



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET
D'INGENIERIE - ANNABA -
(Ex ENSMM)

DEPARTEMENT SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES

FILIERE : METALLURGIE

SPECIALITE : INGENIERIE DES SURFACES

Intitulé :

Influence du changement cyclique de température sur le comportement
tribologique de PEHD/ Noir de Carbone

Présenté par

BOUDERIASSI Abderrahim

Encadrant

MCB. ENSTI

Louiza Bendjeddou

Président

Pr. ENSTI

Mohamed Retima

Examineur

MCA. ENSTI

Yasmima Taibi

Année / 2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie -
Annaba

Département Science et Génie des Matériaux

AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE MASTER

Je soussigné (e) M. Pr. RETINA JOURNAL
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé
M. BOUDERASSA Abdelrahim
à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les corrections signalées
par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

D^r BENDJEDOU
AS

Avis de l'Examineur :

[Signature] le 04/07/23

Président du Jury

[Signature]

Remerciements

الحمد لله

Je souhaite témoigner toute ma gratitude à ma mère, à mon père et à mes frères pour leur soutien sans faille, sans lequel je n'aurais pas pu poursuivre ma formation sur les plans économique, moral et physique.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Mme Louiza BENDJEDOU pour avoir supervisé mon mémoire pendant mon stage, ainsi que pour son soutien, ses critiques, ses conseils et ses suggestions précieux sur le plan scientifique.

Je souhaite exprimer ma sincère gratitude aux membres du jury Mr Mohamed RETIMA et Mme Yasmina TAIBI pour avoir examiné le présent document. Leur acceptation de juger ce travail et leurs précieuses suggestions sont un honneur pour moi. Leur expertise et leurs commentaires contribueront certainement à l'amélioration de ce modeste travail. Je les remercie chaleureusement pour leur temps, leur attention et leur soutien tout au long de ce processus d'évaluation.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le personnel de mon laboratoire à ALTUMET, ainsi que l'École Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie, pour leur précieuse assistance qui m'a été offerte.

Il m'est très agréable de remercier tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont apporté leur contribution.

الملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير التغيرات الدورية في درجة الحرارة على السلوك التريبولوجي لمركب بولي ايثيلين عالي الكثافة/الكربون الأسود. لتحقيق هذا الهدف، سنقوم بمحاكاة التغيرات الدورية في درجات الحرارة التي تمثل ظروف البيئة في منطقة صحراوية والتركيز على تحليل مختلف الظواهر التريبولوجية مثل الاحتكاك والتآكل. بالإضافة إلى ذلك، سنقوم بتوصيف الأسطح وقياس المعلمات التريبولوجية ذات الصلة. ستوفر هذه الدراسة فهماً أفضل حول كيفية تأثير التغيرات الدورية في درجة الحرارة على السلوك التريبولوجي لمركب بولي ايثيلين عالي الكثافة/الكربون الأسود.

الكلمات المفتاحية:

بولي ايثيلين عالي الكثافة/الكربون الأسود، التغيرات الدورية في درجة الحرارة، السلوك التريبولوجي.

Abstract

The objective of this thesis is to investigate the influence of cyclic temperature changes on the tribological behavior of the PEHD/Carbon Black composite. To achieve this objective, we will simulate cyclic temperature variations representative of the environmental conditions in a desert area and focus on analyzing various tribological phenomena such as friction and wear. Additionally, we will characterize the surfaces and measure relevant tribological parameters. This study will provide a better understanding of how the tribological behavior of the PEHD/Carbon Black composite is affected by cyclic temperature fluctuations.

Keywords:

PEHD/Carbon Black, cyclic temperature changes, tribological behavior.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'influence du changement cyclique de température sur le comportement tribologique du composite PEHD/Noir de carbone. Pour atteindre cet objectif, nous allons simuler des variations cycliques de température représentatives des conditions environnementales d'une zone désertique, et nous concentrerons sur l'analyse de divers phénomènes tribologiques tels que le frottement et l'usure. De plus, nous allons caractériser les surfaces et mesurer les paramètres tribologiques pertinents. Ainsi, cette étude permettra de mieux comprendre comment le comportement tribologique du PEHD/Noir de carbone est affecté par les fluctuations de température cycliques présentes dans un environnement désertique.

Mots-clés :

PEHD/Noir de carbone, changement cyclique de température, comportement tribologique.

SOMMAIRE

Introduction	01
Chapitre I : Etude bibliographie & Matériaux et techniques expérimentales	02
Partie 01 : Etude bibliographie.....	03
1. Définition de la tribologie	03
2. Le but de la tribologie	03
3. Systèmes tribologiques.....	03
3. Les principaux phénomènes tribologiques	04
3.1. Frottement	04
3.2. Usure	05
3.2.1. Usure adhésive	05
3.2.2. Usure abrasive	05
3.2.3. Usure par fatigue	06
3.3. Lubrification.....	06
Partie 02 : Matériaux et techniques expérimentales.....	07
1. Description de matériau d'étude	07
2.2. Protocole expérimental pour réaliser le changement cyclique de température	07
3. Techniques expérimentales pour l'étude tribologique	08
3.1. Tribomètre.....	08
3.2. Test de rayage (Scratch Test)	09
4. Analyse des surfaces	10
4.1. Microscopie optique	10
4.2. Profilométrie.....	11
5. Paramètres tribologiques couramment mesurés	11
5.1. Coefficient de frottement	12
5.2. Taux d'usure	13
5.3. Rugosité de surface	13
Chapitre II : Résultats et discussions	15
1. Tribomètre	16
1.1. Coefficient de frottement	16
1.2. Taux d'usure.....	17
2. Test de rayage (Scratch Test)	19
2.1. Taux de retour élastique	19
Conclusion générale	21
Références bibliographiques	22

Liste des figures

Figure.I.1.Représentation schématique d'un système tribologique	04
Figure.I.2.Contact entre deux solides en présence de frottement.....	04
Figure.I.3.Phenomenes élémentaires de l'usure adhésive.....	05
Figure.I.4. Mécanisme de l'abrasion : (a) Abrasion par effet de coupe ; (b) Abrasion par déformation	06
Figure I.5. Echantillons de la couche extérieure en PEHD/noir de carbone	07
Figure I.6. Le four utilisé pour le chargement cyclique les échantillons composites en PEHD/noir de carbone	07
Figure.I.7.Appareil de tribomètre.....	08
Figure.I.8.scratch test	09
Figure.I.9.microscope optique.....	10
Figure.I.10.Appareillage d'un profilomètre 3D	11
Figure.I.11. Evolution du frottement avec la distance de glissement	12
Figure.I.12.surface rugueuse	14
Figure.II.1.variation de la profondeur de pénétration en fonction de la charge appliquée pour l'échantillon avant les cycles thermiques	19
Figure.II.2.variation de la profondeur de pénétration en fonction de la charge appliquée pour l'échantillon après les cycles thermiques.....	20

