

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU  
FACULTÉ génie de construction  
DÉPARTEMENT de génie mécanique**



## **Mémoire de fin d'études**

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
Master académique en Génie Mécanique**

**Option : Fabrication Mécanique  
Et Productique**

### **Thème**

*Amélioration des performances tribologiques du  
polyester par adjonction d'huile et de charbon activé*

**Présenté par : KADOUM Larbi**

**KADI Malek**

**proposé et dirigé par : Mr BELDI Mustapha**

**Mme MANSOURI Lilla**

**Année universitaire 2021/2022**

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout Allah qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions sincèrement Monsieur **BELDI Mustapha** et Madame **MANSOURI Lilla** pour leurs encouragements, leurs conseils précieux, leur patience et leur disponibilité qui nous a permis de mener à bien ce travail, ainsi que de nous avoir fait partager leur vaste expérience.*

*A monsieur le président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.*

*A monsieur l'examineur membre de jury soit vivement remercié pour avoir accepté d'examiner le présent travail.*

## Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, mon frère, ma petite sœurs, ma belle-sœur et sans oublié ma petite nièce Maria, qui m'ont soutenus et encouragés pour aller au bout de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant mes études.

Mes amis qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

*Malek*

*Dédicace Je dédie cet ouvrage*

*A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude.*

*Quelle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.*

*A mes frères, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les*

*Moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont*

*chaleureusement*

*supporté et encouragé tout au long de mon parcours.*

*A ma famille, mes proches et a ceux qui me donnent de l'amour et de la*

*vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de*

*succès.*

*A tous ceux que j'aime*

*Larbi*

## Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Tribologie des polymères et des polymères composites	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Généralité sur la Tribologie .....	4
I.3 Le but de la tribologie.....	5
I.4 Les systèmes tribologiques.....	6
I.4.1 Optimisation du système tribologique .....	6
I.4.1.1 Diminution des contacts .....	6
I.4.1.2 Diminution des efforts .....	6
I.4.2 Changements structurels du système .....	6
I.5 Tribologie des polymères .....	7
I.6 Avantages et inconvénients des polymères en tribologie .....	7
I.7 Frottement des polymères.....	9
I.8 Méthode d'obtention du meilleur matériau tribologique.....	12
I.9 Les additifs solides de lubrification à action tribologique.....	12
I.10 Mesure du frottement des polymères.....	13
I.11 Les paramètres opérationnels .....	14
I.11.1 Mode de contact.....	14
I.11.2 La charge du contact.....	15
I.11.3 La vitesse de contact.....	15
I.11.4 Etat de surface .....	16
I.11.5 L'environnement .....	18
I.11.6 Matériaux.....	18
I.12 Conclusion .....	18
Chapitre II : Effets de l'autolubrification sur les propriétés tribologiques des polymères	
II.1 Introduction .....	19

II.2	Généralité sur les polymères.....	19
II.3	Les polymères thermoplastiques .....	20
II.4	Propriétés des polymères .....	20
II.4.1	Propriétés mécaniques .....	20
II.4.2	Propriétés Tribologiques.....	21
II.5	La lubrification .....	22
II.5.1.1	Les lubrifiants solides.....	23
II.5.1.2	Le graphite.....	23
II.5.1.3	Le Bisulfure de Molybdène (MoS <sub>2</sub> ).....	24
II.5.1.4	Le PTFE ou polytétrafluoroéthylène .....	26
II.5.2	Les lubrifiants liquides .....	26
II.6	Le Film du transfert .....	28
II.7	Renforcement des composites polymères.....	29
II.7.1	Graphite.....	29
II.7.2	Les fibres de verre .....	29
II.7.3	Le carbone .....	29
II.7.4	Le bronze.....	29
II.7.5	Les autres agents de remplissage .....	30
II.8	Recherche tribologique.....	30
II.9	Le produit PV des polymères .....	37
II.10	L'influence de la température sur la tribologie des polymères.....	39
II.11	Conclusion.....	40

### Chapitre III : La partie expérimentale

III.1	Introduction .....	41
III.2	Présentation et élaboration des matériaux utilisés.....	41
III.2.1	Résine Polyester .....	41
III.2.2	L'Huile lubrifiante.....	42

III.2.3	Le charbon Activé .....	43
III.3	Procédure d'élaboration.....	44
III.4	Découpage et préparation des Pions .....	46
III.5	Méthodologie de travail.....	47
III.5.1	Dispositif expérimental: .....	47
III.5.2	Nomenclature du banc.....	48
III.5.3	Principe de fonctionnement:.....	49
III.5.4	Disque.....	49
III.5.4.1	Traitement thermique .....	49
III.5.4.1.1	La trempe.....	49
III.5.4.1.2	Revenu.....	49
III.5.4.2	Polissage .....	50
III.5.4.3	Essai de dureté .....	50
III.5.4.4	Rugosité .....	51
III.6	Convertisseur analogique-numérique (CAN).....	52
III.7	Le capteur de force .....	53
III.8	La planéité .....	54
III.9	Chaine d'acquisition.....	54
III.10	Enregistrement des données .....	55
III.11	Variateur de vitesses .....	56
III.12	Etalonnage du capteur.....	57
III.13	Tests de frottement .....	58
III.14	Résultats.....	59
III.15	Interprétation des Résultats .....	65
III.16	Conclusion .....	67

## Liste des figures

### Chapitre I :

Figure I.1 :Contact entre deux solides en présence de frottement.....	3
Figure I.2 :Dissipation thermique due au frottement dans un disque de formule 1 .....	4
Figure I.3 :Les pertes d'énergie.....	4
Figure I.4: La définition de la tribologie .....	5
Figure I.5:Pièces d'assemblage .....	10
Figure I.6 :La déformation élastique .....	11
Figure I.7 : Contacte entre les aspérités pendant le glissement.....	11
Figure I.8 : Contact ponctuel.....	14
Figure I.9 :Contact Linéiques.....	15
Figure I.10 :Contact surfaciques .....	15
Figure I.11 :Vue théorique en coupe d'une surface .....	17

### Chapitre II :

Figure II.1 : Type de polymère. [1] .....	20
Figure II.2 :Schéma montrant la structure du graphite [3-4].....	24
Figure II.3 : Schéma montrant la structure cristallographique du MoS <sub>2</sub> . [3-4] .....	25
Figure II.4 : Formule chimique du monomère du PTFE (C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>n</sub> et sa structure moléculaire	26
Figure II.5 : Les 2 mécanismes de fonctionnement du film d'huile.....	27
Figure II.6 : Taux d'usure spécifique moyen du PTFE et des composites PTFE (adopté). [9]	31
Figure II.7 : Comportement en frottement du PTFE et des composites PTFE [10].....	32
Figure II.8 : 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) (adapté de [12]) .....	33
Figure II.9 : Perte de poids en fonction de la vitesse de glissement à une charge appliquée constante de 60 N et une distance de glissement de 1500 m.....	33
Figure II.10 : Courbes d'usure des matériaux testés pour une charge de 60 N et une vitesse de 1,5 m/s .....	34
Figure II.11 : Coefficient de frottement avec différentes teneurs en flocons de graphite	35
Figure II.12 : Coefficient de frottement avec différentes teneurs en flocons de graphite	35

Figure II.13 : Variation du coefficient de frottement avec la distance de glissement (charge normale : 50 N ; vitesse de glissement : 1,5 m/s).....	36
Figure II.14 : Taux d'usure spécifique en fonction du poids. % de matériau de remplissage pour divers composites polymères (FEP – éthylène propylène fluoré ; PA6 – polyamide 6 ; HDPE – polyéthylène haute densité ; PA11 – polyamide 11 ; GF – fibre de verre ; PEEK – polyéther éther cétone ; CNT – nanotube de carbone).....	36
Figure II.15 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés [17]).....	39

### Chapitre 3 :

Figure III.1 : L'huile Total 10W40. ....	41
Figure III.2 : les moules fabriqué .....	42
Figure III.3 : La balance .....	43
Figure III.4: Préparation d'une composition .....	43
Figure III.5: Les moules après remplissage.....	44
Figure III.6 : Procédé de découpage.....	45
Figure III.7 : image des Pions. ....	45
Figure III.8 : Tribomètre .....	46
Figure III.9 : Formes et dimensions du pion et du disque .....	47
Figure III.10 : Four électrique .....	48
Figure III.11 : La trempe des pièces dans un bain d'eau.....	48
Figure III.12 : Polissage des disques. ....	49
Figure III.13 : Disque avant (à gauche) et après (à droite) polissage.....	49
Figure III.14 : Duromètre de type WOLPERT DIA TESTOR RC .....	50
Figure III.15 : Rugométre.....	51
Figure III.16 : Carte arduino.....	52
Figure III.17 : Le capteur et les zones d'emplacement de la jauge.....	53
Figure III.18 : Processus de planéité .....	53
Figure III.19 : Chaine d'acquisition. ....	54
Figure III.20 : Programme Labview pour l'acquisition des données.....	55
Figure III.21 : Variateur de vitesse.....	55

Figure III.22 : Mécanisme d'étalonnage .....	56
Figure III.23 : Droite d'étalonnage de l'effort tangentiel.....	57
Figure III.24 : Evolution du coefficient de frottement de PE.....	58
Figure III.25 : Échantillon PE rompu lors des tests d'usure à 1Mpa.m/s .....	59
Figure III.26 : Coefficient de frottement pour la composition (PE/5Ca).....	60
Figure III.27 : Coefficient de frottement pour la composition (PE/3Ca).....	60
Figure III.28 : Échantillon PE/ 3Ca rompu lors du test d'usure à 1Mpa.m/s.....	61
Figure III.29 : Coefficient de frottement pour la composition PE/5H .....	61
Figure III.30 : Coefficient de frottement pour la composition PE/10H. ....	63
Figure III.31 : les traces de l'huile sur le disque .....	63
Figure III.32 : Coefficient de frottement de la composition PE/3Ca/5H .....	64
Figure III.33 : coefficient de frottement de chaque composition. ....	65

## **Liste des Tableaux :**

### **Chapitre 2 :**

Tableau II.1 : Composition (vol. %) des matériaux .....	31
---	----

### **Chapitre 3 :**

Tableau III. 1 : Caractéristiques de l'huile utilisée.....	41
Tableau III. 2 : Caractéristiques du charbon activé.....	42
Tableau III. 3 : Résultats des essais de rugosité .....	51
Tableau III. 4 : Présentation des résultats du frottement des différentes compositions. ....	65

## Introduction générale

La tribologie est une science pluridisciplinaire qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, qu'il s'agisse de frottement, d'usure ou de lubrification. Dans la tribologie l'usure est la conséquence du frottement, elle correspond à une perte d'usage par suite de déformations plastiques, fracturations ou d'un enlèvement de matière d'un corps ou des deux corps en glissement.

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 optimale. Les matériaux composites à base de polymères offrent de nombreux avantages tels que la facilité de fabrication, la légèreté, le faible coût et d'excellentes performances. En tant que matériaux tribologiques, les composites sont très intéressants pour les composants de machines et divers dispositifs mécaniques tels que les joints, les engrenages, les roulements, les freins et les embrayages, les courroies de transmission, les cames, les roues, les segments de piston,...etc

Dans ce présent travail. Un aspect d'autolubrification par adjonction d'huile lubrifiante et du charbon activé dans les matériaux composites à base de polyester a été envisagé. L'incorporation du charbon actif en poudre a pour rôle le maintien d'huile dans la matrice suite aux propriétés d'adsorption que ce dernier possède. Ainsi le nouveau matériau élaboré aura des propriétés tribologiques et mécaniques avantageuses que le polyester seul ne possède pas.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le chapitre 1 porte sur l'analyse de la tribologie des polymères où l'ensemble de facteurs pouvant influencer les forces de frottement, ainsi que les différents modes d'usure tels que l'adhésion et l'abrasion ont été détaillés.

Le chapitre 2 porte sur l'amélioration du comportement au frottement et à l'usure des matériaux polymères qui consistent à réduire leurs adhérences aux matériaux antagonistes et à améliorer leur dureté, leur rigidité et leur résistance à la compression, par adjonction de charges particulières de différents lubrifiants solides, principalement les additifs classiques à savoir le PTFE, le bisulfure de molybdène ainsi que le graphite.

Le chapitre 3 constitue la partie expérimentale où nous allons présenter le dispositif expérimental (tribomètre), réalisé et validé à l'université de Tizi-Ouzou. Ce tribomètre a été utilisé pour la réalisation de l'ensemble de tests de frottement. Par la suite une description de l'ensemble des compositions, élaborées à base de polyester, avec les différents pourcentages d'huile et du carbone activé est donnée. Les essais tribologiques, l'analyse ainsi que la discussion des résultats des différentes compositions sont détaillés à la fin du chapitre.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives.

## **Chapitre I : Tribologie des polymères et des polymères composites**

## I.1 Introduction

La tribologie est aujourd'hui un large domaine d'études et de recherches pluridisciplinaires qui a pour objectif de réduire l'usure des matériaux et augmenter la durée de vie et la fiabilité des systèmes mécaniques et mécatroniques, aussi de maîtriser le frottement qui, dans certaines applications on cherche à augmenter le frottement (freins), alors que dans d'autres, on cherche à le réduire (sport de glisse).

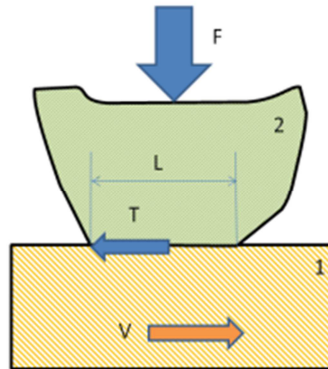


Figure I.1 : Contact entre deux solides en présence de frottement. [18]

Une grande partie des défaillances des pièces travaillantes, s'amorce à la surface de contact des matériaux en mouvement relatif ; de ce fait, le comportement tribologique des matériaux et les performances des lubrifiants ou des revêtements dans un contact glissant déterminent la qualité de la conception, les ingénieurs ont donc besoin d'un accès aux connaissances expérimentales les plus récentes en tribologie.

La présence de frottement dans un contact glissant conduit à une perte d'énergie mécanique qui est transformée en chaleur (voir figure I.1). D'autre part, il conduit à une détérioration des surfaces par usure, fissuration thermique, fatigue comme le montre la figure I.2.



Figure I.2 : Dissipation thermique due au frottement dans un disque de formule 1

Une étude récente de Holmbeg et al. [HAE12] a montré que dans une voiture moyenne se déplaçant à 60km/h, les pertes par frottement représentaient 43% de l'énergie mécanique fourni par le moteur (figure I.3). Pour l'année 2009, 208 milliards de litres de carburant au raient été brûlés pour vaincre le frottement. On comprend aisément l'intérêt que présentent la tribologie et la maîtrise des frottements aussi bien pour les aspects économiques qu'environnementaux. Il est donc utile de pouvoir proposer des solutions permettant de limiter le frottement et ses conséquences.

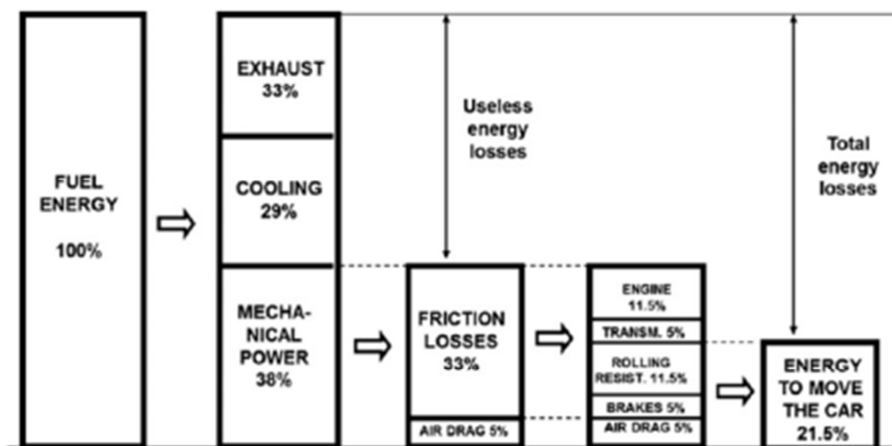


Figure I.3 : les pertes d'énergie.

## I.2 Généralité sur la Tribologie

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Science faisant appel à la

pluridisciplinarité, elle requiert des connaissances relatives aux surfaces, à la physicochimie à la science des matériaux et à la mécanique sur des échelles allant d'un à no mètre au mil mètre. Les contributions historiques pour le frottement sont aujourd'hui bien connues et ont été analysées afin de bien cerner leurs limitations. Il faut admettre cependant que toute prédiction de l'usure n'est possible que pour des cas particuliers et que les modèles proposés ne permettent pas d'extra polard est aux d'usure d'un problème industriel à un autre [24].

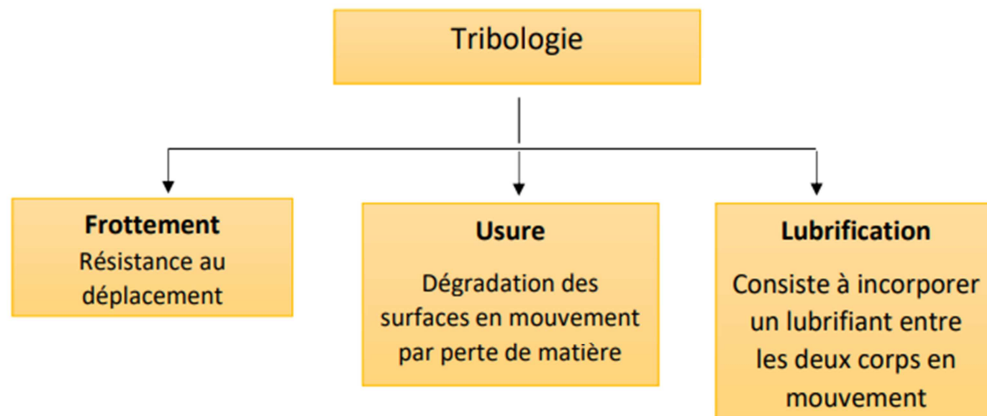


Figure I.4 : la définition de la tribologie.

### I.3 Le but de la tribologie :

Le frottement est l'un des phénomènes physiques les plus anciens connus. C'est certainement l'un des plus importants par ses implications technologiques. C'est la raison pour laquelle le concept de tribologie a été introduit en 1966. Le but de la tribologie consiste à minimiser les pertes de matériau et d'énergie liées à l'usure et au frottement ; c'est donc d'arriver à fabriquer des systèmes mécaniques et énergétiques efficaces. L'amélioration qu'elle apporte aux surfaces en mouvement (au système tribologique donc) permet d'améliorer l'efficacité et la durée de vie des machines. Les aspects (tant techniques qu'économiques) améliorés par la tribologie sont :

- Performance et rendement
- Fiabilité et durée de vie
- Économie d'énergie et de composants
- Impact environnemental

Le frottement entre deux surfaces matérielles se traduit par une force de résistance au mouvement, qui entraîne notamment :

- pertes d'énergie.
- échauffements
- usure.

