



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERIDE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'études

Option : Construction Mécanique

Master académique

**ETUDE DE L'EFFET DE LA VITESSE ET DE LA PRESSION SUR LE
L'USURE DU COUPLE GLISSANT PTFE-PTFE**

Présenté par

AIT TALEB Lydia

DEVANT LE JURY :

MR. OULD OUALI MOHAND

PRÉSIDENT

MR. BELDI MUSTAPHA

ENCADRANT

MR. HACHOUR KAMEL

EXAMINATEUR

ANNÉE 2022-2023

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur Mr BELDI Mustapha pour son soutien, ses conseils et son expertise tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa patience, sa disponibilité et son engagement ont été essentiels pour m'aider à approfondir mes connaissances et à développer mes compétences de recherche.

Je souhaite également remercier chaleureusement mes parents pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant, leurs encouragements ont été des piliers essentiels tout au long de ce parcours académique. Leur confiance en moi a été une source d'inspiration et de motivation pour atteindre mes objectifs.

Je souhaite également remercier mon frère et ma sœur qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien moral, leurs conseils avisés et leur présence bienveillante ont gagné à rendre cette expérience encore plus significative.

Un immense merci à tous mes proches, mes amis, qui m'ont soutenu tout au long de cette aventure. Votre présence, vos encouragements et vos paroles encouragées m'ont donné la force nécessaire pour surmonter les moments difficiles et persévérer jusqu'à la fin.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont gagné de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Votre aide, a été d'une valeur inestimable et je vous en suis reconnaissante.

Ce mémoire est le fruit d'un effort collectif et je suis honorée d'avoir pu compter sur le soutien inébranlable de tous ceux qui m'entourent.

Table des matières

Remerciements	1
Nomenclature et Symboles.....	1
Liste des figures	1
Introduction générale.....	1
Chapitre I. Tribologie des polymères	3
I.1 Introduction :	4
I.2 La tribologie :	4
I.3 Système tribologique :	4
I.4 Paramètres tribologiques :	5
I.5 Les paramètres influant sur le taux d'usure :	6
I.6 Les origines d'usure :	6
I.7 Types d'usure :	6
I.8 Tribologie des polymères :	8
I.9 Contacts non polymère sur polymère :	9
I.10 Contacts polymère sur polymère :	10
I.11 Le produit PV (Pression-Vitesse) :	11
I.12 Classification de polymères :	12
I.13 Classification selon l'origine :	13
I.14 Classification selon l'architecture :	13
I.15 Classification selon la structure chimique :	14
I.16 Classification selon le comportement thermique :	15
I.17 Classification selon le comportement physique :	15
I.18 Avantages et inconvénients des polymères en tribologie :	16
I.19 Utilisation des polymères en tribologie :	17
I.20 Utilisation de PTFE (polytétrafluoroéthylène) en tribologie.....	17

I.21	Conclusion	18
<i>Chapitre II.</i>	La lubrification solide.....	19
II.1	Introduction :	20
	Définition des surfaces solides :	20
	Définition des lubrifiants solides :	Erreur ! Signet non défini.
	Les différents types des lubrifiants solides	21
II.2	Le graphite :.....	21
II.3	MoS2 :	26
II.4	PTFE :.....	32
II.4.1	Caractéristiques :.....	32
II.4.2	Domaine d'utilisation :.....	33
II.4.3	Effet de la charge normale sur le coefficient du frottement et taux d'usure :	33
II.4.4	Effet de la vitesse de glissement sur le coefficient du frottement et le taux d'usure	35
II.4.5	Conductivité thermique de PTFE.....	36
II.4.6	L'influence de la fraction volumique des fibres de carbone sur la conductivité thermique d'un composite de PTFE :.....	37
II.4.7	Amélioration des propriétés tribologiques du PTFE :.....	38
II.4.8	Etude du comportement tribologique des composites de PTFE remplis de particules métalliques :.....	39
II.4.9	Etude comparative des courbes de frottement du PTFE pur et ses composites :	40
II.4.10	Etude sur l'utilisation d'additif à base de graphène pour réduire l'usure du PTFE	41
II.4.11	Comparaison des effets du nano-PTFE et du micro-PTFE sur les propriétés tribologiques du POM modifié :.....	42
	Courbe de Stribeck :	44
II.5	Contacts lubrifiés :.....	44
II.6	Conclusion :.....	45

<i>Chapitre III.</i>	La partie expérimentale	46
III.1	Introduction.....	47
III.2	Description du tribomètre	47
III.2.1	Nomenclature du banc :.....	48
III.3	Réglage de la planéité	48
III.4	Chaine d'acquisition :	49
III.4.1	Capteur :	49
III.4.2	La mise en place des jauges de contraintes :.....	50
III.4.3	Amplificateur	51
III.4.4	Filtrage	52
III.4.5	Convertisseur analogique numérique (CAN) :.....	52
III.4.6	Etalonnage du capteur de l'effort tangentiel	54
III.5	Matériaux utilisés	56
III.5.1	Disques et pions	56
III.6	Tests tribologiques	57
III.6.1	Mesure du coefficient du frottement	58
III.7	Comparaison et interprétation des résultats	68
III.7.1	Variation de la vitesse	68
III.7.2	Variation de la pression.....	71
III.8	Mesure du produit PV	76
III.9	Mesure du taux d'usure.....	77
III.10	Comparaison et interprétation des résultats	79
III.11	Conclusion	81
	Conclusion générale	82
	Références bibliographiques	I
	Annexe	III

Nomenclature et Symboles

R: Résistance électrique de la jauge (Ω)

V_{in} : Voltage d'entrée du pont de Wheatstone (mV)

V_{out} : Voltage de sortie du pont de Wheatstone (mV)

F_N : Charge normale appliquée à l'échantillon pendant le glissement (N)

F_T : Force tangentielle (N)

μ : Coefficient de frottement

Δm : Pertes de masse de l'échantillon (gr)

ρ : Densité de l'échantillon (Kg/m^3)

L : Distance totale de glissement (m)

ω_s : Taux d'usure spécifique (mm^3/Nm)

E_1, E_2 : Modules de Young des matériaux (MPa)

M_c : Fraction massique du graphite (g)

M_m : Fraction massique de MoS_2 (g)

PTFE : Polytétrafluoroéthylène

PA11 : Polyamide 11

TiO_2 : Dioxyde de Titane

Liste des figures

Figure I-1: structure du système tribologique. [2].....	5
Figure I-2: Mode d'usure en adhésion	6
Figure I-3 :Mécanisme d'usure abrasive par contact glissant.....	7
Figure I-4: usure par fatigue.....	7
Figure I-5: Usure par Erosion.....	8
Figure I-6: Usure par corrosion	8
Figure I-7 : Exemple de film de transfert [4]	10
Figure I-8: Diagramme schématiques du produit PV pour deux polymères différents.....	12
Figure I-9: Représentation schématique de polymère linéaire	13
Figure I-10: Polymère ramifié.....	14
Figure I-11: Polymère réticulé	14
Figure II-1: Surfaces des solides	20
Figure II-2: Structure lamellaire du graphite [10].....	22
Figure II-3: Coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles de glissement pour les composites ABS/graphite [11]	23
Figure II-4: Pourcentage de pertes de poids par rapport au nombre de cycles de glissement pour les composites ABS/graphite [11]	25
Figure II-5: La variation du coefficient de frottement mesuré avec le pourcentage en poids de graphite dans les composites pour le glissement à sec et le glissement imprégné d'huile [12].....	25
Figure II-6: Structure cristalline du MoS ₂	26
Figure II-7: Coefficient de frottement dans des conditions sèches et lubrifiées avec des particules de MoS ₂ dispersées comme additif à une charge normale de 75N [15]	27
Figure II-8: Coefficient de frottement dans des conditions sèches et lubrifiées avec des particules de MoS ₂ dispersées comme additif à une charge normale de 100N [15].....	28
Figure II-9: Coefficient de frottement dans des conditions sèches et lubrifiées avec des particules de MoS ₂ dispersées comme additif à une charge normale de 125N [15]	28
Figure II-10: Coefficient d'usure spécifique en fonction de la charge avec différentes tailles de particules de MoS ₂ dispersées comme additifs dans les lubrifiants [15]	29

Figure II-11: Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement pour les composites cuivre pur (a), Cu/2.5 MoS ₂ (b) et Cu/MoS ₂ (c) sous différentes charges normales [16].....	30
Figure II-12: Variation du taux d'usure sous charge normale pour le cuivre pur et les composites Cu/MoS ₂ [16].....	31
Figure II-13: Propriétés de frottement et d'usure des composites PI avec diverses nanofeuillets de MoS ₂ [17].....	32
Figure II-14: Coefficient de frottement en fonction de la charge normale pour différents matériaux	34
Figure II-15: Taux d'usure en fonction de la charge normale pour différents matériaux.....	34
Figure II-16: Coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour différents matériaux	35
Figure II-17: Taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement pour différents matériaux	36
Figure II-18: : Résultats de la simulation numérique comparés à ceux de l'expérience et d'autres modèles de prédiction [18].....	37
Figure II-19: Conductivité thermique des composites en PTFE [18]	38
Figure II-20: Comportement en frottement des composite PTFE [9]	38
Figure II-21: Les taux d'usure du PTFE et des composites PTFE remplis de diverses charges métalliques [19].....	39
Figure II-22: Les courbes de frottement typiques des composites PTFE et Cu-PTFE [19]....	40
Figure II-23: : Volume d'usure en fonction de la distance de glissement pour le PTFE non chargé et pour le PTFE avec des teneurs variables [20]	41
Figure II-24: Taux d'usure à l'état d'équilibre en fonction de la teneur en charge pour les composites plaquettes de graphène-PTFE [20].....	42
Figure II-25: Effet de la concentration de nano-PTFE sur le coefficient de frottement et le taux d'usure des composites POM/nano-PTFE [21]	43
Figure II-26: Effet de la concentration de micro-PTFE sur le coefficient de frottement et le taux d'usure des composites POM/micro-PTFE [21].....	43
Figure II-27: Courbe du Stribeck	44
Figure III-1: Vue du tribomètre.....	47
Figure III-2 : Supports disque pour réglage de planéité.....	48
Figure III-3: Réglage de la planéité du disque	48
Figure III-4: Schéma de la chaîne d'acquisition d'une mesure	49
Figure III-5: Capteur équipé de deux ponts de Wheatstone.....	49

Figure III-6: Jauges de contraintes	51
Figure III-7: Image du capteur utilisé lors des essais d'usure	51
Figure III-8: Image du conditionneur utilisé lors des tests tribologiques.....	52
Figure III-9: Carte ARDUINO	53
Figure III-10: Représentation de la carte ARDUINO	53
Figure III-11: signal obtenu sur le logiciel Labview	54
Figure III-12: Opération d'étalonnage	54
Figure III-13: Représentation du signal de sortie en fonction de l'effort tangentiel.....	55
Figure III-14: Courbe d'étalonnage de l'effort tangentiel	56
Figure III-15: Opération du perçage sur les disques	56
Figure III-16: Disques réalisés	57
Figure III-17: Formes et dimensions des pions et des disques	57
Figure III-18: Comparaison de trois test de même variété (1MPa 1m/s).....	58
Figure III-19: Comparaison de trois test de même variété (3MPa 1,5m/s).....	59
Figure III-20: Image sans traitement sur originLab	60
Figure III-21: Image avec traitement sur originLab (moyenne mobile)	60
Figure III-22: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$	61
Figure III-23: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$	61
Figure III-24: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{m/s}$ et $P=2\text{MPa}$	62
Figure III-25: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{m/s}$ et $P=3\text{MPa}$	63
Figure III-26: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$	63
Figure III-27: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$	64
Figure III-28: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=2\text{MPa}$	64
Figure III-29: Coefficient de frottement avec $v=\text{m/s}$ et $P=\text{MPa}$	65
Figure III-30: Coefficient de frottement avec $v=\text{m/s}$ et $P=\text{MPa}$	66
Figure III-31: Coefficient de frottement avec $v=\text{m/s}$ et $P=\text{MPa}$	66
Figure III-32: Coefficient de frottement avec $v=\text{m/s}$ et $P=\text{MPa}$	67
Figure III-33: Coefficient de frottement avec $v=\text{m/s}$ et $P=\text{MPa}$	67
Figure III-34 : Coefficient de frottement avec pour $P=0,5\text{ MPa}$	68
Figure III-35: Coefficient de frottement pour $P=1\text{MPa}$	69
Figure III-36: Coefficient de frottement avec $v=\text{m/s}$ et $P=\text{MPa}$	70
Figure III-37: Courbe de l'influence de la variation de la vitesse sur le coefficient du frottement	70

Figure III-38: Courbe de l'influence de la variation de la pression sur le coefficient du frottement	71
Figure III-39 : Impact des charges variables sur l'état des disques et les pions à $V=0,5\text{m/s}$...	72
Figure III-40: Courbe de l'influence de la variation de la pression sur le coefficient du frottement	73
Figure III-41 : Impact des charges variables sur l'état des disques et les pions à $V= 1\text{m/s}$	74
Figure III-42: Courbes de l'influence de la variation de la pression sur le coefficient du frottement	75
figure III-43 : Influence des charges variables sur l'état des disques et des pions à $V=1,5\text{m/s}$	76
Figure III-44: Courbe du produit PV du couple glissant pion/disque	77
Figure III-45 : Le taux d'usure à $v=0,5\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$	78
Figure III-46 : Le taux d'usure à $v=0,5\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$	79
Figure III-47 : : Le taux d'usure à $v=1\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$	79
Figure III-48: Courbe de l'influence de la variation de la vitesse sur le taux d'usure	80
Figure III-49: Courbes de l'influence de la variation de la pression sur le taux d'usure	80

Introduction générale

Les polymères présentent un grand avantage dans plusieurs domaines industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, l'électronique, le textile, non seulement pas à cause de leur facilité de mise en œuvre mais aussi à cause de leur faible masse volumique et leur moindre coût.

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 [1], [2].

Le PTFE est un polymère thermoplastique, facilement déformable, semi-cristallin. Il est utilisé comme revêtement antiadhésif, et de manière générale comme lubrifiant solide. Son coefficient de frottement très faible permet de fabriquer des pièces qui, non seulement ne réagissent pas avec les produits chimiques, mais qui sont autolubrifiantes.

Dans ce présent travail. Une analyse du comportement à l'usure du PTFE a été envisagée. Le PTFE (polytétrafluoroéthylène) en tant matériau à faible coefficient de frottement a été testé sous différentes charges et différentes vitesses de glissement afin de quantifier son taux d'usure et de mesurer le coefficient de frottement.

L'objectif de ce travail est de montrer la résistance à l'usure du PTFE par la mesure du produit PV (pression multipliée par la vitesse de glissement). Puis de vérifier l'impact de ces deux paramètres sur le taux d'usure.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le chapitre 1 est consacré à une recherche bibliographique qui 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.

Introduction générale

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 troisième chapitre contient deux parties expérimentales :

La première partie traite la présentation du dispositif expérimental qui est un tribomètre de type pion-disque conforme aux normes ASTM G-99, conçu et réalisé à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Ce tribomètre est équipé d'un capteur à jauges de contraintes, avec deux ponts de Wheatstone, pour mesurer simultanément et indépendamment la force normale et la force tangentielle pendant le processus d'usure. Ce qui permet de prendre des mesures de frottement et d'effectuer facilement des tests d'usure dans des conditions de frottement à sec et de récupérer les données en temps réel.

La deuxième partie porte sur la détermination du produit PV de PTFE. La mesure du produit PV (Pression x Vitesse de glissement) a été effectuée sur une gamme de vitesses allant de 0,5 m/s à 1,5 m/s et une plage de pression allant de 0,5MPa à 3MPa à différentes combinaisons dans des conditions de glissement à sec.

Les essais tribologiques, l'analyse ainsi que la discussion des résultats des différentes compositions seront détaillées à la fin du chapitre.

Nous terminerons par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I. Tribologie des polymères

I.1 Introduction :

L'étude de la tribologie des polymères est un domaine de recherche en constante évolution. Les polymères sont utilisés dans de nombreux domaines tels que l'aérospatiale, l'industrie automobile, la médecine, les emballages alimentaires et bien d'autres encore. Cependant, leur utilisation est souvent limitée par leur comportement tribologique, c'est-à-dire leur capacité à résister à l'usure, au frottement et à la lubrification[1].

L'étude de la tribologie des polymères comprend la compréhension des mécanismes de frottement et d'usure des polymères, l'optimisation de leur performance tribologique ainsi que le développement de nouvelles techniques de caractérisation et de modélisation pour améliorer la fiabilité et la durabilité des systèmes tribologiques.

Les polymères présentent des propriétés tribologiques particulières en raison de leur structure moléculaire et de leurs propriétés physiques.

I.2 La tribologie :

La tribologie est la science qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre des systèmes en contact, immobiles ou en mouvements relatifs, elle regroupe ainsi la lubrification, le frottement et l'usure des éléments. La tribologie intervient dans des domaines très variés, allant du comportement des articulations, à l'adhérence des pneumatiques sur la route, en passant par la tenue du fœtus dans le placenta. La tribologie a été subdivisée en deux grands domaines : les contacts lubrifiés par des fluides et les contacts dits sec pour lesquels le lubrifiant est soit un lubrifiant solide, soit un revêtement ou un traitement de surface. L'étude des contacts en frottement sec est plus complexe et reste difficile à modéliser. Chaque contact tribologique constitue un cas d'étude particulier qui est lié à sa conception, au choix des matériaux et à l'environnement du contact [1], [3].

I.3 Système tribologique :

Le système tribologique est un ensemble des composants qui sont en contact les uns par rapport aux autres et qui sont soumis à des forces et des mouvements relatifs. La science qui étudie ce type de phénomène est la tribologie.

Le système tribologique comprend généralement trois éléments principaux qui sont les surfaces de contact, le lubrifiant et l'environnement.

Le système tribologique est présent dans de nombreuses applications industrielles et technologiques telles que les moteurs, les roulements ... La figure 1.1 présente la structure du système tribologique.

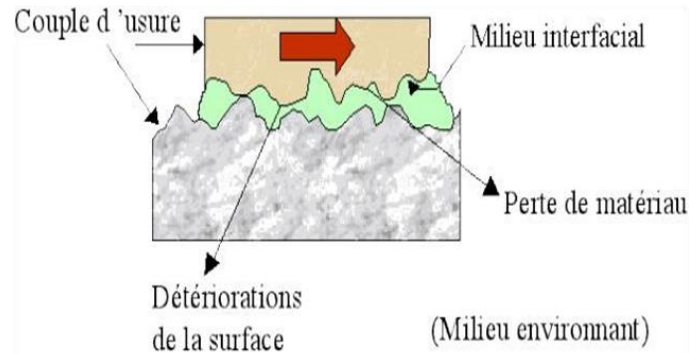


Figure I-1: Structure du système tribologique [2]

I.4 Paramètres tribologiques :

La tribologie est la science qui étudie l'interaction des surfaces en mouvement relatif, et elle comprend plusieurs paramètres importants, parmi ces paramètres, on mentionne :

- ❖ Frottement : est la force qui s'oppose au mouvement relatif entre deux surfaces en contacts. Il peut être défini par le coefficient de frottement, qui représente la quantité de force nécessaire pour faire glisser une surface sur une autre.
- ❖ Usure : est la perte progressive de matériau due à l'interaction de surfaces en mouvement relatif. L'usure correspond à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'endommagement de surfaces.
- ❖ Lubrification : la lubrification est l'utilisation d'un fluide pour réduire le frottement et l'usure des surfaces en contacts. Les différents types de lubrifiants comprennent les huiles, les graisses, les liquides ioniques et les polymères.

La détérioration d'un matériau engendre la production de déchets appelés usure, qui résulte du frottement et se produit au niveau de la zone de contact. L'usure, en relation avec le frottement, est un domaine étendu étudié par la tribologie. Bien qu'il existe certaines théories expliquant l'usure, de nombreux effets restent encore inexpliqués. L'usure altère les surfaces fonctionnelles et entraîne d'importantes pertes, notamment en conjonction avec la corrosion. Il est toujours intéressant de réduire, voire d'éliminer, l'usure afin de prolonger la durée de vie

d'une machine. La prévention de l'usure repose principalement sur l'expérience accumulée dans le domaine de l'exploitation industrielle.

I.5 Les paramètres influant sur le taux d'usure :

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont :

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

I.6 Les origines d'usure :

- Les déformations plastiques ;
- La fissuration ;
- Les transformations physicochimiques des surfaces ;
- L'adhésion : grippage, micro grippage.

I.7 Types d'usure :

Adhésion : lorsque deux surfaces sont mises en contact, les forces superficielles d'attraction et de répulsion agissent entre les atomes et les molécules de deux surfaces qui se rapprochent[3]. Ces forces se neutralisent à une certaine séparation d'équilibre. En raison de ces forces, les liaisons formées entre les surfaces en contact sont suivies de jonctions développées sur les points de contact réel. La formation et la rupture de la jonction contrôlent la composante d'adhérence du frottement.

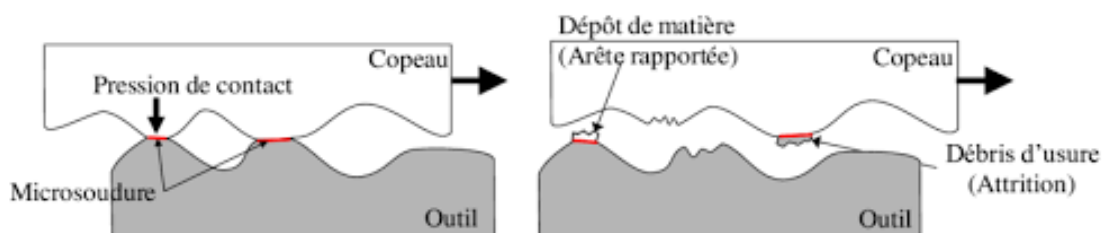
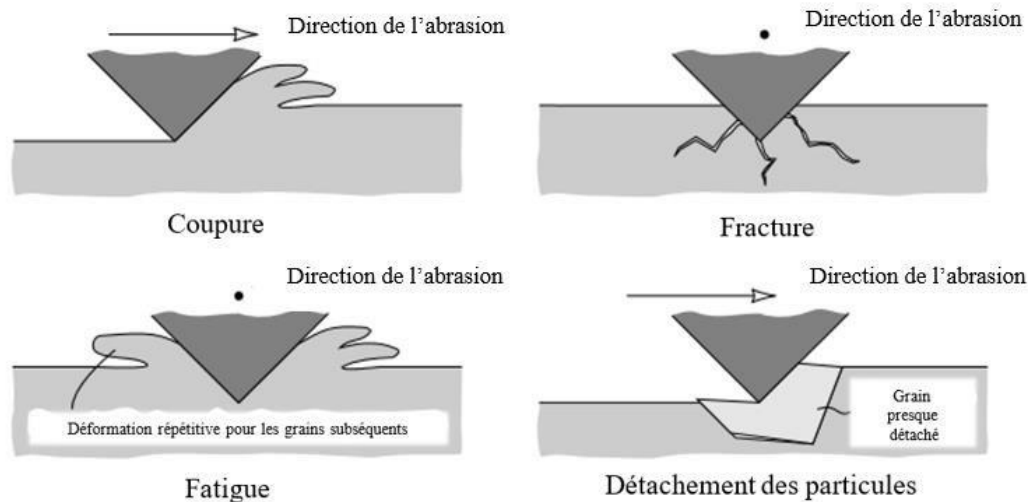


Figure I-2: Mode d'usure en adhésion

Abrasion : l'usure abrasive est le résultat d'un déplacement de matière produit par des particules dures ou des protubérances dures. C'est un phénomène très courant qui sévit

notamment dans la machinerie des industries[3]. Kato a montré en utilisant une configuration pion-disque que les mécanismes d'usure abrasive dépendent à la fois de la profondeur, de la largeur de la trace et du frottement interfacial.



Figurel-3 : Mécanisme d'usure abrasive par contact glissant

Fatigue : C'est une fissuration et la piqûre subséquente des surfaces soumises à des contraintes alternées lors du contact de roulement ou aux contraintes de roulement et de glissement combinés. L'usure par fatigue se produit lorsque les particules d'usure sont détachées par la croissance cyclique de microfissures sur la surface.

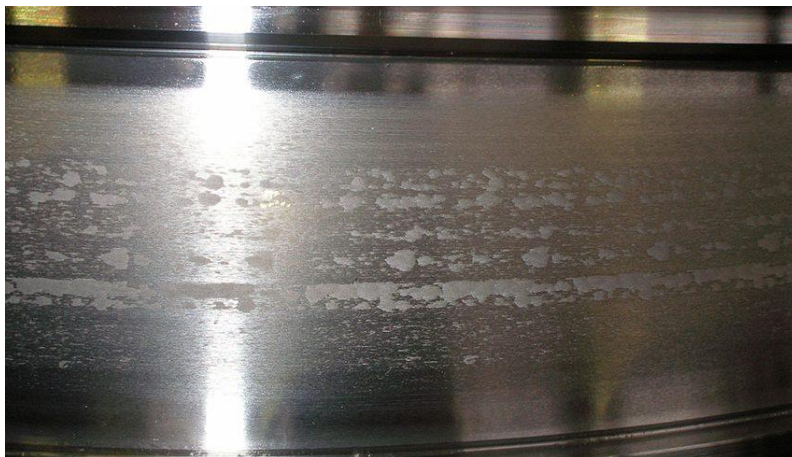


Figure I-4: usure par fatigue

Erosion : C'est une altération physique générée par des agents atmosphériques. L'usure par érosion est due aux impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieux gazeux. La durabilité de la pièce est notamment influencée par l'envergure, la vitesse et la dureté des particules.



Figure I-5: Usure par Erosion

Corrosion : Ce type d'usure est une dégradation de type chimique. Elle se traduit par une perte de matière en surface suite à une réaction chimique entre le métal et son environnement (pression, température, gaz polluant...)



Figure I-6: Usure par corrosion

I.8 Tribologie des polymères :

Aujourd'hui, l'utilisation des polymères dans le domaine technologie a rapidement augmenté, ceci est particulièrement relié au faible coût des matériaux et la fabrication d'une grande quantité de composants ainsi ils remplacent souvent de nombreuses pièces de glissement métalliques classiques, en raison de leur développement rapide avec des meilleures propriétés tribologiques, mécanique et de corrosion[3].

La tribologie des polymères est différente de la tribologie des métaux et des matériaux céramiques. La différence d'application des polymères dans les contacts de frottement par rapport aux métaux et aux matériaux céramiques concerne principalement les structures

chimiques et physiques ainsi que les propriétés de surface et de masse. Dans cette perspective, l'étude de la tribologie des polymères peut contribuer réduire les coûts de maintenance et à prolonger la durée de vie des équipements.

I.9 Contacts non polymère sur polymère :

Les tribosystèmes non polymère sur polymère sont souvent utilisés dans divers appareils et dispositifs. Cela est probablement dû aux bonnes propriétés mécaniques et thermiques de l'élément antagoniste de frottement.

Les propriétés adhésives et les propriétés mécaniques sont deux composantes principales dans le frottement d'un contact glissant non polymère sur polymère. Les interactions mécaniques et adhésives se situent dans une très fine couche superficielle de polymère en contact par friction. Le rapport entre les composantes mécaniques et adhésives dépend en particulier de la rugosité du solide antagoniste. Le coefficient de frottement est généralement très élevé lorsque la rugosité est faible, en raison de l'adhérence élevée, et il diminue jusqu'à atteindre une valeur minimale lorsque la rugosité augmente, puis augmente lorsque la composante mécanique de la force de frottement devient très élevée.

La charge et la vitesse de glissement influencent fortement sur le coefficient de frottement et le taux d'usure. Lorsque la charge augmente, le coefficient de frottement diminue, mais uniquement au niveau du contact élastique. Lorsque la déformation plastique commence, le coefficient de frottement est faible, mais il augmente à mesure que la charge augmente. La vitesse de glissement et température sur le contact ont un effet significatif sur cette relation.

Le processus d'usure est très important dans les tribosystèmes polymère. Des mécanismes d'usure adhésifs et abrasifs se produisent souvent dans de nombreux systèmes coulissants. Le taux d'usure est élevé à un paramètre PV élevé (Pression de contact, Vitesse de glissement). Le processus d'usure dans une mesure supérieure à celle du frottement, le processus est contrôlé par le transfert de matière qui est un phénomène très caractéristique dans les contacts polymères. Ce phénomène joue un rôle très important dans les processus de frottement et d'usure dans les tribosystèmes polymères. Le transfert des matériaux polymère sur le partenaire non polymère est initié par des liaisons adhésives fortes et locales des surfaces qui sont en frottement. La force de cohésion du matériau polymère est un paramètre important qui doit être pris en compte dans le mécanisme de transfert.

