de la vitesse allant de 0 jusqu'à 3600 tour par minute, sur un rayon du disque qui varie de 0 à 25mm. Ce système, nous permet de régler la vitesse de glissement au niveau du contact entre 0,01 et 10 m/s d'une manière exacte.

III.3 Réglage de la planéité du disque

Afin de réduire les vibrations et éviter les impacts de l'échantillon contre le disque, il serait indispensable de régler la planéité du disque. Pour cela, le disque (08) est déposé sur trois supports en caoutchouc collés sur un plateau, comme illustré sur la figure III.3.

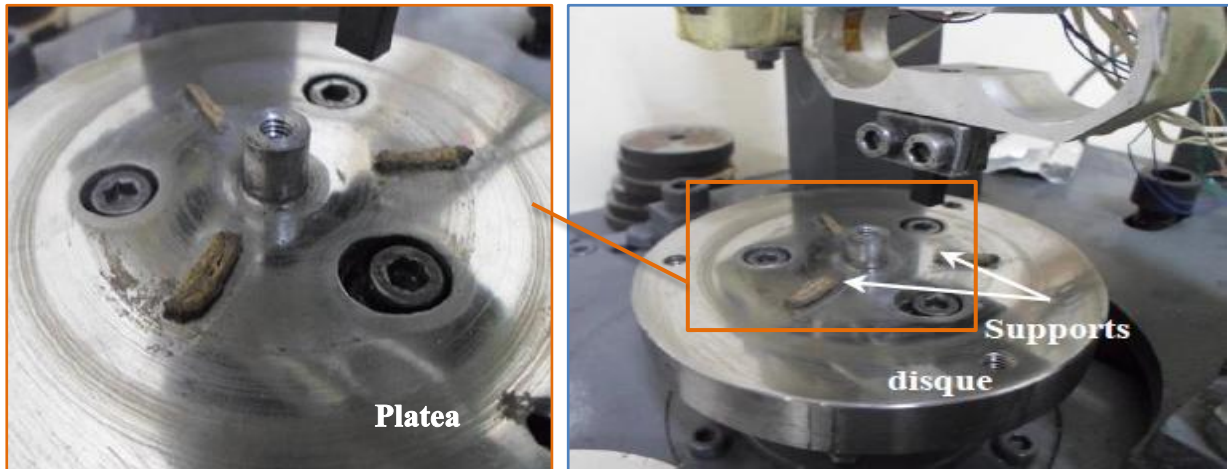


Figure III-3. Supports disque pour le réglage de planéité.

Après le serrage du disque sur le plateau, un comparateur palpeur sera fixé sur la table du tribomètre et positionné sur la surface de contact du disque comme le montre la figure III.4. Le réglage de la planéité se fait au fur et mesure que nous tournons manuellement le disque, la position de l'aiguille est remise à la position 0 selon que nous serrons ou bien nous desserrons les vis de fixation.



Figure III-4. Réglage de planéité lors du montage du disque.

III.4 Système d'acquisition des données

Les données du frottement obtenues lors des essais effectués sur le tribomètre seront récupérées sous forme d'un signal électronique permettant leur acquisition à l'aide d'une chaîne qui contient un capteur à jauge de contraintes, un conditionneur, une carte de conversion analogique numérique et un ordinateur sur lequel l'évolution du coefficient de frottement est affichée et enregistrée en temps réel. Le cheminement du signal de sortie depuis sa sortie du capteur jusqu'à l'ordinateur est donné par la figure III.5.

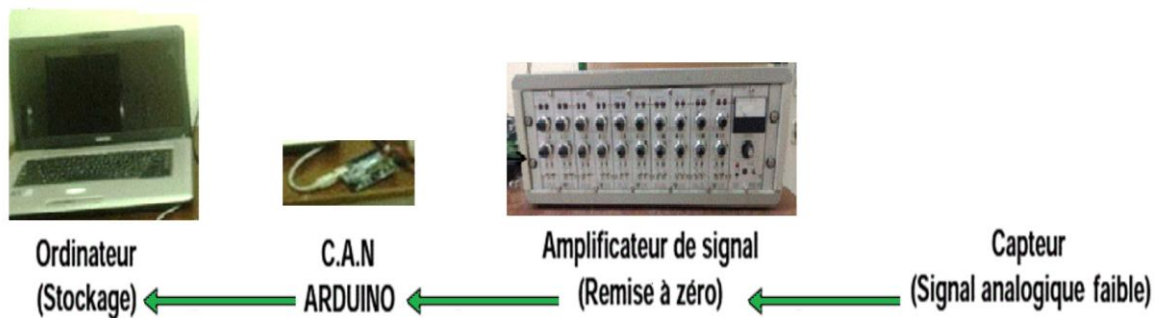


Figure III-5. Chaîne d'acquisition du signal de sortie.

• Capteur de force

La mesure de la force normale et tangentielle due aux frottements sont obtenues grâce à un capteur de force à base des jauges de contraintes. La forme du corps du capteur et l'emplacement judicieux des 8 jauges permettent de mesurer simultanément et indépendamment l'effort tangentiel de frottement F_T et l'effort normal F_N de contact (figure III.6). Les quatre jauges de contraintes (G1 G2 G3 G4) ne mesurent que la force normale, l'effet de la force tangentielle s'annule automatiquement grâce à l'alternance des signes dans la tension de sortie du pont de Wheatstone. Il en est de même pour la mesure de la force tangentielle.

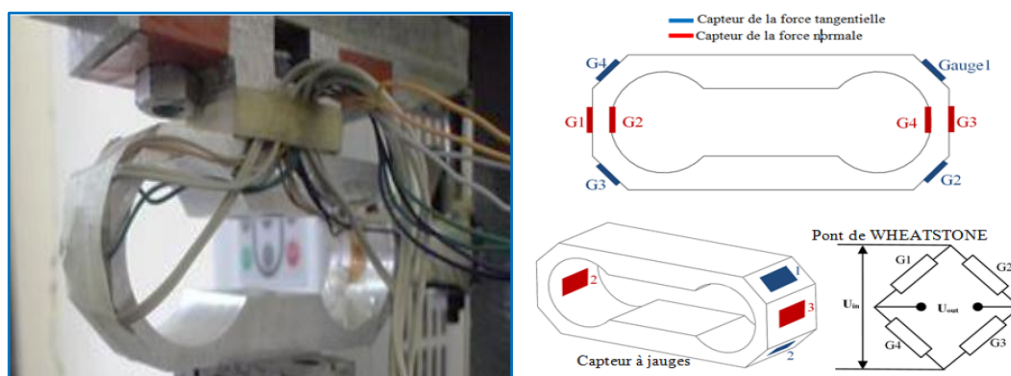


Figure III-6. Capteur et les zones d'emplacement de la jauge.

Une des difficultés d'utilisation des jauges d'extensométrie réside dans leur sensibilité à la température surtout pendant les longues périodes de tests d'usure en raison des fluctuations de la température ambiante ou de la température imposée à l'échantillon. Le tribomètre pion-disque élimine la dérive thermique qui se produit grâce à la configuration du montage en pont complet des deux capteurs de force de frottement, l'effet de la température s'annule automatiquement suite à l'alternance des signes dans la tension de sortie du pont de Wheatstone (équation III.1).

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{III.1}$$

• Amplificateur de signal

Le signal électrique issu de capteur (thermocouple, ponts de mesure) est généralement de faible niveau, susceptible d'être bruité...etc. La sortie des capteurs doit être transformée via un circuit de conditionnement. Ce dernier modifie alors le signal en une forme compatible avec l'entrée d'un CAN (convertisseur analogique numérique). Ce conditionnement peut assurer l'amplification, la remise à zéro (l'offset) et le filtrage.

L'appareil utilisé de fabrication « Vischay Micromesure », est constituée de dix entrées analogiques et dix sorties (voir figure III.5). Cet appareil assure l'alimentation des deux ponts de Wheatstone avec une tension qui peut atteindre 12V. Le signal délivré par le capteur (en microvolt μV) est amplifié 2000 fois environ puis filtré. Par la suite, le signal est reçu par la carte CAN.

• 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.

