

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique.

THEME :

Etude de l'influence de l'ajout de la poudre de graphite sur les propriétés tribologiques et mécaniques d'un polymère époxyde bisphénol A

Proposé et dirigé par : M^r LARBI. S

Réalisé par : M^{elles} TALAHADJ Razika

TAEIB

Hafsa

Promotion 2012/2013



Remerciements

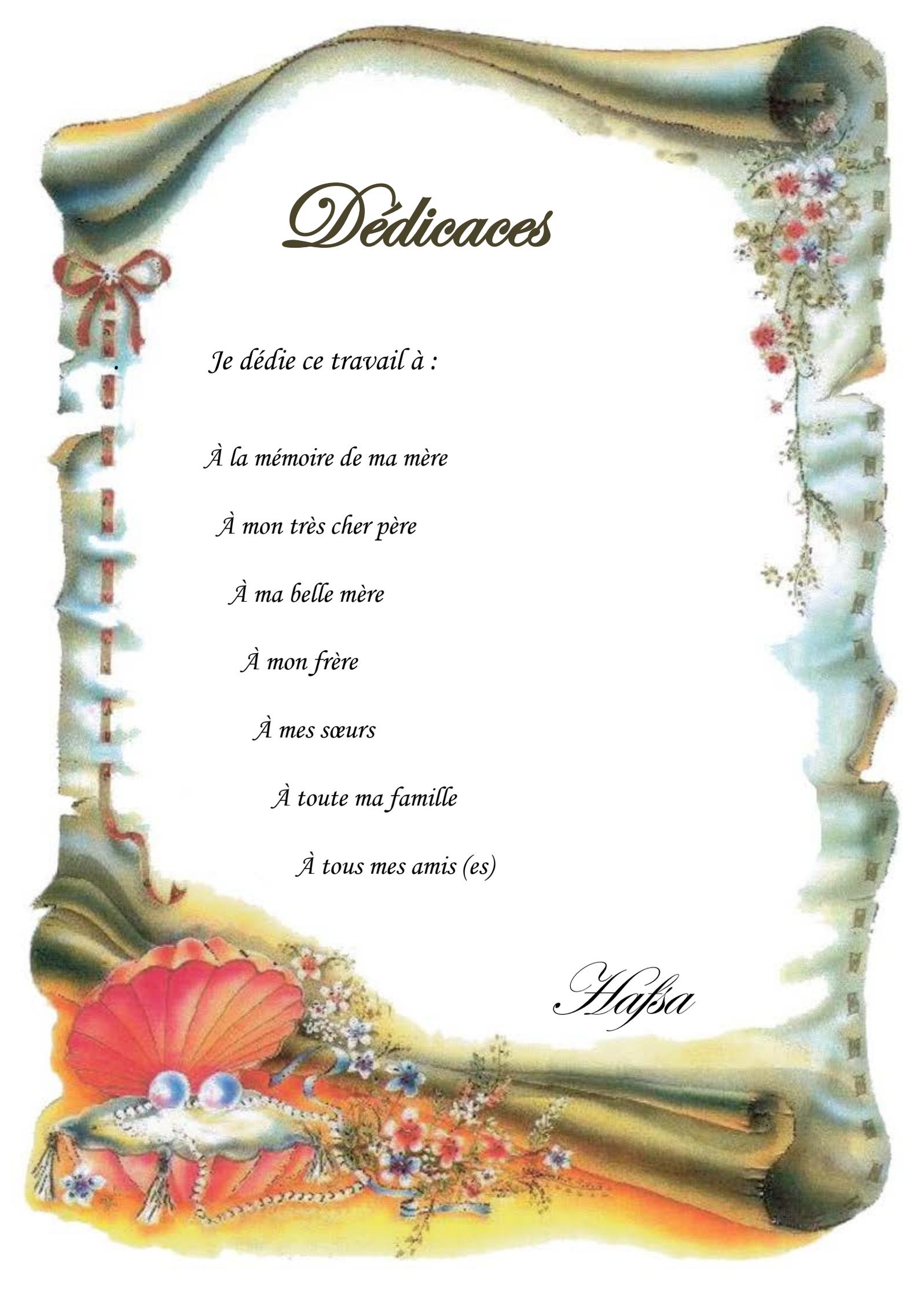
Nous tenons à remercier vivement notre promoteur Mr LARBI.S pour avoir accepté de nous encadrer et pour ses excellents conseils pour l'accomplissement de ce projet.

Nous exprimons également notre reconnaissance et estime au personnel du hall de technologie d'Oued Aissi.

Comme nous tenons à formuler nos remerciements au personnel des laboratoires de génie mécanique spécialement Mrs ANARIS.H, AHMED ZAID.A et KACIMI.B.

Nos remerciements les plus sincères à tous les membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.

Nous sommes aussi très reconnaissantes à toute personne ayant contribué dans la limite du possible, de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À la mémoire de ma mère

À mon très cher père

À ma belle mère

À mon frère

À mes sœurs

À toute ma famille

À tous mes amis (es)

Hafsa



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À la mémoire de mon père

À ma très chère maman, en reconnaissance de tous ses sacrifices

À mes sœurs Fazia, Samira pour leur soutien et leurs encouragements

À tous mes amis(es) et plus spécialement IDIR

À toute ma famille

Razika

Sommaire

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Chapitre I : Eléments de tribologie

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition	3
I.3. L'importance de tribologie	4
I.4. Le système tribologique.....	7
I.4.1. L'environnement	9
I.4.2. Phénomène observables	9
I.5. Caractéristiques tribologique.....	9
I.6. Approche tribologique	9
I.6.1. Le triplet tribologique.....	10
I.6.2. Mécanismes d'Accommodation de vitesse	14
I.6.3. Le circuit tribologique	17
I.7. Paramètres tribologiques	19
I.7.1. Les paramètres opérationnels	19
I.7.2. Les paramètres structuraux.....	20
I.7.3. Les paramètre d'interaction.....	20
I.7.4. Les paramètres tribométriques	21
I.8. L'expérimentation en tribologie.....	21
I.9. Mesures tribométriques.....	21
I.10. Essais tribologiques	22
I.10.1. Paramètres de contact.....	23
I.10.2. Paramètres d'essai.....	24
I.11. Conclusion	25

Sommaire

Chapitre II : Frottement

II.1. Introduction	26
II.2. Définition.....	26
II.3. Provenance des lois du frottement.....	27
II.4. Force et coefficient de frottement.....	29
II.4.1. Formulation du coefficient de frottement	29
II.4.2. Comportement du coefficient de frottement.....	32
II.4.2.1. Vitesse de glissement	32
II.4.2.2. Chemin de glissement parcouru	33
II.4.2.3. Etat de surface	34
II.4.2.4. Nature des métaux.....	34
II.4.2.5. Charge normale appliquée.....	35
II.4.2.6. Température ambiante.....	35
II.4.3. Importance du coefficient de frottement.....	35
II.4.4. Valeurs pratiques du coefficient de frottement.....	36
II.5. Choix des matériaux	37
II.6. Frottement des métaux.....	38
II.7. Frottement des polymères.....	39
II.8. Conclusion	39

Chapitre III : Usure

III.1. Introduction	41
III.2. Définition	41
III.3. Phases de la vie d'un mécanisme.....	41
III.4. Les différents mécanismes d'usure	42
III.4.1. Usure adhésive.....	42
III.4.1.1. Paramètres influant sur l'usure adhésive.....	43

Sommaire

III.4.1.2. Prévention	44
III.4.2. L'usure par abrasion	45
III.4.2.1. Paramètres influençant sur l'usure par abrasion	46
III.4.2.2. Prévention	46
III.4.3. L'usure par érosion	47
III.4.3.1. Paramètre influençant l'usure par érosion	48
III.4.3.2. Prévention	48
III.4.4. Usure par corrosion	49
III.4.4.1. Paramètres influençant l'usure corrosive	50
III.4.4.2. Prévention.....	50
III.4.5. Usure par fatigue de contact	50
III.4.5.1. Généralités	50
III.4.5.2. Fatigue mécanique	51
III.4.5.3. Fatigue thermique	52
III.4.5.4. Facteurs influençant la fatigue de contact.....	52
III.4.5.5. Prévention	53
III.5. Mécanismes d'usure des polymères.....	53
III.6. Paramètres tribologiques	54
III.6.1. Taux d'usure	54
III.6.2. Valeur du produit pv.....	54
III.6.3. Densité d'énergie de frottement	56
III.7. Conclusion	57

Chapitre IV : Partie expérimental

IV.1. Introduction.....	58
IV.2. La procédure expérimentale	58
IV.2.1. Dispositif expérimental	58

Sommaire

IV.2.2. Nomenclature du banc	59
IV.2.3. Principe de fonctionnement.....	59
IV.3. Les conditions d'essais	60
IV.4. Description du capteur de force	60
IV.5. Chaîne d'acquisition.....	61
IV.6. Identification des matériaux utilisés.....	63
IV.6.1. Matériau des disques	63
IV.6.2. Matériaux des pions.....	63
IV.7. Présentation des couples tribologiques	64
IV.7.1. Les disques	64
IV.7.2. Les pions	65
IV.8. Traitement thermique	66
IV.8.1. Introduction	66
IV.8.2. Cycle d'un traitement thermique	67
IV.8.3. Chauffage des pièces	67
IV.8.4. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques	67
IV.8.5. Traitement thermique des disques	67
IV.8.6. La trempe	68
IV.8.7. Procédure.....	68
IV.9. Polissage des disques	68
IV.9.1. Introduction	68
IV.9.2. Avantage du polissage	69
IV.9.3. Mode opératoire	69
IV.10. Examen métallographique	69
IV.10.1. Introduction	69
IV.10.2. Déroulement des tests	70

Sommaire

IV.10.3. Microscopie Optique	70
IV.10.4. Observation microscopique de l'acier XC48 avant traitement thermique	72
IV.10.5. Observation microscopique de l'acier XC48 après traitement thermique	73
IV.11. Essai de dureté	74
IV.11.1. Introduction	74
IV.11.2. Essai BRINELL	74
IV.12.3. Le principe	74
IV.12.4. Déroulement des essais	74
IV.12. La micro dureté	76
IV.12.1. Introduction	76
IV.12.2. Essai de dureté Knoop	77
IV.12.3. Mesure de la micro dureté	78
IV.12.4. Analyse des résultats	79
IV.13. Les essais de flexion	79
IV.13.1. Introduction	79
IV.13.2. Flexion trois points	79
IV.13.3. Machine de flexion	81
IV.13.4. Géométrie des éprouvettes	82
IV.13.5. Résultats des essais de flexion trois points	82
IV.13.6. Interprétation des résultats	84
IV.13.7. Conclusion	86
IV.14. Essais d'usure	87
IV.14.1. Introduction	87
IV.14.2. Les paramètres des essais	87
IV.14.3. Résultats et discussions sur les essais d'usure	88
IV.14.3.1. Coefficient de frottement	88

Sommaire

IV.14.3.2. Observations durant et après les essais.....	95
IV.14.3.3. Discussion des graphiques.....	95
IV. 15. Conclusion	96
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>98</i>
<i>Références bibliographiques</i>	
<i>Annexes</i>	

Liste des figures

Chapitre I : Eléments de tribologie

Figure I.1 : Schéma générale de la tribologie.....	4
Figure I.2 : Economie de la Grande Bretagne.....	7
Figure I.3 : Représentation d'un système tribologique	8
Figure I.4 : les composants de système tribologique	8
Figure I.5 : définition du troisième corps au sens cinématique [Berthier, 1988].....	12
Figure I.6 : Rôle du 3 ^{ème} corps	13
Figure I.7 : Le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps	13
Figure I.8 : sites et modes d'accommodation	14
Figure I.9 : sites d'accommodation de vitesse	15
Figure I.10 : Migration du site d'accommodation de S3 en S2 en fretting (a) L'environnement, (b) la charge et (c) la fréquence de sollicitation (fretting).....	16
Figure I.11 : Représentation schématique du circuit tribologique [Berthier, 1988].....	17
Figure I.12 : circuit tribologique de Berthier et les différents types de débit de matière...	18
Figure I.13 : principe de la mesure	23
Figure I.14 : Tribomètre bille/disque ou pion/disque.....	24

Chapitre II. Les frottements

Figure II.1 : Influence de la charge et l'étendue de la surface sur le coefficient de frottement	27
Figure II.2 : un plateau étiré par une corde.....	28
Figure II .3 : force de frottement.....	30
Figure II .4 : Mouvement de glissement.....	30
Figure II.5 : Angle de frottement.	31
Figure II.6 : Cône de frottement.	32
Figure II.7 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.....	33
Figure II.8 : Evolution du frottement avec la distance de glissement.....	34
Figure II .9 : Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normal N.	