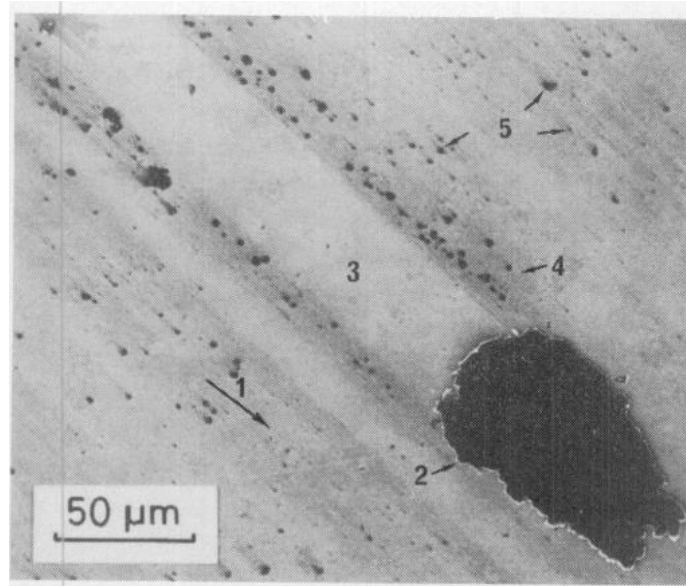


Figure I-7 : Exemple de film de transfert[4]

Le film de transfert est très important pour certains composants polymères, en particulier ceux conçus pour être utilisés dans des conditions de frottement sec. Le film de transfert formé sur un solide antagoniste non polymère est contrôlé par le matériau et la rugosité du solide antagoniste et les conditions de glissement. Généralement, le film de transfert formé pendant le processus de frottement pourrait améliorer efficacement l'état tribologique du polymère, ce qui signifie un coefficient de frottement inférieur et une usure remarquablement réduite du matériau. Par exemple, en tant que type de matériau tribologique très important, l'application de composite à base de PTFE est tout aussi importante.

I.10 Contacts polymère sur polymère :

Comme il a été indiqué précédemment, les polymères et les composites à base des polymères sont largement utilisés en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et tribologiques, en particulier dans des conditions de frottement à sec, où les lubrifiants ne peuvent pas être utilisés.

Le transfert de matière dans les contacts polymères sur polymère est très important dans les processus tribologiques. Les études de transfert de matière dans des couples polymère sur polymère (PTFE, chlorure de polyvinyle, le polypropylène...) ont montré que l'épaisseur de la couche de matériau transféré augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement et de la température et diminue avec l'augmentation de la charge. Le transfert de matière s'est

toujours produit à partir du polymère de faible densité d'énergie cohésive à une densité d'énergie plus élevée.

Les contacts polymère sur polymère sont largement utilisés dans les mécanismes miniatures en raison des coûts de fabrication très faibles des dispositifs polymères complets. Les roulements miniatures polymère sur polymère sont des composants prometteurs, mais les connaissances sur leur comportement tribologique sont très limitées.

I.11 Le produit PV (Pression-Vitesse) :

L'enveloppe PV est le lieu du produit de la pression (P) par la vitesse de glissement (V). Il s'agit d'un outil essentiel qui définit une zone de travail fiable pour une application polymère. La méthode d'essai, l'humidité et le pourcentage de cristallinité de l'échantillon sont d'autres effets de second ordre sur les valeurs du coefficient de frottement. La Figure I-8 montre l'enveloppe PV pour deux polymères différents, en soulignant que chaque enveloppe individuelle peut être différente. Il est essentiel de connaître l'enveloppe PV d'un polymère spécifié pour la conception d'un composant proposé afin d'éviter sa défaillance prématurée en service.

Le coefficient de frottement statique μ_s s'applique à l'effort initial nécessaire pour commencer à déplacer un corps sur une surface. Le coefficient de frottement le plus courant est le coefficient de frottement dynamique μ_d qui s'applique au mouvement établi d'un corps sur cette surface. Le coefficient de frottement statique de deux surfaces matérielles en contact est toujours plus élevé que le coefficient de frottement dynamique.

Pour une comparaison objective des coefficients de frottement des polymères, les conditions d'essai et l'appareillage doivent être précisés. Des méthodes d'essai différentes peuvent donner des coefficients de frottement différents pour un même polymère.

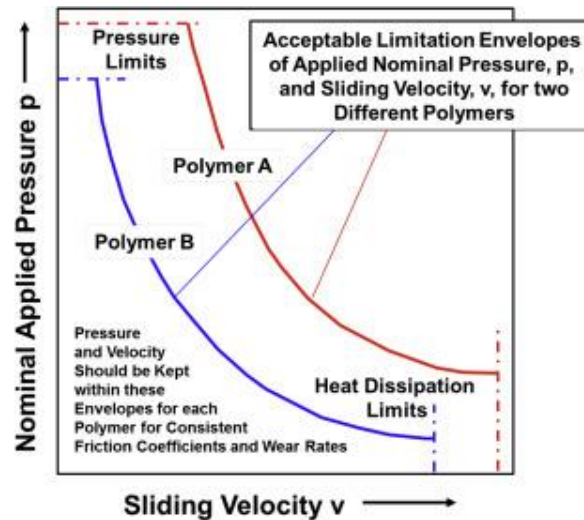


Figure I-8: Diagramme schématiques du produit PV pour deux polymères différents

Le tableau 1 indique les effets de la structure du polymère et des charges sur le coefficient de frottement, il montre que les charges solides augmentent généralement le coefficient de frottement. Cependant, les taux d'usure dépendent de la taille et de la dureté des particules et donc de la nature générale de la charge. Les coefficients de frottement et les taux d'usure d'un polymère chargé doivent être déterminés dans des conditions réelles de charge et de vitesse, car dans certains cas, ils peuvent être opposés.

PTFE	0.10	PVC	0.30
PVDF	0.24	UHMWPE	0.12
UHMWPE, oil filled	0.13	LDPE	0.60
PP, homo-pol	0.26	PA 6	0.26
PA 66	0.25	PA6, oil filled	0.14
PA 66+30% GF	0.31	PA6, wax filled	0.04
POM ,homo-polymer	0.20	POM, co-polymer	0.18
PEEK	0.18	PEEK+30% Gr	0.30
PEEK+30% GF	0.31	PEEK+30% CF	0.22
PSU	0.37	PPO/PS	0.39

Tableau I-1: coefficients de frottement dynamique pour quelques groupes de polymères

I.12 Classification de polymères :

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées, selon l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le types de polymérisation, comme base de la classification.

I.13 Classification selon l'origine :

On distingue les polymères naturels, les polymères artificiels et les polymères synthétiques

I.13.1.1 Les polymères naturels :

Issus des règnes végétal, animal ou minéral et leurs rôles a assuré une place de premier choix pendant plusieurs années comme le caoutchouc.

I.13.1.2 Les polymères artificiels :

Ils sont obtenus par modifications chimiques des polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés par exemple les esters cellulosiques.

I.13.1.3 Les polymères synthétiques :

Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels.

I.14 Classification selon l'architecture :

I.14.1.1 Polymères linéaires :

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont liées entre elles par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide. La Figure I-9 représente un schéma de polymère linéaire.

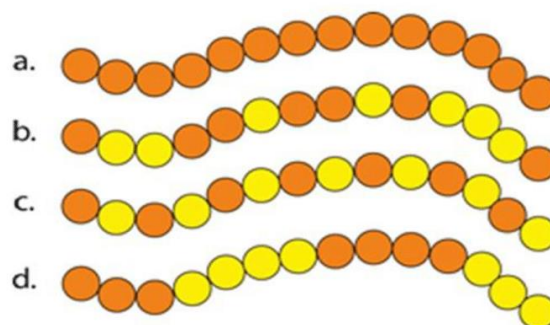


Figure I-9: Représentation schématique de polymère linéaire

I.14.1.2 Polymères ramifiés :

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires. La Figure I-5 indique une présentation schématique de polymères ramifiés.

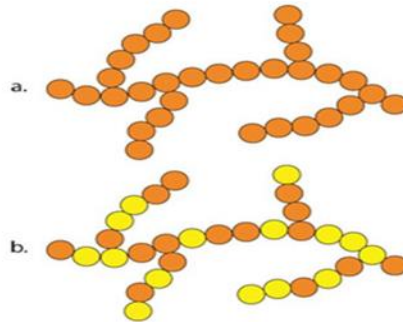


Figure I-10: Polymère ramifié

I.14.1.3 Polymères réticulés :

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau.

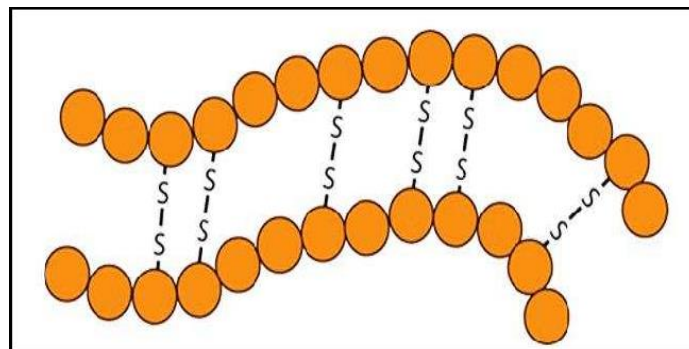


Figure I-11: Polymère réticulé

I.15 Classification selon la structure chimique :

I.15.1.1 Les homopolymères :

Ce sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques,

écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve : les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

I.15.1.2 Les copolymères :

Ce sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles.

I.16 Classification selon le comportement thermique :

I.16.1.1 Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont, en première approximation, constitués par des enchaînements unidimensionnels résultant de l'association de molécules simples en chaînes macromoléculaires linéaires. A température ambiante, ce matériau est solide. Par chauffages et refroidissements successifs, on peut modifier l'état et la viscosité des matières thermoplastiques, de façon réversible.

I.16.1.2 Les thermodurcissables :

Ce sont des composés macromoléculaires s'étendant dans les trois directions de l'espace ; ils sont d'autant plus rigides que le réseau tridimensionnel qui les caractérise est plus dense.

I.16.1.3 Les élastomères :

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer.

Les élastomères sont des matières réticulées d'une manière incomplète. Le degré de réticulation est faible. Les pontages permettent aux macromolécules de revenir en place plus ou moins rapidement après une déformation sous contraintes, c'est la propriété fondamentale des élastomères.

I.17 Classification selon le comportement physique :

I.17.1.1 L'état amorphe

Dans lequel les arrangements moléculaires n'ont pas d'ordre prédéfini. Cette absence d'ordre engendre une absence de point de fusion, l'existence d'une température de transition vitreuse qui marque le passage d'un état vitreux à un état caoutchoutique.

1.17.1.2 L'état amorphe orienté

Où les arrangements moléculaires sont tous orientés dans la même direction.

1.17.1.3 L'état cristallin

Caractérisé par un arrangement organisé des molécules. Les chaînes s'organisent de façon ordonnée et compacte. Le cristal polymère est décrit par son réseau et son motif. Le réseau caractérise la périodicité dans les trois directions de l'espace. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont une compacité supérieure à celle de la phase amorphe, l'existence d'un point de fusion et l'absence de transition vitreuse, une rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.

1.17.1.4 L'état semi cristallin :

Les polymères semi cristallins possèdent une phase amorphe et une autre cristalline. L'état du matériau est amorphe à la température de fusion, en effet, toutes les macromolécules sont dans un état isotrope et désordonné.

1.18 Avantages et inconvénients des polymères en tribologie :

1.18.1.1 Les avantages :

- ❖ Des bonnes propriétés physiques et mécaniques.
- ❖ Facilité de fabrication des formes complexe.
- ❖ Une bonne résistance aux attaques chimiques des milieux agressifs, tels que les acides et les alcalis.
- ❖ Un faible coefficient de frottement ce qui conduit à une bonne résistance à l'usure.

En présence de lubrifiants fluides, les polymères subissent une lubrification élastohydrodynamique plus facilement que les métaux.

1.18.1.2 Les inconvénients :

- ❖ Les polymères sont viscoélastiques et beaucoup plus sensibles au fluage que les métaux.
- ❖ La résistance et les modules limites sont sensiblement inférieurs.
- ❖ Les coefficients de dilatation thermique sont relativement élevés, ce qui peut entraîner des problèmes de stabilité dimensionnelle.
- ❖ Facilité d'absorption des fluides y compris l'eau de l'environnement ce qui peut également affecter la stabilité dimensionnelle.

- ❖ Faibles conductivités thermiques d'un ordre important de celle de l'acier, et la dissipation de la chaleur de frottement est donc médiocre.

En résumé, les polymères peuvent être bénéfiques pour réduire le frottement et l'usure, mais leur utilisation doit être fournie en fonction des exigences spécifiques de l'application, notamment en ce qui concerne la résistance mécanique, la température et la résistance chimique.

I.19 Utilisation des polymères en tribologie :

Aujourd'hui, les polymères sont souvent utilisés dans le domaine de la tribologie et sont devenus un élément indispensable de la vie quotidienne grâce à leurs bonnes propriétés, tels que leurs résistances à l'usure et leurs faibles coefficients de frottement[3].

Les polymères sont couramment utilisés pour des applications tribologiques, comme les pneus, les roulements et les bandes transporteuse.

Ils peuvent être utilisés comme des lubrifiants solides ou liquides dans le but de réduire le frottement et l'usure dans diverses applications telles que les engrenages, et ils sont également utilisés dans les revêtements de surface pour protéger les composants contre l'usure et la corrosion.

Les polymères hauts performance, comme les polyimides, les polyamides, les polyéthersulfones et le PEEK (polyétheréthercétone), sont souvent utilisés dans des applications de haute température et de haute pression. Ces matériaux présentent une résistance à l'usure, un faible coefficient de frottement et une bonne résistance chimique.

Les polymères sont ainsi utilisés comme matériau de frottement dans les freins et les embrayages, où ils offrent une résistance à l'usure et une capacité à absorber l'énergie cinétique. Des exemples de polymères utilisés pour les freins incluent les polyimides renforcés de fibre de carbone et les composites à matrice de polymère. En résumé, sont des matériaux très utiles dans le domaine de la tribologie en raison de leurs propriétés uniques.

I.20 Utilisation de PTFE (polytétrafluoroéthylène) en tribologie

Le PTFE (polytétrafluoroéthylène) est un matériau bien connu qui possède un fort potentiel pour les applications anti-usure en raison de ses divers avantages, tels que son faible coefficient de frottement, sa bonne résistance chimique et sa bonne stabilité thermique.

Cependant, ses applications anti-usure ont été quelque peu limitées par sa faible résistance à l'usure qui a conduit à la défaillance des pièces et des films anti-usure.

Le PTFE est un matériau à faible coefficient de frottement, ce qui signifie qu'il est capable de réduire les forces de frottement entre deux surfaces en mouvement relatif. De plus, le PTFE a une très faible énergie de surface, ce qui signifie qu'il a une grande résistance à l'adhérence et à l'abrasion.

En raison de ces propriétés, le PTFE est souvent utilisé comme revêtement de surface pour réduire l'usure et prolonger la durée de vie des composants mécaniques, tels que les roulements, les joints d'étanchéité, les pistons, les soupapes et les engrenages. Le PTFE est aussi utilisé comme matériau de garniture pour réduire les frottements et les pertes d'énergie dans les machines.

Cependant, bien que le PTFE ait des propriétés tribologiques remarquables, il peut être sensible à l'usure par déchirement et à la fatigue des matériaux en raison de sa faible résistance à la traction. En outre, le PTFE peut être sujet à une usure accumulée en présence de charges élevées ou de hautes températures.

I.21 Conclusion

La tribologie est une science très vaste. Elle intéresse tous les domaines d'activités car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régi par des contacts. La tribologie est une discipline scientifique importante qui permet de mieux comprendre les phénomènes de frottement et d'usure, et qui a un impact significatif sur de nombreux domaines de l'ingénierie et de la technologie moderne.

Chapitre II. **La lubrification solide**

II.1 Introduction :

Les lubrifiants solides sont des substances utilisées pour réduire le frottement et l'usure entre les surfaces en mouvement. Les lubrifiants solides fonctionnent en formant un film protecteur entre les surfaces en contact. Ces substances sont généralement composées de particules solides dispersées dans un liant ou un matériau de base. Les particules solides peuvent être du graphite, du MoS_2 du PTFE ou d'autres matériaux similaires[5].

Les lubrifiants solides :

Ce sont des composés solides facilement cisailables par frottement, du fait :

- d'une **structure lamellaire** : graphite, bisulfure de molybdène (MoS_2), fluorure de graphique (CF_x), nitrure de bore (BN), etc. ;
- d'une **structure polymérique** à longue chaîne droite orientée : polytétrafluoroéthylène (PTFE), polyamides, polyacétals, poly-imides, etc. ;
- d'une **faible dureté** ; métaux mous comme le plomb, l'étain, l'argent, l'indium ou leurs alliages.

Les produits les plus utilisés sont le graphite, le bisulfure de molybdène et le PTFE.

Les lubrifiants solides sont utilisés soit seuls, en substitution des graisses (lubrification sèche), soit associés aux lubrifiants conventionnels pour améliorer leurs performances en régime de lubrification limite ou assurer une lubrification temporaire de secours en cas de défaillance accidentelle du système de graissage[6].

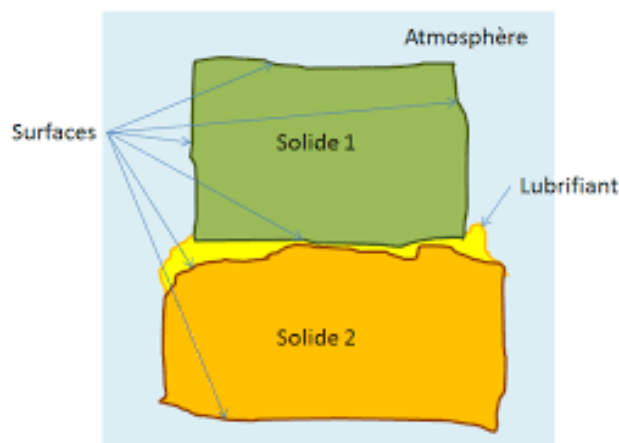


Figure II-1: Surfaces des solides

Les lubrifiants solides sont une catégorie unique de matériaux qui minimise le frottement qui se prêtent à une utilisation dans des environnements extrêmes et dans l'ultravide. Les composites de PTFE et de MoS₂ sont capables d'assurer un faible coefficient frottement et une durée de vie élevée dans une large gamme de températures et d'environnement de fonctionnement, ce qui en fait des matériaux candidats idéaux pour la lubrification des contacts mécaniques dans les satellites et les avions[7].

Les produits les plus utilisés sont le graphite, MoS₂ et le PTFE[4], [8], [9]. ces derniers sont utilisés soit seuls, en substitution des graisses, soit associé aux lubrifiants conventionnels pour améliorer leurs caractéristiques en régime de lubrification temporaire de secours en cas de défaillance accidentelle du système de graissage.

Pour certaines applications (aérospatiale, nucléaire, cryogénique, etc.), il n'y a pas d'alternative à l'utilisation de certains de ces produits du fait de leur tenue sous vide, en présence de radiations, à très basses ou très hautes températures[7].

Les différents types des lubrifiants solides

Il existe plusieurs types de lubrifiants solides [1], [10] qui sont utilisés pour réduire le frottement et l'usure entre les surfaces en mouvement, parmi ces types on mentionne :

II.2 Le graphite :

Le graphite est la forme stable du carbone à température et à pression ordinaires. L'apparence du graphite est celle d'un solide noir à l'éclat submétallique ; sa dureté est faible, entre 1 et 2 sur l'échelle de Mohs. En raison de sa structure en feuillets, toutes les propriétés physiques du graphite sont anisotropes[10].

II.2.1.1 Propriétés :

Le graphite est le plus stable des quatre variétés allotropiques du carbone. A l'état naturel, il se présente sous la forme de masses noires, douce ou même graisseuses au toucher, et qui noircissent les doigts. On les rencontre dans les roches métamorphiques comme les schistes et sous forme de petits cristaux dans d'autres minéraux comme les marbres. Usuellement commercialisé sous forme de paillettes contenant entre 90 et 95% de carbone pur.

La densité du graphite est 2,25. Il est insoluble dans les solvants usuels, conducteur de la chaleur et d'électricité, ce qui l'apparente aux métaux, dont il se rapproche aussi par « éclat

métallique ». Son point de fusion est très élevé (3550°C) et il fait preuve d'une grande neutralité chimique sauf avec les oxydants. Sa structure est un empilage de plaques parallèles formées d'hexagones régulier et pouvant glisser sous un effort très faible. Ces plaques, liées par des forces de van der Waals, sont distantes de 0,335 nm et elles peuvent laisser pénétrer entre elles des ions ou des molécules formant des composés d'intercalation appelés « lamellars ». La Figure II-2 illustre la structure lamellaire du graphite.

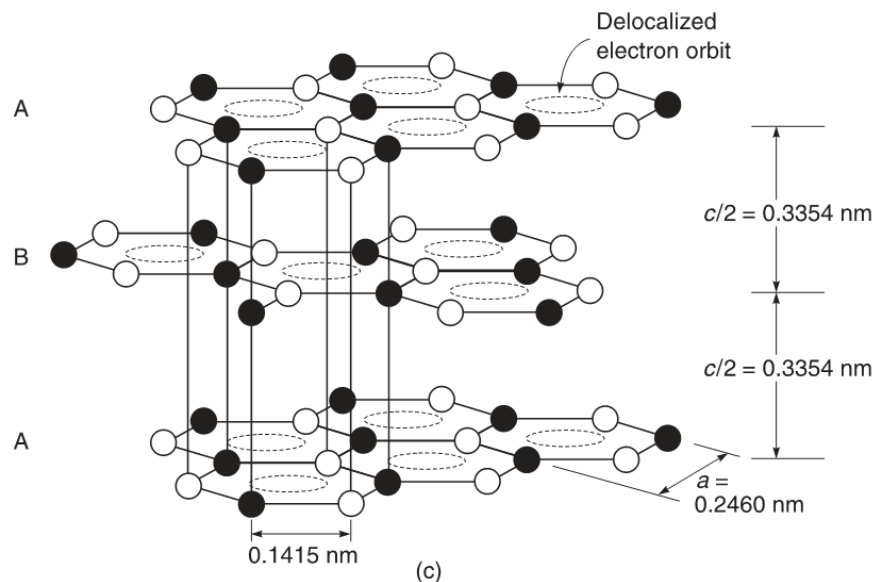


Figure II-2: Structure lamellaire du graphite[10]

Le graphite artificiel, obtenu à partir du pétrole, est beaucoup plus pur que le graphite naturel et communément constitué de 99,9% de carbone. On s'en sert pour fabriquer des électrodes pour les piles électriques ou la métallurgie, des balais pour les moteurs électriques (charbon), des matériaux réfractaires, etc. Sous forme de fibres, il est largement utilisé pour la fabrication de matériaux composites.

II.2.1.2 Applications :

Le graphite est utilisable comme matériau de frottement de -180 à +650°C et jusqu'à 750°C en atmosphère neutre mais il n'est efficace que s'il adsorbe un film de gaz, d'huiles ou surtout d'eau, ses qualités frottantes sont donc diminuées à chaud, sous vide ou dans les milieux anhydres (il tend alors à devenir abrasif)[10].

L'adsorption des films de graphite nécessite une action énergétique et prolongée, moyennant quoi ils résistent à des pressions considérables : 25 000 bars en cas d'écrasement sous déplacement lent et 7 000 sous charges variables ou mouvements rapides. Ces films favorisent

l'adsorption d'autres lubrifiants mais ils n'assurent aucune protection contre la corrosion et peuvent être éliminés par des détergents suffisamment puissants. Le pouvoir lubrifiant du graphite est augmenté par l'oxydation des surfaces lubrifiées ou par adjonction d'oxydes de plomb, de cadmium ou d'antimoine, ou encore par d'autres adjuvants comme des poudres des métaux mous.

Outres ses nombreuses applications dans le domaine des lubrifiants industriels, le graphite rend des services dans la vie courante, on l'utilise par exemple sous forme de poudre pour la fabrication sèche des serrures ou pour empêcher le collage des joints de caoutchouc des portières et des coffres des automobiles[10].

II.2.1.3 Influence du graphite sur le coefficient de frottement et le taux d'usure de l'ABS :

II.2.1.4 Sur le coefficient de frottement :

Une étude [11] sur le développement des composites polymères à base de thermoplastique contenant un lubrifiant solide pour améliorer les propriétés mécaniques et le comportement de frottement. La technique de moulage par compression à chaud a été utilisée pour fabriquer les composites. Le polymère thermoplastique utilisé est l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), couramment utilisé dans des applications telles que les roulements et les glissières.

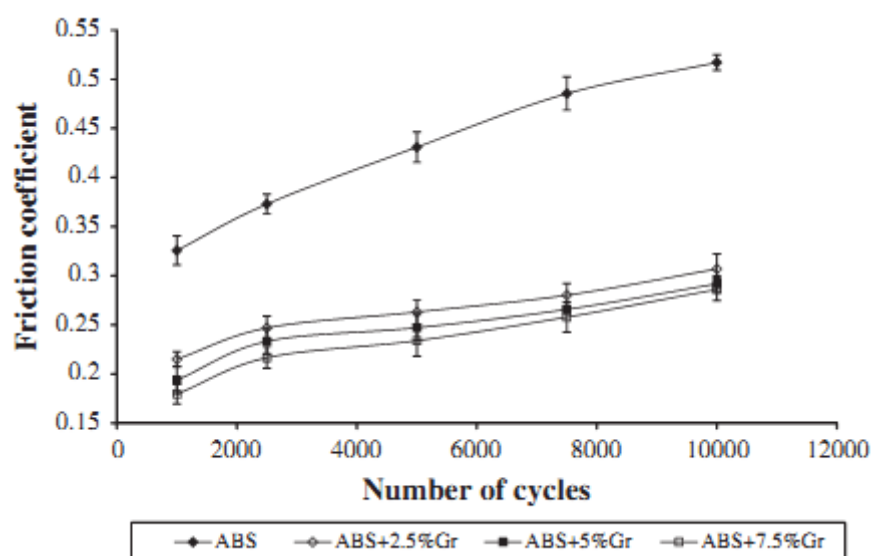


Figure II-3: Coefficient de frottement en fonction du nombre de cycles de glissement pour les composites ABS/graphite[11]

La poudre de graphite a été choisie comme lubrifiant solide et quatre rapports de masse différents de particule de graphite dans la matrice ABS ont été étudiés, allant de 0 à 7,5%. La Figure II-3 illustre la relation entre le coefficient de frottement et la teneur en graphite dans le composite ABS/graphite en fonction du nombre de pièces. On observe une augmentation continue du coefficient de frottement avec le nombre de cycle de glissement, tandis que l'ajout de graphite entraîne une diminution considérable du coefficient de frottement de l'ABS. Après 1000 cycles de glissement, l'ABS pur présente un coefficient de frottement très élevée d'environ 0,34. Ce phénomène devient plus prononcé à mesure que le nombre de cycles augmente. Par exemple, après 10 000 cycles, les échantillons d'ABS pur sont sérieusement usés, et le coefficient de frottement atteint 0,51. Le composite contenant 7,5% de graphite présente la valeur la plus faible du coefficient de frottement, ce qui est cohérent avec les résultats similaires obtenus dans une étude antérieure sur les revêtements de polyester incorporant des particules de graphite.

II.2.1.5 Sur le taux d'usure :

La Figure II-4 montre graphiquement les pertes du poids en fonction du nombre de cycles de glissements. On constate que les pertes de poids diminuent progressivement à mesure que la teneur en graphite augmente. Cette tendance à la baisse est clairement liée aux rapports de masse du graphite. Par exemple après 10 000 cycles de glissement, les pertes de poids passent de 0,17% à 0,054% lorsque le rapport de masse du graphite passe de 0% à 7,5% en poids. Ces résultats indiquent que l'incorporation de graphite dans l'ABS améliore considérablement sa résistance à l'usure. Le composite contenant 7,5% de graphite en poids présente la plus faible usure.