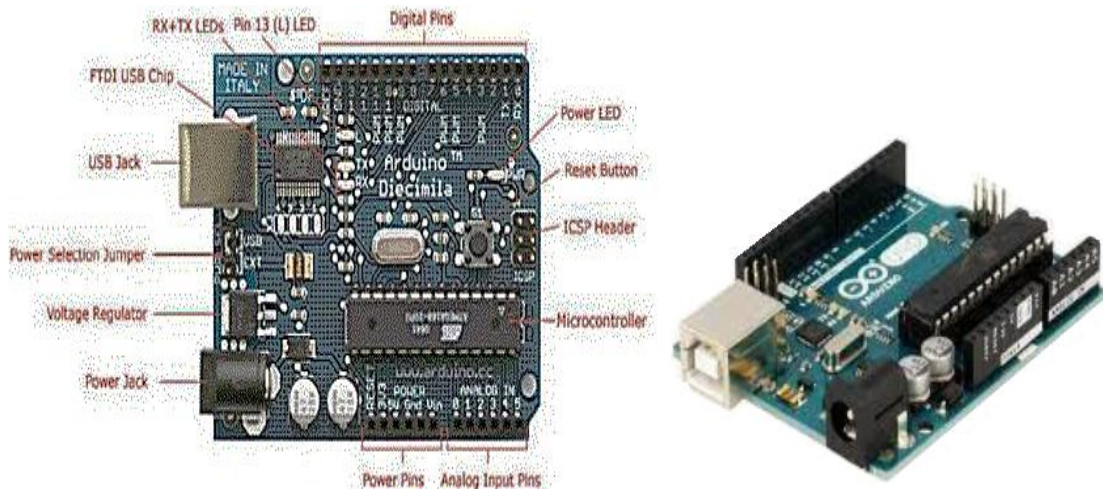


Figure III-7. La carte ARDOUINO.

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 "ARDOUINO 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.

• Ordinateur

La lecture des données se fait par un ordinateur connecté au matériel d'acquisition par le biais d'un port tout en permettant de transférer les différentes instructions et données mesurées. le signal de sortie est récupéré par l'ordinateur dans le but d'analyser et traiter les résultats grâce aux logiciels compatibles avec carte arduino tel que le logiciel arduino, Matlab, labview ...etc.

Chapitre III : Etude Expérimentale du Comportement Tribologique de PTFE

Pour la lecture et l'enregistrement des données obtenues par les essais tribologique, nous avons utilisé le logiciel LabView. Ce logiciel est doté d'un module qui permet la lecture des données numériques de la carte arduino.

Le logiciel **LABVIEW** est le cœur d'une plate-forme de conception de systèmes de mesure et de contrôle. Créé à l'origine sur Apple Macintosh en 1986, LABVIEW est utilisé principalement pour la mesure par acquisition de données, pour le contrôle d'instruments et pour l'automatisme industriel.

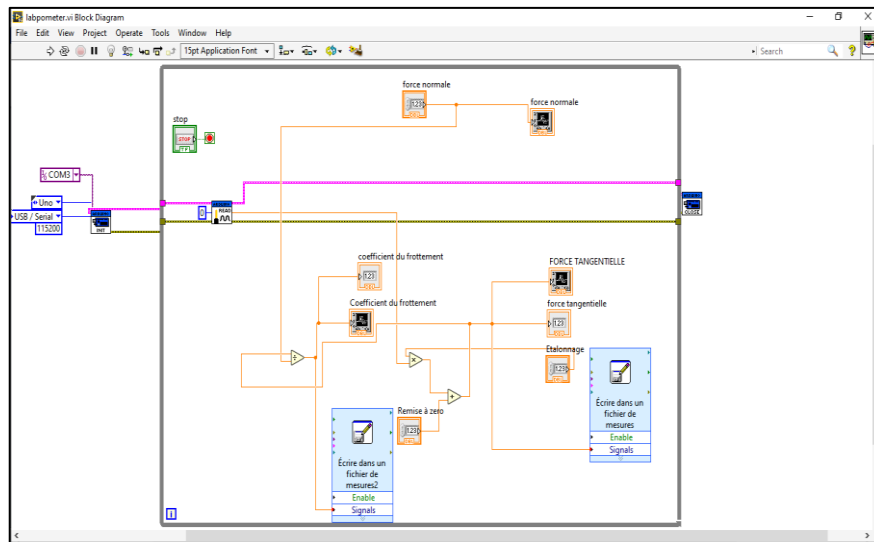


Figure III-8. Fenêtre du programme écrit sous labview.

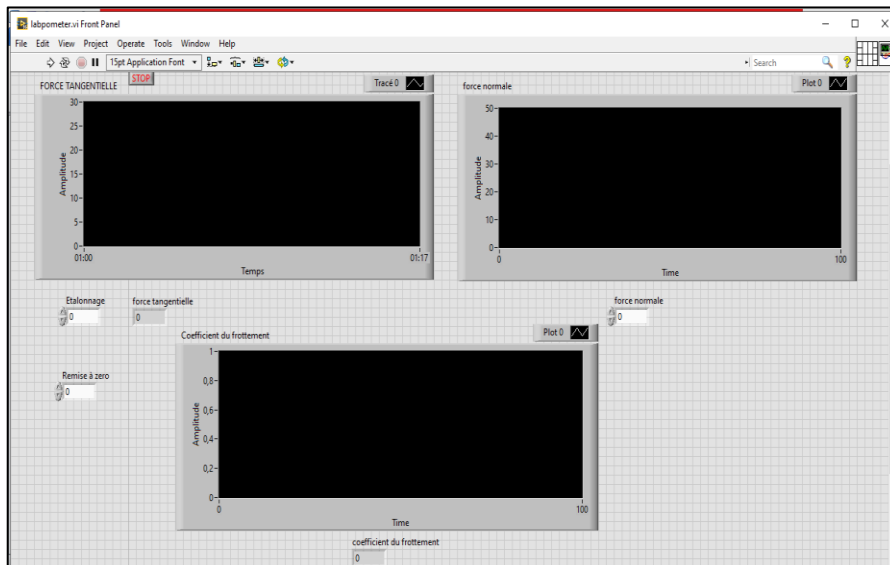


Figure III-9. Fenêtre de lecture de données sur labview.

III.5 Etalonnage du capteur de force

Nous avons placé un mécanisme de façon qu'on puisse étalonner l'effort tangentiel en mettant plusieurs chargements tout en observant la variation de la tension de sortie du capteur de force présentée par la figure III.10.

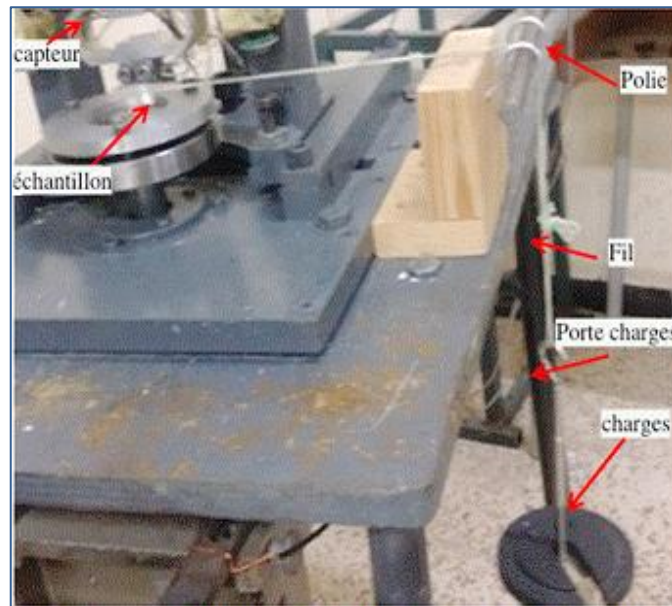


Figure III-10. Mécanisme d'étalonnage.

Le signal de sortie du capteur de force (Tension exprimée en millivolts) est amplifié jusqu'à 2000X (volt) et filtré à l'aide de la chaîne d'acquisition pour réduire les bruits parasites. Par la suite, le signal analogique est converti en valeurs numériques par le CAN (convertisseur analogique numérique) Arduino. Une fois que les résultats sont obtenus, nous procédons à l'opération d'étalonnage qui consiste à faire correspondre à chaque chargement effectué une valeur numérique.

Les résultats sont reproduits sur une courbe qui représente le signal de sortie (valeurs numériques) en fonction de la charge appliquée ($U=f(N)$), où la tangente de la droite correspond au facteur d'étalonnage.