### **I.4 Les systèmes tribologiques :**

La tribologie se trouve partout où il y a mouvement relatif entre deux éléments. Par exemple: Paliers lisses (entre arbre et palier), Roulements (entre corps du roulement et billes, entre billes, pistes et cages), Engrenages (entre les profils des pignons et des roues dentées) .... Ces couples d'éléments se retrouvent dans toutes les machines : moteurs, transmissions, compresseurs, hydraulique et ainsi de suite...On rencontre de nouveau la tribologie dans le travail des métaux (tournage, fraisage, perçage etc.), mais dans ce cas, c'est entre la pièce usinée et l'outil qu'il y aura frottement.

#### **I.4.1 Optimisation du système tribologique :**

Cette optimisation passe par trois types d'adaptations :

##### **I.4.1.1 Diminution des contacts :**

Ce sont les changements qui visent à effectuer des mouvements sans aucun contact. Par exemple : Rails et Glissières magnétiques.

##### **I.4.1.2 Diminution des efforts :**

Ce sont les mesures qui sans modifier les mouvements diminuent les efforts nécessaires pour les réaliser. Par exemple : remplacement d'un palier lisse par un palier à roulement.

#### **I.4.2 Changements structurels du système :**

a) Par des choix à la construction : Envisager dès sa conception le système dans sa configuration et son dimensionnement sous un angle tribologique.

b) Par le choix de la lubrification : Application et choix du lubrifiant adéquat. Pour le choix, il y a deux solutions : soit le lubrifiant sépare les surfaces en mouvement.

c) Par des choix de matières adaptées : La sélection des couples optimaux de matériaux ou l'usage de revêtements de surface optimisés.

#### **➤ Pourquoi la Tribologie est récente ?**

Les mécanismes existent depuis longtemps, mais l'étude de la tribologie est relativement récente pour plusieurs raisons :

- Raison scientifique :

La tribologie a peu intéressé les scientifiques à cause de la complexité de la matière.

- Raison technique :

1) La surface : calcul des structures pour améliorer la résistance, ont été accomplis depuis plus d'un siècle.

2) Le frottement : le frottement présente une source principale de gaspillage d'énergie.

3) L'usure : La durabilité des pièces est limitée.

4) Les indisponibilités : Le cout des pièces de rechange d'un groupe turbo alternateur est élevée. [22]

### **I.5 Tribologie des polymères :**

Dans le monde actuel, des produits de plus en plus performants et fiables doivent être développés dans un délai de plus en plus court pour garantir la compétitivité de l'entreprise, comme par exemple l'allègement des pièces en agissant sur le choix du matériau et la réduction d'usure en se servant des lubrifiants. De ce fait, les polymères sont de plus en plus employés dans des applications tribologiques pour remplacer les matériaux métalliques pour leur facilité de transformation et leur excellente résistance à l'usure.

### **I.6 Avantages et inconvénients des polymères en tribologie**

Afin de comprendre le comportement des polymères, une comparaison pour certaines des propriétés physiques et mécaniques des polymères par rapport à celles des métaux a été donnée ci-dessous:

- 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 par un certain nombre d'avantages particuliers.

- a) 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.
- b) Certains matériaux, notamment les thermoplastiques, sont bon marché et faciles à fabriquer des formes complexes.
- c) De nombreux polymères, en particulier les fluorocarbures, sont très résistants aux attaques chimiques des milieux agressifs, tels que les acides et les alcalis.
- d) Les coefficients de frottement lors d'un glissement non lubrifié contre eux-mêmes ou contre des métaux sont relativement faibles.
- e) 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.
- f) L'entretien périodique, c'est-à-dire la lubrification par des fluides, peut souvent être supprimée.
- g) En présence de lubrifiants fluides, les polymères subissent une lubrification élasto-hydrodynamique plus facilement que les métaux [24].

Le comportement tribologique des polymères dépend essentiellement de leur composition chimique, de leur structure cristalline (quand ils en ont une) et de leur morphologie. L'adhésion est due aussi bien aux forces de Van der Waals qu'aux liaisons hydrogène dans le cas où le polymère est polaire.

La tribologie est la science qui s'intéresse à l'ensemble des phénomènes relatifs aux corps en contact qui se déplacent l'un par rapport à l'autre. Les trois principaux aspects qui représentent la tribologie sont : le frottement qui est un phénomène traduisant la résistance d'un matériau à un déplacement imposé, l'usure qui se manifeste par une dégradation des surfaces et une perte de matière et la lubrification qui consiste, usuellement, à mettre un fluide entre les corps en contact. De ce fait, la tribologie représente une science pluridisciplinaire

faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général. La tribologie a débuté au début du vingtième siècle par l'étude des volumes, en utilisant des concepts de la mécanique et avec l'établissement des lois de comportement. Les recherches dans le domaine de la tribologie se sont tournées, au milieu du vingtième siècle, vers l'état des surfaces à travers la physique des surfaces. Récemment, ces études s'intéressent à la dynamique des interfaces et au rôle fondamental que présentent les éléments interraciaux dans un contact. D'une manière générale, la prédiction des phénomènes intervenants au frottement est délicate vue qu'ils ne décrivent pas des propriétés intrinsèques des matériaux. Le frottement et l'usure étant deux phénomènes distincts, on peut concevoir des systèmes à faible usure avec un frottement élevé (freins) ou bien à forte usure avec un frottement faible (usinage).

Les polymères sont couramment utilisés pour des applications tribologiques, comme les pneus, les roulements et les bandes transporteuses. Différents mécanismes d'usure se produisent en fonction des propriétés mécaniques du polymère, des conditions de contact et des propriétés des débris ou du film de transfert formés pendant le processus d'usure. Afin de s'assurer que les polymères possèdent une résistance à l'usure suffisante dans les conditions de service, une évaluation tribologique fiable et quantifiable est nécessaire. Elle nous permet de comparer quantitativement les comportements d'usure de différents polymères de manière contrôlée et surveillée et de sélectionner le meilleur candidat pour l'application visée.

### **I.7 Frottement des polymères**

Comme on l'a évoqué précédemment, le frottement traduit l'ensemble des phénomènes pouvant apparaître dans les zones superficielles des solides en contact en mouvement relatif. La définition du coefficient de frottement  $\mu = F/N$  a été donnée par Amontons où  $F$  représente la force tangentielle et  $N$  la force normale. Ce coefficient n'est pas une propriété intrinsèque du matériau mais il décrit l'état de l'ensemble du système tribologique.

Le coefficient de frottement résulte, en fait, de la somme des deux coefficients de frottement dynamique  $\mu_d$  et statique  $\mu_s$ . Le coefficient de frottement dynamique représente la force nécessaire au déplacement. Alors que, le coefficient de frottement statique représente l'adhérence ainsi que la force nécessaire à la rupture des jonctions créées entre les deux corps en contact. En effet, chacune des surfaces de contact possède sa propre morphologie et des microcontacts sont mis en jeu par les aspérités des surfaces situés au niveau de l'aire de contact réelle. Selon la théorie de Tabor et Bowden, celle-ci n'est qu'une faible partie de l'aire

de contact apparente d'une manière générale, la force de frottement  $F_T$  produite à une vitesse de glissement est effectuée par deux contributions et s'écrit de la manière suivante .[22] [23]

$$F_T = F_{\text{Déformation}} + F_{\text{Adhésion}}$$

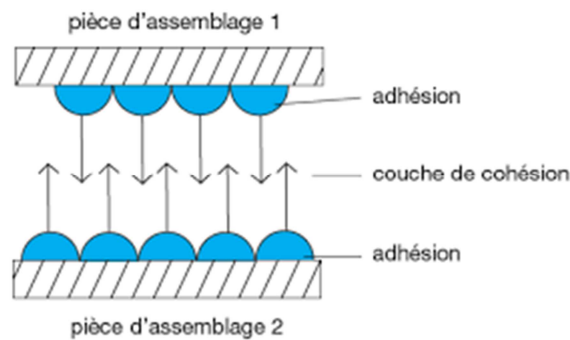


Figure I.5 : Pièce d'assemblage [12]

- **une force de déformation** :  $F_{\text{Déformation}}$  relative à la mise en mouvement. Une déformation élastiques est générée dans les solides en mouvement et provoque une résistance supplémentaire au déplacement.

- **une force d'adhésion** :  $F_{\text{Adhésion}}$  relative aux interactions des molécules à courte portée dans les deux surfaces antagonistes.

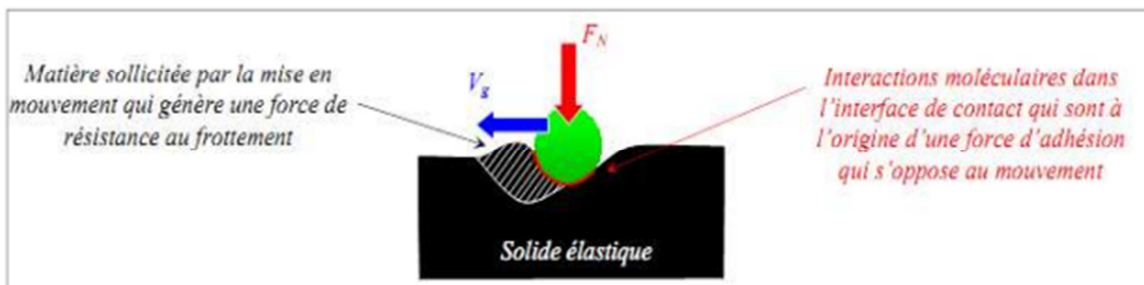


Figure I.6 : la déformation élastique [23].

- **La composante de déformation** : Cette composante prend naissance suite à une déformation locale du matériau qui entraîne une force opposée à la mise en mouvement. Dans le cas où l'une des surfaces est plus rugueuse et plus dure que l'autre ou bien plus élastique, les surfaces s'interpénètrent d'une manière plus importante d'où la résistance au glissement devient plus élevée.

Les propriétés mécaniques et la géométrie des aspérités impliquées au cours du glissement influent l'intensité de cette force. Le coefficient de frottement statique  $\mu_s$  s'exprime sous la forme :  $\mu_s = \tan \alpha$  où  $\tan(\alpha)$  représente la pente de aspérités identifiées par la rugosité de la

surface inférieure au cours du glissement. Une partie de l'énergie du système est emmagasinée par déformation élastique et l'autre partie est dissipée par déformation visqueuse et /ou plastique. Les propriétés topographiques et mécaniques de la surface influent étroitement cette répartition.

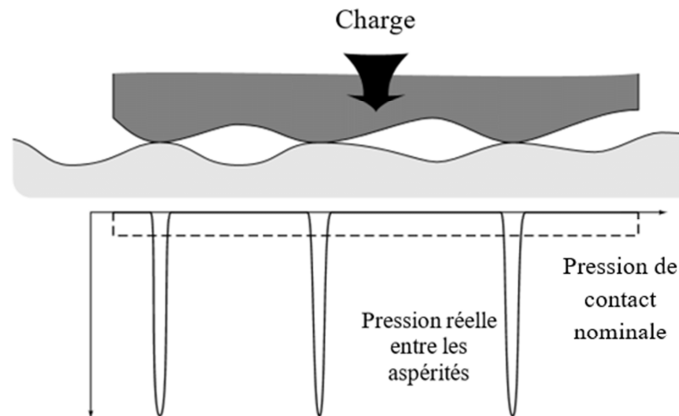


Figure I.7 : Contact entre les aspérités pendant le glissement.

Les états des micros aspérités de surface, la nature des interfaces et des surfaces ainsi que le mode de contact donnent une évolution du coefficient de frottement en fonction des nombres de cycles. La modification du contact peut se produire rapidement et la dégradation des surfaces peut causer le détachement des particules solides. De ce fait, le contact à deux corps peut passer à un contact à trois corps suite à la production d'un lit de particules ou bien ce qu'on appelle « troisième corps ». Ce phénomène est fortement lié au type d'usure générée (abrasion, adhésion, fatigue, corrosion). Selon Godet, ce troisième corps peut provoquer la baisse d'usure par la diminution des interactions entre les premiers corps en mouvement relatif.

### **I.8 Méthode d'obtention du meilleur matériau tribologique :**

Pour obtenir un meilleur matériau tribologique à base de polymères, on procède à l'adjonction de lubrifiants solides:

### **I.9 Les additifs solides de lubrification à action tribologique :**

L'investigation du rôle des lubrifiants solides dans les propriétés de friction des matériaux présente un atout indéniable pour la résolution des problèmes rencontrés dans le développement de matériaux avec une meilleure performance tribologique [26].

En effet, les lubrifiants solides ont un grand nombre d'avantages qui incluent la réduction du prix, la simplicité, la propreté, la facilité de mise en œuvre, une diminution du frottement et

d'usure à des températures extrêmes, et en général, une performance dans les applications où l'utilisation d'un lubrifiant liquide est exclue [15; 13].

Les lubrifiants solides jouent un rôle crucial dans la construction et la maintenance des films de frottement à l'interface entre les corps en contact. La formation de tels films sur le faciès de frottement est principalement liée à la polarité des lubrifiants solides au niveau moléculaire puisqu'ils sont des composés solides cisailables par frottement [16]. Plusieurs facteurs influent l'efficacité des lubrifiants solides tels que : la température, l'humidité, la pression, la vitesse, etc.

Les lubrifiants solides sont utilisés soit seuls, en substitution des graisses, soit associés aux lubrifiants conventionnels pour améliorer leurs performances en régime de lubrification limite ou assurer une lubrification de secours temporaire en cas d'une défaillance accidentelle du système de graissage. Ils ne sont utilisés seuls que dans le cas de fonctionnement à une faible vitesse de glissement, néanmoins, les charges et les températures peuvent être très élevées. Des études récentes ont montré l'importance de l'utilisation de deux ou plusieurs types de lubrifiants solides grâce à leur performance dans les diverses conditions de freinage.

Les lubrifiants solides peuvent être classés selon qu'ils sont:

- D'une structure lamellaire telle que le graphite, le bisulfure de molybdène ( $\text{MoS}_2$ ), le nitrure de bore (BN), le fluorure de graphique ( $\text{CF}_x$ ), etc. ;
- D'une structure polymérique à longue chaîne droite orientée telle que le polytétrafluoroéthylène (PTFE), les polyamides, les polyacétals, les polyimides, etc. ;
- D'une faible dureté telle que les métaux mous comme le plomb, l'étain, l'argent, l'indium ou leurs alliages.

Cependant, les lubrifiants solides les plus utilisés sont le graphite, le PTFE et le bisulfure de molybdène.

Les lubrifiants solides à structure lamellaire présentent un faible coefficient de frottement grâce aux propriétés anisotropiques caractéristiques de leurs liaisons. En effet, ils présentent de fortes liaisons interatomiques dans le plan basal et de faibles liaisons de Van der Waals entre les couches lamellaires [26].

### **I.10 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 [4].

### **I.11 Les paramètres opérationnels :**

Ils caractérisent les conditions fonctionnelles du tribosystème. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests. Les principaux paramètres opérationnels sont : mode de contact, la charge de contact, la vitesse de contact ; état de surface, l'environnement et le matériau.

#### **I.11.1 Mode de contact :**

Il s'agit de définir la nature et la géométrie du contact. Ces informations participeront à l'évaluation du champ de contraintes imposé au contact. Par nature du contact on entend la définition générale de ce qui constitue le contact : solide/solide, liquide/solide, liquide + particules/solide, liquide + vapeur/solide... La géométrie du contact caractérise la forme des surfaces qui limitent les solides au voisinage de la zone de contact. On définit trois types de contact :

- Les contacts de type ponctuel,

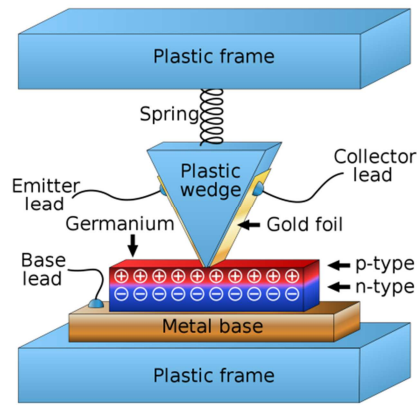


Figure I.8 : Contact ponctuel [3]

•Les contacts linéiques,

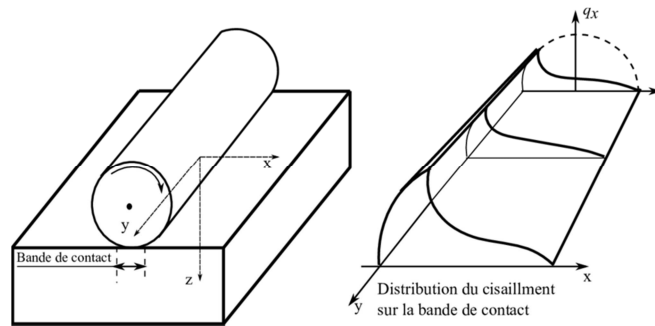


Figure I.9 : Contact Linéiques [8]

•Les contacts surfaciques.

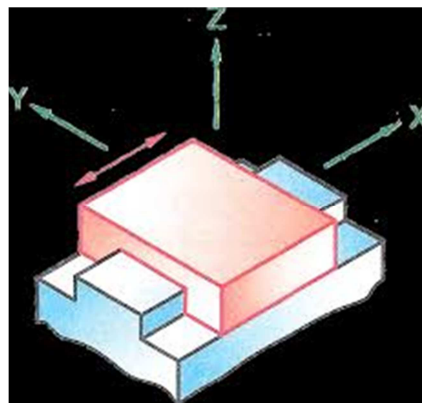


Figure I.10: Contact Surfaiques [9]

### I.11.2 La charge du contact

Il s'agit de déterminer le torseur dynamique, c'est-à-dire l'ensemble des forces et moments auquel est soumis le contact. La charge et la manière dont elle est appliquée

permettent d'évaluer la nature et le niveau des contraintes auxquelles les couches superficielles sont soumises. La connaissance du champ de contrainte en profondeur est nécessaire pour justifier quantitativement la nature, la qualité et l'épaisseur des traitements ou revêtements de surface, pour évaluer les risques de fatigue de contact... La plage de variation [24] des charges mises en œuvre en génie mécanique est extrêmement large allant du milli newton au méga newton.

### **I.11.3 La vitesse de contact**

Ce paramètre consiste à préciser les différents éléments du torseur cinématique (ensemble des vitesses et moments cinétiques) appliqué au contact, c'est-à-dire la nature et la cinématique du mouvement. Suivant l'orientation des composantes de ce torseur au niveau du contact, le déplacement pourra s'effectuer en roulement, glissement ou pivotement. La vitesse contribue à l'énergie dissipée dans le contact. Elle est aussi l'un des facteurs intervenant dans l'évaluation de la durée de vie des surfaces, combinée au temps de fonctionnement, elle permet le calcul de la distance à parcourir.

