

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



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Option : Génie des matériaux

Thème

**Etudes des propriétés lubrifiantes de la vermiculite
exfoliée**

Encadré par :

Dr. BENAMOR Abdessabour

Réalisé par :

DHAN Chaima

BOUSSADA Rayane

Année universitaire 2022/2023

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer nos sincères remerciements au bon Dieu tout-puissant pour nous avoir donné la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail. À la fin de cette tâche, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers les personnes qui nous ont apporté leur aide.

En premier lieu, nous désirons remercier notre encadrant, le docteur A. BENAMOUR, pour avoir accepté de superviser ce travail et pour avoir généreusement consacré son temps. Ses conseils avisés ont grandement enrichi notre réflexion et son soutien précieux nous a accompagnés tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Nous aimerions également exprimer notre reconnaissance envers toutes les personnes qui nous ont assistés durant la réalisation de ce mémoire, ainsi qu'envers toute l'équipe pédagogique du département de mécanique de l'Université de Saad Dahleb Blida 1. Nous sommes profondément reconnaissants envers nos parents pour leur soutien constant et leurs encouragements, ainsi qu'envers nos camarades, nos amis et toute notre famille.

Nous souhaitons vivement remercier monsieur A. HADDAD, N.CHIKER, B.HAMZAOUI, Y.NEMRI et F.BERBAR pour leur aide efficace et leur dévouement tout au long de ce projet.

Enfin, notre gratitude s'étend à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Au plus profond de mon cœur, je souhaite dédier ce modeste travail

*À ma source de joie, **ma maman,***

Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage de réussir. Je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu me portes depuis mon enfance. Que Dieu te préserve en bonne santé, t'apporte bonheur et longévité, mon trésor.

*À l'homme de ma vie, **mon père,***

Celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, celui qui éclaire mon chemin. Qu'Allah te protège pour nous.

*À mon pilier solide, **mon mari***

Pour ta compréhension, ta confiance et ta patience. Tu m'as toujours soutenu et réconforté, tu es et tu resteras toujours ma principale source d'encouragement.

*À mes sœurs **MANEL, NOUSSAIBA** et mon frère **ISLAM,***

*À tous les membres de ma famille **DHAN et HADJ ALI***

*À monsieur **ADEL HADDAD** qui m'a apporté son soutien dans les difficultés rencontrées. Qu'il trouve dans ces quelques lignes l'assurance de mon profond respect et de ma gratitude.*

*À mon promoteur monsieur **ABDESSABOUR BENAMMOR***

*À monsieur **M.TEMMAR** qui m'a aidé à concrétiser mon rêve, qui semblait presque impossible, je tiens à exprimée ma gratitude infinie*

*À mon binôme **RAYANE.***

À tous mes enseignants et à tous ceux qui m'ont aidé.

À tous mes camarades de génie mécanique.

DHAN CHAIMA

Dédicace

Au nom d'Allah, le tout miséricordieux le très miséricordieux, tout d'abord je tiens à remercier le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour arriver à ce stade afin de réaliser ce modeste travail que c'est avec un grand plaisir je dédie à :

Ce qui m'ont toujours poussé vers le chemin de la réussite, qui m'ont doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui mes cher parent

Dieu me les garde.

*A mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, **ma maman.***

*A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection, a mon support qui était toujours à mes cotés pour me soutenir et m'encourager, à mon prince **papa.***

*A mes sœurs **ZINEB** et **CHAIMA**, pour l'amour qui me réserve, que de réussites et de succès.*

*A ma tante **AICHA** qui a toujours été mon idole, et qui demeure toujours dans mon cœur.*

*A ma grande sœur adorable **RYM** qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur.*

*A toute ma grande famille **BOUSSADA** et **CHEBILA***

A mes amis(es) et camarades de 2eme année master génie des matériaux, et à qui je souhaite plus de succès.

*A mon binôme **CHAIMA***

*A la fin, avec tous mes sentiments de respect je dédie très chaleureusement ce mémoire à mon encadrant **Dr A. BENAMOUR** et tous les enseignants de l'université de Saad **DAHLEB** Blida*

BOUSSADA RAYANE

Résumé :

Notre travail de recherche se concentre sur l'étude des propriétés lubrifiantes de la vermiculite. Nous avons initié notre travail en explorant une méthode d'exfoliation de cette argile. Par la suite, nous avons caractérisé la vermiculite exfoliée par la diffraction des rayons X (DRX) et la fluorescence des rayons X (XRF). Enfin, nous avons évalué les effets de cette vermiculite exfoliée en tant qu'additif dans l'huile de paraffine, en étudiant son pouvoir lubrifiant par un tribomètre bille-sur-disque un contact bille 100Cr6-disque 100Cr6.

Mots clefs : Vermiculite, matériaux bidimensionnel, argiles, lubrification, tribologie.

Abstract:

Our research focuses on the study of the lubricating properties of vermiculite. We initiated our work by exploring a method of exfoliating this clay. Subsequently, we characterized exfoliated vermiculite by X-ray diffraction (XRD) and X-ray fluorescence (XRF). Finally, we evaluated the effects of this exfoliated vermiculite as an additive in paraffin oil, by studying its lubricating power by a ball-on-disc tribometer a ball contact 100Cr6 disc 100Cr6.

Key Words: vermiculite, two-dimensional materials, clays, lubrication.

ملخص:

يركز بحثنا على دراسة خصائص تشحيم الفيرميكلوليت. بدأنا عملنا باستكشاف طريقة لتقشير هذا الطين بعد ذلك، وصفنا أخيراً، قمنا بتقييم تأثيرات هذا الفيرميكلوليت (XRF) وفلورة الأشعة السينية (XRD) الفيرميكلوليت المقشر بحيود الأشعة السينية المقشر كمادة مضافة في زيت البارافين، من خلال دراسة قوة التشحيم الخاصة به عن طريق مقياس ترايبوميتر للكرة على القرص 100Cr6 وهو ملامس للكرة 100Cr6.

الكلمات المفتاحية: الفيرميكلوليت، ثنائية الأبعاد، الطين، الترابيولوجية.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 :Généralité sur les matériaux 2D et la vermiculite	
1 INTRODUCTION	2
2 MATERIAUX BIDIMENSIONNELS	2
2.1 GENERALITE	2
2.2 DEFINITION	2
2.3LES RESEAUX DES MATERIAUX BIDIMENSIONNELS (2D)	3
2.4 EXEMPLES DE NOUVEAUX MATERIAUXBIDIMENSIONNELS	3
3 LA VERMICULITE	4
3.1 DEFINITION DE LA VERMICULITE	4
3.2 LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA VERMICULITE	5
3.3 CARACTERISTIQUES DE LA VERMICULITE	5
3.4DOMAINE D’UTILISATION DE LA VERMICULITE	6
3.5 PROPRIETES PHYSIQUES DE LA VERMICULITE	6
3.6 LES METHODES D’EXFOLIATION CHIMIQUE DE LA VERMICULITE	7
3.6.1 METHODES CHIMIQUES.....	7
3.6.2METHODES MECANICO-CHIMIQUES	8
CHAPITRE 2 : TRIBOLOGIE, LUBRIFICATION ET FROTTEMENT	
1 INTRODUCTION	10
2 LA TRIBOLOGIE	10
3 LA LUBRIFICATION.....	10
3.1 COMPOSITION DES LUBRIFIANTS.....	11
3.2 GENERALITE SUR LES HUILES MINERALES	12
3.3GENERALITE SURLES HUILES SYNTHÉTIQUES	12
3.4GENERALITE SUR L’HUILE DE PARAFFINE.....	12
3.4.1 LES CARACTÈRESTIQUE DE L’HUILE DE PARAFFINE	13
3.5LES LUBRIFIANTS SOLIDES	13

4 L'USURE	14
4.1 LES MECANISMES DE L'USURE.....	14
4.1.1 L'USURE ADHESIVE.....	14
4.1.2 L'USURE ABRASIVE.....	15
4.1.3 L'USURE EROSIVE.....	16
4.1.4 L'USURE PAR FATIGUE	16
4.1.5 L'USURE CORROSIVE	16
4.2 LES PARAMETRES INFLUANT SUR LE TAUX D'USURE	17
4.3 MESURE DE L'USURE	18
5 FROTTEMENT	18
5.1 DEFINITION DE FROTTEMENT	18
5.2 LES MECANISMES DE FROTTEMENT	18
5.3 MESURE DE FROTTEMENT	19
CHAPITRE 3 : ETAT DE L'ART SUR LES MATERIAUX BIDIMENSIONNELS COMME LUBRIFIANTS SOLIDES	
1 INTRODUCTION :.....	20
2 LES MATERIAUX BIDIMENSIONNELS COMME LUBRIFIANTS SOLIDES :	20
2.1 MAXENENE COMME LUBRIFIANT SOLIDE :	20
2.2 LE GRAPHENE COMME LUBRIFIANT SOLIDE :	21
2.3 L'OXYDE DE GRAPHENE COMME LUBRIFIANT SOLIDE :	23
ETUDE 1	23
ETUDE 2	24
3 L'INFLUENCE DE LA CHARGE SUR LES PROPRIÉTÉ TRIBOLOGIQUE :	27
4 L'INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS TRIBOLOGIQUE :	29
CHAPITRE04 : PARTIE EXPERIMENTALE ELABORATION ET CARACTERISATION	
1 INTRODUCTION :	31
2 LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ECHANTILLONS :	31
2.1 ACIER 100Cr6	31
2.2 ACIER INOXYDABLE 430C	32

3 PREPARATION DES ECHANTILLONS	32
3.1 DECOUPAGE DES ECHANTILLONS	32
3.2 LE POLISSAGE	33
3.2.1 POLISSAGE PAR PAPIER ABRASIF	33
3.2.2 POLISSAGE DE FINITION	33
4. METHODE D'EXFOLIATION DE LA VERMICULITE	34
5TECHNIQUE DE CARACTERISATION	36
5.1 CARACTERISATION PAR DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)	36
5.2 CARACTERISATION PAR FLUORESCENCE DES RAYONS X (XRF)	38
6 LES ESSAIS TRIBOLOGIQUES	39
6.1 PREPARATION DE LA SOLUTION (HUILE DE PARAFINE+VERMICULITE) :	39
7 LE MILIEU DE DISPERSION DE LA VERMICULITE	41
8 APPLICATION DE REVETMENT SUR L'ACIER 430 C	41
8.1 METHODE D'APPLICATION DE REVETEMENT	41
8.2 APPLICATION DE REVETEMENT PAR DISPERSION ULTRASONIQUE DE LA VERMICULITE :	42
8.3APPLICATION DE REVETEMENT PAR PULVÉRISATION DANS UNE ETUVE :	43
9 EQUIPEMENTS UTILISÉS :	43
9.1 BALANCE DE PRECISION :	43
9.2 AGITATEUR MAGNETIQUECHAUFFANT :	44
9.3 UN HOMOGENEISATEUR :	44
9.4 LE BAIN A ULTRASON :	45
9.5 UNE ETUVE :	45
9.6 UN TRIBOMETRE :	46
9.7 Un microscope optique :	46
CHAPITRE 5 : Résultats et discussions	
1 INTRODUCTION :	47
2 TECHNIQUE DE CARACTERISATION :	47

2.1 DIFFRACTION DES RAYONS X(DRX) :.....	47
2.1 CARACTERISATION DE LA VERMICULITE PAR FLUORESCENCE DES RAYONS X (XRF)	48
2.1.1 VERMICULITE EXPANSE	48
2.1.2 VERMICULITE EXFOLIEE	49
3 LE MILIEU DE DISPERSION DE LA VERMICULITE	50
4 ETUDE DE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE	50
4.1 TEST TRIBOLOGIQUE BILLE SUR DISQUE	51
4. CALCUL DE L'USURE	55
5 APPLICATION DE REVETMENT SUR L'ACIER 430 C	58
CONCLUSION GENERALE	

Liste des tableaux et figures

Tableau 1: la composition chimique de la vermiculite	5
Tableau 2: Propriétés physiques de la vermiculite	6
Tableau 3: La composition chimique de l'acier 100Cr6.	31
Tableau 4 : la composition chimique typique pour l'acier inoxydable 430C.....	32
Tableau 5 : les paramètres des essais tribologiques.....	40
Tableau 6: les composants essentiels de la vermiculite expansé.	48
Tableau 7: les composants chimiques de la vermiculite expansé.	49
Tableau 8: les composants essentiels de la vermiculite exfoliée.	49
Tableau 9: les composants chimiques de la vermiculite exfoliée.	49
Tableau 10: le coefficient de frottement en fonction de pourcentage de la vermiculite exfoliée.	53
Tableau 11: Taux d'usure des échantillons.....	55
Figure 1: Schéma des nanomatériaux de carbone dans différentes dimensions : (a) fullerène à zéro dimension (b) nanotubes de carbone à une dimension (c) graphène à deux dimensions.	3
Figure 2: la vermiculite expansée.	4
Figure 3: Représentation schématique de la structure cristalline de vermiculite.....	5
Figure 4: La dispersion colloïdale des couches de vermiculite.	7
Figure 5: image SEM a) vermiculite avant exfoliation b) vermiculite après exfoliation.	8
Figure 6: contact lubrifié.....	11
Figure 7: Exemples de lubrifiants solides : a) graphite - b) disulfure de molybdène	14
Figure 8: (a) Phénomène de l'usure adhésive (b) l'usure adhésive	15
Figure 9: (a) Mécanisme de l'usure abrasive (b) l'usure abrasive.....	15
Figure 10: (a) l'usure corrosive (b) l'usure par fatigue.....	17
Figure 11: un tribomètre pion sur disque.....	19
Figure 12: coefficient de frottement en fonction de concentration de Ti_3C_2 dans l'huile de base.	21
Figure 13: Coefficients de frottement (l) pour une paire d'essais en acier auto-accouplée dans l'air humide sans SPG, sans SPG dans l'éthanol, avec SPG dans une solution d'éthanol et avec alimentation intermittente en SPG. De plus, les résultats COF pour l'acier.	22

Figure 14: les propriétés tribologiques des nano fluides à base d'huile de moteur contenant de graphène (a) le coefficient de frottement (b)le diamètre de l'empreinte de l'usure (c)la capacité de la charge.....	24
Figure 15: Photographies numériques de la dispersion de 0,3 % en poids de GO et de 0,3 % en poids de CSs dans un lubrifiant à base d'huile de graines de tournesol. Le temps de chaque image est indiqué sur la bouteille d'échantillon respective.	25
Figure 16: Coefficient de frottement de l'huile de graines de tournesol contenant différentes concentrations de GO et de CSs sous une charge spécifique [500 g (5 N)] et une vitesse de rotation [300 tr/min (0,094 m/s)]......	25
Figure 17: Coefficient de frottement de 0,3 % en poids de GO et de 3,0 % en poids de CSs en fonction de différentes vitesses de rotation (100 à 500 tr/min) sous une charge spécifique (500 g)...	26
Figure 18: Coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour huile de base avec différentes concentrations de Ti_3C_2	28
Figure 19: images SEM des surface usées des aciers lubrifié par de hiles de base a) huile de base avec 0 .5 wt% b) ,1 .0 wt% (c), et 6.0 wt % (d) Ti_3C_2 sous la charge appliqué 15 N.....	29
Figure 20: Évolution du coefficient de frottement (COF) en fonction des cycles de glissement pour les revêtements composites (PEI/graphène oxyde) n testés et dans différentes atmosphères a) air, b) vide, c) d) hydrogène sec et e) azote sec.....	30
Figure 21: Découpage des échantillons par une guillotine.	33
Figure 22: polisseuse utilisée pour le polissage.	33
Figure 23: les solutions diamantées, a/ solution de 3μ , b/solution de 1μ , c/solution de 0.25μ	34
Figure 24: résultat de polissage (a) échantillon avant polissage (b) échantillon après polissage.	34
Figure 25: (a) la pesé de 1g de vermiculite/(b) l'ajoute de 1g de vermiculite dans HCl.....	35
Figure 26: (a) l'agitation sur un agitateur (b) la dispersion avec un bain à ultrason	35
Figure 27: (a) le lavage avec l'eau et l'éthanol (b) le séchage de la vermiculite dans l'étuve.	36
Figure 28: la vermiculite exfoliée.	36
Figure 29: (a) la pesé 20 ml d'huile de paraffine (b) la pesé de la vermiculite exfoliée.	40
Figure 30: le mélange de la solution avec un homogénéisateur (b) la dispersion de la solution avec un bain à ultrason.	40
Figure 31: Le mélange de la vmt dans l'eau, éthanol, acétone, propanol, a/ avant, b/ après 30 minutes.....	41
Figure 32: a) la dispersion de la solution b) la solution après la dispersion (vmt+eau).	42
Figure 33: (a) La dispersion de la solution sur L'échantillon (b) échantillon après la dispersion ultrasonique de la vermiculite.....	42

Figure 34: Echantillon après pulvérisation.	43
Figure 35: Balance de précision.....	43
Figure 36:Agitateur magnétique chauffant.	44
Figure 37: un homogénéisateur.....	44
Figure 38: le bain à ultrasons.	45
Figure 39: une étuve.....	45
Figure 40: Un tribomètre bille sur disque.	46
Figure 41: un microscope optique.....	46
Figure 42: diffraction des rayons X de la vermiculite expansée et exfolié.....	47
Figure 43: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 0.2% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 0.2% de vermiculite.	51
Figure 44: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 0.5% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 0.5% de vermiculite.	52
Figure 45: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 1% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 1% de vermiculite.	52
Figure 46 :a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 2% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 2% de vermiculite.	53
Figure 47:a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 5% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 5% de vermiculite.	53
Figure48:Coefficient de frottement de l'huile de paraffine contenant différentes concentrations de la vermiculite exfoliée en fonction de temps (s).....	54
Figure 49: la trace d'usure en fonction de profondeur et largeur.	54
Figure 50:images optique de surfaces usées lubrifiées par a) huile pure b) huile+0.2 % vmt huile+0.5 % vmt d) huile+1 % vmt e) huile+2 % vmt f) huile+5% vmt.	56

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux 2D ont longtemps suscité l'intérêt de la communauté scientifique en raison de leurs propriétés uniques et exceptionnelles. La découverte du graphène en 2004 par Novoselov et Geim [1] a considérablement accéléré la recherche sur ces matériaux, conduisant à la découverte de nombreux nouveaux matériaux 2D ces dernières années.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la vermiculite expansée, un matériau bidimensionnel qui présente des similitudes avec le graphène. La vermiculite est un minéral argileux qui est largement utilisé dans différents domaines en raison de ses propriétés intéressantes telles que l'isolation, la légèreté et l'absorption.

Notre mémoire abordera la vermiculite expansée en tant que lubrifiant solide, en couvrant plusieurs aspects. Tout d'abord, nous présenterons une introduction aux matériaux bidimensionnels et à la vermiculite. Ensuite, nous discuterons de la tribologie, de l'usure et du frottement pour établir le contexte de notre étude. Nous effectuerons également une revue de l'état de l'art sur les matériaux bidimensionnels dans ce domaine.

Dans la partie expérimentale, nous évaluerons les performances de la vermiculite exfoliée en tant que lubrifiant solide. Nous mènerons des expériences visant à mesurer et analyser son efficacité dans la réduction de l'usure et du frottement dans des conditions de lubrification liquide par l'huile de paraffine.

Les résultats obtenus seront ensuite présentés et interprétés dans la section correspondante. Nous discuterons des performances de la vermiculite exfoliée en tant qu'additif solide dans l'huile de paraffine, en mettant en évidence ses avantages et ses limites éventuelles.

Enfin, nous conclurons notre mémoire en récapitulant les principaux points abordés et en soulignant l'importance de la vermiculite exfoliée en tant que lubrifiant solide, tout en suggérant des pistes pour des recherches futures dans ce domaine.

CHAPITRE 1

Généralité sur les matériaux 2D et la vermiculite

1 INTRODUCTION :

Ce chapitre porte une généralité sur les matériaux bidimensionnels, leurs réseaux et leurs propriétés, ainsi qu'une présentation de la vermiculite expansée sa composition chimique, ses propriétés physiques, les différents domaines d'utilisation, Ca méthode d'exfoliation et ses propriétés lubrifiantes de la vermiculite exfoliée.

2 MATERIAUX BIDIMENSIONNELS :

2.1 GENERALITE :

Les matériaux 2D tels que le graphène, sont souvent appelés « bidimensionnels » car ils n'ont que deux dimensions. En raison de leur épaisseur réduite, les propriétés des matériaux 2D peuvent différer considérablement de celles des matériaux tridimensionnels. Les matériaux bidimensionnels peuvent avoir des propriétés électroniques, optiques, mécaniques et thermiques, ce qui les rend utiles pour une variété d'applications dans différents domaines tels que l'électronique, la médecine et l'environnement.

2.2 DEFINITION :

Les matériaux bidimensionnels (2D), également appelés monocouches, sont des structures sous forme de feuilles constituées d'une seule couche d'atomes ou de molécules. Les atomes d'une même couche atomique sont liés de manière covalente, ce qui confère à la structure monocouche son module et sa résistance élevés.