Enfin, le signal de sortie est récupéré par l'ordinateur dans le but d'analyser et traiter les résultats grâce au logiciel LABVIEW. La courbe d'étalonnage du signal obtenue est donnée par la figure III.11)

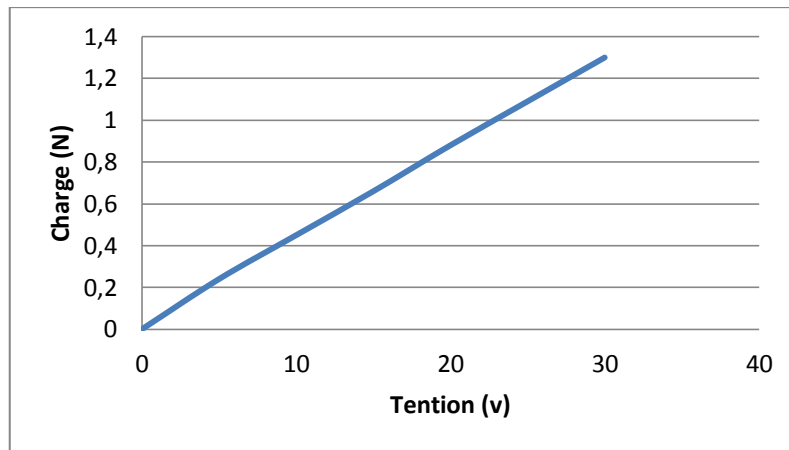


Figure III-11. Droite d'étalonnage de l'effort tangentiel.

III.6. Matériaux et géométrie des éprouvettes

Les dimensions du disque et du pion sont représentées sur la figure III.12.

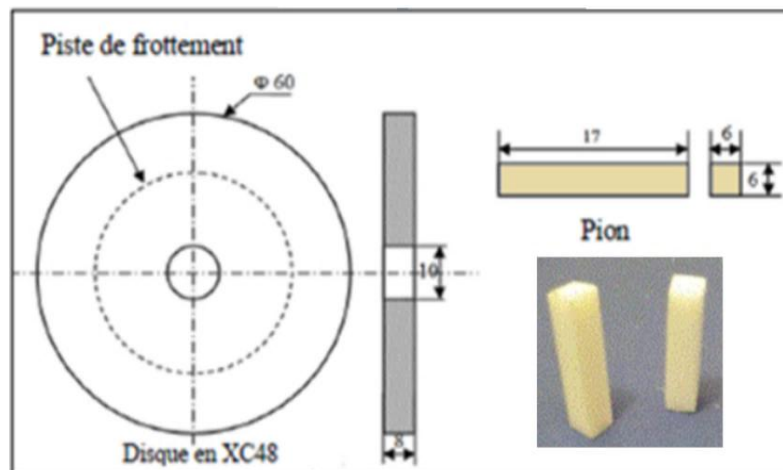


Figure III-12. Géométrie du disque et le pion.

• **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.

• **Pion**, est de forme prismatique de dimensions de 6x6 mm² de section et 17 mm de longueur 6*6*17 mm, obtenu à partir de barre de polytétrafluoréthylène (PTFE) découpée par une scie à métaux.

- Le polytétrafluoroéthylène (sigle PTFE), 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.

III.6. 1. Traitement thermique des disques

Le traitement thermique est réalisé au laboratoire des sciences des matériaux du département de génie mécanique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou. Les disques utilisés dans notre étude ont subi les traitements suivants :

• La trempe

Avant de commencer les essais, 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 (voir figure III.13) de puissance 11 kW dont la température maximale est 1200°C. Le processus de la trempe est comme suit :

- Chauffage lent (≈ 400 °C), puis rapide avec une vitesse de chauffage (5°C/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°.

- Maintien à cette température pendant une heure (1h) pour permettre la dissolution des carbures.

- Refroidissement rapide dans l'eau froide.



Figure III-13. Four électrique.

• **Le 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 III-14. Polisseuse de marque KNUTH-ROTOR (laboratoire SDM).

• **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 WOLPERT DIA TESTOR RC présenté par la figure III.15. Après avoir fini les essais de dureté nous avons choisi des disques avec une dureté de 40 à 50 HV.



figure III-15. Duromètre de type WOLPERT DIA TESTOR RC.

III.6 Tests tribologiques

Afin de déterminer les caractéristiques tribologiques de nos échantillons, plusieurs essais ont été effectués dans le but de déterminer le coefficient de frottement et la perte de masse. Vu que, le coefficient de frottement de la majorité des matériaux dépend de plusieurs paramètres tels que [1] : la nature des matériaux en contact, la rugosité des surfaces en contact, la température, l'humidité relative, la force normale, la vitesse de glissement.

Dans notre étude, nous nous sommes intéressés à suivre la variation de coefficient de frottement en fonction de diverses charges et vitesses de glissement contrôlées dans des conditions normales à température ambiante. Pour chaque essai, nous enregistrons des graphiques qui seront présentés ci- après. Pour bien mener notre travail, nous avons procédé comme suite :

III.7 Mesure de la rugosité des disques

La rugosité joue un rôle primordial dans le comportement de frottement. Il existe toujours une rugosité optimale pour minimiser le frottement. En effet, lorsque la rugosité de la surface en contact est faible, la surface réelle de contact s'accroît, favorisant ainsi la composante adhésive du frottement. Par contre, si les surfaces de contact sont excessivement rugueuses, la composante de déformation plastique sera plus importante. Donc, entre ces deux cas extrêmes, il y a une valeur optimale de rugosité qui donne un coefficient de frottement faible [2].

Les paramètres de rugosités des disques ont été mesurés à l'aide du rugosimètre à palpeur de marque **MITUTOYO SJ.201** illustré par la figure III.16. Les valeurs obtenues sont regroupées au tableau III.1. La rugosité moyenne des disques indiquée est approximativement de $Ra = 0.12$.



Figure III-16. Rugosimètre.

Rugosité	RA	RY	RZ	RQ
D₁	0.12	1.55	0.98	0.17
D₂	0.12	1.41	0.95	0.17
D₃	0.12	1.59	0.89	0.16

Tableau III-1. Paramètres de rugosité des surfaces des disques [3].

Le tableau III.1, présente les rugosités minimales et maximales de chaque paramètre de rugosité. La figure III.17 décrit la signification de chaque paramètre de rugosité tels que RY, RQ et RZ.

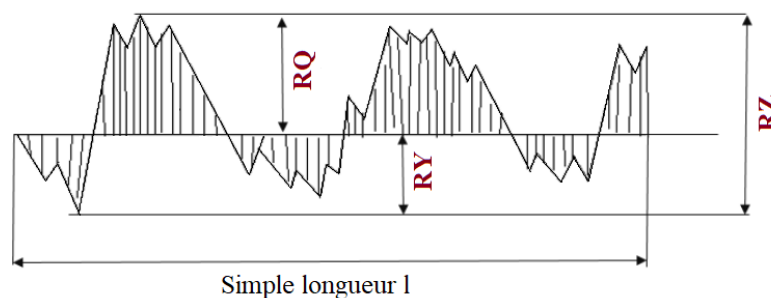


Figure III-17. Signification des paramètres de rugosité [3].

Ra est la hauteur moyenne arithmétique de la surface. C'est une valeur absolue de la différence de hauteur de chaque point par rapport à la moyenne arithmétique de la surface.

III.8 Coefficient de frottement

La mesure du coefficient du frottement a été effectuée sur une plage de vitesse allant de 0.5 m/s à 1.5 m/s et une gamme de pression de 1 MPa à 3 MPa. Pour chaque variété de vitesses et de pression, une série de trois tests réalisés pour chaque variété. Pour chaque essai, nous enregistrons les graphiques de la force normale F_n et de la force de frottement tangentielle F_t en fonction du temps. L'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps $\mu(t)$ est déduite des graphiques de $F_n(t)$ et $F_t(t)$ donnée par la relation III.2.

$$\mu = \frac{F_n}{F_t} \quad \text{III.2}$$

Durant les essais, nous avons remarqué une grande dispersion des résultats des essais de frottement, et c'est la raison pour laquelle l'utilisation de ce type d'essai présente un frein important dans le monde industriel. De plus, les courbes obtenues présentent des fluctuations remarquables comme illustrée pas la figure III.18, ce qui peut être expliqué aux vibrations qui sont la principale cause ainsi que pour la dispersion.