### **II.12.4 Etat de surface**

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci.

En surface, le nombre de plus proches voisins est différent de ce qu'il est en volume. On parle aussi d'interface solide-gaz, solide-liquide, solide-solide.

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles)
- l'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale). Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :
  - ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2<sup>nd</sup> ordre),
  - ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> ordre).

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 et dans le cas de métaux, peut être écaillée. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologique des corps en contact Figure

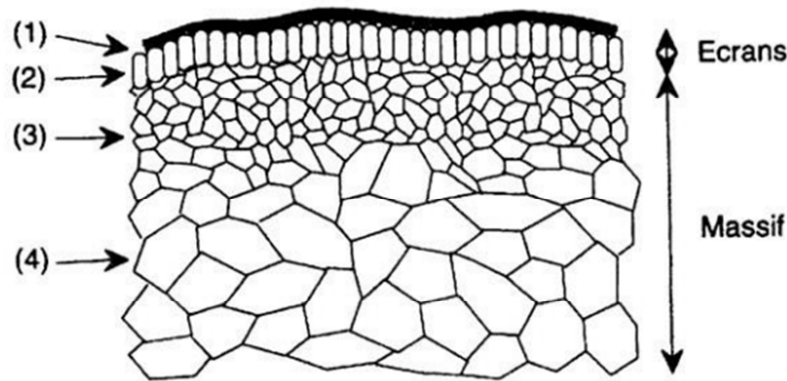


Figure I.11 : Vue théorique en coupe d'une surface

La zone (1) est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes (1 à 10  $\mu\text{m}$ ). La zone(3) est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50  $\mu\text{m}$ ) de structure écaillée ou structure de couche de diffusion. La zone (4) partant de 100  $\mu\text{m}$  est le matériau massif. Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée « usure douce ». Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure « destructrice » ou « sévère ».

Les surfaces de contact de deux corps frottant peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque : un point de la surface de contact du pion est constamment sollicité, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes.

L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même, et effets de fatigue vont être différents. Les usures du pion et du disque différeront également ainsi que les coefficients de frottement. Par exemple, pour des conditions expérimentales identiques, un pion de cuivre frottant sur un disque d'alumine présente un coefficient de frottement type Coulomb de 0,2 qui s'élève jusqu'à 1,5 lorsque le pion est en alumine et le disque en cuivre.

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- Ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- Linéaire (cylindre/plan) • surfacique (rotule dans sphère)
- Conforme (cylindre/cylindre) ou contra formel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées. Le rapport aire réelle sur aire parente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression.

La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation des aspérités : élastiques pour le modèle d'Archard (années 50), élasto-plastiques pour le modèle de Greenwood-Williamson (années 60). Plus récemment, Robbe-Valloire & al. ont publié un modèle intégrant les déformations élastiques, élasto-plastiques mais aussi totalement plastiques des aspérités.

### **I.11.5 L'environnement**

Il s'agit de préciser le milieu dans lequel évolue le contact. Ce milieu intervient sur le comportement tribologique du système par :

- Sa nature : liquide ou gaz, composition chimique,
- Sa température, son débit éventuel,
- Ses propriétés mécaniques et physiques qui interviennent dans le comportement mécanique du contact, dans l'énergie mise en jeu et dans sa dissipation,
- Ses propriétés chimiques : la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact est à l'origine de la création ou de la destruction des films superficiels dont la présence modifie considérablement le comportement du contact ; un environnement oxydant favorise la formation ou le maintien de films, un milieu neutre limite leur durée, un milieu réducteur la diminue.

### I.11.6 Matériaux

Bien que les caractéristiques de frottement ne soient pas une propriété intrinsèque des matériaux, ceux-ci peuvent intervenir d'une manière décisive dans le comportement général du système tant par leurs propriétés mécaniques que physicochimiques

### I.12 Conclusion

La tribologie est une science et rêvasse, elle intéresse les domaines d'activité lequel a conservation d'énergie, productivité, développement et fabrication de nouveaux équipements, ainsi que dans les systèmes vivants (les articulations humaines) car l'univers technique qui nous entoure est essentiellement régit par le contact.

La tribologie permet d'étudier, comprendre et d'apporter des solutions pour les problèmes liés à l'usure et au frottement, l'introduction de nouveaux matériaux et l'interdiction de certains d'autres conduisent à mettre en œuvre de nouveaux concepts et de nouvelles solutions pour résoudre les problèmes tribologiques. Des recherches fondamentales et finalisées sont souvent associées pour prendre en compte la complexité et la variété des situations, les approches interdisciplinaires favorisées.

L'amélioration des techniques connues sous la création de nouvelles (sustenta a biomagnétiques, nano tribologie, biotechnologie, tribologies partiale...) fait apparaitre de nouveaux aspects concernant la compréhension du frottement, la conception des mécanismes, des matériaux à usage tribologique, des traitements et revêtements de surfaces, des méthodes et moyens de lubrification.

## **Chapitre II : Effets de l'autolubrification sur les propriétés tribologiques des polymères**

### II.1 Introduction

Les polymères sont de plus en plus répandus dans différents secteurs par exemple l'industriels. Ils se caractérisent par leur aptitude au glissement à sec ainsi que leur coefficient de frottement réduit.

Le frottement est une caractéristique permettant d'évaluer la sévérité du chargement dans un contact. La lubrification est l'action d'assurer un film d'huile entre deux pièces en mouvement l'une par rapport à l'autre afin de réduire la résistance au glissement provoquant l'échauffement et l'usure des surfaces. Elle est donc régie par l'aptitude à vaincre toutes les contraintes qui l'opposent durant le fonctionnement requis du système lubrifié (charge, vitesse, température, irrégularité des surfaces, abrasion...). Pour ce faire, le lubrifiant doit disposer de plusieurs propriétés le qualifiant à garantir un fonctionnement optimal du système lubrifié. Dans ce chapitre, on présentera quelques généralités sur les lubrifiants.

### II.2 Généralité sur les polymères :

C'est un ensemble de macromolécules issues d'assemblage covalent de motifs identiques appelés monomère, et ce dernier et une molécule de base qui réagit par des réactions dites de polymérisation.

L'importance des polymères réside dans leurs propriétés mécaniques, thermiques, optiques, électriques et chimiques. La qualité d'un polymère est liée aux paramètres suivants:

- Propriétés mécaniques et élastiques intéressantes.
- Abondance et disponibilité à coût réduit.
- Possibilité d'avoir des matériaux de toutes les formes, de toutes les épaisseurs.
- Taux de vieillissement faible en fonction du temps.
- Flexibilité et légèreté.

Il existe de nombreuses classifications pour les polymères, en fonction du mode D'obtention, (polyaddition, polycondensation ou polymérisation) ou bien alors en Fonction de leurs propriétés (thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères),[6]

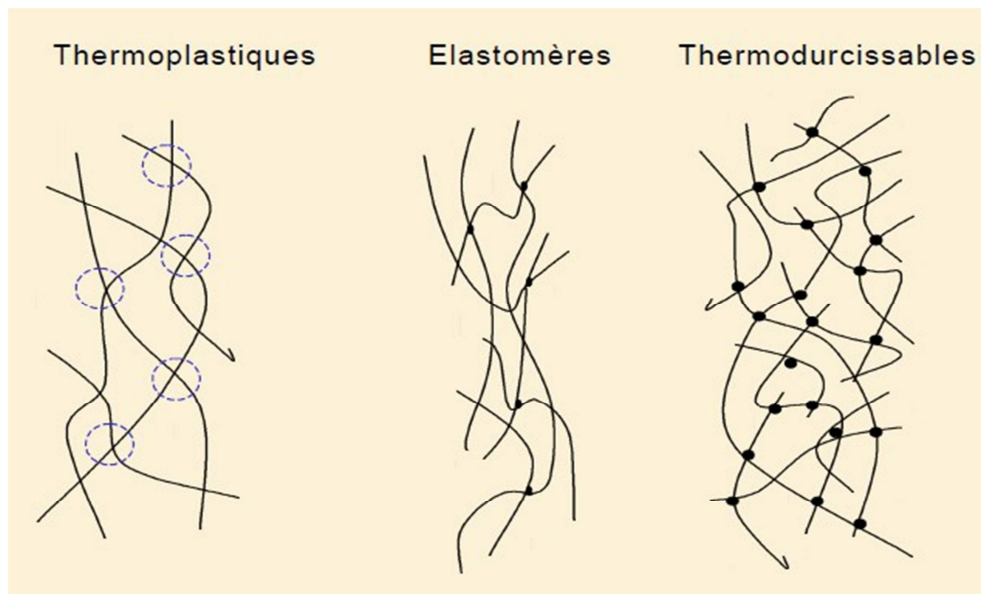


Figure II.1 : Type de polymère. [1]

On peut également les différencier par leurs structures : cristallines ou amorphes Les acronymes permettent une identification aisée puisqu'ils utilisent une séquence de Symboles indiquant la structure chimique. Des lettres supplémentaires permettent de Qualifier les charges ou les propriétés de base comme la densité, par exemple PE-HD Désigne un polyéthylène(PE) haute densité(HD).

### II.3 Les polymères thermoplastiques

En général, les thermoplastiques ont une très bonne résistance à l'usure et un faible coefficient de frottement, ce qui les rend parfaitement adaptés aux applications de frottement. La plupart résistent également très bien à l'abrasion dans des conditions de fonctionnement à sec. Ils se comportent bien lorsqu'un faible frottement est essentiel. Ces thermoplastiques offrent de nombreux avantages: résistance à l'usure, résistance à la corrosion, poids plus léger et faible émission sonore. Les pièces fabriquées avec ces thermoplastiques tendent également à générer moins de frottements, ce qui prolonge la durée des pièces et réduit les coûts de maintenance.

### II.4 Propriétés des polymères

#### II.4.1 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des polymères jouent un rôle particulièrement important. Les caractéristiques matérielles mécaniques fondamentales sont

- **La résistance mécanique** : mesure de la résistance d'un matériau à des contraintes externes
- **Rigidité** : mesure de la résistance d'un matériau à la déformation
- **Dureté** : mesure de la résistance d'un matériau à la déformation sous une forte charge en compression.
- **Solidité** : mesure de la capacité d'un matériau d'absorber de l'énergie pendant les chocs.

### II.4.2 Propriétés Tribologiques :

De nombreux facteurs affectent les propriétés tribologiques des matériaux. Pour les composites polymères, les plus influents sont [2] :

- **Charge normale** : Pour qu'un composite polymère fonctionne comme un matériau tribologique autolubrifiant solide, il doit être capable de supporter la charge, ainsi que les contraintes tangentielles induites par le glissement. En cas de charges élevées, usure sévère se produit, caractérisée par une rupture fragile ou une déformation plastique sévère. D'autre part, à de faibles charges, une usure légère se produit généralement, caractérisée par l'écoulement plastique local du film de transfert mince et des couches de surface (diminution du frottement), ainsi qu'une usure par délaminage.
- **Zone de contact** : La zone de contact détermine les contraintes de contact projetées. Si la charge ne peut pas être réduite, une façon de réduire la contrainte consiste à augmenter la surface de contact projetée. Cependant, si la zone de contact est trop grande au lieu que le matériau s'écoule sur la surface antagoniste, il aura tendance à s'accumuler, formant des arêtes, ce qui peut provoquer des contraintes localisées élevées et une adhérence plus élevée, donc un frottement et une usure plus élevés. Il est important de concevoir une pièce avec une correspondance correcte de la charge et de la zone de contact.
- **Vitesse de glissement** : Les vitesses de glissement élevées peuvent produire des températures élevées en raison du chauffage. Cela peut provoquer la dégradation du polymère ou des additifs composites polymères. Pour développer un film de cisaillement de surface et/ou un film de transfert, la chaîne moléculaire doit avoir le temps de se réorienter. Si l'on glisse trop vite sur ces chaînes non orientées, au lieu de se réorienter, elles se fracturent, entraînant la production de grosses particules d'usure.

et une usure élevée. Il est donc important de choisir la vitesse de glissement pour chaque polymère particulier afin d'assurer des performances optimales.

- **Topographie du matériau antagoniste:** si le matériau antagoniste est trop rugueux, il peut abraser le composite et empêcher la formation d'un film de cisaillement ou d'un film de transfert. Par conséquent, il pourrait être généralement admis que plus l'antagoniste est lisse, plus l'usure est faible. Ceci a certaines limites, puisqu'il s'avère également qu'un polissage excessif a tendance à éliminer le matériau de matrice plus mou de l'antagoniste, laissant les phases et/ou particules plus dures dépasser au-dessus de la surface.
- **Température:** à basse température, les propriétés de frottement et d'usure de la plupart des polymères ne sont pas aussi exceptionnelles qu'à la température ambiante ou au-dessus. A des températures plus basses, les polymères perdent leur capacité de relaxation, c'est-à-dire que le mouvement de leur chaîne moléculaire principale n'obtient pas un degré de liberté adéquat, et ainsi le polymère n'obtient pas beaucoup de plasticité. Des températures élevées peuvent affecter la liaison entre le matériau de remplissage et la matrice polymère. Ils peuvent également affecter les propriétés lubrifiantes de certains additifs dans les composites polymères, car ces additifs peuvent résorber les gaz à certaines températures ou même se décomposer.

### Objectif de ce chapitre est de :

- Montrer le rôle des lubrifiants.
- Indiquer les classifications, les caractéristiques et les propriétés des principales de lubrifiants.
- Définir les différents Lubrifiants solides suivant leurs types ainsi que leurs fonctions.

### II.5 La lubrification :

Un lubrifiant est une substance qui va être déposée dans un contact pour assurer les fonctions suivantes:

1. permettre la séparation des surfaces. Cette fonction est essentiellement assurée par la viscosité du fluide.

L'objectif de la séparation des surfaces est d'empêcher le contact direct des solides et donc le frottement puis l'usure.

2. protéger les surfaces principalement contre des réactions chimiques avec l'environnement (corrosion, oxydation).

3. évacuer du contact les débris (particule d'usure ou autres), les polluants, la chaleur générée, etc.

Dans certains environnements extrêmes, il n'est pas possible d'utiliser des lubrifiants fluides. C'est le cas d'applications cryogéniques, d'applications à très haute température ou dans l'espace. On fait alors appel à des lubrifiants solides.

### II.5.1 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 cisillables, 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 MoS<sub>2</sub>, tous deux d'origine naturelle et le PTFE obtenu par synthèse.

#### II.5.1.1 Le graphite

La structure lamellaire du graphite est hexagonale caractérisée par de fortes liaisons covalentes entre les atomes de carbone d'une même couche et de faibles liaisons de Van der Waals, entre les atomes de carbone des couches différentes. Il en résulte une faible résistance au cisaillement entre les différentes couches et de bonnes propriétés de frottement (Figure II.2) Lorsqu'il existe à l'état naturel, le graphite présente des qualités tribologiques très variables en fonction de son taux de cristallinité carbone graphitisé/carbone amorphe et de sa pureté. Il peut être également produit par synthèse à partir de coke de pétrole et avoir ainsi un haut degré de pureté et de cristallinité. Les propriétés lubrifiantes des graphites

peuvent donc varier considérablement d'un échantillon à l'autre ainsi que leurs prix qui peut s'étager dans un rapport de 1 à 10.[3-4]

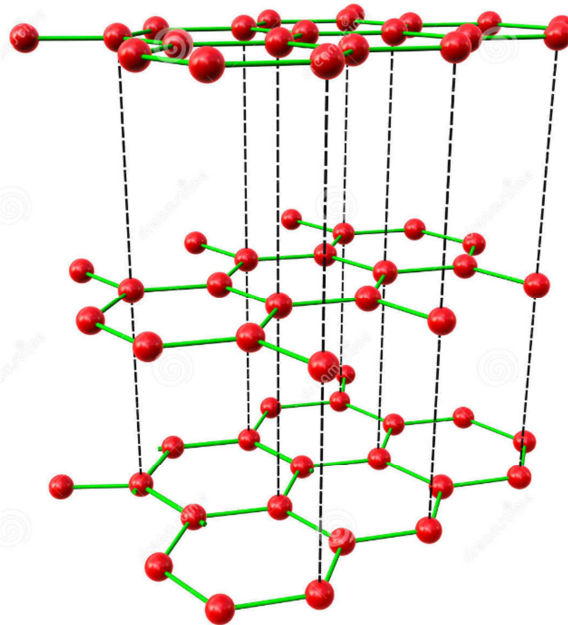


Figure II.2 : Schéma montrant la structure du graphite [3-4]

Le graphite est un matériau de frottement dans l'air de  $-180$  à  $+450$  °C et jusqu'à  $2000$  °C en atmosphère neutre mais son efficacité est due à l'adsorption de vapeur d'eau ou de gaz ; ses qualités frottantes sont donc diminuées à chaud, sous vide ou dans les milieux anhydres (il tend alors à devenir abrasif). Son coefficient de frottement varie entre 0.05 et 0.2.

Il peut être utilisé sous forme de poudre, de dispersion dans de l'eau, dans les huiles minérales et synthétiques, dans des solvants volatiles comme additif dans la composition de certaines graisses ou comme composant de vernis de glissement.

### III.5.1.2 Le Bisulfure de Molybdène ( $\text{MoS}_2$ )

À l'état naturel, le bisulfure de molybdène ( $\text{MoS}_2$ ) existe sous forme de molybdénite. Celle-ci est affinée à l'acide fluorhydrique pour éliminer certaines impuretés abrasives comme la silice. Tout comme le graphite, les remarquables propriétés tribologiques du  $\text{MoS}_2$  sont offertes par sa structure hexagonale lamellaire formée par des couches d'atomes de molybdène qui sont prises en sandwich entre les couches d'atomes de soufre (Figure II.3).

Les liaisons entre les couches de molybdène sont covalentes, donc fortes, alors que celles entre les couches de soufre voisines sont de type Van der Waals, donc faibles, cela explique la facilité de glissement du cristal au niveau des clivages des couches de  $\text{MoS}_2$ . [3-4]

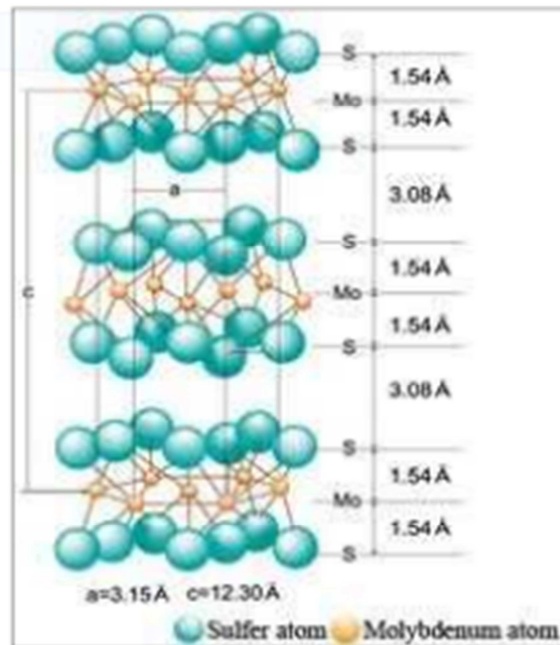


Figure II.3: Schéma montrant la structure cristallographique du  $\text{MoS}_2$ . [3-4]

Le  $\text{MoS}_2$  peut être utilisé à l'air de  $-180$  à  $+350$  °C et en atmosphère neutre ou réductrice jusqu'à  $650 - 700$  °C. Ses propriétés de frottement sont améliorées dans le vide poussé où il peut atteindre des températures de  $1100$  à  $1300$  °C.

