



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -
ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGÉNIERIE -
ANNABA -
(Ex ENSMM)

DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNIQUES
FILIÈRE : MÉTALLURGIE
SPÉCIALITÉ : INGÉNIERIE DES SURFACES

Intitulé : Influence du changement des paramètres de tribologie sur le comportement de
PEHD/noir de carbone

Présenté par

Haythem GUERAICHE

Encadrant	Grade	Établissement d'affiliation
Dr. Louiza BENDJEDDOU	MCB	ENSTI Annaba
Président	Grade	Établissement d'affiliation
Pr. Mohamed RETIMA	Pr	ENSTI Annaba
Examineur(s)	Grade	Établissement d'affiliation
Dr. Yasmina TAIBI	MCA	ENSTI Annaba

Année 2022/ 2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE 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. LERINA Nourma
Président(e) du jury de soutenance de mémoire de Master, déclare avoir autorisé
M. Gueriche Haythem
à déposer son mémoire de Master après avoir apporté les corrections signalées
par les membres du jury.

Avis du Promoteur :

D^r BEN DJE DDOU L
411

Avis de l'Examineur :

Avis favorable; le 04/07/23
[Signature]

Président du Jury

[Signature]

Remerciements

الحمد لله

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents et ma famille pour leur soutien inestimable tout au long de mon parcours.

Un remerciement spécial à mon encadrant, Dr. Bendjeddou Louiza, pour ses efforts et ses remarques précieuses.

Je tiens à adresser mes remerciements particuliers à Madame Dr. Taibi Yasmina d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire. Je remercie également Monsieur le Professeur Mohamed Retima d'avoir présidé le jury de ce mémoire.

Je suis reconnaissant envers le personnel du laboratoire et du département de production de m'avoir accueilli à ALTUMET.

Je tiens à exprimer mes remerciements au personnel du laboratoire de l'ENSTI Annaba pour leur aide dans la réalisation de ce travail.

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف سلوك التآكل للبولي إيثيلين ذو الكثافة العالية (HDPE) المشحون بالكربون الأسود. تركز الدراسة على فهم كيفية استجابة المادة لظروف التآكل المختلفة. تم إجراء اختبارات تجريبية باستخدام جهاز تآكل و جهاز قياس حالة السطح الثلاثي الأبعاد وأيضا المجهر البصري. تعطي النتائج التي تم الحصول عليها نظرة قيمة حول خصائص التآكل ومعامل الاحتكاك للمادة المركبة (بولي إيثيلين ذو كثافة عالية مشحون بالكربون الأسود). من خلال تحليل البيانات، تم تحديد الاتجاهات والأنماط في الأداء التآكلي للمادة. تساهم نتائج هذه الدراسة في فهم أفضل لخصائص التآكل للمادة المركبة كما يمكن أن توجه أيضا لتحسين ظروف التآكل في التطبيقات العملية.

الكلمات المفتاحية: سلوك التآكل، بولي إيثيلين ذو الكثافة العالية (HDPE)، مركب الكربون الأسود، ظروف التآكل، جهاز التآكل، قياس حالة السطح الثلاثية الأبعاد، المجهر البصري، خصائص التآكل.

Abstract

This work aims to investigate the tribological behavior of a high-density polyethylene (HDPE) charged with carbon black composite. The study focuses on understanding how the material responds to different tribological conditions. Experimental tests were conducted using a tribometer, 3D roughness measurement, and optical microscopy. The results obtained provide valuable insights into the wear characteristics and friction coefficient of the composite material. By analyzing the data, trends and patterns in the tribological performance were identified. The findings of this study contribute to a better understanding of the material's tribological properties and can potentially guide the optimization of tribological conditions for practical applications.

Keywords: Tribological behavior, High-density polyethylene (HDPE), Carbon black composite, Tribological conditions, Tribometer, 3D roughness measurement, Optical microscopy, Wear characteristics.

Résumé

Ce travail vise à étudier le comportement tribologique d'un polyéthylène de haute densité (PEHD) chargé de noir de carbone. L'étude se concentre sur la compréhension de la façon dont le matériau répond à différentes conditions tribologiques. Des tests expérimentaux ont été réalisés à l'aide d'un tribomètre, d'une mesure de la rugosité 3D et de la microscopie optique. Les résultats obtenus fournissent des indications précieuses sur les caractéristiques d'usure et le coefficient de frottement du matériau composite. L'analyse des données a permis d'identifier des tendances et des modèles de performances tribologiques. Les résultats de cette étude contribuent à une meilleure compréhension des propriétés tribologiques du matériau et peuvent potentiellement guider l'optimisation des conditions tribologiques pour des applications pratiques.

Mots-clés : Comportement tribologique, Polyéthylène haute densité (PEHD), Composite de noir de carbone, Conditions tribologiques, Tribomètre, Mesure de la rugosité 3D, Microscopie optique, Caractéristiques d'usure.

Table des matières

Introduction Générale	vi
Chapitre I. Introduction aux polymères	2
I.1. Introduction	2
I.2. Types de polymères	2
I.2.1. Homopolymères	2
I.2.2. Comopolymères	2
I.3. Structure des polymères	3
I.3.1. Polymères linéaires	3
I.3.2. Polymères ramifiés	4
I.3.3. Polymères réticulés	4
I.4. Polymères thermoplastiques	5
I.4.1. Classification des polymères par structure physique	5
I.5. Informations générales sur le polyéthylène	6
I.6. Tribology des polymères	6
I.6.1. Frottement des polymères	7
I.6.2. Usure des polymères	7
Chapitre II. Analyse expérimentale du comportement tribologique	13
II.1. Introduction	13
II.2. Essai au tribomètre	13
II.2.1. Dispositif expérimental et méthodologique	13
II.2.2. Analyse et détermination du coefficient de frottement	14
II.2.3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance	15
II.3. Mesure de la rugosité 3D	16
II.3.1. Analyse du taux d'usure	16
II.3.2. Analyse de la rugosité de surface	17
II.4. Examen au microscope optique	18
II.4.1. Dispositif expérimental et méthodologique	18
II.4.2. Analyse des caractéristiques d'usure	19
Conclusion Générale	21
Références Bibliographiques	22

Liste des Figures

Figure I.1 : Un exemple d'homopolymère [1].	2
Figure I.2 : Exemple de copolymère [1].	3
Figure I.3 : Représentation schématique des polymères linéaires : (a) Homopolymère. (b) Copolymère aléatoire. (c) Copolymère alternatif. (d) Copolymère à blocs [2].	3
Figure I.4 : Représentation schématique des polymères ramifiés ((a) homopolymère ramifié et (b) copolymère ramifié) [2].	4
Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère réticulé [3].	5
Figure I.6 : Schéma de l'usure adhésive [11].	8
Figure I.7 Schéma de l'usure abrasive [11].	9
Figure I.8 : Schéma de l'usure par fatigue [11].	10
Figure I.9 : Schéma de l'usure par érosion [12].	11
Figure II.1 : Tribomètre standard de CSM Instruments.	14
Figure II.2 : Résultats du coefficient de frottement.	15
Figure II.3 : Graphiques du coefficient de frottement en fonction de la distance.	16
Figure II.4 : Résultats du taux d'usure pour chaque échantillon.	17
Figure II.5 : Images 3D de la morphologie des cercles d'usure (a) Échantillon 2, (b) Échantillon 3, (c) Échantillon 4, (d) Échantillon 5.	18
Figure II.6 : Rugosimètre 3D de cybertechnologies.	19
Figure II.7 : Images au microscope des échantillons (a) Échantillon 1, (b) Échantillon 2.	19
Figure II.8 : Images au microscope des échantillons (a) échantillon 3, (b) échantillon 4, (c) échantillon 5.	20

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Conditions d'essai pour chaque échantillon.	14
Tableau II.2 : Résultats de coefficient de frottement.	15
Tableau II.3 : : Résultats du taux d'usure.	16

Introduction Générale

L'étude de la tribologie, qui englobe la science et l'ingénierie des surfaces en interaction et en mouvement relatif, est d'une importance capitale dans divers domaines de la science et de l'ingénierie des matériaux. Les phénomènes tribologiques, tels que le frottement, l'usure et la lubrification, ont un impact significatif sur les performances, la durabilité et la fiabilité des matériaux et des composants dans diverses applications.

Dans leur quête de connaissances tribologiques, les ingénieurs et les chercheurs se heurtent souvent à des difficultés lorsqu'ils mènent leurs recherches. L'un des obstacles les plus courants est l'indisponibilité d'équipements spécialisés ou de machines d'essai spécifiquement adaptés à leurs besoins de recherche. De telles limitations peuvent entraver l'exploration approfondie du comportement des matériaux dans différentes conditions tribologiques.