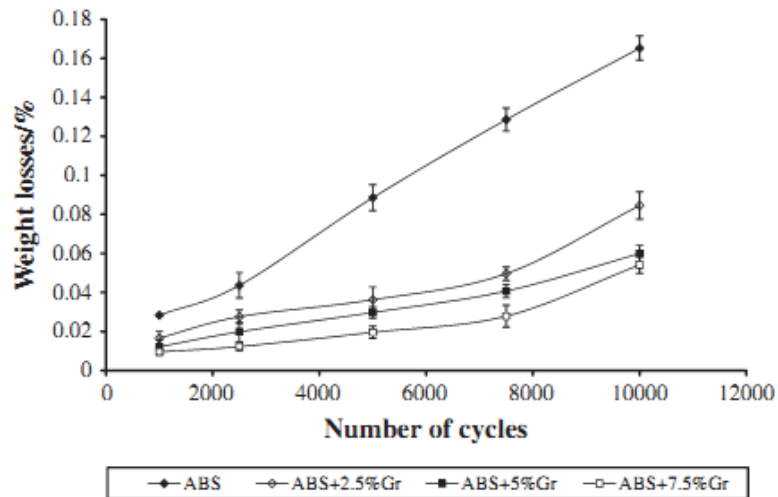


Figure II-4: Pourcentage de pertes de poids par rapport au nombre de cycles de glissement pour les composites ABS/graphite[11]

II.2.1.6 Influence de la teneur en graphite sur les caractéristiques d'usure des composites en alliage d'aluminium 2024 :

Cette étude [12] est consacrée sur l'influence de la teneur en graphite sur les caractéristiques d'usure des matériaux composites en alliage d'aluminium 2024 fritté-graphite (Al/Gr) lors de tests d'usure par glissement et par glissement imprégné d'huile. Les composites ont été fabriqués en ajoutant des particules de graphite (de 5 à 20% en poids) à l'alliage d'aluminium 2024 par la technique de métallurgie des poudres.

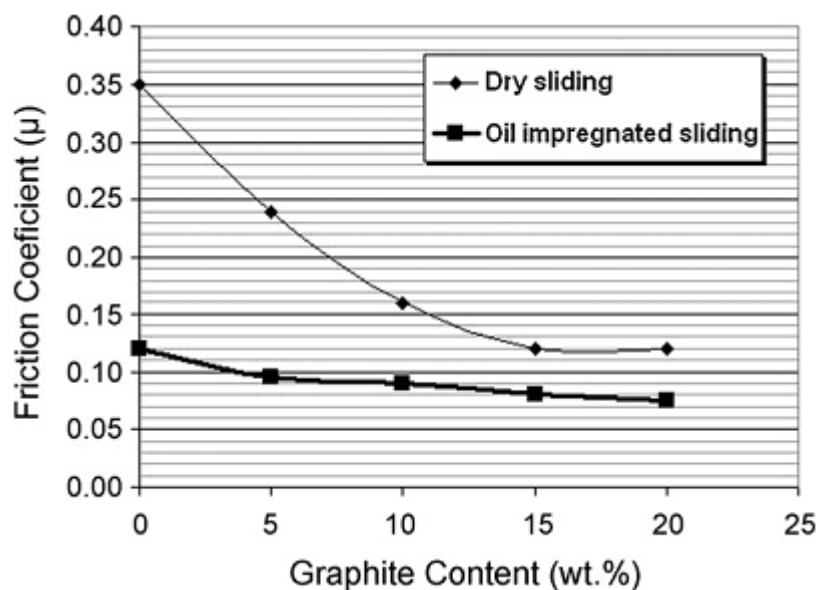


Figure II-5: La variation du coefficient de frottement mesuré avec le pourcentage en poids de graphite dans les composites pour le glissement à sec et le glissement imprégné d'huile[12]

Selon la Figure II-5, on peut observer que, pour un glissement sec les coefficients de frottements débutent à 0,35 pour l'alliage de base, puis diminuent à mesure que la quantité de graphite augmente. Ils passent de 0,35 pour l'alliage de base, puis diminuent avec l'augmentation de la teneur en graphite, atteignant une valeur finale d'environ 0,12 pour les composites contenant 15% en poids de graphite. Cette valeur représente environ un tiers de l'alliage de base.

La raison de cette réduction du coefficient de frottement peut également être attribuée à la présence d'une petite couche de graphite sur la surface de glissement de l'échantillon d'usure. Cette couche agit comme un lubrifiant solide, formant un film lubrifiant qui empêche le contact direct des deux surfaces.

II.3 MoS₂ :

MoS₂ forme une pellicule lubrifiante extrêmement résistante sur toutes les surfaces métalliques de frottement et de glissement. Grâce à une lubrification ultra-rapide et intégrale au démarrage et une friction minimale dans des conditions d'utilisation quotidiennes, assure une durée extrêmement élevée du moteur [8], [13], [14]. La **Figure II-6** illustre la forme cristalline du MoS₂

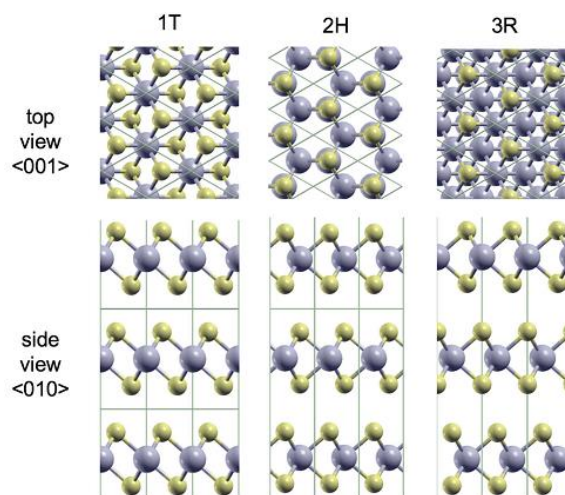


Figure II-6: Structure cristalline du MoS₂

II.3.1.1 Domaine d'utilisation :

Le lubrifiant sec MoS₂ protège contre l'usure, le grippage le frottement et prolonge la durée de vie des pièces. Il est recommandé pour la lubrification permanente des petits mécanismes

soumis à de fortes pressions ou fortes charges où il n'apporte pas de surépaisseur : roulement, chaînes, articulations, assemblage fileté...[14]

Il est utilisable pour le prétraitement des outils et pièces dans le formage à froid et le frettage, comme il est aussi recommandé pour toutes les fois où un lubrifiant liquide ou graisseux est indésirable ou à proscrire. Idéal pour faciliter le déplacement des charnières, glissières de convoyeurs ...

II.3.1.2 Etude sur l'amélioration tribologique du matériau de roulement EN31 en utilisant des particules de MoS₂ dans un lubrifiant SAE 20W40 :

Cette étude [15] a pour objectif principal d'améliorer le comportement tribologique du matériau de roulement EN31 en acier allié dans des conditions de lubrification, en utilisant différentes tailles de particule de MoS₂ comme additif dans le lubrifiant conventionnel SAE 20W40. Quatre tailles de particule de MoS₂ (35 µm, 7 µm, 3 µm et 90 nm) ont été testées comme additifs dans le lubrifiant SAE 20W40, sur un tribomètre constituée d'un disque en acier EN31 et d'une bille en acier AISI 52100. Des tests de frottement et d'usure ont été réalisés sur un tribomètre équipé d'un capteur de charge piézoélectrique haute résolution, à trois niveaux de charge différents (75N, 100N, 125N), avec une vitesse constante de 0,03m/s, pendant une durée de 10 minutes.

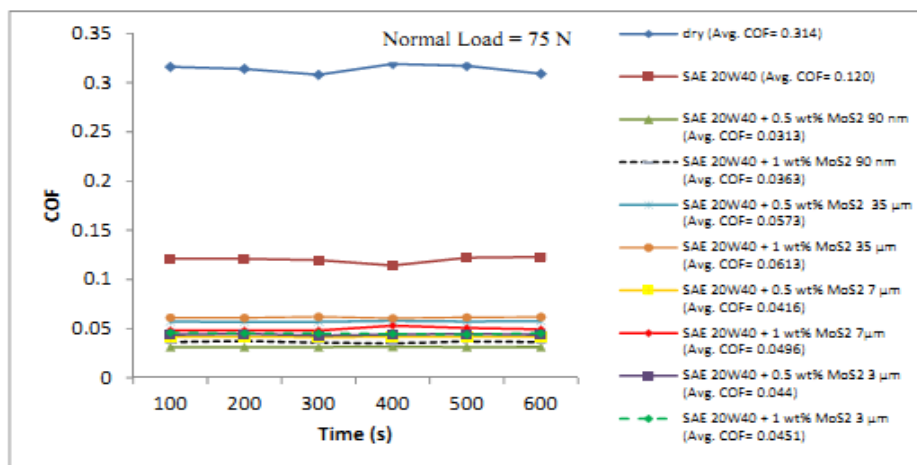


Figure II-7: Coefficient de frottement dans des conditions sèches et lubrifiées avec des particules de MoS₂ dispersées comme additif à une charge normale de 75N[15]

Les résultats montrent que le lubrifiant avec additifs présente un meilleur coefficient de frottement que l'huile de base. Cette amélioration peut être attribuée à l'effet de roulement à billes des particules solides dispersées dans le lubrifiant, sur les surfaces en contact. Par

ailleurs, il est observé que la valeur du coefficient de frottement augmente avec l'augmentation de la charge, probablement en raison de la réduction du nombre de particules solides dans le lubrifiant.

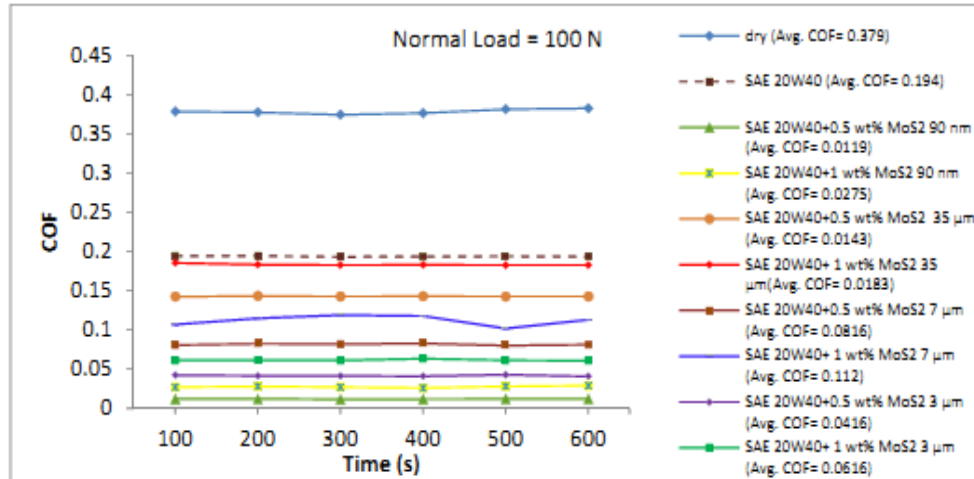


Figure II-8: Coefficient de frottement dans des conditions sèches et lubrifiées avec des particules de MoS_2 dispersées comme additif à une charge normale de 100N [15]

Cette augmentation peut également s'expliquer par la diminution de l'épaisseur du film lubrifiant entre les surfaces en contact, lorsque les contacts sont en phase de lubrification limite. En outre, dans toutes les conditions de charge, le coefficient de frottement des nanoparticules de MoS_2 dans l'eau de mer est plus élevé que dans le lubrifiant à base d'huile. On suppose que cette différence est due à la structure hexagonale des nanoparticules de MoS_2 .

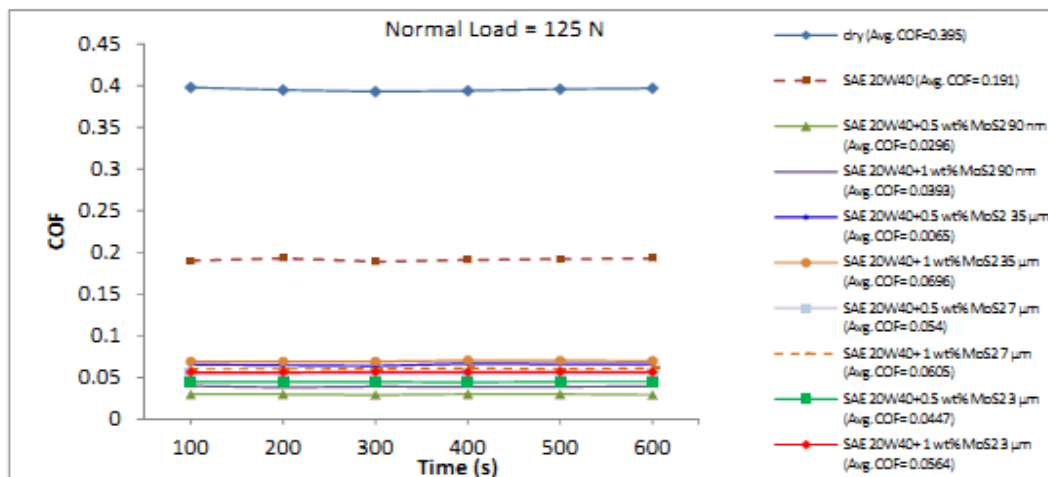


Figure II-9: Coefficient de frottement dans des conditions sèches et lubrifiées avec des particules de MoS_2 dispersées comme additif à une charge normale de 125N [15]

II.3.1.3 L'effet de l'ajout de particules MoS₂ sur la réduction de l'usure du disque EN31 sous lubrification SAE 20W40 :

La quantité d'usure subie a été déterminée en pesant l'EN31 à l'aide d'une balance numérique de haute précision avant et après chaque essai. La densité de matériau a été utilisée pour calculer la perte d'usure en mm³. Le taux spécifique d'usure en fonction de la charge du disque EN31 est présenté dans la Figure II-10 pour différentes charges sous lubrification avec SAE 20W40. De plus, il est évident que, dans la plupart des cas, l'usure du disque EN31 diminue avec l'augmentation de la concentration de MoS₂ dans le lubrifiant.

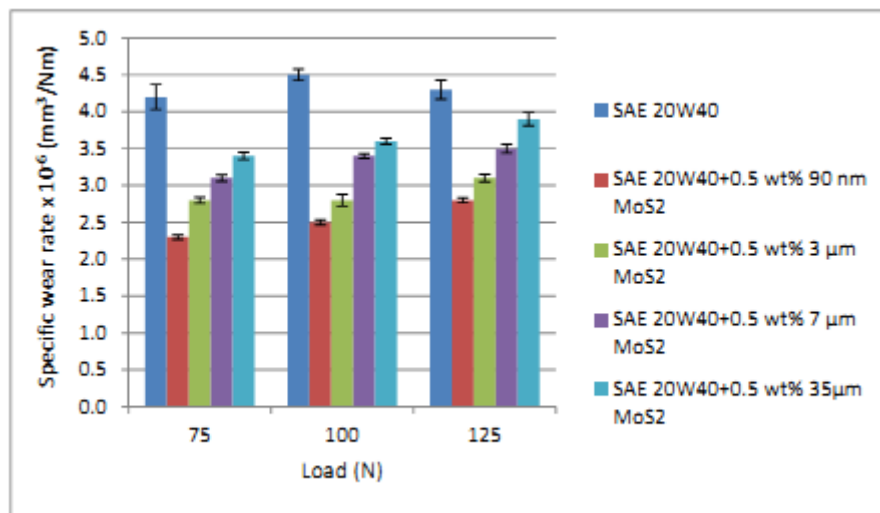


Figure II-10: Coefficient d'usure spécifique en fonction de la charge avec différentes tailles de particules de MoS₂ dispersées comme additifs dans les lubrifiants[15]

En améliorant la concentration de particule de MoS₂ dans le lubrifiant SAE 20W40, on observe une diminution de l'usure du disque EN31. Ces résultats permettent de conclure que l'ajout de particules MoS₂ réduit la perte d'usure d'environ 30 à 60% par rapport au lubrifiant sans additifs.

II.3.1.4 Comparaison des coefficients de frottement et de la stabilité du glissement pour le cuivre de base et les composites Cu/MoS₂ :

La variation du coefficient de frottement [16] en fonction de la distance de glissement pour les composites Cu/MoS₂ à base de cuivre est présentée dans la Figure II-11(a). Pour le cuivre de base, on observe une fluctuation du coefficient de frottement à toutes les charges normales. En revanche la Figure II-11(b) montre que le composite Cu/2,5MoS₂ présente des traces de frottement relativement stables, indiquant un glissement lubrifié et la formation d'un film lubrifiant stable entre les surfaces en contact.

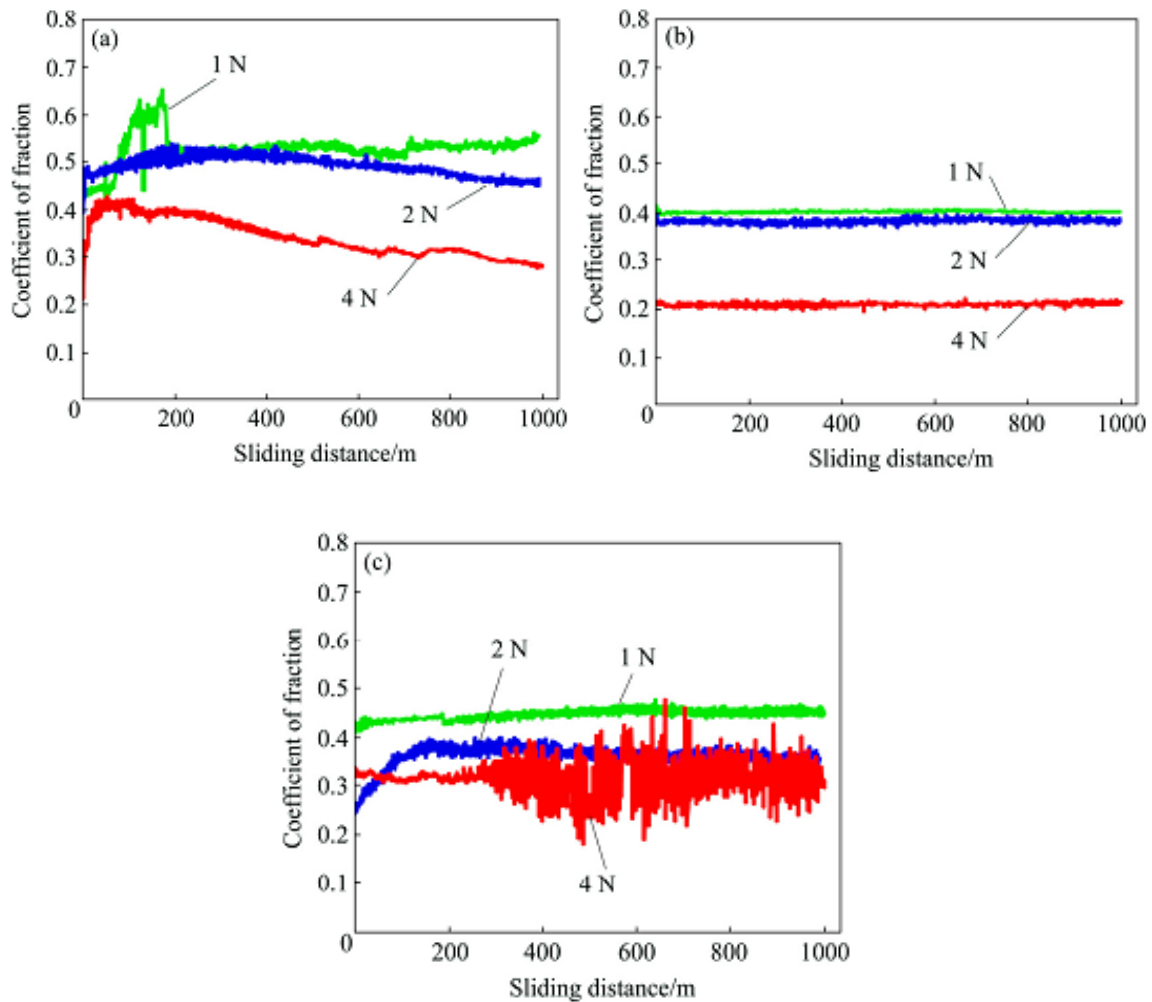


Figure II-11: Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance de glissement pour les composites cuivre pur (a), Cu/2.5 MoS₂ (b) et Cu/MoS₂ (c) sous différentes charges normales[16]

En ce qui concerne le composite Cu/10MoS₂ présenté dans la Figure II-11(c), ses tracés de frottement montrent des données instables, notamment à des charges normales plus élevées. Cette instabilité peut être attribuée à la réduction de la densité du solide lorsque la teneur de MoS₂ est élevée, ce qui affecte la stabilité du film lubrifiant.

II.3.1.5 Comparaison des coefficients d'usure entre le cuivre pur et les composites Cu/MoS₂ autolubrifiants sous différentes charges normales :

Les variations du coefficient d'usure [16] en fonction de la charge normale appliquée sont illustrées dans la Figure II-12 pour le cuivre pur ainsi que pour les composites autolubrifiants Cu/MoS₂ autolubrifiants. La Figure II-12 présente les caractéristiques des composites Cu/MoS₂ autolubrifiant.

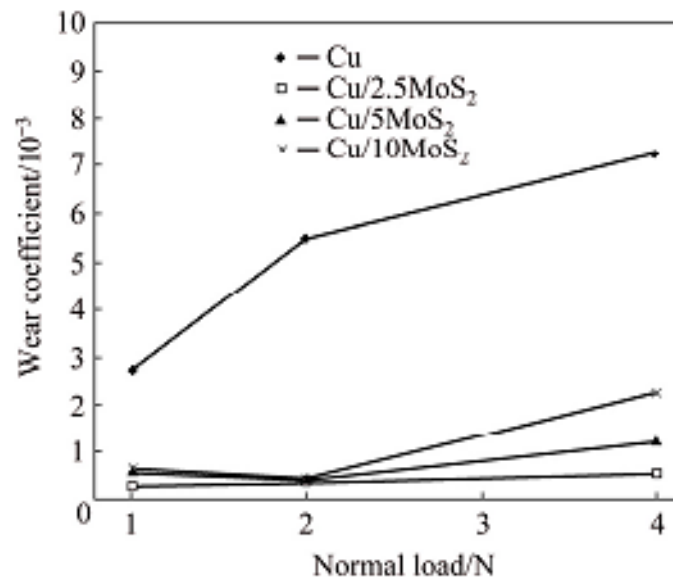


Figure II-12: Variation du taux d'usure sous charge normale pour le cuivre pur et les composites Cu/MoS₂[16]

On observe le coefficient d'usure du cuivre pur augmente considérablement avec la charge normale, ce qui indique une détérioration des performances tribologiques du cuivre lorsque les charges normales sont élevées. En revanche, les coefficients d'usure des composites Cu/MoS₂ montrent peu de variation en fonction de la charge normale. Plus précisément, le coefficient d'usure du composite Cu/2,5MoS₂ reste pratiquement constant sur toute la plage de charges appliquées. Ces résultats suggèrent que les composites Cu/MoS₂ autolubrifiants, correctement sélectionnés et traités, présentent un fort potentiel pour être utilisés dans des applications nécessitant une grande résistance à l'usure et une capacité de charge élevée.

II.3.1.6 Effet bénéfique de nanofeuillets de MoS₂ sur la résistance à l'usure et la stabilité thermique des composites des polyimides :

Dans cette étude[17], les nanofeuillets de MoS₂ ont été évalués en tant qu'additif lubrifiant pour les composites de polyimides, la Figure II-13 présente le taux d'usure du polyimide (PI) et de ses composites contenant différentes quantités de nanofeuillets de MoS₂. Il est remarquable que tous les composites PI-MoS₂ présentent un taux d'usure inférieure à celui du PI pur. En particulier le composite PI-7% en poids de MoS₂ affiche le taux d'usure le plus faible, réduit de 88% par rapport au PI pur, ce qui indique une résistance à l'usure supérieure. Lorsque la quantité de nanofeuillets de MoS₂ dépasse 7% en poids, le taux d'usure augmente légèrement mais reste inférieure à celui du PI pur.

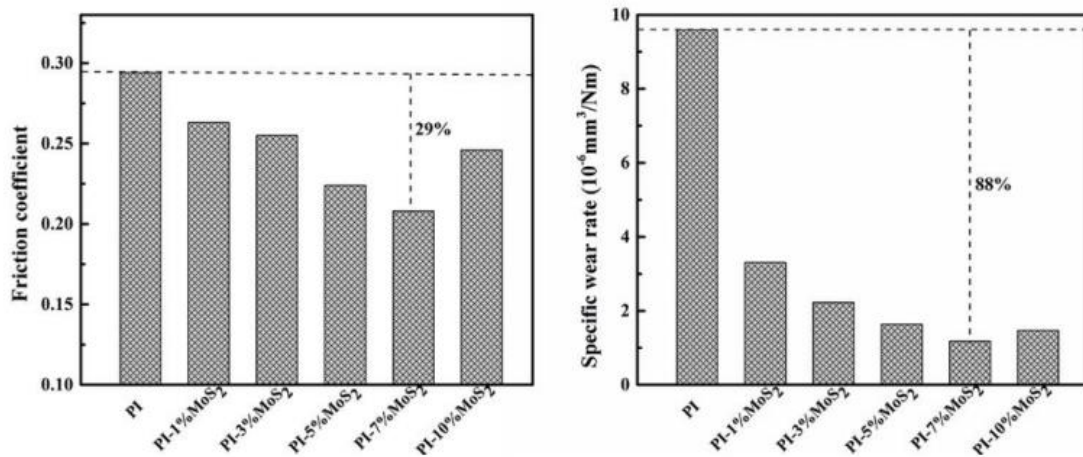


Figure II-13: Propriétés de frottement et d'usure des composites PI avec divers nano feuillets de MoS₂[17]

Ce phénomène pourrait être attribué à la stabilité thermique des composites. Pendant le processus de glissement à sec, une quantité importante de chaleur de frottement est générée, et en l'absence de lubrifiant, cette chaleur ne peut pas être dissipée. Par conséquent, la chaleur de frottement provoque une détérioration excessive des composites et des propriétés tribologiques médiocres. Une bonne stabilité thermique est donc essentielle pour protéger les composites contre les effets néfastes des températures élevées lors des processus de frottement et d'usure. Le composite PI-7% en poids de MoS₂ démontre une stabilité thermique satisfaisante, ce qui contribue à ses bonnes propriétés tribologiques.

II.4 PTFE :

Le PTFE est un matériau synthétique connu par sa résistance chimique exceptionnel, son faible frottement et son excellente résistance à température élevées. Il est composé de chaînes de polymères contenant des atomes de carbone et de fluor. Le PTFE est également connu sous le nom de téflon.

II.4.1 Caractéristiques :

- **Resistance chimique :** le PTFE est très résistant aux attaques chimiques, y compris aux acides, aux bases et aux solvants. Il ne réagit pas avec la plupart des substances chimiques, ce qui en fait un matériau très utilisé dans les applications nécessitant une résistance chimique élevée.

- Résistance à la chaleur : le PTFE peut résister à des températures élevées, allant jusqu'à 260°C, et même plus pour de courtes périodes.
- Faible coefficient de frottement : le PTFE possède un coefficient de frottement extrêmement bas, ce qui le rend utile dans les applications nécessitant une lubrification solide et une réduction de l'usure.
- Isolant électrique : il est un excellent isolant électrique ce qui le rend utile dans les applications nécessitant des propriétés diélectriques élevées
- Non adhérent : il a une surface antiadhésive, ce qui le rend approprié pour les revêtements antiadhésifs utilisés dans les ustensiles de cuisine.

II.4.2 Domaine d'utilisation :

- Revêtements antiadhésifs : poêles, casseroles et autres ustensiles de cuisine.
- Joints d'étanchéité : joints toriques, joints plats, joints d'étanchéité pour les liquides et les gaz dans les industries chimiques.
- Revêtements résistants à la corrosion : cuves de stockage chimique, tuyaux et équipements de traitement chimique.
- Isolant électriques : Câbles, fils et connecteurs électriques.
- Applications médicales : prothèses, cathéters et autres dispositifs médicaux nécessitant une compatibilité chimique et une biocompatibilité élevées.

II.4.3 Effet de la charge normale sur le coefficient du frottement et taux d'usure :

II.4.3.1 Sur le coefficient du frottement :

Dans cette étude [18], une comparaison de la variation du coefficient de frottement avec une charge normale pour différents matériaux a été discutée. Les taux d'usure de différents matériaux sont également comparés. Les résultats de la Figure II-14 montrent que le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la charge normale pour le PTFE.