Son coefficient de frottement varie de  $0,02$  à  $0,2$ .

Il s'utilise sous forme de poudres, de dispersions dans un fluide volatil et principalement sous forme de vernis de glissement seul ou en association avec d'autres lubrifiants solides.

On peut également citer parmi les lubrifiants à structure hexagonale lamellaire :

- le nitrure de bore (BN) céramique également appelée graphite blanc. Il est surtout utilisé sous forme de vernis de glissement et n'a d'intérêt qu'à haute température de  $250$  °C à  $750$  °C. Son coefficient de frottement est de l'ordre de  $0,2 - 0,3$ .

▪ le fluorure de cérium (CeF<sub>3</sub>) utilisé à plus haute température que le MoS<sub>2</sub> jusqu'à 1000 °C dans l'air ou l'argon.

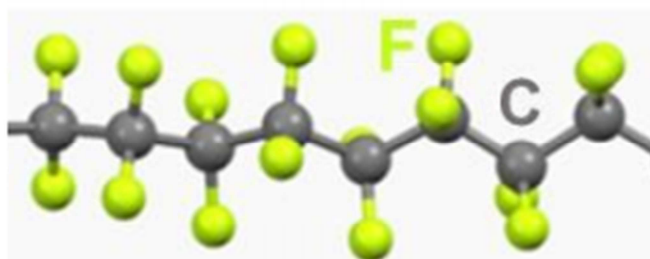
▪ Le fluorure de calcium (CaF<sub>2</sub>) utilisé pour la lubrification à haute température de 500 à 1000 °C notamment en présence de radiation. Il s'utilise sous forme de film.[5]

### II.5.1.3 Le PTFE ou polytétrafluoroéthylène

Le PTFE est un polymère thermoplastique semi-cristallin composé de fluor (F) et de carbone (C). La liaison carbone-fluore est l'une des liaisons la plus forte de la chimie inorganique. Le tétrafluoroéthylène gazeux est converti en polymère de polytétrafluoroéthylène en présence de certains catalyseurs et des émulsifiants pendant la phase de polymérisation. Il possède une masse moléculaire dans la gamme de 10<sup>6</sup> g/mole. Il se caractérise par une macromolécule dont la structure est linéaire (Figure II.4.).[5]



a)



b)

Figure II.4 : (a) Formule chimique du monomère du PTFE (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)<sub>n</sub> (b) sa structure moléculaire

le PTFE (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)<sub>n</sub> peut s'utiliser entre -160 °C (voir -200 °C) et +250 °C. C'est le meilleur matériau plastique autolubrifiant avec des valeurs très faibles de coefficient de frottement (0.02 à 0.05) sous charges relativement élevées mais faible vitesse. Sa limitation en vitesse est due au fait que c'est un isolant thermique. Sous forme massive, sa capacité de charge est limitée par sa déformation plastique.

- Il existe d'autres polymères fluorés aux propriétés voisines du PTFE : le copolymère FEP (tétrafluoroéthène-perfluoroprène) moins cher que le PTFE mais avec des propriétés de frottement moins bonnes ; le PVDF ou PVF<sub>2</sub> (polyfluorure de vinylidène), plus résistant

mécaniquement mais utilisable entre -40 et +150 °C ; le PTFCE (polytrifluorochloréthylène), de moins en moins employé, utilisable jusqu'à -250 °C.

Parmi les autres lubrifiants solides, on peut notamment citer les polyamides (PA), les polyéthylènes haute densité (PE hd), les polyacétals ou polyoxyméthylènes (POM), les polyimides (PI).[6]

### 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].

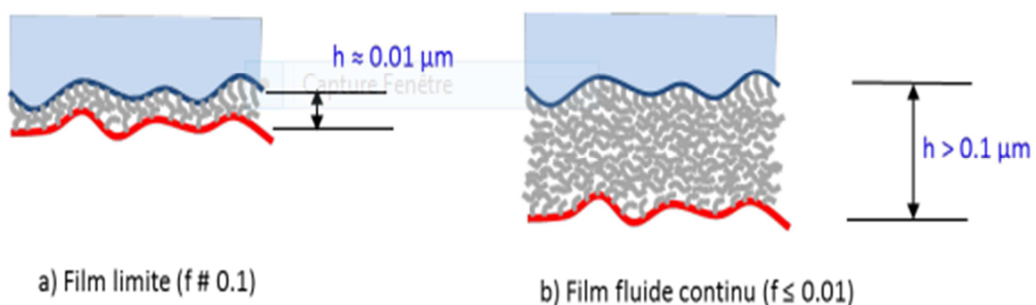


Figure II.5 : Les 2 mécanismes de fonctionnement du film d'huile

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 17 : 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.6 Le Film du 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'antifriction etc.),
- des sels métalliques autolubrifiants tels que les sulfures, les chlorures, les phosphates apportés soit par traitement de surface (sulfuration) 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 ( $\text{MoS}_2$ ).
- 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.7 Renforcement des composites polymères :

### II.7.1 Graphite

Les pourcentages utilisés varient entre 5 et 15%. Le graphite abaisse le coefficient de frottement et est donc employé en plus des autres charges déjà présentes, afin d'améliorer uniquement cette propriété. Néanmoins, le graphite apporte aussi une influence positive sur la résistance au fluage et dans un degré moindre sur la résistance à l'usure.

### II.7.2 Les fibres de verre

Le PTFE est renforcé de fibres de verre. Le pourcentage varie entre 5 et 40%. L'apport en fibres de verre améliore les propriétés de résistance à l'usure et, dans un degré moindre, la résistance à la compression tout en laissant quasiment inchangées les caractéristiques électriques et chimiques. Le verre lui-même, possède une résistance chimique plutôt faible contre des alcalis et est facilement attaqué par l'acide fluorhydrique. Le coefficient de

frottement est légèrement pénalisé et pour cette raison, on ajoute parfois du graphite afin de compenser cet effet secondaire.

### II.7.3 Le carbone

Le carbone est ajouté au PTFE dans un pourcentage en poids variant entre 10 et 35%, avec un faible pourcentage du graphite. Le carbone tend améliorer de manière notable la résistance à l'usure et au fluage, tout en laissant pratiquement inchangée la résistance chimique; seules, les propriétés électriques sont sensiblement modifiées.

### II.7.4 Le bronze

Le bronze, utilisé comme charge de remplissage, est introduit dans des pourcentages en poids variant entre 40 et 60%. Le PTFE chargé de bronze possède le meilleur comportement à l'usure, très peu de déformation par fluage ainsi qu'une bonne conductibilité thermique. Toutefois, les caractéristiques d'isolation électrique et la résistance chimique sont très faibles (cela provient du bronze ajouté). Pour ces raisons, le PTFE chargé de bronze n'est presque plus utilisé (sauf pour de très petites pièces) car en plus, il est assez coûteux.

### II.7.5 Les autres agents de remplissage

Le bisulfure de molybdène est parfois préféré au graphite comme agent favorisant le coefficient de frottement. Des poudres de métal (acier inoxydable, nickel, titane) sont employées pour leur résistance particulière à des agents chimiques précis en remplacement du bronze (qui reste le meilleur pour les applications de frottement). Certains oxydes de métalliques en complément aux charges classiques, peuvent également apporter de meilleures propriétés à l'usure.

## II.8 Recherche tribologique

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 augmente la résistance à l'usure de tous les composites étudié.

La résistance a été trouvée pour le composite contenant 18 vol. % de carbone et 7 vol. % de graphite (Fig. II.6). Les valeurs du coefficient de frottement sont comprises entre 0,11 et 0,16 (Fig. II.7). 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 $\mu\text{m}$ ) ; paillettes de graphite (taille : 25 – 50 $\mu\text{m}$ )
C	85 % PTFE + 15 % verre E	Fibres de verre E (diamètre : 10 $\mu\text{m}$ ; longueur : 50 – 75 $\mu\text{m}$ )
D	75 % PTFE + 25 % verre E	

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

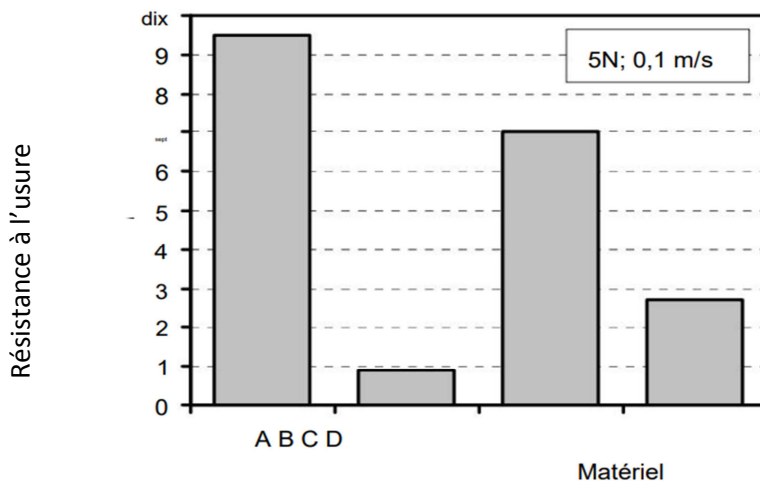


Figure II.6 : Taux d'usure spécifique moyen du PTFE et des composites PTFE (adopté). [9]

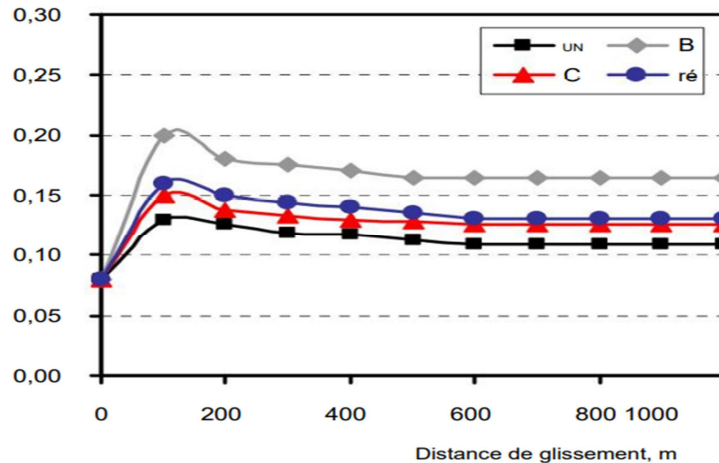


Figure II.7 : Comportement en frottement du PTFE et des composites PTFE [10]

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.

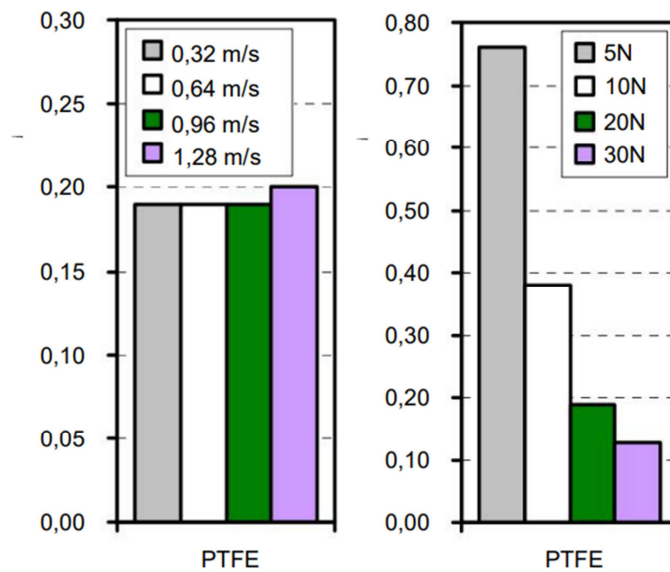


Figure II. 8 : variation du coefficient de frottement du PTFE en fonction de la vitesse de glissement (pour une charge de 20 N) et à la charge appliquée (pour une vitesse de 0,32 m/s) (adapté de [12])

L'influence des particules de verre (25 vol. % ; 40  $\mu\text{m}$ ) et des particules de bronze (40 vol. % ; 48  $\mu\text{m}$ ) sur le comportement à l'usure des composites à base de PTFE a été étudiée par MudasarPasha et al. [13]. Les tests ont été effectués sur un tribomètre pion-disque avec différentes charges normales (20 – 100 N, soit 0,2 – 1 MPa), vitesses de glissement (1,5 – 5,5 m/s) et distances (500 – 2500 m). Les résultats expérimentaux indiquent que la perte de poids augmente avec l'augmentation de la charge et de la vitesse de glissement (Fig. II.9). Le composite PTFE + 40 % bronze présente une meilleure résistance à l'usure que les autres (Fig. II.10).

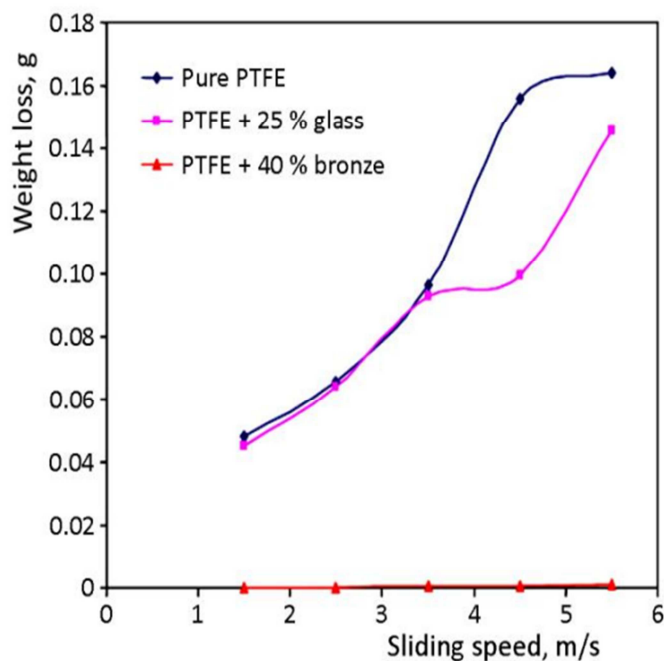


Figure II.9 : Perte de poids en fonction de la vitesse de glissement à une charge appliquée constante de 60 N et une distance de glissement de 1500 m

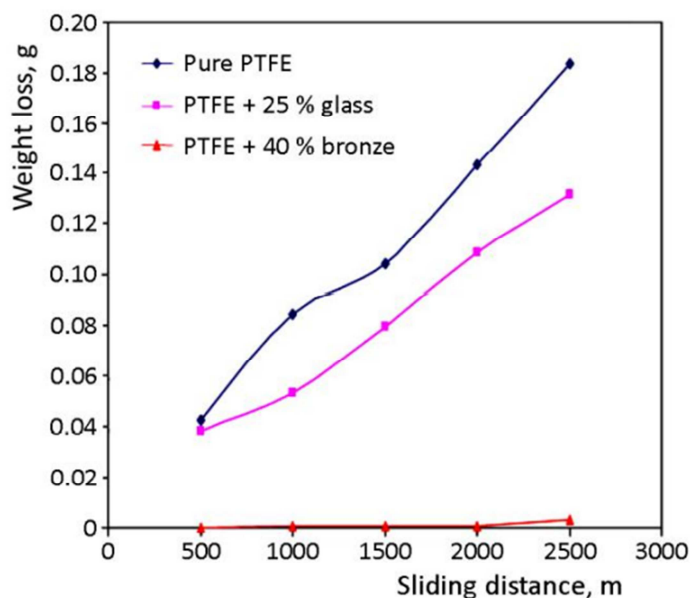


Figure II.10 : Courbes d'usure des matériaux testés pour une charge de 60 N et une vitesse de 1,5 m/s

Goyal et Yadav [14] ont étudié l'évaluation du taux d'usure et du coefficient de frottement pour les composites de PTFE chargés de flocons de graphite (2, 5 et 10 % en poids ; 10  $\mu\text{m}$ ). Elle a été réalisée sur un tribomètre pion-disque dans des conditions de glissement sec, à une

vitesse de glissement de 1 m/s et une charge de 25 N (0,19 MPa), pendant 8000 m. Une diminution significative de l'usure des composites par rapport au PTFE pur est constatée. Les taux d'usure des composites avec 5 et 10 wt. % de graphite ont été diminués respectivement de 22 et 24 fois (Fig. II.11).

Cette diminution du taux d'usure est également attribuée à la formation d'un film de transfert mince et tenace sur la surface de contrepartie.

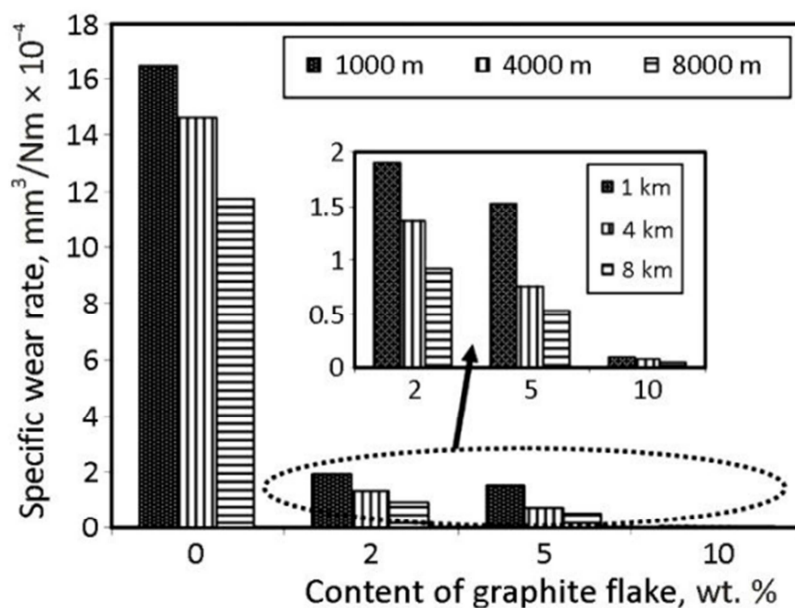


Figure II.11 : Coefficient de frottement avec différentes teneurs en flocons de graphite

Par rapport au PTFE pur, les composites ont montré un coefficient de frottement stable (Figure II.12). Le coefficient de frottement le plus bas est de 0,20 pour les composites de 2 et 5 wt. % de graphite. Pour composite avec 10 wt. % de graphite, le coefficient de frottement est légèrement supérieur et proche de la valeur obtenue avec du PTFE pur. Quoiqu'il en soit, les variations du coefficient de frottement sont très faibles.