L'absence de machines d'essai appropriées oblige les chercheurs à rechercher des solutions alternatives et à adapter les ressources disponibles pour répondre à leurs besoins. Dans ces situations, la créativité et l'ingéniosité entrent en jeu, car les ingénieurs s'efforcent d'optimiser leurs montages expérimentaux à l'aide de l'équipement disponible. Cette approche adaptative leur permet non seulement de mener des recherches significatives, mais favorise également l'innovation dans la résolution des problèmes et la conception des expériences.

Ce travail, L'étude tribologique du composite PEHD/noir de carbone a été réalisée dans les limites du tribomètre disponible dans notre école. Malgré ses limites, un plan expérimental complet a été conçu pour étudier la réponse tribologique du composite dans diverses conditions. En sélectionnant et en manipulant soigneusement les paramètres disponibles, des informations précieuses ont été obtenues sur les performances du matériau en cas de contact glissant.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette recherche mettent en lumière le comportement tribologique du composite PEHD/noir de carbone et fournissent des indications précieuses pour l'optimisation de ses performances. En outre, ce travail souligne l'importance de trouver des solutions innovantes et de tirer le meilleur parti des ressources disponibles pour surmonter les limites et faire progresser les connaissances scientifiques.

En tenant compte des limites de l'équipement disponible et en adaptant avec succès le dispositif expérimental, cette étude met en évidence l'ingéniosité et les capacités de résolution de problèmes qui font partie intégrante de la recherche scientifique. Elle souligne l'importance d'exploiter les ressources existantes pour mener des recherches significatives, même face à des contraintes. Cette approche adaptative permet non seulement d'obtenir des informations précieuses, mais aussi de contribuer au développement de solutions pratiques pour des applications concrètes.

Chapitre I : Introduction aux polymères

Chapitre I. Introduction aux polymères

I.1. Introduction

Les polymères sont devenus indispensables dans de nombreuses industries en raison de leurs propriétés exceptionnelles, de leur polyvalence et de leur rentabilité. Ces matériaux sont largement utilisés dans des applications allant de l'emballage et des composants automobiles aux appareils médicaux et aux matériaux de construction. Pour maximiser les avantages des polymères et garantir leur performance optimale, il est essentiel de comprendre leur comportement dans différentes conditions environnementales et opérationnelles. Ce chapitre constitue une introduction approfondie à l'étude, offrant une vue d'ensemble des polymères thermoplastiques, avec un accent particulier sur le polyéthylène, et approfondissant le domaine de la tribologie des polymères, qui englobe l'étude des phénomènes de frottement et d'usure dans les matériaux polymères.

I.2. Types de polymères

I.2.1. Homopolymères

Les homopolymères sont des polymères composés d'une seule unité structurelle récurrente qui se répète constamment le long de la chaîne polymère. Ils sont formés par la polymérisation d'un seul monomère.

La structure des homopolymères peut varier en fonction du type de liaison entre les unités récurrentes de la chaîne polymère. Ces liaisons déterminent la manière dont les unités récurrentes sont reliées entre elles. La figure I.1 illustre un exemple d'un homopolymère.

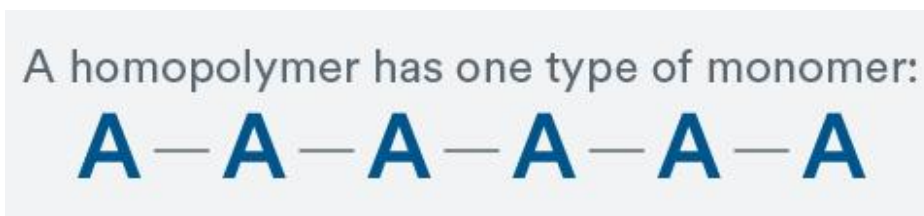


Figure I.1: Un exemple d'homopolymère [1].

I.2.2. Copolymères

Un copolymère est un composé macromoléculaire formé par la polymérisation de deux monomères distincts, appelés comonomères. La disposition des comonomères, en particulier les unités A et B, dans la chaîne polymère détermine la structure et les propriétés du copolymère.

Le processus de polymérisation des monomères A et B peut se dérouler de différentes manières et donner lieu à différents types de copolymères. La disposition et la distribution des unités A et B le long de la chaîne polymère peuvent avoir un impact significatif sur les caractéristiques et le comportement du copolymère. La figure I.2 illustre un exemple d'un copolymère.

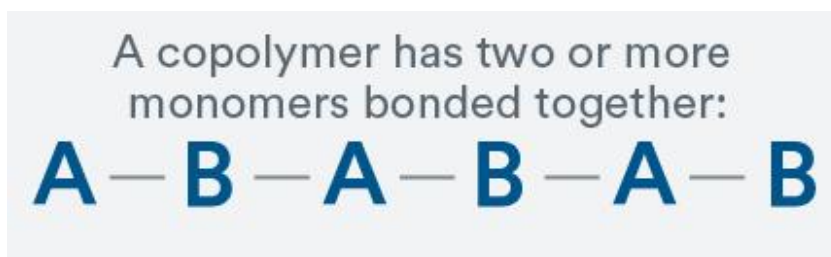


Figure I.2: Exemple de copolymère [1].

I.3. Structure des polymères

Selon le type de liaison entre les chaînes moléculaires d'un polymère, on distingue trois types de polymères : les polymères linéaires, les polymères ramifiés et les polymères réticulés.

I.3.1. Polymères linéaires

La forme la plus simple des polymères consiste en une séquence d'unités monomères disposées de manière linéaire. Ces monomères sont reliés par des liaisons chimiques qui vont dans une seule direction, ce qui entraîne la formation de chaînes moléculaires linéaires. Cette structure linéaire est représentée visuellement dans la figure I.3, qui illustre l'organisation des macromolécules polymères.

Dans un polymère linéaire, chaque unité monomère est liée aux monomères adjacents par des liaisons covalentes, créant ainsi une chaîne continue. L'arrangement linéaire des chaînes moléculaires confère des propriétés spécifiques aux polymères, telles que la flexibilité, l'élongation et la capacité à se déformer lorsqu'ils sont soumis à des forces externes. En outre, la linéarité des chaînes moléculaires joue un rôle important dans la détermination des caractéristiques mécaniques, thermiques et optiques du matériau polymère [16].

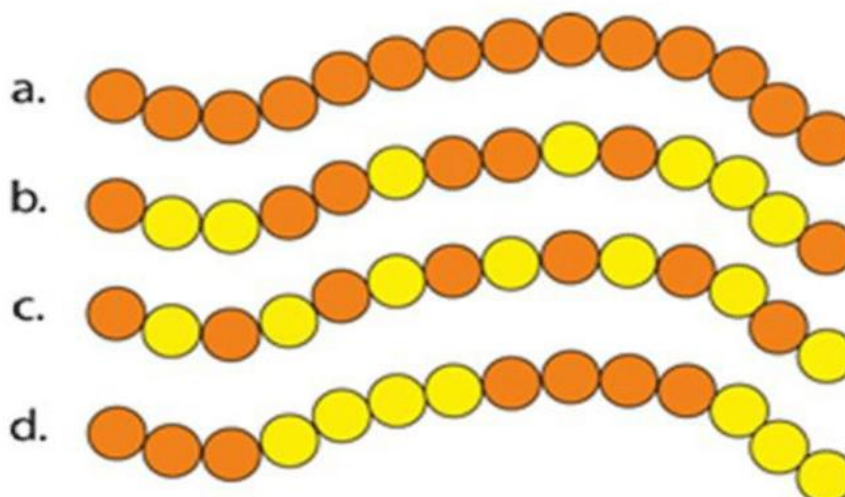


Figure I.3: Représentation schématique des polymères linéaires : (a) Homopolymère. (b) Copolymère aléatoire. (c) Copolymère alternatif. (d) Copolymère à blocs [2].

1.3.2. Polymères ramifiés

Un polymère linéaire peut parfois présenter des "accidents" de polymérisation, où des branches ou des groupes latéraux se forment le long de la chaîne principale. Ce type de polymère est connu sous le nom de polymère ramifié et est représenté schématiquement dans la figure I.4.

Les polymères ramifiés se distinguent des polymères linéaires par la présence de chaînes latérales qui se greffent sur la chaîne principale. Ces chaînes latérales peuvent être formées pendant la réaction de polymérisation ou résulter de modifications ultérieures du polymère. Les groupes latéraux peuvent varier en taille, en forme et en nature chimique, ce qui influence les propriétés et les comportements du polymère ramifié [17].

La présence de branches dans les polymères ramifiés entraîne des changements dans leur structure moléculaire, ce qui se traduit par des variations de leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques.