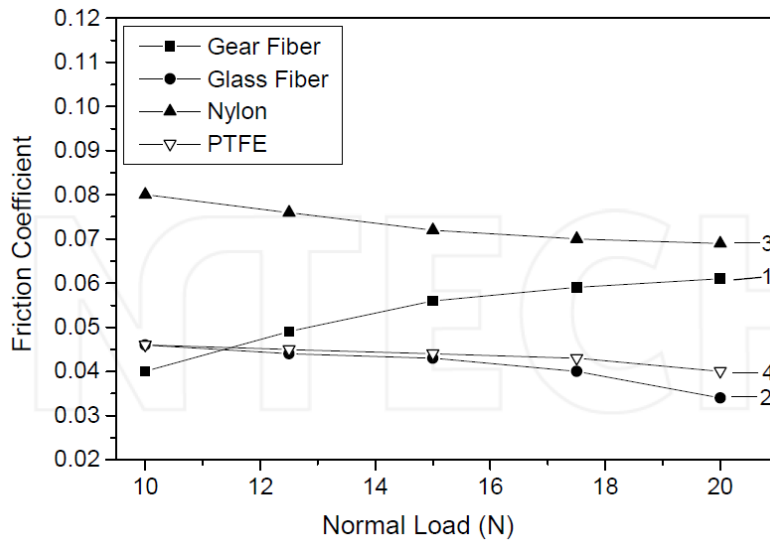


Figure II-14: Coefficient de frottement en fonction de la charge normale pour différents matériaux[18]

II.4.3.2 Sur le taux d'usure :

La Figure II-15 montre également la comparaison de la variation du taux d'usure avec une charge normale de différents matériaux. L'étude montre que le taux d'usure du PTFE augmente avec l'augmentation de la charge normale.

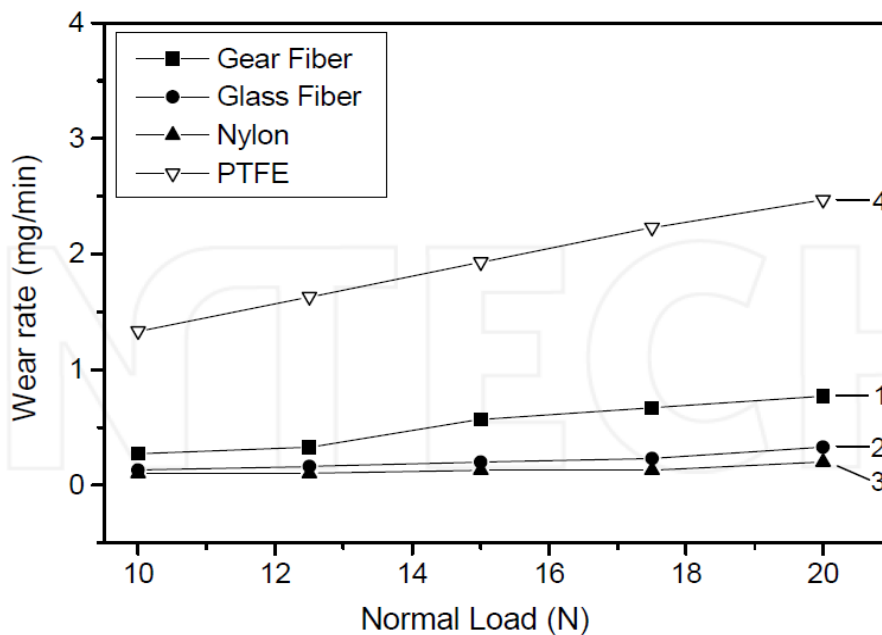


Figure II-15: Taux d'usure en fonction de la charge normale pour différents matériaux[18]

II.4.4 Effet de la vitesse de glissement sur le coefficient du frottement et le taux d'usure

II.4.4.1 Sur le coefficient du frottement :

Dans les contacts glissants, la vitesse de glissement a un rôle important sur le coefficient du frottement et l'usure de différents matériaux polymère et composites[18]. La Figure II-16 montre la comparaison de la variation du coefficient de frottement avec la vitesse de glissement pour différents matériaux. Les résultats montrent que le coefficient de frottement augmente presque linéairement avec la vitesse de glissement. Les résultats révèlent également que le PTFE présente le coefficient de frottement le plus faible parmi ces quatre matériaux, sauf à une vitesse de glissement de 1 m/s.

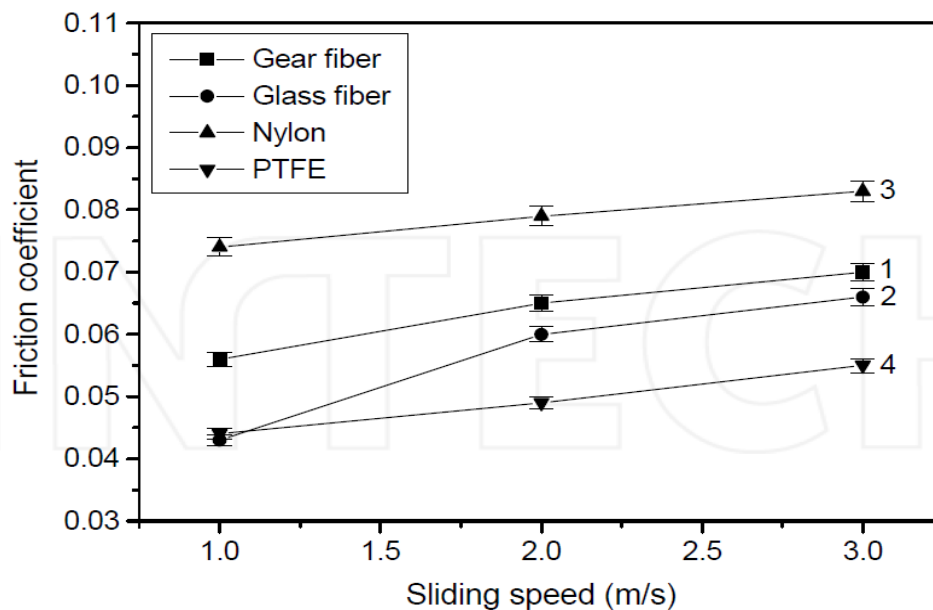


Figure II-16: Coefficient de frottement en fonction de la vitesse de glissement pour différents matériaux[18]

II.4.4.2 Sur le taux d'usure :

La poussée de frottement augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement et ces incréments accélèrent le taux d'usure. La Figure II-17 montre également la comparaison de la variation du taux d'usure avec la vitesse de glissement pour la fibre d'engrenage, la fibre de verre, le nylon et le PTFE.

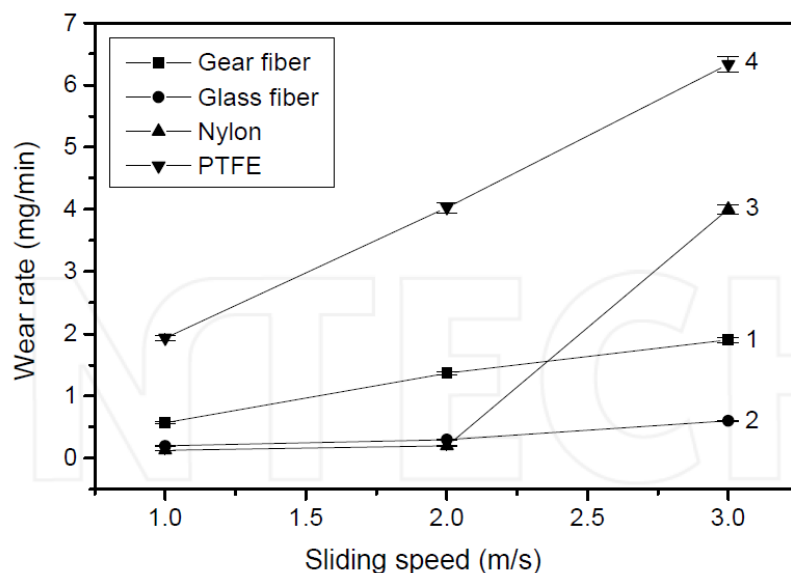


Figure II-17: Taux d'usure en fonction de la vitesse de glissement pour différents matériaux[18]

A partir de cette figure, on observe que le PTFE a le taux d'usure le plus élevé parmi ces quatre matériaux dans la plage observée de vitesse de glissement.

II.4.5 Conductivité thermique de PTFE

La bonne conductivité thermique est importante en tribologie, car elle permet l'évacuation de la température générée par le frottement. Sachant que la conductivité thermique des polymères est assez médiocre en le comparant à celles des métaux. Dans cette optique plusieurs études ont été menées pour améliorer la conductivité de PTFE. Une analyse effectuée par Jin Zunlong et all, où un modèle de prédiction de la conductivité thermique des composites de PTFE renforcés de fibres de carbone est introduit. Les résultats du modèle de prédiction concordent bien avec les données expérimentales. Un compromis entre les fractions volumiques est de 17,76 et 10% pour les particules de graphite et les fibres de carbone, respectivement[19].

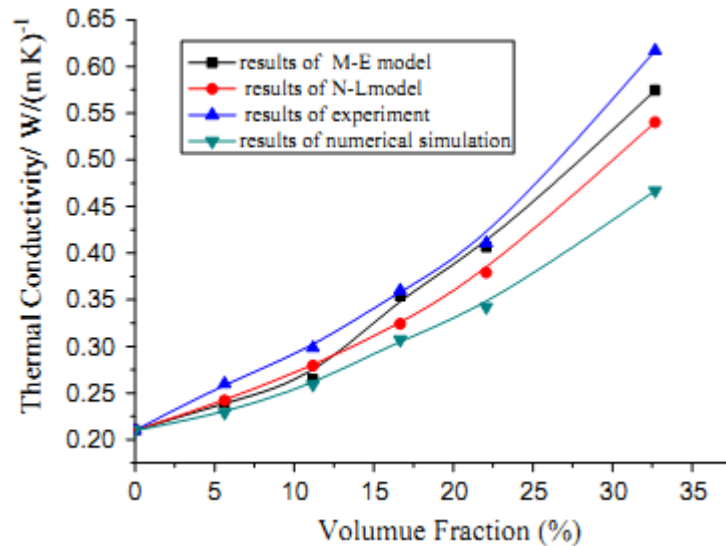


Figure II-18: Résultats de la simulation numérique comparés à ceux de l'expérience et d'autres modèles de prédiction[19]

II.4.6 L'influence de la fraction volumique des fibres de carbone sur la conductivité thermique d'un composite de PTFE :

Z.Jin et Al [19] ont analysé la conductivité thermique d'un composite de PTFE en étudiant l'impact de l'augmentation de la fraction volumique des fibres de carbone. Pour cela, des expériences ont été menées pour déterminer si cette augmentation influence positivement ou non sur la conductivité thermique du composite en PTFE.

Les résultats de cette étude (Figure II-19), montre que la conductivité des composites de PTFE s'est améliorée avec l'augmentation de la fraction volumique des fibres de carbone, ce qui peut être attribué à sa conductivité thermique élevée. Lorsque des fibres de carbone sont ajoutées dans les composites, la structure fibreuse peut être liée au graphite dans la matrice pour former un réseau de conductivité thermique. Plus de fibres de carbone signifie plus de liens de réseaux de conductivité thermique dans la matrice, ce qui améliore la conductivité thermique des composites PTFE.

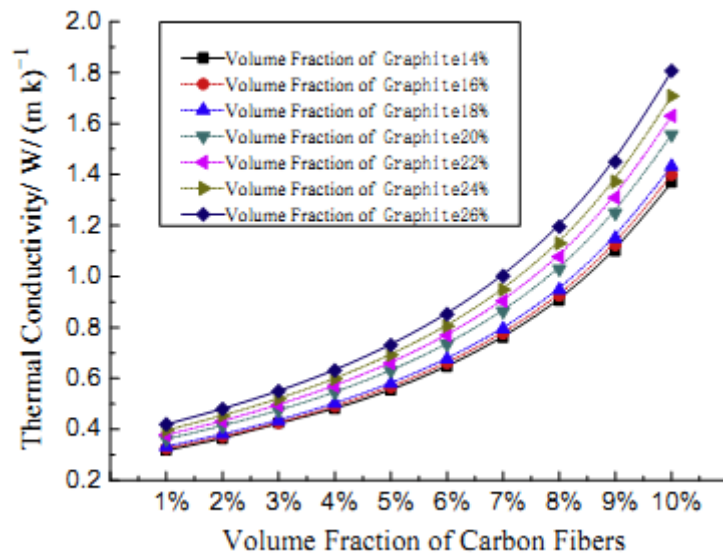


Figure II-19: Conductivité thermique des composites en PTFE[19]

II.4.7 Amélioration des propriétés tribologiques du PTFE :

Une analyse comparative de sept composites de PTFE[9], est présentée montrant comment les propriétés de PTFE peuvent être améliorées même si la caractéristique la plus attrayante de faible frottement est perdue en raison de la présence de particules dures dans la matrice polymère.

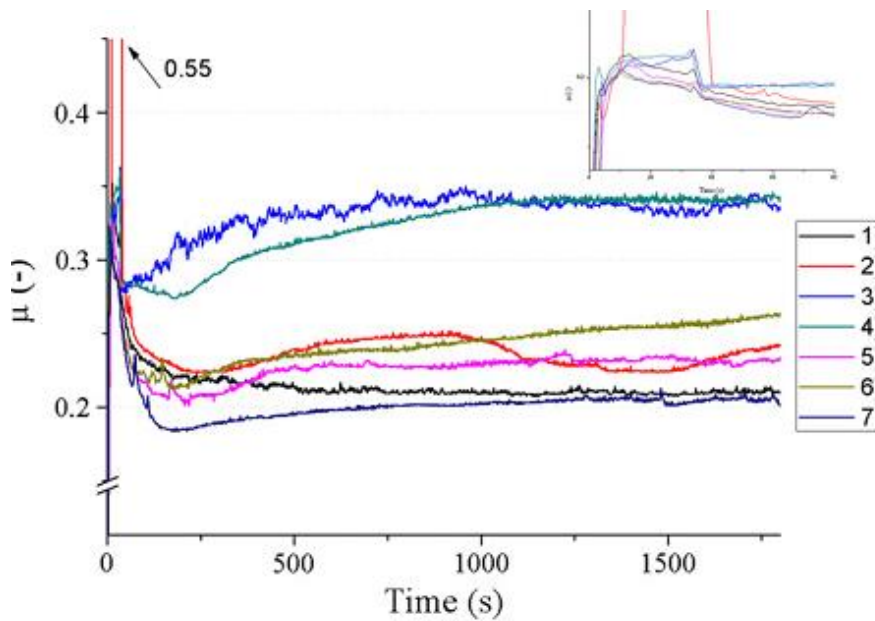


Figure II-20: Comportement en frottement des composite PTFE[9]

La manière dont l'utilisation de phases douces et dures dans une matrice polymère améliore les propriétés autolubrifiantes et les propriétés de charge de la matrice qui impriment les propriétés tribologiques du PTFE est présentée.

La Figure II-20 présente l'évolution des coefficients de frottement sur la distance. Au régime, la formation d'un film de transfert à haute cristallinité sur les contreparties provoque le coefficient de frottement relativement stable dans le processus de glissement même en présence des charges.

Il est bien connu que la nature autolubrifiante du PTFE provient de la faible énergie d'activation pour le mouvement de liaisons moléculaires du PTFE. Dans la plage de température de 30 à 90°C, facilement atteinte lors d'un évènement de frottement, le PTFE se rompt le long des liaisons intermoléculaires en raison de la légère élévation de température qui implique le glissement des formations cristallines de la structure de liaison.

II.4.8 Etude du comportement tribologique des composites de PTFE remplis de particules métalliques :

Le comportement tribologique des composite de PTFE remplis de diverses particules métalliques ont été étudiées dans les conditions extrêmes de frottement d'une charge lourde et d'un mouvement alternatif de faible amplitude[20].

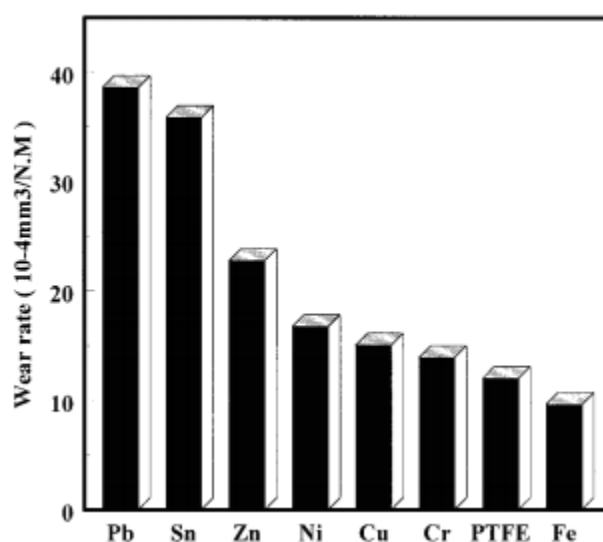


Figure II-21: Les taux d'usure du PTFE et des composites PTFE remplis de diverses charges métalliques[20]

Deux stades de frottement évidemment distincts correspondant aux conditions de contact ont été trouvés. Les phénomènes d'accumulation de charges sur la surface de contact et d'usure à l'extrusion de la matrice PTFE ont également été observés. Sur la base des résultats expérimentaux, les actions des charges métalliques sur la formation du film de transferts ont été analysées. Il a été noté que le transfert et l'accumulation de charges pouvaient en fait être considérés comme un processus d'assimilation des paires de frottement.

II.4.9 Etude comparative des courbes de frottement du PTFE pur et ses composites :

Les graphiques présentés dans la Figure II-22 illustrent les courbes de frottement typiques du PTFE pur et de ses composites tels que le composite Cu-PTFE [20]. On remarque que le coefficient de frottement du PTFE pur reste relativement stable, avoisinant 0,15. En revanche, pour les composites contenant des particules métalliques, on observe deux phases de frottement. Pendant la première phase stable, qui peut être assez courte (environ 10 secondes), les coefficients de frottement des composites PTFE sont généralement aussi bas que 0,15, similaire à ceux du PTFE pur.

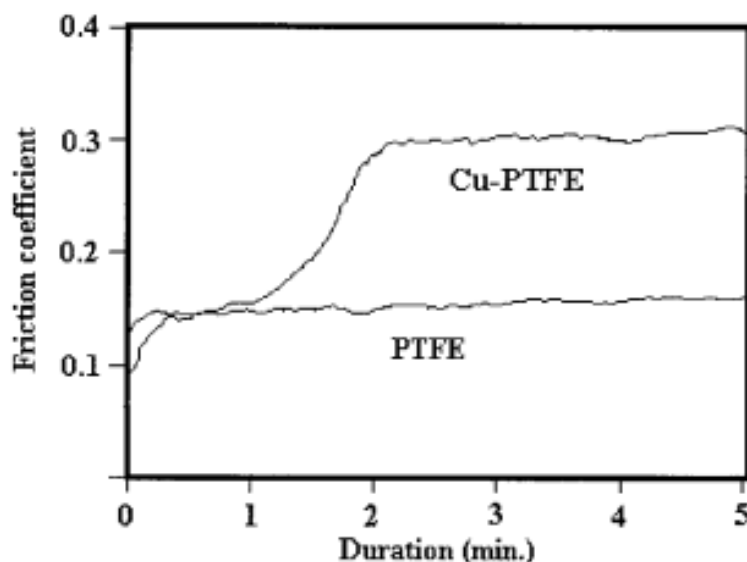


Figure II-22: Les courbes de frottement typiques des composites PTFE et Cu-PTFE[20]

Cependant, lors de la deuxième phase, les coefficients de frottement des composites augmentent pour atteindre des valeurs plus élevées, allant de 0,25 à 0,32. Ce changement ne peut pas être attribué uniquement à l'usure des matériaux ou à la contrainte de contact, car le

même phénomène n'a pas été observé pour le PTFE pur. Une raison importante de ce phénomène est que le frottement progresse graduellement lorsque le polymère glisse contre l'acier, le composite glisse contre l'acier ou le composite glisse contre un autre composite, et cela est transféré à la surface de contact si un film de transfert existe.

II.4.10 Etude sur l'utilisation d'additif à base de graphène pour réduire l'usure du PTFE

Cette étude[21] est basée sur l'utilisation d'additif à base de graphène pour réduire l'usure du PTFE. Les composites étudiés ont montré un taux d'usure extrêmement lent. La figure 23(b) permet de visualiser plus clairement la réponse de ces composites très résistants à l'usure, en élargissant l'échelle de l'axe du volume d'usure de la figure 23(a).

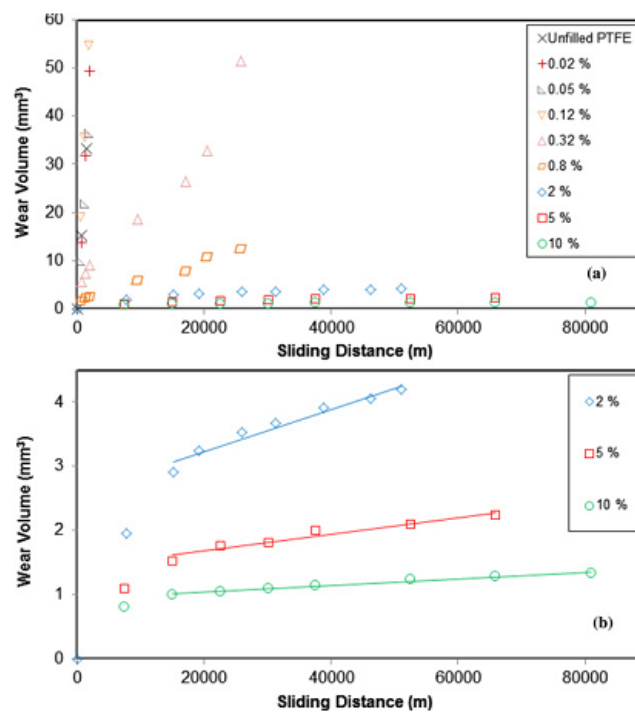


Figure II-23: : Volume d'usure en fonction de la distance de glissement pour le PTFE non chargé et pour le PTFE avec des teneurs variables[21]

Il est clairement observé dans la figure 23(b) que même les composites à faible usure à 2.5 et 10% en poids présentent initialement un comportement transitoire de taux d'usure plus élevé, pendant lequel ils accumulent quelque mm³ d'usure en volume. Après cette phase transitoire, ils passent à un comportement d'usure stable plus faible, indiqué par des lignes de tendance.

Le passage du comportement transitoire au comportement stable des composites de la figure 23(b) semble se produire dans les 7 à 15 premiers kilomètres de glissement.

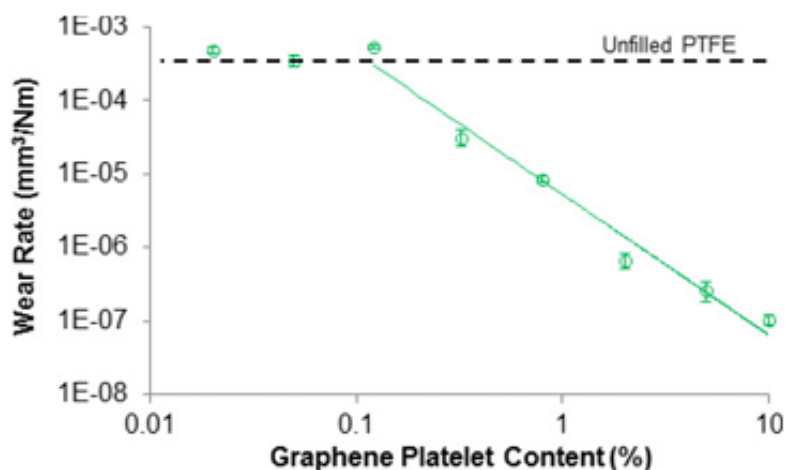


Figure II-24: Taux d'usure à l'état d'équilibre en fonction de la teneur en charge pour les composites plaquettes de graphène-PTFE[21]

Les résultats des Figure II-23(a) et 23(b) sont résumés dans la Figure II-24, qui présente les taux d'usure en régime permanent en fonction de la teneur en GPL. Bien qu'aucune réduction par rapport à la valeur de $0,4 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ du PTFE non chargé n'ait été observée dans les composites à 0,02, 0,05 et 0,12% en poids, des diminutions significatives ont été observées dans les composites à 0,32% en poids, affichant un taux d'usure de $0,3 \times 10^4 \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Les taux d'usure en régime permanent continuent de diminuer avec l'augmentation de la teneur en remplissage, et la capacité exceptionnelle de suppression de l'usure du GPL est évidente dans le composite à 10% en poids, affichant un taux d'usure extrêmement bas. Les résultats suggèrent que des taux d'usure encore plus bas peuvent être atteints avec des teneurs en graphène plus élevées que celles étudiées ici, car une diminution monotone se poursuit sans observer de minimum jusqu'à une charge de 10%.

II.4.11 Comparaison des effets du nano-PTFE et du micro-PTFE sur les propriétés tribologiques du POM modifié :

une étude [22] sur les propriétés technologiques d'un matériau appelé polyoxyméthylène (POM) modifié avec du nano-PTFE comparé à du POM modifié avec du micro-PTFE.

En comparant la Figure II-25 avec la Figure II-26, on observe que les composites POM/2% nano-PTFE et les composites POM/10% micro-PTFE présentent des coefficients de

frottement et des taux d'usure similaires. En revanche, ces valeurs sont nettement inférieures pour les composites POM/10% micro-PTFE. En d'autres termes, les nanoparticules se révèlent plus efficaces que les microparticules pour améliorer les propriétés tribologiques des composites POM.

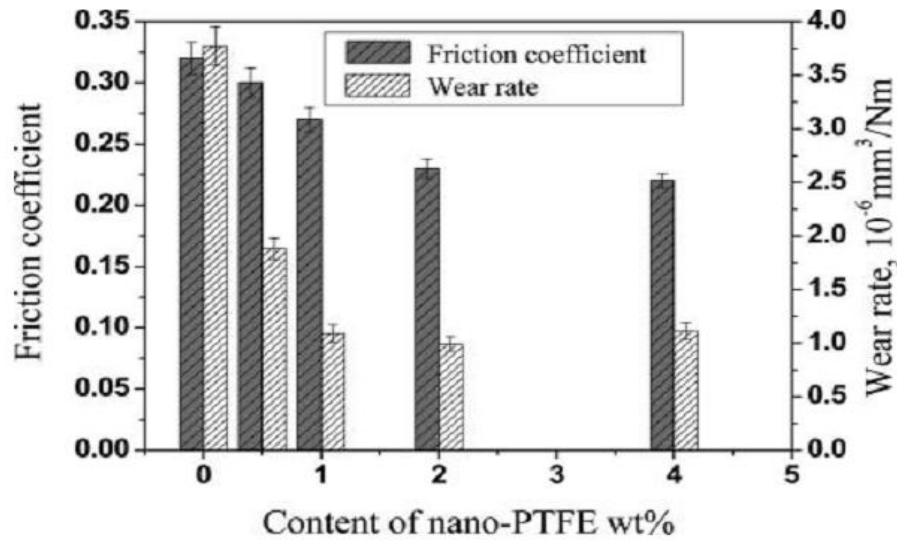


Figure II-25: Effet de la concentration de nano-PTFE sur le coefficient de frottement et le taux d'usure des composites POM/nano-PTFE[22]

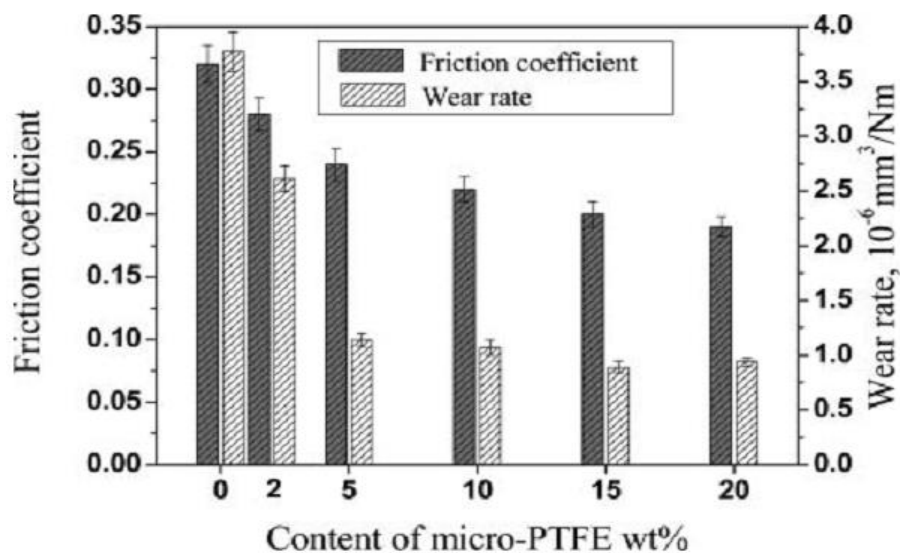


Figure II-26: Effet de la concentration de micro-PTFE sur le coefficient de frottement et le taux d'usure des composites POM/micro-PTFE[22]

Courbe de Stribeck :

La courbe de Stribeck est utilisée en tribologie pour expliquer l'évolution de certains phénomènes de lubrification, via les variations du coefficient de frottement, en fonction de divers paramètres pouvant caractériser, par exemple le démarrage d'un mécanisme abondamment lubrifié.