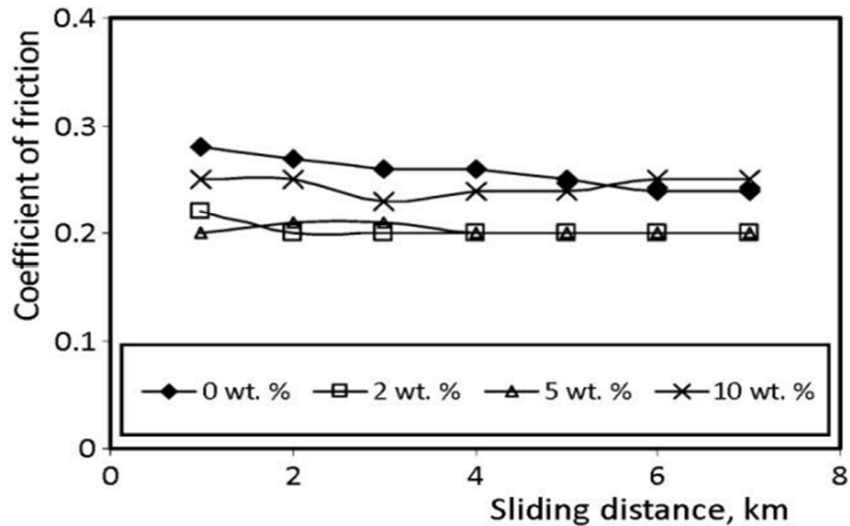


Figure II.12 : Coefficient de frottement avec différentes teneurs en flocons de graphite

Unal et al. [15] ont également étudié le comportement au frottement et à l'usure du PTFE pur et des composites polymères PTFE chargés de bronze (25, 40 et 60 %) sous une plage de charge appliquée de 5 à 200 N (0,18 - 7,07 MPa) et une plage de vitesse de glissement de 0,32 à 2,0 m/s, à l'aide d'un tribomètre pion-disque. Les résultats ont montré que le composite PTFE chargé de bronze présentait un coefficient de frottement inférieur (Fig.II.13).

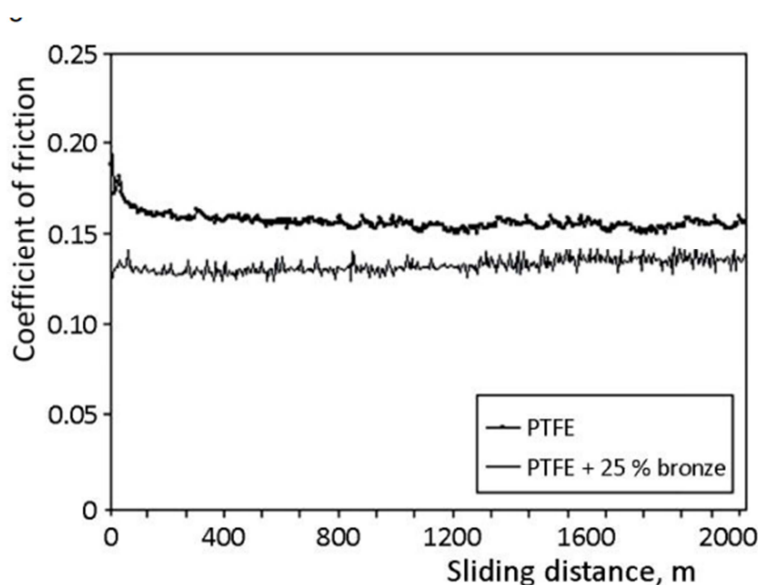


Figure II.13 : Variation du coefficient de frottement avec la distance de glissement (charge normale : 50 N ; vitesse de glissement : 1,5 m/s)

Le PTFE comme matrice de base peut être renforcé par des charges métalliques. Ces charges qui ont des performances de résistance plus forte dans un composite polymère donc il pourrait être intéressant de présenter un diagramme qui montre la dépendance du taux d'usure spécifique sur le poids. % de matériaux de remplissage (Fig. II.14) [16] Bien qu'il existe des matériaux de remplissage qui ne font pas l'objet de cet article, il pourrait être intéressant de comparer le taux d'usure spécifique pour différents composites polymères.

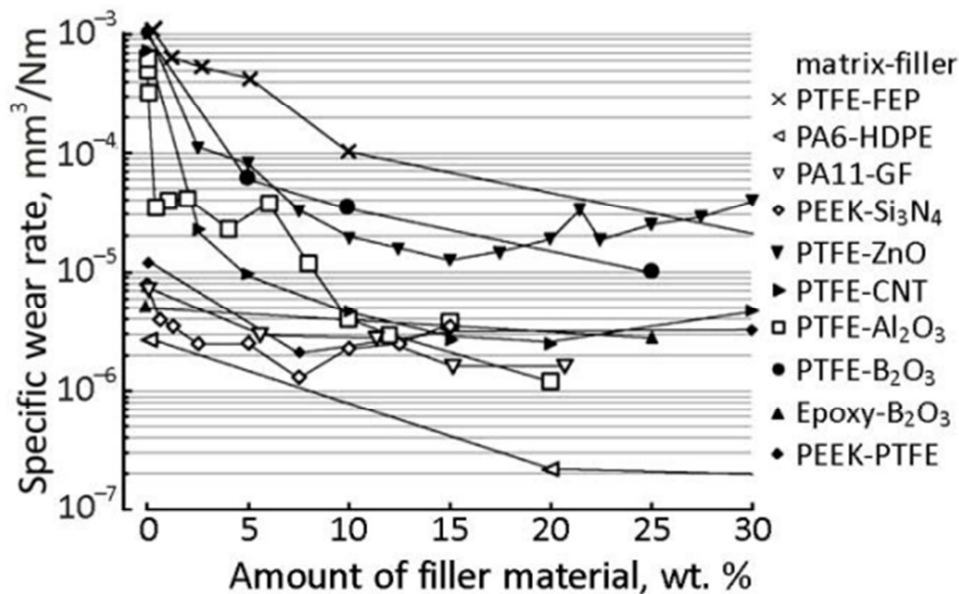


Figure II.14 : Taux d'usure spécifique en fonction du poids. % de matériau de remplissage pour divers composites polymères (FEP – éthylène propylène fluoré ; PA6 – polyamide 6 ; HDPE – polyéthylène haute densité ; PA11 – polyamide 11 ; GF – fibre de verre ; PEEK – polyéther éther cétone ; CNT – nanotube de carbone)

### Résultats :

Nous avons vu le comportement tribologique des composites PTFE, remplis de fibres de verre, de flocons de graphite, de carbone, de bronze ou d'une combinaison des matériaux de remplissage mentionnés, a été analysé. On remarque que le coefficient de frottement reste généralement compris entre 0,1 et 0,3. En ce qui concerne l'usure du PTFE pur et de ses composites, l'influence des matériaux de remplissage est assez significative. La présence de matériau de remplissage peut augmenter la résistance à l'usure (diminuer l'usure) jusqu'à 2 à 3 ordres de grandeur. Cependant, nous pouvons conclure que les meilleurs résultats, concernant la résistance à l'usure, ont été obtenus par les composites PTFE + bronze.

### II.9 Le produit PV des polymères :

La valeur PV est également une donnée technique classique pour les pièces en mouvement en condition de frottement. Cette valeur PV est le produit de la vitesse de déplacement (en m/sec) multipliée par la pression de surface en MPa. Chaque matériau possède une valeur PV maximale au-delà de laquelle le degré d'usure devient trop important. Cette valeur "PV max" (maximale) est une constante caractéristique pour chaque matériau. Lorsque la valeur PV augmente, le degré d'usure suit la même courbe linéaire. Si on dépasse la valeur PV max, le degré d'usure perd son comportement linéaire et augmente considérablement provoquant ainsi, assez vite, la dégradation du matériau de glissement.

On peut donc dire que le facteur d'usure est tout comme le facteur PV max un des paramètres caractéristiques propre à chaque matériau. Dans la pratique, cependant, on peut comprendre aisément que le facteur d'usure et le PV max d'un même matériau peuvent subir des variations avec la nature, la dureté et la finition extérieure de l'autre surface de contact dite "associée". Il en est de même en présence, ou pas, de refroidissement et/ou de lubrification.

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 P.V sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur P.V en (M Pa. m/s) est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème / contact. La valeur P.V multipliée par le coefficient de frottement, détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact. 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), car les matériaux ou le lubrifiant ne peuvent plus supporter les sollicitations thermiques ou mécaniques et « répondent » par un changement de mécanisme d'usure qui peut aller jusqu'au grippage. Les domaines d'usure

(douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans le plan (p, v) (voir figure 15) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit (p.v) à prendre en considération : Les matériaux présentés dans la figure (II.15) possèdent tous un domaine de faible taux d'usure, mais pour des valeurs de  $Pet V$  sensiblement différentes ; En dehors de ce domaine, le taux d'usure dépend du fortement et de la valeur du produit  $P.V$  et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine.

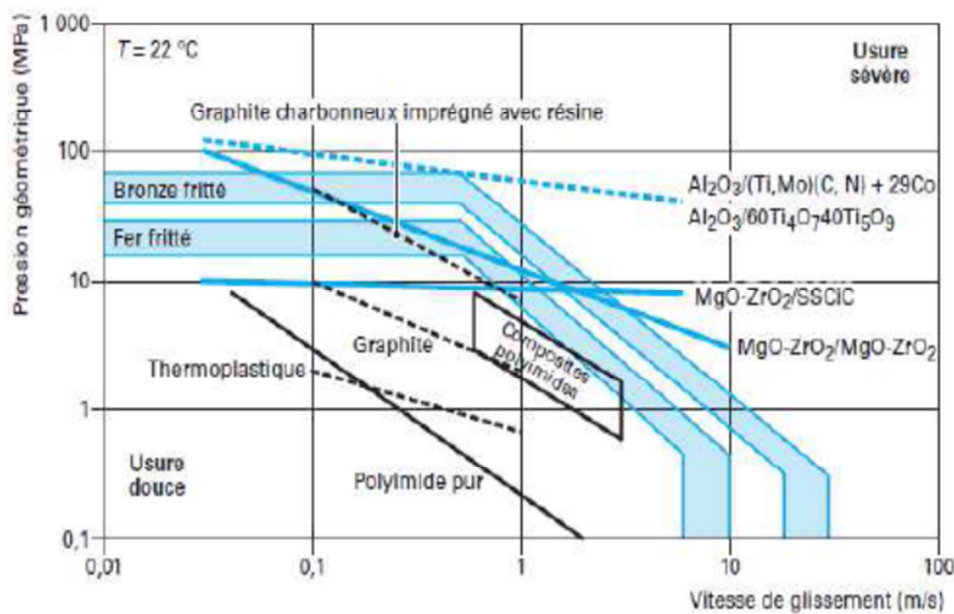


Figure II.15 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés [17].

L'objectif de notre étude ne se limite pas à l'amélioration des performances tribologiques du polyester mais aussi à l'amélioration du produit PV par adjonction d'additifs tel que le charbon activé ce qui augmentera davantage la durée vie des pièces.

## II.10 L'influence de la température sur la tribologie des polymères

L'augmentation de la température joue également un rôle important: Si on observe pour du PTFE pur et pour une application définie, une déformation égale à "x" à 23°C, à 100°C, on observera x/2 et à 200°C, x/10. De toute façon, le PTFE et en particulier le PTFE chargé, sont parmi les matières plastiques qui admettent des déformations encore admissibles lors de sollicitations mécaniques au-delà de 200°C,. Enfin, on constate que:

- La résistance à la déformation sous charge des PTFE chargés est environ de moitié celles des PTFE non chargés (ce qui peut surprendre).
- La déformation rémanente est d'environ 50% de la déformation observée sous charge.
- La résistance à la compression des PTFE chargés est environ double de celles des PTFE non chargés.

L'ajout du charbon activé dans la matrice polymère peut favoriser la conductivité thermique du composite par conséquent sa résistance mécanique. Le tableau III.2 Montre les bonnes caractéristiques thermiques du charbon activé. C'est ce que vérifier dans notre travail expérimental

### II.11 Conclusion

Ce chapitre montre que les lubrifiants solides et liquides tels que le graphite, le PTFE et le MoS<sub>2</sub> offrent de nombreux avantages dans les applications tribologiques. La plupart de ces lubrifiants sont utilisés comme additifs dans les composites polymères autolubrifiants.

Ces lubrifiants solides et liquides peuvent être incorporés dans des polymères sous forme de charges particulières pour conférer les propriétés lubrifiant unique, Il est basé sur la modification des propriétés des polymères telles que la conductivité thermique.

En général, une forte adhérence et la formation de film de l'interface de glissement semblent être la clé pour obtenir un faible frottement et une longue durée de vie sur la plupart des surfaces lubrifiées solides. L'ajout de fibre ou charge métallique a la matrice polymères pour augmenter la résistance mécanique améliore considérablement la résistance a l'usure.

**Chapitre III : La partie expérimentale**

### III.1 Introduction

L'objectif principale de ce travail consiste à l'étude de l'influence de l'ajout de différents additifs tels que : la poudre du charbon activé et de l'huile sur les caractéristiques tribologiques et mécaniques d'une résine polyester thermodurcissable.

Ce chapitre est subdivisé en trois parties,

En premier nous allons présenter les différents constituants des matériaux à élaborer et procédés d'élaboration. Par la suite, nous exposons les techniques expérimentales, où nous présentons le tribomètre et son mode de fonctionnement.

Deuxièmement, nous allons présenter les différents résultats obtenus regroupés selon les différents taux de pourcentages d'additifs utilisés pour chaque composition. Une étude comparative entre les différentes compositions

### III.2 Présentation et élaboration des matériaux utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux à base de résine polyester thermodurcissable, chargé par plusieurs additifs de nature différente : le charbon activé et l'huile.

#### III.2.1 Résine Polyester

La résine polyester thixotropique, Particulièrement étanche, a été utilisée dans des différents domaines (construction navale, Aéronautiques .....). Ses propriétés peuvent être améliorées par l'ajout des renforts, charges et additifs. Dans notre travail nous intéressons aux propriétés tribologiques par l'ajout d'additifs le charbon activé et l'huile.

Les caractéristiques de la résine polyester sont les suivantes :

- Densité à 20 °C : 1.10
- Point d'éclair : 31°C
- Etat physique : Thixotrope (gel)

Nous avons utilisé une huile lubrifiante et du charbon activé comme additifs dans les matrices polymères à base de polyester.

### III.2.2 L'Huile lubrifiante

Pour obtenir un matériau autolubrifiant de performances tribologiques améliorées, nous avons utilisé une huile lubrifiante de la marque **Total Quartz 7000 10W-40** pour les moteurs mécaniques. L'ensemble des caractéristiques sont données au tableau 2.

TOTAL QUARTZ 7000 10W-40	Unités	Grade SAE <b>10W-40</b>
Masse volumique à 15°C	kg/m <sup>3</sup>	873.6
Viscosité à 40°C	mm <sup>2</sup> /s	96.8
Viscosité à 100°C	mm <sup>2</sup> /s	14,81
Indice de viscosité	-	160
Point éclair Cleveland	°C	232
Point d'écoulement	°C	-24°C

Tableau III.1 : Caractéristiques de l'huile utilisée

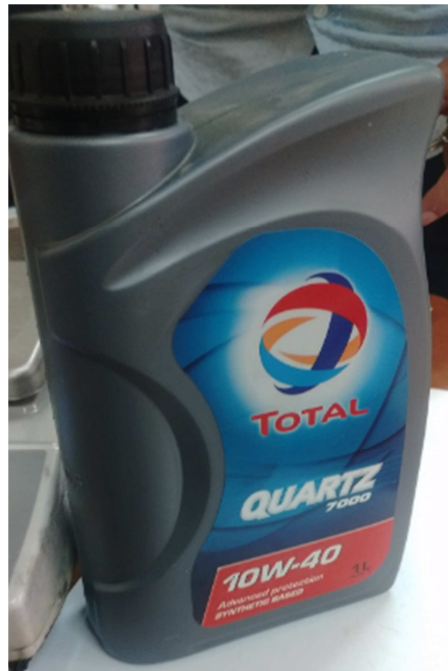


Figure III.1 : L'huile Total 10W40.

### III.2.3 Le charbon Activé :

Le charbon activé est une poudre noire insoluble, sans odeur ni saveur, obtenue par pyrolyse de substrats organiques et lavée à l'acide pour éviter tout rélargie de produits toxiques. L'activation par un courant gazeux oxydant à haute température (600 à 900°C) permet d'obtenir un fin réseau de pores, ce qui augmente la surface spécifique de 1000 à 3500 mètres carré/g et multiplie par 2 ou 3 son pouvoir d'adsorption.

Le charbon activé possède les propriétés suivantes :

- Adsorption de toxiques dans la lumière intestinale : formation de complexes inactifs charbon-toxiques, rupture du cycle entéro-hépatique pour certains toxiques et leurs métabolites
- « Dialyse intestinale » de certains toxiques, par liaison aux molécules diffusant du sang vers la lumière intestinale, lors d'une administration du charbon à doses répétées.

Humidité à l'ensachage, % MAX	15
Indice de mélasse	330
Densité en place, kg/m <sup>3</sup> /min	220
Granulométrie, % max : > 1.6 mm < 0,4 mm	5 3

Tableau III.2 : Caractéristiques du charbon activé.

### III.3 Procédure d'élaboration

La mise en œuvre des différents matériaux est assurée dans des conditions normales à température ambiante au laboratoire de RDM département Génie mécanique. L'élaboration s'effectue en deux étapes, après la préparation des moules présentées par la figure III.2 ainsi que le choix des différents pourcentages en additifs pour nos matériaux nous allons mélanger avec la résine polyester 1% d'accélérateur en cobalt et 1% du durcisseur afin d'accélérer le durcissement.



Figure III.2 : les moules fabriqué.

Ce mélange nous lui ajoutons les différents additifs (charbon active, l'huile) à plusieurs pourcentages à l'aide d'une balance montré dans la figure III.3, les mélanges seront versés dans le moule comme le montre la figure III.4. Après conditionnement à température ambiante pendant plus de 72 heures, les plaques sont démoulées et subissent par la suite une post-cuisson à température ambiante. A la fin de la polymérisation nous procédons au découpage.



Figure III.3 : La balance.