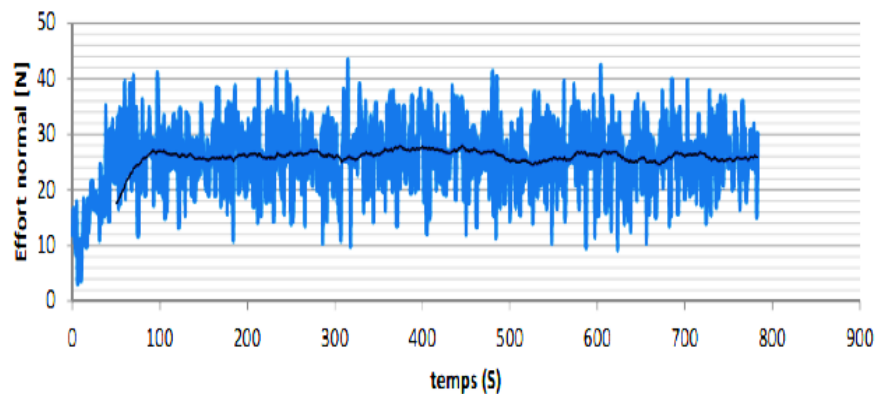


Figure III-18. Evolution de l'effort normal en fonction du temps.

Notamment, ils existent d'autres phénomènes qui peuvent influencer les résultats tels que, la mauvaise planéité du disque, la rugosité des surfaces, la résonance du tribomètre ainsi que les moyens d'acquisition et de traitement du signal.

Pour bien mener notre travail et donner de bons résultats, nous allons présenter les différentes courbes obtenues en fonction de la variation des deux paramètres, tout en utilisant des courbes de tendance moyennes mobiles.

- Coefficient de frottement pour $V=0.5$ m/s et $P=2$ MPa

La courbe d'évolution présentée par la figure III.19, montre que la courbe **moyenne mobile** nous permet de lire facilement la valeur du coefficient de frottement $\mu=0.05$.

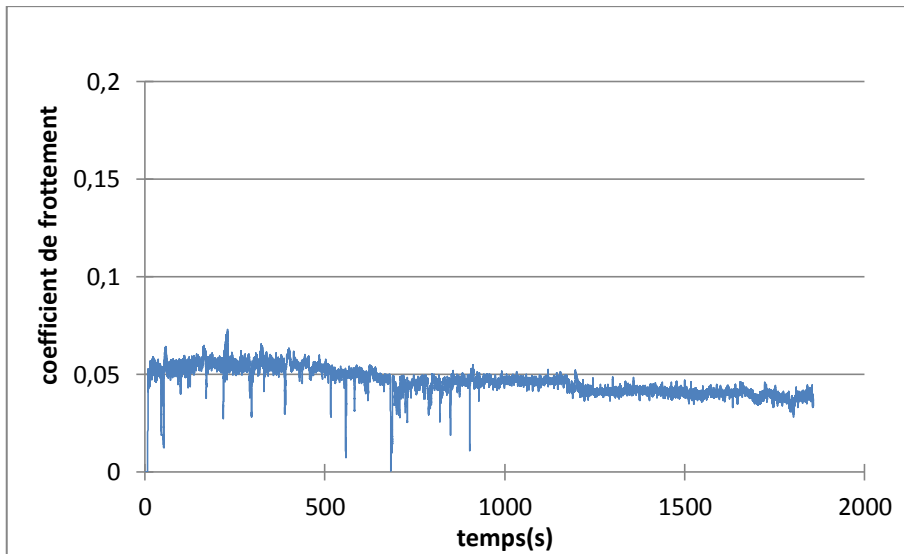


Figure III-19. Variation de coefficient de frottement à $V=0.5$ m/s et $P=2$ MPa.

- Coefficient de frottement pour $V=1$ m/s pour différentes pressions

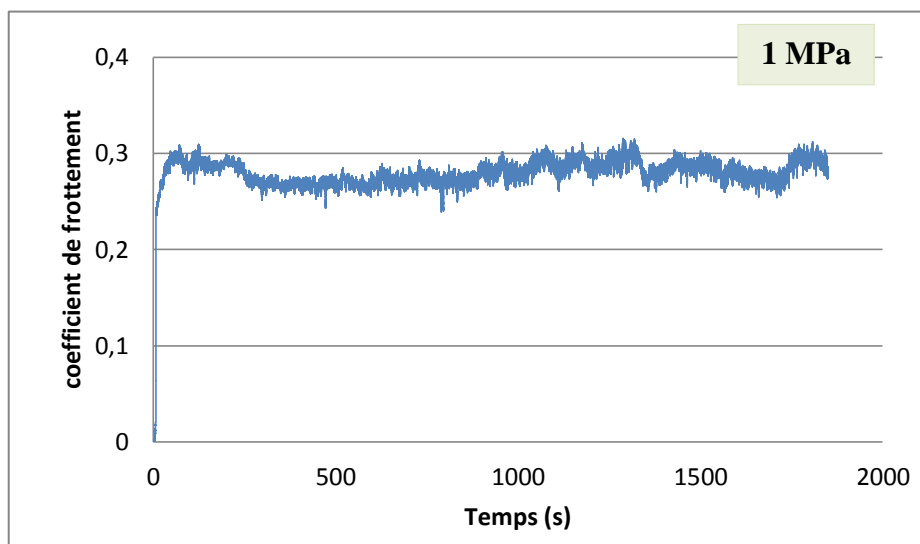


Figure III-20. Variation de coefficient de frottement à $V=0.5$ m/s et $P=1$ MPa.

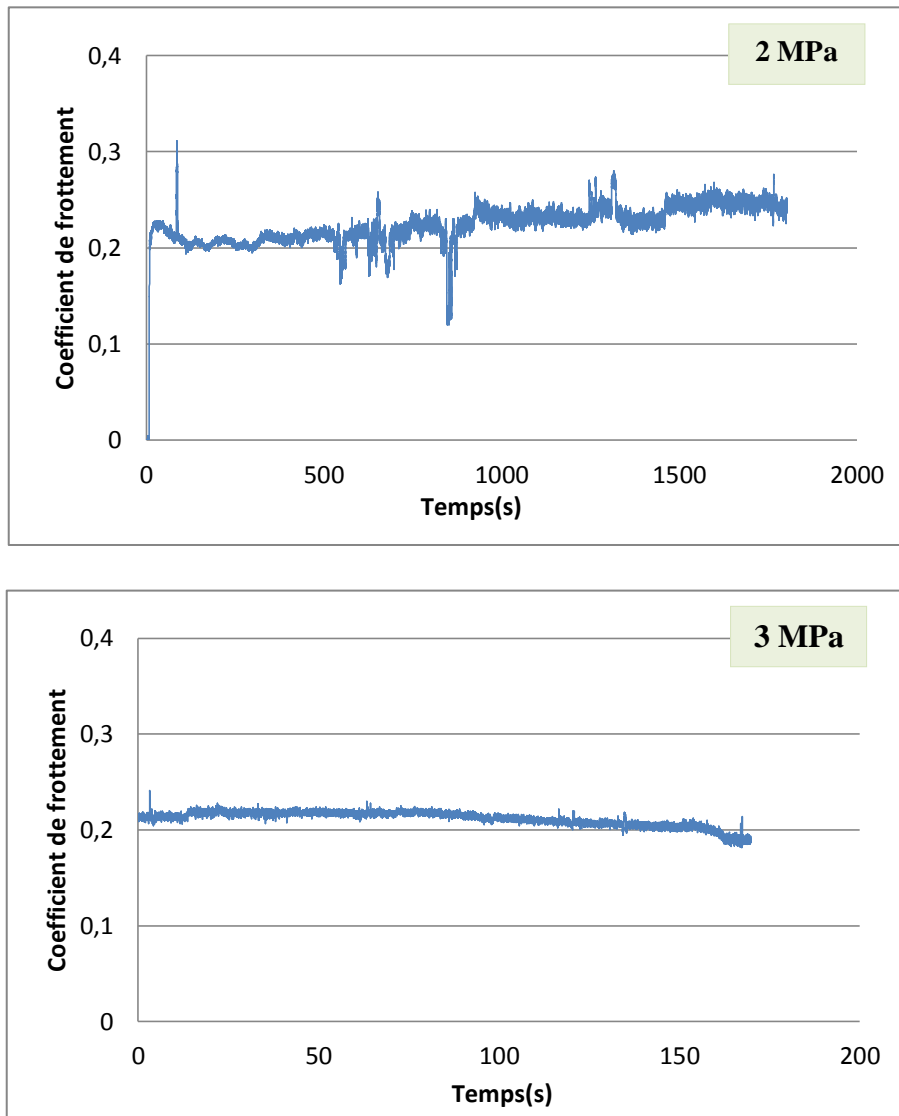


Figure III-20. Variation de coefficient de frottement à $V=1$ m/s et différentes pressions.