Liste des tableaux

Tableau.II.1.les paramètres utilisés dans l'appareil de tribomètre.....	16
Tableau.II.2.coefficient de frottement moyen	16
Tableau.II.3.resultats obtenir a partire de microscope optique et profilomètre 2D et 3D.....	17
Tableau.II.4.resultats obtenir a partire de microscope optique et profilomètre 2D et 3D.....	18
Tableau.II.5.le taux d'usure.....	18
Tableau.II.6.le taux de retour élastique	20

Introduction

La tribologie est une discipline scientifique qui étudie les phénomènes d'interaction et de frottement entre les surfaces en contact. Elle revêt une importance capitale dans de nombreux domaines industriels, notamment dans le domaine des matériaux et des revêtements, où elle permet d'optimiser les performances et la durabilité des systèmes mécaniques.

Le polyéthylène haute densité (PEHD) est un matériau polymère largement utilisé dans diverses applications industrielles en raison de ses propriétés mécaniques et chimiques exceptionnelles. L'ajout de noir de carbone (2,3%) permet d'améliorer davantage ses performances, notamment en tant que revêtement tricouche pour la couche extérieure. Cependant, malgré l'importance de ce revêtement, il existe peu d'études portant spécifiquement sur l'effet du changement cyclique de température sur son comportement tribologique.

L'objectif est donc d'étudier l'influence du changement cyclique de température sur le comportement tribologique PEHD/noir de carbone. Pour atteindre cet objectif, nous nous concentrerons sur l'analyse de différents phénomènes tribologiques, tels que le frottement et l'usure, ainsi que sur la caractérisation des surfaces et la mesure des paramètres tribologiques.

La structure de ce mémoire suit la démarche suivante :

La première partie du premier chapitre vise à présenter une synthèse bibliographique approfondie sur le domaine de la tribologie, en mettant l'accent sur le concept de système tribologique. Cette partie permettra d'établir une base solide de connaissances pour une meilleure compréhension des phénomènes tribologiques étudiés.

La deuxième partie du premier chapitre se concentre sur les procédures et techniques expérimentales utilisées dans cette étude. Différents équipements seront abordés, tels que les tribomètres. Le test de rayage, également connu sous le nom de scratch test. De plus, l'utilisation de techniques d'analyse de surface, telles que la profilométrie 2D et 3D ainsi que la microscopie optique.

Le deuxième chapitre sera dédié à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. Les données recueillies à l'aide des techniques et équipements mentionnés précédemment seront analysées et interprétées. Les variations du coefficient de frottement, du taux d'usure et du taux de retour élastique.

Enfin, une conclusion générale clôturera ce mémoire.

Chapitre I : Etude bibliographique

Partie 01 : Etude bibliographie

1. Définition de la tribologie

Le terme tribologie a été inventé par Peter Jost en 1966 et est dérivé du mot grec "tribos", qui signifie frotter. Il est donc de la science du frottement.

La tribologie est l'étude des interactions entre les surfaces solides qui se déplacent les unes par rapport aux autres. Lorsque deux solides entrent en contact sous l'effet d'une force normale F , une force tangentielle T se manifeste et s'oppose au mouvement relatif des deux solides. Le frottement joue un rôle essentiel lorsque l'objectif est d'immobiliser deux solides l'un par rapport à l'autre. Par exemple, il est crucial pour nos déplacements, car il nous permet d'exercer des forces de poussée tangentielle sur le sol sans glisser, ce qui nous propulse vers l'avant [1].

2. Le but de la tribologie

Le but principal de la tribologie est de minimiser les pertes de matériau et d'énergie associées à l'usure et au frottement, dans le but de concevoir des systèmes mécaniques et énergétiques plus efficaces. En améliorant les propriétés des surfaces en mouvement, la tribologie permet d'optimiser l'efficacité et la durée de vie des machines [2].

En outre, la tribologie vise à regrouper toutes les sciences liées au frottement sous une seule terminologie. Cela inclut l'étude du contact des surfaces, de l'usure, du frottement, de la lubrification et d'autres aspects pertinents [1].

3. Systèmes tribologiques

La tribologie des interfaces concerne l'étude du milieu interfacial entre deux corps en contact. Un contact tribologique ou tribosystème est composé de trois éléments principaux (Figure.I.1) : deux solides en contact (corps A et corps B) et le milieu interfacial (troisième corps). Le milieu interfacial partiellement ou totalement sépare les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de ceux des premiers corps. Il peut avoir une origine externe, telle qu'un lubrifiant solide ou liquide, ou interne, résultant du détachement de particules provenant des premiers corps. Ce tribosystème se trouve dans un environnement qui définit les conditions de fonctionnement du contact [3].

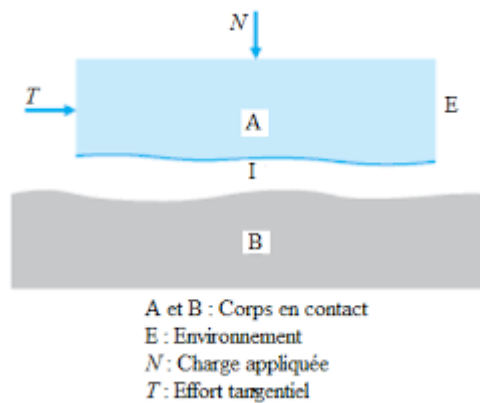


Figure.I.1.Représentation schématique d'un système tribologique [4].

3. Les principaux phénomènes tribologiques

Les phénomènes tribologiques jouent un rôle essentiel dans les interactions entre les surfaces en contact. Ils sont au cœur de la science de la tribologie, qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification. Comprendre ces phénomènes est crucial pour améliorer la durabilité, l'efficacité et la fiabilité des systèmes tribologiques utilisés dans diverses applications, allant des machines industrielles aux dispositifs médicaux.

3.1. Frottement

Le frottement peut être défini comme la force qui agit entre deux corps en contact, ce qui oppose ou ralentit leur mouvement relatif. Il s'agit de la résistance qui se manifeste lorsque des objets solides sont déplacés les uns par rapport aux autres (Figure.I.2), que ce soit par glissement ou par roulement. Le frottement est une force qui entrave ou freine le mouvement relatif entre les surfaces en contact [5] [6].