Liste des figures

.....35

Chapitre III : Usure

Figure III.1 : La perte de matière par unité de temps.....41

Figure III.2 : Usure par adhésion.....43

Figure III.3. Les deux types usure par abrasion.....46

Figure III.4 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans le fluide en mouvement.48

Figure III.5 : relation d'usure corrosive- temps.....49

Figure III.6 : Apparence d'une surface endommagée par fatigue.....51

Chapitre IV : Partie expérimental

Figure IV.1 : Photographie du tribomètre pion-disque.....59

Figure IV.2 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges.....61

Figure IV.3 : Chaine d'acquisition.....61

Figure IV.4 : Balance électronique.....64

Figure IV.5 : Géométrie du disque.....65

Figure IV.6 : géométrie des pions65

Figure IV.7 : Dimensions des pions.....65

Figure. IV.8 : forme du moule utilisé.....66

Figure. IV.9 : plaques obtenues.....66

Figure. IV.10 : Représente L'étai.....66

Figure IV.11 : Cycle d'un traitement thermique.....67

Figure IV.12 : Photo du four électrique.....68

Figure .IV.13 : Polisseuse du laboratoire SDM.....69

Figure IV.14 : Microscope Optique(MO).....71

Figure. IV.15 : Micrographie de l'acierXC48avant le traitement thermique.....72

Figure IV.16: Micrographie de l'acierXC48après traitement thermique.....73

Figure IV.17 : Principe de l'essai de dureté BRINELL.....75

Liste des figures

Figure.18: Duromètre de type «WOPERTDIA TEST OR RC».....	75
Figure IV.19: schéma d'une empreinte avec un pénétrateur KNOOP.....	76
Figure IV.20: pénétrateur de forme pyramide à base losange.....	77
Figure IV.21 : Photo du microduromètre.....	78
Figure IV.22 : Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.....	80
Figure IV.23 : Test de flexion trois points.....	80
Figure IV.24 : Courbe de contrainte déformation	81
Figure IV.25 : Machine de flexion Z20.....	81
Figure IV.26 : Géométrie des éprouvettes de flexion.....	82
Figure IV.27 : Evolution contrainte/déformation de la résine (EP0%G).....	83
Figure IV.28 : Evolution contrainte/déformation de la résine (EP1%G).....	84
Figure IV.29 : Evolution contrainte/déformation de la résine (EP2%G).....	84
Figure IV.30 : Influence de l'ajout de graphite sur les contraintes à rupture	85
Figure IV.31 : Influence de l'ajout de graphite sur la déformation à rupture.....	86
Figure IV.32 : Influence de l'ajout de graphite sur la le module d'élasticité.....	86
Figure IV.33 : L'évolution de l'effort normal en fonction du temps.....	89
Figure IV.34: L'évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps.....	89
Figure IV.35 : L'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps.....	89
Figure IV36 à44 : Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps.....	90 à94
Figure IV.45 : Evolution du coefficient de frottement de (EP0%G ; EP1%G ; EP2%G) en fonction de la vitesse v et la charge F_N	94
Figure IV.46 : L'effet du renfort en fibre de carbone ou de verre du PEEK.....	96
Figure IV.47 : L'évolution du coefficient de frottement de (UP0%G et UP6%G) en fonction de l'effort normal et de la vitesse de glissement	96

Liste des tableaux

Chapitre I. Eléments de tribologie

Tableau I.1: Impacts de la tribologie sur la société6

Tableau I-2: constituants structuraux de tribosystèmes..... .20

Chapitre II. Frottements

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement.37

Chapitre III. Usure

Tableau III.1 : liste de quelque matériau compatible.....45

Chapitre IV. Partie expérimentale

Tableau IV.1: Propriétés physiques de la résine et du durcisseur..... 64

Tableau IV.2: Résultats des essais de dureté Brinell(HB) de l'acierXC48 à différents état.....7

Tableau IV.3: Résultats de la micro dureté Knoop de l'époxy (EP0%G, EP1%G, EP2%G)...78

Tableau IV.4 : Représente les éprouvettes de lot A83

Tableau IV.5 : Représente les éprouvettes de lot B83

Tableau IV.6 : Représente les éprouvettes de lot C84

Liste des symboles

F_T : Force de frottement [N]

F_N : Force normale [N]

F_0 : Force appliquée [N]

R : Réaction résultante [N]

ρ : Angle de frottement

μ : Coefficient de frottement

μ_0 : Coefficient de frottement statique

μ_D : Coefficient de frottement cinétique (dynamique)

V : Vitesse de glissement [m/s]

T : Température [°C]

v : la perte de volume (g)

t : temps [s]

d : la distance de glissement (m).

K : Taux d'usure [mm³ / (N.m)]

E_f : Densité d'énergie de frottement [N.m]

ef : densité d'énergie de frottement apparente [N.m]

HB : Dureté Brinell [Mpa]

S : Surface de la calotte sphérique [mm²]

D : Diamètre de la bille

d : Diamètre de l'empreinte

F : Charge appliquée par le pénétrateur [N]

A : Surface de l'empreinte [mm²]

l : Longueur de la plus grande diagonale imprimée [mm]

Liste des symboles

C: Rapport constant de la longueur l à la surface projetée

r_1 : Rayon de cylindre de la panne [mm]

r_2 : rayon des cylindres d'appuis [mm]

L: distance entre appuis [mm]

l: Longueur totale de l'éprouvette [mm]

h: Epaisseur de l'éprouvette [mm]

b: largeur de l'éprouvette [mm]

σ_f : Contrainte normale [MPa]

W: Flèche de l'axe neutre [mm]

ϵ : Déformation

σ_R : Contrainte de rupture [MPa]

E: Module de YOUNG [MPa]

f_{max} : Flèche maximale à la rupture [mm]

Δv : Perte de volume [mm³]

Δw : Perte de masse [g]

N: Vitesse de rotation du mandrin du tour [tr/min]

r: Rayon de la trajectoire circulaire [mm]

Introduction générale

Une grande partie des défaillances techniques qui s'amorce à la surface de contact des matériaux en mouvement relatif s'avère de plus en plus importante pour la durée de vie des équipements, la pollution, le coût en énergie perdue et la réduction de l'efficacité des systèmes mécaniques. Dans l'industrie, il existe un très grand nombre d'application des mécanismes dans lesquels deux corps sont en mouvement relatif et les fortes interactions existantes entre les sollicitations mécaniques et thermiques locales d'une part, l'environnement et la réactivité physico-chimique des surfaces d'autre part, constituent dans les mécanismes le phénomène de frottement et par conséquent l'usure qui représentent de 6 à 10 % du Produit National Brut des pays industrialisés. Dans les applications mécaniques, par exemple, 30 % des causes d'avarie sont dues à l'usure et 11% de la consommation énergétique totale des Etats-Unis est perdue à cause de frottement.

Pour répondre à la demande industrielle, de nouvelles études et recherches ont été menées. Elles ont pour objectif de réduire le frottement et par conséquent l'usure des systèmes mécaniques et mettre au point des systèmes permettant de réduire ces nuisances. Ces études font appel aux connaissances expérimentales à l'interprétation scientifique en tribologie.

La tribologie est une branche de la mécanique qui traite de multiples aspects du frottement, de la lubrification et de l'usure.

Chaque année, plusieurs dizaines de milliers de résultats tribologiques sont obtenus et publiés, mais deux problèmes importants se posent :

- Leur accès reste encore difficile, onéreux et nécessite beaucoup de temps ;
- Comment tirer le meilleur parti de ces données pendant la conception d'un produit, d'une machine ou l'utilisation d'un matériau ?

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'action de l'expérimentation et l'interprétation des résultats sur l'influence de l'ajout de poudre de graphite sur les propriétés mécaniques et plus particulièrement sur le comportement tribologique de matériau polymère (résine époxy).

La valorisation de matériaux polymères est favorisée par la facilité de mise en forme (la possibilité de pouvoir réaliser une pièce, souvent en une seule opération dans des conditions économiques satisfaisante), leurs caractéristiques spécifiques élevés et leur facilité de transformation leurs ont donné un avantage technologique par rapport aux autres matériaux.

Les polymères pénètrent tous les domaines d'activité (automobile, électroménager, emballage...), ils consistent à rechercher des solutions pour accroître

Introduction générale

la fiabilité, la qualité et le coût de mise en œuvre de pièces mécaniques et particulièrement les époxydes qui sont adaptés tant aux : grands travaux de la construction, ordinateurs, satellites, boîtes de boissons, cloisons des navires Environ 830000 tonnes d'époxyde sont chaque année produites dans le monde.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout de graphite à différents pourcentages en masse et l'influence des paramètres mécaniques comme le chargement sur les propriétés tribologiques et mécaniques (coefficient de frottement, et le taux d'usure) de couple (XC48/ époxy thermodurcissable) et de discuter les résultats obtenus. Par ailleurs, l'effet de l'ajout du graphite à la résine époxyde sur les propriétés mécaniques en flexion est étudié.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres

Le premier chapitre du mémoire est consacré à une étude bibliographique relative à la tribologie.

Le deuxième chapitre concerne l'étude du frottement, il spécifie le frottement de glissement par rapport aux autres formes.

Dans le troisième chapitre nous présentons une étude bibliographique sur le processus d'usure.

Le quatrième chapitre concerne l'étude expérimentale, il décrit les dispositifs expérimentaux utilisés et les techniques de mesure, l'identification des matériaux utilisés et la préparation des échantillons. Il décrit aussi la méthode de calcul du coefficient du frottement à partir de la force tangentielle, et enfin l'évolution de la courbe d'usure en fonction du temps.

Une conclusion générale clôt ce mémoire en faisant ressortir les principaux résultats de l'étude.

I.1. Introduction

Il n'existe pas encore des formalismes précis pour résoudre un problème de tribologie, c'est-à-dire de frottement, d'usure et de lubrification. Le comportement au frottement ou à l'usure dépend de manière complexe des conditions de sollicitation de l'environnement et des propriétés physico-chimiques des surfaces, elles-mêmes tributaires des mécanismes tribologiques. Les propriétés mécaniques intrinsèques des matériaux jouent un rôle complémentaire et indirect dans le processus tribologique.

Le frottement est la cause principale de la perte d'énergie et de l'usure. L'usure est la cause de la perte de matières et des performances mécanique des systèmes. La lubrification a pour objectif principal de minimiser la friction des solides en contact et de prévenir leurs endommagements.

Les premières études tribologiques concernait les volumes (Corps massifs) en contact, puis leurs surfaces. Aujourd'hui la tribologie se concentre sur le rôle des interfaces.

La tribologie est une science pluridisciplinaire, elle requiert des connaissances relatives à la physicochimie des surfaces, à la science des matériaux et à la mécanique, sur des échelles allant du nanomètre au millimètre.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement.

Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments inter faciaux dans un contact.

Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

I.2. Définition

Le mot (tribologie) forgé à partir du grec, est apparu en 1968, tribein (tribo) qui signifie (gratter, frotter) et logos (parole, étude).

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes susceptibles de se produire lorsque des corps en contact sont animés de mouvement relatif, en relation avec les caractéristiques des matériaux.

Elle présente trois aspects distincts :

- Le Frottement : qui est la résistance à un déplacement imposé.
- L'usure : suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière.
- La lubrification : qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact.

La Figure I.1 illustre les mécanismes qui prennent naissance au niveau de contact.

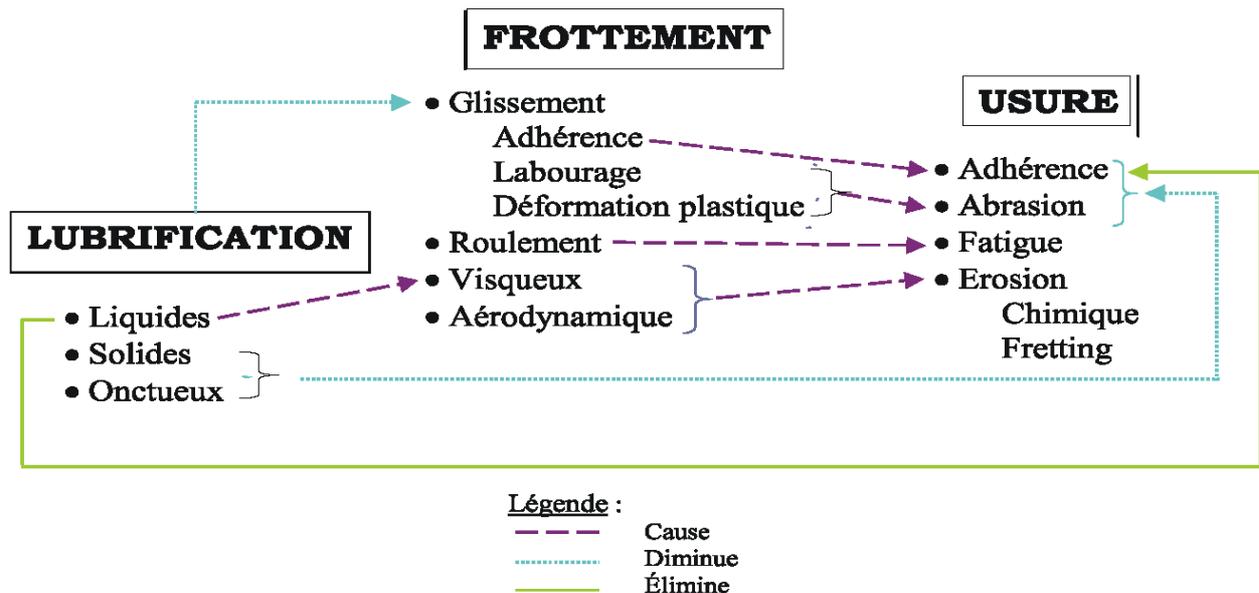


Figure I.1 : Schéma général de la tribologie. [1]

I.3. L'importance de tribologie

Les phénomènes de frottement sont présents partout (11% de la consommation énergétique totale des Etats-Unis est perdue à cause de frottement). Dans le monde actuel, des produits de plus en plus performants et fiables doivent être développés dans un délai de plus en plus court pour garantir la compétitivité de l'entreprise. De plus l'allègement des pièces pour des raisons économiques et/ou écologiques est un enjeu de plus en plus important.

La tribologie est aujourd'hui décisive dans les domaines d'application variés qui vont de la mécanique industrielle aux systèmes du vivant. Elle l'était probablement pour les hommes préhistoriques lors du choix des matériaux de leurs outils. Actuellement, la tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux.

La tribologie étudie également l'association de divers matériaux pour limiter l'usure des pièces de friction, il peut s'agir de poussoirs, de cames, de soupapes ..., cette science a pour objet d'étudier en détail le comportement de surfaces en contact.

La tribologie a donc pour but de mesurer dynamiquement la friction (ou frottement) et l'usure en simulant les conditions réelles de friction afin de :

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines,
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes,
- Améliorer le rendement et la longévité des machines, (minimiser les pertes énergétiques).
- Assurer la sécurité des biens et des personnes,
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits liés aux contacts mécaniques.
- Limiter les déchets
- Atteindre des vitesses plus élevées
- Améliorer la lubrification
- Créer des nouveaux produits.