Ces matériaux sont très recherchés pour leurs propriétés inhabituelles, qui varient en fonction de leur taille et de leur forme à l'échelle nanométrique. Les nanomatériaux sont quant à eux définis comme des matériaux solides caractérisés par au moins une dimension dans la gamme des nanomètres. De plus, les bidimensionnels ont des surfaces spécifiques plus élevées par rapport aux autres matériaux nanostructures. Cela leur permet de couvrir une plus grande surface que les autres nanomatériaux lorsqu'ils sont absorbés sur une surface de substrat, réduisant ainsi le potentiel de contact direct avec les surfaces de frottement et réduisant la quantité de friction entre elles. Les propriétés des matériaux 2D et des nanomatériaux sont très différentes de celles des matériaux tridimensionnels et ont des applications potentielles dans de nombreux domaines. [17-18]

2.3 LES RESEAUX DES MATERIAUX BIDIMENSIONNELS (2D) :

Les réseaux des matériaux bidimensionnels (2D) sont des structures planes composées d'atomes ou de molécules arrangés dans un motif régulier en deux dimensions. Ces motifs peuvent être décrits par des paramètres de maille, qui déterminent la taille et la forme de la structure périodique. Les réseaux 2D peuvent être classés en différentes catégories, telles que les réseaux hexagonaux, les réseaux carrés ou les réseaux triangulaires, selon la géométrie des motifs de base. Les propriétés physiques des matériaux 2D dépendent en grande partie de la structure de leur réseau, qui peut affecter leur conductivité électrique, leur résistance mécanique et leurs interactions avec d'autres matériaux. La compréhension des réseaux des matériaux bidimensionnels est donc essentielle pour la conception et l'optimisation de nouveaux matériaux avec des propriétés spécifiques. [2]

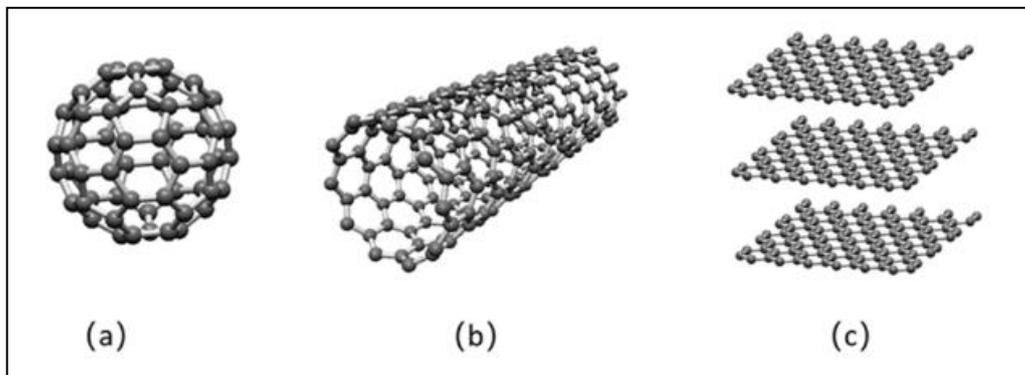


Figure 1: Schéma des nanomatériaux de carbone dans différentes dimensions : (a) fullerène à zéro dimension (b) nanotubes de carbone à une dimension (c) graphène à deux dimensions. [3]

2.4 EXEMPLES DE NOUVEAUX MATERIAUX BIDIMENSIONNELS :

Il y a eu de nombreuses découvertes de nouveaux matériaux bidimensionnels (2D) ces dernières années. Voici quelques exemples de matériaux 2D récemment découverts :

- Disulfure de molybdène (MoS_2) : C'est une poudre solide noire au toucher savonneux, inodore, hexagonale ou orthorhombique, avec un éclat métallique et des propriétés semblables au graphite.
- Graphène noir : Le graphène est une monocouche de graphite, un matériau composé de carbone qui absorbe fortement la lumière à toutes les longueurs d'onde visibles, ce qui explique la couleur noire du graphite.

- Phosphore noir : Une allotropie de phosphore stable avec une structure en couches de type graphite.
- Nitrure de bore (BN) : Les nanostructures de BN sont utilisées pour améliorer la conductivité thermique, la résistance mécanique, les revêtements isolants, les revêtements résistants à l'oxydation et à la corrosion, les circuits électriques, le traitement de l'eau et le stockage de l'hydrogène.

3 LA VERMICULITE :

Dans notre étude on va présenter un modèle bidimensionnel, un cristal parfait qui ressemble au Graphene, c'est la vermiculite.



Figure 2: la vermiculite expansée. [4]

3.1 DEFINITION DE LA VERMICULITE :

La vermiculite est une roche naturelle de couleur beige marron ou vert militaire, de la famille des micas, transformée en paillettes qui peuvent être déversées ou insufflées à l'intérieur d'une paroi. Il est tout à fait d'usage d'associer ce matériau directement avec le béton pour des projets de rénovation ou encore de constructions neuves. Dans le commerce, la vermiculite est souvent vendue sous forme de panneaux ou en vrac. L'un de ses avantages est qu'elle est simple à mettre en œuvre même dans les zones les plus difficiles d'accès. Ce matériau est aussi inaltérable dans le temps, imputrescible (stable, inerte, n'attire ni insecte, ni rongeur) et incombustible. Il n'est formé d'aucune substance allergène et ne provoque pas d'irritations même sous l'effet de la chaleur. [5]

3.2 LA COMPOSITION CHIMIQUE DE LA VERMICULITE :

La vermiculite est un minéral du groupe des silicates [5]. Sa composition chimique est complexe et peut varier en fonction de la source géologique à partir de laquelle il a été extrait. En bref, la vermiculite est principalement composée de silicium, d'aluminium et de magnésium, et contient diverses traces d'autres éléments tels que le fer, et contient également des molécules d'eau adsorbées. [9].

Elle est sous forme $(\text{Mg, Ca})_{0,7}(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{Al, Si})_{8022}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

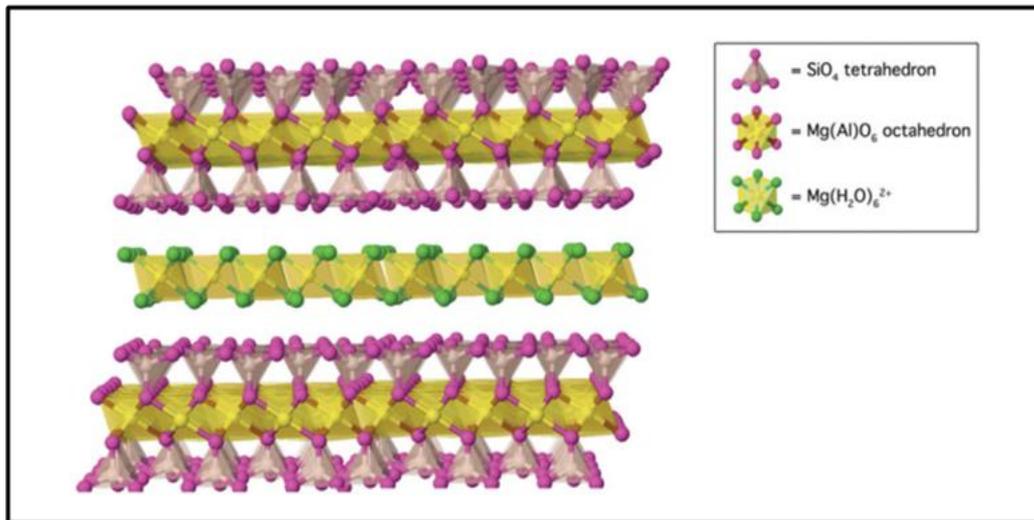


Figure 3: Représentation schématique de la structure cristalline de vermiculite. [7]

La vermiculite est composée de deux couches de tétraèdre d'oxygène de silicium et d'une couche d'octaèdre de magnésium [7]

Tableau 1: la composition chimique de la vermiculite [9]

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	C
Pourcentage(%)	45	9	21.5	6	5	1	0.2

3.3 CARACTERISTIQUES DE LA VERMICULITE :

1. Elle est naturellement poreuse et légère.
2. Elle est résistante à la chaleur et au feu.
3. Elle est inerte et non-toxique.
4. Elle est facile à manipuler et à installer.

5. Elle est résistante à la compression.
6. Elle est capable d'absorber l'eau et les nutriments, ce qui la rend utile pour
7. La culture des plantes.
8. Elle est souvent utilisée comme isolant thermique et acoustique.
9. Elle est souvent mélangée à d'autres matériaux pour améliorer leurs propriétés isolantes. [6]

3.4 DOMAINE D'UTILISATION DE LA VERMICULITE :

En raison de ses propriétés physiques et chimiques uniques, la vermiculite est utilisée dans de nombreux domaines, notamment :

1. Isolation thermique : la vermiculite est utilisée dans la fabrication de matériaux isolants pour les bâtiments et les équipements industriels en raison de sa capacité à résister à des températures élevées.
2. Absorption et filtration : en raison de sa structure en couches, la vermiculite peut absorber et filtrer des liquides, des gaz et des solides, ce qui en fait un matériau utile pour la filtration de l'eau et des huiles, ainsi que pour la décontamination de sols et de déchets.
3. Horticulture : la vermiculite est souvent utilisée comme substrat pour la culture de plantes en raison de sa capacité à retenir l'eau et les nutriments.
4. Construction : la vermiculite est utilisée dans la fabrication de matériaux de construction légers, tels que les panneaux de gypse et les enduits de plâtre, ainsi que dans les mortiers ignifuges.

3.5 PROPRIETES PHYSIQUES DE LA VERMICULITE :

Tableau 2: Propriétés physiques de la vermiculite

Conductivité thermique	0,046 à 0,080 W/m. °C
Densité	60 à 160 kg/m ³
Chaleur spécifique	800 à 1000 J/kg. °C
Coefficient de diffusion à la vapeur d'eau	3 à 4
Perméabilité à la vapeur d'eau	0,9.10 ⁻⁵ à 4,5.10 ⁻⁵ g/m. h .mm Hg

3.6 LES METHODES D'EXFOLIATION CHIMIQUE DE LA VERMICULITE :

3.6.1 METHODES CHIMIQUES :

R.K Gogoi et al [8].

La vermiculite argileuse a été exfoliée par traitement à l'aide d'une solution acide. Dans une synthèse typique, 1 g de vermiculite a été mélangé magnétiquement avec 20 % (c.-à-d. 0,26 N) 100 ml de solution de HCl pendant 18 heures à température ambiante, puis on a lavé la bouillie jaune résultante avec de l'eau et de l'éthanol. La poudre de vermiculite exfoliée a été obtenue par séchage à l'air du matériau obtenu après élimination du solvant de la boue jaune par centrifugation. On a obtenu une dispersion colloïdale des couches de vermiculite (Figure4) en redécouvrant la poudre exfoliée dans de l'eau déionisée (ID), qui a ensuite été utilisée pour la préparation d'une membrane de vermiculite autoportante par filtration sous vide avec un filtre à membrane en PTFE.



Figure 4:La dispersion colloïdale des couches de vermiculite. [8]

S.C.Tjong et al [9]

La VMT a d'abord été prétraitée avec de l'acide chlorhydrique selon un brevet rapporté. Environ 25 g de VMT de 250 mailles ont été introduits dans 1 L d'une solution de HCl de 2 M dans un bécher en polypropylène à température ambiante. Le lisier obtenu a été agité magnétiquement pendant différentes périodes allant de 2 à 36 h par pas de 2 h. La VMT a été séparée par filtration, puis lavée à fond avec de l'eau distillée à plusieurs reprises jusqu'à ce que le pH du filtrat soit de 7,0. Après le lavage, le matériau solide obtenu a été séché à 573,15 K pendant la nuit. Une poudre fine beaucoup plus blanche que le matériau de départ a été obtenue après un broyage final. Le processus de délamination des histoires hermétiques. Par la suite, les échantillons ont été refroidis à 283 K au taux de 2 K min⁻¹.

3.6.2 METHODES MECANICO-CHIMIQUES :

- **Exfoliation assistée par ultrasons de vermiculite (vmt-US) :**

1 g de vermiculite, préalablement broyée dans un mortier, a été ajouté à 100 ml de solution HCl, puis placé dans le bain ultrasonique (Bandelin Sonorex, 30 kHz) pendant 1 minute. Après cette période, une exfoliation supplémentaire a été effectuée à l'aide d'un homogénéisateur (Bandelin Sonopuls 3100, 20 kHz, 15 W, avec sonde en titane 3 mm 175 mm, 1–4 h). Après l'expérience, le pH de dispersion a été mesuré avec une Mettler Toledo Seven Compact™ S220 équipée d'une électrode In Lab® Expert Pro-ISM. Au besoin, le matériau solide a été recueilli par filtration à travers des membranes PTFE Omnipore™ (Merck) de 0,2 à 0,45 µm pour une caractérisation plus poussée [7]

- **Exfoliation de la vermiculite par cisaillement (vmt-SM) :**

5 g de vermiculite, préalablement broyée dans un mortier, ont été ajoutés à 500 ml de solution de HCl à pH = 3,5. Le processus d'exfoliation a été effectué à l'aide d'un mélangeur à cisaillement (Silverson L5M-A, 1000 à 3000 tr/min, 20 min) stocké dans une extrémité de rotor à trou carré (D = 32 mm, 96 trous carrés, 2 mm 2 mm chacun). Après l'expérience, le pH de la solution a été mesuré. Au besoin, le matériau solide a été recueilli par filtration à travers des membranes PTFE Omnipore™ (Merck) de 0,20 à 0,45 µm pour une caractérisation plus poussée. [7]

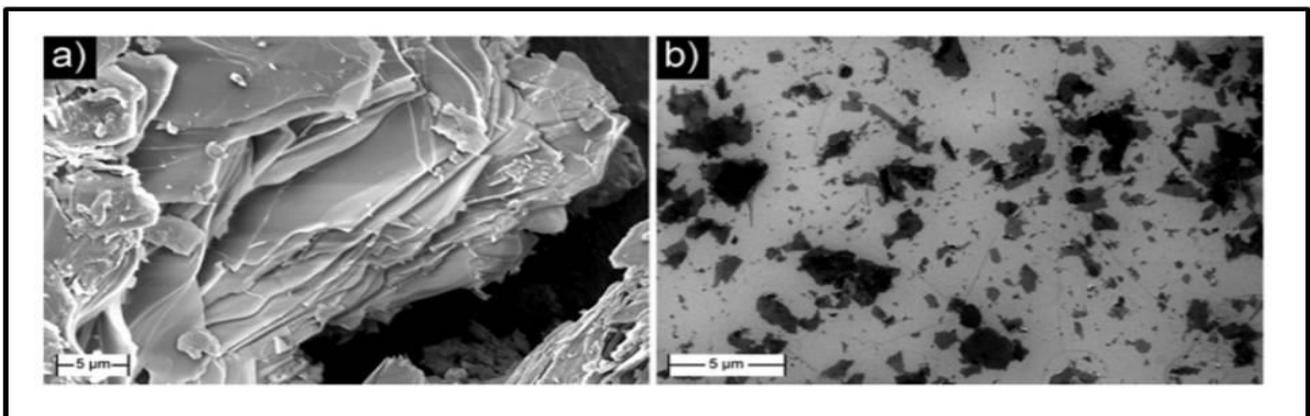


Figure 5: image SEM a) vermiculite avant exfoliation b) vermiculite après exfoliation. [7]

CHAPITRE 2 :
Tribologie, lubrification et frottement

1 INTRODUCTION :

Ce chapitre est consacré à la tribologie, frottement et l'usure. Dans ce chapitre, nous aborderons la composition et les différents types de lubrifiants, les mécanismes d'usure des surfaces en contact, ainsi que les méthodes de mesure de l'usure et de la friction.

2 LA TRIBOLOGIE :

En 1966, PETER JOST a introduit le terme « tribologie » qui dérive du mot grec « TRIBOS » signifiant « frotté ». [10]

La tribologie est la science qui étudie les phénomènes de frottement, d'usure et de lubrification des surfaces en mouvement relatif. Elle comprend également l'étude des interactions entre les matériaux en contact et l'impact des propriétés physiques, chimiques et mécaniques sur les performances de ces surfaces. La tribologie est appliquée dans de nombreux domaines industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, la mécanique, les matériaux, la nanotechnologie et les technologies de l'information et de la communication. Les avancées récentes en tribologie comprennent l'utilisation de nouveaux matériaux pour réduire l'usure et le frottement, l'optimisation de la lubrification pour améliorer les performances et la durée de vie des machines, ainsi que le développement de modèles numériques pour prédire le comportement des systèmes tribologiques. [11]

3 LA LUBRIFICATION :

La lubrification est un processus qui consiste à réduire le frottement et l'usure des surfaces en contact en introduisant un film liquide ou solide, appelé lubrifiant, entre ces surfaces. Le lubrifiant permet de minimiser les forces de frottement qui se produisent lorsque deux surfaces en contact se déplacent l'une contre l'autre, en créant une couche protectrice qui empêche le contact direct entre ces surfaces.

La lubrification peut être réalisée avec différents types de lubrifiants, tels que des huiles minérales ou synthétiques, des graisses, des liquides ioniques, des polymères ou même des gaz. Les lubrifiants peuvent être introduits dans les surfaces en contact par différents moyens, tels que le trempage, le pinceau ou le système de lubrification centralisé.

La lubrification est essentielle pour réduire l'usure, prolonger la durée de vie et améliorer les performances des équipements mécaniques, tels que les moteurs, les transmissions, les boîtes de vitesses, les roulements, les pompes, les compresseurs et les turbines. La sélection et l'application correctes des lubrifiants peuvent contribuer à réduire les coûts de maintenance, à augmenter la fiabilité et à améliorer l'efficacité énergétique des machines. [12]

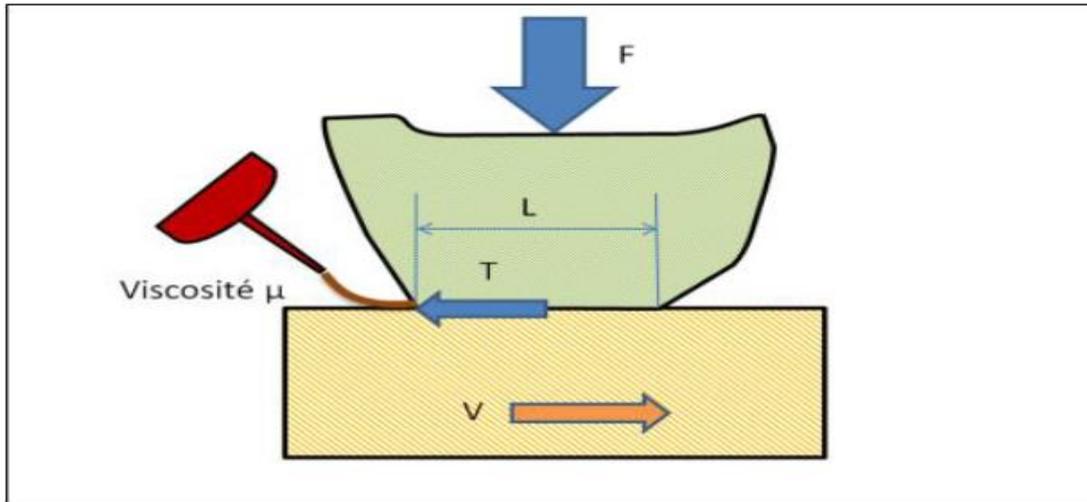


Figure 6:contact lubrifié. [10]

3.1 COMPOSITION DES LUBRIFIANTS :

Les lubrifiants sont composés d'une base d'huile et d'additifs qui leur confèrent des propriétés spécifiques. La composition exacte des lubrifiants peut varier en fonction de leur application et de leurs spécifications, mais voici quelques-uns des composants couramment utilisés :

1. Base d'huile : huile minérale, huile synthétique, huile végétale, etc.
2. Additifs anti-usure : zinc, phosphore, soufre, molybdène, etc.
3. Additifs antioxydants : phénols, amines, etc.
4. Additifs anticorrosion : zinc, soufre, phosphore, etc.
5. Additifs améliorant l'adhérence : agents de friction, etc.
6. Additifs pour la réduction de l'usure : polymères, fluoropolymères, etc.
7. Additifs améliorant les propriétés de viscosité : polymères, polymères de haute performance, etc.

La combinaison de ces composants varie selon les applications spécifiques pour lesquelles le lubrifiant est utilisé, et peut être ajustée pour répondre à des exigences particulières telles que la température, la pression et la charge.

3.2 GENERALITE SUR LES HUILES MINERALES :

Les huiles minérales sont des huiles lubrifiantes produites à partir de pétrole brut, qui est raffiné et traité pour obtenir une huile de base ayant les propriétés souhaitées. Elles sont largement utilisées comme lubrifiants dans de nombreuses applications industrielles et automobiles, en raison de leur coût relativement faible et de leur disponibilité.

Cependant, les huiles minérales sont souvent critiquées pour leur impact environnemental et leur performance limitée dans certaines applications extrêmes. Des alternatives plus durables, telles que les huiles synthétiques et les huiles végétales, gagnent en popularité. Les fabricants d'huiles minérales cherchent également à améliorer leurs produits en ajoutant des additifs et en utilisant des procédés de raffinage plus efficaces pour réduire leur impact environnemental et améliorer leur performance. [13]

3.3 GENERALITE SUR LES HUILES SYNTHÉTIQUES :

Les huiles synthétiques sont des lubrifiants de haute performance qui sont fabriqués à partir de composés chimiques de base et qui sont conçus pour offrir des performances supérieures à celles des huiles minérales traditionnelles. Elles sont utilisées dans une large gamme d'applications, y compris dans l'industrie automobile, l'aviation, la marine, l'industrie pétrolière et gazière, et dans de nombreuses autres industries.

Les huiles synthétiques offrent de nombreux avantages, notamment une stabilité thermique et une résistance à l'oxydation supérieure, une viscosité plus stable sur une plage de températures plus large, une excellente fluidité à basse température, une résistance à l'usure accrue, et une meilleure économie de carburant. Elles sont également plus respectueuses de l'environnement car elles ont tendance à durer plus longtemps que les huiles minérales, ce qui réduit les déchets et les émissions de CO₂.

Il existe plusieurs types d'huiles synthétiques, y compris les esters, les polyalphaoléfinés (PAO), les polyglycols, les huiles silicones et d'autres types moins courants. Chaque type d'huile synthétique a des propriétés spécifiques.