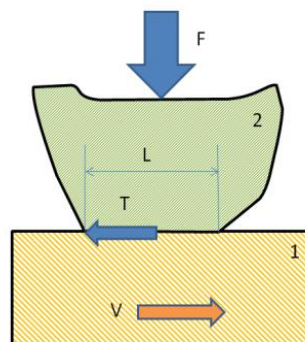


Figure.I.2.Contact entre deux solides en présence de frottement [1].

3.2. Usure

L'usure est un résultat du frottement entre les surfaces, ce qui provoque la libération de débris et entraîne une perte de matière, de dimensions et de forme. Parallèlement, cela engendre des modifications physiques et chimiques au niveau des surfaces en contact [7].

L'usure est habituellement considérée comme nuisible, mais elle peut également être bénéfique dans certaines situations. Par exemple, lors du rodage, de l'affûtage d'un outil, de la finition d'une surface par rectification, de l'écriture à l'aide de la craie sur un tableau ou du crayon sur du papier. Dans ces cas, l'usure contrôlée peut améliorer les performances, la précision ou la qualité du processus ou du produit final [8].

3.2.1. Usure adhésive

L'usure adhésive, qui est le modèle le plus fondamental, est basée sur des principes de physico-chimie. Lorsqu'il y a contact entre deux surfaces, des liaisons intermoléculaires ou interatomiques se forment à l'interface. Cela est dû à la formation et à la rupture de liens entre les deux surfaces. Ces liaisons sont le résultat des forces interatomiques interfaciales, qui dépendent du degré de pénétration des aspérités et de la composition des surfaces.

Lorsque deux matériaux entrent en contact, si les forces d'adhésion sont plus fortes que la résistance d'un des matériaux, cela peut entraîner l'arrachement de matière lorsqu'ils sont séparés par un mouvement dû à une force normale ou tangentielle (ce que l'on appelle l'usure douce) [9] [10].

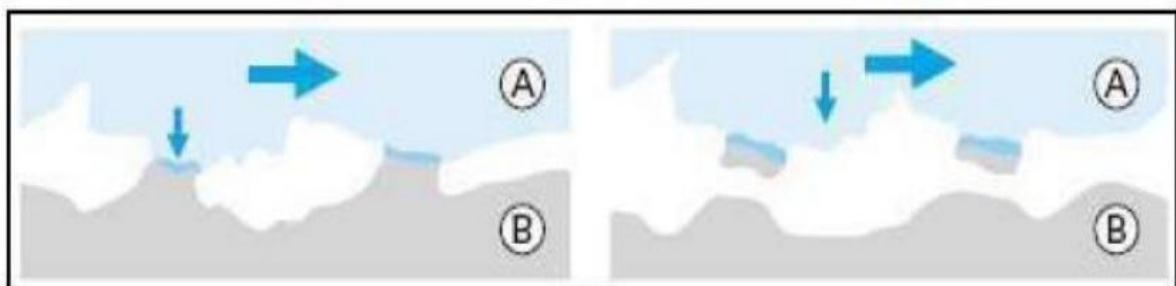


Figure.I.3. Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive [3].

3.2.2. Usure abrasive

L'usure abrasive est caractérisée par le déplacement de matière causé par des particules dures ou des protubérances dures. Cela signifie que l'usure abrasive est le résultat du frottement de glissement, que ce soit par labourage ou par déformation plastique. Il peut y avoir deux types d'usure abrasive : à deux corps (Figure.I.4(a)), où l'usure se produit directement entre les surfaces solides en contact, ou à trois corps, où des particules abrasives issues de débris d'usure ou de la pollution de l'environnement se trouvent entre les surfaces ou font partie de l'une d'elles.

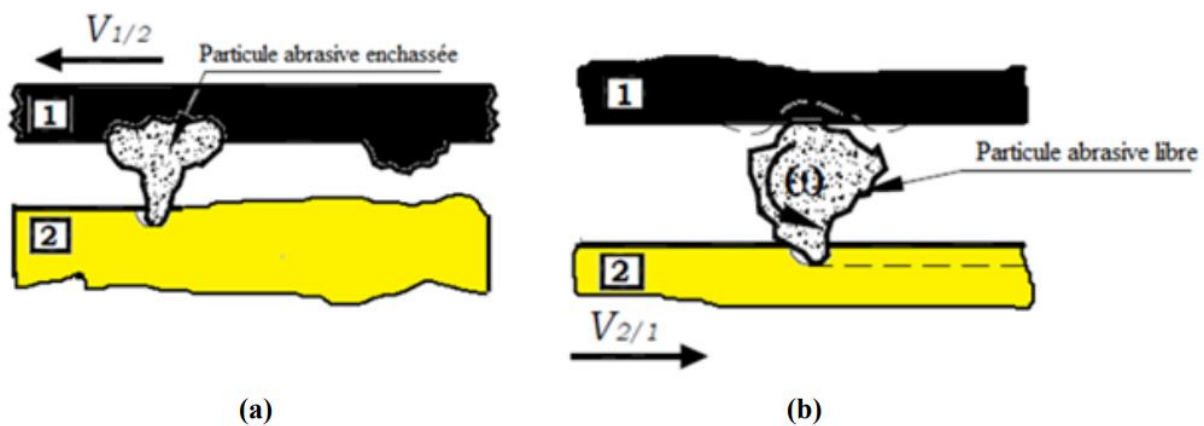


Figure.I.4. Mécanisme de l'abrasion : (a) Abrasion par effet de coupe ; (b) Abrasion par déformation [11].

Il est important de noter que l'usure abrasive est présente dans tous les systèmes mécaniques, indépendamment de leur nature. En effet, les débris d'usure générés par d'autres modes d'usure tels que l'adhésion ou la fatigue sont généralement plus durs que les surfaces en contact, ce qui contribue à l'abrasion. De plus, les grains abrasifs tels que les poussières ou le sable provenant de fonderies peuvent également participer à l'usure abrasive.

Selon Tabor, il est observé que la dureté des particules abrasives est en moyenne supérieure de 20% à celle de la surface initiale. Cela souligne que les particules abrasives sont souvent plus dures que les surfaces qu'elles usent, ce qui entraîne une détérioration supplémentaire des matériaux en contact [10].

3.2.3. Usure par fatigue

L'amorçement et la propagation des fissures de fatigue engendrent l'enlèvement de fragments entiers de matériaux. Cela peut entraîner des dommages tels que des microfissures et des zones de dégradation locale. Ce phénomène se produit en surface lorsque le coefficient de frottement est très élevé ou en sous-couche lorsqu'il est très faible [18].