Le tableau I.1 montre que la tribologie trouve ses applications dans deux grands domaines: Celui des systèmes mécaniques et celui de la mise en œuvre des matériaux.

Systèmes mécaniques	Mise en œuvre des matériaux
<p>Vivant: animal, homme</p> <ul style="list-style-type: none"> - Membranes biologiques - Prothèses biomécaniques - Cartilages - Dentisterie <p>Organes de machines</p> <ul style="list-style-type: none"> - Paliers, roulements - Segments - Cames, engrenages, freins - Joints - Systèmes électriques - Systèmes magnétiques <p>Terre</p> <ul style="list-style-type: none"> - Génie civil - Mouvements des sols - Tremblements de terre - Ecoulement des glaciers - Ski <p>Maintenance</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fiabilité - Durée de vie 	<p>Types de matériaux</p> <ul style="list-style-type: none"> - Artificiels: métaux, polymères - Céramiques, Composites - Naturels <p>Adhérence, collage</p> <ul style="list-style-type: none"> - Composites, textiles, fibres matrices <p>Déformations plastiques</p> <ul style="list-style-type: none"> - Laminage, filage, extrusion - Emboutissage, découpage - Outillages de coupe, polissage <p>Lubrifiants</p> <p>Traitements des surfaces</p>

Tableau I.1 : Impacts de la tribologie sur la société. [2]

❖ **Les différents aspects**

La tribologie présente différents aspects : [3]

• **Aspect scientifique**

Avec la tribologie on essaie d'examiner en détail des processus irréversibles de la mécanique. On essaie aussi de donner une explication des effets complexes de la dissipation de l'énergie de friction dans des matériaux, et de l'usure induite.

• **Aspect multidisciplinaire**

La tribologie ne concerne pas uniquement les physiciens, chimistes et spécialistes en sciences des matériaux intéressés par les propriétés de surface des matériaux. Elle inclut aussi le travail des ingénieurs qui utilisent des "surfaces interactives" pour la transmission du mouvement, force, travail, etc., dans divers types de machines.

- **Aspect économique**

Le "Jost Report" (où le terme Tribologie est apparu pour la première fois) estimait que par l'application des plus importants principes scientifiques et technologiques de la tribologie, la Grande Bretagne pourrait économiser £515millions par an (1965), de la façon suivante Figure I.2 :

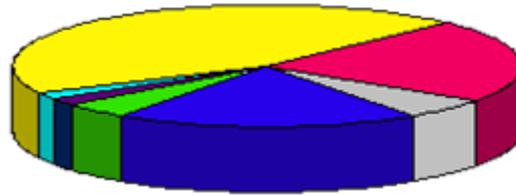


Figure I.2: Economie de la Grande Bretagne (1965).

- Réduction de la consommation d'énergie grâce à la diminution des frottements.
- Diminution des pertes dues aux arrêts.
- Diminution des coûts de maintenance et remplacement des pièces.
- Diminution du coût des lubrifiants.
- Réduction de la main d'œuvre par une meilleure lubrification.
- Diminution des investissements grâce à la fiabilité des installations.
- Economie due à un meilleur rendement mécanique.

Donc, la maîtrise de l'usure et de ses conséquences représente un enjeu économique énorme.

I.4. Le système tribologique

La tribologie des interfaces concerne le milieu inter facial entre les deux corps en contact, donc un système tribologique ou tribosystème est un ensemble d'éléments en interaction statique ou dynamique généralement, organisé pour la transmission d'énergie, étanchéité statique ou dynamique, freinage, guidage.

Dans le cas le plus général un contact tribologique est composé de trois éléments principaux représentés dans la figure I.3.

- Deux matériaux antagonistes en contact animé d'un mouvement relatif (les deux premier corps) qui sont soumis à des torseurs cinématique (vitesses) et dynamique (force et moments) sont limités par des couches superficielle à caractéristiques spécifiques souvent mal connues tant des points géométrique que

physicochimique, mécanique ou structural corps (1) et (2).

- Le milieu inter facial désigné sous forme de troisième corps qui soumit à des sollicitations mécanique, thermique, physicochimique.

- Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu inter facial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation insitu (détachement de particules des premiers corps).

- Ce tribosystème se trouve dans un environnement qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact (4). Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle.

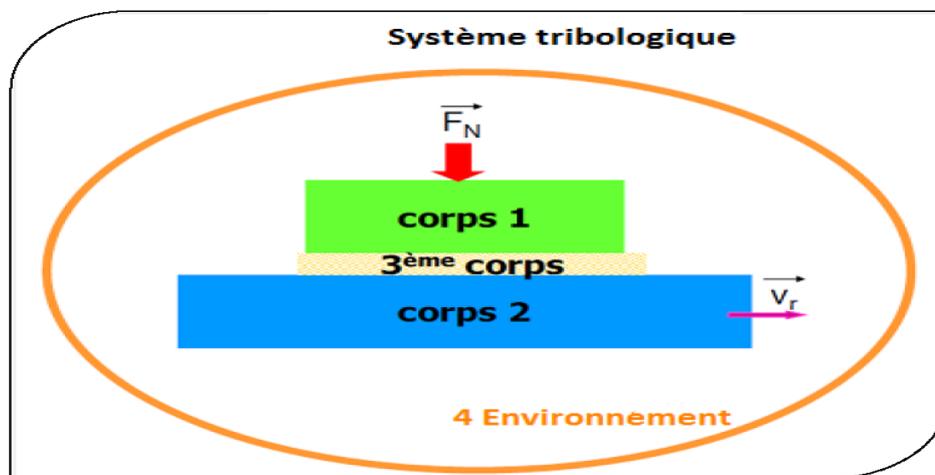


Figure I.3 : Représentation d'un système tribologique. [4]

L'ensemble de détérioration de la surface et la perte de matériau donne les caractéristiques de l'usure. Figure I.4

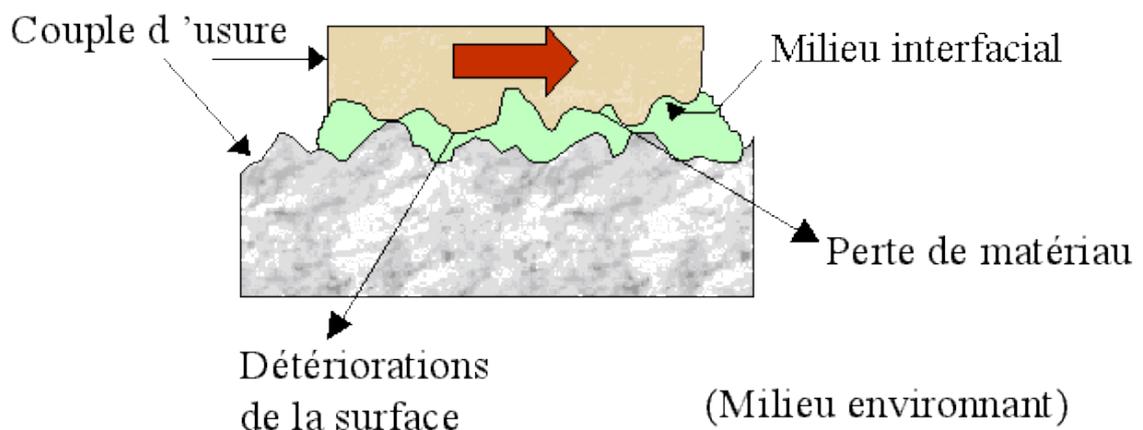


Figure I.4 : les composants de système tribologique. [3]

I.4.1. L'environnement

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

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

I.4.2. Phénomène observables

Lors de fonctionnement d'un système tribologique apparaissent un certain nombre de phénomènes physiques caractéristiques :

L'un des plus évidents est la résistance au déplacement que l'on exprime par un facteur de frottement et les variations instantanées des efforts normaux et tangentiels sont la source de vibration, les excitations très riches en fréquences générées au niveau des surfaces peuvent se traduire par des bruits.

L'énergie dissipée dans le contact va en très grande partie, plus de 95% se transformer en énergie thermique, celle-ci se dissipe dans le milieu ambiant et dans chacun des deux solides se qui provoque leur échauffement.

I.5. Caractéristiques tribologique :

- Force de frottement
- Coefficient de frottement
- Taux d'usure
- Aspect de surface
- Température de contact
- Bruits et vibrations

I.6. Approche tribologique :

Le concept du troisième corps en tribologie a été introduit par Godet au cours des années 70. Le troisième corps est un '*opérateur*' séparant les deux premiers corps et

transmet l'effort entre les deux corps en accommodant la plus grande partie de leur différence en vitesse. Ce concept mécanique a été introduit afin de fournir un '*degré de liberté*' (comme une possibilité supplémentaire d'interprétation) permettant d'harmoniser des concepts fondamentaux en science des matériaux. L'approche du troisième corps se base sur la transposition de la lubrification hydrodynamique au frottement sec. Ceci a conduit à la définition, dans un premier temps d'un champ de vitesse qui traduit l'accommodation de vitesse entre deux corps et par la suite d'un ensemble de sites dans lesquels opèrent différents modes d'accommodation.

Le concept du troisième corps a été étendu progressivement à la notion de cinétique des mécanismes d'accommodation. Le but était de localiser, dans l'épaisseur du contact, les sites et les modes par lesquels les premiers et le troisième corps accommodent la différence des vitesses imposée par le mécanisme. En parallèle, la notion du circuit tribologique a été introduite afin de définir les différents écoulements que peut activer le troisième corps.

Cette approche, très similaire à la lubrification, permet de considérer un ensemble de particules comme un fluide jouant le rôle d'un troisième corps, lequel conduit à corrélérer les changements dans le frottement, à la rhéologie à l'écoulement des particules du troisième corps circulant dans le contact. L'expérimentation a confirmé le fondement des notions de rhéologie et d'écoulement du troisième corps dans, ou en dehors du contact.

❖ **Concept de troisième corps :**

Le concept phénoménologique de troisième corps en tribologie est élaboré suite à des observations expérimentales. A partir des théories bien établies sur la lubrification, l'introduction de cette notion de troisième corps contribue à la compréhension des phénomènes liés à la lubrification solide. Ce concept est fondé sur une approche globale du processus d'usure, avec la prise en compte de l'enchaînement décrivant la vie du troisième corps dans le contact depuis la formation et le détachement des particules issues des premiers corps jusqu'à leur élimination définitive du contact.

Cette théorie s'appuie sur les notions de triplet tribologique, et de circuit tribologique.

I.6.1. Le triplet tribologique

Le triplet tribologique est constitué par le mécanisme, les deux premiers corps et le troisième corps. Il permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent le contact, c'est-à-dire la 'boucle' (ou circuit) qui

représente l'équilibre des forces extérieur au contact. [5]

Il aborde des sujets dont les démentions caractéristiques s'échelonnent entre le nanomètre et le mètre et des unités de temps entre la microseconde et l'année. L'éventail des grandeurs est considérable.

➤ Le mécanisme

La notion de mécanisme c'est l'ensemble du système mécanique (combinaisons d'éléments assemblés en vue du fonctionnement d'une machine ou d'un équipement) qui impose les conditions de fonctionnement et via en leur transmettant les charges statiques ou dynamiques (l'équilibre de forces internes : aspect mécanique) et via l'environnement ambiant, température (aspect physicochimique).

Chaque mécanisme comprend plusieurs contacts et chaque contact comprend deux premiers corps qui matérialisent les massifs. Ces derniers peuvent être d'une part homogènes, hétérogènes ou revêtus et d'autre part, lisses ou rugueux.

➤ Les premiers corps

Les deux premiers corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme. Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermomécaniques, en induisant des déformations qui, à leur tour, définissent la zone de contact élémentaire.

Les contraintes locales sont générées par le chargement normal et le déplacement tangentiel imposé, et affectent le volume du matériau. La profondeur (pénétration) affectée par ces contraintes locales avoisine en général 50 μm .

➤ Le troisième corps

Le troisième corps est l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre.

Lors du frottement sec des '*particules élémentaires*' (d'usure) sont détachées d'un ou des deux premiers corps et s'agglomèrent. Cet agglomérat de particules forme un troisième corps intercalaire qui tend à séparer les deux surfaces en contact. Ces particules peuvent être piégées ou refoulées du contact.

Ce troisième corps est en micromètre, il peut être un ensemble de particules mobiles ou plus généralement, un film de transfert plus ou moins discontinu formé par une agglomération de particules élémentaires fraîchement détachées. Berthier a défini le troisième corps selon deux aspects (Figure I.5) [Berthier, 1988].

au sens matériaux, comme étant la zone qui marque une nette discontinuité de composition très près de la surface. Cette zone comprend des écrans de faible épaisseur quelques nanomètres ainsi que des particules solides circulant dans le contact pour former un film continu ou discontinu.

- au sens cinématique, comme étant l'épaisseur au travers de laquelle la différence de vitesse entre les deux premiers corps est accommodée. Le troisième corps est dit '*naturel*' lorsqu'il est formé par l'un ou les deux premiers corps. par exemple, au sens cinématique, comme étant l'épaisseur au travers de laquelle la différence de vitesse entre les deux premiers corps est accommodée.
- On peut injecter un troisième corps dit '*artificiel*' comme le graphite par exemple.