Les graphes présentés par la figure III.20 des différentes pressions révèlent que le coefficient de frottement est sensiblement influencé par la pression, où nous avons enregistré une valeur de μ proche de 0.3 et diminue au fur à mesure la pression augmente. La variation de coefficient de frottement est inversement proportionnelle avec la pression.

Il est à noter que le pion est déformé à partir de 150 secondes pour une pression de 3 MPa. Contrairement aux autres pressions, où nous avons remarqué que les pions ne présentent aucune déformation.

• Coefficient de frottement pour $V=1.5$ m/s pour différentes pressions

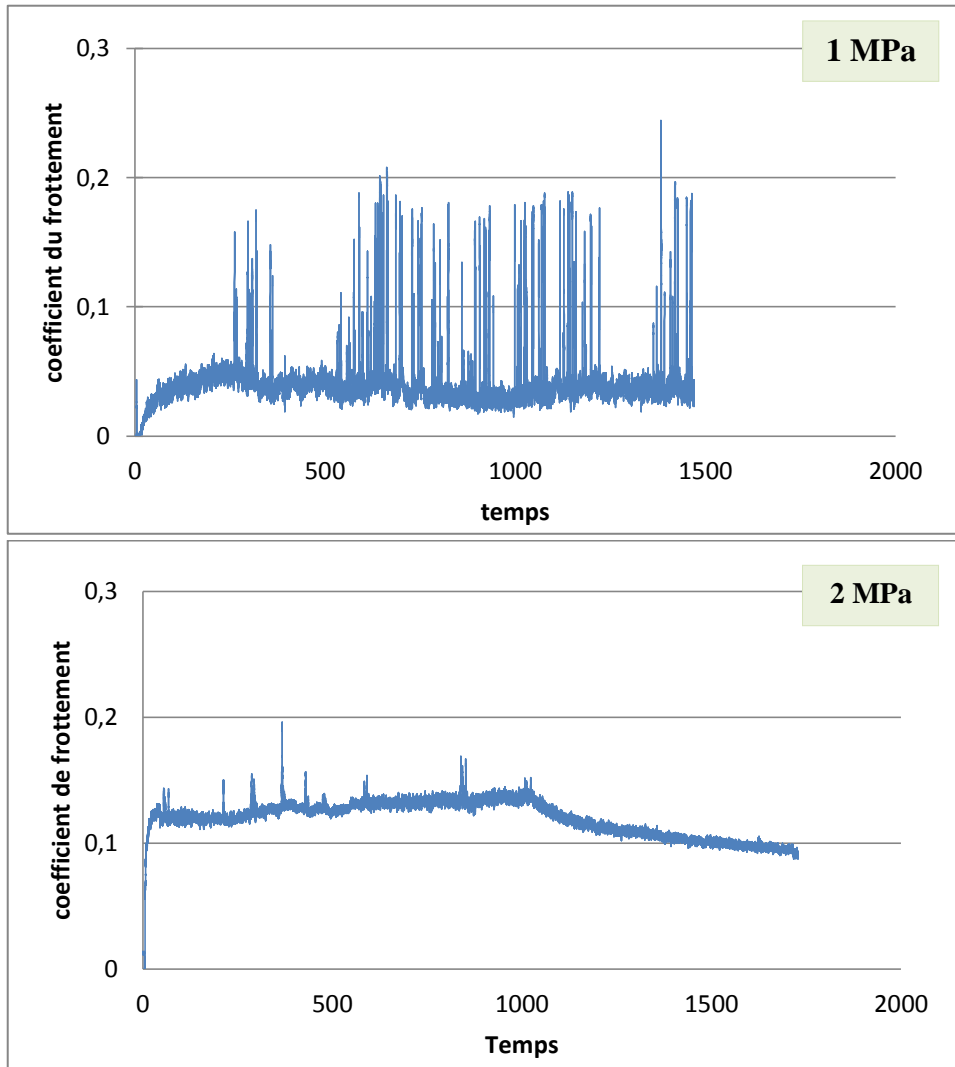


Figure III-21. Variation de coefficient de frottement à $V=1.5$ m/s et différentes pressions.

D'après la figure III.21, nous constatons que pour une vitesse de 1.5 m/s nous enregistrons de faibles valeurs de coefficient de frottement, et qui augmente avec l'augmentation de la pression. La comparaison des résultats obtenus par rapport à ceux de la vitesse 1 m/s, montre que plus que nous augmentons la vitesse la variation du coefficient de frottement n'est pas le même avec l'augmentation de la pression.

● Coefficient de frottement pour $V=2$ m/s et une pression $P=1$ MPa

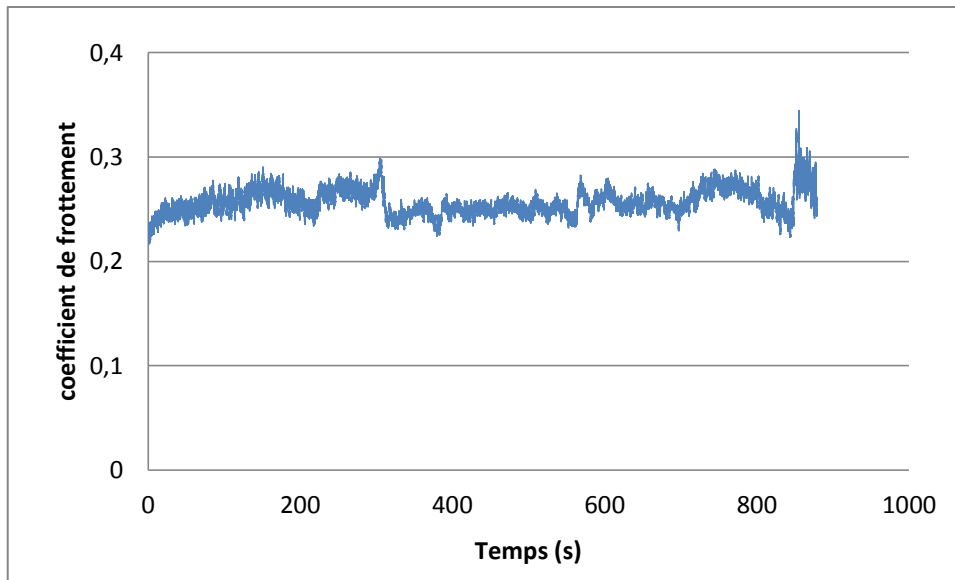


Figure III-22. Variation de coefficient de frottement à $V=2$ m/s et une pression $P=1$ MPa.

La variation du coefficient de frottement donnée par la figure III.22, montre que l'augmentation de la vitesse de glissement entraîne la modification de la valeur du coefficient de frottement. Pour une vitesse de glissement de 2m/s et une pression $P=1$ MPa nous enregistrons une valeur de $\mu = 0.25$.

Au cours de l'ensemble des expériences, nous avons observé 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 températures en fonction de la charge et de la vitesse est observé.

Afin d'évaluer l'effet de la vitesse de glissement et la pression sur la variation du coefficient de frottement, cette partie est suivie par une comparaison de μ en fonction de ces paramètres.

III.8.1 Influence de la vitesse de glissement sur le coefficient de frottement

Les figures III.23 et III.24 présentent la variation de coefficient de frottement au cours du temps en fonction de différentes vitesses selon deux pressions consécutivement $P= 1$ MPa et $P=2$ MPa.