Figure III.4 : Préparation d'une composition

Six compositions à base de polyester ont été élaborées :

- Résine polyester (Pure)
- Résine polyester /Carbone activé

- Résine polyester / 3 % en poids Ca (nommée PE/3Ca)
- Résine polyester / 5 % en poids Ca (nommée PE/5Ca)
- Résine polyester / Huile
- Résine polyester / 5% en poids Huile (nommée PE/5H)
- Résine polyester / 10% en poids Huile (nommée PE/10H)
- Résine polyester / Charbon actif / Huile
- Résine polyester / 3 % en poids Ca / 5% en poids Huile (nommée RP/3Ca/5H)

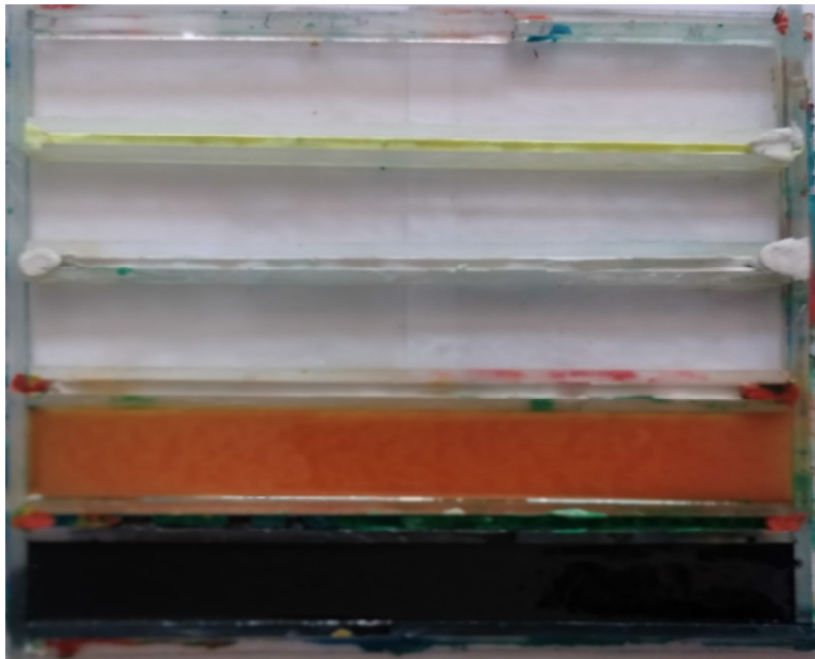


Figure III.5 : Les moules après remplissage

- Résine polyester / 15% en poids Huile (nommée PE/15H)

Nous avons essayé l'élaboration d'une composition avec 15% huile. La combinaison n'a pas abouti, car l'huile ne se mélange pas avec la résine à cause du taux d'huile que nous supposons élevé, c'est ce que nous amène à dire que le taux de huile maximum qui peut être imprégné dans la résine polyester est limité à 10%.

Le durcissement des échantillons chargés d'huile a pris plusieurs jours, ceci peut s'expliquer par polymérisation ralenti suite à la présence d'huile dans la composition.

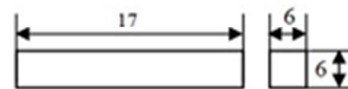
### III.4 Découpage et préparation des Pions

Après le durcissement des plaques, nous avons procédé au découpage des échantillons à l'aide d'une scie à métaux. La Figure III.6 montre la fixation des plaques élaborées dans l'étau pour le découpage des pions.



Figure III.6 : Procédé de découpage.

A la fin de cette opération nous avons obtenu des pions de section 6mm x 6mm et une longueur de 17mm.



Pion

Figure III.7 : image des Pions.

### III.5 Méthodologie de travail :

### III.5.1 Dispositif expérimental:

Afin de déterminer les caractéristiques tribologiques de la résine polyester, des tests ont été fait dans des conditions de frottement à sec ont été effectués sur un tribomètre de type pion-disque conçu et réalisé à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

### III.5.2 Nomenclature du banc

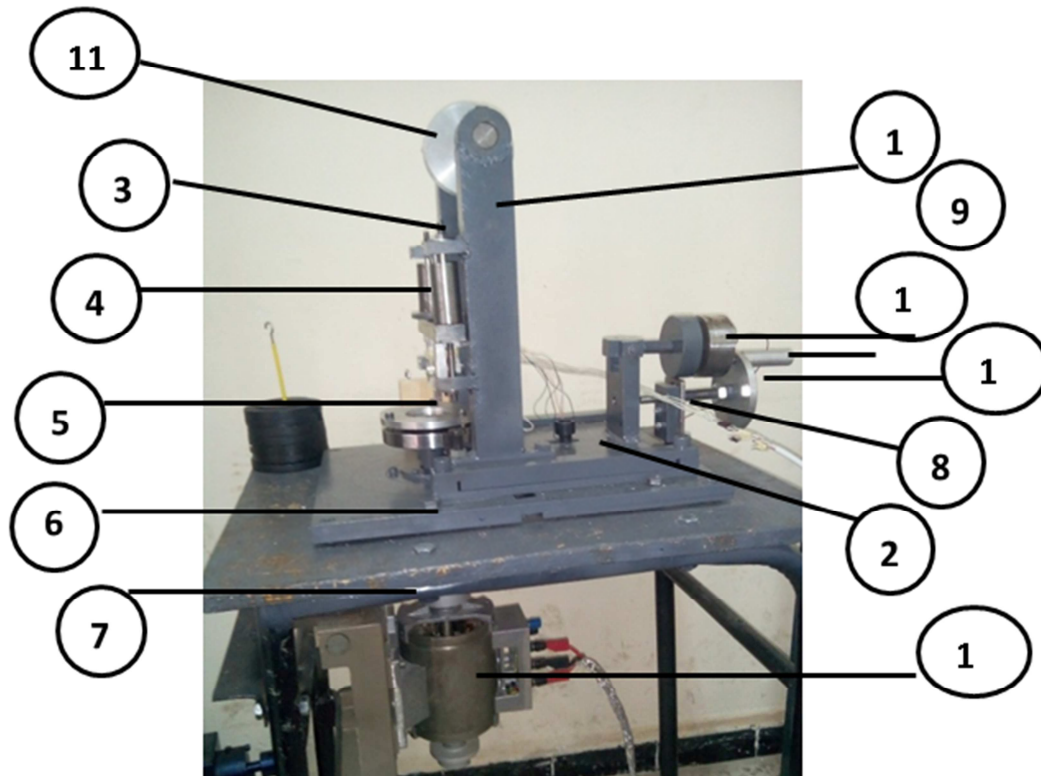


Figure III.8 : Tribomètre.

1-Bâti, 2- Plaque coulissante, 3- axes, 4- bague de guidage, 5- Porte capteur, 6-Capteur de force, 7-Disque, 8-masse morte, 9-liaison glissière, 10-moteur électrique, 11-Poulie,12-volant, 13-Poignée.

### III.5.3 Principe de fonctionnement

Son principe consiste à appliquer une charge verticale sur un pion immobile en contact avec la face plane d'un disque en rotation. Lors de l'essai de frottement un capteur à jauges de

contrainte enregistre les valeurs de l'effort tangentiel grâce aux déformations des jauges. Ce tribomètre permet la variation de la vitesse linéaire en change le rayon de la piste de glissement du pion sur le disque grâce à la liaison glissière d'une plaque coulissante avec le bâti. Le dispositif est muni d'un système de compensation avec des masses mortes 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 d'une puissance de 220W tournant à 1400 tr/min qui entraine la broche porte disque (figure III.8). L'effort tangentiel  $F_T$  et le coefficient de frottement induit par le contact (pion/disque), est mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (6), qui est relié à une chaîne d'acquisition qui enregistre les données.

### III.5.4 Disque :

Afin d'étudier les propriétés tribologiques du couple acier/Polyester. Nous avons utilisé des disques en acier XC48 qui ont subi un traitement thermique (trempe et revenu), polissage et des essais de dureté.

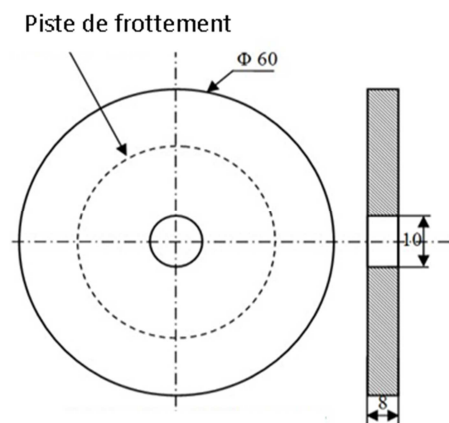


Figure III-9:Formes et dimensions du pion et du disque

#### III.5.4.1 Traitement thermique :

Le traitement thermique est réalisé au laboratoire de Science des Matériaux du département de génie mécanique. Trempe et revenue

##### III.5.4.1.1 La trempe :

Nous avons fait subir une trempe à ns disques, son rôle est généralement de permettre d'obtenir des structures hors équilibre dans les conditions où nous les rencontrons, à l'échelle

aussi bien cristalline que micrographique.

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

Nous avons installé les échantillons sur des tiges filetées et nous les avons mis dans un four électrique de puissance 11W dont la température maximale est de 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°C.

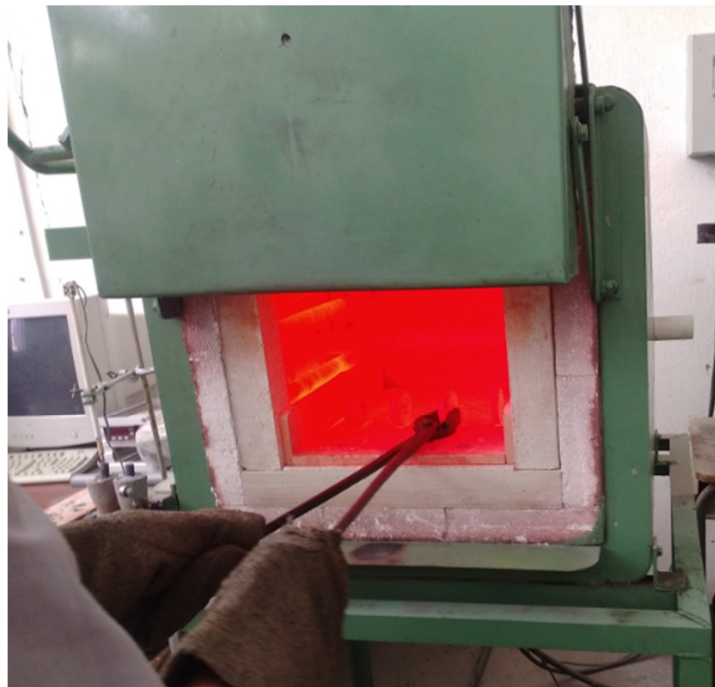


Figure III.10 : Four électrique.

- Maintien à cette température pendant une heure, pour permettre la dissolution des carbures
- Refroidissement rapide dans l'eau froide.



Figure III.11 : La trempe des pièces dans un bain d'eau.

#### III.5.4.1.2 Revenu

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

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- Chauffage à 250°C
- Maintien de température (la durée est de 2 heures)
- Refroidissement lent (à l'air libre)

#### III.5.4.2 Polissage :

Les surfaces des disques ont été polies au niveau du laboratoire, le polissage nous offre des avantages tel que

- Une bonne qualité de l'état de la surface.
- Une meilleure résistance à la corrosion pour les disques.



Figure III.12 : Polissage des disques.



Figure III.13 : Disque avant (à gauche) et après (à droite) polissage.

#### **III.5.4.3 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.

Après avoir fini les essais de dureté nous avons choisi des disques avec une dureté de 40 à 50 HV.



Figure III.14 : Duro mètre de type WOLPERT DIA TESTOR RC.

#### III.5.4.4 Mesure de la rugosité des disques

Nous avons procédé à des essais de rugosité en utilisant un rugormètre de marque Mitutoyo SJ.201 figure III.15.



Figure III.15: Rugométre

Après étalonnage du matériel nous avons commencé les essais, les résultats obtenus par le rugométre sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Rugosité	RA	RY	RZ	RQ
Surface A	0,20	1,96	1,46	0,26
Surface B	0,18	1,50	1,12	0,24
Surface C	0,16	1,48	1,19	0,21
Surface D	0,16	1,62	0,99	0,22
Surface E	0,17	1,56	1,12	0,22
Moyenne R	0,174	1,624	1,176	0,23

Tableau III.3 : Résultats des essais de rugosité.

### III.6 Convertisseur analogique-numérique (CAN)

Un convertisseur analogique – numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique, avec une fréquence d'échantillonnage de 30 valeurs par Seconde.

Les convertisseurs se présentent généralement sous forme de carte. Il existe plusieurs sortes de convertisseurs de différentes marques. Celui que nous avons utilisé pour traiter et analyser nos résultats est la carte « ARDUINO ».

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. Voir figure III.16.

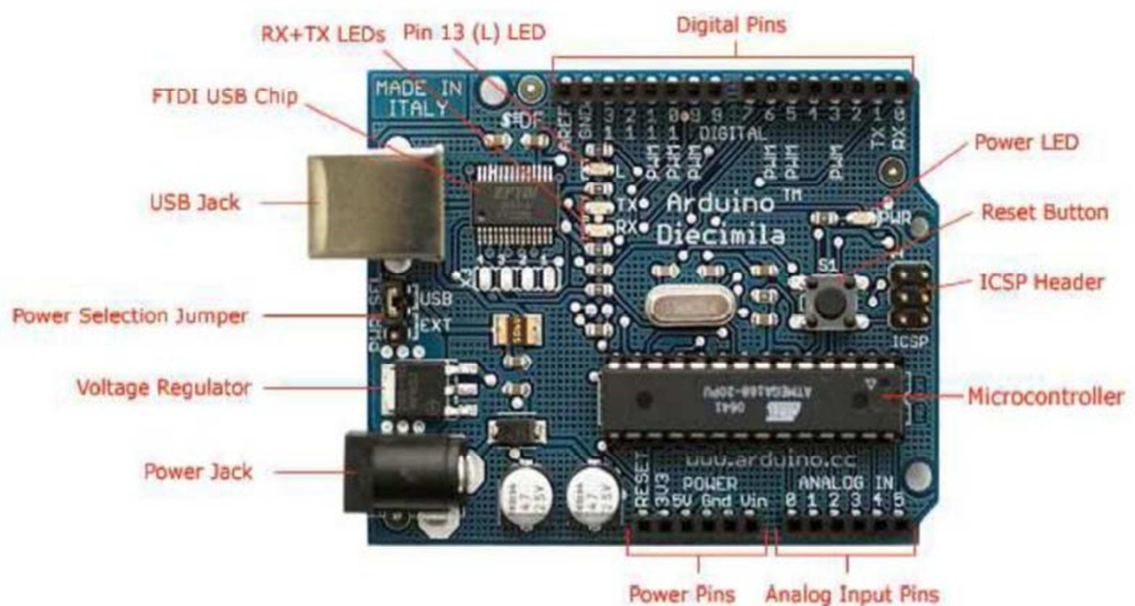


Figure III.16 : Carte arduino.

### III.7 Le capteur de force :

Pour mesurer la force tangentielle et la force normale due aux frottements, simultanément et sans interférence, le tribomètre figure III.8 utilise un capteur à jauges de déformation inspiré d'une conception américaine de capteur de mesure des efforts d'un outil de coupe. Le capteur (Figure III.17), placé au-dessus du porte pion permet de mesurer la force normale et l'effort tangentiel engendré.

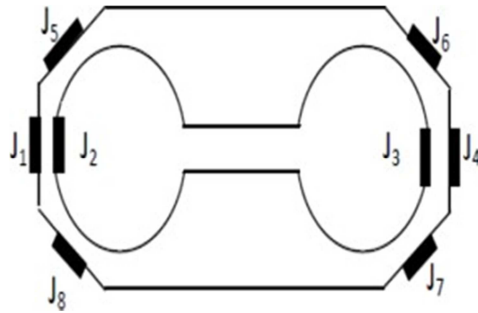


Figure III.17: Le capteur et les zones d'emplacement de la jauge

### III.8 La planéité :

Afin d'assurer le contact de toute la surface de notre matériaux avec nos disques au cours des essais de la tribologie, nous avons procédé à l'utilisation du comparateur pendant le serrage des écrous, voir (la figure III.18)



Figure III.18 : Processus de planéité.

Une fois que la planéité est réalisée, la réduction des vibrations du pion sur le disque est assurée, ainsi les courbes obtenues sur l'ordinateur seront plus fines et plus lisible. Aussi une bonne planéité du disque minimisera l'impact du pion sur le disque.

### III.9 Chaine d'acquisition

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

Pour relever les données de forces frottement mesurées, nous avons utilisé une chaîne d'acquisition de fabrication « vischay micro mesure 12 voies », qui est constituée de dix entrées analogiques et dix sorties. Le conditionnement de nos capteurs permet la remise à zéro, l'équilibrage des ponts, l'amplification et le gain du signal d'entrée.

Cette acquisition permet d'enregistrer les valeurs de l'effort normal et tangentiel dans l'ordinateur en se servant du logiciel LABVIEW, ainsi que le rapport entre les deux efforts permet le calcul du coefficient de frottement. La chaîne d'acquisition est représentée dans la figure III.19 :

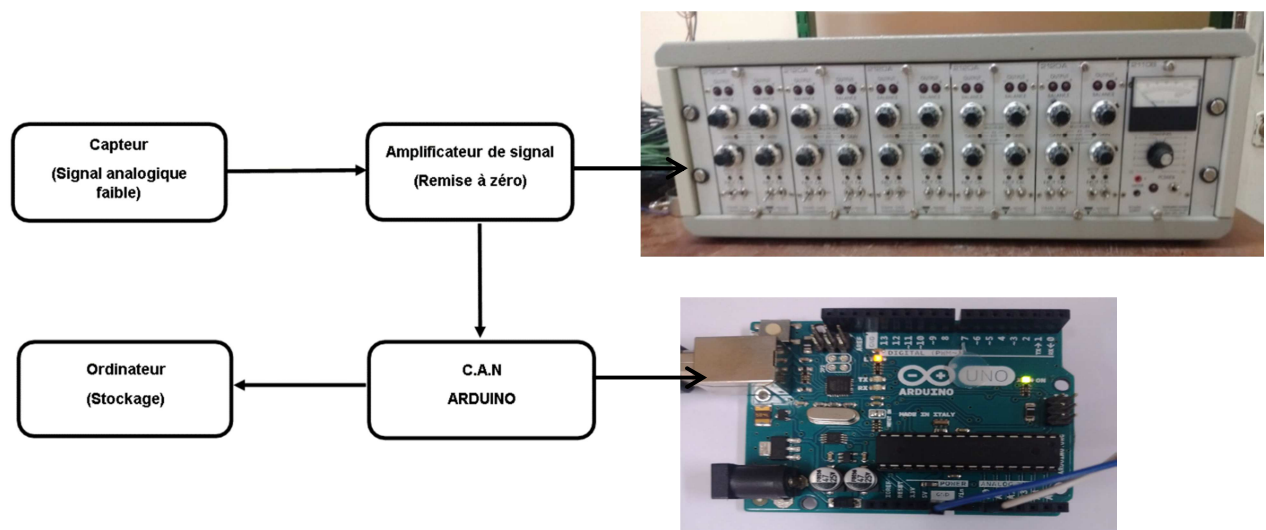


Figure III.19: Chaîne d'acquisition.