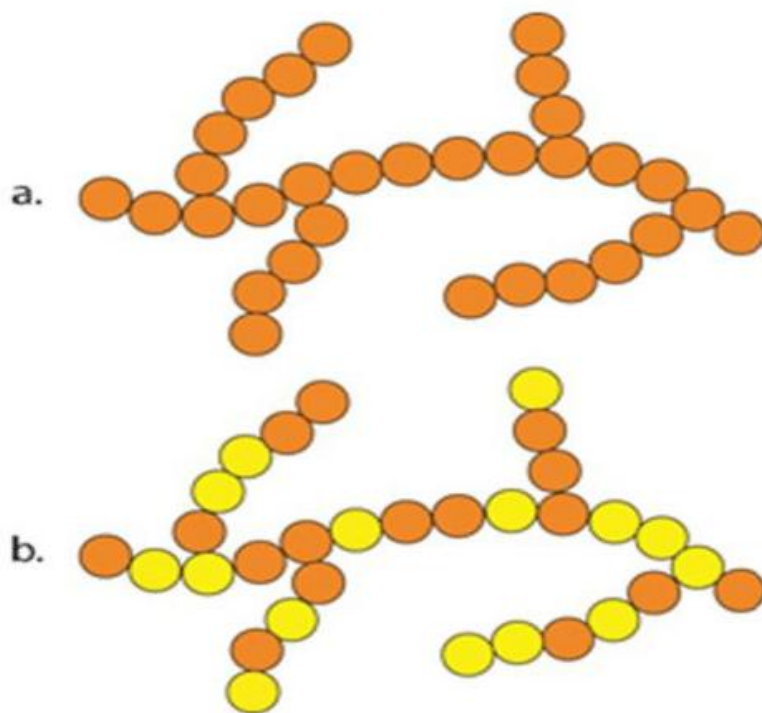


Figure I.4: Représentation schématique des polymères ramifiés ((a) homopolymère ramifié et (b) copolymère ramifié) [2].

1.3.3. Polymères réticulés

Certaines molécules polymères peuvent se lier entre elles de manière plus complexe, formant des structures réticulées. Dans ces structures, les chaînes de polymères sont reliées entre elles par des ponts, créant ainsi un réseau tridimensionnel de liaisons. La figure I.5 illustre schématiquement cette structure réticulée.

La réticulation se produit lorsque des liaisons chimiques supplémentaires se forment entre les chaînes de polymères, généralement par le biais de réactions de réticulation. Ces liaisons peuvent être covalentes, ioniques ou basées sur d'autres forces chimiques. La présence de réticulations confère au matériau une structure volumétrique, ce qui signifie que les liaisons s'étendent dans les trois dimensions de l'espace. Toutefois, dans certains cas, les réticulations peuvent être bidimensionnelles et ne se développer que dans un seul plan [16].

Les polymères réticulés présentent des propriétés distinctes de celles des polymères linéaires ou ramifiés. Le réseau tridimensionnel confère une plus grande rigidité et une plus grande résistance aux contraintes mécaniques, thermiques et chimiques. Les polymères réticulés sont souvent plus rigides, plus durs et moins déformables que les polymères linéaires. Ils ont également tendance à présenter une meilleure résistance à la chaleur, aux solvants et à d'autres conditions environnementales extrêmes.

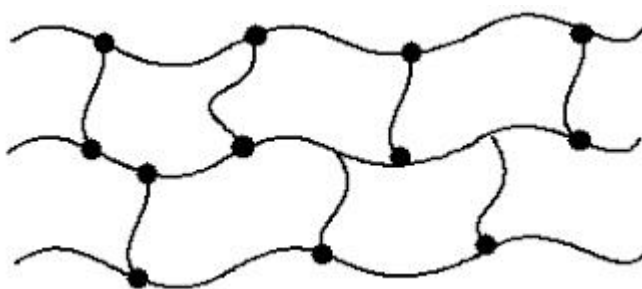


Figure I.5: Représentation schématique d'un polymère réticulé [3].

I.4. Polymères thermoplastiques

Les polymères sont composés d'une multitude d'unités de base appelées monomères. Ces monomères sont des molécules individuelles qui ont la capacité de réagir avec d'autres monomères, conduisant à la formation d'un polymère. Les principaux éléments présents dans les monomères sont le carbone et l'hydrogène. La polymérisation, une réaction chimique, se produit lorsque des monomères s'assemblent pour former un polymère.

Il existe deux types principaux de polymères basés sur la composition des monomères. Un "homopolymère" est formé lorsqu'un seul type de monomère subit une polymérisation. En revanche, un "copolymère" est formé lorsque deux ou plusieurs monomères différents réagissent ensemble pour créer la structure du polymère. Les copolymères peuvent avoir deux ou trois espèces de monomères, offrant ainsi une plus large gamme de propriétés chimiques et physiques.

Le passage des monomères aux polymères par la polymérisation est une étape cruciale dans la synthèse de divers types de polymères. Ce processus permet la formation de longues chaînes interconnectées de monomères, ce qui confère aux polymères des propriétés uniques et des applications diverses dans différents secteurs.

I.4.1. Classification des polymères par structure physique

Les polymères amorphes présentent une structure similaire à celle des liquides ou du verre, sans ordre moléculaire à longue portée. Par rapport aux polymères semi-cristallins, les polymères amorphes possèdent des caractéristiques telles qu'une bonne transparence, une grande rigidité et un

faible retrait. Cependant, ils sont perméables à la vapeur d'eau et à certains gaz, et ont tendance à présenter un vieillissement physique plus prononcé [8,9].

Dans des conditions favorables spécifiques, telles que la régularité de la structure, la présence de germes, un refroidissement lent après la fusion et l'orientation des chaînes, les polymères peuvent subir une cristallisation partielle. Ce processus implique l'organisation locale de chaînes de polymères parallèles les unes aux autres, maintenues ensemble par des forces de Van der Waals intermoléculaires. La structure résultante consiste en une suspension de particules cristallines, appelées lamelles cristallines, enchâssées dans une matrice amorphe. Ces deux phases sont interconnectées car certaines macromolécules ont des segments situés dans différentes lamelles cristallines, tandis que d'autres segments résident dans la phase amorphe [4,5,6,7].

I.5. Informations générales sur le polyéthylène

Les polymères thermoplastiques possèdent un comportement unique caractérisé par leur capacité à se ramollir et à fondre lorsqu'ils sont exposés à la chaleur, ce qui permet de les façonner et de les remodeler facilement sans qu'ils subissent de modifications chimiques. Cette propriété distinctive rend les thermoplastiques hautement souhaitables dans diverses applications industrielles en raison de leur excellente aptitude à la transformation, de leur recyclabilité et de leur polyvalence dans l'obtention de propriétés mécaniques, thermiques et chimiques spécifiques.

Le polyéthylène (PE) est l'un des polymères thermoplastiques les plus utilisés. Il est classé en trois grandes familles en fonction de sa densité : Le polyéthylène haute densité (PEHD), le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polyéthylène basse densité linéaire (PEBDL). Parmi eux, le PEHD est le plus rigide et a le moins d'impact sur les ressources pétrolières. Grâce à son exceptionnelle recyclabilité, le PEHD est considéré comme une ressource quasi inépuisable. La structure chimique du PE, représentée par $(-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -)_n$, est la plus simple de la famille des polymères. Le PE est très polyvalent, recyclable et rentable.

Le PE est principalement produit par polymérisation du monomère éthylène et représente environ 30 % de la production mondiale de polymères. C'est le polymère synthétique le plus populaire au monde, grâce à son prix abordable et à son large éventail d'applications. Environ 90 % de la production mondiale de PE est utilisée dans six secteurs principaux, dont environ 50 % pour les films et les feuilles, 13 % pour les produits moulés par soufflage et 13 % pour les pièces moulées par injection [10].

I.6. Tribology des polymères

La tribologie est un domaine scientifique qui englobe l'étude de divers phénomènes associés à des objets en contact qui subissent un mouvement relatif. Elle se concentre principalement sur trois aspects fondamentaux : le frottement, l'usure et la lubrification. Le frottement fait référence à la résistance rencontrée par un matériau lorsqu'il est soumis à un déplacement ou à un mouvement extérieur. L'usure se caractérise par la détérioration et la perte de matière sur les surfaces en contact. La lubrification implique l'introduction d'un fluide entre les corps en contact afin de minimiser le frottement et l'usure.

La tribologie est une science multidisciplinaire qui s'appuie sur les principes de la mécanique, de la chimie physique et de la science des matériaux. Elle cherche à comprendre les interactions et les

comportements complexes des matériaux en contact, ainsi que les mécanismes qui influencent leurs performances. En étudiant et en comprenant ces phénomènes, la tribologie contribue au développement de systèmes plus efficaces et plus fiables dans de nombreuses applications industrielles.