3.4 GENERALITE SUR L'HUILE DE PARAFFINE :

L'huile de paraffine, qui est également appelée huile minérale blanche, est un produit pétrolier. Elle est incolore, inodore et sans saveur et est principalement composée d'hydrocarbures. En raison de ses propriétés physiques et chimiques, l'huile de paraffine est largement utilisée dans diverses applications, telles que la lubrification des machines, la fabrication de produits pharmaceutiques et cosmétiques, la protection contre la corrosion,

l'isolation électrique, etc. Elle est également utilisée comme matière première pour la production de cires, de graisses et d'autres produits dérivés. [14][15]

3.4.1 LES CARACTÉRISTIQUES DE L'HUILE DE PARAFFINE :

Voici quelques caractéristiques de l'huile de paraffine :

- Viscosité : l'huile de paraffine a une viscosité élevée, ce qui lui confère de bonnes propriétés de lubrification et une capacité à adhérer aux surfaces métalliques.
- Point d'éclair : l'huile de paraffine a un point d'éclair relativement élevé, ce qui signifie qu'elle est moins inflammable que d'autres types d'huiles.
- Point de congélation : l'huile de paraffine a un point de congélation relativement bas, ce qui la rend liquide à des températures très basses.
- Inodore et incolore : l'huile de paraffine n'a pas d'odeur et n'est pas colorée, ce qui
- La rend appropriée pour une utilisation dans des produits pharmaceutiques et cosmétiques.
- Stabilité chimique : l'huile de paraffine est chimiquement stable et ne réagit pas avec de nombreux produits chimiques courants, ce qui la rend appropriée pour une utilisation dans des applications industrielles.
- Isolation électrique : l'huile de paraffine est un excellent isolant électrique et est utilisée dans les transformateurs électriques pour prévenir les courts-circuits.
- Pureté : l'huile de paraffine est généralement très pure et peut être utilisée en toute sécurité dans les produits pharmaceutiques et cosmétiques.

Ces caractéristiques font de l'huile de paraffine un produit polyvalent et largement utilisé dans de nombreuses industries. [14][15]

3.5 LES LUBRIFIANTS SOLIDES :

Dans certains environnements extrêmes, il n'est pas possible d'utiliser des lubrifiants fluides. C'est le cas d'applications à très haute température ou dans l'espace. On fait alors appel à des lubrifiants solides. Ils sont déposés en couches entre les solides en frottement et jouent le rôle d'un troisième corps qui peut se cisailer facilement pour réduire le frottement et limiter l'usure.

Les lubrifiants peuvent avoir une structure lamellaire comme le graphite ou le bisulfure de molybdène (MoS₂) dont les couches glissent facilement l'une sur l'autre (voir figure). On trouve également des lubrifiants plastiques comme le PTFE (polytétrafluoro éthylène) dont la faible énergie de surface permet de réduire le frottement [10]

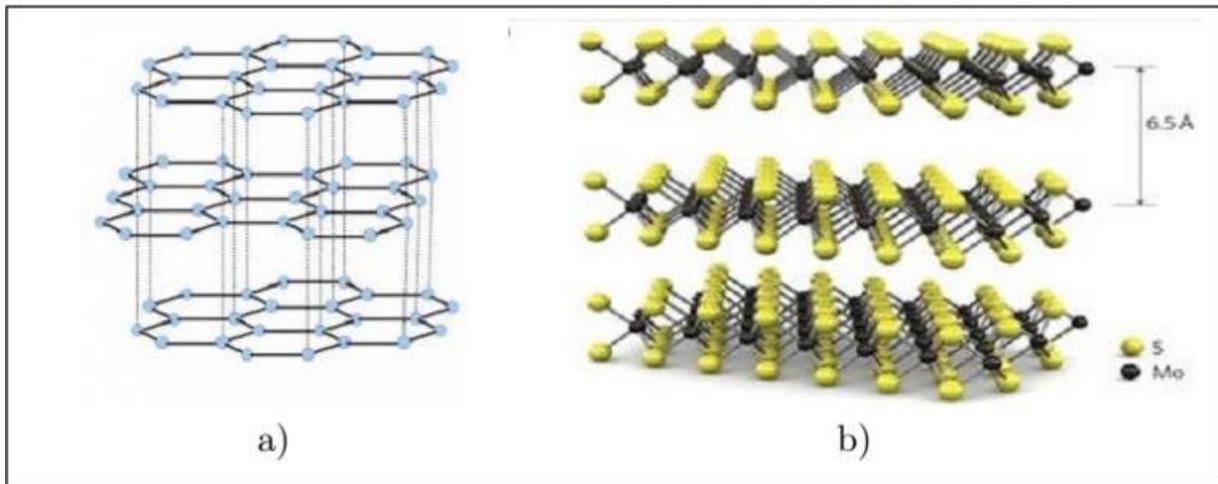


Figure 7:Exemples de lubrifiants solides : a) graphite - b) disulfure de molybdène [10]

4 L'USURE :

L'usure est le processus de détérioration progressive d'un matériau ou d'un objet résultant de l'interaction avec son environnement ou avec d'autres matériaux. Elle peut être causée par des frottements, des chocs, des contraintes mécaniques, des réactions chimiques ou d'autres facteurs externes. L'usure peut affecter la performance, la durabilité et l'apparence d'un objet ou d'un matériau, et peut conduire à des défaillances ou des pannes. Les ingénieurs et les scientifiques étudient l'usure pour comprendre comment les matériaux se comportent dans différents environnements et pour développer des matériaux plus résistants à l'usure.

4.1 LES MECANISMES DE L'USURE:

4.1.1 L'USURE ADHESIVE :

L'usure adhésive est un type d'usure qui se produit lorsque deux surfaces en contact glissent l'une sur l'autre sous une pression élevée. Dans ce processus, une partie des deux surfaces est arrachée, créant des adhérences entre les deux surfaces. Ces adhérences sont ensuite rompues, ce qui entraîne une détérioration des surfaces en contact. L'usure adhésive peut être un problème majeur dans les mécanismes de frottement à haute pression, tels que les moteurs, les transmissions et les freins. Elle peut également se produire dans des applications à faible vitesse, comme les interfaces d'étanchéité ou les coussinets de glissement. [10]

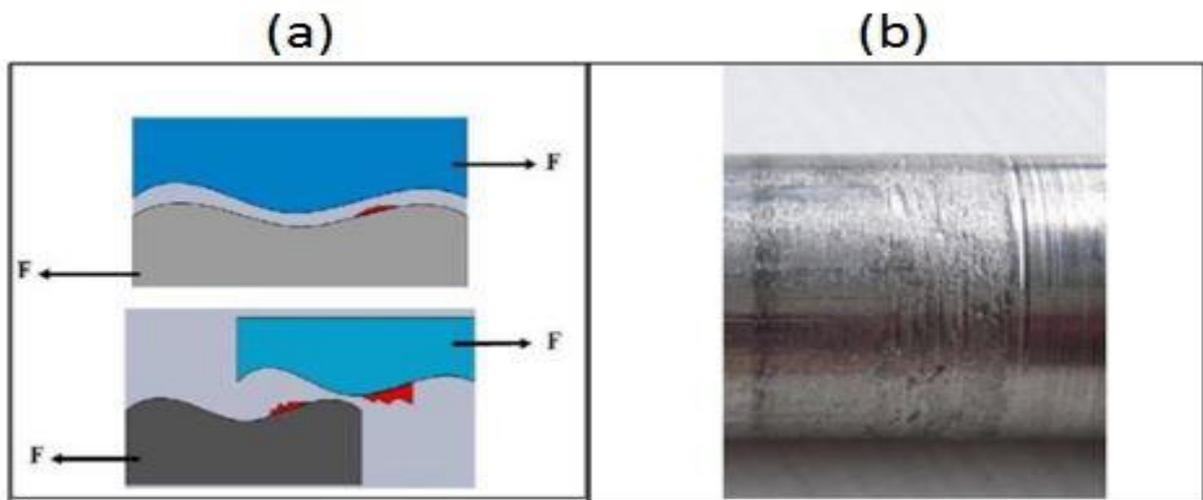


Figure 8: (a) Phénomène de l'usure adhésive (b) l'usure adhésive [16-10]

4.1.2 L'USURE ABRASIVE :

L'usure abrasive est une forme d'usure qui se produit lorsqu'une surface en mouvement entre en contact avec des particules abrasives dures telles que des grains de sable, des particules de poussière ou des débris métalliques. Ces particules agissent comme des outils de coupe et provoquent l'enlèvement progressif de matériau de la surface en mouvement. L'usure abrasive peut être particulièrement préjudiciable dans les systèmes mécaniques où les surfaces en mouvement sont soumises à des charges élevées, ce qui peut entraîner une usure rapide et une dégradation de la performance du système. [10]

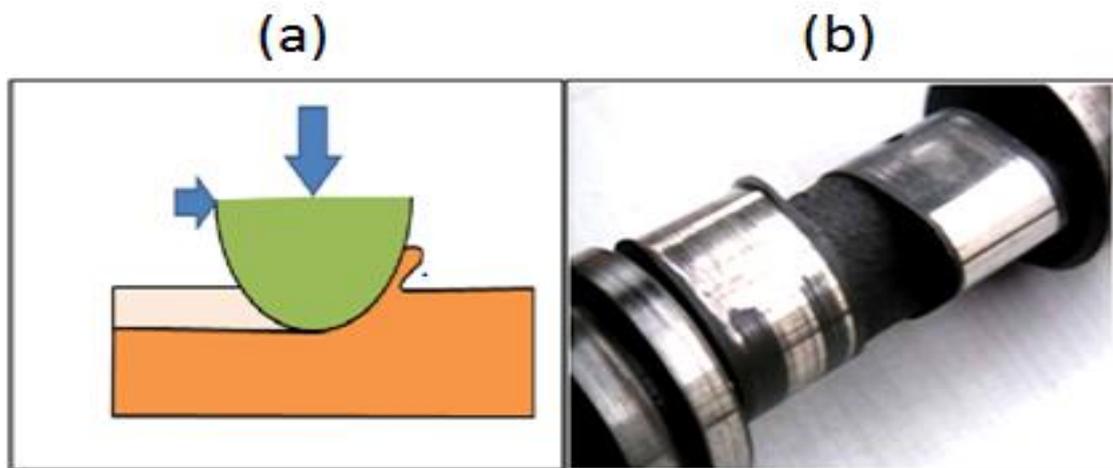


Figure 9:(a) Mécanisme de l'usure abrasive (b) l'usure abrasive. [10]

4.1.3 L'USURE EROSIVE :

L'usure érosive est un type d'usure qui résulte de l'impact de particules en mouvement rapide, telles que des liquides, des gaz ou des solides, sur une surface solide. Ce type d'usure peut causer des dommages importants aux surfaces exposées à des flux érosifs, entraînant une diminution de la résistance et de la durée de vie des matériaux. Les causes courantes de l'usure érosive comprennent les impacts de sable ou de débris dans les moteurs, les érosions de l'eau sur les bords de la rivière et les impacts de particules dans les conduites d'écoulement de gaz et de liquides. Les ingénieurs étudient l'usure érosive pour comprendre comment les matériaux se comportent dans différents environnements et pour développer des matériaux plus résistants à l'usure érosive. [10]

4.1.4 L'USURE PAR FATIGUE :

L'usure par fatigue est un phénomène qui se produit dans les matériaux soumis à des contraintes cycliques répétées. Elle se caractérise par la détérioration progressive du matériau en raison des contraintes fluctuantes, même si ces contraintes sont inférieures à la limite de résistance du matériau. L'usure par fatigue peut se produire dans divers matériaux tels que les métaux, les polymères. [10]

4.1.5 L'USURE CORROSIVE :

L'usure corrosive est une forme d'usure qui se produit lorsqu'un matériau subit une réaction chimique avec un environnement corrosif, entraînant une détérioration de sa surface. Les matériaux les plus couramment affectés par l'usure corrosive sont les métaux et les alliages. Les réactions chimiques peuvent être causées par des acides, des alcalis, des sels ou d'autres substances chimiques présentes dans l'environnement. L'usure corrosive peut entraîner la formation de piqûres, d'érosion ou de fissures dans le matériau, qui peuvent à leur tour entraîner une diminution de la performance et de la durabilité de l'objet ou de la structure en question. Pour prévenir l'usure corrosive, il est souvent nécessaire d'utiliser des matériaux résistants à la corrosion ou d'appliquer des revêtements de protection sur la surface du matériau. [10]

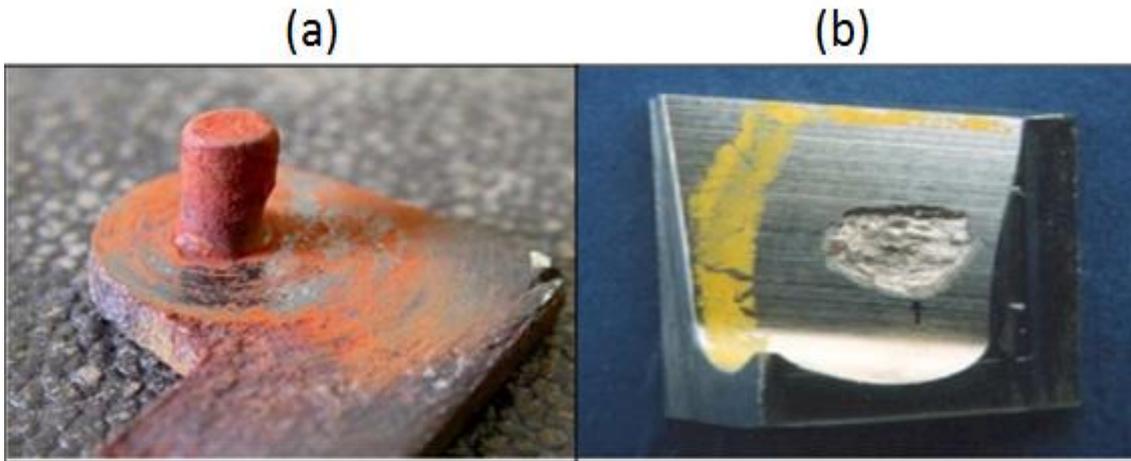


Figure 10: (a) l'usure corrosive (b) l'usure par fatigue [10]

4.2 LES PARAMETRES INFLUANT SUR LE TAUX D'USURE :

Le taux d'usure dépend de nombreux paramètres, notamment :

- La nature et les propriétés des matériaux en contact.
- La force de contact ou la pression entre les surfaces en contact.
- La température et l'environnement dans lequel l'usure se produit (par exemple, la présence de liquides corrosifs ou de contaminants).
- La géométrie des surfaces en contact et la rugosité.
- La lubrification ou la présence d'additifs solides.
- La présence de particules étrangères, de fissures ou d'autres imperfections dans les matériaux.

La compréhension de ces paramètres est essentielle pour prévoir et contrôler l'usure des matériaux et des systèmes mécaniques.

4.3 MESURE DE L'USURE :

L'usure est généralement mesurée au cours d'un test de frottement sur un tribomètre. Des techniques simples de mesure d'usure permettent d'évaluer la quantité de matière enlevée :

- Pesée : pesée de l'échantillon avant et après le test de frottement au moyen d'une Balance de précision
- Mesure de cote : Mesure de la variation de longueur d'un échantillon avant et après le test de frottement, dans le cas d'une usure uniformément répartie
- Mesure du volume usé : Mesure de topographie avant et après test pour évaluer le volume enlevé pour créer la piste d'usure [10]

5 FROTTEMENT :

5.1 DEFINITION DE FROTTEMENT :

Le frottement est une force qui résiste au mouvement relatif ou à la tentative de mouvement relatif entre deux surfaces en contact. Cette force est générée par les interactions entre les aspérités des surfaces en contact et peut être influencée par la nature et les propriétés des matériaux en contact, ainsi que par les conditions environnementales telles que la température et l'humidité. Le frottement peut entraîner une usure des surfaces en contact, ainsi que la génération de chaleur et de bruit.

5.2 LES MECANISMES DE FROTTEMENT :

Il existe plusieurs mécanismes de frottement, voici quelques-uns :

1. Frottement sec : Ce mécanisme de frottement se produit lorsque deux surfaces en contact glissent l'une sur l'autre sans lubrification. Il est caractérisé par une forte force de frottement et une usure importante des surfaces en contact.
2. Frottement fluide : Ce mécanisme de frottement se produit lorsque deux surfaces en contact sont séparées par un fluide, tel que l'huile ou l'eau. Il est caractérisé par une faible force de frottement et une usure moindre des surfaces en contact.
3. Frottement de roulement : Ce mécanisme de frottement se produit lorsque deux surfaces en contact roulent l'une sur l'autre, comme dans le cas des roues d'une voiture. Il est caractérisé par une faible force de frottement et une usure minimale des surfaces en contact.

4. Frottement mixte : Ce mécanisme de frottement se produit lorsque les surfaces en contact glissent et roulent simultanément. Il est caractérisé par des forces de frottement variables et une usure variable des surfaces en contact.

Ces mécanismes de frottement sont importants pour comprendre les interactions entre les surfaces en contact et pour développer des matériaux et des lubrifiants qui réduisent la friction et l'usure.

5.3 MESURE DE FROTTEMENT :

Le facteur de frottement se mesure au moyen d'un tribomètre. La figure (5) présente un tribomètre pion-disque qui est parmi les appareils les plus couramment utilisés. Il se compose d'un arbre en rotation à vitesse variable sur lequel se fixe un disque constituant le premier matériau à tester. Un pion réalisé avec le deuxième matériau du couple tribologique se monte sur un support équipé d'un capteur de force normale et tangentielle. Une Force normale est appliquée au support de manière à presser le pion sur le disque. Puis le Disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée [10].

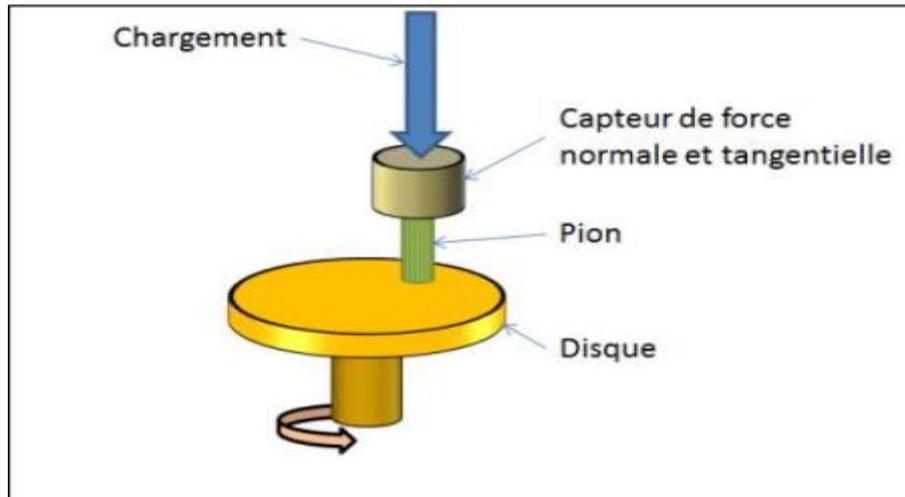


Figure 11:un tribomètre pion sur disque. [10]

CHAPITRE 3 :

Etat de l'art sur Les matériaux bidimensionnels comme lubrifiants solides

1 INTRODUCTION :

Les matériaux à structure stratifié tels que le graphite et le MoS₂, sont souvent utilisés comme lubrifiants solides [17]

Les atomes d'une même couche atomique sont liés de manière covalente, ce qui confère à la structure monocouche son module et sa résistance élevés. De plus, les nanomatériaux bidimensionnels (2D) ont des surfaces spécifiques plus élevées par rapport aux autres matériaux nanostructures. Cela leur permet de couvrir une plus grande surface que les autres nanomatériaux lorsqu'ils sont absorbés sur une surface de substrat, réduisant ainsi le potentiel de contact direct avec les surfaces de frottement et réduisant la quantité de friction entre elles. [17-18]

Les progrès des technologies de modification de surface ont fourni de nouvelles façons de disperser uniformément les structures en couches dans les milieux liquides de base. De plus, les techniques d'isolation monocouche pour la synthèse de structures monocouches et de structures multicouches ont amélioré notre compréhension des interactions entre les surfaces de nano feuilles et d'autres matériaux. Ces développements encouragent de nouvelles investigations sur les propriétés tribologiques des nanomatériaux 2D entant qu'additifs lubrifiants [17-18]

2 LES MATERIAUX BIDIMENSIONNELS COMME LUBRIFIANTS SOLIDES :

2.1 MAXENENE COMME LUBRIFIANT SOLIDE :

L'article de Yang et al [19], présente une étude sur les propriétés tribologiques du Ti₃C₂ bidimensionnel.

Les propriétés tribologiques du Ti₃C₂ bidimensionnel ont été étudiées en utilisant un tribomètre à bille sur disque. Les résultats ont montré que le Ti₃C₂ bidimensionnel présente des propriétés tribologiques améliorées par rapport à celles du Ti₃AlC₂ tridimensionnel. En particulier, le Ti₃C₂ bidimensionnel présente une friction plus faible et une usure plus lente que le Ti₃AlC₂.

Les chercheurs ont également étudié l'effet de la concentration d'additif de Ti₃C₂ bidimensionnel sur les propriétés tribologiques de l'huile de base. Les résultats ont montré que l'ajout de Ti₃C₂ bidimensionnel dans l'huile de base peut considérablement réduire la friction et l'usure.

En conclusion, cette étude montre que le Ti₃C₂ bidimensionnel peut être utilisé comme un additif potentiel pour améliorer les propriétés tribologiques de l'huile de base. Les résultats

suggèrent que le Ti_3C_2 bidimensionnel a un grand potentiel pour être utilisé dans les applications de lubrification et de friction.