### III.10 Enregistrement des données

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, ce dernier nous donne aussi une fonctionnalité de remise à zéro pendant les essais afin d'obtenir de meilleurs résultats.

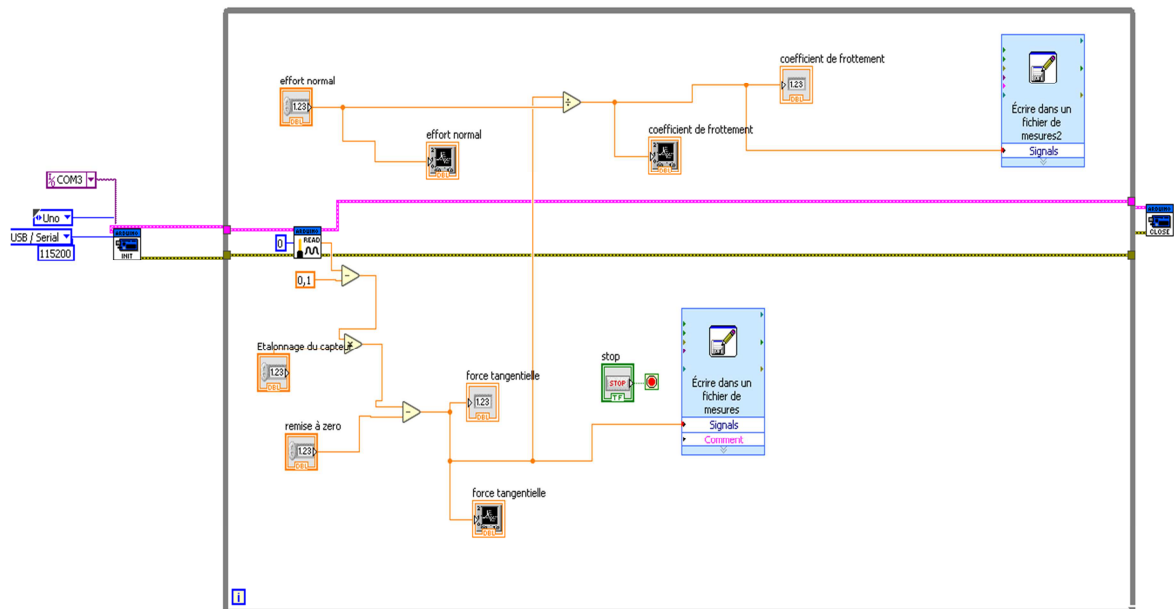


Figure III.20 : Programme Labview pour l'acquisition des données.

### III.11 Variateur de vitesses

Un variateur électronique de vitesse est un dispositif destiné à régler la vitesse et le couple d'un moteur électrique à courant alternatif en faisant varier respectivement la fréquence et le courant, nous avons utilisé le variateur d'une marque CHINT NVF2G-1.5PS4 (Figure III.21)



Figure III.21 : Variateur de vitesse.

### III.12 Etalonnage du capteur

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 montrée dans la figure III.22.

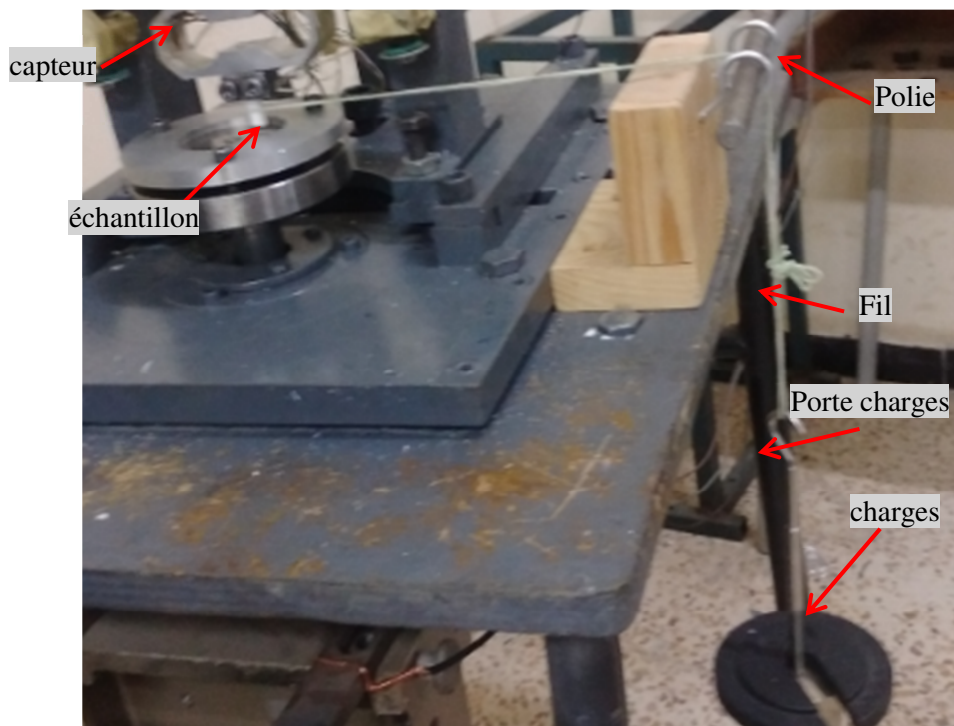


Figure III.22 : Mécanisme d'étalonnage.

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. Le cheminement du signal de sortie depuis sa sortie du capteur jusqu'à l'ordinateur est donné par la (figure III.23)

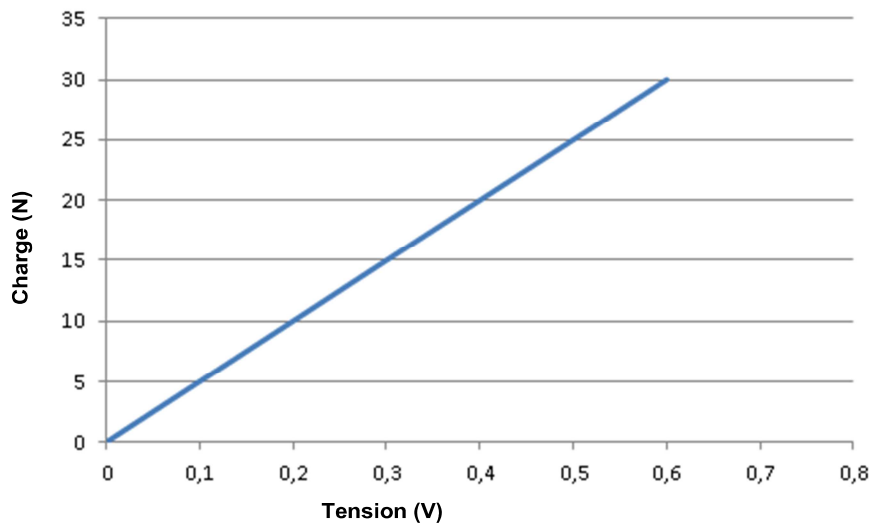


Figure III.23 : Droite d'étalonnage de l'effort tangentiel.

### III.13 Tests de frottement

Afin de bien mener notre travail nous avons procédé au polissage des surfaces sur lesquels nous ferons les tests de tribologie, en mettant du papier abrasive sur les disques de l'acier XC 48, afin d'assurer un bon contact entre les pions et les disques.

Les essais ont été effectués à température ambiante dans des conditions de charge et de vitesse de glissement contrôlées. 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 est déduite des graphiques de  $F_N(t)$  et  $F_T(t)$  en effectuant le rapport  $F_T(t) / F_N(t)$ .

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (1)$$

A partir des données de l'effort normal et tangentiel, la relation de coulomb (1) permet le calcul et la visualisation du coefficient de frottement en fonction du temps sur le graphe. Au moins trois essais ont été réalisés pour chaque composition. Nous avons sélectionné les courbes montrant la reproductibilité des résultats pour chaque composition lors des essais d'usure.

Dans des conditions de glissement à sec, le disque tourne et frotte contre le pion composite pendant une heure environ à température ambiante. L'ensemble des tests de frottement ont été effectués dans les conditions de glissement standard de 1Mpa et 1m/s.

### III.14 Interprétation des Résultats

A la fin des essais nous avons obtenu les résultats ci-dessous, pour chaque composition nous avons tracé une courbe de coefficient de frottement.

#### ❖ Résine Polyester (Nommée PE) :

Les résines polyester présentent généralement des coefficients de frottement relativement élevés lorsqu'elles glissent à sec contre des surfaces en acier. Cela est essentiellement dû à la structure moléculaire réticulée, qui empêche la formation d'un film de transfert efficace et se traduit par un degré de fragilité relativement élevé. (38)

La mesure du frottement a été effectuée sur des échantillons en Polyester pure. La courbe d'évolution (Figure III.24) montre un coefficient de frottement qui atteint 0,30.

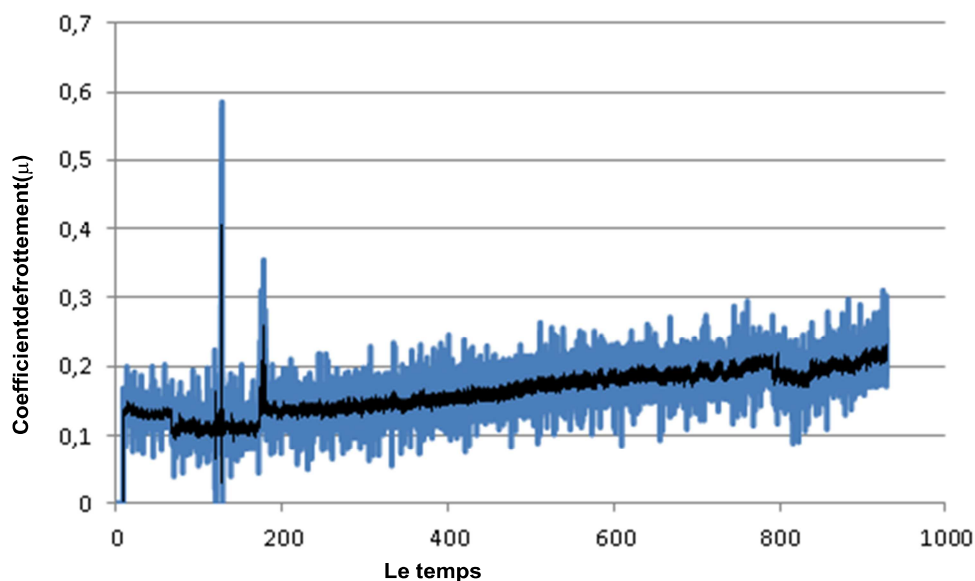


Figure III.24 : Evolution du coefficient de frottement de PE.

Comme le montre la Figure III-25, les essais d'usure de la composition (PE) ont été souvent interrompus au bout de 10 minutes d'essai environ en raison de la déformation et de la rupture des pions pendant le test.



Figure III.25 : Échantillon PE rompu lors des tests d'usure à 1Mpa.m/s

Afin d'améliorer les caractéristiques tribologiques de la Résine Polyester, l'autolubrification de ce dernier a été réalisée par adjonction d'additifs à savoir l'huile et le charbon activé.

❖ **Résine Polyester /Carbone**

Nous avons deux compositions à base de Résine Polyester : PE/5 Ca et PE/3 Ca

- **PE/5 Ca**
- **PE/3Ca**

Ces compositions ont été testées sous la condition standard de frottement à sec et à température ambiante. La courbe montre un coefficient de frottement qui atteint une valeur moyenne de 0.30. Le pion se rompt suite aux grands efforts tangentiels engendrés par l'adhérence du pion sur le disque.

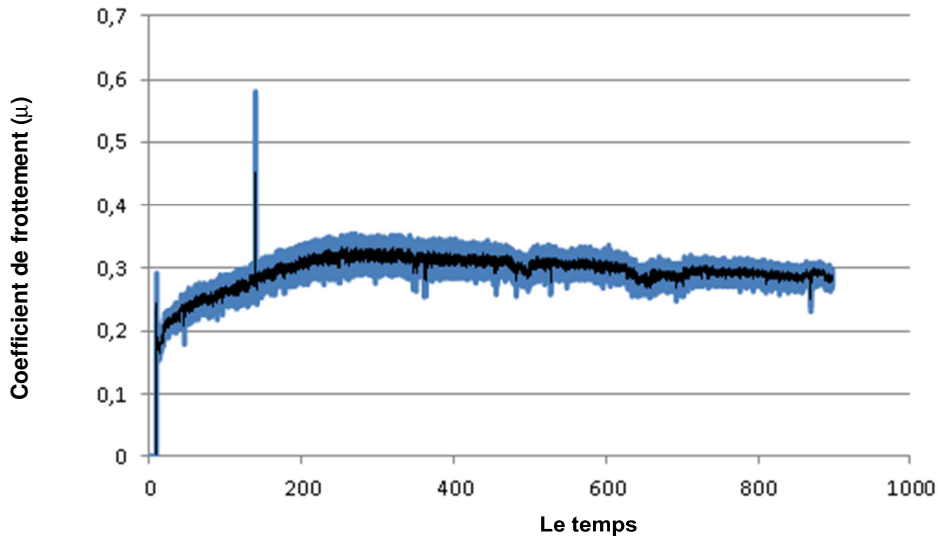


Figure III.26 : Coefficient de frottement pour la composition (PE/5Ca)

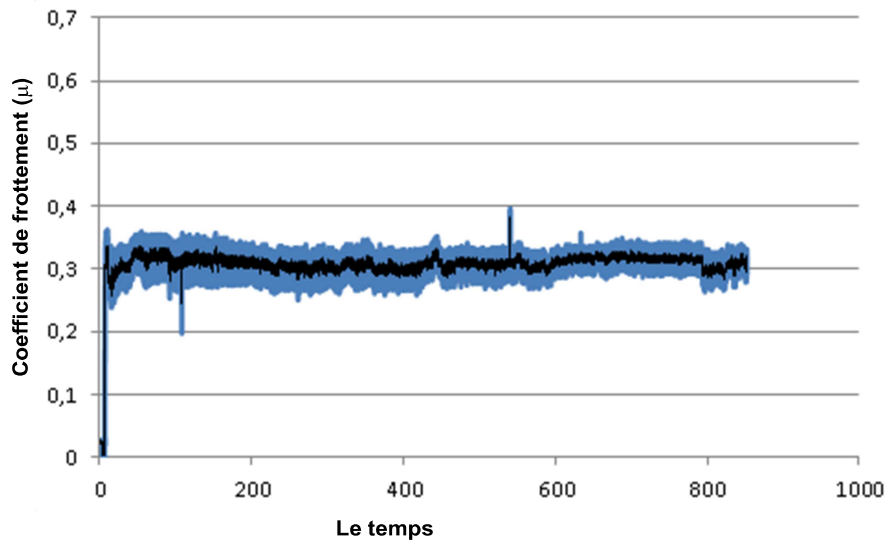


Figure III-27 : Coefficient de frottement pour la composition (PE/3Ca)

La Figure III-27 montre que la résine Polyester chargé de charbon activé présente un comportement de frottement élevé. Le frottement des matériaux en carbone dans l'air ambiant augmente avec la distance de glissement en raison de l'aplatissement progressif des aspérités par l'usure, ce qui entraîne une plus grande surface de contact réelle et donc un frottement plus élevé [28]. D'où un coefficient de frottement élevé et la rupture des échantillons au cours des essais.

Les essais d'usure ont été interrompus pour la composition PE/Ca en raison de la déformation et de la rupture des pions pendant l'essai (Figure III-28).



Figure III.28: Échantillon PE/ 3Ca rompu lors du test d'usure à 1Mpa.m/s

- **Résine Polyester/Huile (nommée PE/H) :**
- **PE/5H**

L'adjonction d'huile lubrifiante dans la matrice polymère à différents pourcentages en poids se fait en ajoutant de l'huile petit à petit pour déterminer le pourcentage d'huile maximum que la matrice peut contenir pour de meilleurs caractéristiques tribologiques.

- Une composition PE/5H

Une quantité d'huile de 5% a été introduite dans la matrice polymère à base de Résine Polyester. Après polymérisation cette quantité n'a pas été retenue en entier dans la matrice, une petite couche fine a été trouvée sur la surface de l'échantillon. Des essais dans des conditions standard ont été effectués avec cette composition pour mesurer le coefficient de frottement (Figure III-29).

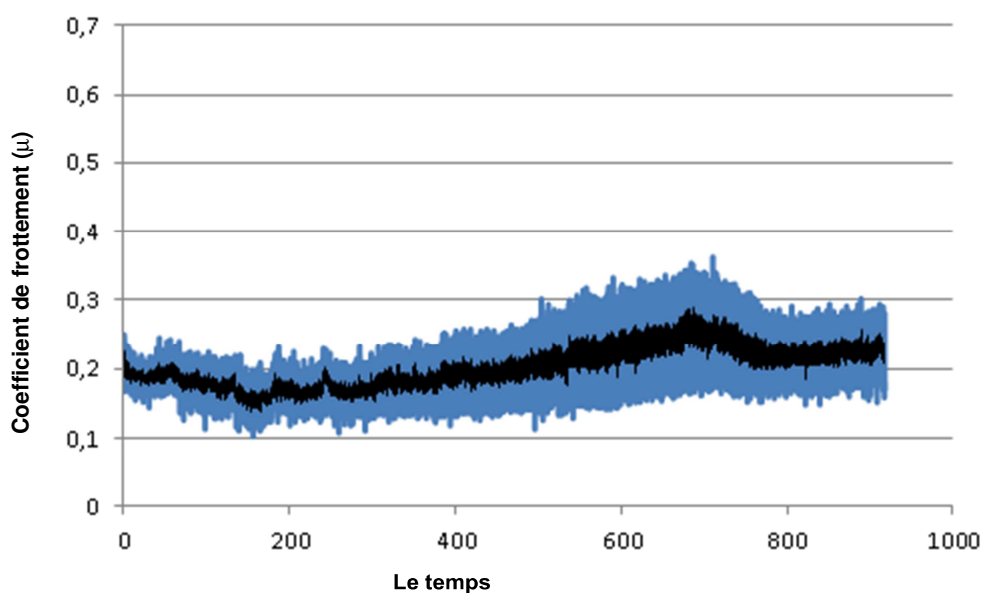


Figure III.29 : Coefficient de frottement pour la composition PE/5H

Cette quantité d'huile (5%) semble suffisante pour réduire le coefficient de frottement de la résine polyester. Ceci se voit sur l'évolution de la courbe du coefficient de frottement qui atteint une valeur de 0.17 (Figure III-29). Aussi nous voyons que la courbe présente des pics qui peuvent être interprétées comme instabilité due à l'adhésion du pion sur le disque. Mais d'après les résultats d'essais obtenus de cette composition, nous pouvons dire que les performances tribologiques du composite sont améliorées l'adhésion du l'huile.