II.5 Contacts lubrifiés :

La lubrification concerne tous les contacts pour lesquels un film mince visqueux est intercalé entre deux corps solides en mouvement relatif. Les différents régimes de lubrification ont été présentés pour la première fois par Richard Stribeck dans le cas d'un palier lisse. La courbe de Stribeck représente la variation du coefficient de frottement d'un palier lubrifié en fonction de sa vitesse. Cette courbe montre plusieurs régimes de fonctionnement successifs (Figure II-27). Stribeck définit par la suite, un coefficient similitude pour permettre la généralisation de son modèle à tous type de contact lubrifiés.

$$Z = \mu u / W$$

- Z : le coefficient de similitude
- μ : la viscosité dynamique du lubrifiant
- u : la vitesse linéaire de l'arbre en rotation
- W : la charge radiale exercée sur l'arbre.

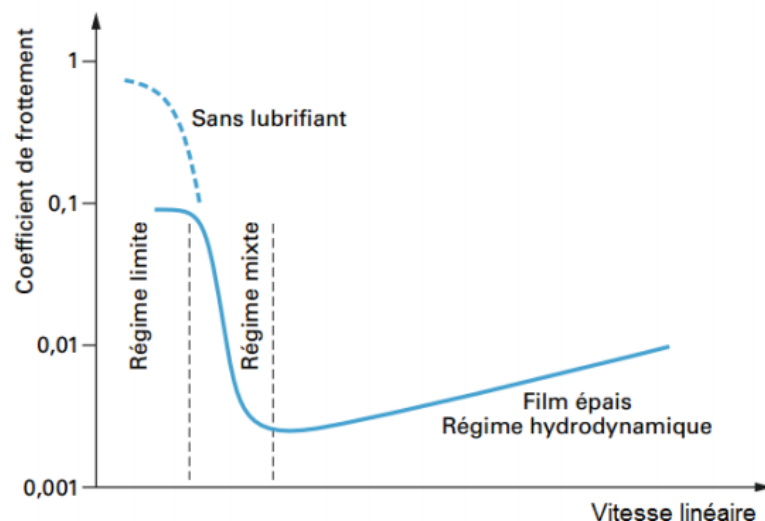


Figure II-27: Courbe du Stribeck

II.6 Conclusion :

En conclusion, l'incorporation de PTFE, MoS₂ et de graphite dans une matrice permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques, y compris le taux d'usure et le coefficient de frottement. Ces matériaux sont couramment utilisés comme additifs pour obtenir des performances optimales dans de nombreuses applications industrielles et mécaniques.

Chapitre III. **La partie expérimentale**

III.1 Introduction

Dans le cadre de notre travail actuel, nous avons effectué des essais visant à mesurer le coefficient de frottement du PTFE sur PTFE avec la variation de la charge et la vitesse de glissement. L'objectif de ces essais est de mieux comprendre les propriétés de frottement du PTFE, qui est un matériau très utilisé dans diverses industries.

Pour ce faire, nous utilisons un tribomètre de type pion-disque. Le tribomètre est équipé d'un capteur à jauges de contraintes, avec deux ponts de Wheatstone, pour mesurer simultanément et indépendamment la force normale et la force tangentielle ainsi que le coefficient de frottement pendant le processus d'usure.

III.2 Description du tribomètre

Le dispositif utilisé pour cette étude est un tribomètre à pion disque vertical. Ce tribomètre permet la mesure du frottement et de l'usure des couples de matériaux. Son principe de fonctionnement consiste à appliquer une charge verticale sur un pion immobile en contact avec la face plane d'un disque en rotation. Pendant les essais de frottements, une chaîne d'acquisition de donnée, doté de deux capteurs à jauges de contraintes, enregistre simultanément les valeurs de l'effort normal et de l'effort tangentiel.

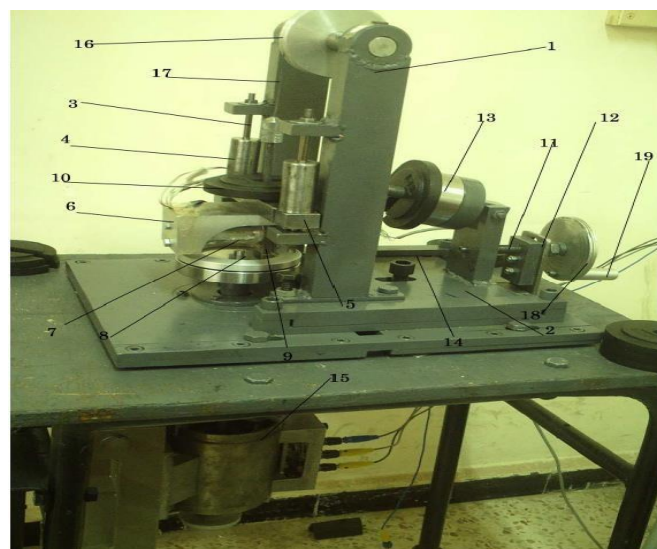


Figure III-1: Vue du tribomètre

Le tribomètre offre deux possibilités qui permettent la variation de la vitesse de glissement. La première possibilité consiste à modifier le rayon de la piste de glissement du pion sur le disque, et ce grâce à une plaque coulissante reliée au bâti (Figure III 1). La deuxième

possibilité est l'utilisation d'un variateur de vitesse électronique de type CHENT permettant d'atteindre des vitesses de rotation de manière plus exacte de la broche porte-disque. Où dernière est entraînée par un moteur électrique de 220Watt.

III.2.1 Nomenclature du banc :

1-Bâti,2- plaque coulissante, 3- axes, 4- bague de guidage, 5- poutre, 6- porte capteur,7- capteur de force, 8- disque, 9- Pion, 10- charge, 11- vis de manœuvre, 12- plaque, 13- masse morte, 14- liaison glissière, 15- moteur électrique, 16- poulie, 17- câbles, 18- volant,19- poignée

III.3 Réglage de la planéité

Le dispositif dispose également d'un système de réglage de planéité permettant ainsi d'éviter les vibrations pouvant abimer les courbes de frottement (Figure III-2 et Figure III-3).

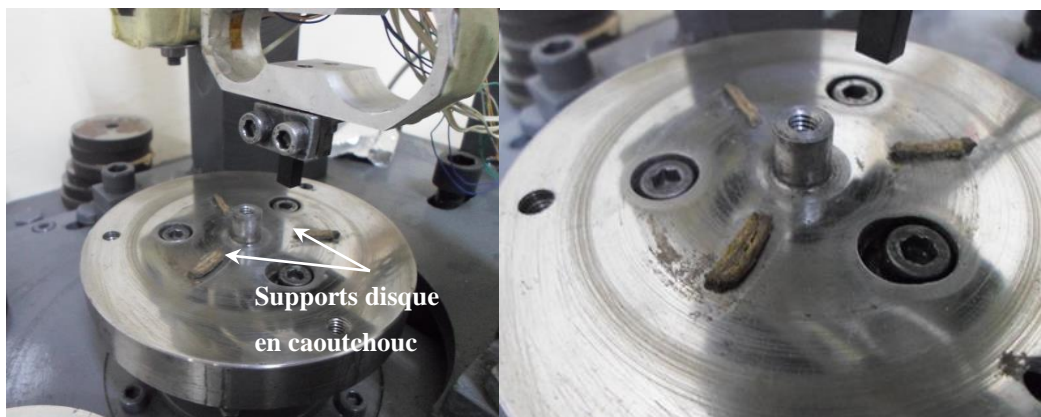


Figure III-2 : Supports disque pour réglage de planéité



Figure III-3: Réglage de la planéité du disque

Ce système permet aussi de protéger l'échantillon en minimisant les impacts de ce dernier sur le disque, ce qui permet d'éviter la rupture des échantillons.

III.4 Chaîne d'acquisition :

Une chaîne d'acquisition est un système électronique permettant d'exploiter une grandeur physique. Figure III-4 montre l'ensemble des éléments nécessaires à la "capture" des données (analogiques ou numériques) à leur transmission jusqu'au récepteur et à l'utilisateur (homme ou machine) des données capturées.

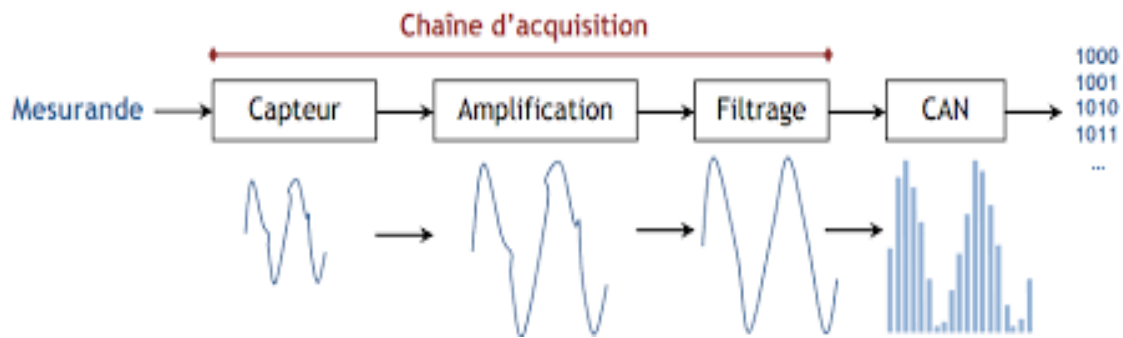


Figure III-4: Schéma de la chaîne d'acquisition d'une mesure

III.4.1 Capteur :

Un capteur de force est un dispositif qui permet de transformer une force reçue sur un objet en un signal électrique. Nous avons utilisé un capteur à jauge de contrainte pour mesurer simultanément et indépendamment la force normale et la force tangentielle pendant le processus d'usure. Le capteur est équipé de deux ponts de Wheatstone (Figure III-5).

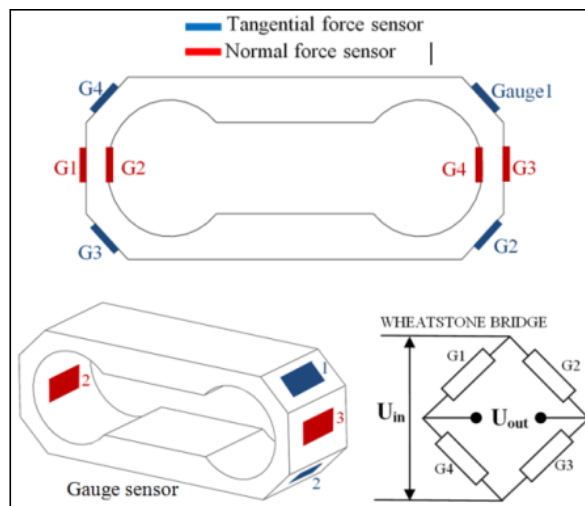


Figure III-5: Capteur équipé de deux ponts de Wheatstone

La conception du capteur de force permet de mesurer séparément la force normale et la force tangentielle. Les quatre jauges de contrainte (G1 G2 G3 G4) ne mesurent que la force normale, l'effet de la force tangentielle s'annule automatiquement grâce à l'alternance des signes dans la tension de sortie du pont de Wheatstone (équation 1). Il peut en être de même pour la mesure de la force tangentielle.

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

R : Résistance électrique de la jauge

III.4.2 La mise en place des jauges de contraintes :

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

Les instruments utilisés :

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

La jauge de contrainte (Figure III-6), qui est l'élément sensible du capteur, est composée d'une grille de mesure placée sur un support et recouverte d'une couche protectrice. Les jauges de contrainte sont fixées sur le corps d'épreuve aux endroits appropriés, généralement en utilisant quatre jauges disposées de sorte que deux soient étirées et deux soient comprimées lors de l'application de la force.

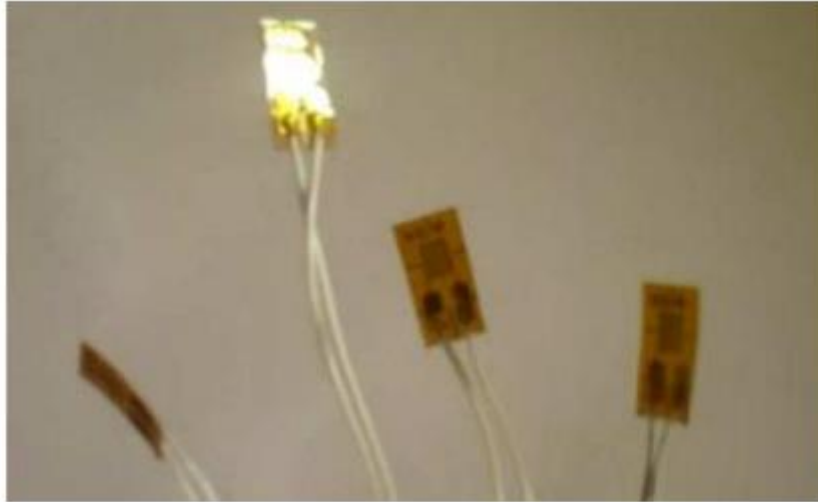


Figure III-6: Jauges de contraintes

Ces jauges sont connectées dans un montage appelé « pont de Wheatstone » qui nécessite une tension d'alimentation. La Figure III-7 montre le capteur utilisé dans la mesure des forces de frottement.

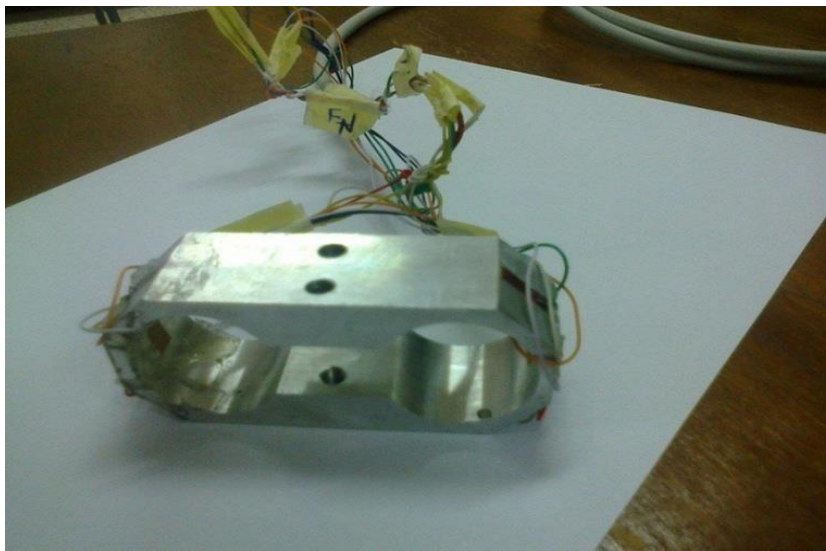


Figure III-7: Image du capteur utilisé lors des essais d'usure

III.4.3 Amplificateur

Il faut savoir que l'amplification (en tension ou en puissance) du signal électrique issu du capteur est un phénomène bruyant : elle s'accompagne d'une dégradation du rapport signal sur le bruit. Cela signifie que si l'amplitude du signal utile issue du capteur se trouve augmentée, les parasites (bruit) le sont également mais dans des proportions plus grandes

encore. Les amplificateurs sont caractérisés par un gain d'amplification (en tension ou en puissance) ratio du signal électrique de sortie de l'amplificateur sur le signal d'entrée, ainsi que par un facteur $F > 1$ qui quantifie la dégradation du rapport signal sur bruit entre l'entrée et la sortie.

III.4.4 Filtrage

Le filtrage peut avoir différentes applications. Il peut en particulier être pratiqué afin de réduire le bruit (signal parasite « large bande » ou haute fréquence) entachant le signal utile. Ainsi un filtrage passe-bas éliminera le bruit haute fréquence et produira un effet de lissage utile. Le filtrage lisse le signal de sortie pour restituer le signal utile.



Figure III-8: Image du conditionneur utilisé lors des tests tribologiques

III.4.5 Convertisseur analogique numérique (CAN) :

Un convertisseur analogique-numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique.

Les convertisseurs se présentent généralement sous forme de carte. Il existe plusieurs sortes de convertisseurs de différentes marques. Celui qu'on a utilisé pour traiter et analyser nos résultats est la carte « ARDOUINO uno ».

L'Arduino (Figure III-9) est une famille de cartes électroniques à microcontrôleur open-source née en Italie en 2005. C'est un circuit imprimé comportant tous les composants électroniques nécessaires pour faire fonctionner un microcontrôleur, il est associé à une interface USB lui permettant de communiquer avec un ordinateur.

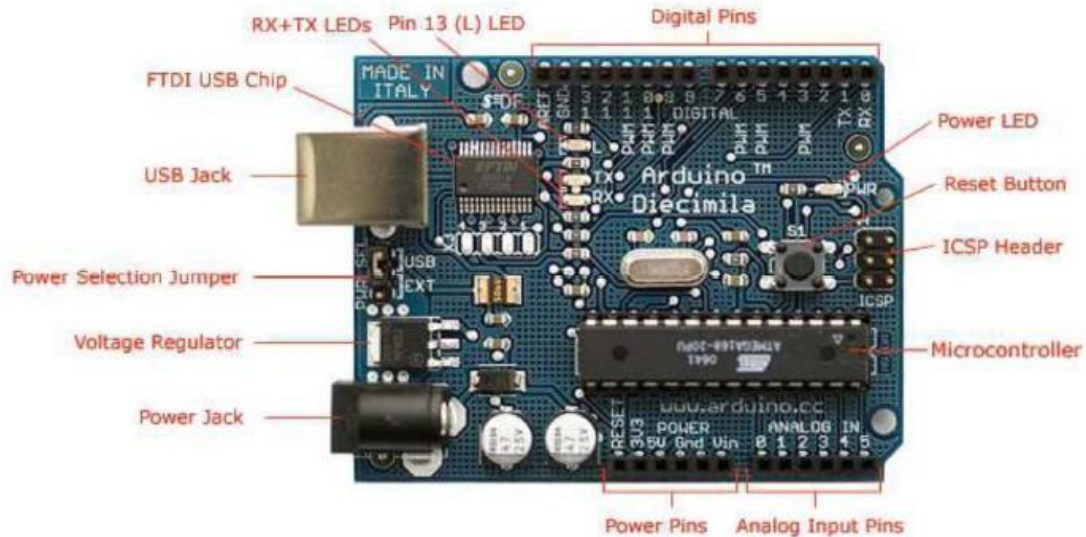


Figure III-9: Carte ARDUINO

Un microcontrôleur est équipé de différentes mémoires, d'interfaces pour la communication externe et d'une horloge pour synchroniser les opérations. Il peut être alimenté par le port USB ou une alimentation externe fournissant 5V. L'Arduino est une plateforme permettant la construction d'objet interactif indépendant grâce à un prototypage rapide, ou pouvant être connectée à un ordinateur pour la communication et la supervision via des logiciels de programmation comme labview.

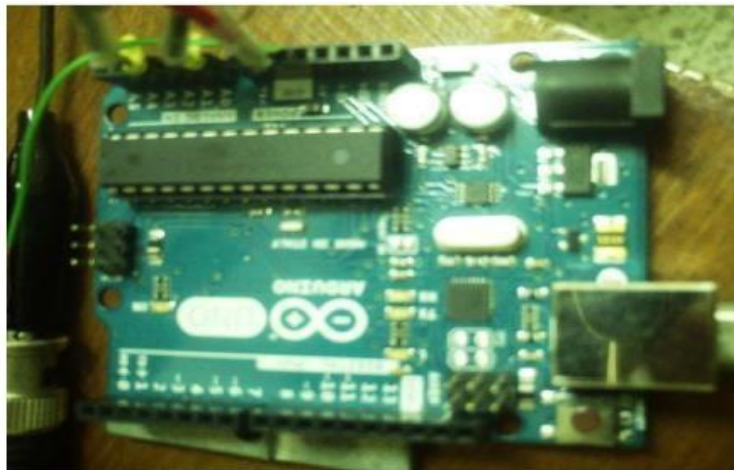


Figure III-10: Représentation de la carte ARDUINO

Dans le cadre de nos essais tribologiques, nous avons utilisé une carte Arduino pour assurer la liaison entre la chaîne d'acquisition et l'ordinateur pour collecter les données. Cette carte dispose de 14 broches qui peuvent être configurées en entrées ou en sorties digitales, capables de délivrer une intensité maximale de 40Ma à une tension de 0V ou 5V. Elle possède

également 6 entrées analogiques permettant de mesurer des tensions allant de 0V à 5V, grâce à un convertisseur A/N de 10 bits.

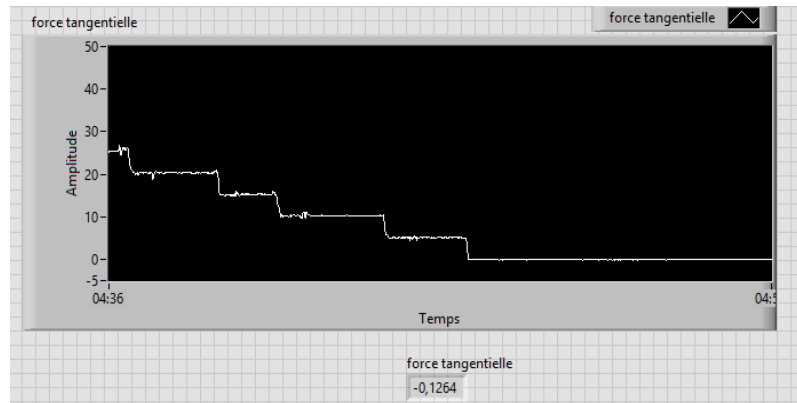


Figure III-11: signal obtenu sur le logiciel Labview

La lecture et l'enregistrement des résultats lors des essais de frottement ont été effectués sur le logiciel Labview. La Figure III 11 montre une représentation visuelle en temps réel.

III.4.6 Etalonnage du capteur de l'effort tangentiel

L'étalonnage du capteur de l'effort tangentiel revêt une grande importance car il garantit la fiabilité et l'exactitude des données recueillies lors des expériences tribologiques.



Figure III-12: Opération d'étalonnage

Cela permet d'éliminer les éventuelles erreurs systématiques liées aux capteurs de force et de s'assurer que les mesures obtenues sont cohérentes et reproductibles. Il convient de noter que l'étalonnage de l'effort tangentiel a été réalisé avant de commencer les tests tribologiques (Figure III-12)

Afin de déterminer la valeur d'étalonnage, nous avons effectué le calcul de la tangente de la courbe de la charge appliquée en fonction de la tension de sortie du capteur.

$$\tan \alpha = \frac{\text{la charge}}{\text{la tension}}$$

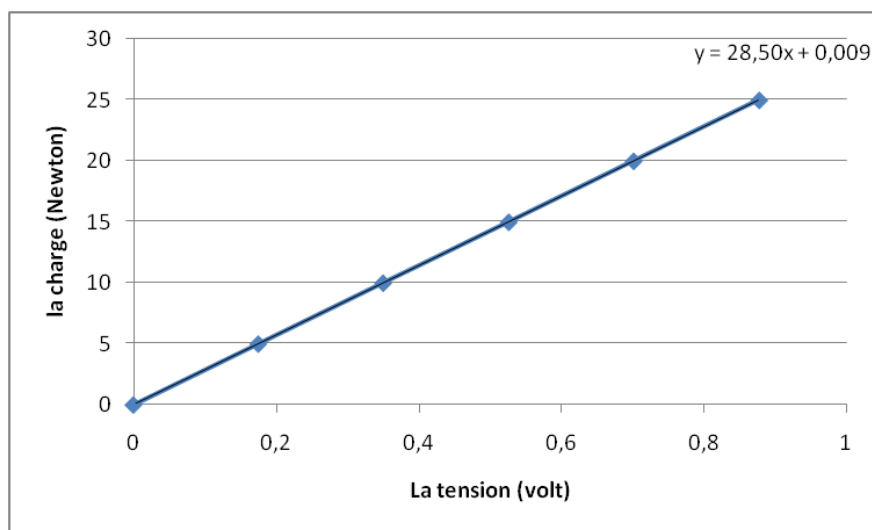


Figure III-13: Représentation du signal de sortie en fonction de l'effort tangentiel

Après nos calculs, nous avons obtenu une valeur de 28,5 pour cette tangente. Par conséquent la charge peut être déterminée comme suit :

$$\text{La charge (N)} = \tan \alpha * \text{la tension (Volt)}$$

La courbe d'étalonnage des forces tangentielles obtenues présente une tendance linéaire claire. Les résultats obtenus lors de l'étalonnage du capteur ont montré un comportement linéaire. Ce phénomène indique que les mesures sont précises et cohérentes lors des phases de charge et de décharge.

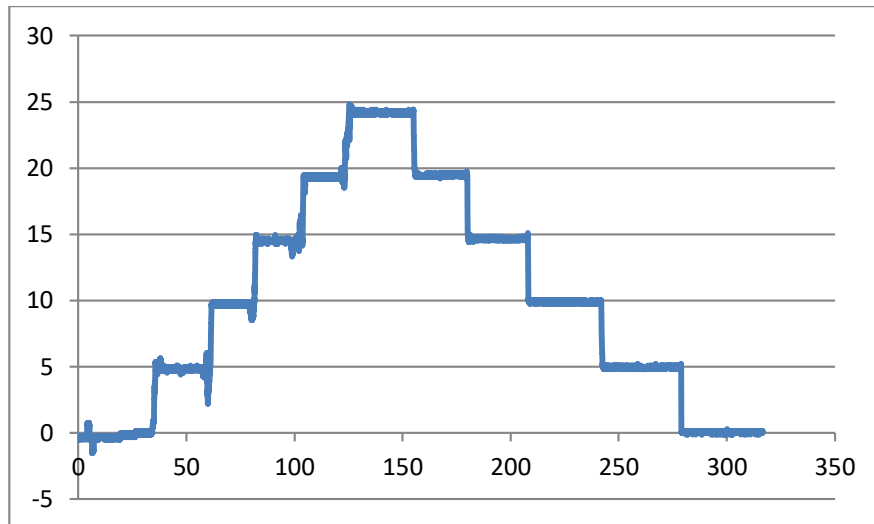


Figure III-14: Courbe d'étalonnage de l'effort tangentiel

La Figure III-14 montre la fiabilité du capteur où la nature discrète des mesures en charge-décharge suggère une résolution élevée du capteur utilisé.

III.5 Matériaux utilisés

III.5.1 Disques et pions

Dans le cadre de cette étude, des échantillons en polytétrafluoroéthylène (PTFE) ont été découpés pour des tests expérimentaux. Les disques (Figure III-15), de diamètre 60 mm et d'épaisseur 8mm en PTFE obtenus par tournage à partir de ronds.



Figure III-15: Opération du perçage sur les disques

Ensuite, nous avons effectué une opération de perçage sur les disques avec un foret de 10 mm de diamètre pour obtenir la forme des disques comme montré sur la Figure III-16.



Figure III-16: Disques réalisés

Les pions (Figure III-17) obtenus à partir de plaques en PTFE découpées et fraisées sous forme parallélépipédique de section carrée 6x6 mm² et de longueur 17mm.