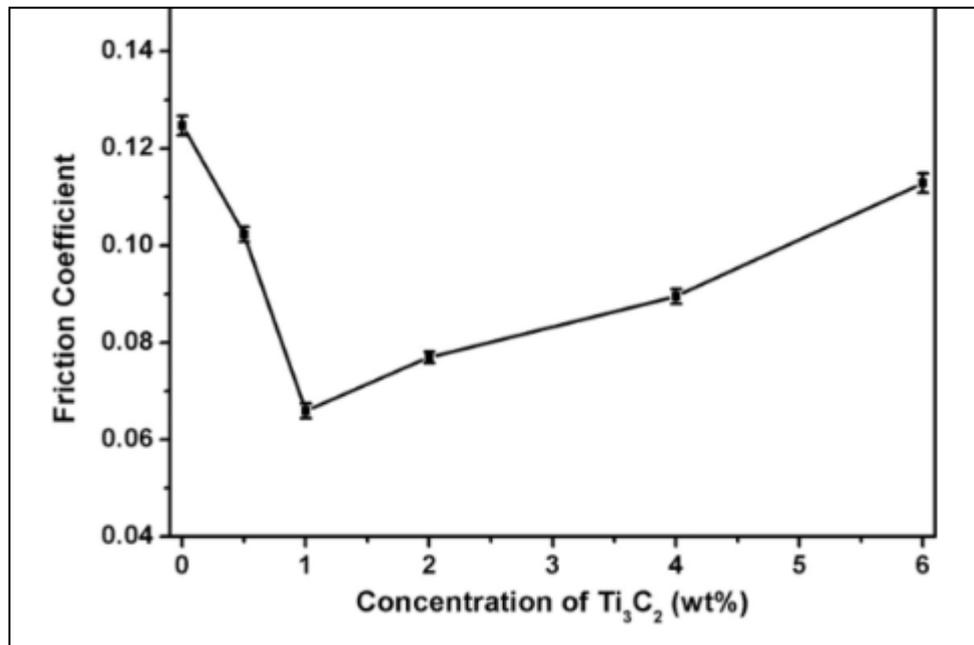


Figure 12:coefficient de frottement en fonction de concentration de Ti_3C_2 dans l'huile de base. [19]

2.2 LE GRAPHENE COMME LUBRIFIANT SOLIDE :

L'article de Berman et al [20] présente une étude sur l'effet du graphène sur le frottement et l'usure des paires de tests en acier dans un environnement d'air humide. Trois expériences modèles ont été réalisées pour évaluer les performances : (1) acier contre acier, (2) acier contre graphène traité en solution (SPG) sur acier immergé dans une solution liquide de SPG, et (3) acier contre SPG sur acier avec une alimentation intermittente de gouttes de SPG tous les 400 cycles.

Les résultats ont montré que l'ajout de SPG réduisait significativement l'usure des surfaces en acier et le frottement à l'interface tribologique. L'analyse de la trace d'usure par imagerie et spectroscopie Raman a révélé la suppression du pic d'oxyde de fer et la présence de graphène. Ces résultats indiquent un effet de passivation dû aux couches de graphène, qui non seulement contribuent à réduire la tribocorrosion et l'usure, mais facilitent également le cisaillement et réduisent le frottement.

Les tests effectués avec une solution de SPG liquide après traitement à l'éthanol ont montré une réduction du coefficient de frottement à 0,2. Cependant, les tests avec un lubrifiant d'éthanol pur ont entraîné un coefficient de frottement plus élevé (0,4) et une usure importante, ce qui suggère que c'est le graphène qui est responsable de la réduction du frottement.

Les expériences avec une alimentation périodique de gouttes de SPG tous les 400 cycles ont maintenu un faible coefficient de frottement d'environ 0,15. Cette réduction du frottement est attribuée à la présence continue de couches de graphène dans l'interface de contact. Les résultats indiquent également que les faibles valeurs de frottement peuvent être maintenues pendant une période prolongée. Il a été observé que la durée entre les ajouts de solution de SPG augmentait avec le temps, ce qui suggère la formation d'une tribocouche stable.

En conclusion, cette étude démontre l'effet réducteur du frottement du SPG. Le graphène se révèle ainsi être une nouvelle classe de lubrifiant pour les surfaces en acier et potentiellement pour d'autres surfaces métalliques. Il présente des avantages tels que la résistance à la corrosion, la faible toxicité et la facilité d'application.

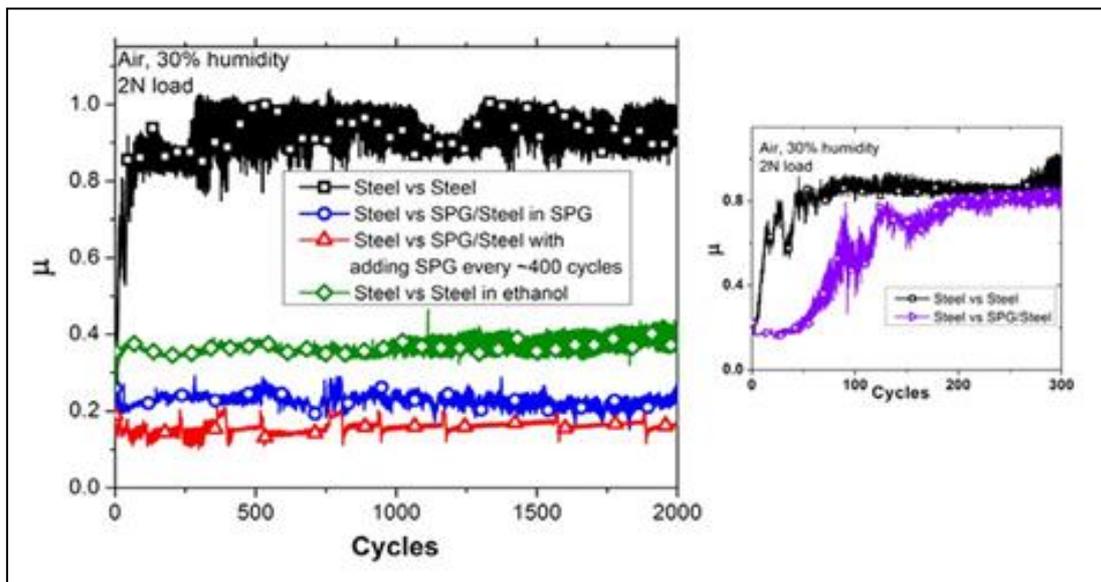


Figure 13: Coefficients de frottement (l) pour une paire d'essais en acier auto-accouplée dans l'air humide sans SPG, sans SPG dans l'éthanol, avec SPG dans une solution d'éthanol et avec alimentation intermittente en SPG. De plus, les résultats COF pour l'acier. [20]

2.3 L'OXYDE DE GRAPHENE COMME LUBRIFIANT SOLIDE :

De manière similaire au graphène, les nanofeuilles d'oxyde de graphène peuvent être directement utilisées comme lubrifiant solide et offrent d'excellentes performances tribologiques à l'échelle micro/macro. En ce qui concerne les méthodes expérimentales utilisées pour caractériser les performances tribologiques à l'échelle micro/macro. [21]

ETUDE 1 :

Dans l'article de (Eswaraiah et al) [21] le coefficient de frottement (COF) des nano lubrifiants à base de graphène, y compris l'huile de base, a été mesuré à l'aide d'un tribomètre à quatre billes. Les résultats sont présentés dans la (Figure 20).

Les résultats montrent que le COF de l'huile de base était d'environ 0,1. Lorsque la concentration de graphène augmente dans l'huile, le COF diminue initialement de manière significative jusqu'à atteindre une valeur extrêmement faible à une concentration particulière, puis il augmente à mesure que la concentration de graphène dans l'huile augmente. Cette diminution améliorée du coefficient de frottement des nano lubrifiants à base de graphène peut être attribuée à la structure en couches du graphite et à son autolubrification. Les feuilles de graphène, composées de couches de 12 nm d'épaisseur, peuvent agir comme des nano-roulements entre les pièces en mouvement et réduire le frottement.

Des études antérieures ont également montré une réduction du COF pour des nano lubrifiants à base de graphène. Par exemple, Lin et al. ont rapporté une diminution du COF de 0,17 à 0,19 (pour l'huile de base) à 0,12 (pour 0,075 % en poids de MGP). [22]

De plus, l'article mentionne que l'ajout de graphène à l'huile de base permet de réduire la température lors des essais de frottement. Par exemple, la température reste autour de 35 °C à une charge de 1400 N pour un nano lubrifiants à base de graphène, tandis qu'elle atteint 60 °C pour l'huile de base seule. Cela peut être attribué à l'effet de polissage du graphène, qui réduit le coefficient de frottement et limite ainsi l'augmentation de température.

Le mécanisme de lubrification des nano fluides d'huile moteur à base de graphène est attribué à la formation d'un film de lubrification continu composé de graphène entre les surfaces en mouvement. Le graphène, en raison de sa géométrie plane, peut facilement glisser entre les surfaces dans l'huile, réduisant ainsi le frottement. Cependant, il est important de noter que l'efficacité de la réduction du frottement et de l'usure dépend de la concentration optimale de

graphène dans l'huile de base. Une concentration excessive de graphène peut entraîner l'agrégation des particules et augmenter l'usure et le frottement entre les surfaces.

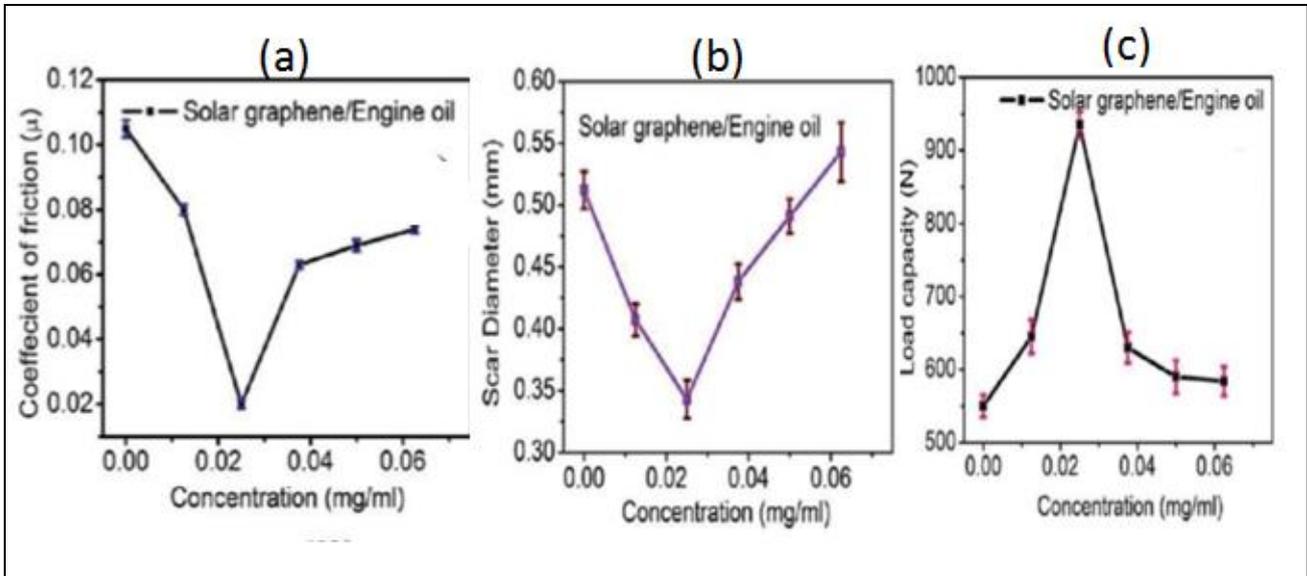


Figure 14: les propriétés tribologiques des nano fluides à base d'huile de moteur contenant de graphène (a) le coefficient de frottement (b)le diamètre de l'empreinte de l'usure (c)la capacité de la charge.[21]

ETUDE 2 :

L'article publié par Song et al [23] aborde les propriétés tribologiques des nanomatériaux tels que l'oxyde de graphène et les sphères de carbone utilisés comme additifs lubrifiants. L'accent est mis sur l'analyse du coefficient de frottement (COF) de ces matériaux.

Dans l'étude, les chercheurs ont ajouté de l'oxyde de graphène et des sphères de carbone à de l'huile de tournesol, puis ont évalué les propriétés tribologiques en fonction de leur concentration respective. Ils ont observé que les deux additifs nanométriques présentaient une Bonne stabilité de dispersion pendant une période de 12 jours. Figure



Figure 15: Photographies numériques de la dispersion de 0,3 % en poids de GO et de 0,3 % en poids de CSs dans un lubrifiant à base d'huile de graines de tournesol. Le temps de chaque image est indiqué sur la bouteille d'échantillon respective. [23]

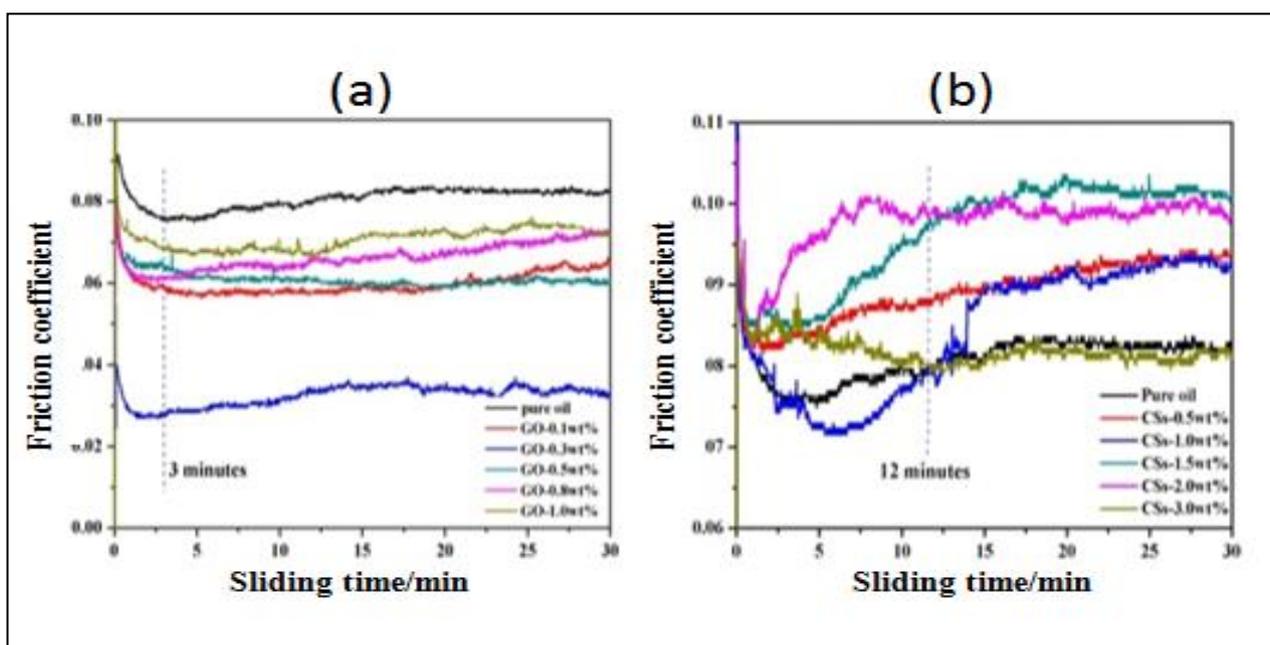


Figure 16: Coefficient de frottement de l'huile de graines de tournesol contenant différentes concentrations de GO et de CSs sous une charge spécifique [500 g (5 N)] et une vitesse de rotation [300 tr/min (0,094 m/s)]. [23]

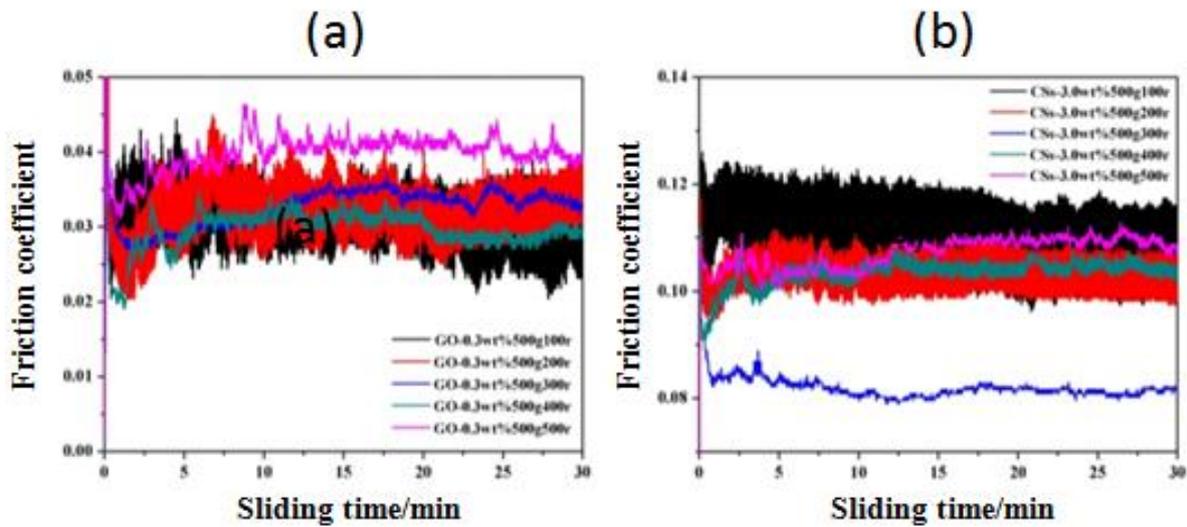


Figure 17: Coefficient de frottement de 0,3 % en poids de GO et de 3,0 % en poids de CSs en fonction de différentes vitesses de rotation (100 à 500 tr/min) sous une charge spécifique (500 g).[23]

Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation de la concentration en oxyde de graphène (GO). Cependant, le coefficient de frottement commence à augmenter lorsque la concentration en GO dépasse 0,3 % en poids. Par conséquent, la concentration optimale en GO pour réduire le frottement est de 0,3 %. De plus, on observe que le coefficient de frottement de l'huile de graines de tournesol contenant du GO tend à rester horizontal et stable autour de 3 minutes, ce qui peut être attribué à la formation de films de transfert de GO sur la surface usée de la plaque d'acier et de la bille d'acier.

La figure 17 illustre le coefficient de frottement en fonction de la concentration de sphères de carbone (CS) allant de 0,5 % à 3,0 % en poids, à 300 tours par minute sous une charge de 5 N pendant 30 minutes. L'ajout de CS a peu d'effet sur la réduction du coefficient de frottement de l'huile de graines de tournesol. Lorsque la concentration est inférieure à 2,0 % en poids, le coefficient de frottement est légèrement plus élevé que celui de l'huile de graines de tournesol seule. À une concentration de 3,0 % en poids de CS, le coefficient de frottement est légèrement inférieur à celui de l'huile de graines de tournesol pure. Après 12 minutes, le coefficient de frottement de l'huile de graines de tournesol contenant des CS se stabilise.

De plus, le coefficient de frottement de l'huile de base contenant 0,3 % en poids de GO et 3,0 % en poids de CS est étudié à différentes vitesses de rotation dans la figure 6. Le coefficient de frottement diminue légèrement avec l'augmentation de la vitesse de rotation jusqu'à 400 tours par minute. Cependant, lorsque la vitesse de rotation dépasse 400 tours par minute, Le coefficient de frottement commence à augmenter. Le coefficient de frottement de l'huile de base avec 0,3 % en poids de GO reste dans une petite plage de 0,025 à 0,04, ce qui indique un effet constant des additifs sur la réduction du frottement.

En termes de performance tribologique, l'oxyde de graphène a surpassé les sphères de carbone en termes de COF minimal atteint. Une concentration de 0,3 % en poids d'oxyde de graphène a permis d'atteindre un COF minimum d'environ 0,08. Cela indique que l'oxyde de graphène a une capacité remarquable à réduire le frottement entre les surfaces en mouvement.

Il convient de noter que l'étude a souligné que la stabilité de dispersion des nanomatériaux dans l'huile est un aspect essentiel à prendre en compte pour maintenir les performances tribologiques à long terme. Une bonne dispersion empêche la ré-agglomération des nanomatériaux, ce qui peut compromettre leur efficacité lubrifiante.

En résumé, l'article met en évidence les avantages potentiels de l'oxyde de graphène et des sphères de carbone en tant qu'additifs lubrifiants. Ces nanomatériaux peuvent réduire de manière significative le coefficient de frottement et améliorer les propriétés tribologiques lorsqu'ils sont dispersés de manière stable dans l'huile de base.

3 L'INFLUENCE DE LA CHARGE SUR LES PROPRIÉTÉ TRIBOLOGIQUE :

L'utilisation de matériaux à structure bidimensionnelle (2D) dans le domaine de la lubrification suscite un intérêt croissant.

Une étude menée par Yang et al [19], Dans cette étude, les chercheurs ont examiné les comportements tribologiques du Ti_3C_2 exfolié en tant qu'additif de lubrification dans une huile de base à l'aide d'un testeur de frottement et d'usure de type UMT-2 (bille sur plaque). Le Ti_3C_2 en couches 2D présentait une épaisseur très faible, se présentant sous forme de couches individuelles ou d'empilements de plusieurs couches.

Les résultats de l'étude ont révélé que le Ti_3C_2 en couches 2D pouvait considérablement améliorer les propriétés de réduction de friction et de résistance au frottement de l'huile de base, en particulier avec une concentration de 1,0% en poids de Ti_3C_2 . Ces résultats sont d'une

grande importance pour la conception de nouveaux matériaux lubrifiants en couches 2D, capables de répondre aux besoins émergents dans les applications pratiques.