Une quantité infime d'huile lubrifiante est suffisante pour améliorer sensiblement les performances tribologiques. Pendant le glissement, l'huile lubrifiante piégée dans la matrice est libérée et crée un film d'huile qui aide à séparer les surfaces en contact qui réduit le contact adhésif. Ce qui entraîne une réduction significative du coefficient de frottement.

- **PE/10H :**

Dans cette expérience nous avons tenté une autre approche, nous avons ajouté une quantité supérieur du durcisseur et du l'huile afin que toute l'huile sera imprégné dans le mélange.

Effectivement, après le durcissement nous n'avons pas trouvé de couche de l'huile à la surface de l'échantillon, on conclut que le pourcentage du durcisseur joue un rôle très important, nous avons obtenu un résultat meilleur du coefficient de frottement au début de l'expérience ont eu une moyenne de 0,09, après seulement quelques minutes le coefficient de frottement est stabilisé aux environ de 0,05 et notre échantillons à résister pendant toute cette période sans aucune déformations. Ce qui nous amène à dire que ce taux d'huile imprégné est idéal figure III.30 :

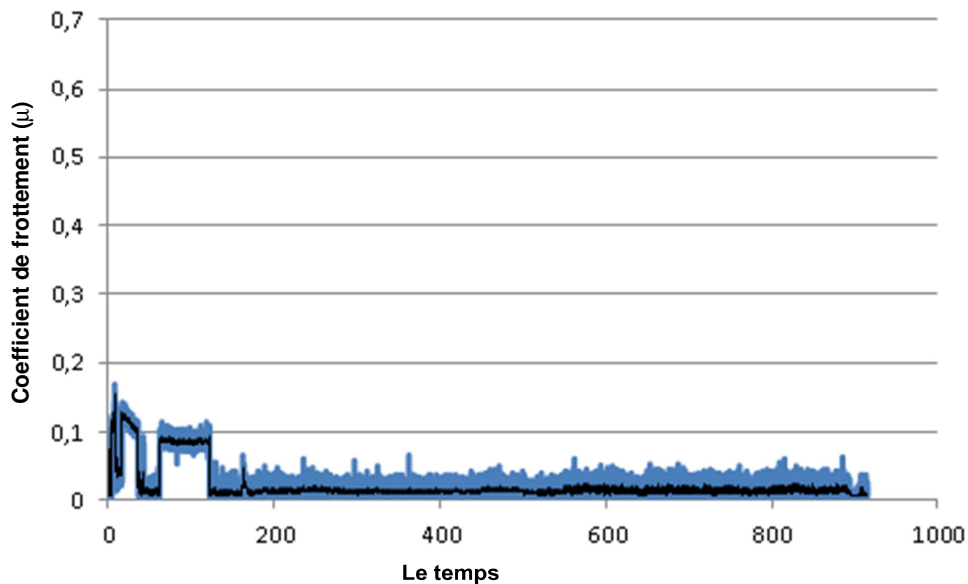


Figure III.30 : PE/10H.

Nous avons remarqué aussi une couche fine de l'huile sur le disque voir la figure III.31 :

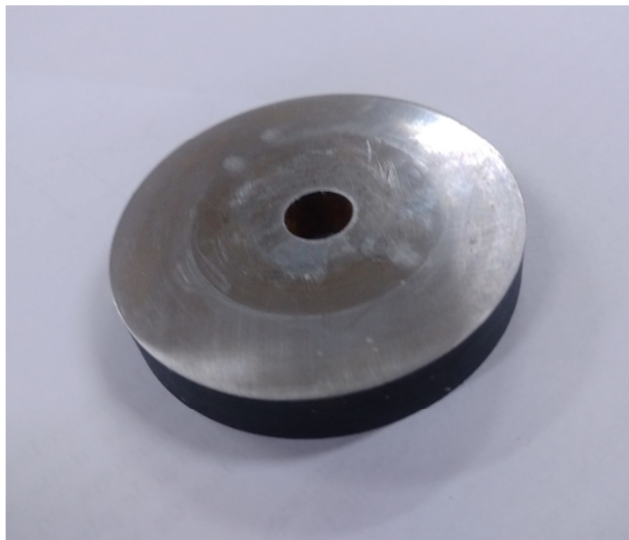


Figure III.31 : les traces de l'huile sur le disque.

#### ❖ Résine Polyester/ Charbon actif / Huile :

##### • PE /5H/3Ca

Une composition à 5% d'huile et 3% charbon activé a été élaborée. Après polymérisation, une quantité d'huile a été rejetée et montée à la surface du composite. La matrice ne retient pas toute la quantité de l'huile injectée. Ceci signifie que la quantité de charbon activé semble insuffisante pour piéger tout le taux d'huile injecté dans la matrice.

Les essais tribologiques (Figure III-32) montrent une valeur du coefficient de frottement qui dépasse 0.2. Ceci peut s'expliquer par la présence du contact adhésif suite au faible taux d'huile dans le composite.

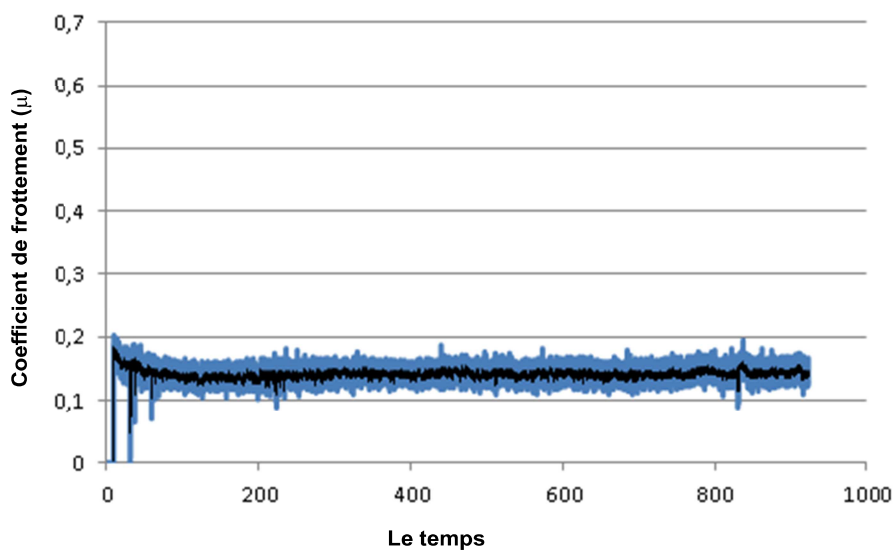


Figure III.32 : Coefficient de frottement de la composition PE/3Ca/5H

## II.1 Interprétation des Résultats :

Nous avons effectué trois tests d'usures pour chaque composition, les valeurs de coefficient de frottement donné au tableau ci-dessous, sont les valeurs de la même reproductibilité des courbes de chaque composition.

N	COMBINAISON	Paramètre	Remarque	Valeur C.F
PE	PE	1Mpa 1m/s	Endommagé à 10 minutes	0,22
PE/CA	PE/3Ca	1Mpa 1m/s	Grosse pertes de Matière	0,30
	PE/5Ca	1Mpa 1m/s	Grosse pertes de Matière	0,30

<b>PE/H</b>	<b>PE/5H</b>	<b>1Mpa</b> <b>1m/s</b>	<b>Bien tenu</b>	<b>0,17</b>
	<b>PE/10H</b>	<b>1Mpa</b> <b>1m/s</b>	<b>Bien tenu</b>	<b>0,05</b>
<b>PE/Ca/H</b>	<b>PE/3Ca/5H</b>	<b>1Mpa</b> <b>1m/s</b>	<b>Bien tenu</b>	<b>0,15</b>

Tableau III.4 : Présentation des résultats du frottement des différentes compositions.

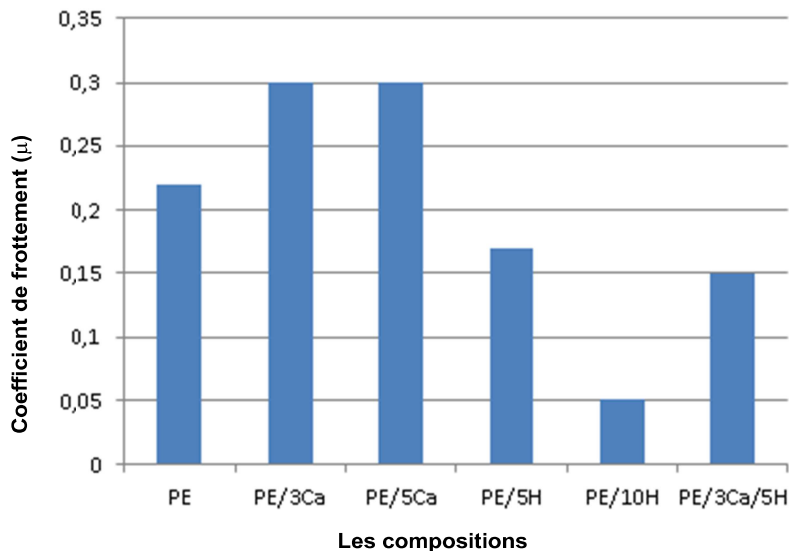


Figure III.33 : coefficient de frottement de chaque composition.

➤ **PE :**

Nous avons obtenu un coefficient de frottement égal 0,22 et une durée de vie moyenne de 10 minutes, alors notre but dans notre travail est de trouver la combinaison idéale pour le réduire.

➤ **PE/3CA et PE/5CA :**

Nous avons constaté une croissance du coefficient de frottement (0,30), ça peut s'expliquer que le charbon activé n'est pas efficace comme lubrifiant solide à cause de la modification de la structure chimique du graphite.

Par contre nous avons remarqué une résistance plus élevée, nos échantillons ont pu résister toute au long de l'essai toute au long et ça revient au faite que le charbon activé est un bon conducteur thermique, la chaleur n'est pas concentrer sur la face du contacte seulement mais dissipé dans toute notre échantillon.

➤ **PE/5H :**

Nous avons obtenu un coefficient de frottement moins élevé (0,17) ce résultat est grâce à l'adjonction de l'huile, qui a joué le rôle du lubrifiant, moins de frottement, moins de chaleur ce qui nous donne une résistance plus long.

➤ **PE/10H :**

Encore nous remarquons une décroissance du coefficient de frottement (0,05) qui est dû à l'augmentation de l'huile ajouter dans la composition.

➤ **PE/3Ca/5H :**

Coefficient de frottement moins élevé par rapport à la composition **PE/5H** à cause du charbon activé qui a adsorbé tous les 5% de l'huile ajouté contrairement à la composition précédente, ou nous avons trouvé une couche fine de l'huile à la surface des échantillons après durcissement.

### **III.16 Conclusion :**

Nous constatons que l'ajout du l'huile joue le rôle du lubrifiant qui réduit le coefficient de frottement, quant au charbon activé il n'a aucune influence sur le coefficient de frottement car ce n'est pas un lubrifiant solide, mais son rôle consiste à l'amélioration de la résistance de la résine polyester lors de essais tribologiques en étant un bon conducteur thermique, certaines dispersions dû à l'équipement. Ce que nous devons confirmer ou infirmer par d'autres essais.

## Conclusion général

A l'issue de ce modeste travail de recherche, nous pouvons conclure sans prétention qu'il nous a permis de découvrir une jeune science qu'est la tribologie, d'une importance capitale pour l'industrie à l'échelle planétaire au vu des pertes économiques qu'elle engendre, particulièrement pour les pays industrialisés. Nous avons constaté, sur la base de notre recherche bibliographique combien cette science est encore à l'état embryonnaire. L'expérimentation en tribologie pose encore de nombreuses difficultés et les résultats expérimentaux présentent une dispersion encore très élevées.

L'étude expérimentale que nous avons menée, nous a permis avant tout, d'atteindre l'objectif assigné à ce mémoire à savoir, 'l'initiation à la recherche' car nous avons vraiment goûté au sens profond du terme aux problèmes qui se posent à l'expérimentateur. Nous avons par ailleurs utilisé de nombreux et diverses qui permet expérimente aux, confrontés aux problèmes de mesure de grandeurs physiques, d'étalonnage de systèmes de mesure, de parasitage et filtrage de signaux électriques etc.

Nous avons aussi réalisé des échantillons, effectué des traitements thermiques, des mesures de dureté, d'état de surface, des essais de matériaux et enfin des essais de frottement.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'ajout de charges comme charbon activé à la résine polyester, a entraîné une longitudo de la durée de vie du composite à celles du matériau vierge.

Cependant, les essais de frottement montrent la baisse de ce dernier avec l'augmentation du pourcentage de l'huile malgré quelques dispersions due sans doute à la qualité de notre équipement.

En étudiant les résultats expérimentaux obtenus sur notre tribomètre, nous pouvons aisément remarquer que le charbon activé joue le rôle de conducteur thermique d'où la longitudo de la durée de vie pendant les essais de frottement.

Tant dis que l'huile a joué un rôle de lubrifiant se basant sur sa contribution à la baisse du coefficient de frottement.

Les présents résultats peuvent aisément permettre à des utilisateurs de choisir le compromis utile qui répondra le mieux à leur cas.

Enfin, nous souhaitons que les camarades des promotions à venir continuent cette étude en essayant de remédier à toutes les difficultés expérimentales que nous avons rencontrées et signalées dans ce mémoire.

*Références*  
*Bibliographiques*

- [1] SmithersRapra;REACH for Polymères, meilleures méthodes d'essai et techniques disponibles 2011,
- [2] PV Kulkarni, NK Chapkhaneÿ: Développement et test d'unmatériau de palier composite à base de PTFE pour pompe àturbine, International Journal of Engineering and AdvancedTechnology(IJEAT), Vol. 1,n° 6, p.15-20,2012.
- [3] Wisander DW, Johnson RL. Friction and Wear of Nine Selected Polymers with Various Fillers in Liquid Hydrogen. 1969;(March 1969).
- [4] You YL, Li DX, Si GJ, Deng X. Investigation of the influence of solid lubricants on the tribological properties of polyamide 6 nanocomposite. Wear. 2014;311(1-2):57-64. doi:10.1016/j.wear.2013.12.018
- [5] G. Heinonen, P.L.Taylor, Dynamic of helicity-reversal defects in polytetrafluoroethylene chains, Polymer (30), pp. 585-589, 1989. [130] D.C. Bassett, R.Davitt, On the crystallization phenomena in polytetrafluoroethylene, Polymer (15), pp. 721-728, 1974.
- [6] F. ROBBE-VALLOIRE, Lubrification, Cours SUPMECA (2014).
- [7] P. GUAY, Principes de base de la lubrification. Edition Les Techniques de l'Ingénieur, TRI 1500 (2014).
- [8] H. Unal, A. Mimaroglu, U. Kadÿoglu, H. Ekiz : Frottement par glissement et comportement à l'usure du polytétrafluoroéthylène et de ses compositesdansdesconditionssèches,Materials&Design,Vol.25, n°3,pages239-245,2004.
- [9] Xu YM, Mellor BG. A comparative study of the wear resistance of thermoplastic and thermoset coatings. Wear. 2003;255(1-6):722-733. doi:10.1016/S0043-1648(03)00064-4
- [10] Tanaka K, Ueda S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene above the melting point. Wear. 1976;39(2):323-333. doi:10.1016/0043-1648(76)90058-2
- [11] BA Mudasar Pacha, D. Abdul Budan, S.Basavarajappa,S.ManjunathYadav,BANizamuddin:Comportementà l'usureparglissementàsecdu PTFE chargé de particules de verre et de bronze,Tribologie – Matériaux, Surfaces & Interfaces, Vol. 5, n° 2, pages 59-64,2011.
- [12] Sun L, Yang Z, Li X. Tensile and tribological properties of PTFE and nanoparticles modified epoxy-based polyester fabric composites. 2008;497:487-494. doi:10.1016/j.msea.2008.07.049
- [13] RKGoyal,M.Yadav:Étudesurlecomportementà l'usureetau frottement des composites de PTFE chargés de floconsde graphite, Journal of AppliedPolymer Science, Vol. 127,n°4, pages3186-3191,2013

- [14] PV Kulkarni, NK Chapkhanej: Développement et test d'un matériau de palier composite à base de PTFE pour pompe à turbine, International Journal of Engineering and Advanced Technology(IJEAT), Vol. 1,n° 6, p.15-20,2012.
- [15] H. Unal, E. Kurtulus, A. Mimaroglu, M. Aydin : Performances tribologiques des composites remplis de bronze PTFE dans une large gamme de conditions d'application, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.29,n°14, pages 2184-2191,2010.
- [16] DL Burris, WGSawyer: Un composite PEEK/PTFE à faible frottement et à très faible taux d'usure, Wear, Vol261,n°3-4, pages 410-418,2006.
- [17] Jean Louis Fanchon. Guide des sciences et technologies industrielles. Mars 2003, Italie.
- [18] Myshkin NK, Petrokovets MI, Kovalev A V. Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. Tribol Int. 2005;38(11-12 SPEC. ISS.):910-921. doi:10.1016/j.triboint.2005.07.016
- [19] Bushan B. Principales and Applications of tribology ; 2013.
- [20] Ainbinder SB, Tyunina EL. Friction of polymeric materials. 4. effect of temperature and relative sliding velocity on the coefficient of friction of elastomers. Polym Mech. 1974;10(6):905-910. doi:10.1007/BF00856240
- [21] K.L. Johnson contact mechanics Cambridge university 1985
- [22] Pooley CM. Friction and molecular structure. Proc R Soc London. A math Phys Sci 1972;329
- [23] Evans DC, Lancaster JK. The wear of polymers Vol 13, Academic INC ; 1979
- [24] Chen N, Macdonald T, Tirrell M. J. Adhesion and friction of polymer surfaces. The effect of chain ends 2005.
- [25] Zhang ZZ, Liu WM, Xue QJ. Effects of various kinds of fillers on the tribological behavior of polytetrafluoroethylene composites under dry and oil-lubricated conditions. J Appl Polym Sci. 2001;80(11):1891-1897. doi:10.1002/app.1286
- [26] Tanaka K, Uchiyama Y, Toyooka S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene. Wear. 1973;23(2):153-172. doi:10.1016/0043-1648(73)90081-1
- [27] Sawyer WG, Freudenberg KD, Bhimaraj P, Schadler LS. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. Wear. 2003;254(5-6):573-580. doi:10.1016/S0043-1648(03)00252-7
- [28] Prokhorov P, Permis Comparaison of JKR- And DMT-Based multi asperity adhesion model, Theory and experiment 2011

- [29] Goer JLE, Avril j, ESP I, Technique E, Eleve A, Ecole D. Compteur à jauges extensométrique capteur à jauge. 2022 ;33
- [30] Methode ST. Standant test method for wear testing with a piston dick apparants, wear 2011;5.
- [31] G.Zambeli.L. Vincent. Matériaux et contacts ; une approche tribologique. Edition Suisse Romande. PUR.1998.