3.3. Lubrification

Un lubrifiant est une substance utilisée pour remplir différentes fonctions dans un contact entre surfaces :

a-Permettre la séparation des surfaces : Cette fonction est principalement assurée par la viscosité du fluide lubrifiant. L'objectif est d'éviter le contact direct entre les solides, réduisant ainsi le frottement et l'usure.

b-Protéger les surfaces contre les réactions chimiques : Le lubrifiant agit comme une barrière protectrice en empêchant les réactions chimiques telles que la corrosion et l'oxydation entre les surfaces et leur environnement.

c-Évacuer les débris, les polluants et la chaleur : Le lubrifiant facilite l'élimination des particules d'usure, des contaminants et de la chaleur générée par le contact en les évacuant hors du système.

En général, la lubrification permet de réduire le coefficient de frottement associé à un contact glissant, ainsi que l'usure des pièces en contact [1].

Partie 02 : Matériaux et techniques expérimentales

1. Description de matériau première

Le matériau utilisé dans notre étude est un polyéthylène noir haute densité pour revêtement des tubes d'acier au sein de l'entreprise ANABIB - UNITE ALTUME, ce type de polyéthylène est connu sous le nom LUXENE HDPE 2050. Nous avons pris les échantillons de la couche extérieure du revêtement tricouche après le procédé d'extrusion. Il contient des particules fines de noir de carbone très bien dispersé, la teneur en noir de carbone dans les échantillons est de 2.3%.



Figure I.5. Echantillons de la couche extérieure en PEHD/noir de carbone.

2. Protocole expérimental pour réaliser le changement cyclique de température

Dans cette étude, nous examinons l'influence du changement cyclique de température sur des échantillons en PEHD/noir de carbone. Des cycles de chauffage (dans un four) (figure I.6) et de refroidissement (à l'air) ont été appliqués à l'échantillon, où nous avons effectué 31 cycles. Nous l'avons chauffé jusqu'à ce que la température de l'échantillon atteigne 48 °C, puis nous l'avons sorti du four et laissé refroidir à l'air jusqu'à ce que sa température atteigne 25 °C. La durée de chauffage et de refroidissement était de 5 minutes, ce qui constitue un cycle de 10 minutes. Ces conditions ont été définies de manière à reproduire les conditions environnementales d'un véritable oléoduc utilisé pour le transport des hydrocarbures dans les zones désertiques de notre pays.



Figure I.6. Le four utilisé pour le changement cyclique les échantillons composites en PEHD/noir de carbone.

3. Techniques expérimentales pour l'étude tribologique

Les techniques expérimentales appliquées à l'étude tribologique revêtent une importance primordiale pour appréhender les phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification. Elles permettent de caractériser les interactions entre les surfaces en contact, d'évaluer les performances tribologiques des matériaux et de développer des stratégies pour améliorer la durabilité et l'efficacité des systèmes tribologiques. Ces techniques incluent des tests spécifiques tels que le tribomètre et le test de rayage (scratch test).

3.1. Tribomètre

Le tribomètre utilisé pour les essais de frottement est le modèle Bille-Disque et Pion Disque, nommé "TRB6-S-DE-0000" de la marque CSM Instrument. Ce tribomètre est spécifiquement conçu pour évaluer la résistance à l'usure des surfaces soumises à des frottements. Il propose deux modes de mouvement : un mouvement alternatif et un mouvement de rotation. Le bras supérieur, également appelé porte-bille, peut être motorisé grâce à un système de positionnement vertical. Sur ce tribomètre, la force de frottement dynamique ainsi que le coefficient de frottement instantané ont été mesurés en fonction de la durée des tests [12].

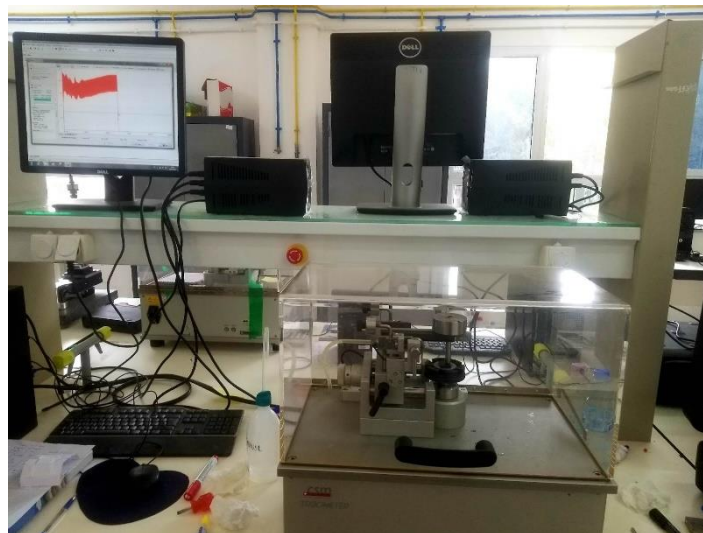


Figure.I.7.Appareil de tribomètre.

Principe : Pendant l'essai, la force de frottement tangentielle, F_t , provoque un déplacement latéral du bras élastique qui soutient la tige porte-bille. La déformation élastique du bras est mesurée à l'aide d'un capteur inductif, à partir de laquelle la valeur de F_t est déterminée. En connaissant la charge normale, F_n , le logiciel d'acquisition et de traitement des données calcule le coefficient de frottement, μ , en utilisant sa définition. Cette valeur est ensuite enregistrée en fonction du nombre de tours (temps) dans le logiciel [16].

Lors de nos essais tribologiques, nous avons pris en compte plusieurs paramètres essentiels pour obtenir des résultats fiables et significatifs

- La nature de la bille utilisée
- Le diamètre de la bille
- La force normale appliquée
- La vitesse linéaire
- La distance parcourue pendant l'essai
- Le temps (durée de l'essai)
- La température
- Fluide de lubrification
- Atmosphère

3.2. Test de rayage (Scratch Test)

Le test de rayage implique de faire glisser une pointe ou un stylet sur la surface du matériau avec une force constante ou progressive.

La machine de test de rayage (Figure.I.8), également connue sous le nom de scratch test, est de mesurer la résistance d'un matériau à la déformation et à l'endommagement.

Le déroulement des tests de rayure est composé de deux étapes : une première étape d'indentation avec un effort normal initial et une seconde étape de rayure où l'indenteur est déplacé avec un effort normal croissant selon une direction parallèle à la surface de l'échantillon. Les tests de rayure ont permis de collecter plusieurs paramètres à savoir : la force tangentielle, la profondeur de pénétration, la profondeur résiduelle et l'émission acoustique.