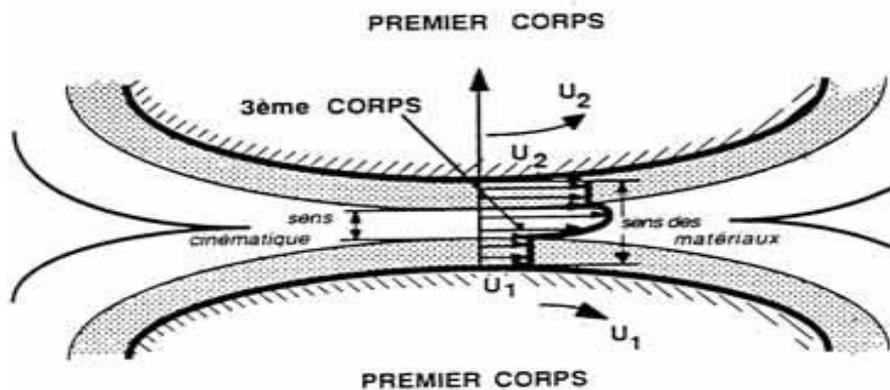


Figure I.5 : définition du troisième corps au sens cinématique [Berthier, 1988]. [5]

➤ Conséquences sur l'étude du troisième corps

L'élaboration du circuit tribologique et du scénario de la vie de contact à partir des seules observations des surfaces frottées des premiers corps après ouverture du contact et des particules perdues pour le contact est difficile car ces observations apportent une vue trop statique des phénomènes mis en jeu. Figure I.6.

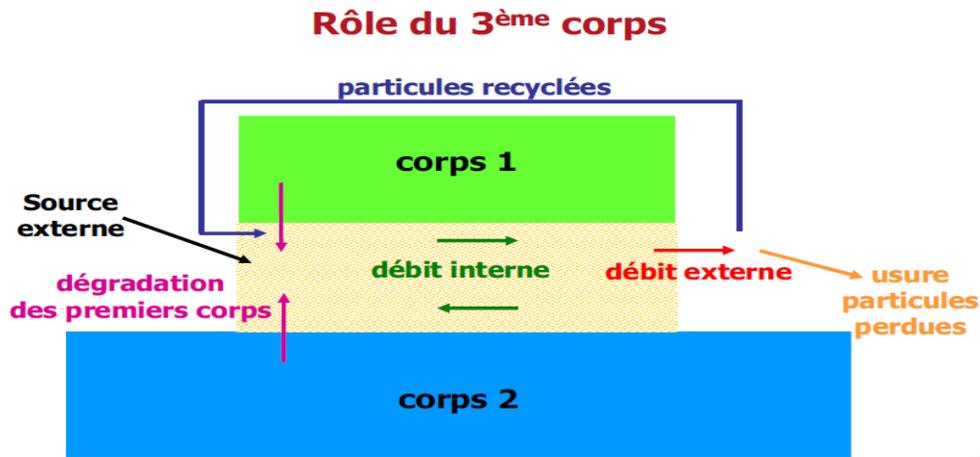


Figure I.6 : Rôle du 3^{ème} corps [4]

➤ **Le triplet tribologique et la notion de troisième corps :**

Le concept du triplet tribologique (mécanisme, premiers corps, troisième corps) introduit par Godet et Berthier, implique la superposition de phénomènes à trois échelles différentes. Figure I.7

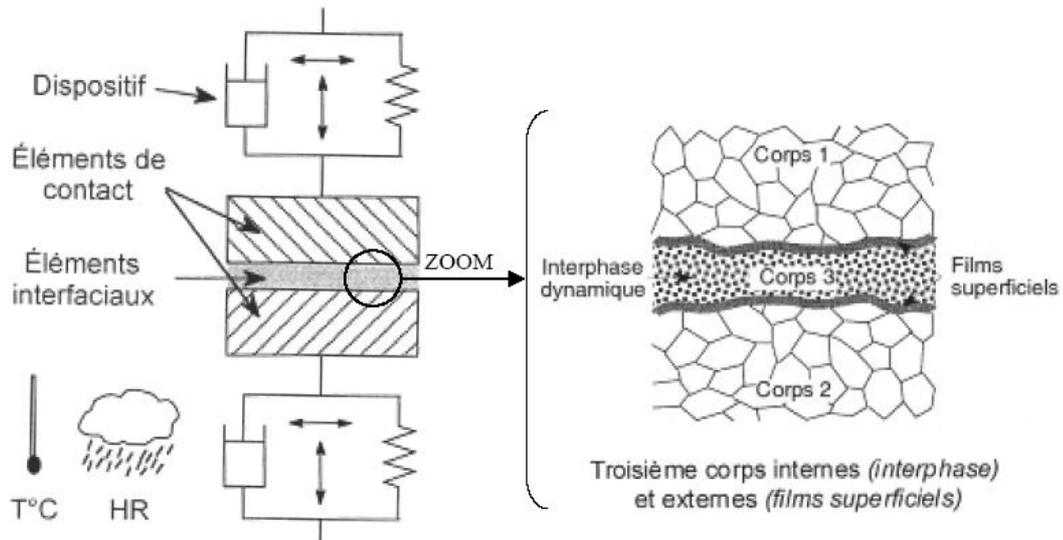


Figure I.7 : Le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps. [6]

Il se compose tout d'abord d'un mécanisme qui sollicite le contact et impose un Chargement (F), une cinématique (v) et un environnement de frottement (HR , T) viennent ensuite les deux premiers corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme. Le troisième corps est

l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre.

Le troisième corps représente ainsi l'ensemble des éléments s'intercalant entre les deux premiers corps (Figure I. 7). Il est composé :

- De films superficiels (contaminants, molécules absorbées, films d'oxydes...), induits par la réactivité des surfaces,
- De particules détachées (débris) s'accumulant lors du frottement, induits par les processus de dégradation des surfaces. [6]

L'ordre de grandeur caractéristique du troisième corps est le micromètre, alors que les écrans ont une épaisseur de quelques nanomètres. Ces derniers sont composés de dépôts artificiels ou de couches naturelles physisorbées, chimisorbées, oxydées, dépendant de l'historique de préparation des surfaces des premiers corps en contact. Figures I.7 et I.8

I.6.2. Mécanismes d'Accommodation de vitesse

Par rapport au système tribologique présenté par un contact à trois corps Berthier, considère que l'étude du frottement et de l'usure passe par l'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse activés dans le contact ou aux interfaces. Il émet l'hypothèse de l'existence de plusieurs mécanismes d'accommodation notés S_i M_j , sont définis par des sites S_i et des modes M_j qui indiquent respectivement le lieu d'accommodation de vitesse et la manière dont celle-ci s'effectue. Figure I.8.

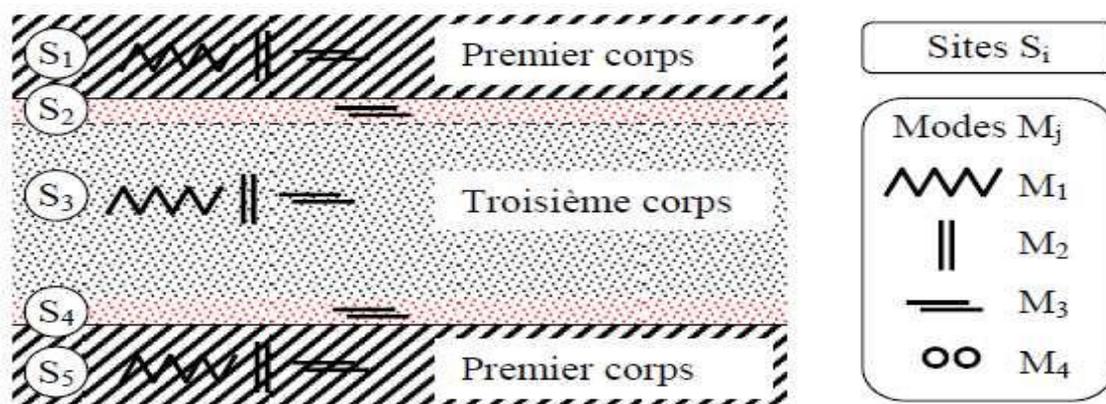


Figure I.8: sites et modes d'accommodation. [6]

- **Sites d'accommodation**

Ces sites sont au nombre de cinq (Figure I.9) : les deux premiers corps (sites S_1 et S_5) alors que la partie volumique du troisième corps constitue le site S_3 , et les interfaces ou

écrans entre les premiers corps et le troisième corps constitués de couches de pollution, de molécules absorbées, ... (sites S2 et S4).

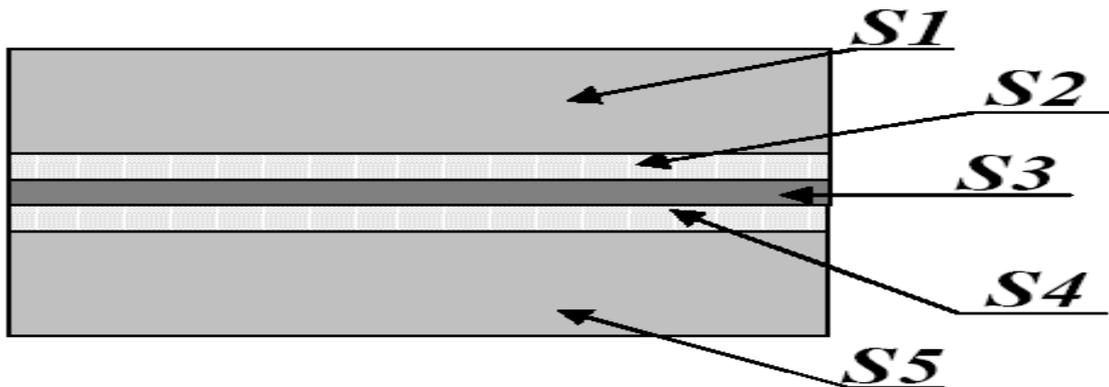


Figure I.9 : sites d'accommodation de vitesse. [5]

- **Les modes**

Chaque site est susceptible d'accommoder les vitesses selon les quatre types de comportement mécaniques : M1 correspond à l'accommodation de vitesse par déformation élastique, M2 par fissuration ou rupture normale, M3 par cisaillement longitudinal et M4 par roulement.

Si un mécanisme d'accommodation constitue par les différentes combinaisons $S_i M_j$ y aura vingt mécanismes d'accommodation de vitesse qui peuvent exister dans un contact. Mais ces mécanismes ne sont pas clairement identifiables, bien qu'activés avec certitude. Ils n'aboutissent pas à la formation de débris et ne contribuent pas tous à un taux d'usure correspondant à l'évacuation définitive de particules issues des débris hors du contact.

Un contact soumis à un frottement sec, ces différents mécanismes d'accommodation de vitesse peuvent coexister ou se succéder avec une hiérarchie propre au tribosystème étudié. L'identification des mécanismes d'accommodation de vitesse mis en jeu au sein du contact permet de relier les variations du frottement aux phénomènes physiques dans le contact. Il s'agit donc d'un outil d'expertise des contacts fonctionnant avec un troisième corps solide.

- **Aiguillages**

L'influence de l'environnement sur les changements de sites d'accommodation a été mis en évidence pour un contact acier – acier en fretting (débattement = 50 μm , fréquence = 1 Hz)

En présence d'un troisième corps artificiel d'oxyde de fer Fe_2O_3 Ainsi, en présence d'air, l'accommodation de vitesses fait en S3 (cisaillement du troisième corps), alors qu'en présence d'azote, l'accommodation se fait en S2 (glissement à la paroi) (figure I. 10a).

De même, une augmentation du chargement, donc de la cohésion du troisième corps peut faire passer le site d'accommodation de S3 en S2 (figure I.10b).

L'effet de la fréquence de sollicitation (toujours en fretting) a été étudié sur des alliages de titane (Ti 6 Al 4 V) : le troisième corps est alors formé d'oxydes de titane et de vanadium. En dessous de 75 Hz, les deux oxydes se mélangent et l'accommodation se situe en S3. Au-dessus de 75 Hz, les particules d'oxydes de vanadium forment un lit qui se range au-dessus du lit d'oxyde de titane et le premier corps .Figure I.10.

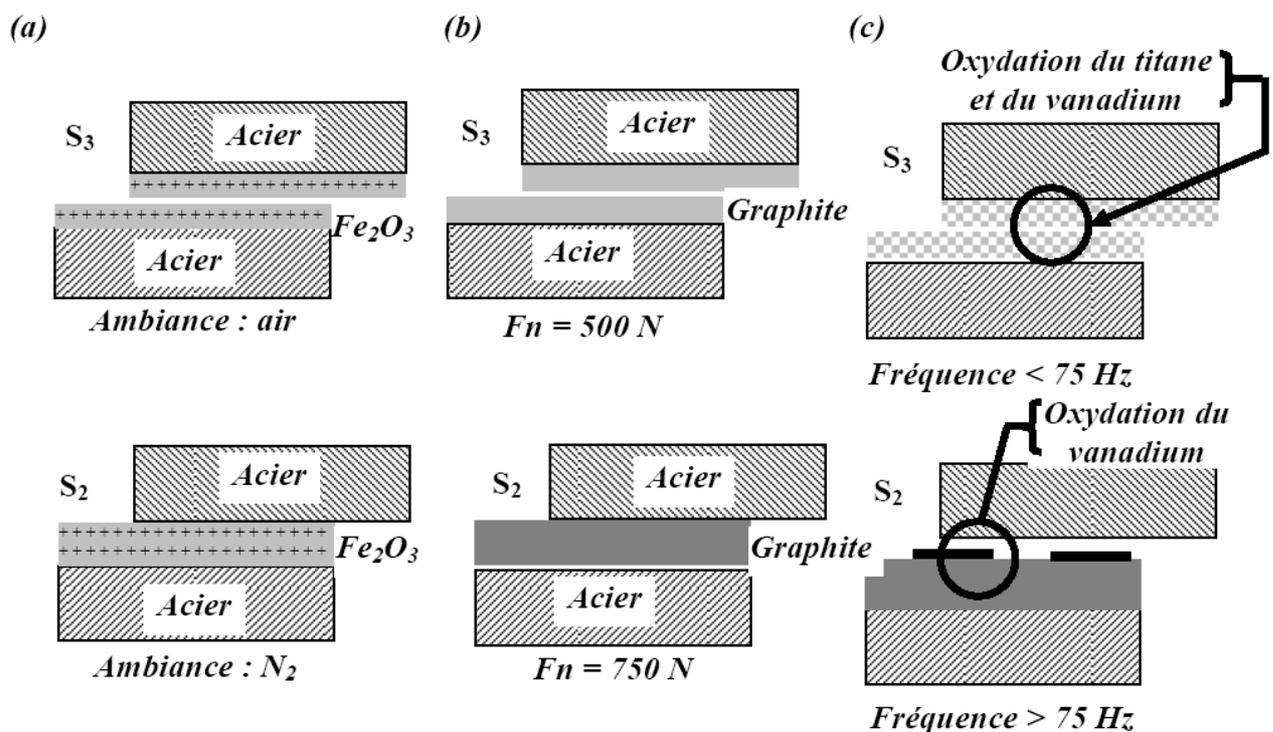


Figure I.10 : Migration du site d'accommodation de S3 en S2 en fretting (a)

L'environnement, (b) la charge et (c) la fréquence de sollicitation (fretting) [5]

I.6.3. Le circuit tribologique

La détérioration de surface et la perte de matériau se traduit par un enchaînement d'événements liés à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à un régime stationnaire traduisant l'équilibre entre détachement et élimination des particules, avec une influence par la géométrie des premiers corps et la rigidité du mécanisme.