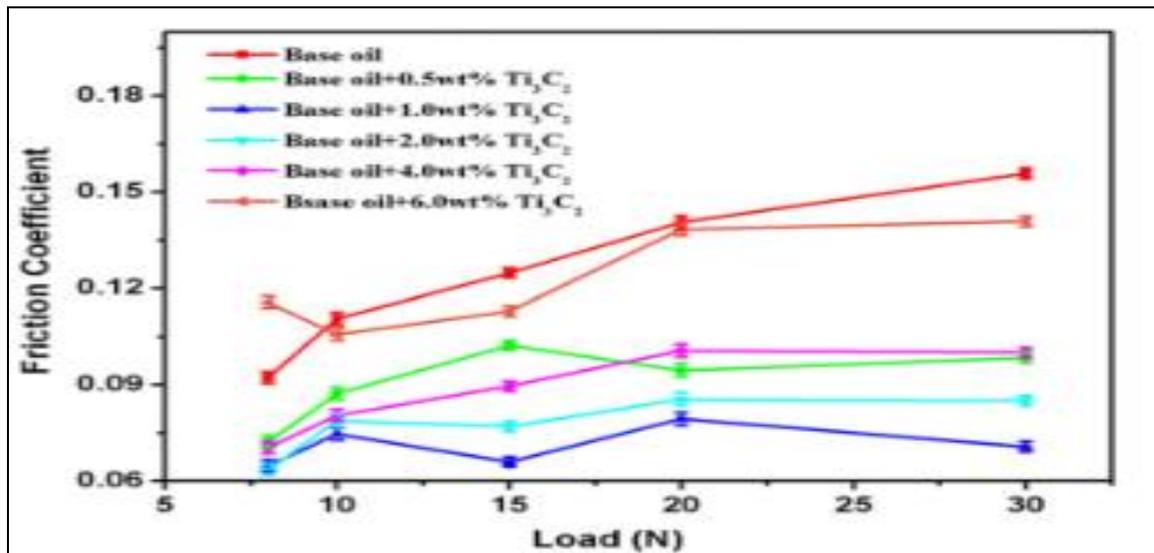


Figure 18: Coefficient de frottement en fonction de la charge appliquée pour huile de base avec différentes concentrations de Ti_3C_2 [19]

La figure illustre l'effet de la charge appliquée sur le coefficient de friction de l'huile de base avec différentes concentrations de Ti_3C_2 . Le coefficient de friction de l'huile de base augmente presque linéairement avec la charge appliquée. Dans la plage de charges appliquées de 8 N à 20 N, le coefficient de friction augmente légèrement car la charge accrue s'oppose à la formation de films d'huile entre les surfaces en contact. Cependant, lorsque la charge appliquée dépasse 20 N, le coefficient de friction de l'huile de base contenant du Ti_3C_2 en deux dimensions reste inchangé. La raison en est que, sous des charges appliquées élevées, le Ti_3C_2 en deux dimensions peut former une couche à la surface de la pièce en contact, ce qui permet non seulement un effet de lubrification, mais également d'éviter le contact direct entre les surfaces en contact. Autrement dit, la propriété de réduction du coefficient de friction de l'huile de base sous faible charge appliquée est principalement due à l'effet de lubrification, tandis que sous des charges appliquées élevées (20 N à 30 N), la formation d'un film d'huile est la principale raison pour laquelle l'huile contenant du Ti_3C_2 présente une excellente réduction du coefficient de friction. Il convient de noter que le coefficient de friction est un paramètre clé pour évaluer les performances de lubrification.

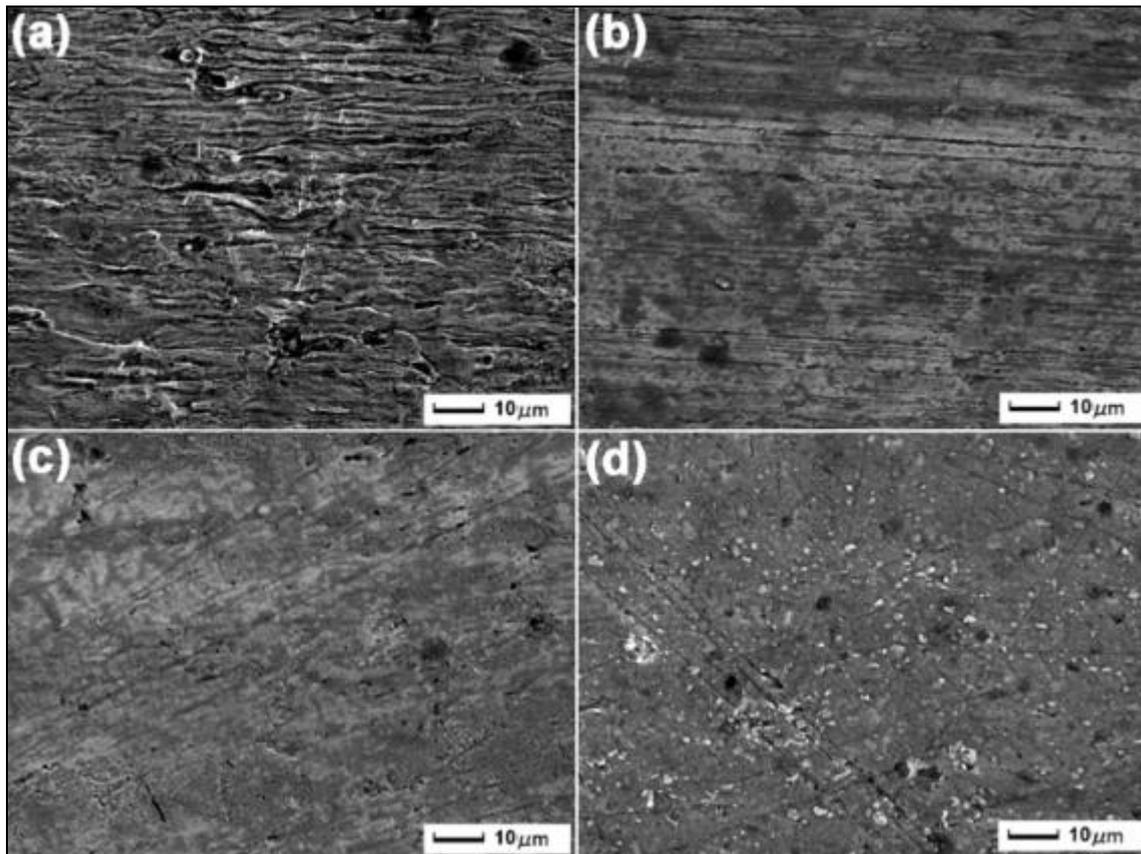


Figure 19:images SEM des surface usées des aciers lubrifié par de hiles de base a) huile de base avec 0 .5 wt% b) ,1 .0 wt% (c), et 6.0 wt % (d) Ti3C2 sous la charge appliqué 15 N. [19]

4 L'INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ SUR LES PROPRIÉTÉS TRIBOLOGIQUE :

Outre l'utilisation exclusive de nanofeuilles d'oxyde de graphène en tant que lubrifiant solide, il existe également d'importantes activités de recherche dans le domaine des revêtements composites. En ce qui concerne les revêtements composites à base de polymères, Saravanan et al. [24] ont fabriqué des revêtements en couches alternées d'oxyde de graphène et de polyéthylèneimine (PEI) avec 5, 10 et 15 bilayers. Par la suite, ils ont testé leurs performances tribologiques dans des conditions d'air, de vide, d'hydrogène et d'azote. Comme le montre la figure 4, le coefficient de frottement était généralement plus faible en cas de glissement à sec par rapport aux conditions plus humides, ce qui était contradictoire par rapport à la compréhension courante pour les revêtements de graphite et de carbone de type diamant. Pour des conditions d'azote sec, des états super lubrifiants avec des coefficients de frottement inférieurs à 0,01 ont été détectés pour les revêtements avec 15 bilayers. Ces résultats ont été attribués à la formation de rouleaux vérifiée par microscopie électronique à transmission haute résolution (HR-TEM), ce qui leur permet d'agir comme des nano-roulements. Les simulations DFT ont montré que l'humidité relative avait un effet significatif sur la

passivation de l'hydrogène résultante, ce qui, à son tour, affectait directement les performances de frottement (Saravanan et al. 2016).

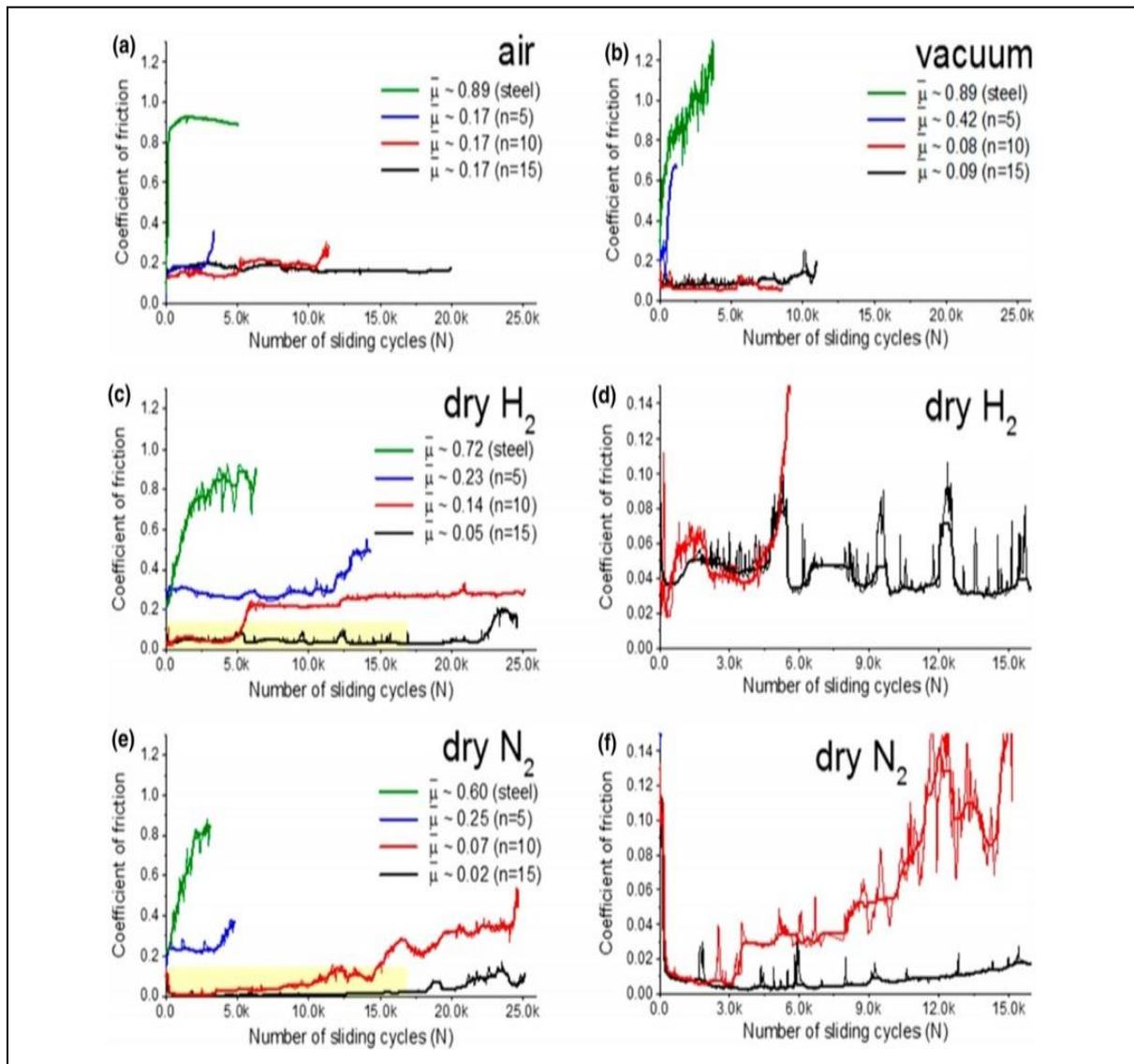


Figure 20: Évolution du coefficient de frottement (COF) en fonction des cycles de glissement pour les revêtements composites (PEI/graphène oxyde) n testés et dans différentes atmosphères a) air, b) vide, c) d) hydrogène sec et e) azote sec. [24]

Dans ce contexte, "n" indique le nombre de bicouches de PEI/graphène oxyde, comprenant 5 (courbes bleues), 10 (courbes rouges) et 15 bicouches (courbes noires), tandis que les courbes vertes représentent les mesures de référence avec des substrats d'acier nu [24]

CHAPITRE04 :
Partie expérimentale élaboration et
caractérisation

1 INTRODUCTION :

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire science des matériaux SDM et le Laboratoire d'Études et de Recherche en Technologie Industrielle (LERTI) de l'Université de Blida 1.

L'objectif principal de cette partie expérimentale était d'étudier l'exfoliation de la vermiculite et son impact sur la tribologie. Le chapitre correspondant se concentrera sur le protocole expérimental, les techniques et les méthodes utilisées pour exfolier la vermiculite. L'idée était d'utiliser la vermiculite exfoliée comme lubrifiant solide, en la combinant avec de l'huile de paraffine.

Plusieurs tests ont été réalisés afin de déterminer le milieu de dispersion optimal pour la vermiculite exfoliée. Ensuite, une technique expérimentale basée sur la tribologie a été appliquée aux échantillons en acier (100Cr6) et (430C) préalablement polis. L'objectif était de mesurer le coefficient de frottement et le taux d'usure.

2 LA COMPOSITION CHIMIQUE DES ECHANTILLONS :

2.1 ACIER 100Cr6 :

La barre de 100Cr6 est un acier au chrome, utilisé principalement pour la fabrication de roulements à billes. L'oxydation de la barre de 100Cr6 peut se produire en présence d'oxygène et d'humidité, ce qui entraîne la formation d'oxyde de fer, communément appelé rouille.

L'acier 100Cr6 contient du chrome, qui est un élément allié pour augmenter la résistance à la corrosion. Le chrome forme une couche protectrice d'oxyde de chrome à la surface de l'acier, qui agit comme une barrière contre la corrosion.[26]

Tableau 3: La composition chimique de l'acier 100Cr6. [26]

Carbone (C)	Silicium (Si)	Manganèse (Mn)	Phosphore (P)	Soufre (S)	Chrome (Cr)
0,93-1,05%	0,15-0,35%	0,25-0,45%	0,025%	0,03%	1,35-1,60%

2.2 ACIER INOXYDABLE 430C :

L'acier inoxydable 430C est une catégorie spécifique d'acier inoxydable ferritique. Il appartient à la famille des aciers inoxydables au chrome. La désignation "430C" fait référence à sa composition chimique et à ses propriétés spécifiques.

L'acier inoxydable 430C contient généralement environ 17% de chrome, ce qui lui confère une bonne résistance à la corrosion. Il présente également une faible teneur en carbone, ce qui améliore sa soudabilité et sa formabilité.

Ce type d'acier inoxydable est principalement utilisé dans des applications nécessitant une résistance à la corrosion moyenne. Il est également utilisé dans des environnements où une résistance élevée à la chaleur n'est pas requise.

Il convient de noter que l'acier inoxydable 430C peut varier légèrement en termes de composition et de propriétés selon les normes et les spécifications spécifiques de chaque fabricant.

Tableau 4 : la composition chimique typique pour l'acier inoxydable 430C.[27]

Carbone	Silicium	Manganèse	Phosphore	Soufre	Chrome
0.08%	1.00%	1.00%	0.040%	0.030%	16-18%

3 PREPARATION DES ECHANTILLONS :

3.1 DECOUPAGE DES ECHANTILLONS :

Les échantillons ont été découpés à partir d'une barre d'acier (100Cr6) d'un diamètre de 25 mm.

De plus, d'autres échantillons ont été découpés à partir d'une tôle d'acier inoxydable ferritique 430C dans l'atelier du département de mécanique de l'Université Saad Dahleb Blida 1. Pour ce faire, une guillotine a été utilisée, comme illustré dans la Figure 21.



Figure 21: Découpage des échantillons par une guillotine.

3.2 LE POLISSAGE :

3.2.1 POLISSAGE PAR PAPIER ABRASIF :

Ce travail a été réalisé au niveau de laboratoire SDM de l'université SAAD DAHLEB BLIDA

Le polissage est une opération visant à affiner les rayures afin de pouvoir observer la microstructure de matériaux ce dernier a été effectuée avec des papiers abrasifs en carbure de silicium (Sic) de différentes granulométries : 80, 280,400, 600, 800, 1200,1500 pour obtenir une surface plane. On a utilisé une polisseuse (Figure22)



Figure 22: polisseuse utilisée pour le polissage.

3.2.2 POLISSAGE DE FINITION :

Un polissage de finition en alumine (Al_2O_3) d'une granulométrie de $2\mu m$ puis par la solution diamantée de $3\mu m$, $1\mu m$, $0.25\mu m$ pour un effet miroir.

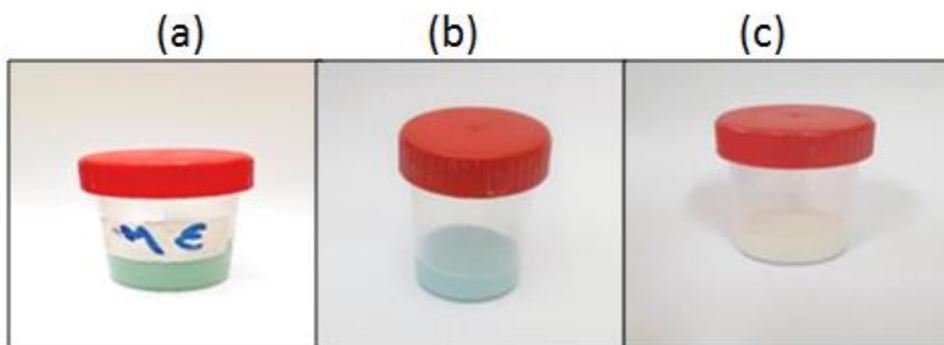


Figure 23: les solutions diamantées, a/ solution de 3μ , b/solution de 1μ , c/solution de 0.25μ .



Figure 24: résultat de polissage (a) échantillon avant polissage (b) échantillon après polissage.

4. METHODE D'EXFOLIATION DE LA VERMICULITE :

1. Préparation de la vermiculite :

- Un gramme de vermiculite a été ajouté à une solution d'HCl dilué.
- La solution a été placée sur un agitateur pendant 21 heures à une vitesse moyenne et à température ambiante.
- Après l'agitation, il a été observé que l'agitation seule était insuffisante, alors la solution a été transférée dans un bain à ultrasons pendant 1 heure et 10 minutes.
- La solution a ensuite été filtrée à l'aide d'un papier filtre placé dans un entonnoir.

2. Lavage de la vermiculite :

- Pour éliminer la couleur jaune, un lavage a été effectué cinq fois de manière répétée.
- Chaque lavage a été réalisé en rinçant la vermiculite avec de l'eau distillé.

3. Séchage de la vermiculite :

- La vermiculite a été laissée à sécher dans une étuve à une température appropriée.
- Une fois sèche, la vermiculite exfoliée a été récupérée pour les analyses ultérieures.

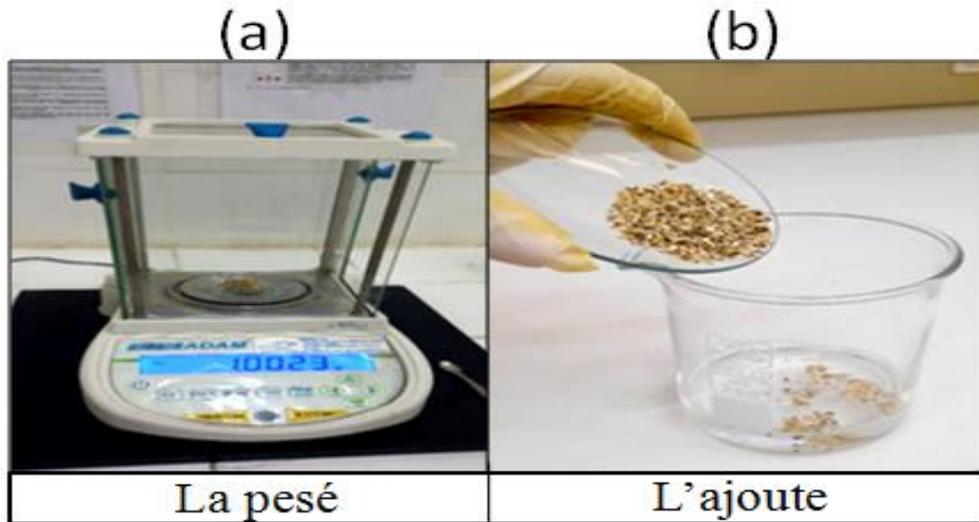


Figure 25: (a) la pesée de 1g de vermiculite/(b) l'ajoute de 1g de vermiculite dans HCl

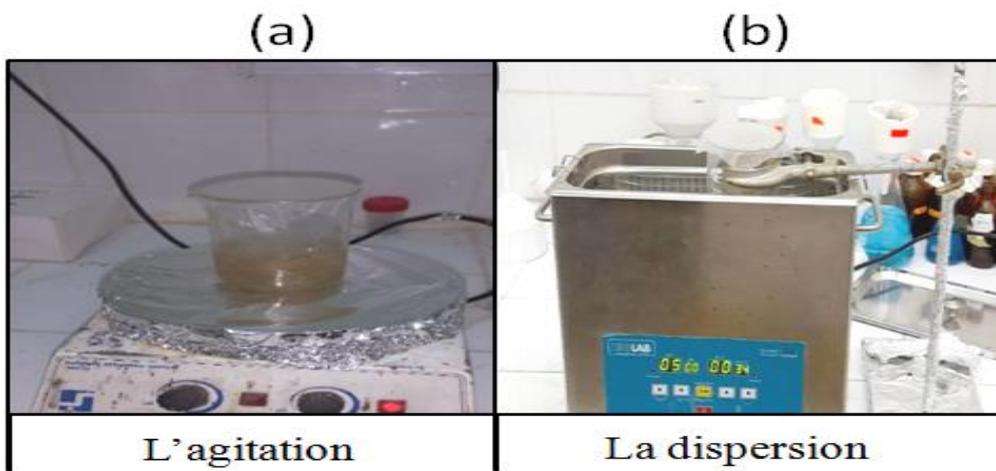


Figure 26: (a) l'agitation sur un agitateur (b) la dispersion avec un bain à ultrason

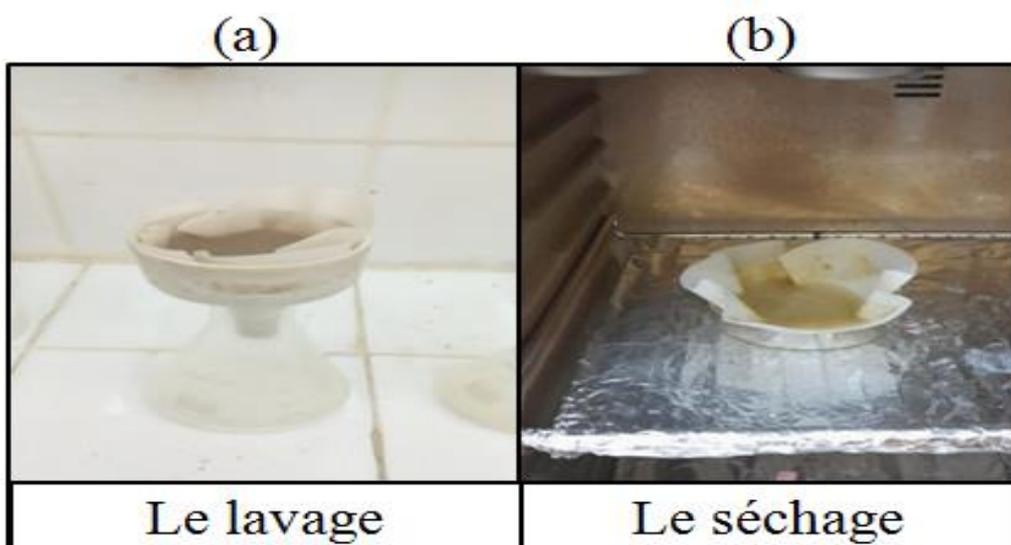


Figure 27: (a) le lavage avec l'eau et l'éthanol (b) le séchage de la vermiculite dans l'étuve.