1.6.1. Frottement des polymères

Le comportement frictionnel des polymères revêt une grande importance à deux points de vue. Premièrement, le frottement entre les polymères et divers composants, tels que les guides, les bobines et les matrices de moulage par injection, joue un rôle crucial dans leur manipulation au cours du traitement. Deuxièmement, dans des applications telles que les roulements, les engrenages, les joints, les bagues et les joints d'étanchéité, les caractéristiques de frottement des polymères déterminent leur adéquation à l'application spécifique.

Le frottement englobe tous les phénomènes qui se produisent sur les surfaces de contact des matériaux solides lorsqu'ils sont soumis à un mouvement relatif. Le coefficient de frottement, noté $\mu = F/N$, a été défini à l'origine par Amontons, où F représente la force tangentielle et N la force normale. Il est important de noter que le coefficient de frottement n'est pas une propriété intrinsèque du matériau lui-même, mais qu'il décrit plutôt l'état général du système tribologique. Il se compose de deux éléments : le coefficient de frottement dynamique (μ_d) et le coefficient de frottement statique (μ_s). Le coefficient de frottement dynamique représente la force nécessaire pour un mouvement continu, tandis que le coefficient de frottement statique représente l'adhérence et la force nécessaire pour surmonter les jonctions formées entre les deux corps en contact [13].

1.6.2. Usure des polymères

L'usure est un phénomène qui se produit lorsque deux surfaces solides entrent en contact et se déplacent l'une par rapport à l'autre, ce qui entraîne une perte de matière à la surface des matériaux. Il existe différents types de mécanismes d'usure qui peuvent se produire en fonction des conditions de contact et des propriétés des matériaux concernés.

L'usure par adhérence. Lorsque deux surfaces sont en contact et glissent l'une contre l'autre, leurs aspérités opposées les plus hautes entrent en contact en premier. Au fur et à mesure que la charge appliquée augmente, les aspérités de moindre hauteur entrent également en contact, formant des jonctions individuelles [15].

La surface combinée de ces jonctions est appelée surface de contact réelle, où des phénomènes d'adhésion peuvent se produire, entraînant la formation de liaisons adhésives.

La résistance mécanique de chaque jonction dépend de l'énergie dissipée localement. Dans les cas extrêmes, les surfaces de frottement peuvent même être soudées par fusion. Au fur et à mesure que le mouvement de glissement se poursuit, les jonctions subissent des contraintes de cisaillement, ce qui conduit à deux scénarios possibles :

- Si l'interface est plus faible que les matériaux eux-mêmes, les jonctions se cisailent par rupture de l'adhésif, ce qui entraîne une usure modérée ou minime.
- Si l'interface est plus résistante que l'un des matériaux, une défaillance cohésive se produit, entraînant une usure importante, voire un grippage. L'interface adhère au matériau le plus résistant ou

se détache sous forme de particules qui peuvent contribuer à l'adhérence après durcissement et oxydation.

S'il est possible de calculer ou de mesurer la force d'attraction entre deux matériaux, il n'est pas aussi simple de déterminer la force nécessaire à la décohésion une fois le contact établi. La séparation par décohésion ne se produit pas instantanément mais se propage comme une fissure. La friction provient de la force nécessaire pour cisailer les jonctions [14]. La figure I.6 illustre un schéma de l'usure adhésive.

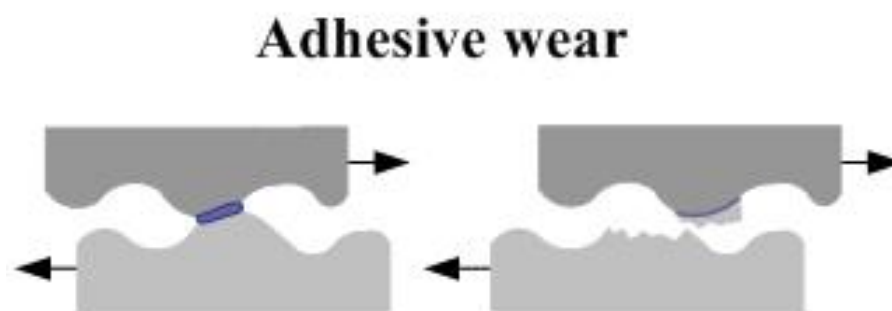


Figure I.6: Schéma de l'usure adhésive [11].

L'usure abrasive. L'aspect essentiel de l'usure abrasive concerne la découpe de la surface par des particules ou des aspérités plus dures. Ces points de coupe peuvent soit être incrustés dans la contreface, soit tomber dans la zone de contact. Le premier cas est communément appelé abrasion à deux corps, où les aspérités du corps le plus dur forment des rainures dans la même direction de déplacement ; le second cas, l'abrasion à trois corps, où les particules dures présentes dans l'interface déforment plastiquement les surfaces de frottement, créant des indentations [15].

En fonction des deux cas précédents, l'usure abrasive peut entraîner des dommages par déformation plastique, enlèvement phénoménal de matière et/ou fatigue de la surface. Ce type d'usure est favorisé par l'augmentation de la température, de l'humidité et de l'agressivité chimique de l'environnement lorsque l'abrasion agit par coupure.

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

À un niveau élémentaire, l'usure abrasive implique des phénomènes mécaniques, avec des paramètres dépendant du matériau, tels que la dureté ou la limite d'élasticité, les contraintes résiduelles et la ténacité. La structure (homogénéité, rapport d'écrouissage, etc.) et les propriétés thermomécaniques dans le cas de charges de température. La figure I.7 illustre un schéma de l'usure abrasive.

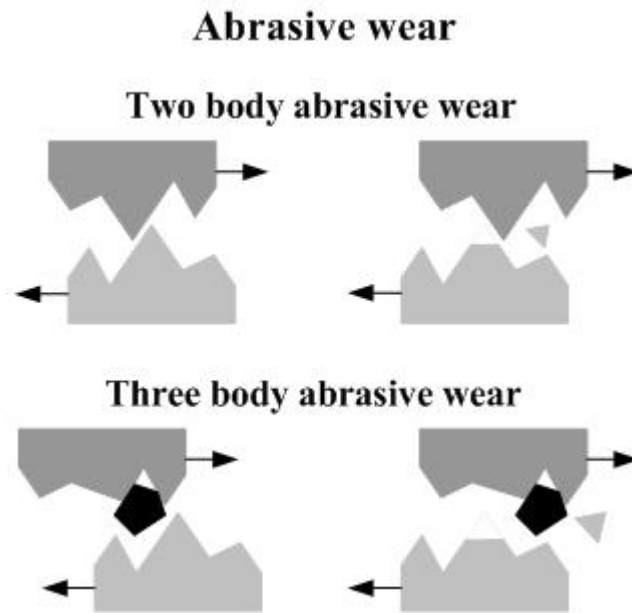


Figure I.7 Schéma de l'usure abrasive [11].

Usure par fatigue. La fatigue désigne l'altération de l'état d'un matériau sous l'effet de contraintes répétitives ou cycliques, entraînant le développement progressif de fractures. Elle se caractérise par l'accumulation de changements irréversibles dans l'état de surface des matériaux, conduisant à l'apparition et à la propagation de fissures. Dans le cas des matériaux ductiles, une usure par fatigue superficielle ou une délamination peut se produire. Cela implique la formation d'écailles ou de couches qui se détachent de la surface en raison des forces de frottement. L'usure par fatigue superficielle est couramment observée dans les roulements à billes, où des contraintes répétées provoquent la formation et le détachement de petites particules de la surface [14].

En revanche, les matériaux fragiles sont susceptibles de se fracturer dans les zones soumises à une forte contrainte de traction, et ces fractures ont tendance à se produire perpendiculairement à la surface. Ce type de fracture est connu sous le nom de fracture transgranulaire, où les fissures se propagent à travers la structure des grains du matériau. Dans les matériaux fragiles, la rupture par fatigue est souvent caractérisée par la propagation soudaine de fissures, conduisant à une rupture catastrophique. La figure I.8 illustre un schéma de l'usure par fatigue.