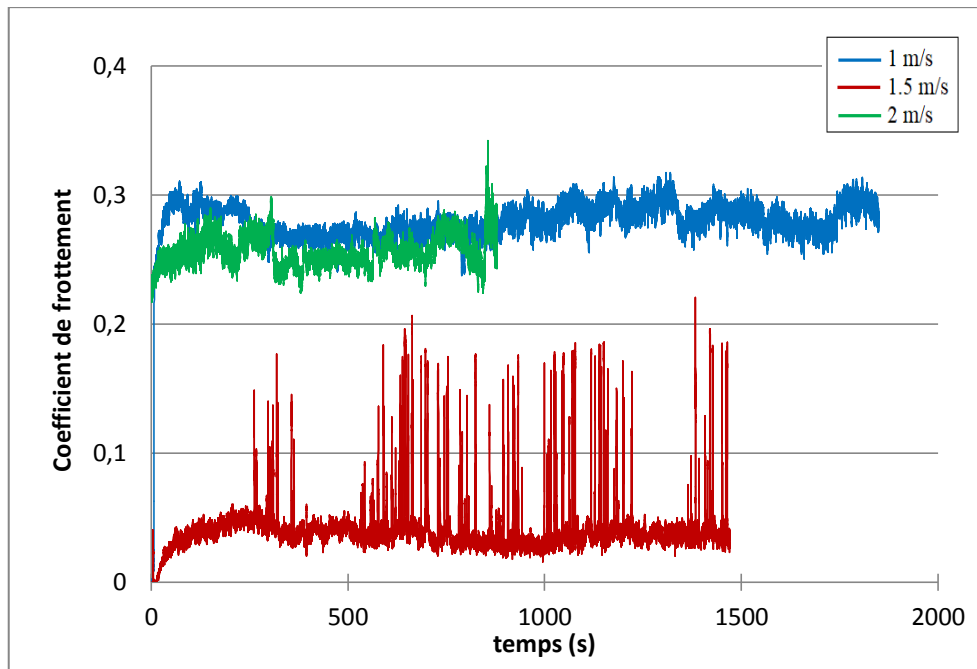


Figure III-23. Comparaison de coefficient de frottement en fonction de temps pour P=1MPa.

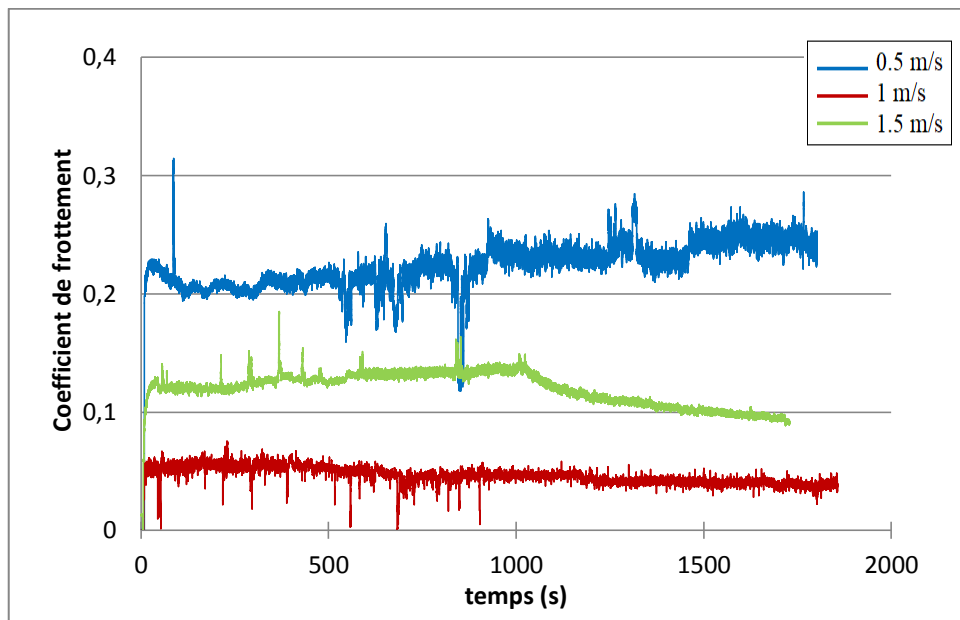


Figure III-24. Comparaison de coefficient de frottement en fonction de temps pour P=2MPa.

La comparaison des résultats montre que la vitesse de glissement possède un effet remarquable sur le comportement du coefficient de frottement. En général, la variation de coefficient de frottement en fonction de la vitesse pour les deux pressions présente la même sensibilité. D'ailleurs, nous avons observé une diminution importante de coefficient de frottement de 0.3 à 0.05 avec l'augmentation de la vitesse de glissement de 1m/s à 1.5 m/s dans le cas de la pression P1= 1 MPa.

Même remarque concernant la pression $P_2 = 2\text{MPa}$, une chute importante du coefficient de frottement de plus de 0.2 à 0.05 avec l'augmentation de la vitesse de glissement à 1m/s. Par la suite, le coefficient de frottement augmente dès que nous augmentant à nouveau la vitesse de glissement.

La confrontation de nos résultats avec d'autres nous permet de trouver que la variation de coefficient de frottement ressemble au comportement de style courbe de Stribeck [4]. Nous avons également remarqué que la tenue des échantillons n'est pas la même avec l'augmentation de la vitesse de glissement.

III.8.2 Influence de la pression sur le coefficient de frottement

Dans cette section, nous nous intéressons à l'effet de l'augmentation de la pression sur la variation de coefficient de frottement. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure III.25.

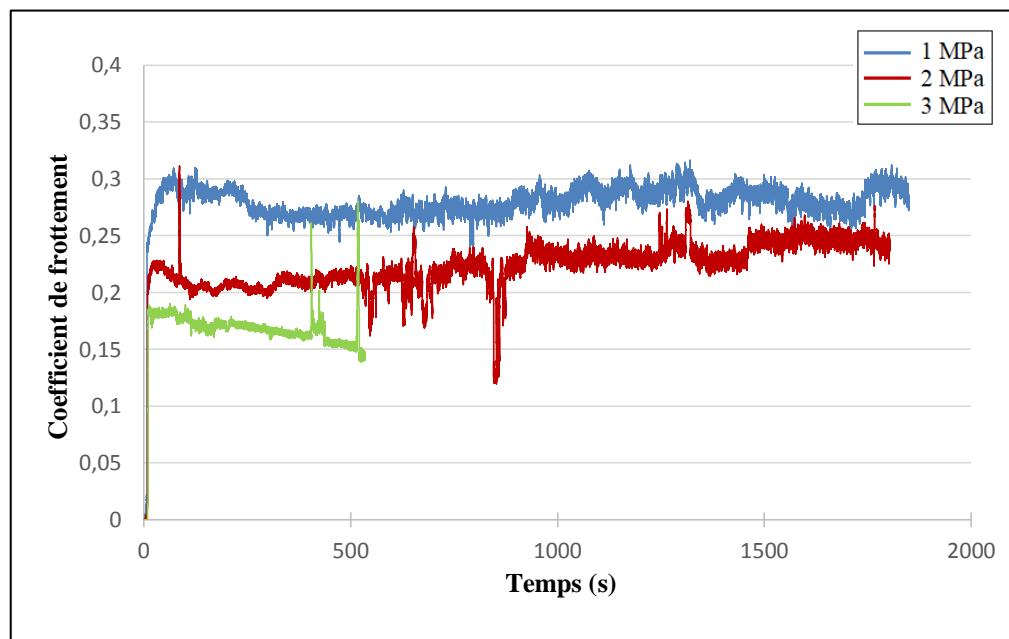


Figure III-25. Comparaison de coefficient de frottement en fonction de temps pour $V=1\text{m/s}$.

Selon la figure III.25, il a été trouvé que le coefficient de frottement diminue progressivement avec l'augmentation de la pression et évolue quasiment linéaire avec elle. Par contre, pour la pression $P= 3\text{MPa}$ le coefficient de frottement évolue d'une manière décroissante avec la durée du frottement.

Afin de bien comprendre l'effet de la variation de la vitesse de glissement et de la pression nous allons regrouper l'ensemble des résultats et les présenter sous forme des histogrammes présentés sur la figure III.26.

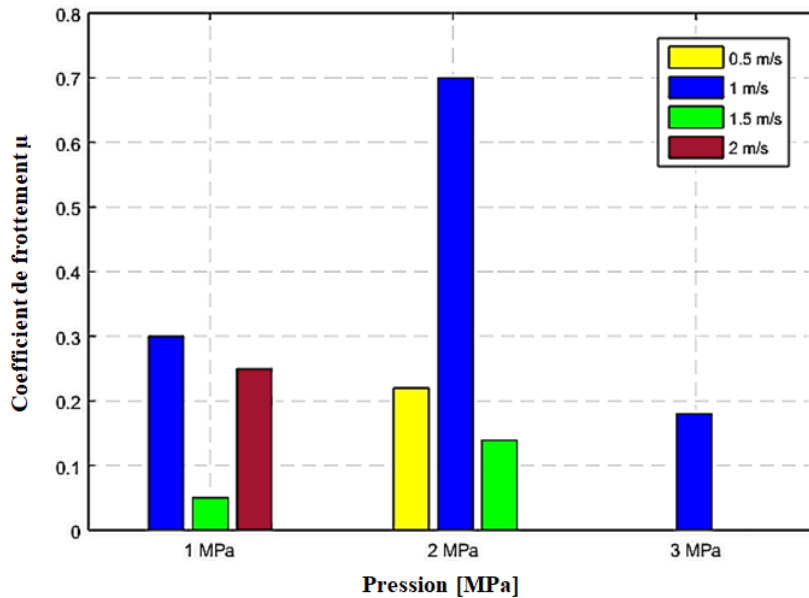


Figure III-26. Effet de la variation de la vitesse et de la pression sur le coefficient de frottement.