Les particules de troisième corps adhèrent aux premiers corps à l'arrêt, mais au cours du frottement, ces particules sont constamment en mouvement et sont soumises à des gradients de vitesse. Par conséquent le contact est le siège de débit de matière. Cette circulation de matière à l'intérieur et à l'extérieur du contact est définie sous le terme de *circuit tribologique*, concept proposé par Y. Berthier (Figure I.11). Pour compléter celui des mécanismes d'accommodation des vitesses et comprendre la relation entre le troisième corps et l'usure dans un contact donné. Il s'agit d'une représentation en deux dimensions des débits de troisième corps dans un contact élémentaire

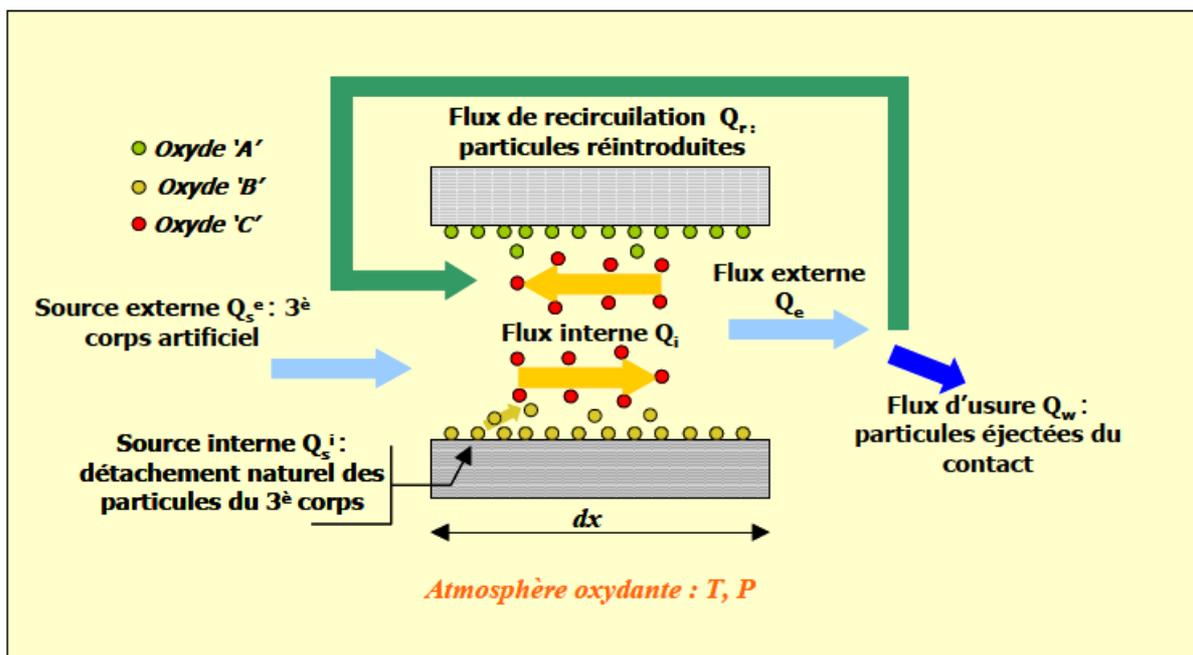


Figure I.11: Représentation schématique du circuit tribologique [Berthier, 1988]. [5]

La détermination de l'origine du troisième corps, des phénomènes qui entraînent l'activation du différent débit du circuit tribologique et qui conditionnent la circulation du troisième corps sont indispensables à la maîtrise de la durée de vie du segment porteur.

Les différents types de débit de matière identifiés dans et hors du contact sont présentés dans la Figure I.12 :

(Q_{si}) : le débit source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact.

(Q_{se}) : le débit source externe est obtenu par alimentation externe en troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide).

(Q_i) : le débit interne est la circulation du troisième corps dans le contact.

(Q_e) : le débit externe est l'injection du troisième corps du contact se scinde deux:

(Q_r) : le débit de recirculation correspond au débit des particules qui seront réintroduites dans le contact et permet la réalimentation de ce dernier.

(Q_u) : le débit d'usure correspond au débit de particules définitivement perdues pour le contact.

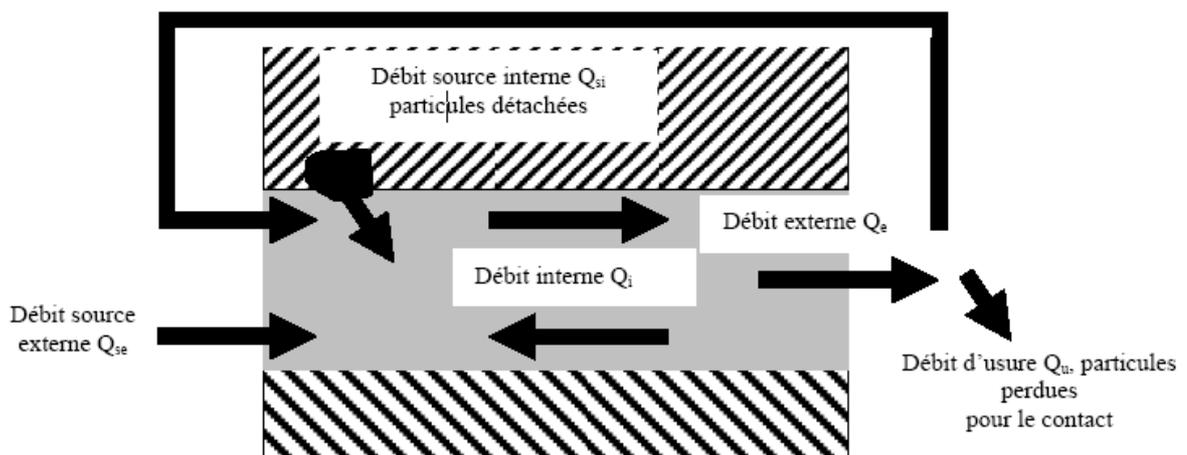


Figure I.12: circuit tribologique de Berthier et les différents types de débit de matière.[6]

Dans cette approche, l'usure n'est pas relative à la dégradation des premiers corps (ce qui correspondrait au débit interne de troisième corps. Elle est ici représentée par la sortie des particules hors du contact, qui deviennent alors des particules (débris) d'usure.

Tant que les particules restent dans le contact, elles peuvent avoir un rôle actif à jouer (support de charge, accommodation des vitesses,...).

Dans le cas de la lubrification liquide ou solide, il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe

(Q_{se}). Il apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé. Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par $Q_{se}=0$, le terme de débit source (Q) ne représente que le débit source interne (Q_{si}) Dalverny écrit ainsi les relations d'équilibre des débits pour différents types de circuits tribologiques (conservation de la quantité de matière) :

$$\begin{array}{l}
 \bullet \text{ Circuit ouvert} \\
 \bullet \text{ Circuit fermé}
 \end{array}
 \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{array} \right. \text{ soit } \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{array} \right. \text{ soit } \left\{ \begin{array}{l} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{array} \right.$$

$$Q_u = Q_e - Q_r$$

I.7. Paramètres tribologiques

Les paramètres tribologique sont des caractéristiques mécaniques qui ont des surfaces qui interagissent en mouvement relatif .La résistance au mouvement (friction) ou la résistance à l'endommagement des surfaces (usure) dans un environnement données en relation avec l'action d'une ou plusieurs sollicitations.

Un système tribologique caractérisé par les paramètres tribométriques, associés avec les conditions opérationnelles, les paramètres microstructuraux et les paramètres d'interaction dépendant du contact et des modes de lubrification.

I.7.1. Les paramètres opérationnels

Ils caractérisent les conditions fonctionnelles du tribosystème. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests. Les principaux paramètres opérationnels sont la charge appliquée F_N , la vitesse v , le temps t et la température T .

I.7.2. Les paramètres structuraux

Ils sont liés aux mécanismes élémentaires des tribosystèmes des produits et des machines. Le modèle classique d'un tribosystème est constitué de quatre composants principaux :

- Les éléments (1) et (2).
- L'interface (3^{ème} corps, lubrifiant, sable/eau)
- L'environnement (air, huile, poussière)

Une distinction doit être faite entre les :

Systèmes ouverts : qui permettent l'écoulement de matière à l'interface dans le cas de machines de mise en forme).

Systèmes fermés : dont les composants sont soumis aux processus de frottement et usure de manière continue.

Tribosystème	Elément(1)	Elément(2)	Interface(3)	Environnement(4)	de système
Boîte de vitesse	Engrenage	Engrenage	Lubrifiant	Air	Fermé
Roue /rail	Roue	Rail	3ème corps	Air	Ouvert
Glissière	Glissière	Support	Graisse	Air	Ouvert
Roulement	Billes	Cage	Lubrifiant	Huile	Fermé
Pneu/route	Pneu	Sol	Sable, eau	Poussière	Ouvert
Oulin	Roue	Cage	Minerais	Air	Ouvert

Tableau I-2: constituants structuraux des tribosystèmes

I.7.3. Les paramètre d'interaction

Ils caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants des tribosystèmes, ainsi que le mode de contact (distribution des contraintes de contact) ou le type de lubrifiant pour un couple de matériaux donnés. Ces conditions peuvent être associées aux processus de frottement et d'usure (adhésion, abrasion, ...). Les forces d'interactions entre les surfaces en contact en dépendent, de manière complexe, de la nature physico-chimique et des énergies des surfaces. Les contraintes de contact dépendent de la géométrie du contact, de l'élasticité, viscoélasticité, plasticité ou dureté des matériaux et de la force externe statique ou dynamique. Les modes de déformations au contact sont gouvernés par topographie (état de rugosité) des surfaces.

I.7.4. Les paramètres tribométriques

Ce sont des valeurs qui résultent des mesures des interactions à l'interface de contact, donc des systèmes tribologiques. Le frottement sera décrit par des mesures de force ou d'énergie et l'usure par des mesures de géométries modifiées ou de manière enlevées. D'autres caractéristiques tribologiques peuvent offrir un intérêt : les variations induites au frottement, le changement de composition des surfaces, la caractérisation des débris d'usure.

I.8. L'expérimentation en tribologie

Le coût et les difficultés tribologiques pour obtenir des mesures fiables des valeurs de frottement et d'usure en service favorisent le développement d'essais de simulation en laboratoire. Le choix entre plusieurs méthodes d'essais est lié à deux alternatives fondamentales:

- Essais de simulation pour lesquels les conditions d'essais, le choix des matériaux et le type d'échantillons sont déterminés par une situation tribologique réelle.
- Essai modèle où les conditions, ainsi que les matériaux et les échantillons sont adaptés et simplifiés pour analyser leur endommagement et modéliser le système tribologique.

Il y a deux raisons majeures pour entreprendre des essais de frottement et d'usure. D'une part, une mesure de performance d'un produit ou d'un composant souhaitée en fonction de la conception et des matériaux utilisés pour la construction, d'autre part, la performance d'un nouveau matériau ou d'un traitement de surface doivent être établies pour délimiter leur compétitivité commerciale.

- Plusieurs questions fondamentales se posent avant de choisir une méthode d'essais :
 - Quelles sont les conditions d'essai et leurs limites ?
 - Le comportement du matériau dans les conditions imposées est-il connu ?
 - Existe-t-il des essais normalisés adaptés au problème posé ?

I.9. Mesures tribométriques

- Le coefficient de frottement μ avec la condition statique μ_s ou dynamique μ_d , au glissement, ou bien en roulement est dans ce cas μ_r .
- La perte de masse Δw , la perte de volume Δv déterminés par l'enregistrement de variation géométrique mais souvent par une corrélation entre la masse spécifique et la perte de masse mesurée.

- l'énergie de frottement E_f
- Le taux d'usure k
- Le produit $P \cdot V$.

I.10. Essais tribologiques

La stratégie d'un choix d'une méthode d'essais tribologique va dépendre des résultats espérés et définis par le test. Cette stratégie peut commencer par une recherche fondamentale théorique sur le processus physiques impliqués ces derniers définissent le test et aboutissent à la mesure expérimentale d'un paramètre tribométrique pour finalement développer un produit ou assurer une qualité. Il est important d'évaluer la validité de la simulation des conditions réelles de service ou les conditions requises pour optimiser des solutions existantes ou à créer.

Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques qui permettent d'obtenir une caractérisation du frottement, de la lubrification et de l'usure. Les études fondamentales du comportement tribologique des matériaux utilisent des concepts géométriques simples et les principaux types de géométrie des interfaces de contact sont représentés schématiquement dans la Figure I.13.