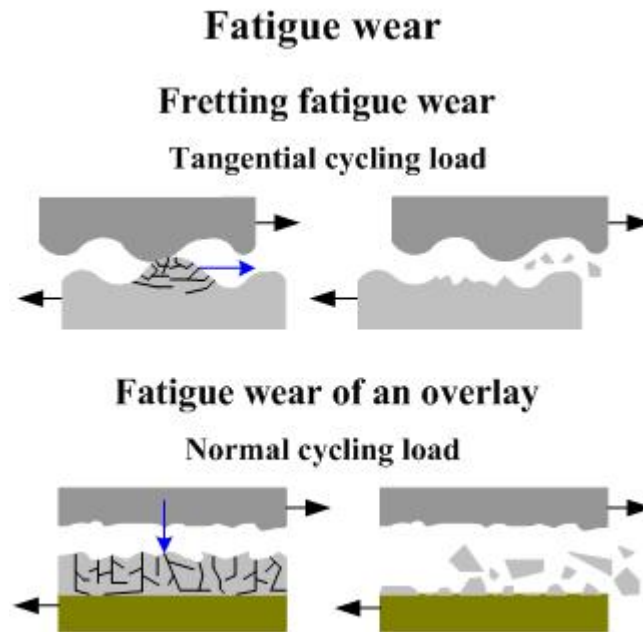


Figure I.8: Schéma de l'usure par fatigue [11].

L'usure tribochimique. Cette forme d'usure se produit lorsque le frottement a lieu dans un environnement réactif (atmosphère, lubrifiant, etc.). Dans ce type de situation, l'usure peut être initiée ou accentuée par la réaction chimique entre l'environnement et les surfaces en contact. La réaction, qui peut être créée ou activée par l'énergie dissipée par le frottement dans l'interface, conduit à la formation d'une couche superficielle solide (film réactionnel), non soluble dans l'environnement, de faible épaisseur, adhérent aux substrats et protégeant généralement les surfaces de l'usure par adhérence. L'usure se produit ensuite lorsque les contraintes de frottement de contact entraînent l'élimination des couches formées.

L'usure par érosion. L'usure par érosion se produit lorsque de la matière est enlevée d'une surface en raison de l'impact et de l'abrasion causés par un fluide contenant des particules. Ce type d'usure est couramment observé dans les systèmes mécaniques exposés à des flux à grande vitesse de liquides chargés d'abrasifs ou de produits pâteux.

Pendant l'usure par érosion, les particules en suspension dans le fluide entrent en collision avec la surface du matériau, ce qui provoque des impacts et des rayures. Au fil du temps, cet impact et cette abrasion continus entraînent l'enlèvement progressif de matériau de la surface, ce qui provoque une dégradation. L'usure par érosion est particulièrement répandue dans les composants tels que les tuyaux, les pompes, les vannes, les turbines et les hélices qui sont soumis à un écoulement de fluide à grande vitesse [15].

La gravité de l'usure par érosion dépend de divers facteurs, notamment la vitesse du fluide, la taille, la forme et la dureté des particules abrasives, ainsi que les propriétés du matériau. Les matériaux moins durs et moins résistants à l'abrasion sont plus sensibles à l'usure par érosion.

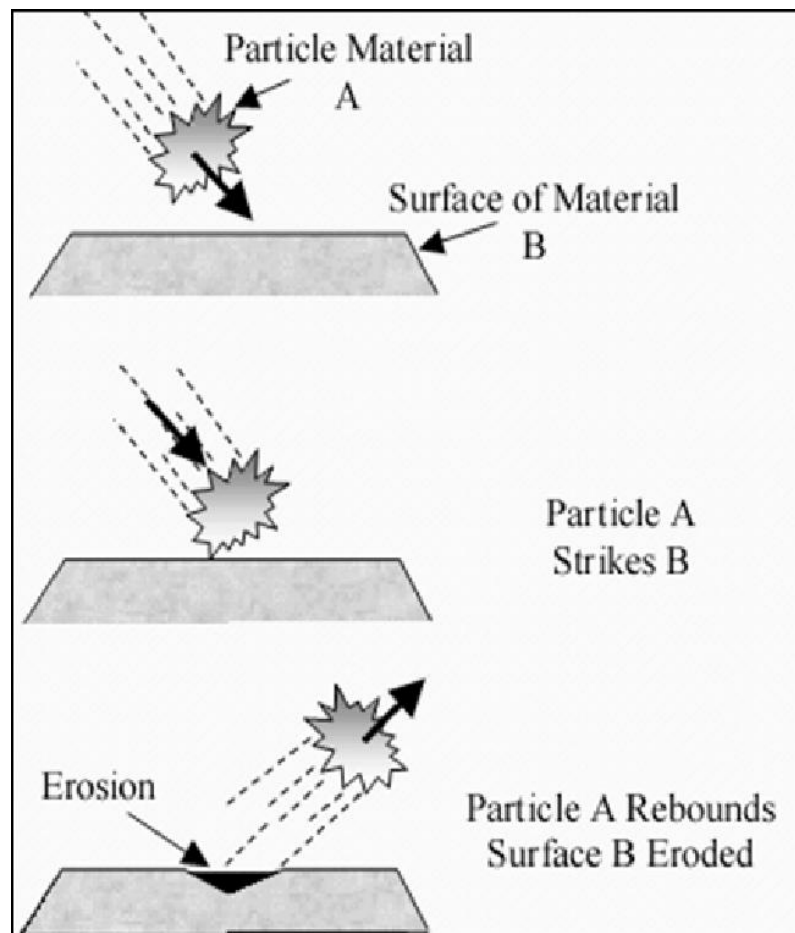


Figure I.9: Schéma de l'usure par érosion [12].

Chapitre II : Analyse expérimentale du comportement tribologique

Chapitre II. Analyse expérimentale du comportement tribologique

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif principal était d'étudier la réponse tribologique du composite PEHD/noir de carbone avec une teneur en noir de carbone de 2,3 % aux variations de la vitesse et de la distance dans des conditions tribologiques de type " pin-on-disk ". L'étude se concentre sur l'acquisition d'une compréhension globale du comportement du matériau sous différents paramètres d'essai et vise à identifier les paramètres les plus appropriés pour caractériser avec précision la performance tribologique de ce composite spécifique.

Afin d'assurer la collecte de données complètes pour l'analyse, plusieurs techniques de caractérisation ont été employées. Le tribomètre pin-on-disk a été utilisé pour mesurer le coefficient de frottement, un paramètre crucial qui indique la résistance du matériau au glissement. En outre, des mesures de rugosité en 3D ont été effectuées pour évaluer les changements dans la topographie de la surface, y compris les paramètres du taux d'usure. La microscopie optique a été utilisée pour visualiser et analyser les caractéristiques d'usure, dans le but de déterminer le mode de défaillance du composite PEHD/noir de carbone.

La caractérisation du comportement tribologique de ce composite spécifique revêt une grande importance pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elle fournit des informations précieuses sur les performances du matériau dans diverses conditions de glissement, facilitant ainsi l'optimisation de son application dans les systèmes de revêtement protecteur pour les pipelines. Deuxièmement, en étudiant les effets de la vitesse et de la distance sur la réponse tribologique, cette étude expérimentale contribue à une meilleure compréhension des mécanismes d'usure du matériau, ce qui permet de sélectionner des paramètres d'essai appropriés pour des études ultérieures.

En combinant le tribomètre pin-on-disk, les mesures de rugosité 3D et la microscopie optique, il est possible de réaliser une analyse complète des performances tribologiques du matériau. Ces techniques complémentaires permettent une évaluation plus précise et plus détaillée du comportement d'usure du matériau et des mécanismes de défaillance.

II.2. Essai au tribomètre

II.2.1. Dispositif expérimental et méthodologique

L'étude de la tribologie des échantillons a été réalisée à l'aide d'un tribomètre pin-on-disk de CSM Instruments dans des conditions ambiantes (comme présenté sur la figure II.1).



Figure II.1: Tribomètre standard de CSM Instruments.

Les conditions d'essai sont détaillées dans le tableau II.1 ci-dessous. Le tableau présente la vitesse et la distance comme variables, tandis que la durée de l'essai, le rayon du cercle, la force appliquée et le type de bille restent les mêmes pour tout les échantillon. Les essais ont été réalisés à la température du laboratoire, sans lubrification.

	Vitesse (cm/s)	Distance (m)	Temps (min)	Rayon (mm)	Force appliquée (N)	Le type de bille
Échantillon 1	0.1	2.4	40	5.1	5	Alumine
Échantillon 2	0.4	9.6	40	5.1	5	Alumine
Échantillon 3	0.7	16.8	40	5.1	5	Alumine
Échantillon 4	1.3	31.2	40	5.1	5	Alumine
Échantillon 5	1.6	38.4	40	5.1	5	Alumine

Tableau II.1: Conditions d'essai pour chaque échantillon.

II.2.2. Analyse et détermination du coefficient de frottement

La figure II.2 ci-dessous illustre la variation du coefficient de frottement pour chaque échantillon. Le coefficient de frottement augmente en fonction de la vitesse et de la distance de l'essai. Cependant, il se stabilise après le quatrième essai, atteignant une valeur d'environ 0,22.