Figure 28: la vermiculite exfoliée.

Le traitement par ultrason a été effectué avec les conditions suivantes :

- Bain rempli à fond avec de l'eau.
- Température 28°C.
- Durée de l'opération est de 1h 10 min.
- La puissance de la fréquence est standard.

5. TECHNIQUE DE CARACTERISATION :

Après récupération des échantillons ces derniers ont subi plusieurs tests afin de déterminer les différentes propriétés microstructurales, Une caractérisation microstructurale par diffraction des rayons X (DRX), observation et analyse chimique par fluorescence des rayons X (XRF).

5.1 CARACTERISATION PAR DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX) :

La diffraction des rayons X est l'un des phénomènes clés utilisés dans la caractérisation des matériaux. Elle est basée sur la capacité des rayons X à se diffracter lorsqu'ils interagissent avec un réseau cristallin. Voici les principaux aspects de la diffraction des rayons X :

1. Principe de la diffraction des rayons X : Lorsque des rayons X rencontrent un cristal, ils interagissent avec les atomes présents dans le cristal. Ces interactions conduisent à une diffusion constructive des rayons X, qui se produit lorsque les ondes des rayons X diffractés

sont en phase les unes avec les autres. La diffraction constructive se produit lorsque les conditions de Bragg sont satisfaites.

2. Conditions de Bragg : Les conditions de Bragg sont données par l'équation

$$n\lambda = 2d_H \sin(\theta)$$

Où :

n : est un entier appelé ordre de diffraction,

λ : est la longueur d'onde des rayons X,

d : est la distance entre les plans de la structure cristalline

θ : est l'angle de diffraction.

L'équation de Bragg montre que les rayons X sont diffractés de manière constructive uniquement lorsque la différence de chemin optique entre les différents plans du cristal est un multiple entier de la longueur d'onde.

3. Patron de diffraction : Lorsque les rayons X sont diffractés par un cristal, ils forment un motif caractéristique de taches de diffraction. Ce motif est enregistré sur un détecteur, tel qu'un film photographique ou un détecteur électronique, et peut être analysé pour déterminer la structure cristalline de l'échantillon. Les positions angulaires et les intensités des taches de diffraction fournissent des informations sur la géométrie et l'arrangement des atomes dans le cristal.

4. Analyse de la diffraction des rayons X : L'analyse des données de diffraction des rayons X implique souvent la transformation de l'espace réciproque en utilisant la transformée de Fourier. Cela permet d'obtenir le motif de densité électronique tridimensionnel du cristal, à partir duquel la structure atomique peut être déduite. Des techniques avancées telles que la diffraction des rayons X à grand angle (WAXS) et la diffraction des rayons X à petit angle (SAXS) peuvent également être utilisées pour caractériser des structures de plus grande échelle.

5.2 CARACTERISATION PAR FLUORESCENCE DES RAYONS X (XRF) :

La caractérisation par fluorescence des rayons X (XRF, acronyme de l'anglais X-ray Fluorescence) est une technique couramment utilisée pour déterminer la composition chimique des matériaux. Elle repose sur le principe de l'excitation des atomes par des rayons X et l'émission subséquente de rayonnement X caractéristique.

Voici les principaux aspects de la caractérisation par XRF :

1. Excitation des atomes : Dans la caractérisation par XRF, l'échantillon est exposé à un faisceau de rayons X de haute énergie. Ces rayons X ont suffisamment d'énergie pour éjecter les électrons des couches internes des atomes constituant l'échantillon.
2. Émission de rayonnement X caractéristique : Lorsque les électrons des couches internes sont éjectés, des trous électroniques sont créés. Pour combler ces trous, des électrons provenant des couches externes tombent vers les niveaux d'énergie inférieurs, émettant ainsi des rayons X caractéristiques. Chaque élément chimique a des niveaux d'énergie spécifiques associés à ces transitions électroniques, ce qui permet d'identifier les éléments présents dans l'échantillon.
3. Spectre de fluorescence des rayons X : Le rayonnement X émis est mesuré à l'aide d'un détecteur qui enregistre l'intensité des différents rayons X caractéristiques. Cela permet de générer un spectre de fluorescence des rayons X qui représente les éléments présents et leurs concentrations dans l'échantillon.
4. Analyse quantitative : La caractérisation par XRF peut également être utilisée pour effectuer une analyse quantitative de la composition chimique de l'échantillon. Cela est possible grâce à l'étalonnage du système à l'aide d'échantillons de référence de compositions connues. En comparant les intensités des raies de fluorescence des rayons X de l'échantillon inconnu avec celles des échantillons de référence, il est possible d'estimer les concentrations des éléments présents.

La caractérisation par XRF est appréciée pour sa rapidité, sa non-destructivité (dans de nombreux cas), sa large gamme d'éléments détectables et sa capacité à fournir des résultats quantitatifs. Elle permet d'obtenir des informations précieuses sur la composition chimique des matériaux, ce qui aide à la fois à la recherche fondamentale et aux applications pratiques dans de nombreux domaines.

6 LES ESSAIS TRIBOLOGIQUES :

6.1 PREPARATION DE LA SOLUTION (HUILE DE PARAFFINE+VERMICULITE) :

Il a été réalisé une préparation de la solution en utilisant de l'huile de paraffine et de la vermiculite exfoliée avec différents pourcentages. Les étapes suivantes ont été suivies :

1. Une quantité de 20 ml d'huile de paraffine a été pesée avec une balance de précision.
2. En fonction du pourcentage désiré de vermiculite exfoliée, la quantité appropriée de vermiculite a été pesée et ajoutée à l'huile de paraffine dans un bécher. Les pourcentages pour chaque échantillon ont été notés.
3. La solution d'huile de paraffine et de vermiculite exfoliée dans le bécher a été soigneusement mélangée en utilisant un homogénéisateur. L'objectif était d'obtenir une dispersion homogène des particules d'argile dans l'huile.
4. Pour continuer à disperser la solution, un bain ultrason a été utilisé. Des cycles répétés d'homogénéisation et de bain ultrason ont été effectués pour une meilleure dispersion. Par exemple, deux cycles de 2 minutes de malaxage ont été suivis de 2 minutes de bain ultrason, puis un cycle plus long de 10 minutes de malaxage a été suivi de 10 minutes de bain ultrason. Les durées spécifiées pour chaque cycle ont été respectées.

Grâce à ces étapes, des solutions contenant différents pourcentages de vermiculite exfoliée dans l'huile de paraffine ont été préparées. Ces solutions dispersées peuvent maintenant être utilisées pour caractériser les propriétés tribologiques de la vermiculite exfoliée en tant qu'additif lubrifiant.

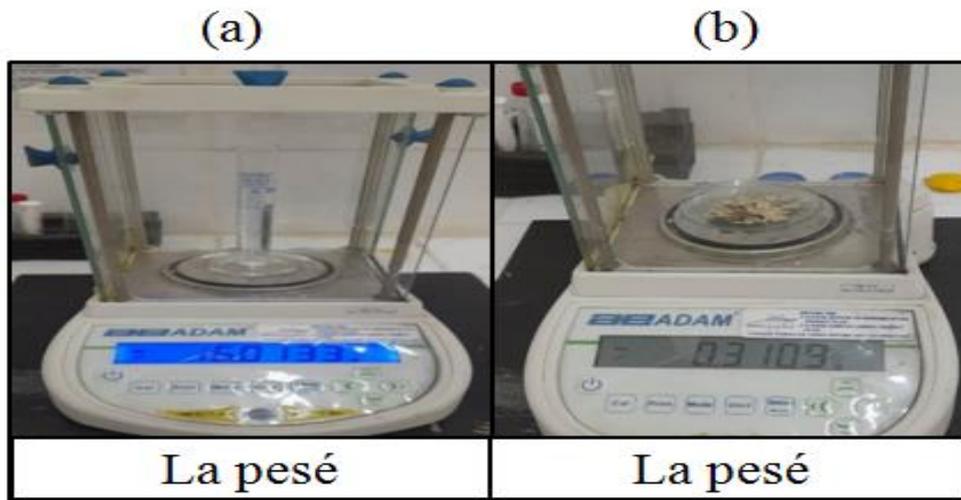


Figure 29:(a) la pesé 20 ml d'huile de paraffine (b) la pesé de la vermiculite exfoliée.

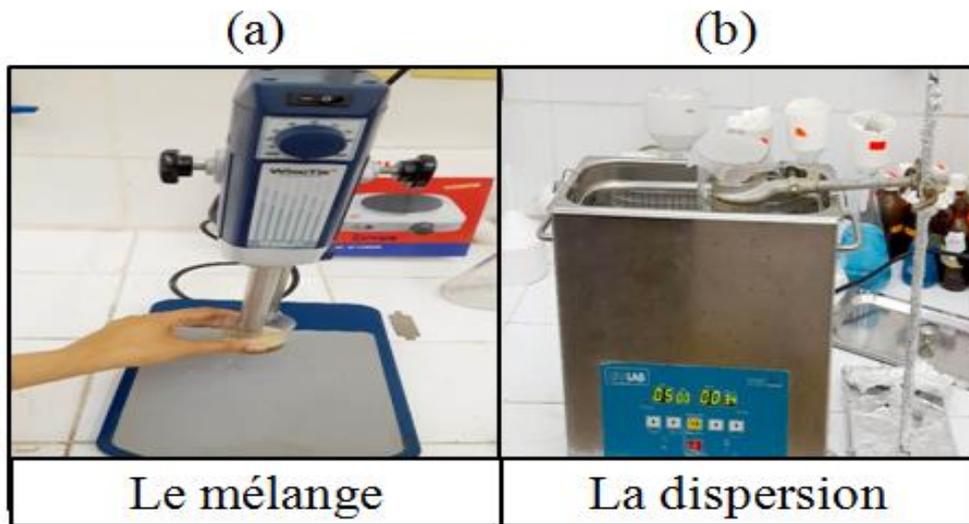


Figure 30:le mélange de la solution avec un homogénéisateur (b) la dispersion de la solution avec un bain à ultrason.

Les essais tribologiques ont été réalisés (au niveau du Laboratoire études et Recherche en Technologie Industrielle LERTI - Université de Blida 1) en configuration plan bille-disque à l'aide d'un tribomètre de marque ANTON PAAR doté d'un logiciel sur pc

Tableau 5 : les paramètres des essais tribologiques

Paramètre	Valeur
Vitesse de glissement (cm/s)	100
Charges normal (N)	20
Distance de glissement (m)	500
Atmosphère	L'air

7 LE MILIEU DE DISPERSION DE LA VERMICULITE :

Les étapes suivantes ont été effectuées pour mélanger la vermiculite avec l'eau distillée, l'éthanol, l'acétone et le propanol :

1. Une quantité de 0,015 g de vermiculite a été ajoutée à 5 ml d'eau distillée, d'éthanol, d'acétone et de propanol respectivement, dans des tubes séparés.
2. Les solutions de vermiculite dans chaque solvant ont été laissées à se disperser dans un bain à ultrasons pendant une durée de 10 minutes.

Après cette étape, les résultats de dispersion ont été obtenus et peuvent être visualisés dans la Figure 31.

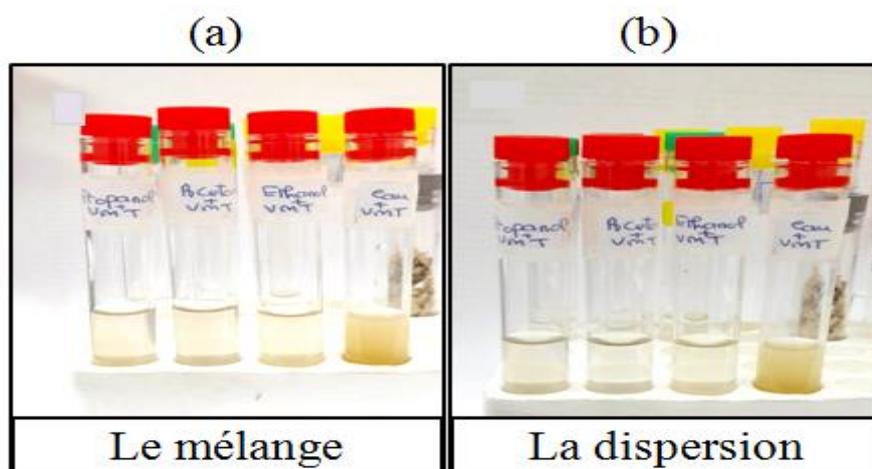


Figure 31: Le mélange de la vmt dans l'eau, éthanol, acétone, propanol, a/ avant, b/ après 30 minutes.

8 APPLICATION DE REVETMENT SUR L'ACIER 430 C :

8.1 METHODE D'APPLICATION DE REVETEMENT :

1. Préparation de la surface : la surface à revêtir a été bien lavée et séché.
2. Mélange de la vermiculite : Nous avons mesuré une quantité de 0,015 g de vermiculite. Ensuite, nous avons mélangé la vermiculite avec 10 ml d'eau distillée.
3. La dispersion de la solution : la solution obtenue a été dispersée dans un bain à ultrasons pendant 5min.

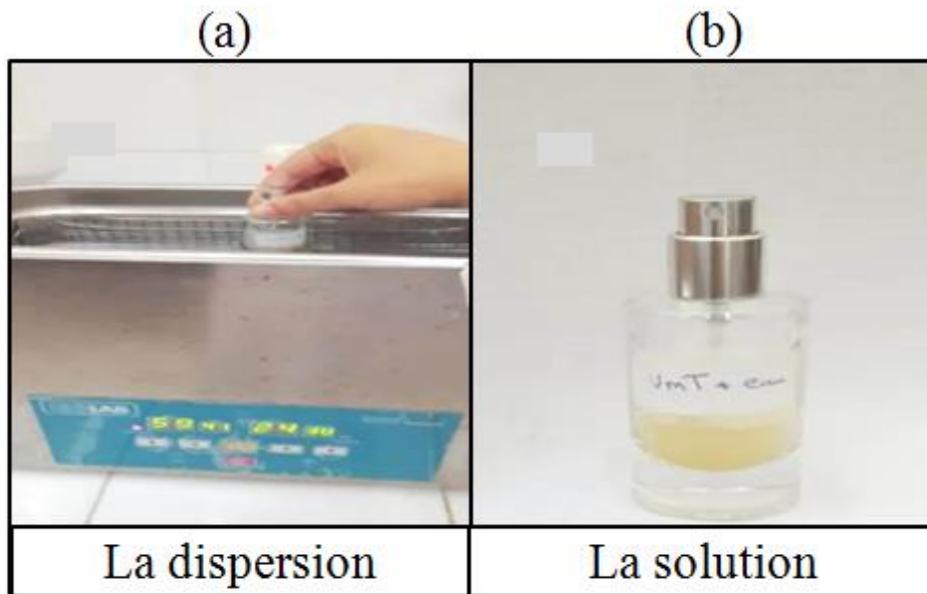


Figure 32: a) la dispersion de la solution b) la solution après la dispersion (vmt+eau).

8.2 APPLICATION DE REVETEMENT PAR DISPERSION ULTRASONIQUE DE LA VERMICULITE :

L'échantillon est placé dans un bécher, puis la solution est ajoutée au bécher. Ensuite, le bécher est positionné dans un bain à ultrasons réglé à 80 °C jusqu'à ce que l'eau s'évapore. Enfin, l'échantillon est laissé à sécher.

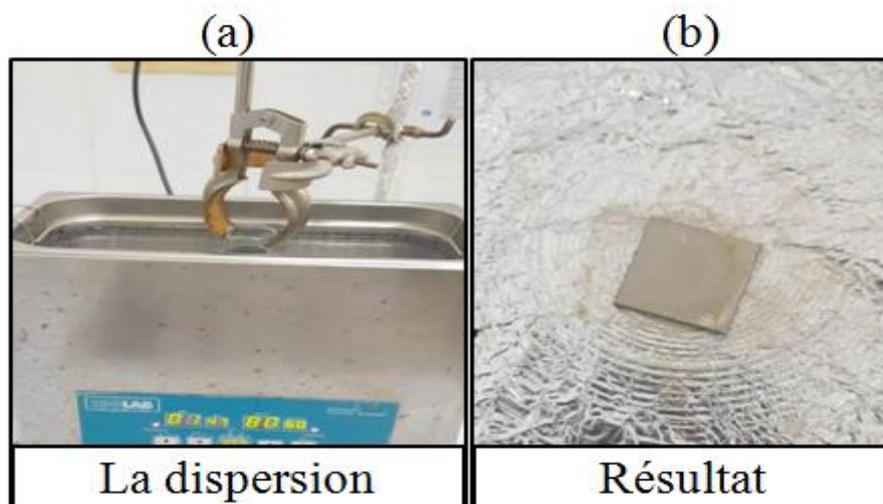


Figure 33: (a) La dispersion de la solution sur L'échantillon (b) échantillon après la dispersion ultrasonique de la vermiculite.

8.3APPLICATION DE REVETEMENT PAR PULVÉRISATION DANS UNE ETUVE :

L'échantillon a été soigneusement nettoyé à l'aide d'acétone. Ensuite, il a été placé dans une étuve et chauffé pendant 20 minutes. Après cela, la solution a été dispersée sur l'échantillon en le pulvérisant 30 fois de manière répétée. À chaque pulvérisation, la solution a été dispersée dans un bain à ultrasons pendant 2 minutes.

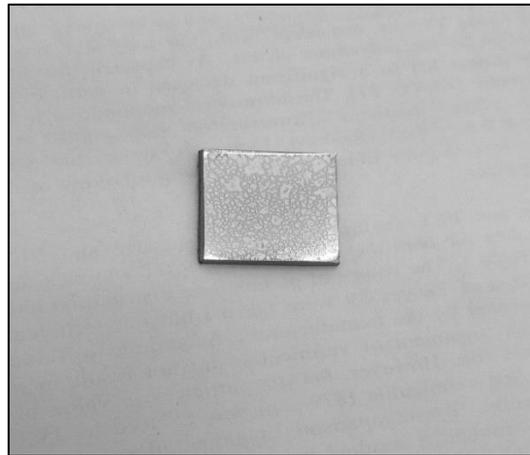


Figure 34: Echantillon après pulvérisation.

9 EQUIPEMENTS UTILISÉS :

9.1 BALANCE DE PRECISION :

C'est un modèle de balance qui permet de peser avec précision un produit et d'afficher le poids.



Figure 35: Balance de précision.

9.2 AGITATEUR MAGNETIQUECHAUFFANT :

Un agitateur magnétique ou mélangeur magnétique est un dispositif qui utilise un champ magnétique rotatif pour faire tourner très rapidement un barreau magnétique immergé dans un liquide.



Figure 36: Agitateur magnétique chauffant.

9.3 UN HOMOGENEISATEUR :

C'est un outil utilisé pour mélanger de manière homogène les composants. Il fonctionne en appliquant une force mécanique élevée pour briser les particules de la substance à traiter et les disperser uniformément dans le liquide.



Figure 37: un homogénéisateur.

9.4 LE BAIN A ULTRASONS :

C'est un équipement utilisé pour nettoyer, dégraisser, décontaminer ou disperser des objets en utilisant des ondes ultrasonores.



Figure 38: le bain à ultrasons.

9.5 UNE ETUVE :

C'est un équipement de laboratoire permettant de chauffer à température régulée des éléments par pression atmosphérique ou pression sous vide. Les applications courantes lorsque l'on utilise une étuve sont le séchage, la stérilisation et la conservation à chaud.



Figure 39: une étuve.

9.6 UN TRIBOMETRE :

Les tribomètres sont les instruments utilisés pour évaluer les propriétés tribologiques d'un matériau, y compris le frottement, l'usure et même l'adhérence, la dureté et d'autres mécanismes de deux surfaces en contact.



Figure 40: Un tribomètre bille sur disque.

9.7 Un microscope optique :

C'est un instrument utilisé pour observer des objets qui ne sont pas visibles à l'œil nu. Il utilise la lumière visible ou une autre forme de rayonnement électromagnétique pour illuminer l'échantillon et former une image agrandie.

Il existe différents types de microscopes optiques, tels que les microscopes à champ clair, les microscopes à fluorescence, les microscopes à contraste de phase, etc.



Figure 41: un microscope optique.

CHAPITRE 5 :
Résultats et discussions

1 INTRODUCTION :

Dans ce dernier chapitre, nous aborderons les résultats obtenus lors du test de tribologie et fournirons des interprétations pertinentes concernant l'usure, les traces d'usure et l'application de revêtements.

2 TECHNIQUE DE CARACTERISATION :

2.1 DIFFRACTION DES RAYONS X(DRX) :

La caractérisation diffraction des rayons X (DRX) a été faite au niveau de Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Cheraga.