Cette présentation nous permet de voir clairement l'influence de la vitesse de glissement et de la pression sur la variation de coefficient de frottement. D'ailleurs, nous avons remarqué que l'augmentation de la vitesse de glissement engendre l'augmentation de coefficient de frottement pour la pression de 2 MPa. Par contre, le contraire a été enregistré pour la pression de 1 MPa, où le coefficient de frottement est réduit avec l'augmentation de la vitesse. Une chute plus prononcée du coefficient de frottement est à signaler pour la vitesse de 1.5 m/s et P=1 MPa.

D'après ces résultats, nous constatons qu'il existe un point seuil de la vitesse où le coefficient de frottement diminue. En effet, dans un premier temps que le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la vitesse de glissement. Mais à une valeur seuil de celle-ci, le coefficient de frottement augmente légèrement avec l'augmentation de la vitesse de glissement[5].

La diminution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement peut être due à l'augmentation de la température dans la zone de frottement. Cette augmentation est liée à une puissance dissipée importante induit par la vitesse. Par conséquent, le changement de température peut modifier le comportement mécanique des matériaux [5].

Afin de confirmer ces résultats, nous préférons que ce travail soit complété par d'autres études supplémentaires tout en augmentant les nombres d'échantillons par niveau et d'élargir la marge de la vitesse de glissement pour trouver exactement le seuil de la vitesse.

III.7.3. Essai de perte de masse

Cet essai consiste tout d'abord à prendre la pesée de l'échantillon avant le test à l'aide d'une balance électronique (voir figure III.27) dont la précision est de 10^{-5} g. Par la suite, nous fonctionnons un mécanisme pendant un temps connu. À la fin de chaque test, les échantillons seront à nouveau repesés.

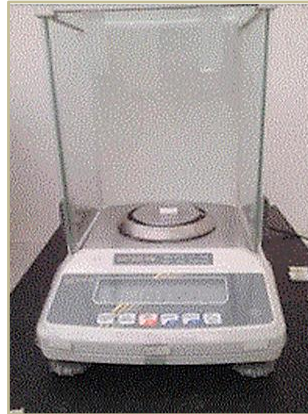


Figure III-27. Balance électronique.

Cette méthode présente plusieurs inconvénients [3]:

- Elle n'est pas valable pour de lourdes pièces ;
- Elle nécessite un nettoyage poussé et reproductible car on pèse en même temps les oxydes 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.

La perte de masse a été prise en fonction de trois vitesses de glissement $V_1=0.5 \text{ m.s}^{-1}$, $V_2=1 \text{ m.s}^{-1}$ et $V_3=1 \text{ m.s}^{-1}$ pendant différentes durées du temps (15mn, 30mn et 45 mn). L'ensemble des résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux III.2, III.3 et III.4. L'évolution des pertes de masses présentées sur les figures III.28, III.29 et III.30 sont des valeurs moyennes de 3 tests effectués pendant le processus d'usure.

● Perte de masse pour une vitesse de glissement $V_1=0.5 \text{ m.s}^{-1}$

		$V_1=0.5 \text{ m.s}^{-1}$			
Temps (min)		0	15	30	45
Pression (N)	P1=1 MPa	0	0.0202	0.0262	0.0270
	P2=2 MPa	0	0.0306	0.0615	0.1045
	P3=3 MPa	0	0.0324	0.0594	0.0777

Tableau III-2. Variation de la perte de masse en fonction de temps.

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

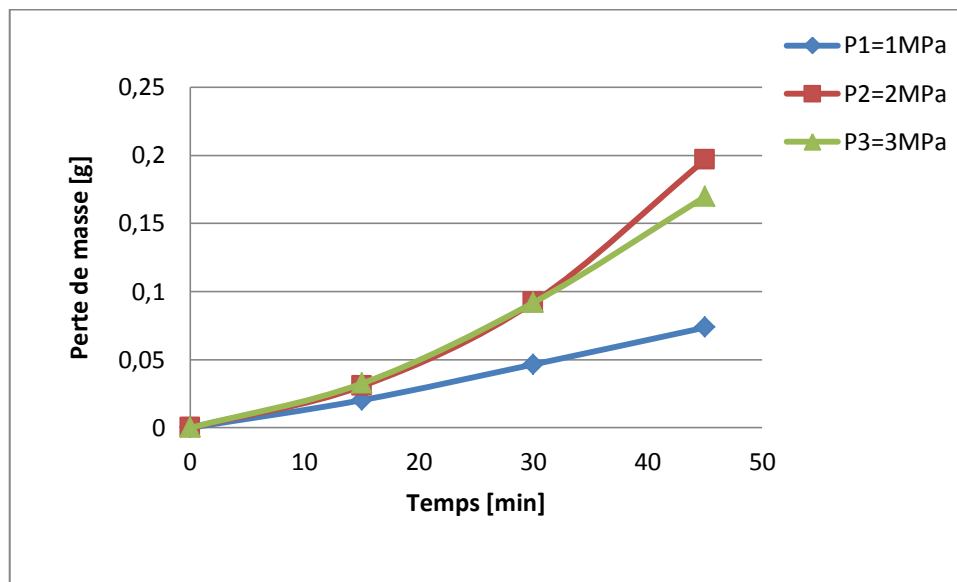


Figure III-28. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_1=0.5 \text{ m.s}^{-1}$.

La figure ci-dessus, montre que l'allure de la variation de la perte de masse en fonction du temps est similaire pour les trois pressions. Ainsi que, nous avons remarqué que les deux courbes de la perte de masse se superpose pour la pression P2 et P3 et après les 30 minutes elles se séparent.

Il est à noter que la perte de masse est influencée par la variation de la pression. L'augmentation de la pression entraîne la croissance de la perte de masse.

III.9 • Perte de masse pour une vitesse de glissement $V_2=1 \text{ m.s}^{-1}$

		$V_2=1 \text{ m.s}^{-1}$			
Temps (min)		0	15	30	45
Pression (N)	P1=1 MPa	0	0.03258	0.06601	0.0905
	P2=2 MPa	0	0.05407	0.20799	0.1142
	P3=3 MPa	0	0.16534	0.11875	0.0799

Tableau III-3. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_2=1 \text{ m.s}^{-1}$.

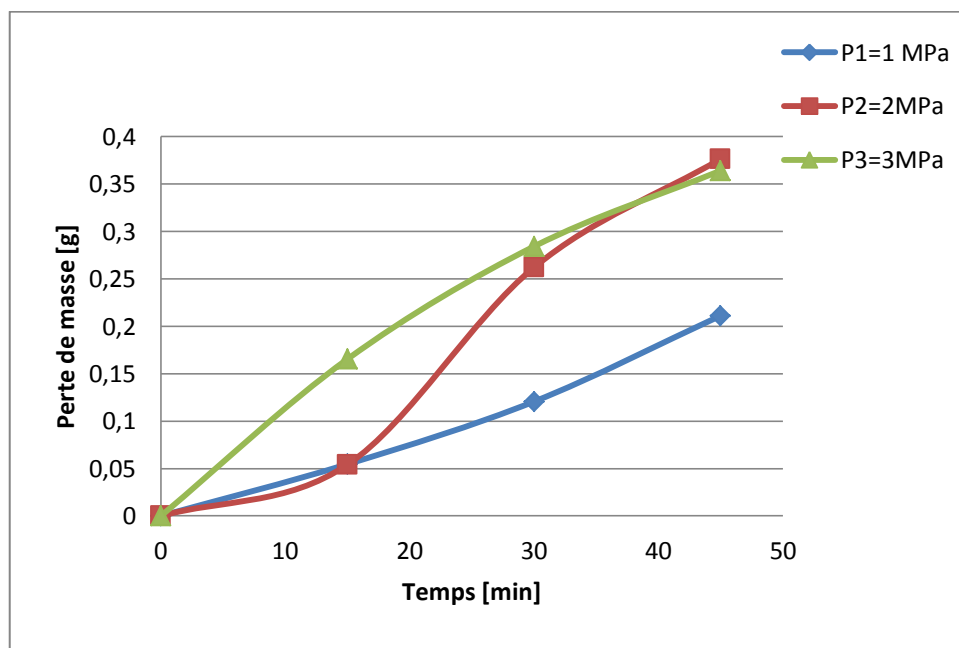


Figure III-29. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_2=1 \text{ m.s}^{-1}$.