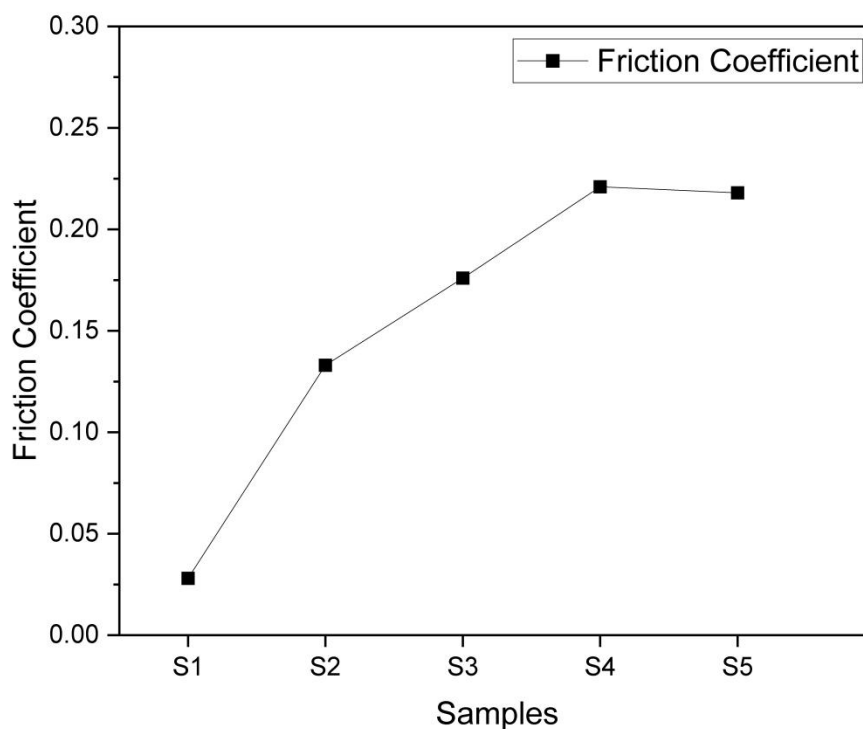


Figure II.2: Résultats du coefficient de frottement.

Le tableau II.2 présente des valeurs plus précises des coefficients de frottement obtenus. L'augmentation des valeurs des coefficients de frottement peut être attribuée à la vitesse et à la distance d'essai plus élevées, qui entraînent un contact accru entre la surface et la bille.

Échantillon n	Échantillon n 1	Échantillon n 2	Échantillon n 3	Échantillon n 4	Échantillon n 5
Coefficient de friction	0.028	0.133	0.176	0.221	0.218

Tableau II.2: Résultats de coefficient de frottement.

II.2.3. Variation du coefficient de frottement en fonction de la distance

La figure II.3 illustre la variation du coefficient de frottement en fonction de la distance pour les échantillons testés. Il est évident que les graphiques des échantillons 1st, 2nd et 3rd présentent des mesures incomplètes et des variations non standard. Inversement, les échantillons 4th et 5th présentent une meilleure stabilité et des graphiques plus précis. Nous pouvons donc conclure que les coefficients de frottement des échantillons 4th et 5th sont plus précis.

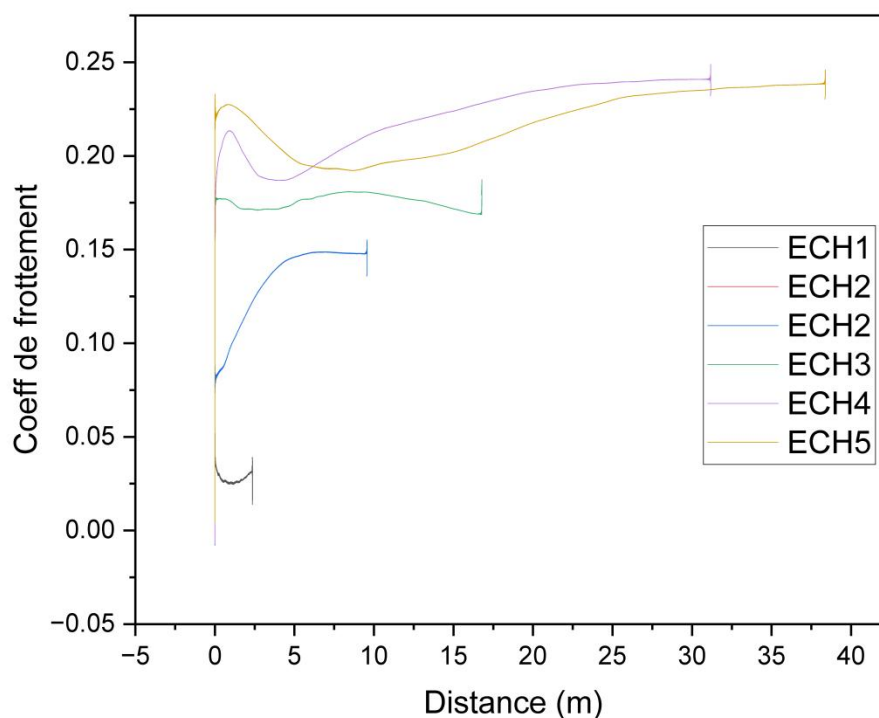


Figure II.3: Graphiques du coefficient de frottement en fonction de la distance.

II.3. Mesure de la rugosité 3D

II.3.1. Analyse du taux d'usure

L'utilisation d'un rugosimètre 3D donne des indications précieuses sur la rugosité de la surface et permet d'étudier les traces circulaires d'usure. Les valeurs de surface négative obtenues par le rugosimètre 3D aident à déterminer les taux d'usure, comme indiqué dans le tableau II.3 ci-dessous.

Échantillon	Taux d'usure ($\text{mm}^3/\text{N/m}$)
Échantillon 1	1.142×10^{-3}
Échantillon 2	3.959×10^{-3}
Échantillon 3	3.387×10^{-4}
Échantillon 4	1.007×10^{-4}
Échantillon 5	1.202×10^{-4}

Tableau II.3 : Résultats du taux d'usure.

La figure II.4 illustre la variation des taux d'usure des échantillons testés. Elle montre une augmentation des valeurs du taux d'usure de l'échantillon 1 comparée à l'échantillon 2, suivie d'une diminution significative pour l'échantillon 3. Par la suite, les taux d'usure restent relativement stables pour les échantillons 4th et 5th . L'augmentation observée du taux d'usure de l'échantillon 1 à l'échantillon 2 est cohérente avec la corrélation commune entre le taux d'usure et la vitesse d'essai. Plus la vitesse et la distance augmentent, plus il y a d'interactions de surface, ce qui entraîne un taux d'usure plus élevé. Toutefois, la stagnation des valeurs du taux d'usure pour les échantillons 3rd , 4th et 5th , malgré l'augmentation de la vitesse et de la distance, peut être attribuée au fait que le composite HDPE/CB atteint une plage de conditions de glissement optimales. Dans cette plage, une lubrification favorable, des contraintes de cisaillement interfaciales réduites et une meilleure conformabilité entre les surfaces sont obtenues, ce qui se traduit par des taux d'usure plus faibles.

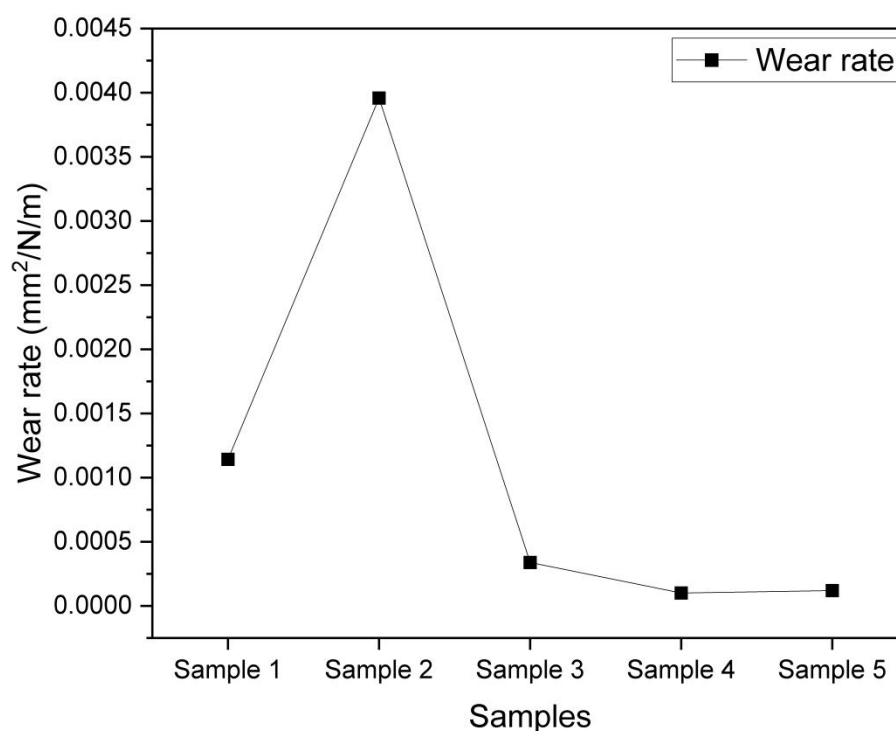


Figure II.4: Résultats du taux d'usure pour chaque échantillon.