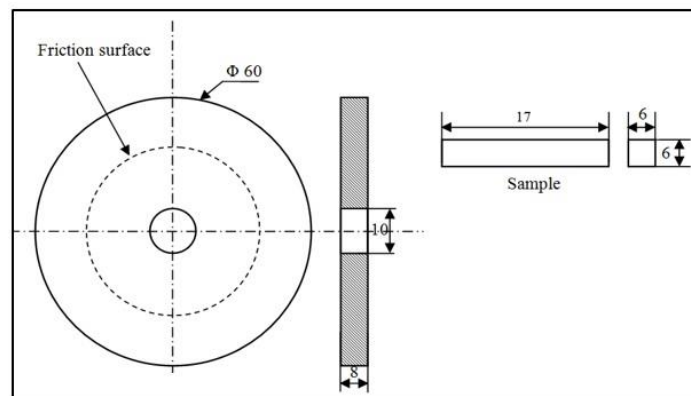


Figure III-17: Formes et dimensions des pions et des disques

III.6 Tests tribologiques

Les essais sont effectués à température ambiante dans des conditions de charges et de vitesses de glissement à sec. 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 $F_T(t) / F_N(t)$.

A partir des données de l'effort normal et tangential, la relation d'Amontons (2) permet le calcul et la visualisation du coefficient de frottement en fonction du temps directement sur le graphe.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \tag{2}$$

III.6.1 Mesure du coefficient du frottement

La mesure du coefficient du frottement a été effectuée sur une gamme de vitesses allant de 0,5 m/s à 1,5 m/s et une plage de pression allant de 0,5MPa à 3MPa à différentes combinaisons comme le montre Tableau III-1.

Tableau III-1 : Ensemble des vitesses et des pressions appliquées durant les tests

Pression (MPa)	0.5			1			2			3		
Vitesse (m/s)	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5

Pour mener à bien notre travail et obtenir des résultats fiables, nous avons réalisé une série d'essais en variant ces deux paramètres, tout en effectuant trois tests de frottement pour chaque variante (vitesses et pressions) durant 30 minutes.

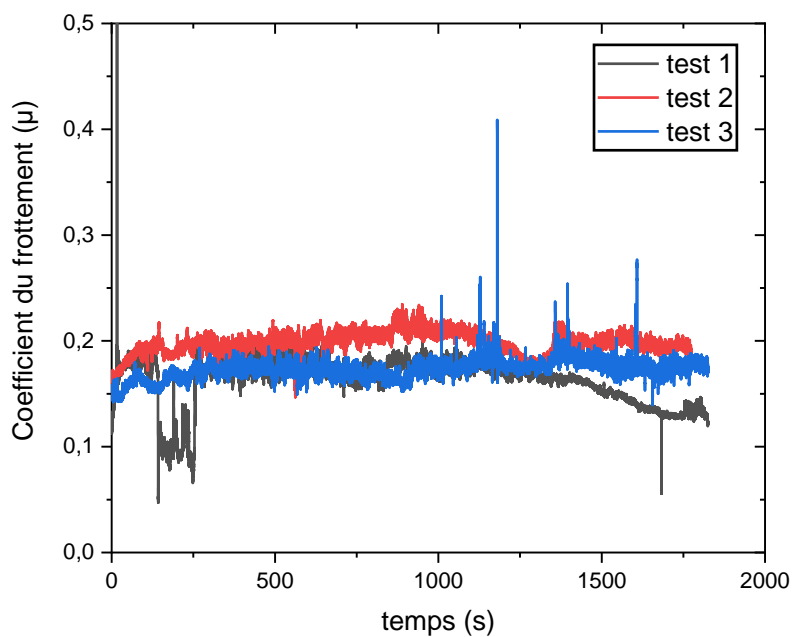


Figure III-18: Comparaison de trois test de même variété (1MPa 1m/s)

Les courbes de la Figure III-18 sont tracées à l'aide du logiciel originLab. Elles illustrent la proximité des résultats des trois essais réalisés avec les mêmes paramètres (1MPa et 1m/s).

Les courbes de la Figure III-19 illustrent la proximité des résultats des trois essais réalisés avec les mêmes paramètres (3MPa et 1,5m/s) où le pion et le disque ont subi une déformation.

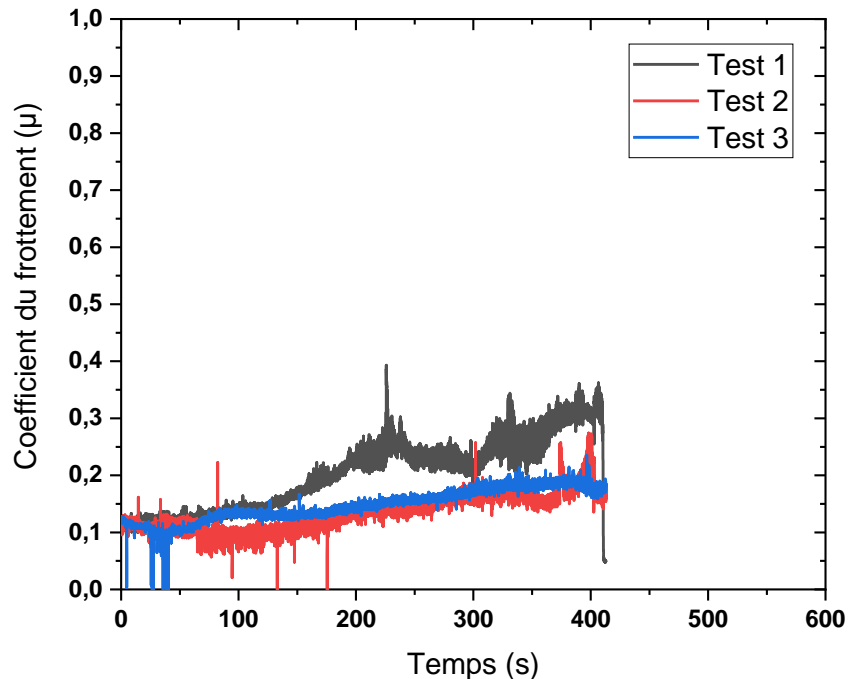


Figure III-19: Comparaison de trois test de même variété (3MPa 1,5m/s)

Pour une meilleure visualisation des résultats, nous avons tracé la courbe de tendance de moyenne mobile pour chaque courbe du coefficient de frottement, ce tracé utilise un nombre spécifique de points de données (définies par l'option Période), utilise la valeur moyenne comme point de la courbe de tendance. Les courbes (Figure III-20 et Figure III-21) illustrent deux situations : l'une sans traitement sur originLab et l'autre est le tracé la courbe de tendance de moyenne mobile respectivement.

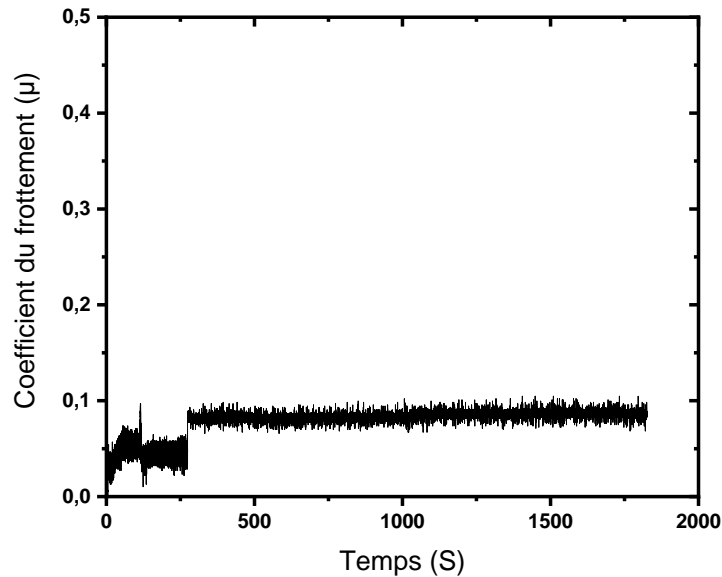


Figure III-20: Image sans traitement sur originLab

Nous remarquons que la courbe traitée (Figure III-21) est nette et permet de lire facilement la valeur du coefficient du frottement, contrairement à la courbe non traitée (Figure III-20), le coefficient du frottement varie entre deux valeurs différentes.

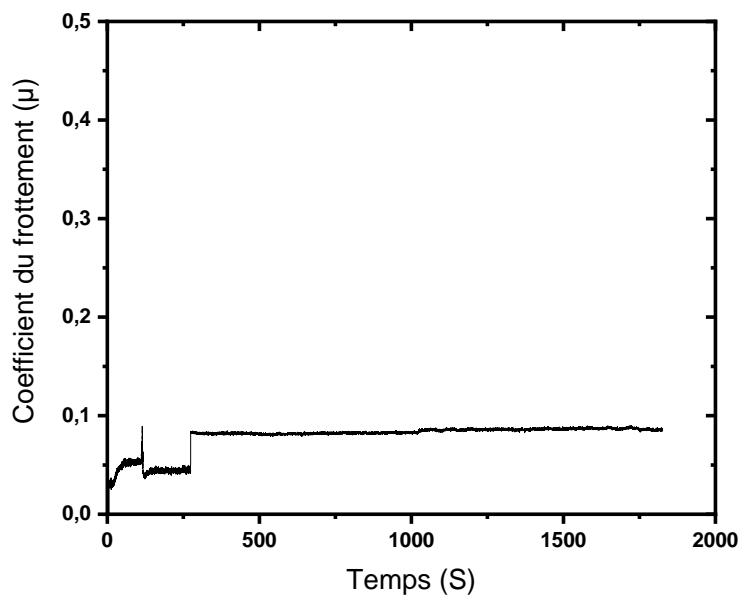


Figure III-21: Image avec traitement sur originLab (moyenne mobile)

III.6.1.1 Tests tribologiques à $V=0,5m /set$ $P=0,5 MPa$:

En appliquant une charge de 0,5 m/s et une force normale de 0,5MPa sur le couple glissant PTFE/PTFE, les résultats obtenus ont révélé que le pion n'a montré aucun signe

d'enfoncement dans le disque, et le disque lui-même n'a subi aucune déformation significative.

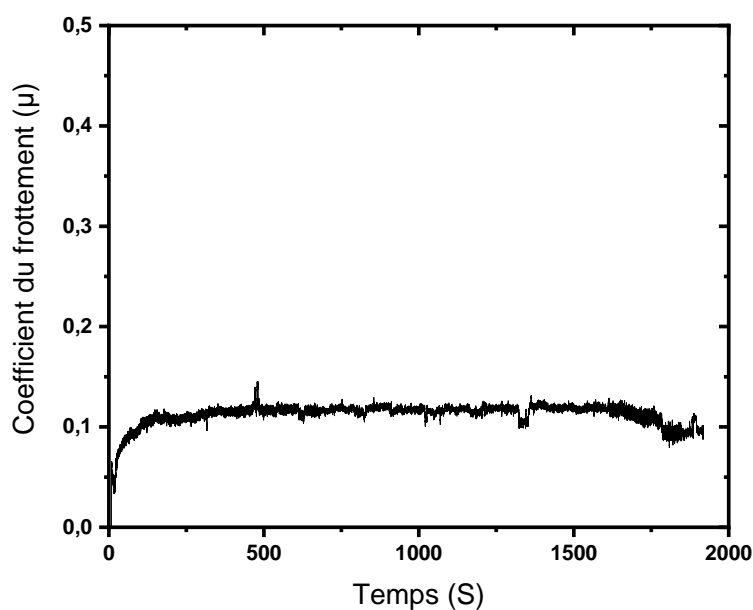


Figure III-22: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{ m/s}$ et $P=0,5\text{ MPa}$

III.6.1.2 Tests tribologiques à $V=0,5\text{ m/s}$ et $P=1\text{ MPa}$

Dans une autre série de tests, nous avons augmenté la charge normale à 1 MPa tout en maintenant la vitesse de glissement à 0.5 m/s.

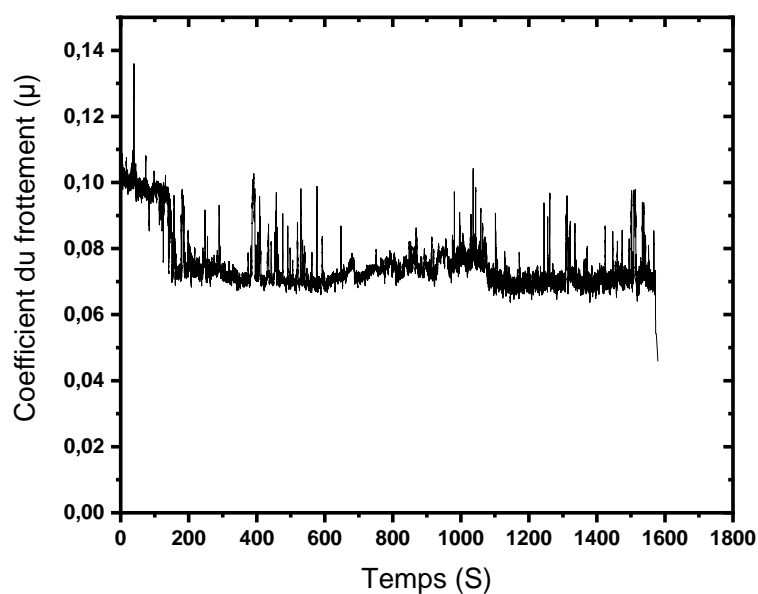


Figure III-23: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{ m/s}$ et $P=1\text{ MPa}$

Les résultats ont montré une légère augmentation du coefficient de frottement par rapport au test précédent. Cependant, malgré cette augmentation légère du coefficient de frottement, le disque n'a toujours pas subi de déformation notable et le pion n'a montré aucun signe de creusement.

III.6.1.3 Tests tribologiques à $V=0,5$ m/s et $P=2$ MPa

Dans ce test, nous avons augmenté la charge appliquée à 2MPa, en gardant la même vitesse de glissement, malgré l'augmentation du paramètre de l'effort normale, le pion n'a montré aucun signe de creusement, et le disque n'a subi aucune déformation.

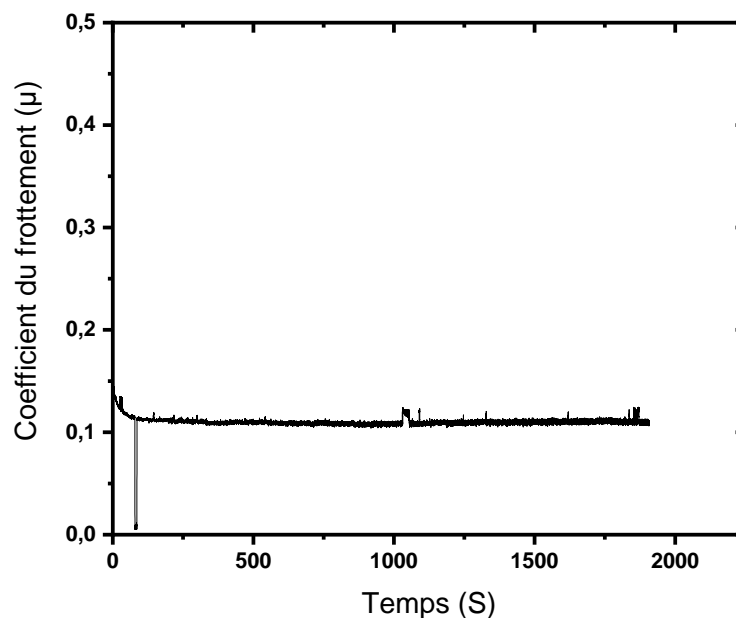


Figure III-24: Coefficient de frottement avec $V=0,5$ m/s et $P=2$ MPa

III.6.1.4 Tests tribologiques à $V=0,5$ m/s et $P=3$ MPa

Lorsque la vitesse de 0,5 m/s est appliquée avec la charge de 3MPa, les résultats ont indiqué que le pion n'a toujours pas présenté aucune indication de creusement dans le disque.

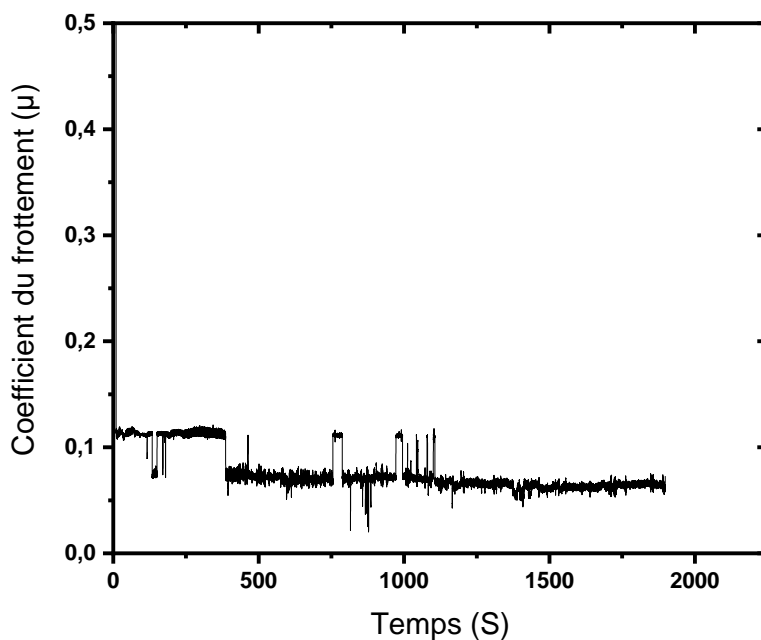


Figure III-25: Coefficient de frottement avec $V=0,5\text{m/s}$ et $P=3\text{MPa}$

III.6.1.5 Tests tribologiques à $V=1\text{ m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

Dans cette expérience, nous avons augmenté la vitesse de glissement à 1m/s avec une pression de $0,5\text{MPa}$. Pendant toute la durée de l'expérience, le coefficient de frottement est resté stable. De plus aucun signe de creusement n'a été remarqué.

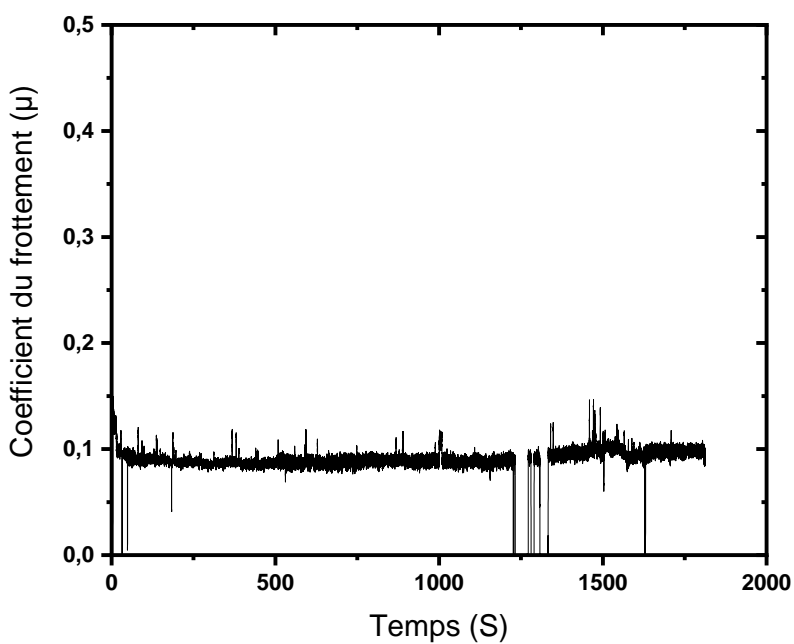


Figure III-26: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

III.6.1.6 Tests tribologiques à $V=1\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$

En appliquant une vitesse de 1m/s et une charge de 1MPa , nous constatons que le coefficient de frottement varie entre $0,1$ et $0,2$. Dans ces conditions, le pion a montré un signe de creusement dans le disque et le disque a subi une déformation.

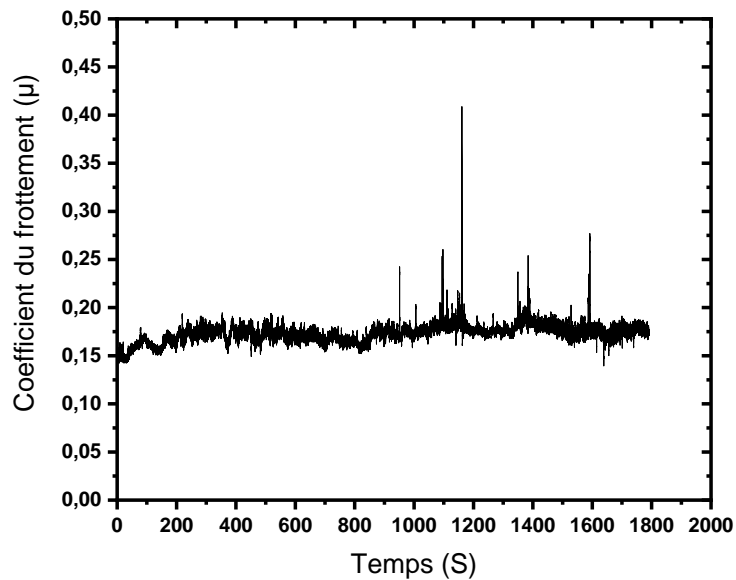


Figure III-27: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$

III.6.1.7 Tests tribologiques à $V=1\text{m/s}$ et $P=2\text{MPa}$

En augmentant la charge normale à 2MPa , le pion a creusé dans le disque, ce qui a engendré une déformation notable du disque lui-même.

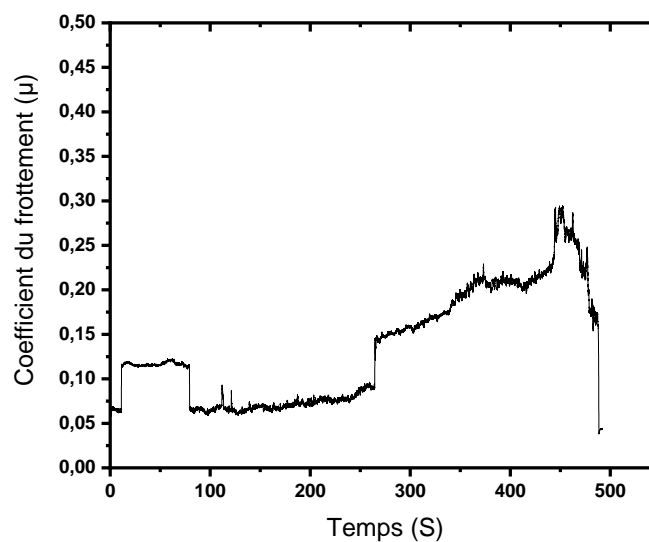


Figure III-28: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=2\text{MPa}$

Cet effet indésirable de creusement et de déformation est provoqué probablement par l'augmentation de la température pendant les essais.

III.6.1.8 Tests tribologiques à $V=1\text{m/s}$ et $P=3\text{MPa}$

Lors de l'application d'une vitesse de glissement constante de 1m/s et d'une charge de 3MPa , il a été constaté que le coefficient de frottement était instable. Cette instabilité s'est traduite par une déformation significative du disque et une usure complète du pion. De plus, lors du contact avec le disque, une température exceptionnellement élevée a été remarquée.

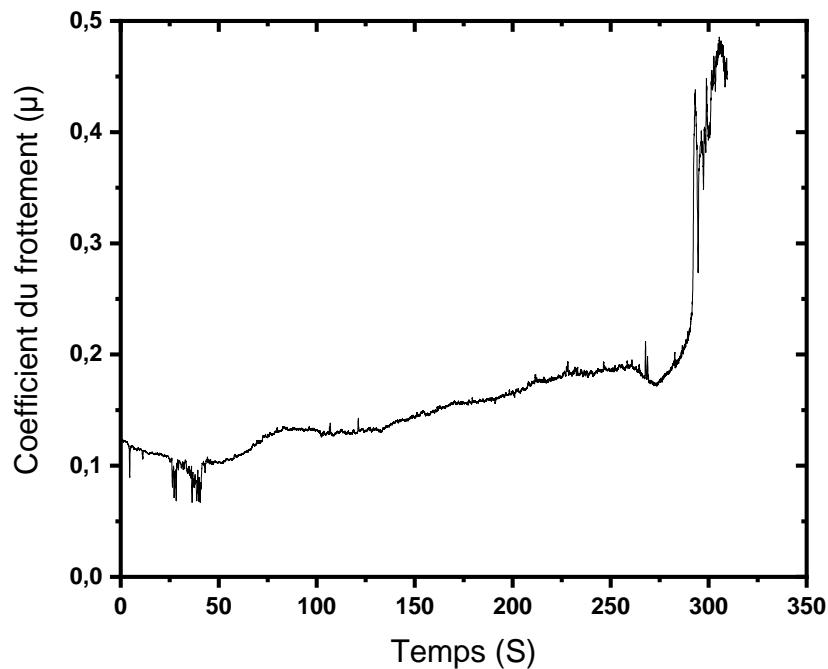


Figure III-29: Coefficient de frottement avec $V=1\text{m/s}$ et $P=3\text{MPa}$

III.6.1.9 Tests tribologiques à $V= 1,5\text{ m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

En appliquant une vitesse de $1,5\text{m/s}$ et une pression de $0,5\text{MPa}$ lors de nos expériences d'usure, nous avons observé que le pion commence à creuser légèrement dans le disque.

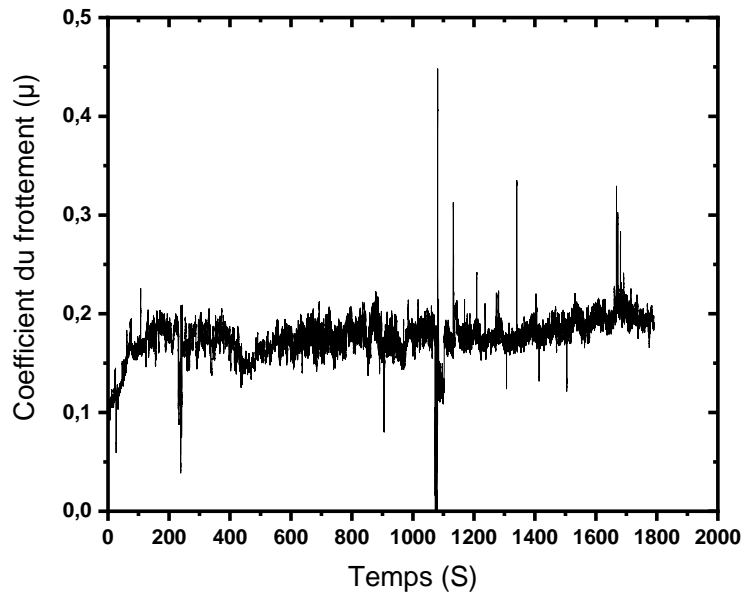


Figure III-30: Coefficient de frottement avec $V=1,5$ m/s et $P=0,5$ MPa

III.6.1.10 Tests tribologiques à $V=1,5$ m/s et $P=1$ MPa

Dans ce test, en augmentant la vitesse de glissement à 1,5 m/s et en appliquant la charge de 1MPa, nous avons observé que le pion a creusé dans le disque, ce qui indique une déformation importante.

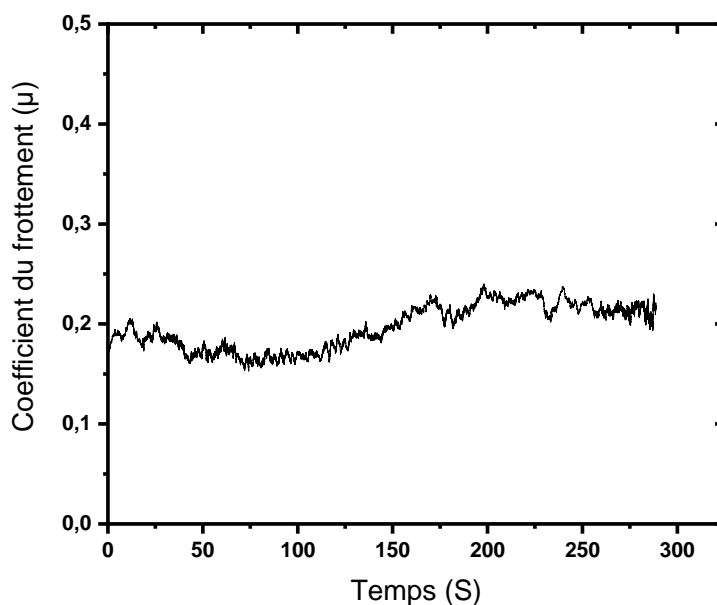


Figure III-31: Coefficient de frottement avec $V=1,5$ m/s et $P=1$ MPa

De plus, la température a augmenté de manière significative à la fois dans le pion et le disque.