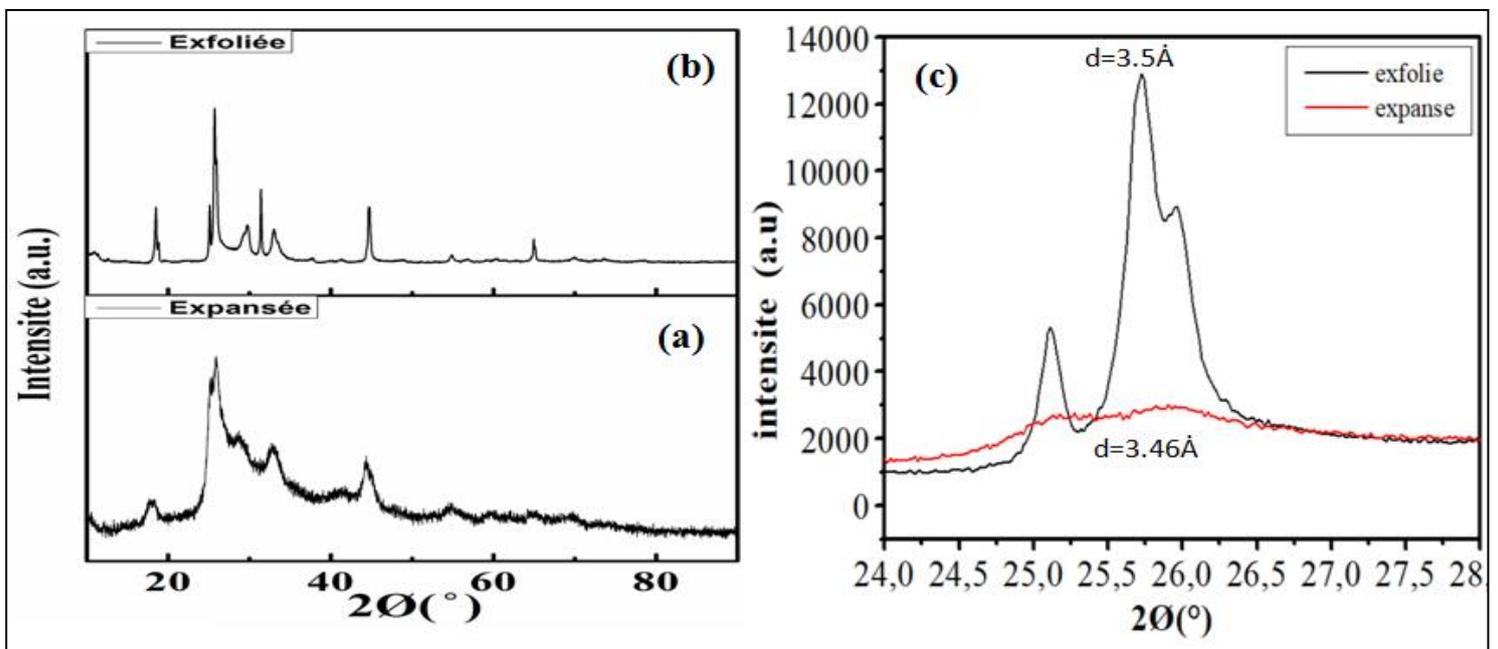


Figure 42: diffraction des rayons X de la vermiculite expansée et exfolié.

Les analyses de diffraction des rayons X (DRX) montrent la comparaison entre la vermiculite exfoliée et la vermiculite expansée.

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) de la vermiculite expansée et exfoliée, traitée avec de l'acide chlorhydrique (HCl), on observe que les réflexions présentent des intensités plus grande, mais elles conservent la même position par rapport à la vermiculite de départ

Cette différence de largeur des pics peut être interprétée en tenant compte des effets de l'acide chlorhydrique sur la structure de la vermiculite.

Lorsque la vermiculite est traitée avec de l'acide chlorhydrique, l'acide réagit avec les couches minérales de la vermiculite, provoquant une dissolution partielle et une exfoliation accrue. Cela entraîne une augmentation de la séparation entre les feuillets de la structure cristalline de la vermiculite exfoliée par HCl, comparée à celle de la vermiculite expansée non traitée.

La dissolution partielle et l'exfoliation accrue de la vermiculite par l'acide chlorhydrique peuvent également entraîner une réduction de la taille des particules de vermiculite, ce qui peut contribuer à la diminution de la largeur des pics observés dans la vermiculite exfoliée par HCl.

En résumé, les résultats de la caractérisation par DRX indiquent que la vermiculite expansée présente une structure en couches moins modifiée, avec des feuillets relativement proches les uns des autres, ce qui se traduit par des pics plus larges. En revanche, la vermiculite exfoliée par HCl montre une structure en couches plus exfoliée et une plus grande séparation entre les feuillets, ainsi que des particules de taille réduite, ce qui se traduit par des pics moins larges. [7-8]

2.1 CARACTERISATION DE LA VERMICULITE PAR FLUORESCENCE DES RAYONS X (XRF) :

La caractérisation par fluorescence des rayons x (XRF) a été faite au niveau de laboratoire des procédés énergétique et nanotechnologie de l'université de Saad Dahleb Blida.

2.1.1 VERMICULITE EXPANSE:

Tableau 6: les composants essentiels de la vermiculite expansé.

Composant	Mg	Al	Si	Ca	Fe
Pourcentage	16.474	7.141	35.077	8.219	33.089
%	%	%	%	%	%

Tableau 7: les composants chimiques de la vermiculite expansé.

Composant	Mg	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Pourcentage %	14.073 %	5.244 %	26.391 %	7261.5 Ppm	887.0 Ppm	12.424 %	7.078 %	2.309 %	95.1 Ppm	1367.1 Ppm	1790.7 Ppm	30.436 %
Composant	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Eu	Yb	Re	Os
Pourcentage %	1139.3 PPM	2363.9 Ppm	533.4 Ppm	52.6 Ppm	2956.8 Ppm	878.3 Ppm	12.0 Ppm	119.9 Ppm	986.7 Ppm	0.0 Ppm	0.0 Ppm	0.0 Ppm

2.1.2 VERMICULITE EXFOLIEE :

Tableau 8: les composants essentiels de la vermiculite exfoliée.

Composant	Mg	Al	Si	Ca	Fe
Pourcentage%	14.097%	6.961%	40.58%	4.127%	34.228%

Tableau 9: les composants chimiques de la vermiculite exfoliée.

Composant	Mg	Al	Si	P	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Pourcentage Unité	11.873 %	5.071 %	29.961 %	5852.3 Ppm	2610.5	12.204 %	3.323 %	3.120 %	87.3 Ppm	3641.1 Ppm	1636.9 Ppm	32.252 %
Composant	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Eu	Yb	Re	Bi
Pourcentage Unité	1183.8 PPM	1821.4 Ppm	522.9 Ppm	69.7 Ppm	2825.3 Ppm	138.7 Ppm	0.0 Ppm	349.4 Ppm	1218.4 Ppm	0.0 Ppm	19.5 Ppm	118.6 Ppm

D'après le résultat de XRF nous remarquons une variation de pourcentage des éléments chimiques entre la vermiculite expansé et exfoliée

1. Diminution de Mg et Ca : Il est observé une diminution du taux de magnésium (Mg) et de calcium (Ca) dans la vermiculite exfoliée par rapport à la vermiculite expansée. Cela peut être dû à des réactions chimiques spécifiques lors du processus d'exfoliation ou à une élimination sélective de ces éléments.

2. Amélioration de Si : Nous notons une amélioration du pourcentage de silicium (Si) dans la vermiculite exfoliée par rapport à la vermiculite expansée. Cela peut indiquer une concentration accrue de silice dans le matériau après le processus d'exfoliation.

3. Stabilisation de Fe et Al : Les taux de fer (Fe) et d'aluminium (Al) semblent être stables, ce qui suggère que ces éléments n'ont pas subi de changements significatifs lors du processus d'exfoliation.

4. Présence de nouveaux éléments : Les résultats indiquent également la présence de nouveaux éléments tels que le rhénium (Re) et le bismuth (Bi). Il est important de noter que la présence de ces éléments peut être liée à des impuretés ou à des contaminants dans l'échantillon ou à des conditions spécifiques du processus d'exfoliation.

5. Diminution des oxydes : Les oxydes présents dans la vermiculite ont montré une diminution générale, Cela peut être dû à des réactions chimiques, des processus de décomposition ou des pertes de certains éléments oxydés lors du traitement de la vermiculite.

3 LE MILIEU DE DISPERSION DE LA VERMICULITE :

Nous remarquons que la vermiculite exfoliée a été bien dispersée dans l'eau distillée, cependant une petite dispersion dans le propanol, par contre il n'y a aucune dispersion dans l'acétone et l'éthanol.

4 ETUDE DE COMPORTEMENT TRIBOLOGIQUE :

Dans cette partie nous allons s'intéresser au comportement tribologique des échantillons en acier 100Cr6 Avec la vermiculite exfoliée comme additif dans l'huile de paraffine pour cela l'essai bille sur disque a été réalisé.

4.1 TEST TRIBOLOGIQUE BILLE SUR DISQUE :

La propriété tribologique des échantillons en aciers 100Cr6 lubrifiés par l'huile de paraffine et la vermiculite exfolié comme additifs a été mesurée sur un tribomètre bille sur disque (Antone Paar).

La vermiculite exfoliée a été dispersé dans l'huile de paraffine avec 0.2%, 0.5%, 1%, 2.0%, 5.0 % en poids par un bain ultrasonique (1800 W, 20 kHz) pour 15min et avec un homogénéisateur pendant 15min.

Les propriétés tribologiques des produits tels que préparés ont été étudiées sur un testeur de frottement bille sur disque. Le test a été mené à une vitesse de rotation de 100 cm/s et sous une charge de 20 N pendant 1h30. Le matériau de l'échantillon supérieur est une bille en acier d'un diamètre de 6 mm, et la contrepartie est un disque en acier 100Cr6 de 20 mm×2 mm de taille.

Les coefficients de frottement des échantillons sont indiqués dans les figures suivantes.

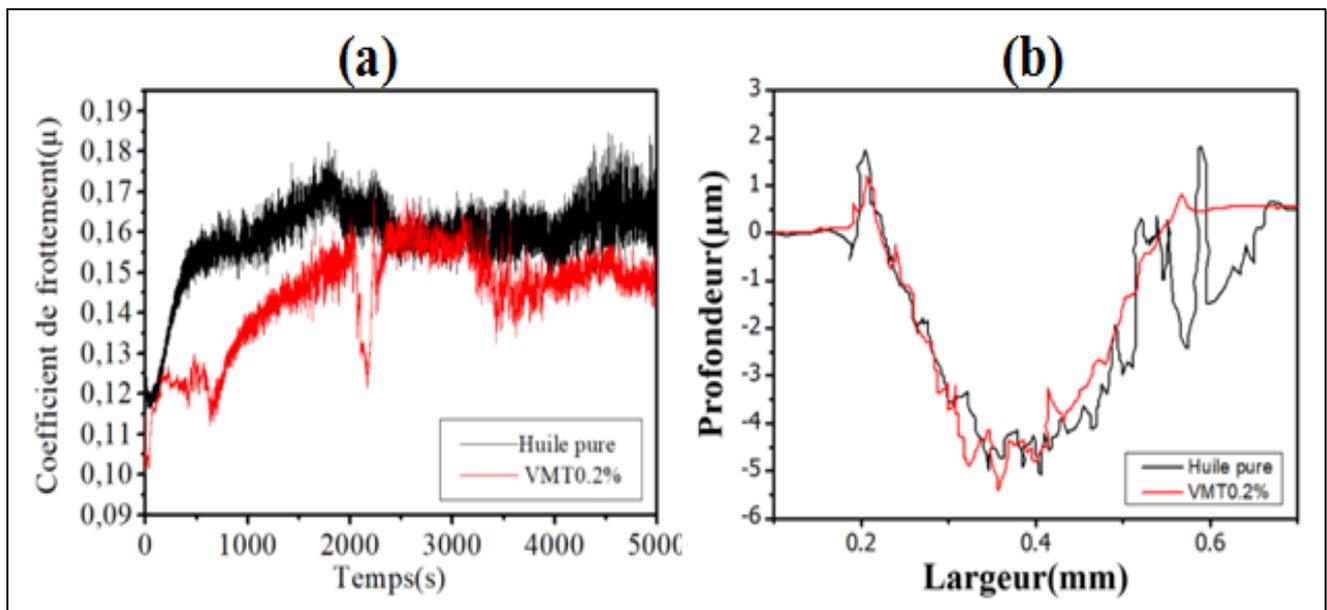


Figure 43: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 0.2% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 0.2% de vermiculite.

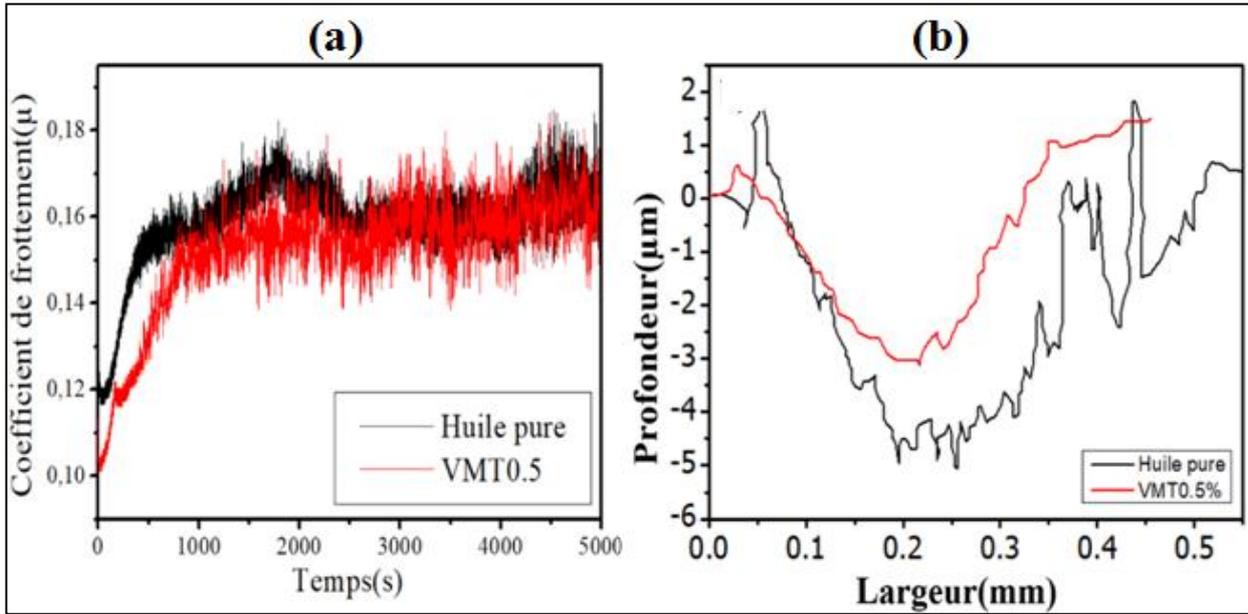


Figure 44: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 0.5% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 0.5% de vermiculite.

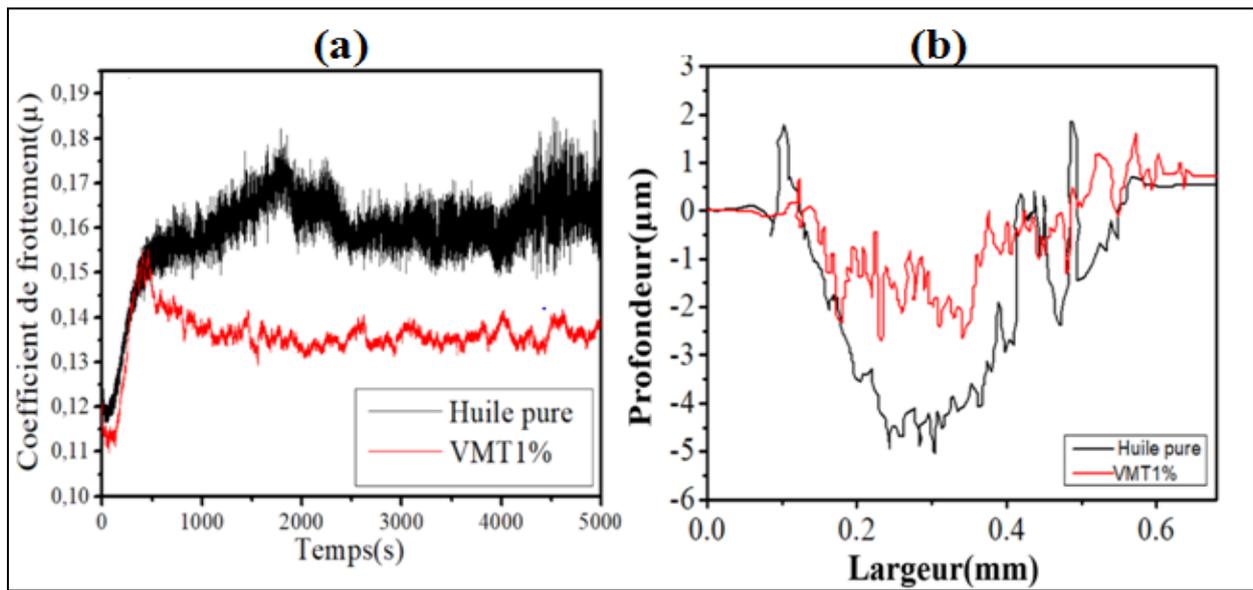


Figure 45: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 1% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 1% de vermiculite.

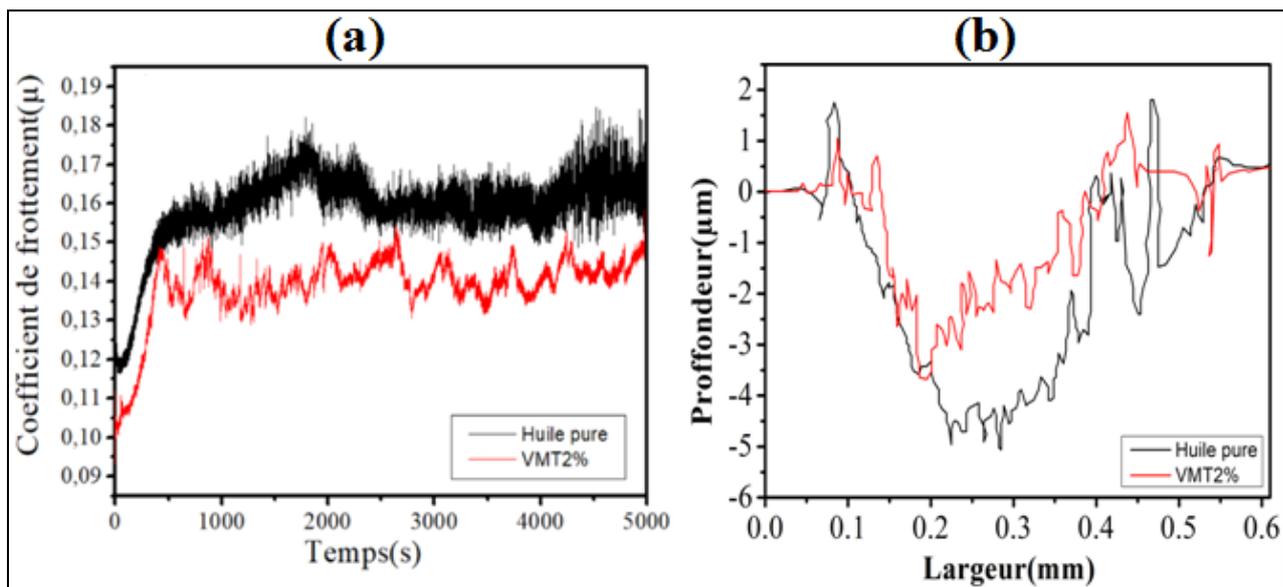


Figure 46 : a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 2% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 2% de vermiculite.

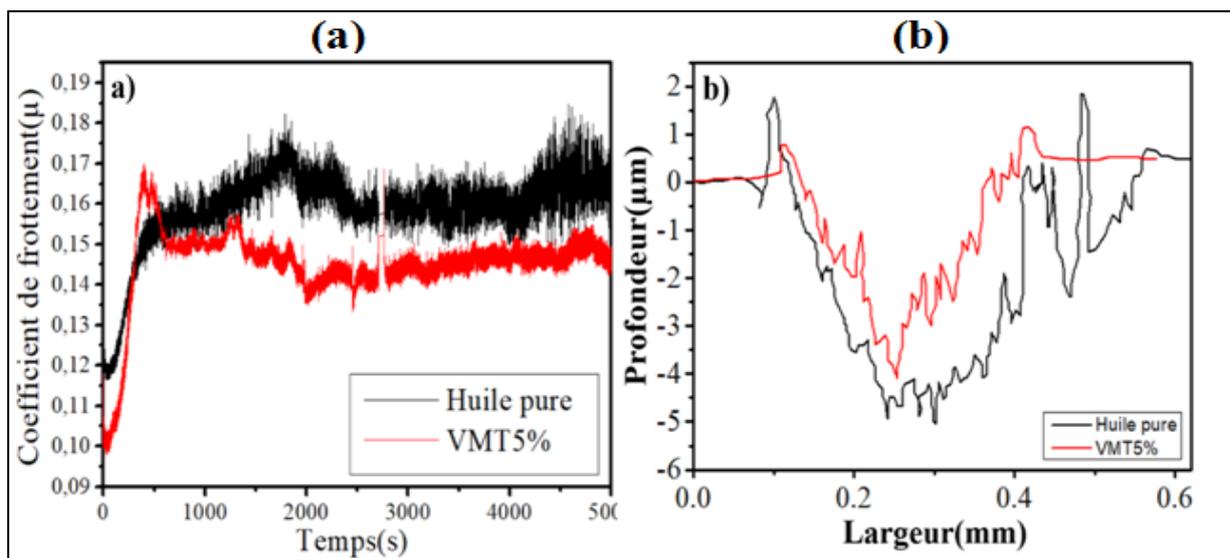


Figure 47: a) variation de coefficient de friction pour l'huile pure et huile+ 5% en poids de vermiculite b) trace d'usure pour des surfaces usées lubrifiées par l'huile et huile+ 5% de vermiculite.

Tableau 10: le coefficient de frottement en fonction de pourcentage de la vermiculite exfoliée.