II.3.2. Analyse de la rugosité de surface

La figure II.5 présente la variation de la rugosité pour chaque échantillon, ainsi que les résultats obtenus à l'aide d'un rugosimètre 3D.

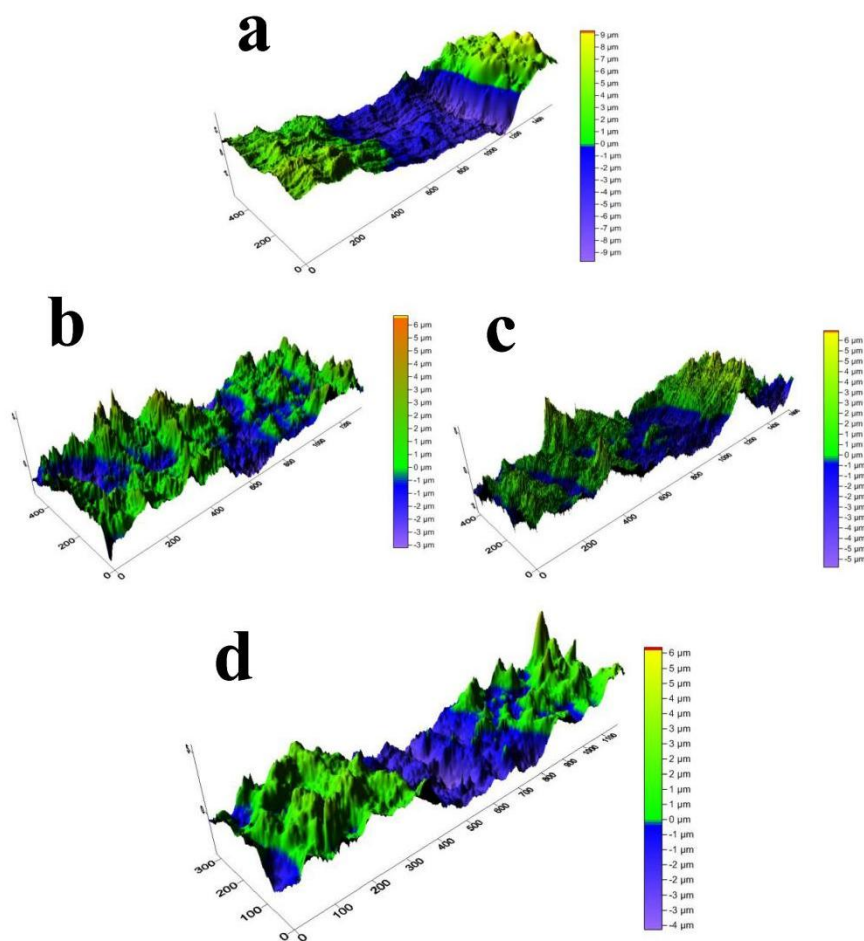


Figure II.5: Images 3D de la morphologie des cercles d'usure (a) Échantillon 2, (b) Échantillon 3, (c) Échantillon 4, (d) Échantillon 5.

II.4. Examen au microscope optique

II.4.1. Dispositif expérimental et méthodologique

L'examen de la morphologie du cercle d'usure et de son comportement suite aux essais a été réalisé à l'aide d'un microscope optique. Les échantillons ont été observés sous un grossissement de 50X, et les images correspondantes sont présentées dans les figures II.7 et II.8.

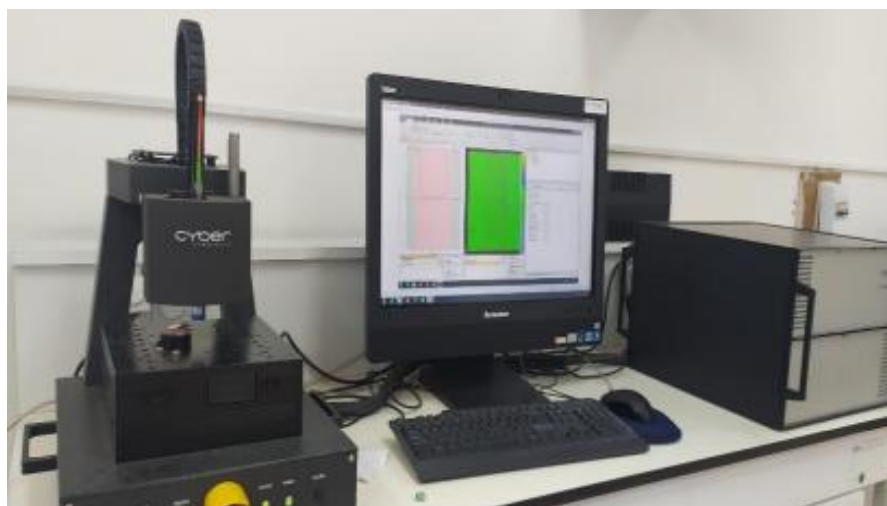


Figure II.6: Rugosimètre 3D de cybertechnologies.

II.4.2. Analyse des caractéristiques d'usure

La figure II.7 illustre les résultats pour l'échantillon 1 et 2. Les images révèlent des marques d'usure à peine perceptibles, qui peuvent être attribuées à la faible vitesse de rotation. La faible vitesse de rotation entraîne une friction minimale entre la bille et les échantillons.

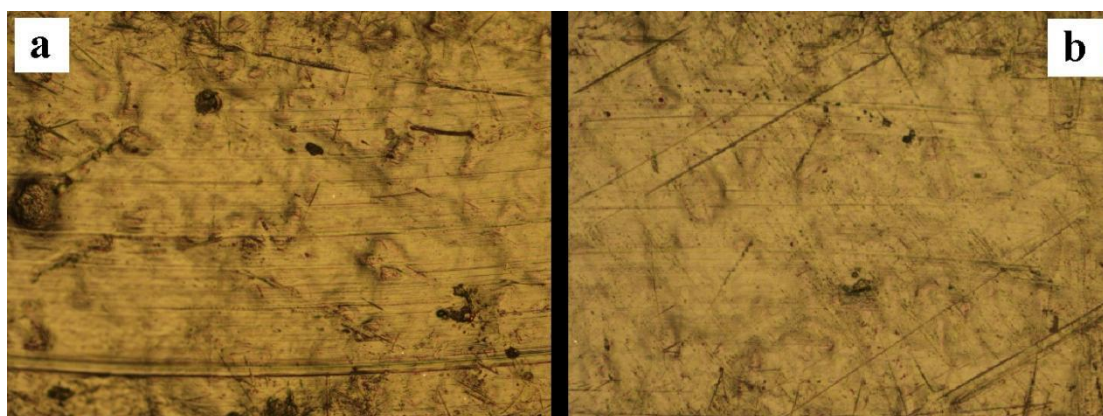


Figure II.7: Images au microscope des échantillons (a) Échantillon 1, (b) Échantillon 2.

La figure II.8 présente des images au microscope des échantillons 3, 4 et 5. Il est évident qu'avec une augmentation de la vitesse, une déformation devient perceptible le long de la marque d'usure, indiquant une déformation superficielle du polymère. En outre, l'échantillon numéro 5 présente un plus grand nombre de rayures que les deux autres échantillons de la figure II.5, ce qui suggère une plus grande interaction entre la bille de test et la surface de l'échantillon. Ces effets n'ont pas été observés dans les deux premiers échantillons.