III.6.1.11 Tests tribologiques à $V= 1,5 \text{ m/s}$ et $P= 2\text{MPa}$

Pour ce test, nous avons changé le paramètre de l'effort normale en l'augmentant 2MPa, nous observons les mêmes résultats, le pion a creusé dans le disque dans les premières minutes du test ce qui a provoqué une déformation importante du disque, et une température élevée.

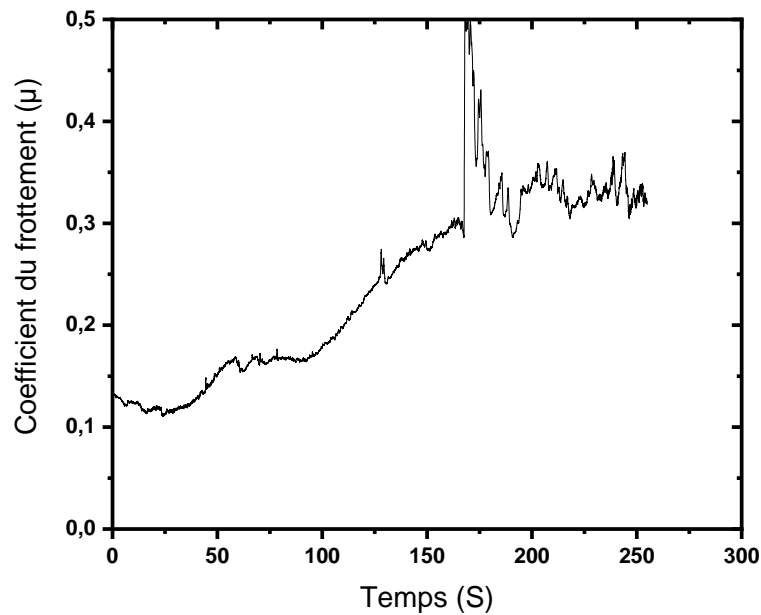


Figure III-32: Coefficient de frottement avec $V= 1,5 \text{ m/s}$ et $P= 2\text{MPa}$

III.6.1.12 Tests tribologiques à $V= 1,5 \text{ m/s}$ et $P= 3\text{MPa}$

Lors de ce test, le paramètre de l'effort normal a été modifié en 3MPa.

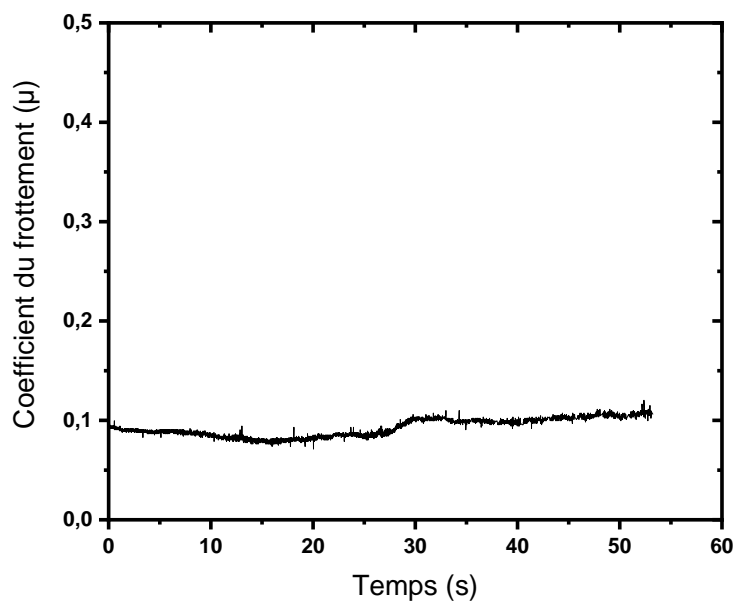


Figure III-33: Coefficient de frottement avec $V= 1,5 \text{ m/s}$ et $P= 3\text{MPa}$

Les résultats observés restent les mêmes : le pion a creusé dans le disque dès les premières instantes du test, ce qui a engendré une déformation significative du disque et une augmentation de la température.

III.7 Comparaison et interprétation des résultats

III.7.1 Variation de la vitesse

III.7.1.1 A pression égale à 0,5 MPa

La courbe Figure III-34 montre la superposition de courbes de frottement pour une pression constante égale à 0,5 MPa avec une variation de vitesses de glissements allant de 0,5m/s à 1,5m/s.

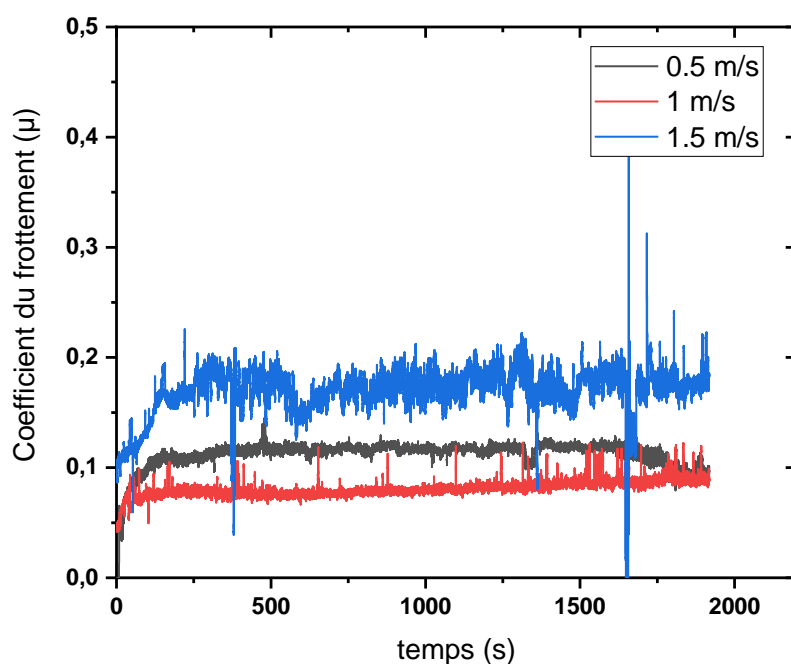


Figure III-34 : Coefficient de frottement avec pour $P=0,5$ MPa

Nous remarquons que la variation de la vitesse de glissement influence sur la variation du coefficient du frottement. Cette variation ressemble à l'allure de la courbe de stribeck, où l'augmentation de la vitesse au départ diminue le coefficient du frottement de 0,1 à 0,08. D'autre part ; à une vitesse de 1,5m/s nous constatons que le frottement augmente et atteint 0,17.

III.7.1.2 A pression égale à 1 MPa

La courbe Figure III-35 illustre la superposition de courbes de frottement tout en maintenant la pression constante à 1MPa pour différentes vitesses de glissements allant de 0,5m/s à 1,5m/s.

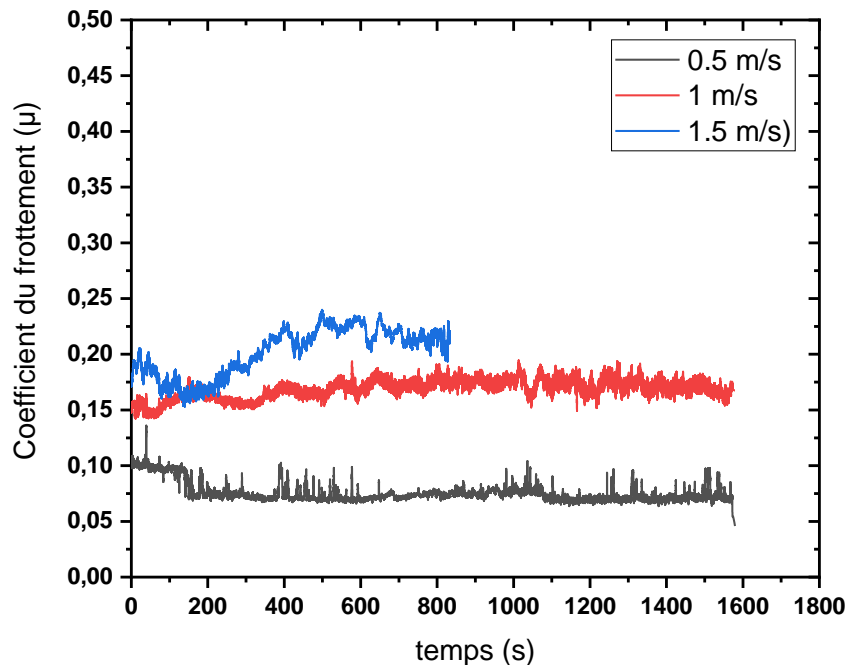


Figure III-35: Courbe de l'influence de la variation de la vitesse sur le coefficient du frottement

L'augmentation de la pression montre une certaine linéarité entre la variation de la vitesse du glissement et le coefficient du frottement, ou l'augmentation de la vitesse engendre l'augmentation du coefficient du frottement. Seulement à une vitesse de 1,5 m/s nous constatons que le pion a creusé dans le disque ce qui n'a pas permis d'atteindre les 30 minutes de l'essai.

III.7.1.3 A pression égale à 2 MPa

La courbe Figure III-36 illustre la superposition de courbes de frottement tout en maintenant la pression constante à 2MPa pour différentes vitesses de glissements allant de 0,5m/s à 1,5m/s.

Sur cette courbe à 2MPa, nous pouvons voir clairement qu'à des vitesses de glissement dépassant 0,5 m/s, le couple de frottement pion/disque ne montre aucune résistance et se dégrade au cours des tests de frottement.

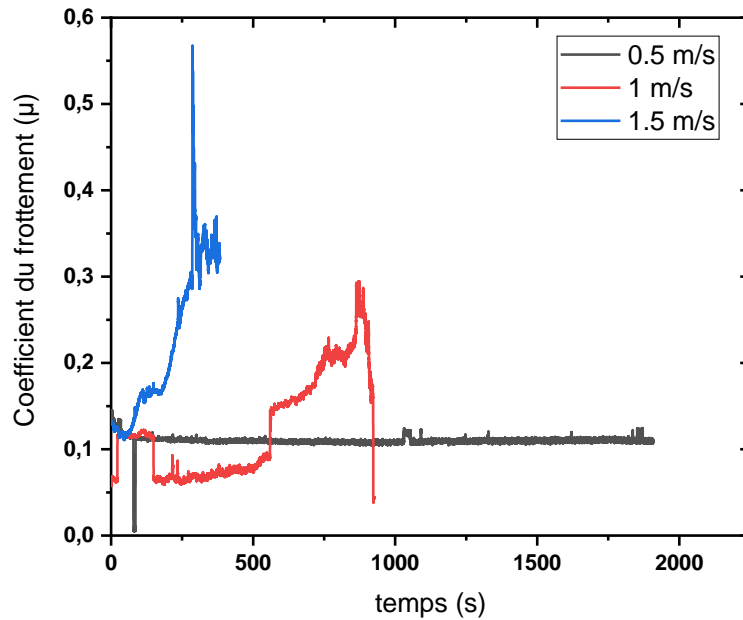


Figure III-36: Courbe de l'influence de la variation de la vitesse sur le coefficient du frottement

III.7.1.4 A pression égale à 3 MPa

La courbe représentée dans la Figure III-37 mis en évidence la superposition des courbes de frottement, avec une pression constante à 3 MPa pour différentes vitesses de glissements allant de 0,5m/s à 1,5m/s.

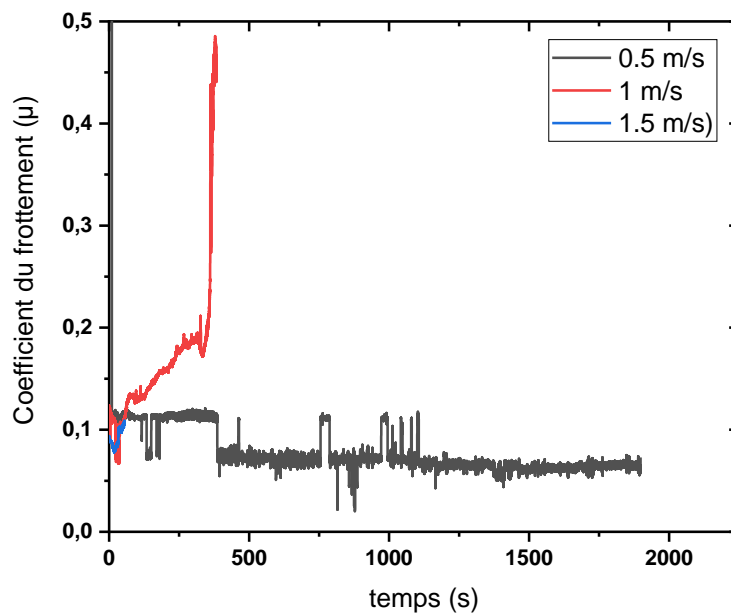


Figure III-37: Courbe de l'influence de la variation de la vitesse sur le coefficient du frottement

D'après les résultats obtenus, nous observons que le coefficient de frottement reste stable à la vitesse de 0,5m/s. Cependant, à des vitesses de 1m/s et 1,5m/s, nous remarquons que le disque subit une déformation au début du test (Figure III-37). En conséquence, le test a été arrêté prématurément dans les premières minutes pour éviter l'endommagement du disque.

III.7.2 Variation de la pression

III.7.2.1 A vitesse égale à 0,5m/s

La courbe présentée dans la Figure III-38 montre la superposition de courbes de frottement à différentes pressions allant de 0,5MPa à 3MPa, avec une vitesse constante de 0,5 m/s

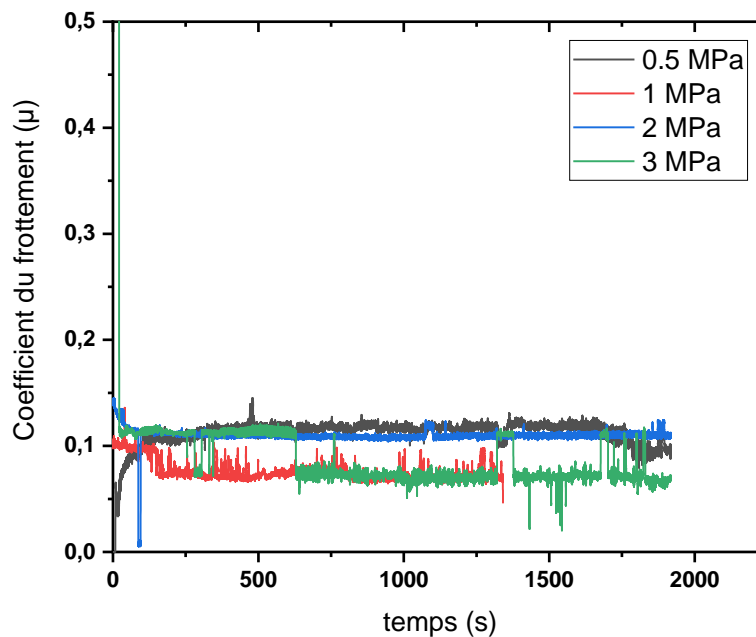


Figure III-38: Courbe de l'influence de la variation de la pression sur le coefficient du frottement

Dans ce cas, nous remarquons que le coefficient de frottement varie autour de 0.1 et les disques n'ont pas subi de déformation sous ces pressions. Ceci nous amène à dire que la pression n'a pas un impact significatif sur le frottement avec une vitesse de glissement constante de 0,5 m/s.

Le Figure III-39 présente les formes des disques et des pions obtenus lors de l'application des efforts normaux variés et une vitesse de glissement constante de 0,5 m/s sur le couple glissant PTFE/PTFE.

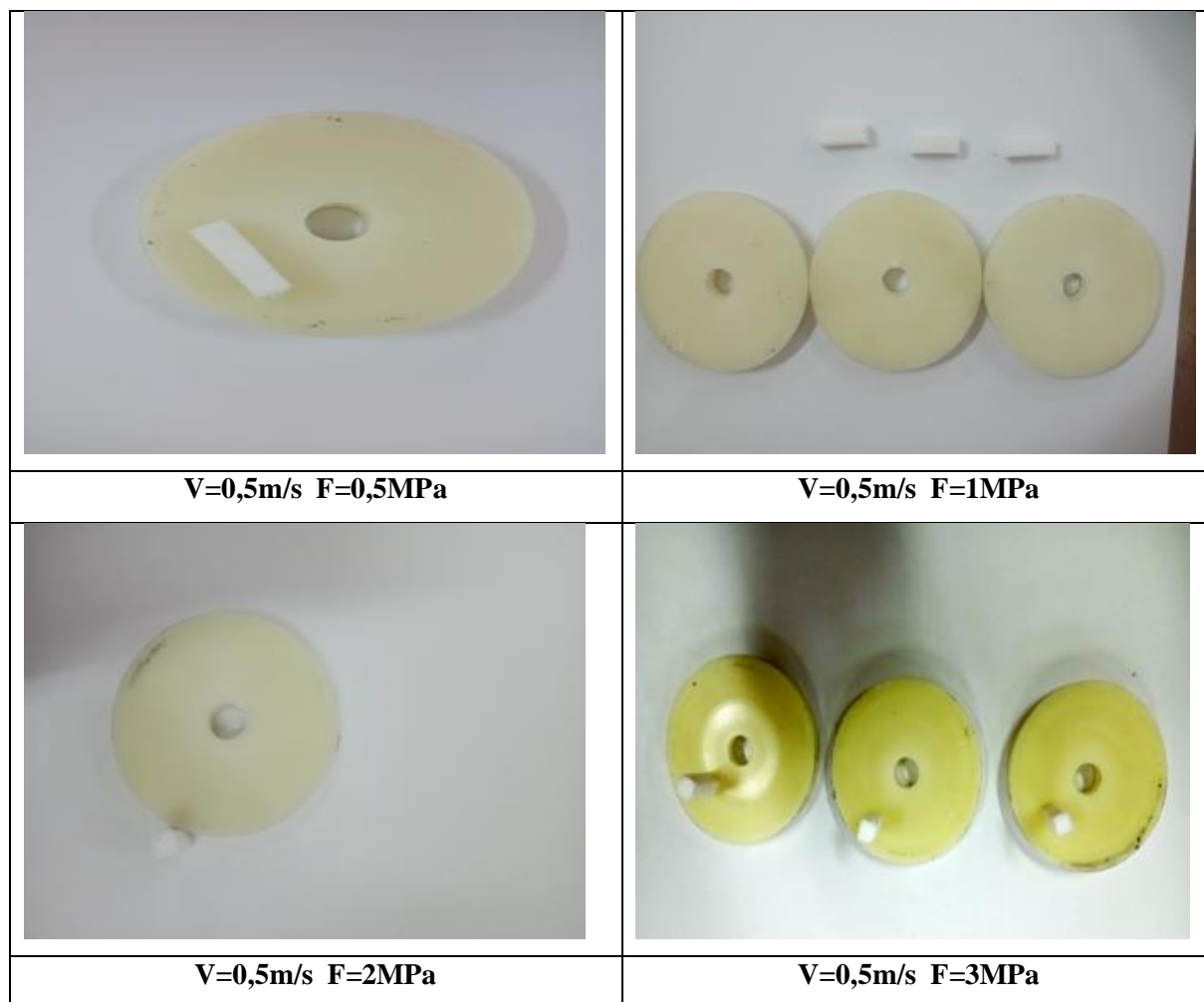


Figure III-39 : Impact des charges variables sur l'état des disques et les pions à $V=0,5m/s$

En maintenant la vitesse de glissement du couple glissant PTFE/PTFE et en variant l'effort normal, nous avons observé que le coefficient de frottement reste presque constant.

Les résultats obtenus sont particulièrement intéressants car ils indiquent que le couple glissant PTFE/PTFE présente une résistance élevée à des charges importantes sans subir de déformation majeure. Malgré l'augmentation de la force appliquée, les propriétés structurales du disque ont été maintenues, et le pion a préservé son intégrité sans creuser dans le disque.

Ces observations mettent en évidence la stabilité dimensionnelle et la résistance mécanique du couple PTFE/PTFE dans des conditions de charge plus élevées. Ces résultats sont encouragés et soulignent le potentiel de cette combinaison de matériaux pour des applications tribologiques nécessitant une capacité à supporter des charges élevées sans subir de déformation excessive.

III.7.2.2 A vitesse égale à 1m/s

La courbe Figure III-40 illustre la superposition des courbes de frottement à différentes pressions, tandis que la vitesse de glissement reste constante à 1m/s.

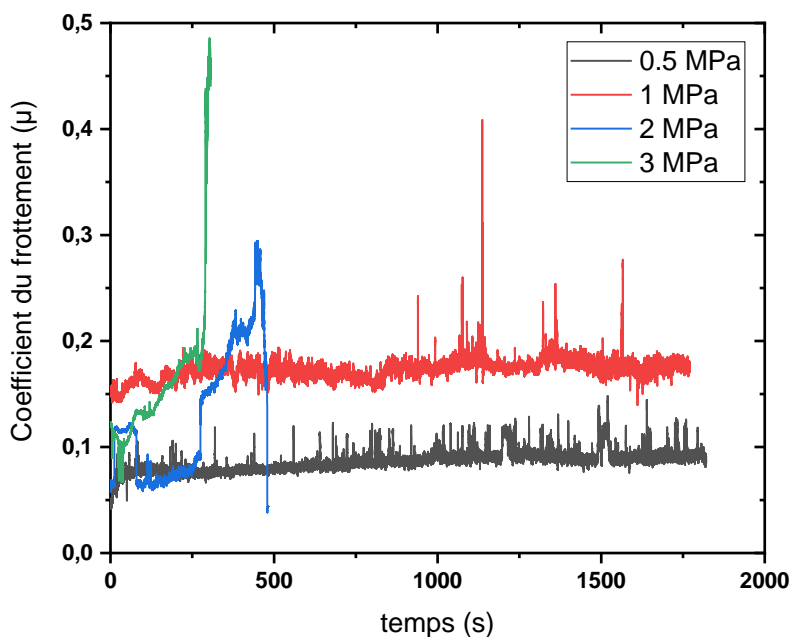


Figure III-40: Courbe de l'influence de la variation de la pression sur le coefficient du frottement

D'après ces résultats, nous observons que le coefficient de frottement reste stable avec une pression de 0,5MPa, dans ce cas le disque n'a pas subi de déformation.

L'augmentation de la pression à 1MPa entraîne une augmentation du coefficient de frottement de 0.08 à 0.15, ce qui a causé la déformation du disque. Aux niveaux des pressions de 2MPa et 3MPa, le disque a subi des endommagements dans les premières minutes du test. Cela suggère que la pression a d'influence sur la résistance et l'intégrité structurelle du disque, contrairement au test précédent.

Le Figure III-41 illustre l'impact des charges variables sur l'état des disques et les pions tout en maintenant la vitesse de glissement et en variant les efforts normaux appliqués.

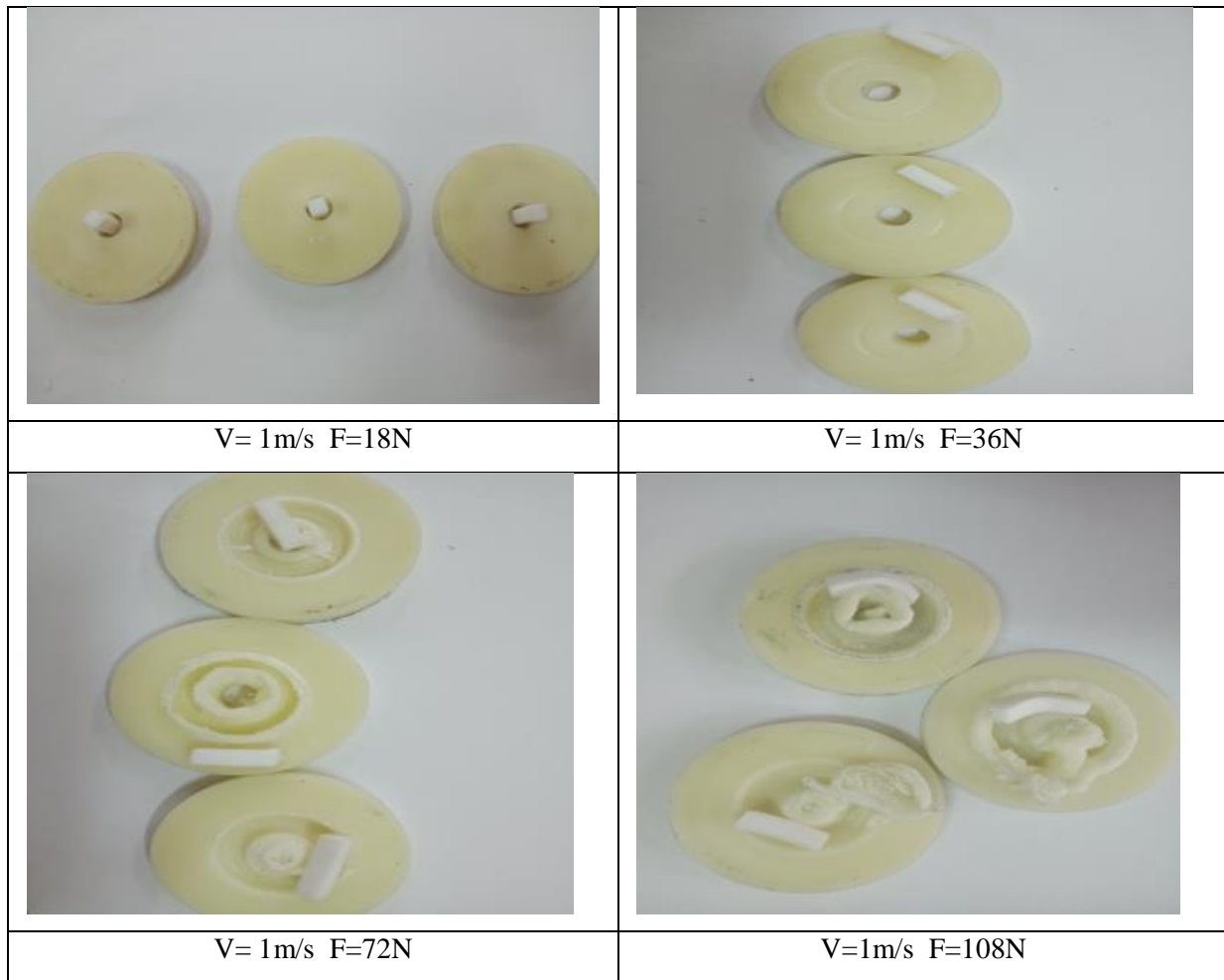


Figure III-41 : Impact des charges variables sur l'état des disques et les pions à $V= 1m/s$

Lorsque la charge sur le couple de PTFE augmente, le pion exerce une pression plus élevée sur le disque. Nous observons que, malgré la vitesse constante de 1m/s, l'augmentation de la charge entraîne un creusement accumulé du pion dans le disque, ainsi qu'une déformation progressive du disque lui-même (Figure III-41).

III.7.2.3 A vitesse égale à 1,5m/s

La courbe de la Figure III-42 illustre la superposition des courbes de frottement à différentes pressions, tandis que la vitesse de glissement reste constante à 1,5m/s.