Ces contacts sont caractérisés des tests de frottement et d'usures au glissement ou au roulement et l'ensemble des paramètres tribométriques sont mesurés par ces types de tribomètres. La force de friction est mesurée par jauges de contraintes ou de déplacement. Dans certain cas (mesures dynamiques) des capteurs piézo-électriques sont utilisés pour mesurer cette force.

Les configurations des tribomètres de type pion sur disque sont les plus représentatives pour la mesure du frottement et de l'usure par glissement. La Figure I.14 montre un exemple de tribomètre pouvant travailler en configuration pion/disque ou bille/disque. Dans ce cas le contact initial peut être une surface (contact conforme), un point ou une ligne (contact concentré) suivant la forme et l'orientation des pions (sphère ou cylindre). Les conditions d'essais de mesure du frottement et de l'usure par glissement sont fixées par des normes. Par exemple la norme américaine [ASTM G99] fixe les conditions pour l'essai pion sur disque :

- Vitesse de rotation : 0.03 à 500 t_r /min ;
- Force normal : 1 à 60N ;
- Dimensions : $\phi=60$ mm, $h=15$ mm.

La normalisation des essais en tribologie présente de nombreuses difficultés en raison de la complexité des phénomènes de frottement et d'usure. Ces essais normalisés peuvent cependant servir par exemple à établir une base commune pour

évaluer les performances d'un nouveau couple de matériaux pour le sélectionner ou comme certificat de contrôle de qualité.

Les méthodes d'essai sont classées en fonction du type de contact et des mouvements relatifs des corps en présence. La norme française NF T 51-108 présente les trois contacts (ponctuel, linéaire, surfacique) obtenus par combinaisons appropriées de sphères, de cylindres ou les plans, avec mouvement alternatif ou continu.

I.10.1. Paramètres de contact

Surfaces : matériaux, topographie, géométrie

Sollicitations : charge, vitesse, température

Ambiance : environnement, lubrification

Mode de déplacement : résistance, dissipation d'énergie, portance

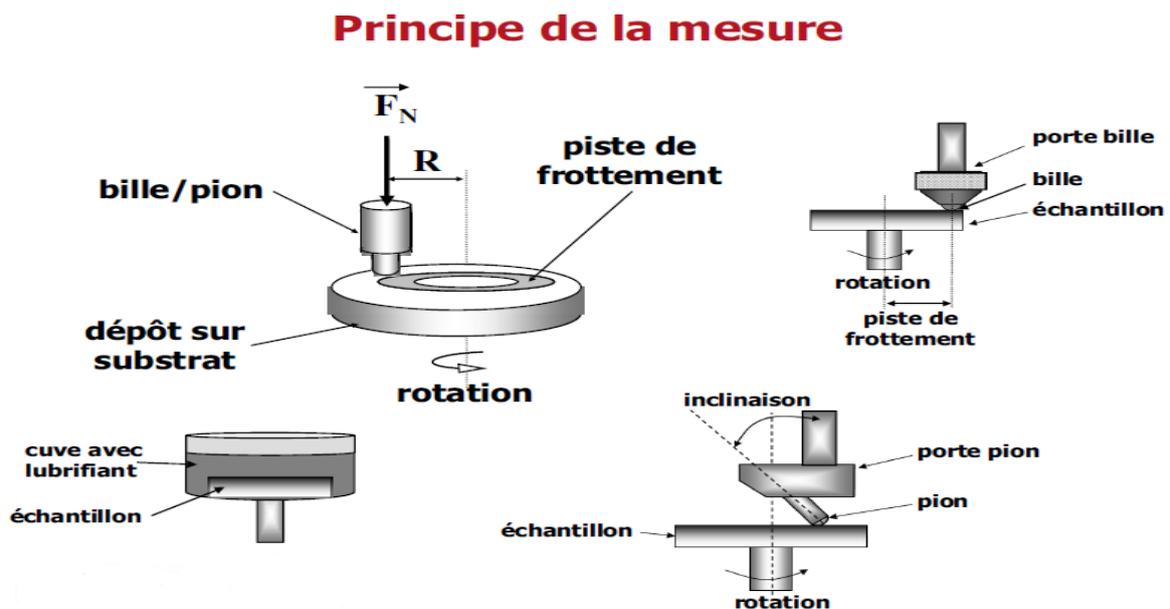


Figure I.13 : Principe de la mesure.

Tribomètre

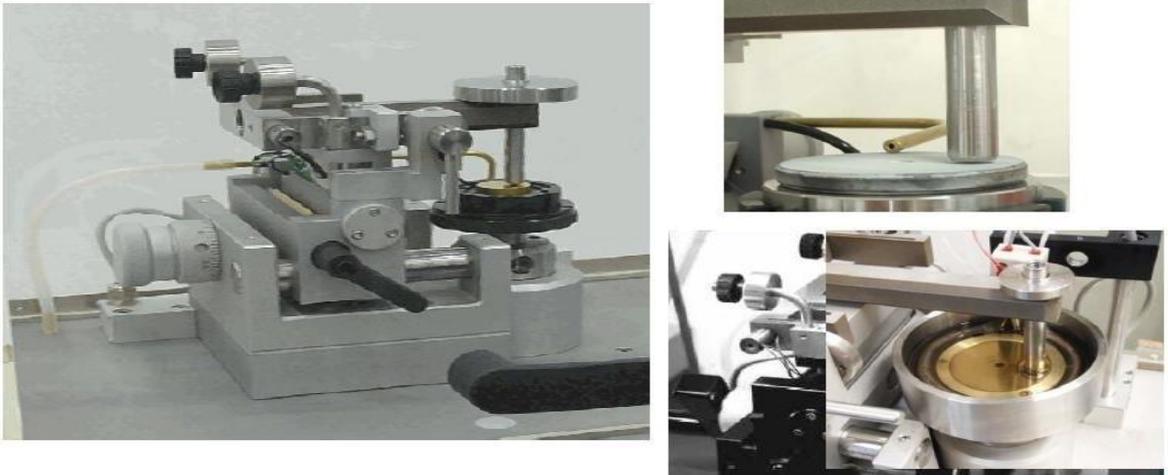


Figure I.14: Tribomètre bille /disque ou pion/disque

I.10.2. Paramètres d'essai

Bille/pion : acier 100 Cr6, alumine frittée : $\phi=1.5, 3,6$ et 10 mm

Charge appliquée : 1 à 30 N \longrightarrow 5N

Vitesse : 1 à 500 tours/min \longrightarrow 0.1m/s

Débris d'usure soufflés ou non \longrightarrow effet du troisième corps

Distance parcouru \longrightarrow 20 000 cycles

Atmosphère : à sec/mode lubrifié(θ).

La tribologie est importante dans nombreux domaines. On la trouve partout, par exemple :

Dans le domaine des transports :

(rendement, freinage, lubrification, durée de vie)

- ferroviaire
- aéronautique
- transport automobile

Dans la médecine :

- les prothèses
- les systèmes biomécaniques implantés
- les articulations

Dans le domaine sportif :

- le_frottement_et l'usure des équipements
- les skis
- les canoës
- les voiliers
- les freins de Formule 1

Dans le domaine militaire :

- les performances des machines
- la discrétion acoustique
- le frottement dans les tubes d'armes
- Dans les matériaux composites
- le frottement fibre/matrice

I.11. Conclusion

La tribologie est une science très vaste. Elle intéresse tous les domaines d'activité car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régi par des contacts. La tribologie permet d'étudier, comprendre et d'apporter des solutions pour les problèmes liés à l'usure et le frottement en s'appuyant sur les évolutions des techniques industrielles et des théories scientifiques et à l'aide des dispositifs expérimentaux très variés pour créer de nouvelles techniques et moyens qui permettent un bon fonctionnement dans les contacts mécaniques. La tribologie entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines industriels (conservation d'énergie, productivité, développements et fabrication de nouveaux équipements), elle intervient dans les systèmes vivants (les articulations humaines).

II.1. Introduction

On peut considérer que tous les aspects presque de nos vies sont affectés par les phénomènes de frottement, que ce soit de manière positive ou négative. Nous tenons en compte comme évident les effets positifs. Nous nous ne rendons pas compte de l'importance du frottement dans la vie quotidienne. C'est le cas pour des actions comme démarrer, arrêter, faire tourner une voiture, fixer des pièces, tenir un objet dans la main...etc.

Avec le frottement, il existe l'usure, qui est un vaste domaine couvert par la tribologie.

L'usure des surfaces frottantes qui en résulte se traduit, le plus souvent en cours de fonctionnement, par une élévation de température, des modifications géométriques et dimensionnelles, des transformations physico-chimiques ou encore par des enlèvements de matière. Par ses aspects, le frottement et l'usure sont des phénomènes complexes dont l'étude nécessite de multiples approches.

On est toujours intéressé à réduire, voire supprimer l'usure afin de prolonger la durée de fonctionnement et la fiabilité des machines et des mécanismes.

Ce n'est, toutefois, que depuis peu de temps que des études spécifiques et approfondies sur l'usure sont entreprises. En effet, l'usure est toujours liée au frottement.

II.2. Définition

Le frottement peut être défini comme la force qui agit entre deux corps à leur surface de contact, de façon à freiner le déplacement de l'une par rapport à l'autre. [8]

Le frottement peut être défini comme la force résistante tangentielle à l'interface commune entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force externe, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à la surface de l'autre. Le frottement est aussi défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement.

Les normes ne définissent pas le frottement mais la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à l'autre [ASTM, 1990].

Pour d'autres normes le frottement se résume à l'action agissant contre le mouvement relatif de corps en contact [DIN, 1977].

II.3. Provenance des lois du frottement

Nous avons peu d'informations à propos des développements et de la résolution des problèmes quotidiens concernant le frottement jusqu'à Léonard DE VINCI (1452-1519) qui fut le premier à faire une approche scientifique du phénomène. Ce génie universel postula que la force que l'on doit appliquer pour permettre le glissement d'un corps est proportionnelle à la charge et ne dépend pas de la surface de contact.

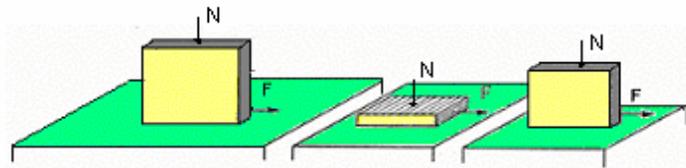
Environ deux siècles plus tard, l'ingénieur français AMONTONS a énoncé ses deux lois, indépendamment de Léonard DE VINCI. Une troisième loi a été introduite par COULOMB en 1785 qui a postulé que le frottement cinétique est indépendant de la vitesse de glissement. Ces lois de frottement sont de nature empirique et, bien évidemment, aucun principe fondamental de physique n'est violé dans le cas où ces lois ne sont pas respectées.

Il n'existe pas jusqu'à ce jour de théorie unifiée du frottement basée sur des principes physiques. Une des lois d'AMONTONS s'énonce comme suit :

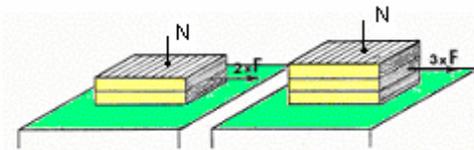
La force de frottement F_T est proportionnelle à la charge normale F_N permettant de définir un coefficient de frottement μ :

$$F_T = \mu F_N$$

Les lois d'AMONTONS-COULOMB sur le frottement entre deux solides



Influence de l'étendue de surface sur la force de frottement



Proportionnalité de la charge appliquée sur la force de frottement

Figure II.1 : Influence de la charge et l'étendue de la surface sur le coefficient de frottement. [8]

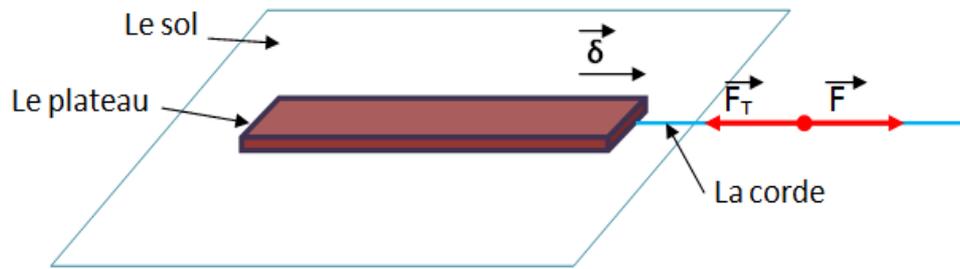


Figure II.2 : un plateau étiré par une corde.

COULOMB décrit plus d'une trentaine d'expériences pour lesquelles il donne à chaque fois une série de mesures. Cette expérience est celle d'un plateau étiré par une corde (Figure II.2). Tant que le plateau reste immobile, la tension de la corde \mathbf{F} reste équilibrée par la résistance \mathbf{F}_T due au frottement. La valeur de la tension de la corde à partir de laquelle le plateau commence à glisser donne donc la valeur maximale de la force de frottement \mathbf{F}_T .

Parmi les conclusions de Coulomb, nous retiendrons les plus remarquables, transcrites en langage moderne :

- (1) : La force de frottement \mathbf{F}_T est proportionnelle au poids \mathbf{F}_N du solide posé sur le plateau horizontal.
- (2) : Pour un poids \mathbf{F}_N donné, cette force ne dépend pas de l'étendue des surfaces de contact, mais seulement de la nature de ces surfaces (bois poli ou rugueux, bois ou métal,.. etc.).

Les lois (1) et (2) peuvent être exprimées par la formule :
 $\mathbf{F}_T/\mathbf{F}_N =$ une constante dépendant de la nature des deux matériaux en contact et de leur état de surface.

Cette constante sera appelée plus tard "coefficient de frottement". Sa valeur est de l'ordre de 0,5 pour du bois sur du bois, de 1 pour une semelle de chausson d'escalade en caoutchouc sur un rocher.