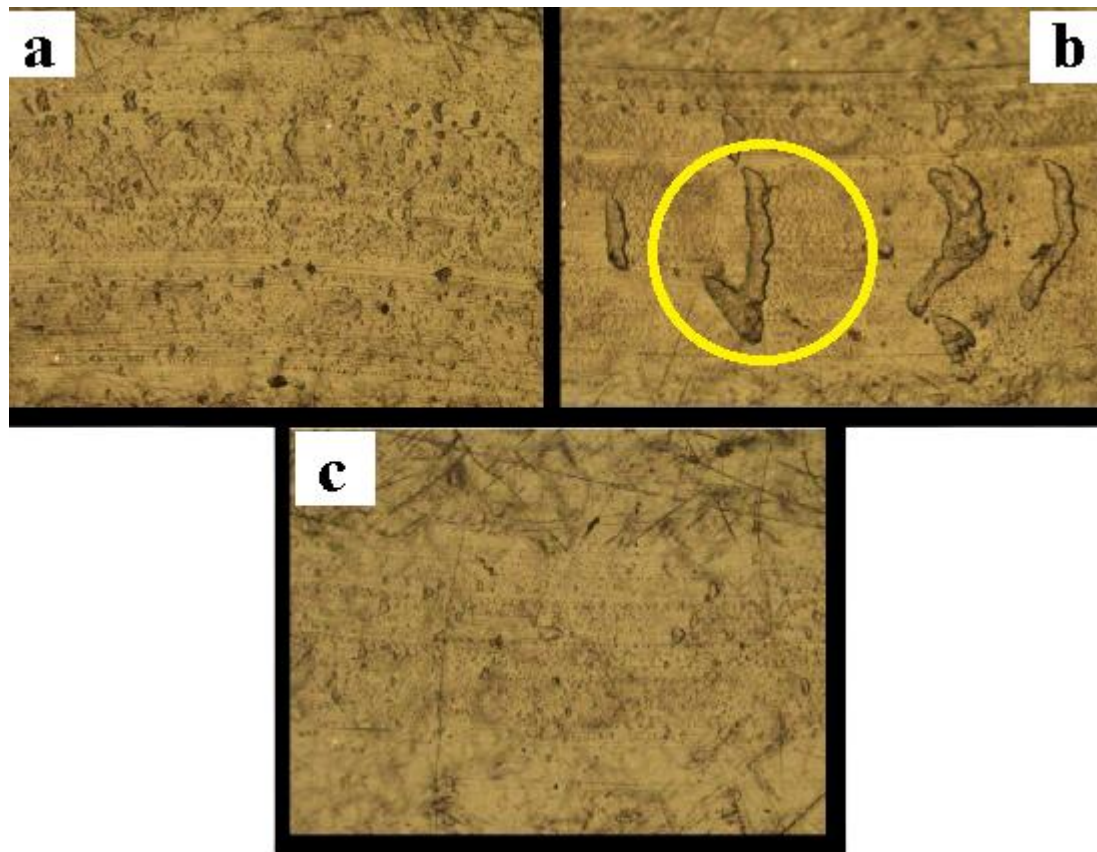


Figure II.8: Images au microscope des échantillons (a) échantillon 3, (b) échantillon 4, (c) échantillon 5.

Dans cette section, nous avons examiné le mécanisme d'usure observé dans l'étude. Les résultats indiquent que le mécanisme d'usure prédominant est l'usure par fatigue. Cela se manifeste par l'apparition de fissures le long de la trace d'usure, comme le montrent les images de la figure II.8. Ces fissures sont dues à l'application de charges cycliques répétées sur l'échantillon. Ce type d'usure par fatigue est couramment observé dans les matériaux soumis à des contraintes répétitives, ce qui entraîne la propagation progressive des fissures et une détérioration progressive de la surface.

Conclusion Générale

En conclusion, ce travail visait à étudier le comportement tribologique du composite PEHD/noir de carbone en utilisant les ressources et l'équipement disponibles, en particulier le tribomètre standard de CSM Instruments à notre disposition. En faisant varier systématiquement les paramètres d'essai, nous avons obtenu des informations précieuses sur la réponse du matériau à différentes conditions tribologiques.

L'une des principales conclusions de cette étude est l'identification des conditions d'essai optimales pour le composite PEHD/noir de carbone. Grâce à une analyse et une comparaison minutieuses des résultats, il a été déterminé que les paramètres d'essai utilisés dans les 4ème et 5ème échantillons ont produit les performances tribologiques les plus favorables. Ces résultats fournissent des indications cruciales pour l'utilisation future du même tribomètre et l'emploi de matériaux similaires. En adoptant les conditions d'essai identifiées, il est possible d'obtenir des résultats plus précis et plus fiables, ce qui facilite la réalisation de divers objectifs et permet de faire progresser la recherche en tribologie.

En outre, cette recherche illustre la capacité d'adaptation requise lorsque l'on est confronté à des ressources expérimentales limitées. En tirant le meilleur parti de l'équipement disponible et en manipulant de manière créative les paramètres d'essai, les défis posés par les capacités limitées du tribomètre ont été surmontés. Cette approche adaptative a non seulement permis de mener à bien l'étude, mais elle constitue également une leçon précieuse pour les futurs étudiants qui pourraient être confrontés à des contraintes de ressources similaires.

En outre, les résultats et les connaissances tirés de cette étude contribuent au domaine plus large de la tribologie et de l'ingénierie de la science des matériaux. La compréhension du comportement tribologique du composite PEHD/noir de carbone, ainsi que l'identification des conditions d'essai optimales, peuvent faciliter le développement de matériaux plus efficaces et plus durables. Cette connaissance peut également éclairer la conception et la sélection des matériaux pour diverses applications où la performance tribologique est critique.

En résumé, ce travail souligne l'importance d'exploiter les ressources et l'équipement disponibles pour mener des études tribologiques significatives. En adaptant de manière créative le dispositif expérimental et en analysant les résultats, des contributions précieuses ont été apportées à la compréhension du comportement tribologique du composite PEHD/noir de carbone. Les conditions d'essai optimales identifiées serviront de guide pratique à l'avenir, permettant d'obtenir des résultats plus précis et plus fiables. En fin de compte, ce travail a le potentiel de bénéficier aux personnes qui travaillent avec le même tribomètre et étudient des matériaux similaires, en les aidant à atteindre leurs objectifs de recherche et à faire progresser le domaine de la tribologie.

Références Bibliographiques

- [1] Proto Labs. (s.d.). *Homopolymères, copolymères et chimie des pièces en plastique* [Page Web]. Récupéré de <https://www.protolabs.com/resources/blog/homopolymers-copolymers-and-the-chemistry-of-plastic-parts/>
- [2] WEISS P. (2009) : *La chimie des polymères. Support de Cours, Université Médicale Virtuelle Francophone*. 17 p.
- [3] Université de Dakar. (s.d.). *Titre de la page web ou du chapitre* [Page Web]. Récupéré de <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2813&chapterid=2547>.
- [4] Callister, William D, *Matériaux science and engineering ; Introduction*, John Wiley & Sons, Inc 5e édition, 2000.
- [5] Wunderlich, B., *Physique macromoléculaire vol. 2 : Nucléation cristalline, croissance, recristallisation*, Academic Press, New York, 1976.
- [6] Dahoun, A., *Comportement plastique et textures de déformation des polymères semi-cristallins en traction uniaxiale et en cisaillement*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Science et génie des matériaux, 1992.
- [7] Haudin, J.M., *Déformation plastique des polymères semi-cristallins, Déformation plastique des matériaux amorphes et semi-cristallins*, Édité par Escaig, B. et G'Sell, C., Les éditions de Physique, 291-311, Les Ulis, France, 1982.
- [8] P. Weiss, *La chimie des polymères, Support de Cours*, 2010.
- [9] Etienne, Serge, Laurent, David, Gaudry, Emilie, Lagrange, Phillipe ; Leidieu, Julian, Steinmetz, Jean, *Les Matériaux de A à Z*, Dunod, Paris, 2008.
- [10] R. Khelif, "Analyse de la rupture et évaluation de la durée de vie basée sur la fiabilité des tuyaux en polyéthylène pour le transport de gaz", Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2007].
- [11] SubsTech. (s.d.). *Mécanismes d'usure* [Page Web]. Récupéré de https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear
- [12] Shibe, V. et Chawla, V. (2014). Une revue des techniques de modification de surface pour améliorer la résistance à l'érosion des composants techniques. *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, 4(2, Spl-2), 92. Récupéré de <http://www.ijrmet.com/issues.php?mid=MzE2>
- [13] Blau, P. M. (2009). *Science et technologie de la friction : Des concepts aux applications*. New York, États-Unis : Taylor & Francis Group. ISBN : 978-1-4200-5404-0. 436 pages.
- [14] Essa, F. A., Elsheikh, A. H., Yu, J., Elkady, O. A., et Saleh, B. (2021). Études sur l'effet de la charge appliquée, de la vitesse de glissement et de la température sur le comportement à l'usure de l'acier M50 renforcé par des nanoparticules d'Al₂O₃ et/ou de graphène. *Journal of Materials Research and Technology*, 12, 283-303. doi:10.1016/j.jmrt.2021.02.082
- [15] *Mécanismes d'usure*. (2001). *Manuel de lubrification et de fiabilité*, 1-3. doi:10.1016/b978-075065154-7/50113-3
- [16] Shrivastava, A. (2018). *Introduction to Plastic Engineering*. Éditeur.
- [17] Saleh, T. A. (2021). *Matériaux hybrides polymères et nanocomposites*. Éditeur.