Selon la figure III.29, la variation de la perte de masse est proportionnelle avec l'augmentation de la pression. La comparaison de ces résultats avec ceux de la figure III.28 prouve que l'augmentation de la vitesse à 1 m.s^{-1} avec la variation de la pression peut influencer sur le taux de perte de masse et accélère l'usure.

● Perte de masse pour une vitesse de glissement $V_3=1.5 \text{ m.s}^{-1}$

		$V_3=1.5 \text{ m.s}^{-1}$			
Temps (min)		0	15	30	45
Pression (N)	P1=1 MPa	0	0.05476	0.07794	0.10429
	P2=2 MPa	0	0.14204	0.14505	0.15632
	P3=3 MPa	0	0.28183	0.25109	0.19804

Tableau III-4. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_3=1.5 \text{ m.s}^{-1}$.

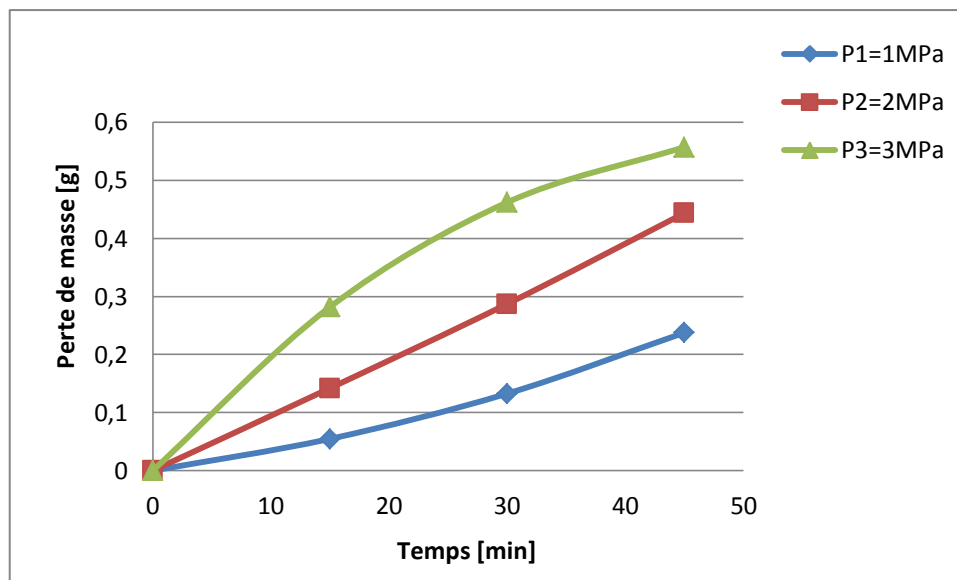


Figure III-30. Variation de Perte de masse en fonction du temps pour une vitesse $V_3=1.5 \text{ m.s}^{-1}$.

Mêmes remarques ont été trouvées au niveau de la figure III.30, où nous avons constaté que pour une vitesse de glissement et une pression plus élevées entre le pion et le disque peut provoquer une usure plus rapide des pions. Cela peut se produire, pas seulement à la vitesse de glissement mais dépendra également des propriétés spécifiques des matériaux en contact.

Ainsi que, la pression élevée peut entraîner une déformation plastique de nos pions, où nous avons remarqué des pertes de masses varient faiblement sous la pression et subissent des changements permanents de forme pour de faible vitesse $V_1=0.5 \text{ m.s}^{-1}$ (superpositions des courbes), voir figure III.28.

Enfin, nous pouvons dire que la variation de la vitesse de glissement et de la pression peut influencer la perte de masse en modifiant les mécanismes d'usure et de frottement entre les surfaces en contact.

III.10 Conclusion

L'analyse de l'ensemble des résultats nous permet de conclure que, le coefficient de frottement et la perte de masse sont deux aspects étroitement liés à la caractérisation tribologique et peuvent être influencé par la vitesse de glissement et la pression. Cette influence peut être complexe et dépendre ainsi d'autres paramètres, nécessitant une analyse spécifique pour une compréhension complète du comportement tribologiques de nos matériaux.

Le coefficient de frottement est un paramètre clé dans la tribologie, car il mesure la résistance au mouvement relatif entre deux surfaces en contact. Un faible coefficient de frottement est souvent souhaitable pour minimiser les pertes d'énergie et l'usure.

La caractérisation de la perte de masse permet d'évaluer la durabilité de ces matériaux et de prévoir leur usure future.

La tribologie reste une discipline cruciale pour optimiser le comportement tribologique des polymères afin de garantir leur bon fonctionnement et d'améliorer leur efficacité à résister aux frottements, ce qui contribuera à prolonger leur durée de vie.

Conclusion générale

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.

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, conforme aux normes ASTM G-99, conçu et réalisé à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Ce tribomètre permet de prendre des mesures et d'effectuer facilement des tests d'usure dans des conditions de frottement à sec et de récupérer les données en temps réel. L'étude a permis la mesure de l'influence de la vitesse de glissement et de la pression sur les paramètres tribologiques du couple de frottement PTFE/Acier. La comparaison des résultats montre que la vitesse de glissement possède un effet remarquable sur le comportement du coefficient de frottement. Nous avons remarqué que l'augmentation de la vitesse de glissement engendre l'augmentation de coefficient de frottement pour la pression de 2 MPa. Par contre, le contraire a été enregistré pour la pression de 1 MPa, où le coefficient de frottement est réduit avec l'augmentation de la vitesse. Une chute plus prononcée du coefficient de frottement est à signaler pour la vitesse de 1.5 m/s et P=1 MPa. Nous constatons aussi que l'augmentation de la charge entraîne une augmentation du taux d'usure, qui probablement provoqué suite à l'augmentation de la température lors frottement, ce qui suggère que le PTFE est moins résistant à l'usure sous des charges plus élevées.

Les perspectives de recherches futures feront l'objet d'équiper le tribomètre d'un thermocouple afin de mesurer l'influence de la température sur le coefficient du frottement et la résistance à l'usure du couple de frottement précédemment étudié.

Bibliographie

- [1] : Noël Brunetière, « Introduction à la TRIBOLOGIE », Institut Prime Futuroscope 2016.
- [2] : MANE Hend et MEZDAD Samir « Utilisation de la méthode d'analyse de la valeur d'amélioration pour la conception d'un tribomètre ».
- [3] : Zambelli, L Vincent, Matériaux et contacte-une approche tribologique, Suisse, PUR 1998.
- [4] : Débris d'usure Indices connexes en tribologie, RICHARD Caroline, Techniques de l'ingénieur, 2013.
- [5] : I. M. Hutchings, Tribology. Friction and wear of engineering materials, edit. EDWARD ARNOLD (1992).
- [6] : validation d'un tribomètre pion-disque vertical, mémoire master, Chekir Nabila, UMMTO, 2016.
- [7] : Okba Belahssen, Etude comparative du comportement chimique et tribologique des aciers nitrurés, thèse doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [8] : Jean Dhers "usure, avaries et corrosion". Facteur de destruction des matériels industriels. Ed 1978.
- [9] N. Chand, and U. K. Dwivedi, "Influence of fiber orientation on high stress wear behavior of sisal fiber-reinforced epoxy composites," Polymer Composites, vol. 28, no. 4, pp. 437-441,2007.
- [10] KAID-AMEUR Djilali, comportement à l'usure des matériaux de construction mécanique sous l'effet des facteurs environnementaux, thèse doctorat, université Abdelhamid ben badis de mostaganem,2012.
- [11] : F. P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids I, Clarendon Press, Oxford 1950.
- [12] : G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et contacts, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [13] : M. WOYDT, technique de l'ingénieur, Application des données tribologiques des matériaux, BM 7006.
- [14] : 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.

[15] G. L. Wannop, and J. R. Archard, "Elastic Hysteresis and a Catastrophic Wear Mechanism for Polymers," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 187, no. 1, pp. 615-623, 1973.

[16] : A. BENFOUGHAL, analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone-carbone dans un contact électrique, mémoire magister, université mentouri Constantine, 201