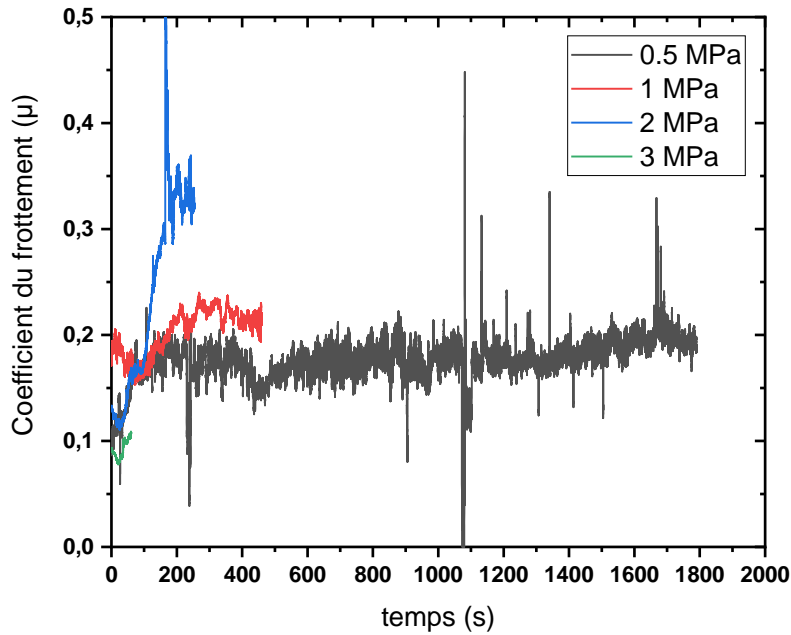
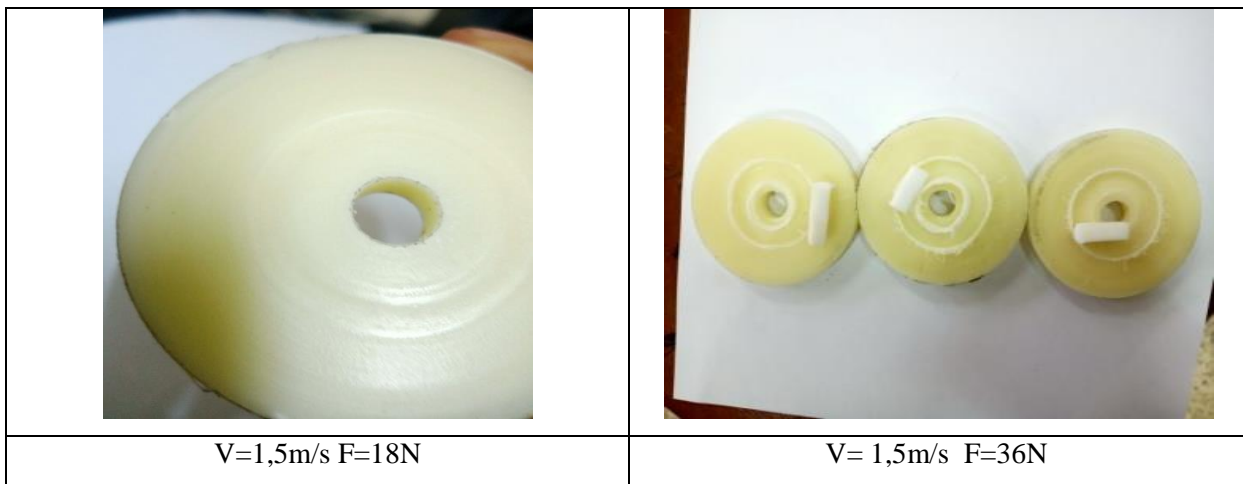


Figure III-42: Courbes de l'influence de la variation de la pression sur le coefficient du frottement

Ces résultats indiquent que lorsqu'une vitesse constante de 1,5 m/s et une pression de 0,5MPa, le disque commence déjà à se déformer légèrement. Cependant, à des pressions plus élevées, telles que 1MPa, 2MPa et 3MPa, le disque se déforme complètement dès les premières instantes du test. La figure III-43 démontre l'influence des charges variables sur l'état des disques et des pions, tout en maintenant la vitesse de glissement et en modifiant les forces normales appliquées.



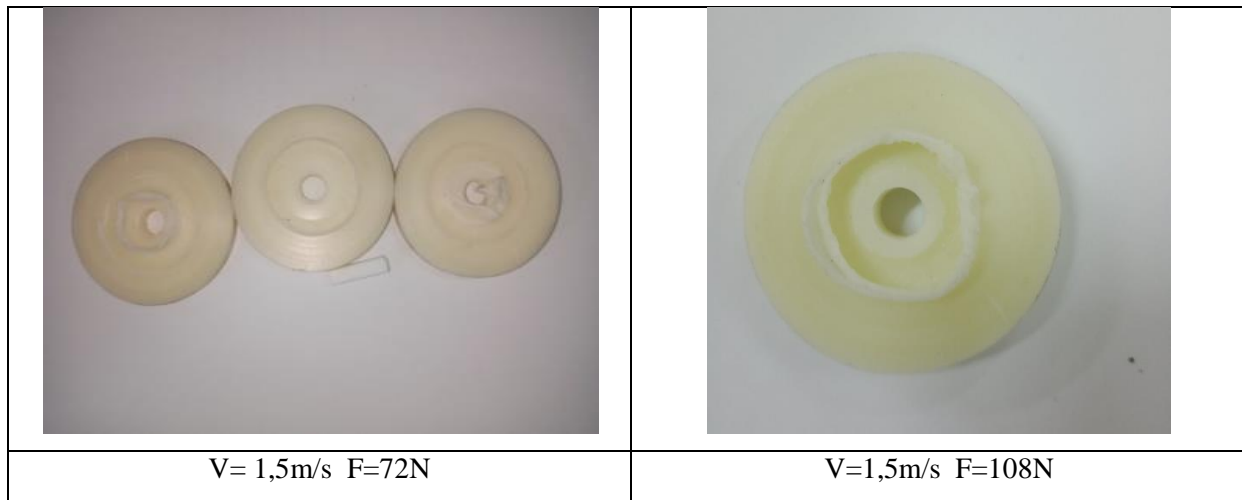


figure III-43 : Influence des charges variables sur l'état des disques et des pions à V=1,5m/s

Nos résultats ont révélé que, quelle que soit la charge appliquée, l'indentation des pions entraînait une déformation significative des disques. Les disques ont montré des signes de déformation, indiquant une modification permanente de leur forme. De plus, nous avons observé que la vitesse de 1,5 m/s était un facteur déterminant de la déformation des disques.

III.8 Mesure du produit PV

La mesure du produit PV (Pression x Vitesse de glissement) a été effectuée sur une gamme de vitesses allant de 0,5 m/s à 1,5 m/s et une plage de pression allant de 0,5MPa à 3MPa à différentes combinaisons comme le montre le **Tableau I-1**.

Tableau III-2 :Tableau recapitulatif de l'état du couple du frottement disque/pion sous différents produit PV

Pression (MPa)	0.5			1			2			3		
Vitesse (m/s)	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
Produit PV	0.25	0.5	0.75	0.5	1	1.5	1	2	3	1.5	3	4.5
Etat du couple pion/disque	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	KO	KO	KO
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	KO	KO	KO
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	KO	KO	KO

Pour une période d'essai de 30minutes pour chaque combinaison, nous remarquons que le disque garde ses caractéristiques mécaniques et ne se déforme pas lorsque le produit PV est inférieur à 3MPa. en revanche lorsque la pression atteint 3MPa le pion creuse dans le disque

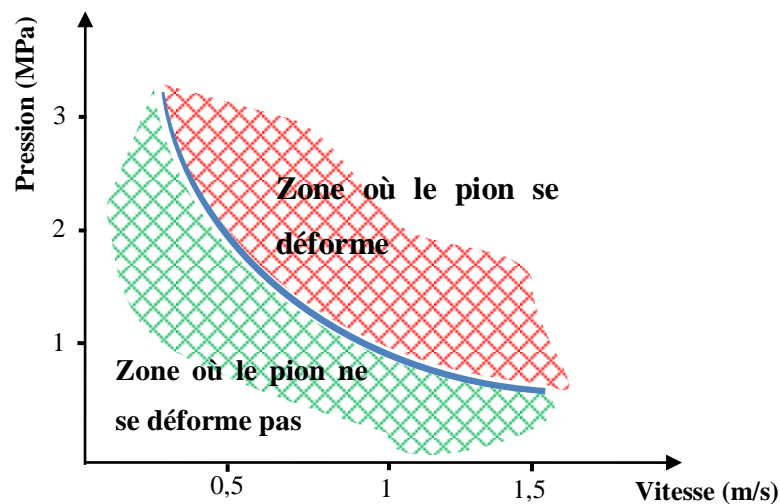


Figure III-44: Courbe du produit PV du couple glissant pion/disque

III.9 Mesure du taux d'usure

La norme DIN EN 50324 définit le taux d'usure comme « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance ». Le taux d'usure spécifique du matériau est calculé à l'aide de l'équation (1).

$$\omega_s = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F_N \cdot L} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right) \quad (1)$$

Dans laquelle F_N est la charge normale appliquée à l'échantillon pendant le glissement, Δm est la perte de masse de l'échantillon, ρ est la densité de l'échantillon, et L est la distance totale de glissement.

Les essais d'usure ont été réalisés afin d'évaluer les performances des disques soumis à des conditions variables de charge et de vitesse.

Pour chaque test, un pion a été sélectionné, pesé et mis en contact avec le disque. A l'intervalle régulier de 15 minutes, le pion a été retiré du contact avec le disque et pesé à nouveau. Cette procédure permet de suivre l'évolution de l'usure du pion en indiquant les changements éventuels de masse du pion, qui peuvent être attribués à l'usure du disque.

En variant les charges et les vitesses tout au long des tests, il a été possible d'analyser l'impact de ces paramètres sur l'usure des disques.

III.9.1.1 Tests d'usure à $V=0,5\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

Lors de l'application d'une vitesse de $0,5\text{m/s}$ et une charge de $0,5\text{MPa}$, il a été observé que les pertes de masse sont restées constantes après chaque intervalle de mesure de 15 minutes. De plus, le taux d'usure est demeuré constant tout au long de l'expérimentation. La courbe Figure III-45 présente le taux d'usure en fonction de la distance parcourue en appliquant une vitesse de $0,5\text{m/s}$ et une pression de $0,5\text{MPa}$.

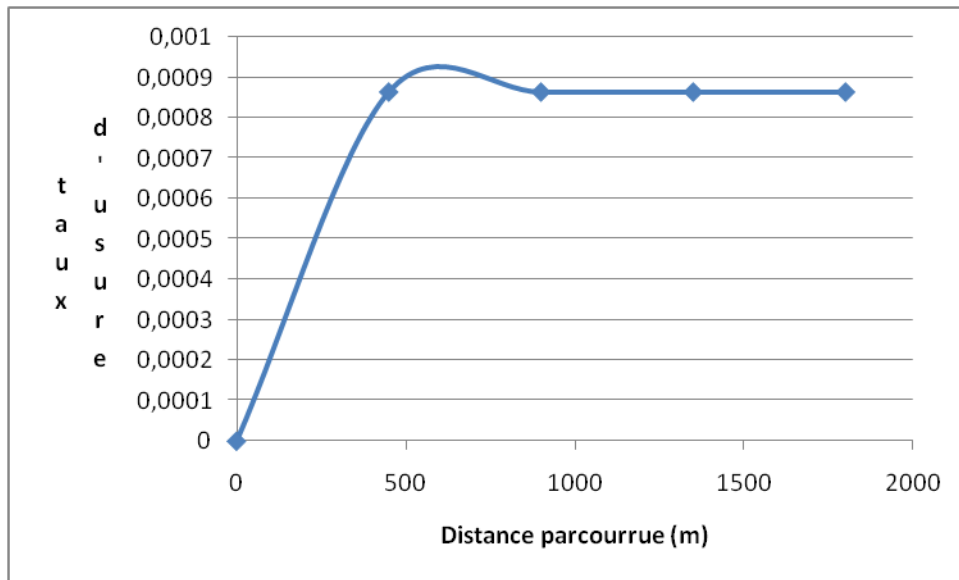


Figure III-45 : Le taux d'usure à $v=0,5\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

III.9.1.2 Tests d'usure à $V=0,5\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$

Dans ce test, nous avons augmenté la charge appliquée à 1MPa tout en laissant la vitesse constante, il a été remarqué que les pertes de masse sont augmentées par rapport au teste précédent, ce qui a engendré l'augmentation du taux d'usure. Le graphique Figure III-46 illustre l'évolution du taux d'usure en relation avec la distance parcourue lorsqu'une vitesse de $0,5\text{m/s}$ et une pression de 1MPa sont appliquées.

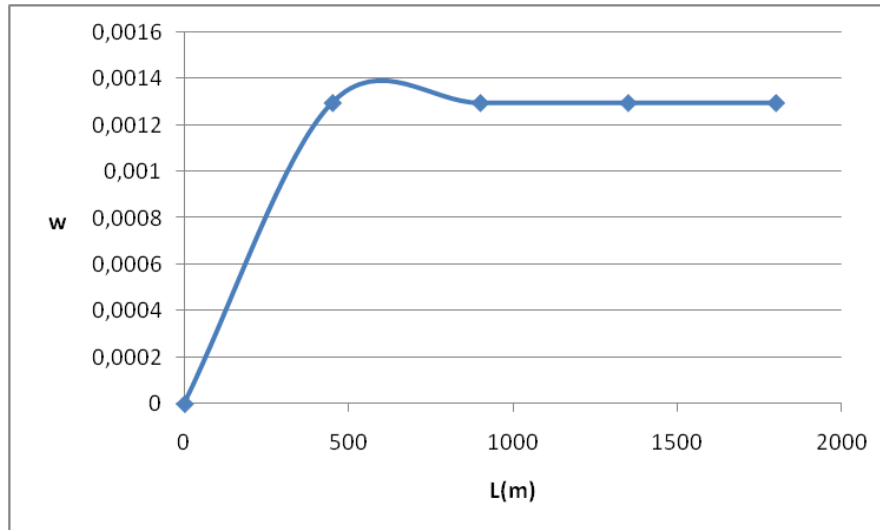


Figure III-46 : Le taux d'usure à $v=0,5\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$

III.9.1.3 Tests d'usure à $V=1\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

La courbe Figure III-47 présente la corrélation entre le taux d'usure et la distance parcourue, dans le contexte d'une vitesse de 1 m/s et d'une pression de 0,5MPa.

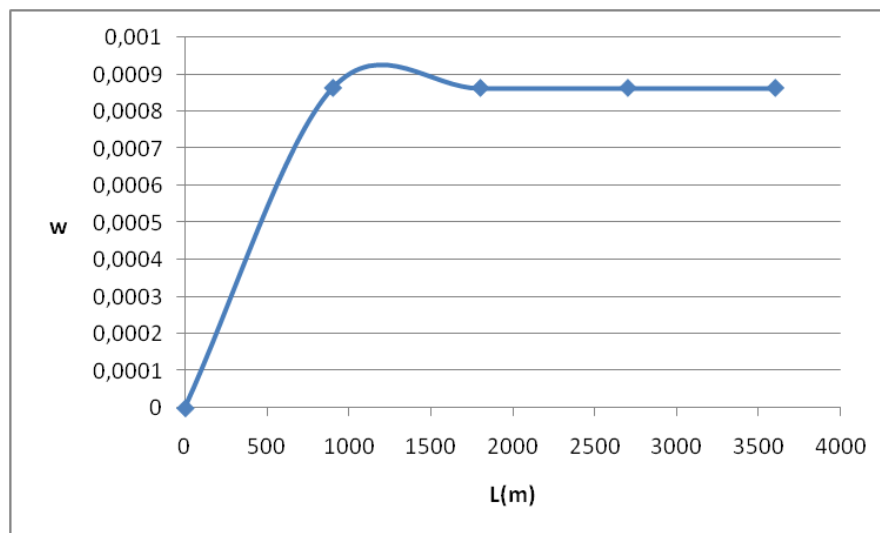


Figure III-47 : : Le taux d'usure à $v=1\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

III.10 Comparaison et interprétation des résultats

III.10.1.1 Variation de la vitesse

En appliquant une charge de 0,5 MPa avec différente vitesse allant de 0,5m/s à 1m/s, il a été constaté un taux d'usure constant. Les essais ont été réalisés soumettant l'échantillon à ces

différentes vitesses de rotation, tout en maintenant la même charge. Malgré la variation de vitesse le taux d'usure est resté stable. (Figure...)

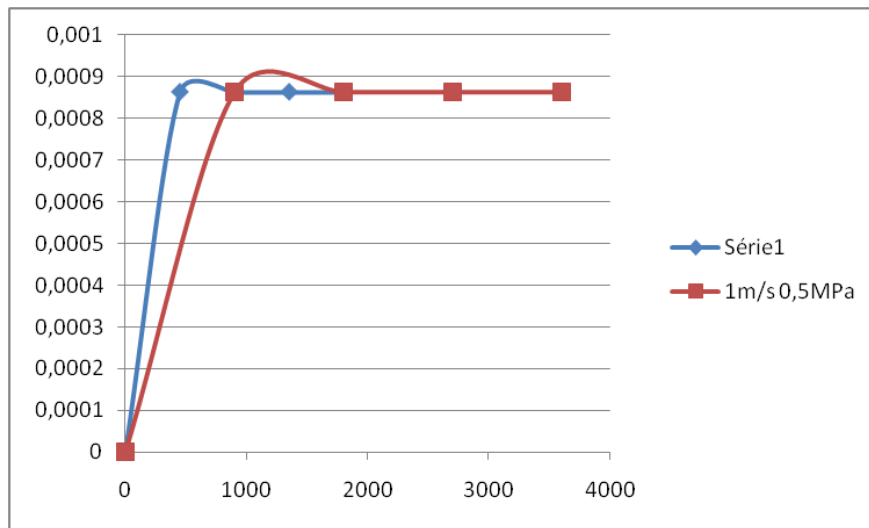


Figure III-48: Courbe de l'influence de la variation de la vitesse sur le taux d'usure

III.10.1.2 Variation de la pression :

Lorsque la pression est augmentée de 0,5MPa à 1MPa, nous observons que cela augmente le taux d'usure. Ces résultats indiquent que le taux d'usure est influencé par la pression.

Nous constatons alors que l'augmentation de la charge entraîne une augmentation du taux d'usure est cela est provoqué suite à l'augmentation de la température lorsque du frottement, ce qui suggère que le PTFE est moins résistant à l'usure sous des charges plus élevées.

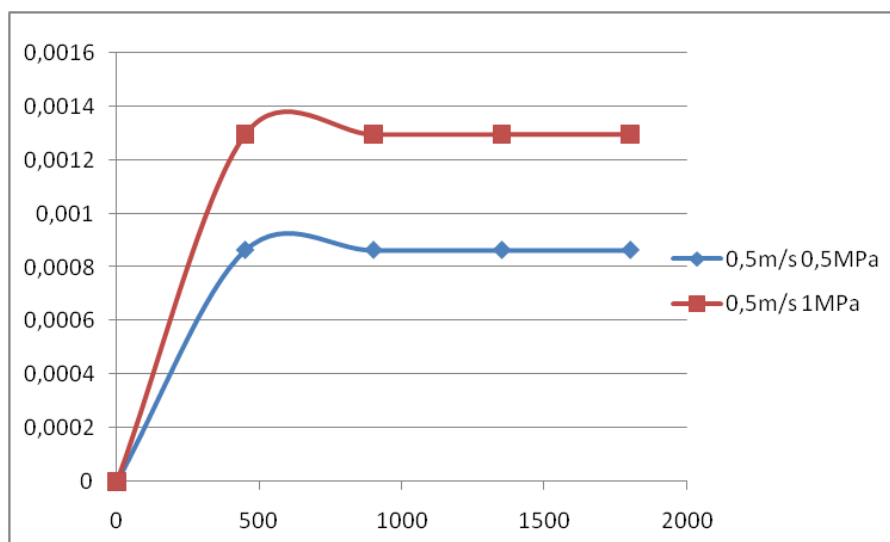


Figure III-49: Courbes de l'influence de la variation de la pression sur le taux d'usure

III.11 Conclusion

Les performances tribologiques du couple du frottement PTFE-PTFE ont été analysé sur un tribomètre de type pion/disque. Lors de cette partie expérimentale nous avons constaté que lorsque la vitesse de glissement égale à 0.5 m/s, la variation de la pression n'a montré aucune influence sur la valeur du coefficient du frottement ni sur l'état des disques. Par contre ; à des vitesses plus élevées, nous avons remarqué que la variation de la pression influe sur le coefficient du frottement. A partir des pressions supérieures à 2, cette influence provoque la déformation des disques et le creusement des pions. Ceci s'explique probablement par les faibles caractéristiques mécaniques du PTFE et de l'augmentation de la température causée par le frottement.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est un travail d'analyse et de recherche dans le domaine de la tribologie des polymères notamment de PTFE. Les tribosystèmes polymères peuvent fonctionner sans lubrification. Les possibilités de modification des matériaux polymères par autolubrification solide ou liquide offrent de très bonnes perspectives pour trouver des composites polymères qui présentent d'excellentes propriétés tribologiques.

Le premier chapitre de ce mémoire a présenté le contexte de la tribologie des polymères qui est un domaine en pleine expansion en raison de leurs applications croissantes dans l'industrie. Dans ce chapitre nous avons traité l'ensemble des facteurs pouvant influencer le frottement des polymères tels que les propriétés mécaniques du polymère et la façon dont ces propriétés mécaniques changent avec la température et les conditions environnementales. D'autres facteurs agissant sur les mécanismes d'usure sont l'adhésion et l'abrasion qui sont très importants dans l'analyse de frottement et d'usure des polymères.

Dans le deuxième chapitre, nous avons donné un aperçu bibliographique de l'ensemble des thématiques et des travaux effectués concernant l'utilisation de lubrifiants solides en tribologie. Ce chapitre montre que les lubrifiants solides tels que le graphite, le PTFE et le MoS₂ ont beaucoup à offrir pour des applications tribologiques. La plupart de ces lubrifiants sont utilisés comme additifs dans les composites autolubrifiants polymères.

Le troisième chapitre contient deux parties expérimentales. La première partie traite la présentation d'un tribomètre pion-disque, conforme aux normes ASTM G-99, conçu et réalisé à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Ce tribomètre permet de prendre des mesures et d'effectuer facilement des tests d'usure dans des conditions de frottement à sec et de récupérer les données en temps réel.

La deuxième partie porte sur la mesure du produit PV du couple en frottement PTFE-PTFE. L'ensemble des tests effectués montrent que lorsque la vitesse de glissement égale à 0.5 m/s, la variation de la pression n'a montré aucune influence sur la valeur du coefficient de frottement ni sur l'état des disques. Par contre ; à des vitesses plus élevées, nous avons remarqué que la variation de la pression influe sur le coefficient de frottement. A partir des

pressions supérieures à 2, cette influence provoque la déformation des disques et le creusement des pions. Ceci s'explique probablement par les faibles caractéristiques mécaniques du PTFE et de l'augmentation de la température causée par le frottement.

Les perspectives de recherches futures feront l'objet de mesurer l'influence de la température sur le comportement à l'usure du couple de frottement PTFE-PTFE, et de renforcer ce matériau de différents additifs pour améliorer ses caractéristiques mécaniques ainsi que sa conductivité thermique.

Références bibliographiques

- [1] Z. Rymuza, « Tribology of Polymers », *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 7, n° 4, p. 177-184, 2007, doi: 10.1016/S1644-9665(12)60235-0.
- [2] S. W. Zhang, « State-of-the-art of polymer tribology », *Tribol. Int.*, vol. 31, n° 1-3, p. 49-60, 2002, doi: 10.1016/s0301-679x(98)00007-3.
- [3] S. K. Sinha et B. J. Briscoe, Éd., *Polymer tribology*. London : Singapore ; Hackensack, NJ: Imperial College Press ; Distributed by World Scientific, 2009.
- [4] M. Brendle, J. Fatkin, P. Turgis, et R. Gilmore, « Mechanisms of Graphite Transfer on Steel as Studied by Image Analysis », *Tribol. Trans.*, vol. 33, n° 4, p. 471-480, janv. 1990, doi: 10.1080/10402009008981978.
- [5] « https://fr.wikipedia.org/wiki/Lubrifiant_solide ».
- [6] J. Ayel, « Lubrifiants - Constitution », *Frott. Usure Lubrif.*, juill. 1997, doi: 10.51257/a-v1-bm5341.
- [7] E. Omrani, P. K. Rohatgi, et P. L. Menezes, *Tribology and Applications of Self-Lubricating Materials*, 1^{re} éd. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis, 2017.: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781315154077.
- [8] M. P. Suarez, A. Marques, D. Boing, F. L. Amorim, et Á. R. Machado, « MoS₂ solid lubricant application in turning of AISI D6 hardened steel with PCBN tools », *J. Manuf. Process.*, vol. 47, p. 337-346, nov. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.10.001.
- [9] M. Conte et A. Igartua, « Study of PTFE composites tribological behavior », *Wear*, vol. 296, n° 1-2, p. 568-574, août 2012, doi: 10.1016/j.wear.2012.08.015.
- [10] B. Bhushan, *Principles and applications of tribology*, Second edition. in Tribology series. Chichester, West Sussex, UK: Wiley, 2013.
- [11] B. Ben Difallah, M. Kharrat, M. Dammak, et G. Monteil, « Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder », *Mater. Des.*, vol. 34, p. 782-787, févr. 2012, doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.001.

- [12] A. Baradeswaran et A. Elaya Perumal, « Effect of Graphite on Tribological and Mechanical Properties of AA7075 Composites », *Tribol. Trans.*, vol. 58, n° 1, p. 1-6, janv. 2015, doi: 10.1080/10402004.2014.947663.
- [13] M. H. Cho, J. Ju, S. J. Kim, et H. Jang, « Tribological properties of solid lubricants (graphite, Sb₂S₃, MoS₂) for automotive brake friction materials », *Wear*, vol. 260, n° 7-8, p. 855-860, avr. 2006, doi: 10.1016/j.wear.2005.04.003.
- [14] M. R. Vazirisereshk, A. Martini, D. A. Strubbe, et M. Z. Baykara, « Solid Lubrication with MoS₂: A Review », *Lubricants*, vol. 7, n° 7, p. 57, juill. 2019, doi: 10.3390/lubricants7070057.
- [15] M. S. Charoo, M. F. Wani, M. Hanief, et M. A. Rather, « Tribological Properties of MoS₂ Particles as Lubricant Additive on EN31 Alloy Steel and AISI 52100 Steel Ball », *Mater. Today Proc.*, vol. 4, n° 9, p. 9967-9971, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.303.
- [16] M. Moazami-Goudarzi et A. Nemati, « Tribological behavior of self lubricating Cu/MoS₂ composites fabricated by powder metallurgy », *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 28, n° 5, p. 946-956, mai 2018, doi: 10.1016/S1003-6326(18)64729-6.
- [17] S. Qiu, X. Li, et B. Chen, « FABRICATION OF MoS₂ ULTRATHIN NANOSHEETS AND ITS TRIBOLOGICAL PROPERTIES AS LUBRICATING ADDITIVE OF POLYIMIDE ».
- [18] D. Muhammad et M. Asaduzzaman, « Friction and Wear of Polymer and Composites », in *Composites and Their Properties*, N. Hu, Éd., InTech, 2012. doi: 10.5772/48246.
- [19] Z. Jin, X. Chen, Y. Wang, et D. Wang, « Thermal conductivity of PTFE composites filled with graphite particles and carbon fibers », *Comput. Mater. Sci.*, vol. 102, p. 45-50, mai 2015, doi: 10.1016/j.commatsci.2015.02.019.
- [20] F.-Y. Yan, Q.-J. Xue, et X. Wang, « Tribological action of metallic fillers in poly(tetrafluoroethylene) composites », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 83, n° 9, p. 1832-1840, févr. 2002, doi: 10.1002/app.2309.
- [21] S. S. Kandanur *et al.*, « Suppression of wear in graphene polymer composites », *Carbon*, vol. 50, n° 9, p. 3178-3183, août 2012, doi: 10.1016/j.carbon.2011.10.038.
- [22] T. Huang, R. Lu, H. Wang, Y. Ma, J. Tian, et T. Li, « Investigation on the Tribological Properties of POM Modified by Nano-PTFE », *J. Macromol. Sci. Part B*, vol. 50, n° 7, p. 1235-1248, juill. 2011, doi: 10.1080/00222348.2010.503152.

Annexe

III.11.1.1 Tests d'usure à $V=0,5\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

masse	Δm	L(m)	Σm	ρ	F_N	ω
1,73	0	0	0	0,00143	18	0
1,72	0,01	450	0,01	0,00143	18	0,00086333
1,71	0,01	900	0,02	0,00143	18	0,00086333
1,70	0,01	1350	0,03	0,00143	18	0,00086333
1,69	0,01	1800	0,04	0,00143	18	0,00086333

III.11.1.2 Tests d'usure à $V=0,5\text{m/s}$ et $P=1\text{MPa}$

masse	Δm	L(m)	Σm	ρ	F_N	ω
1,44	0	0	0	0,00143	36	0
1,41	0,03	450	0,03	0,00143	36	0,001295
1,38	0,03	900	0,06	0,00143	36	0,001295
1,35	0,03	1350	0,09	0,00143	36	0,001295
1,32	0,03	1800	0,12	0,00143	36	0,001295

III.11.1.3 Tests d'usure à $V=1\text{m/s}$ et $P=0,5\text{MPa}$

masse	Δm	L(m)	Σm	ρ	F_N	ω
1,42	0	0	0	0,00143	18	0
1,4	0,02	900	0,02	0,00143	18	0,00086333
1,38	0,02	1800	0,04	0,00143	18	0,00086333
1,36	0,02	2700	0,06	0,00143	18	0,00086333
1,34	0,02	3600	0,08	0,00143	18	0,00086333