Figure.I.8. Scratch test.

4. Analyse des surfaces

L'analyse des surfaces joue un rôle crucial dans l'étude des matériaux et des surfaces, fournissant des informations détaillées sur leur topographie, leur structure et leurs propriétés. Deux techniques largement utilisées pour cette analyse sont la microscopie optique et la profilométrie.

4.1. Microscopie optique

Le microscope optique (Figure.I.9) occupe une place primordiale dans les domaines des sciences et de la recherche en offrant la possibilité d'observer des échantillons à une échelle microscopique. Le modèle Nikon Eclipse LV150N est largement utilisé dans divers domaines, notamment la recherche des matériaux. Il a été spécialement conçu pour offrir une observation précise et détaillée des échantillons en combinant une optique de haute qualité avec des fonctionnalités avancées. Ce microscope offre une résolution optique élevée, ce qui permet de visualiser des structures fines et des détails subtils présents dans les échantillons. Il est équipé d'un ensemble de lentilles objectives interchangeable offrant différents niveaux de grossissement d'image (X 100, X 200, X 500, X 1000, X 1500), ce qui permet d'observer les échantillons à différentes échelles selon les besoins de l'observation.



Figure.I.9.microscope optique.

4.2. Profilométrie

Le profilomètre 3D (Figure.I.10) est un instrument de mesure largement utilisé dans divers domaines tels que la recherche, l'industrie et les sciences des matériaux. Son rôle principal est de caractériser avec précision la topographie des surfaces à l'échelle micro et nanométrique. En capturant des informations détaillées sur les variations de hauteur et de forme des échantillons, le profilomètre 3D permet d'évaluer des caractéristiques essentielles telles que la rugosité, la planéité et la rectitude. Cet instrument utilise des capteurs optiques ou mécaniques avancés pour numériser la surface de l'échantillon et générer une représentation tridimensionnelle précise. Grâce à cette visualisation en 3D, il devient possible d'analyser en profondeur les caractéristiques de surface, ce qui est précieux pour la conception de produits, le contrôle qualité et la recherche scientifique. En résumé, le profilomètre 3D est un outil essentiel pour comprendre et optimiser les propriétés des surfaces dans de nombreux secteurs d'activité.



Figure.I.10.Appareillage d'un profilomètre 3D.

5. Paramètres tribologiques couramment mesurés

Les paramètres tribologiques sont des mesures essentielles dans l'étude des phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification. Ils permettent de caractériser les interactions entre les surfaces en mouvement et d'évaluer les performances et la durabilité des matériaux. Parmi les paramètres tribologiques couramment mesurés, on retrouve le coefficient de frottement, la résistance à l'usure et la rugosité de surface.

5.1. Coefficient de frottement

Le frottement se produit lorsque deux surfaces en contact se déplacent tangentiellement l'une par rapport à l'autre. La résistance au frottement est mesurée par la force T qui s'oppose à ce mouvement. Le coefficient de frottement μ est défini comme le rapport entre la résistance au frottement et la force normale N exercée entre les deux surfaces en contact [10] :

$$\mu = T/N$$

On distingue deux types de coefficients de frottement : le coefficient de frottement statique μ_s , également appelé coefficient de démarrage ou d'adhérence, qui correspond à la force tangentielle minimale nécessaire pour initier le mouvement (glissement ou roulement), et le coefficient de frottement dynamique μ_d , qui représente la force tangentielle minimale nécessaire pour maintenir un mouvement non nul dans le temps après le démarrage. La résistance au frottement a principalement deux origines [10] [13] :

- La présence d'aspérités sur les surfaces de contact.
- L'adhérence entre les surfaces.

-Chemin de glissement parcouru

La figure.I.11 illustre la variation du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches en fonction du chemin de glissement. Elle permet de distinguer six stades distincts dans cette évolution :

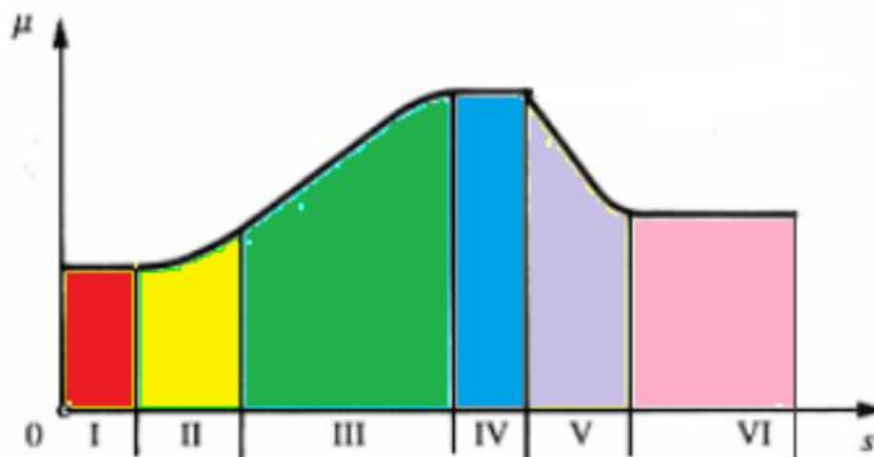


Figure.I.11. Evolution du frottement avec la distance de glissement [14].

I : Au départ, les surfaces sont propres, et le frottement est principalement causé par des processus de labourage et de déformation.

II : Le frottement commence à augmenter lentement en raison de petites déchirures dans le matériau.

III : Le coefficient de frottement augmente à mesure que des débris d'usure se logent entre les surfaces, entraînant un labourage intensif.

IV : Le coefficient de frottement atteint un état stable lorsque le nombre de nouveaux débris d'usure égale celui des débris qui quittent la surface.

V : Parfois, il est observé que lorsqu'un matériau dur frotte contre une surface tendre, celui-ci se polie. Cela entraîne une diminution du coefficient de frottement, car le labourage devient moins intense.

VI : Lorsque les deux surfaces s'érodent et que les débris d'usure sont éliminés ou suffisamment incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure, le coefficient de frottement atteint une valeur constante à la fin du rodage. Ces étapes de rodage dépendent des matériaux, des conditions expérimentales, de la contamination des surfaces et des conditions ambiantes [10].