Ces deux lois, souligne Coulomb en préambule de son mémoire, avaient déjà été exprimées par Guillaume AMONTONS dans son mémoire "De la résistance causée dans les machines" en 1699. Mais ces lois d'AMONTONS avaient été contestées par la suite. COULOMB fait plus que les confirmer.

Il en étend le domaine de validité, en particulier pour de très fortes charges. La diversité des paramètres dont il étudie l'influence, son utilisation systématique de l'analyse mathématique sont sans précédent au XVIIIe siècle. [13]

Deux types de coefficients de frottement peuvent être distingués : un qui représente l'opposition de frottement début de mouvement relatif (mouvement imminent), et un autre qui représente le frottement s'opposant à la continuation du mouvement relatif une fois que le mouvement a commencé. Le premier s'appelle le coefficient de frottement statique ; le second, le coefficient de frottement cinétique.

Dans le cas de frottement solide/solide (avec ou sans lubrifiant), ces deux types de coefficients de frottement sont par convention définis comme suit :

$$\mu_0 = F_0 / F_N$$
$$\mu_D = F_T / F_N$$

Là où F_0 est la force juste suffisamment pour empêcher le mouvement relatif entre deux corps, F_T est la force requise pour maintenir le mouvement relatif entre deux corps, et F_N est la force normale à l'interface entre les corps coulissants.

A ce point, il faut souligner que μ n'est une constante que pour un couple de matériaux donné en glissement dans un milieu environnant. Sa valeur varie suivant les matériaux et les conditions telles que le temps de rodage, par exemple.

Le coefficient de frottement μ n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique.

II.4. Force et coefficient de frottement

II.4.1. Formulation du coefficient de frottement

Une pièce (2) est appliquée contre une pièce plane (1) par une force F_N normale au point de contact (figure II.3). L'expérience montre qu'on peut appliquer à la pièce (2) une force F_T parallèle à la surface de contact sans qu'elle se mette en mouvement. Il existe donc une force F_0 appliquée par le corps (1) à la pièce (2) capable de s'opposer à F_T et d'empêcher le mouvement.

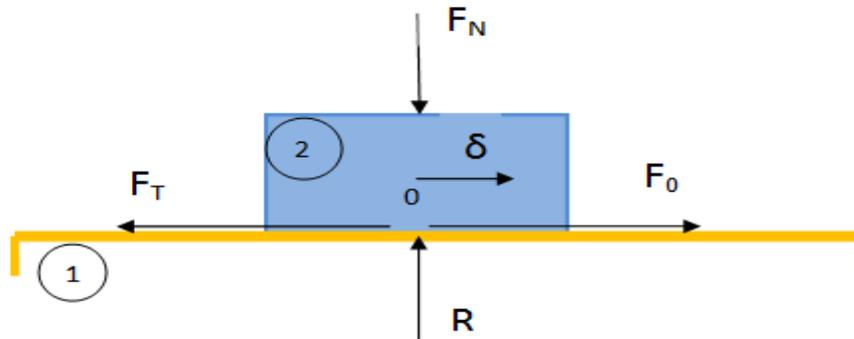


Figure II.3 : Force de frottement.

En observant le déplacement δ du solide (2) à partir de sa position où $F_T = 0$, on voit d'abord un très petit mouvement qu'on appelle micro glissement lorsque F_T croît (figure II.4). Pour une certaine valeur $F_T = F_0$, la pièce se met en mouvement. En supprimant la force appliquée F_0 , la pièce ralentit, puis s'arrête. [2]

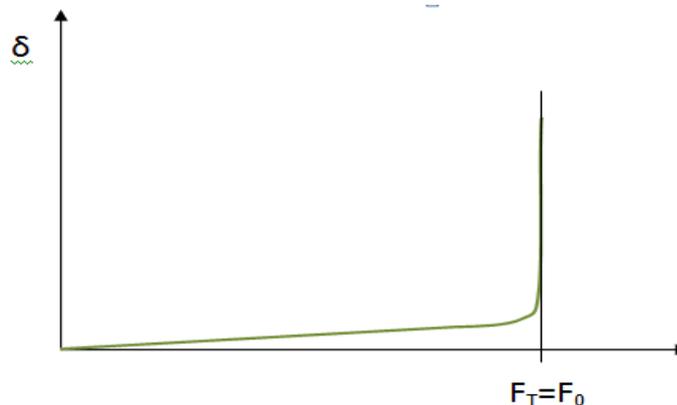


Figure II.4 : Mouvement de glissement

Ces observations montrent qu'il existe un phénomène dans la surface de contact des pièces qui s'oppose à leur glissement relatif, c'est le frottement.

On peut en donner la définition suivante: le frottement est un phénomène à la surface d'un corps qui empêche son glissement sur un autre corps (frottement statique) ou qui dissipe de l'énergie mécanique en cas de glissement (frottement dynamique).

Par définition, le coefficient de frottement μ est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale qui les applique l'une sur l'autre.

$$\mu = F_T / F_N \quad (\text{II.1})$$

Où $F_T = T$ est la force nécessaire à un glissement permanent et F_N la charge s'exerçant sur le solide (2) lors du déplacement.

La formule II.1 est la loi d'AMONTONS qui est la seule formule actuellement disponible en frottement sec. La (figure II.5) Représente la pièce (3) isolée. A l'équilibre statique :

La différence entre le coefficient de frottement dynamique et le frottement statique est plus marquée avec les polymères qu'avec les métaux.

- La réaction normale de la pièce (1) est égale et opposée à l'action de (2), $F_N^- = -F_N$
- La force de frottement est égale et opposée à la force tangentielle exercée sur (2), $F_T^- = -F_T$;
- La réaction résultante de la pièce (1) est égale et opposée à la réaction de (2), $R^- = -R$.

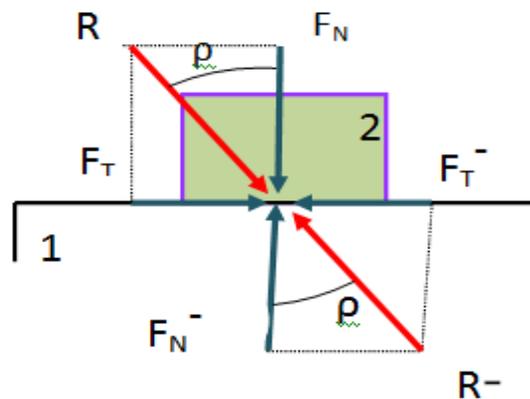


Figure II.5 : Angle de frottement. [8]

L'angle de frottement indique l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à la surface, il vaut :

$$\rho = \arctan (F_T/F_N) = \arctan (F_T^-/F_N^-) \quad (\text{II.2})$$

$$\rho = \arctan (F_T/F_N) \quad (\text{II.3})$$

Où

$$\mu = \tan \rho \quad (\text{II.4})$$

Le coefficient de frottement μ n'est pas une propriété du matériau mais de l'ensemble du système tribologique. C'est-à-dire que, par exemple, un couple graphite-graphite a un coefficient de frottement de 0,1 environ dans une atmosphère normalement humide alors que ce coefficient est supérieur à 0,5 si l'atmosphère ambiante est très sèche.

Nous constatons que, la résultante R d'après la (figure II.6) est toujours inclinée du même angle de frottement ρ par rapport à la normale, c'est-à-dire qu'elle se trouve toujours sur un cône d'axe normal au plan et de demi angle au sommet ρ , que nous appelons cône de frottement. [8]

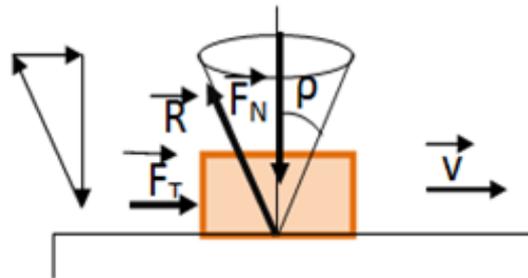


Figure II.6 : Cône de frottement. [9]

Retenons que :

- S'il y a un glissement, la force de contact est sur le cône de frottement.

Le coefficient de frottement correspond à une égalité

$\mu = F_T/F_N = \tan \rho$ (le cône dans ce cas s'appelle cône d'adhérence).

- S'il n'y a pas de glissement, la force de contact est dans ou à la limite sur le cône.

Le coefficient d'adhérence correspond à une inégalité $\mu_0 = \tan \rho_0 \geq F_T/F_N$

II.4.2. Comportement du coefficient de frottement

Les principaux paramètres qui influent sur le comportement du coefficient de frottement et par conséquent sa valeur sont :

II.4.2.1. Vitesse de glissement

La valeur du coefficient de frottement est généralement différente à l'arrêt que lorsque les corps glissent l'un sur l'autre on distingue :

- Le coefficient de frottement statique (à l'arrêt) μ_0 .
- Le coefficient de frottement dynamique (avec glissement) μ .

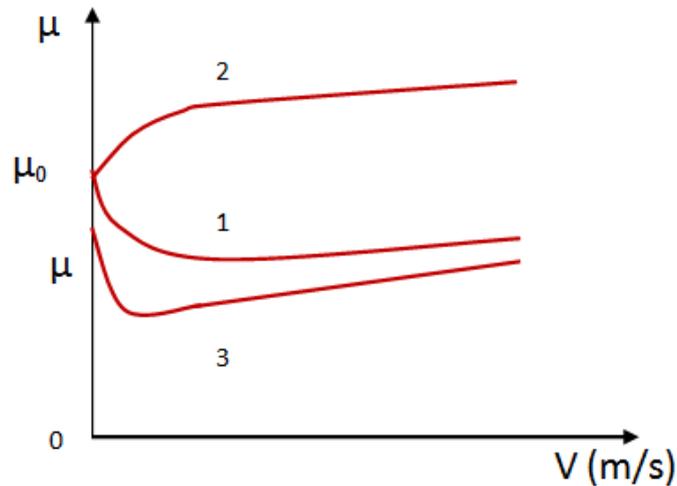


Figure II.7 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure II.7, courbe (1)) il atteint rapidement la valeur dynamique lorsque la vitesse dépasse quelques cm/s. A très grande vitesse, plus de 150m/s, le coefficient de frottement des métaux diminue fortement, il peut tomber jusqu'à 0.02, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant.

Certains matériaux non métalliques présentent au contraire une augmentation du frottement avec la vitesse, courbe (2) de la (figure II.7).

Si les surfaces sont abondamment lubrifiées en régime de frottement mixte, courbe(3) de la même figure, le coefficient de frottement statique est plus bas qu'en régime sec et diminue relativement moins avec le glissement, puis il augmente lentement du fait du cisaillement du liquide ou de la graisse.

On est habituellement intéressé par le frottement à des petites valeurs de vitesse 0,5m/s pour éviter l'échauffement et l'usure.

II.4.2.2. Chemin de glissement parcouru

La (figure II.8) représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement:

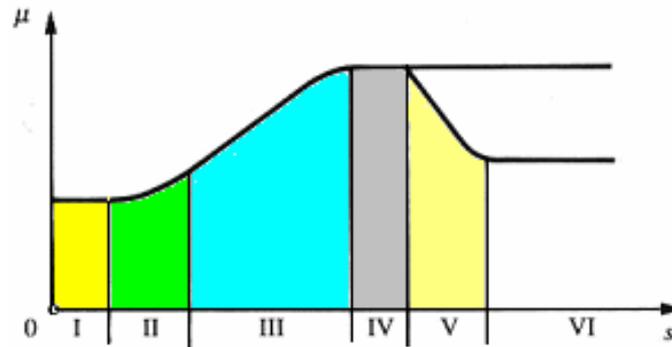


Figure II.8 : Evolution du frottement avec la distance de glissement. [8]

I : Les surfaces sont initialement propres, le frottement résulte principalement de phénomènes de labourage et de déformation.

II : Le frottement commence à croître lentement à cause de petits arrachages de matière. Avec des surfaces lubrifiées, le stade I persiste longtemps et le stade II peut faire défaut.

III : Le coefficient de frottement croît parce que les débris d'usure entre les surfaces s'incrustent dans l'une ou l'autre des surfaces en provoquant un intense labourage.

IV : Le coefficient de frottement se stabilise lorsque le nombre de nouveaux débris d'usure est égal au nombre de débris qui quittent la surface.

V : On observe parfois qu'un matériau dur se polit lorsqu'il frotte contre une surface tendre.

Le coefficient de frottement diminue parce que le labourage est moins intense.

VI : Si les deux surfaces se polissent et que les débris d'usure sont enlevés ou assez profondément incrustés dans la surface tendre pour ne pas rayer la surface dure, le coefficient de frottement prend une valeur constante de fin de rodage.

Ces stades dépendent des matériaux, des conditions expérimentales, de la contamination des surfaces et des conditions ambiantes.

II.4.2.3. Etat de surface

Le coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses.

II.4.2.4. Nature des métaux

Le frottement diminue lorsqu'un des matériaux du couple tribologique est tendre, car l'effort de labourage est faible. C'est pourquoi on revêt les surfaces d'une fine couche d'un matériau tendre ou d'un film d'oxyde.

II.4.2.5. Charge normale appliquée

La (figure II.9) donne un exemple de la variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale appliquée N pour du cuivre glissant sur du cuivre dans l'air et sans lubrification pour un essai pion-disque.

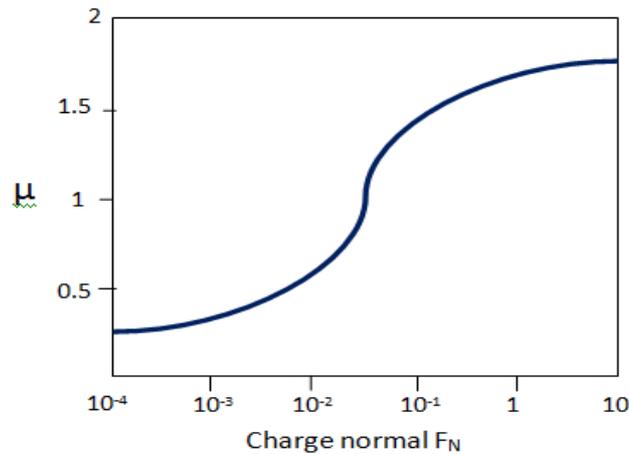


Figure II.9 : Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale F_N .