Pourcentage de VMT	0%	0.2%	0.5%	1%	2%	5%
Coefficient de frottement	0.16	0.14	0.15	0.14	0.13	0.14

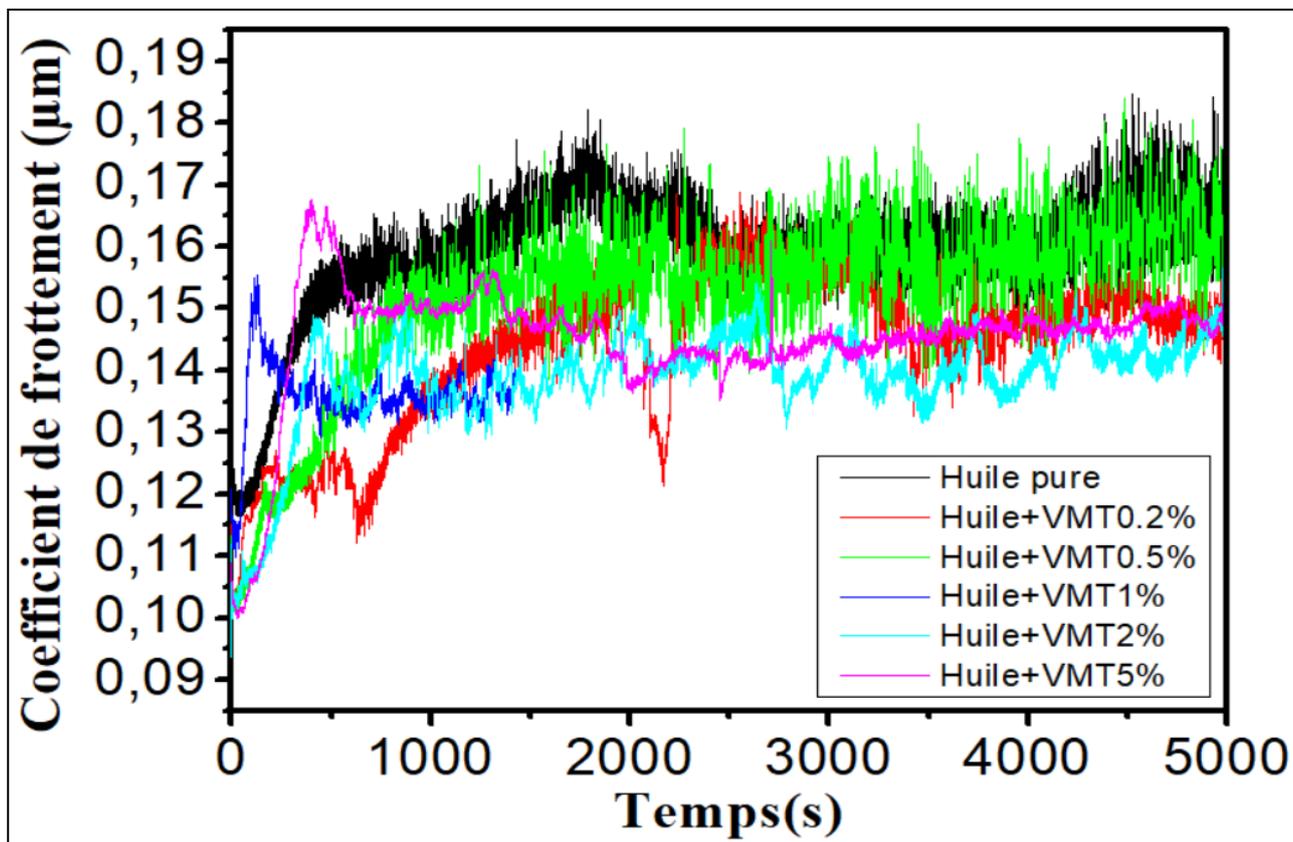


Figure48: Coefficient de frottement de l'huile de paraffine contenant différentes concentrations de la vermiculite exfoliée en fonction de temps (s)

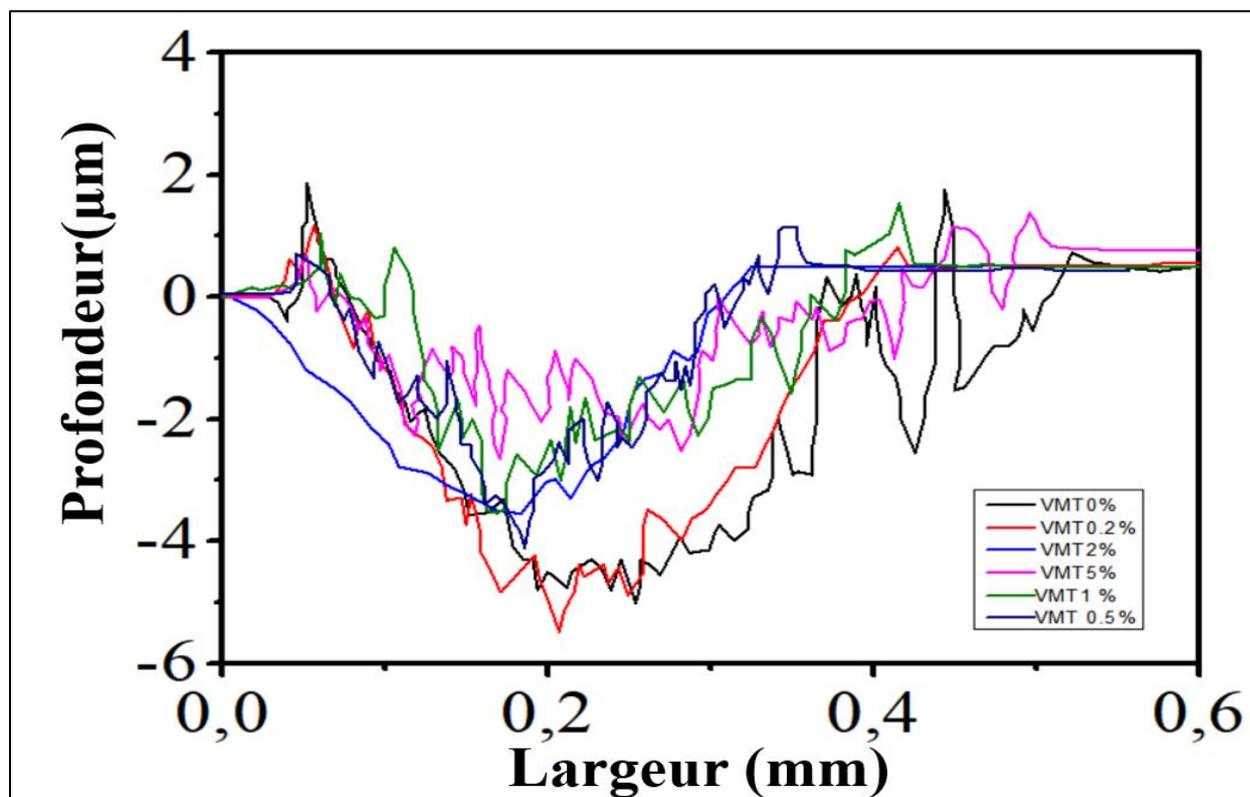


Figure 49: la trace d'usure en fonction de profondeur et largeur.

4. CALCUL DE L'USURE :

Pour calculer le taux d'usure de chaque échantillon on a appliqué la loi ci-dessous :

$$W = \frac{V}{D.F} mm^3/N.m$$

Où W, v, D, F représentant taux d'usure, volume, distance parcourue, la charge normal, respectivement

Le tableau suivant montre les taux d'usure des échantillons après chaque test :

Tableau 11: Taux d'usure des échantillons

Pourcentage	Huile pure	0.2%	0.5%	1%	2%	5%
Aire de trace (mm²)	1191.15*10 ⁻⁶	1030.49*10 ⁻⁶	707.49*10 ⁻⁶	528.04*10 ⁻⁶	528.12*10 ⁻⁶	525.53*10 ⁻⁶
Rayons (mm)	5.11	5.11	6.32	5.11	5.11	5.11
La charge normale (N)	20	20	20	20	20	20
Distance parcourue (m)	500	500	500	500	500	500
Taux d'usure (mm³/N.m)	6.08*10 ⁻⁷	5.26*10 ⁻⁷	4.47*10 ⁻⁷	2.69*10 ⁻⁷	2.69*10 ⁻⁷	2.68*10 ⁻⁷

Les résultats ont montré que l'addition de vermiculite à l'huile de paraffine réduit le coefficient de friction et le volume d'usure, par rapport à l'huile de paraffine pure.

Notre étude démontre que l'ajoute de la vermiculite dans l'huile de paraffine conduit à une réduction du frottement, principalement grâce à deux mécanismes. Tout d'abord, la structure en couches de la vermiculite favorise l'adsorption des molécules d'huile de paraffine, créant ainsi une couche protectrice entre les surfaces de contact. Cette couche de vermiculite permet de minimiser le contact direct entre les surfaces, réduisant ainsi le frottement.

De plus, la structure cristalline particulière de la vermiculite lui confère la capacité de se déformer et de s'intercaler lorsqu'elle est soumise à une contrainte.

Ainsi, l'utilisation de la vermiculite dans notre huile de paraffine permet de réduire significativement le frottement et l'usure des surfaces en exploitant ces mécanismes clés.

En général, une concentration plus élevée de vermiculite dans l'huile de paraffine a conduit à une réduction plus importante de la friction et de l'usure. Cela est dû à la structure

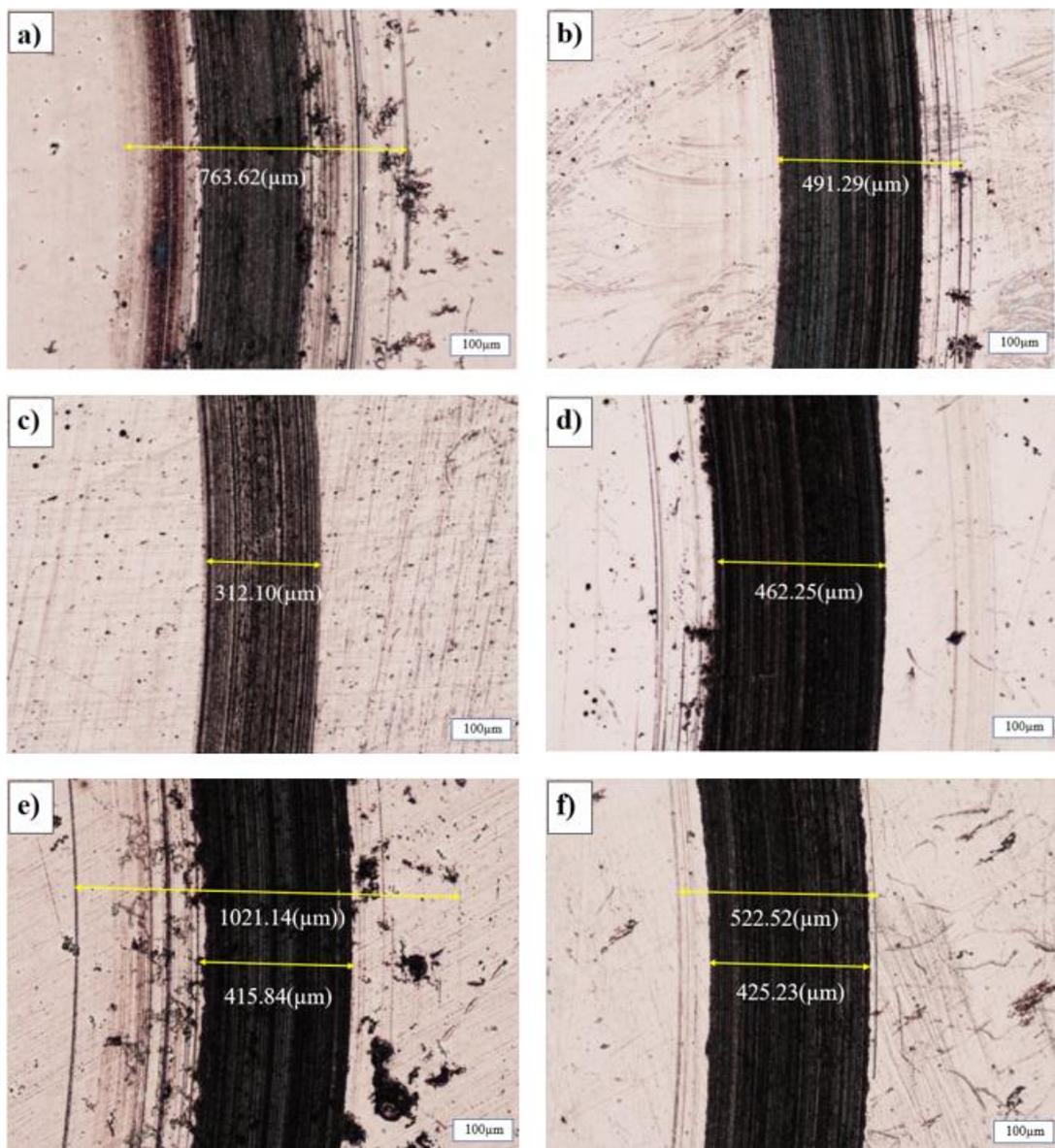


Figure 50:images optique de surfaces usées lubrifiées par a) huile pure b) huile+0.2 % vmt huile+0.5 % vmt d) huile+1 % vmt e) huile+2 % vmt f) huile+5% vmt.

Le résultat montre que :

- a) Huile pure : les traces d'usure sont régulières, ce qui indique une usure normale due au frottement. Le manque d'additif de vermiculite exfoliée peut provoquer une usure modérée des surfaces lubrifiées.
- b) Huile + 0,2% Vermiculite : nous observons des signes d'usure légèrement réduits par rapport à l'huile pure. Les additifs de vermiculite exfoliée améliorent les propriétés lubrifiantes d'huile de paraffine et réduisent l'usure. La surface est mieux protégée contre l'abrasion.
- c) Huile + 0,5 % Vermiculite : Peut encore réduire les signes d'usure par rapport aux compositions précédentes. En augmentant la proportion de vermiculite exfoliée, les propriétés lubrifiantes de l'huile de paraffine sont améliorées, réduisant encore l'usure de surface. Usure superficielle minimale et meilleure protection contre les frottements.
- d) Huile + 1 % de vermiculite : À mesure que le pourcentage de vermiculite en flocons augmente, les rayures deviennent plus visibles, mais toujours moins que l'huile pure. Cela peut indiquer une augmentation de la contrainte sur la surface lubrifiée due à l'additif, mais cela indique également la formation d'une couche protectrice supplémentaire.
- e) Huile + 2 % de vermiculite : Une augmentation supplémentaire de la proportion de vermiculite exfoliée peut augmenter la cicatrice d'usure de surface. Cela peut être dû à une charge accrue ou à d'autres interactions entre les additifs et les surfaces lubrifiées. Cependant, les additifs peuvent également former une couche protectrice plus épaisse, ce qui peut réduire les dommages dus à l'usure.
- f) Huile + 5 % de vermiculite : Une proportion plus élevée de vermiculite en flocons peut entraîner des cicatrices d'usure de surface plus prononcées et plus profondes. Cela peut être dû à une forte augmentation du dosage ou à une concentration trop élevée en additif. La capacité de la vermiculite exfoliée à former une couche protectrice peut devenir moins efficace à mesure que la concentration augmente.

5 APPLICATION DE REVETMENT SUR L'ACIER 430 C :

Nous avons obtenu des résultats défavorables lors du test de tribologie après l'application du revêtement de solution de vermiculite sur l'acier inoxydable 430C. Cette interprétation suggère que le revêtement de vermiculite n'a pas réussi à améliorer de manière satisfaisante les propriétés tribologiques de l'acier inoxydable 430C. Les raisons possibles de ces mauvais résultats pourraient être :

- Une incompatibilité entre le revêtement et l'acier inoxydable.
- Une composition incorrecte de la solution de vermiculite.
- Des conditions de test inappropriées.

Afin d'améliorer les performances du revêtement, il est recommandé d'approfondir l'analyse des problèmes identifiés, d'optimiser les conditions d'application et de préparation de surface, et d'explorer d'autres options de revêtement ou de traitement de surface.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement et les propriétés tribologique des échantillons en aciers (100Cr6) lubrifiés par l'huile de paraffine et la vermiculite exfoliée comme additifs.

L'élaboration de la vermiculite a été faite au niveau du laboratoire études et Recherche en Technologie Industrielle LERTI - Université de Blida 1, ces résultats sont confirmés par la technique de caractérisation (Diffraction des rayons X (DRX)), et XRF.

L'étude tribologique dans notre cas consiste à faire des essais par la méthode de la bille sur disque en utilisant une bille en 100Cr6. Les tests ont été mesurée sur un tribomètre bille sur disque

- Le comportement tribologique a donné un coefficient de frottement qui varie entre [0,13 – 0,16].
- Le taux d'usure des échantillons en acier (100Cr6) varie entre $6,08 \times 10^{-7}$ et $2,68 \times 10^{-7}$. L'échantillon testé dans l'huile avec l'ajout de 5% de la vermiculite comme additif a donné de bons résultats de taux d'usure
- La vermiculite exfoliée à une capacité limité à se disperser dans l'eau, l'éthanol, le propanol, l'acétone. Elle est insoluble dans ces solvants.
- En conclusion, l'ajout de vermiculite dans l'huile de paraffine présente des avantages significatifs en termes de réduction du frottement et de l'usure des surfaces en contact. La structure en couches de la vermiculite permet la formation d'une couche protectrice entre les surfaces, réduisant ainsi le contact direct et le frottement. De plus, la capacité unique de la vermiculite à se déformer et à s'intercaler offre une barrière supplémentaire contre l'usure. Ces mécanismes combinés contribuent à améliorer les propriétés tribologiques de l'huile de paraffine lorsqu'elle est enrichie en vermiculite. Cette recherche ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation de la vermiculite en tant qu'additif solide dans d'autres applications où la réduction du frottement et de l'usure est recherchée.

Références bibliographiques

- [1] D. Magné, "Damien MAGNE Synthèse et structure électronique de phases MAX et MXènes," 2016
- [2] Malard, L.M., Pimenta, M.A., Dresselhaus, G. et Dresselhaus, M.S. Raman spectroscopy in graphene. Phys. Rep 473, 51–87 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2009.02.003>
- [3] A Review of Nanomaterials with Different Dimensions as Lubricant Additives Wenwen Liu
- [4] FICHE TECHNIQUE 1/20 VERMICULITE, InteragSudoe
- [5] C.H.Spencer et M. Grés .Mémento roches et minéraux industriel, vermiculite. Décembre 1990
- [6] M. Félix BALIMA. Structure et porosité de systèmes lamellaires sous haute pression : cas du graphite et de la vermiculite. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1
- [7] I.Janica, S.DelBuffa, A.Mikolajczak, M.Eredia, D.Pakulski, A.Ciesielski, P.Samori. Thermal insulation with 2D materials: liquid phase exfoliated vermiculite functional nanosheets
- [8] R.K Gogoi, K.Saha, J.Deka, D.Brahama, K.Raidongia. J.Mater Solvent-Driven Responsive Bilayer Membrane of Clay and GrapheneOxide 2017 DOI : 10.1039/C6TA09341H
- [9] S.C.Tjong, S.P Bao Crystallization Regime Characteristics of Exfoliated Polyethylene/Vermiculite Nanocomposites 2004
- [10] N.Brunetière ; Introduction à La Tribologie ; Thèse De Doctorat ; Institut Pprime-Futurescope ; 2016.
- [11] F. Sadeghi, "A Review of Tribology: Basic Concepts and Future Perspectives," *Frontiers in Mechanical Engineering*, vol. 5, p. 42, 2019.

- [12] J. Halling et A.W. Batchelor "Principles of Tribology"
- [13] Kemal, A., &Gürü, M. (2021). Evaluation of MineralOils for IndustrialLubrication. Materials Science Forum, 1039, 221-228. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1039.221
- [14] Fiche de données de sécurité. Huile de paraffine EUR, basse viscosité .numéro de l'article 9190
- [15] Laura Boissinot. Intérêt d'une huile de paraffine dans le cadre d'une protection biologique intégrée en culture de fraisier sous-abri. Sciences agricoles. 2016.
- [16] J. Blouet, Usure. Techniques de l'Ingénieur, 1978. B585: p. 1 - 34
- [17] 2D nanomaterials as lubricant additive
- [18] X. He, H. Xiao, H. Choi, A. Díaz, B. Mo1sby, A. Clearfield, H. Liang, α -Zirconium phosphate nanoplatelets as lubricant additives, Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 452 (2014)
- [19] J. Yang, B.B. Chen, H.J. Song, H. Tang, C.S. Li, Synthèsis, characterization, and tribologicalproperties of two-dimensional Ti₃C₂, Cryst. Res. Technol. 49 (2014) 926–932.
- [20] Berman, D., Erdemir, A., &Sumant, A. V. (2014). Few layer graphene to reduce wear and friction on slidingsteel surfaces. Carbon, 67, 171-177. DOI : 10.1016/j.carbon.2013.09.05
- [21] Eswaraiiah V, Sankaranarayanan V, Ramaprabhu S (2011) Graphenebased engine oilnanofluids for tribological applications. ACS Appl Mater Interfaces 3:4221–4227. <https://doi.org/10.1021/am200851z>
- [22] Lin, J.; Wang, L.; Chen, G. Tribol. Lett. 2011, 41, 209–215
- [23] Song H, Wang Z, Yang J (2016) Tribologicalproperties of graphene oxide and carbonspheres as lubricating additives. Appl Phys A 122:933. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0469-x>

[24] Saravanan P, Selyanchyn R, Tanaka H, Fujikawa S, Lyth SM, Sugimura J (2017) Ultra-low friction between polymers and graphene oxide multilayers in nitrogen atmosphere, mediated by stable transfer film formation. Carbon 122:395–403.

<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.090>

[25] Zhao J, Mao J, Li Y, He Y, Luo J (2018) Friction-induced nano-structural evolution of graphene as a lubrication additive. Appl Surf Sci 434:21–27.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.10.119>

[26] R.BENMOUSSA .Caractérisation mécanique de l'acier 100cr6 .Memoire de master. Université BADJI MOKHTAR-ANNABA 2018.

[27] Fiche technique Nuance AISI 430 AGST Draht & Biegetechnik