5.2. Taux d'usure

Le taux d'usure est une mesure utilisée pour quantifier la détérioration d'une surface due au phénomène de frottement, d'abrasion ou de contact répété avec d'autres matériaux. Il représente la vitesse à laquelle le matériau est perdu ou érodé d'une surface au fil du temps ou de la distance parcourue.

Plusieurs paramètres influencent sur le taux d'usure, comme cela a été établi [13] :

- Les conditions opératoires telles que la charge appliquée, la température, la vitesse de frottement et la pression de contact.
- L'aire de contact entre les surfaces en frottement.
- L'état physico-chimique des surfaces frottantes, comprenant la rugosité des surfaces et la présence de couches d'oxyde.
- Les propriétés mécaniques des matériaux en présence, notamment la dureté.
- La présence ou l'absence d'un lubrifiant lors du frottement.

5.3. Rugosité de surface

Une surface réelle usinée n'est jamais parfaitement lisse et présente des défauts résultant d'erreurs systématiques et d'imperfections admises lors de la fabrication. Ces défauts peuvent se présenter sous forme de défauts de forme, tels que des ondulations ou des défauts macro-géométriques, ainsi que de petites irrégularités connues sous le nom de rugosité (Figure.I.12). La rugosité est caractérisée par des aspérités ou "pics" et des cavités ou "creux" par rapport à une ligne moyenne. Ces irrégularités sont présentes sur la surface en fonction du procédé d'usinage, des outils utilisés et du matériau [15].

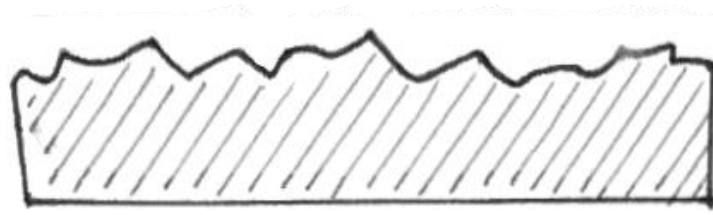


Figure.I.12. Surface rugueuse.

Principaux paramètres de la rugosité [17] :

Un grand nombre de critères sont définis dans la normalisation pour caractériser une rugosité mais en pratique dans un profil et sur une longueur considérée seuls trois d'entre eux sont retenus :

- "**Ra**" : écart moyen, c'est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts, entre les pics et Les creux. "**Ra**" mesure la distance entre cette moyenne et la ligne centrale. On admet couramment que cette notion synthétise approximativement les différents paramètres intéressés dans la rugosité.
- "**Rt**" : écart total, c'est la dénivellation la plus importante entre le plus haut sommet d'un pic et le fond le plus bas d'un creux.
- "**Rz**" : régularité, c'est la moyenne des écarts totaux de rugosité "**Rt**" observés sur 5 longueurs.

Chapitre II : Résultats et Discussions

Chapitre II : résultats et discussions

Ce chapitre expose et discute les résultats trouvés

1. Tribomètre

1.1. Coefficient de frottement

Pour déterminer le coefficient de frottement des deux échantillons, avant et après les cycles thermiques, nous avons utilisé un tribomètre de type Bille-Disque et Pin Disque, modèle "TRB6-S-DE-0000" de la marque CSM Instrument. Nous avons réalisé deux essais avec des vitesses différentes tout en maintenant les autres paramètres identiques. Le tableau.II.1.regroupe les paramètres appliqués aux deux échantillons :

Tableau.II.1.les paramètres utilisés dans l'appareil de tribomètre

Echantillons	Essai 01	Essai 02
Partenaire statique	- Substrat : ALUMINA - Dimension : 6,00 [mm] - Géométrie : Ball	- Substrat : ALUMINA - Dimension : 6,00 [mm] - Géométrie : Ball
Acquisition	- Rayon : 5,10 [mm] - Vitesse lin. : 1,00 [cm/s] - Force normale : 5,00 [N] - Condition d'arrêt : 24,00 [m] -Temps : 40 [min]	- Rayon : 5,10 [mm] - Vitesse lin. : 1,90 [cm/s] - Force normale : 5,00 [N] - Condition d'arrêt : 24,00 [m] -Temps : 40 [min]
Environment	- Température : 25,00 [°C] - Atmosphère : Air - Humidité : 50,00 [%]	- Température : 25,00 [°C] - Atmosphère : Air - Humidité : 50,00 [%]

Résultats :

Tableau.II.2.coefficient de frottement moyen

Echantillons	coefficient de frottement moyen de l'essai 01	coefficient de frottement moyen de l'essai 02
Ech avant	0,132	0,113
Ech après	0,160	0,117

D'après les résultats du coefficient de frottement, une légère augmentation a été observée pour les deux essais. Pour l'essai 01, le coefficient de frottement de l'échantillon brut était de 0,132, tandis qu'il atteint une valeur de 0,16 pour l'échantillon traité. Pour l'essai 02, le coefficient de frottement de l'échantillon avant traitement est de 0,113, et il est passé à 0,117 pour l'échantillon après les cycles de température.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette augmentation du coefficient de frottement. Tout d'abord, les cycles thermiques ont entraîné une diminution de la rugosité de la surface des

échantillons, comme observé par le microscope optique, ce qui diminue le coefficient de frottement.

De plus, les cycles thermiques ont également augmenté la dispersion de noir de carbone dans le matériau, comme indiqué par les résultats de l'analyse FTIR. Le noir de carbone, étant une charge de renfort, confère une certaine rigidité au matériau (augmentation du module de Young, comme observé lors de l'essai de traction). Cette augmentation de rigidité contribue à une augmentation du coefficient de frottement.

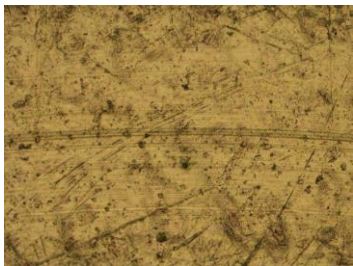
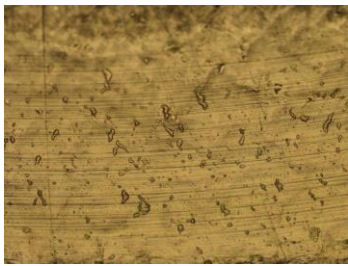
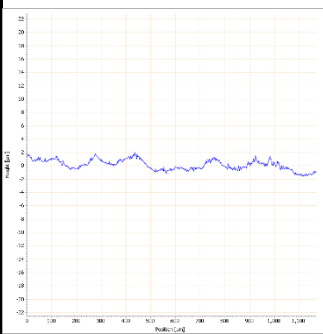
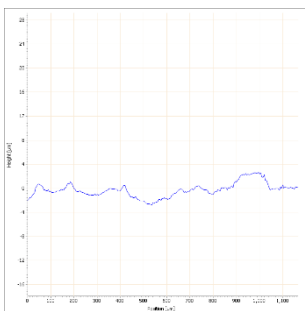
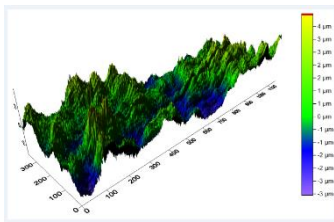
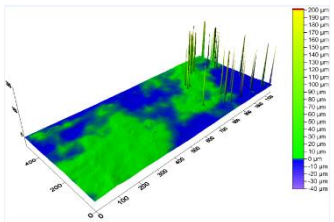
Ces facteurs combinés, à savoir la diminution de la rugosité de la surface et l'amélioration de la dispersion de noir de carbone dans la matrice polymérique, ont conduit à une légère augmentation du coefficient de frottement.

1.2. Taux d'usure

Résultats : Pour l'essai 01

Le tableau.II.3.représente les résultats obtenus de microscopie optique et de profilomètre 2D et 3D.

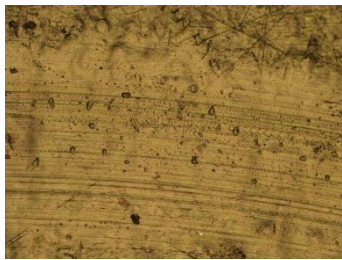
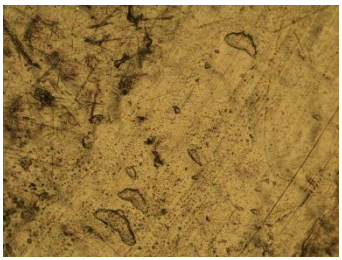
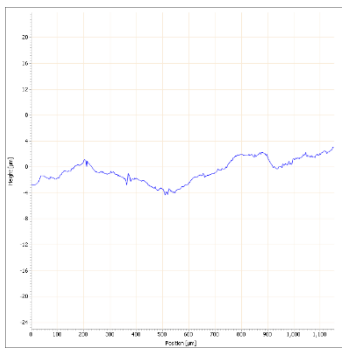
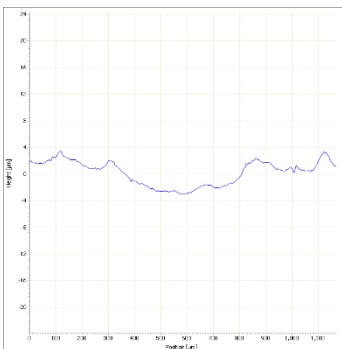
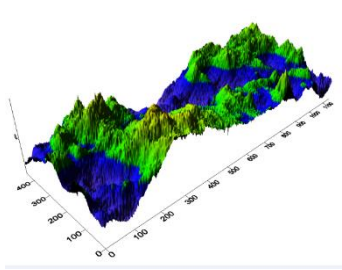
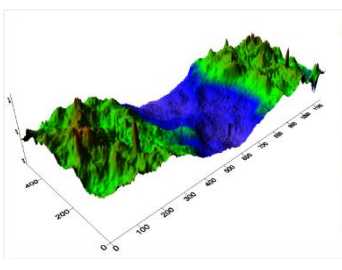
Tableau.II.3.results obtenir a partire de microscope optique et profilomètre 2D et 3D

Echantillons	Ech avant	Ech apres
Trace de l'usure		
Profil 2D		
Profil 3D		

Pour l'essai 02

Les résultats obtenus de microscopie optique et de profilomètre 2D et 3D sont présentés dans le tableau.II.4.

Tableau.II.4.results obtenir a partire de microscope optique et profilomètre 2D et 3D

Echantillons	Ech avant	Ech apres
Trace de l'usure		
Profile 2D		
Profile 3D		

Les taux d'usure en se basant sur le profil 2D sont respectivement :

Tableau.II.5.le taux d'usure

Echantillons	Taux d'usure de l'essai 01	Taux d'usure de l'essai 02
Ech avant	$4,183 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/m}$	$1,215 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N/m}$
Ech apres	$1,128 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N/m}$	$2,298 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N/m}$

D'après les résultats du taux d'usure, une augmentation a été observée pour les deux essais. Pour l'essai 01, le taux d'usure de l'échantillon avant traitement est de $4,183 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N/m}$, tandis qu'il est de $1,128 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N/m}$ pour l'échantillon après traitement. Pour l'essai 02, il a été trouvé que le coefficient de frottement de l'échantillon brut était de $1,215 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N/m}$, et il est passé à $2,298 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N/m}$ pour l'échantillon après les cycles de température.

Donc, on peut conclure que les échantillons après les cycles de température présentent une moindre résistance à l'usure.

2. Scratch test

2.1. Le taux de retour élastique

Nous nous intéressons dans cette partie aux résultats expérimentaux relevés suite à la réalisation des tests de rayage à charge progressive. Les paramètres des tests sont :

- Charge initiale (N) : 1
- Charge finale (N) : 30
- Vitesse de charge (N/min) : 46,4
- Longueur (mm) : 5
- Vitesse (mm/min) : 8

Résultats :

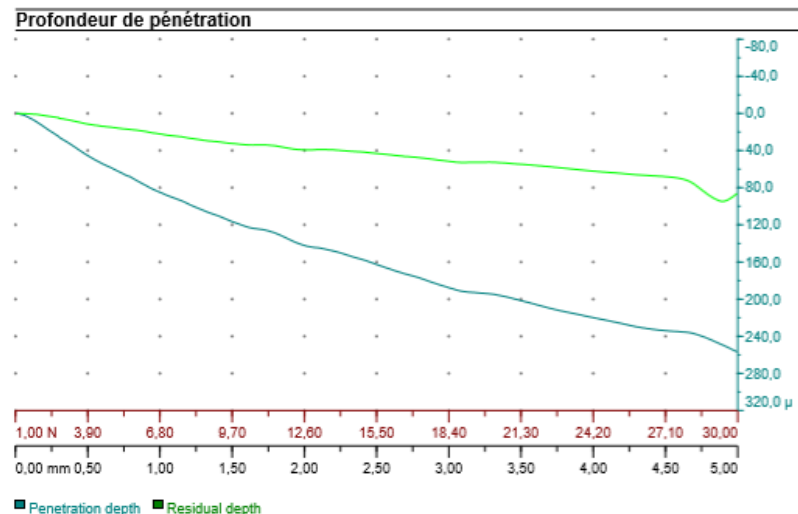


Figure.II.1.variation de la profondeur de pénétration en fonction de la charge appliquée pour l'échantillon avant les cycles thermiques

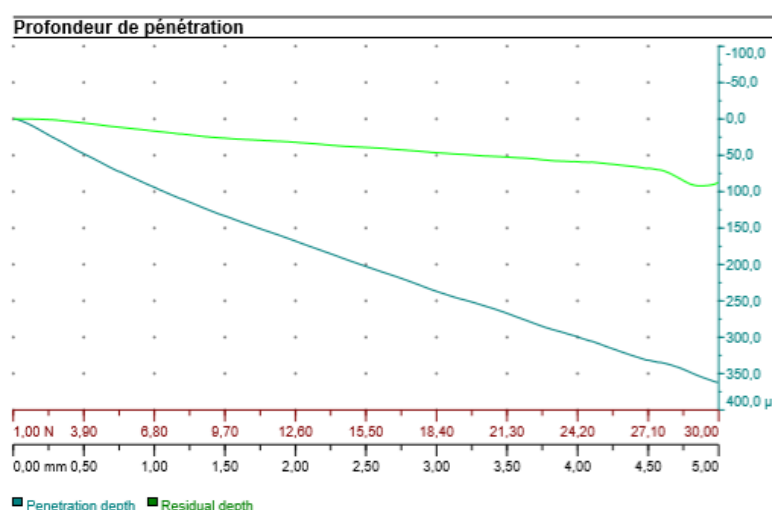


Figure.II.2.variation de la profondeur de pénétration en fonction de la charge appliquée pour l'échantillon après les cycles thermiques

Calculer Le taux de retour élastique :

$$Re = (Pd - Rd).100 / Pd$$

Dans cette formule, "Re" représente le taux de retour élastique, "Pd" correspond à la profondeur de pénétration et "Rd" est la profondeur résiduelle.

Tableau.II.6.le taux de retour élastique

Echantillons	profondeurs de pénétration (Pd)	profondeurs de résiduelle(Rd)	taux de retour élastique
Ech avant	256,12 μm	87,14 μm	65,97%
Ech apres	361,88 μm	87,02 μm	75,95%

Le taux de retour élastique mesure la capacité d'un matériau à récupérer sa forme initiale après avoir subi une déformation élastique. Plus le taux de retour élastique est élevé, plus le matériau a la capacité de revenir à sa forme d'origine.

Nous avons observé une augmentation du taux de retour élastique de l'échantillon après les cycles de température par rapport à l'échantillon avant. Cela suggère que les cycles de température induisent des changements dans les propriétés mécaniques du matériau, ce qui améliore sa capacité à retrouver sa forme initiale après déformation, cela peut être aussi attribué à l'augmentation de l'élasticité du matériau après les cycles thermiques.

Conclusion générale

L'objectif est d'étudier l'influence du changement cyclique de température sur le comportement tribologique du composite PEHD/noir de carbone. Pour atteindre cet objectif, nous nous concentrerons sur l'analyse de différents phénomènes tribologiques, Le travail que nous avons réalisé nous a permis de relever les points suivants :

- Les cycles thermiques induisent une diminution de la rugosité de surface et améliorent la dispersion du noir de carbone dans la matrice polymérique, ce qui entraîne une légère augmentation du coefficient de frottement.

- Les cycles de température ont un impact négatif sur les propriétés tribologiques de la couche extérieure (PEHD/Noir de carbone) du revêtement tricouche, ce qui se traduit par une réduction de sa résistance à l'usure.

- Les cycles de température induisent une augmentation du taux de retour élastique, ce qui se traduit par une augmentation de l'élasticité de la couche extérieure (PEHD/Noir de carbone) du revêtement tricouche.

Références

- [1] Noël Brunetière ; Introduction à la tribologie ; Institut Pprime – Futuroscope 2015.
- [2] Dr. BENDAOUED Nadia , Polycopié de Cours Tribologie (2020-2021).
- [3] Delqué, M. (2007). Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma (Doctoral dissertation).
- [4] M. Cartier, P. Kapsa, "Usure des contacts mécaniques - Eléments de tribologie", Techniques de l'Ingénieur BM5066, p. 1-13, 2001.
- [5] Larab, N. Chalal, O. (2017) Contribution à l'optimisation des pertes d'énergies d'une pièce tournante à l'aide d'une lubrification optimale combiné d'un dépôt obtenu par projection thermique. (Master, Université de Bejaia).
- [6] J. Dhers, "Usure, avaries et corrosion". Facteur de destruction des matériels industriels. Ed 1978.
- [7] P. Kapsa, M. Cartier, Usure des contacts mécaniques-Manifestation de l'usure, Techniques de l'ingénieur, 2001, BM 5067.
- [8] O. Barrau, "Etude tribologique de revêtement en régulation de turbines", Rapport de stage Turboméca, ENIT, 1999.
- [9] F. P. Bowden, D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids I", Clarendon Press, Oxford 1950.
- [10] ELHADI Abdelmalek, "PROCESSUS DE FORMATION ET DE RUPTURE DES COUCHES D'OXYDES DANS LE CONTACT TOURNANT SEC ACIER-ACIER : CONSÉQUENCES SUR LE FROTTEMENT ET L'USURE ", THÈSE de doctorat.

- [11] J. Ayel. "Les différentes formes tribologiques d'usure des surfaces métalliques". Rev. IFP, Vol. 31, No. 4, pp. 703-728, 1976.
- [12] Brahim Tlili ; Caractérisation de films durs multicouches élaborés par pulvérisation magnétron. Influence des conditions d'élaboration sur leurs propriétés ; 6 Mar 2011.
- [13] R. Courtel, Le frottement sec, Revue Française de Mécanique, No 66, pp.23-29,1978.
- [14] G. Spinnler, "Conception des machines". Principe et application, 1 Statique 1997
- [15] A. Cornet et J.-P. Deville ; physique et ingénierie de surface ; chap 01 Propriétés physicochimiques des surfaces ; EDP Sciences 1998.
- [16] Bouhelal, N. (2016). Etude des propriétés tribologiques des cermets à base de WC infiltrés par un alliage de cuivre (Thèse de doctorat).
- [17] All Cut instruments, principe de la mesure, www.mesures.com www.allCut.biz.
- [18] Basma BEN DHIFALLAH(2014),Contribution à l'étude du comportement tribologique et des propriétés mécaniques de polymères thermoplastiques chargés de lubrifiants solides en poudre(thèse de doctorat).