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1 à 10 nm) qui joue un rôle critique dans le contact glissant est progressivement détruit, entraînant une augmentation progressive du coefficient de frottement qui se stabilise à une valeur correspondant au contact métal-métal.

II.4.2.6. Température ambiante

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève; puis, au-delà de 500 °C à 800 °C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue.

Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà. [2]

II.4.3 Importance du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs (F_N , V , et μ), correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement. [10]

Le champ des contraintes mécaniques superficielles augmente dangereusement avec l'accroissement du coefficient de frottement. Sauf cas particuliers de l'utilisation positive du frottement, par exemple pour accroître les caractéristiques d'adhérence entre deux corps (mécanismes d'engrènement, assemblage frettés, ...) ou pour absorber de l'énergie (freinage), on cherche donc à abaisser le plus possible le coefficient de frottement.

La maîtrise du coefficient de frottement est un critère déterminant pour la fiabilité et la sécurité de fonctionnement de certains composants tels que les assemblages frettés, vissés.

Ainsi le rôle de certains traitements de surfaces est-il principalement dévolu au contrôle des couples de serrage sur les éléments de visserie, de boulonnerie.

II.4.4. Valeurs pratiques du coefficient de frottement

L'étude théorique des mécanismes du frottement sec et mixte ne permet pas de prédire avec exactitude la valeur réelle du coefficient de frottement dans les couples cinématiques et dans les assemblages. Mais la compréhension du phénomène est précieuse pour choisir correctement les matériaux et savoir comment agir pour obtenir les caractéristiques de frottement souhaitées.

Le coefficient de frottement d'un métal glissant sur un autre sans lubrification dans l'air varie de $\mu = 0,5$ à $\mu = 1,5$. A l'exception de l'or ($\mu = 2$), les autres métaux s'oxydent dans l'air en formant un film d'oxyde de l'ordre de 1 à 10 nm d'épaisseur. Ce film d'oxyde favorise un coefficient de frottement faible, pour de faibles pressions.

C'est le cas du cuivre en friction sur lui-même dont le coefficient de frottement $\mu = 0,4$ pour une charge normale $F_N < 10^{-2}$ N. Pour une charge $F_N > 10^{-1}$ N, ce coefficient se stabilise à $\mu \approx 1,8$. Cet accroissement est dû à la rupture du film d'oxyde. Il y a transfert de métal et usure.

Dans le cas d'un alliage métallique tel que l'acier (0,4% de teneur en carbone), la valeur du coefficient de frottement est relativement élevée ($\mu \approx 1$) pour de faibles charges ($F_N < 10^{-3}$ N).

La valeur de μ s'abaisse pour une charge $F_N > 10^{-2}$ FN ($\mu \leq 0,5$).

Cette transition est attribuée à l'incrustation du film d'oxydes de fer sous l'effet de la charge élevée assurant le maintien du contact entre films d'oxydes. La fonte grise et les bronzes ou le plomb glissant sur un acier non allié donnent des valeurs faibles du coefficient de frottement $\mu = [0,2 ; 0,4]$. [7]

Le tableau II.1 suivant donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux. [9]

Matériau 1	Matériau 2	Statique	Dynamique
Acier doux	Bronze	0.75	0.57
Acier doux	Fonte	0.75	0.23
Acier doux	Aluminium	0.60	0.47
Acier doux	Acier durci	0.50	0.45
Acier durci	Acier doux	0.78	0.42
Acier durci	Acier	0.70	0.35
Fonte	Téflon	1.1	0.15
Téflon	Aluminium	1.1	1.4
Téflon	Fonte	0.10	0.05
Aluminium	Régule	0.05	0.05

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement. [9]

II.5. Choix des matériaux

Le choix d'un matériau de frottement est un problème d'optimisation entre des qualités souvent contradictoires.

- Propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement et amortissement des vibrations et des chocs.

- Propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion et aptitude aux traitements.

- Facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et aux propriétés anti-usure, grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion, à la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.

- Propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, auto-réparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident ;
- Comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,
- Propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités lubrification, problèmes de pollution ou contamination ;
- Propriétés socio-économiques : coût de revient, disponibilité sous des formes diverses, facilité d'approvisionnement, dépendance des fournisseurs, évolution prévisible des techniques.

II.6.Frottement des métaux

Les surfaces métalliques propres, placées dans le vide ou des atmosphères, présentent généralement une adhésion marquée. L'absence de contaminations fait que des liaisons interfaciales fortes s'établissent entre les surfaces, ce qui induit des facteurs de frottement élevés ($\mu > 1$). Des microsoudures peuvent s'établir, conduisant au grippage épidermique qui, en se généralisant, peuvent amener la soudure complète des deux solides en contact (grippage généralisé). [12]

Bien que le frottement ne soit pas considéré comme une propriété intrinsèque des matériaux, leur structure cristalline et leurs propriétés font apparaître des différences dans leur comportement. C'est ainsi que le terme d'adhésion est fortement dépendant de la structure cristalline. En présence d'air, la plupart des métaux s'oxydent naturellement en formant des films de 1 à 10nm d'épaisseur.

Ces films jouent un rôle déterminant dans le comportement tribologique, dans la mesure où les conditions de fonctionnement permettent leur maintien ou leur renouvellement. En effet le travail d'adhésion des oxydes est bien inférieur à celui des métaux, ce qui réduit le terme d'adhésion du facteur de frottement, limitant l'apparition des liaisons interfaciales. En général, le frottement métal oxydé / métal oxydé est inférieur à celui métal nu/métal nu.

Les conditions de charge et de vitesse d'une part, les propriétés mécaniques et physico-chimiques des métaux et des oxydes d'autre part, régissent le comportement global.

Lorsque la température du contact augmente, on observe plusieurs effets :

- Les propriétés mécaniques des matériaux évoluent : ductilité et écrouissage par exemple pour les métaux à structure cubique à faces centrées, transition fragile/ductile pour les métaux à structure cubique centrée ; ces évolutions

conduisent à des variations du coefficient de frottement.

-La précipitation de la réactivité physico-chimique des matériaux qui abaissent largement les facteurs de frottement. C'est le cas de la corrosion, la couche d'oxyde qui se forme joue le rôle d'un film lubrifiant qui.

II.7. Frottement des polymères

Les polymères sont utilisés dans un grand nombre d'applications, où la résistance à l'usure et à la corrosion, la légèreté, la facilité de mise en œuvre et de maintenance, le coût, sont les critères principaux qui orientent le choix. Proposés par les firmes spécialisées sous forme de poudre, paillettes, granules, bondes, ils peuvent être mis en forme par moulage, extrusion ou usinage, ce qui facilite la mise en œuvre de composant tribologique élémentaire : coussinets, engrenages, composant de roulement.

De plus, il est relativement facile de leur associer des charges métalliques, minérales ou organiques, sous forme de poudre, fibres ou tissus, qui améliorent à la fois leurs propriétés mécanique, thermique ou tribologique : métaux conducteurs tels que le cuivre ou le bronze, fibre minérales de verre ou fibre de carbone, lubrifiant solide tels que le graphite ou le bisulfure de molybdène....

On retrouve en tribologie les deux grandes familles de polymère utilisées en génie mécanique:

-Les polymères thermoplastiques, dont la structure se caractérise par des chaînes linéaires dans lesquelles le motif de base se répète plusieurs milliers de fois. L'arrangement des chaînes peut leur conférer une structure soit amorphe, soit semi-cristalline. Ils sont mis en forme par fusion et moulage. Il n'y a pas de réaction chimique lors de l'opération, qui est réversible.

-Les polymères thermodurcissables, qui sont constitués par un réseau moléculaire bi ou tridimensionnel. Une réaction chimique de réticulation se produit lors de l'opération de mise en forme.

II.8. Conclusion

Malgré la simplicité des lois d'AMONTON-COULOMB le frottement reste un phénomène difficile à expliquer. Il est fonction d'un grand nombre de facteurs (dureté, état des surfaces en contact, milieu de fonctionnement, la vitesse, la charge, la température, la lubrification...). Ces facteurs dépendent aussi de plusieurs autres paramètres plus complexes. On ne peut pas contrôler complètement ces paramètres mais on peut faire de sorte que le frottement soit le plus petit possible, en remédiant par la

lubrification, les traitements thermiques, les revêtements de surfaces ou encore l'adjonction de particules de lubrifiants solides.

III.1. Introduction

L'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et qui s'accompagne de transformations physiques et chimiques des surfaces.

Elle est la conséquence majeure du frottement, généralement combattue à cause des dégâts qu'elle apporte aux machines, mais elle présente aussi des aspects positifs, lors de la période de rodage des machines, et même parfois utile, on peut citer comme exemple, l'écriture de la craie sur le tableau ou le crayon sur le papier et l'ultime finition des machines lors de la période de rodage.

III.2. Définition

L'usure est la détérioration des composantes due à l'usage, elle est souvent menée à la perte de la matière qui se produit dans les zones de contact au cours de fonctionnement.

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont: [14]

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

III.3. Phases de la vie d'un mécanisme

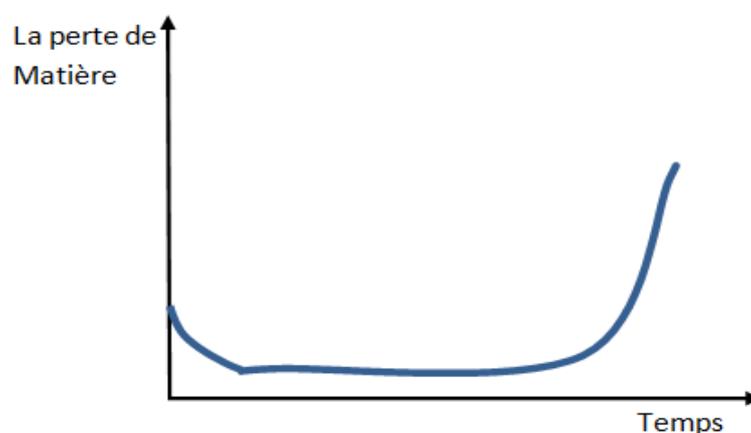


Figure III.1 : La perte de matière par unité de temps [9]

Un mécanisme passe normalement par trois phases d'usure successives :

L'ultime finition des surfaces lors du rodage : les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.

La vie utile correspond au régime d'usure douce : la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît.

Enfin, **la vieillesse** se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage.

Les débris d'usure portent en eux l'histoire de leur formation et l'examen des particules de fer dans les lubrifiants, ou ferrographie, apporte de précieuses informations. Les processus d'avarie produisent des particules atteignant 0,1 mm, mais les débris d'usure douce ont moins de 15 micromètres. Même après une vidange, il y a vite équilibre dans un lubrifiant entre la production des particules et leur élimination par décantation, filtration, rétention par un bouchon magnétique ...ect.

III.4. Les différents mécanismes d'usure

III.4.1. Usure adhésive

Elle est due au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions, qui se forment entre deux aspérités en contact direct métal-métal. Elle est accompagnée d'un échauffement au moins local des surfaces métalliques, qui, à l'observation visuelle, se traduit par l'aspect des empreintes d'usure.

Quand deux corps sont en contact, il se forme sur la surface des soudures froides appelées jonctions. Pour réaliser le mouvement relatif, ces jonctions doivent être cisillées.

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement par soudage en phase solide. Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

- Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.

- Si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme de particules qui sont écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'abrasion.

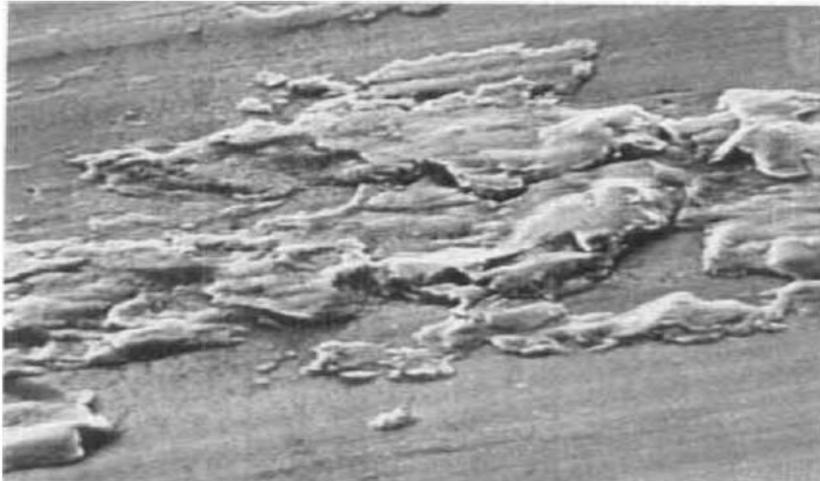


Figure III.2 : Usure par adhésion.

III.4.1.1. Paramètres influant sur l'usure adhésive

L'adhésion dépendant essentiellement de l'aire réelle de contact, elle est fortement influencée par les paramètres fonctionnels de la situation tribologique concernée et par la nature et les propriétés des matériaux mis en présence.

- Le milieu ambiant tend à accélérer le phénomène ou à le ralentir, suivant qu'il favorise ou défavorise l'existence de jonctions métal-métal et le transfert qui en résulte.
- L'augmentation de la charge se traduit d'abord par un accroissement du nombre de points de contact, et ensuite par un accroissement de la taille des jonctions. Les aspérités se déforment plastiquement et contribuent ainsi à une augmentation rapide de l'usure.
- L'effet de la vitesse est d'agir sur la température superficielle, la température maximale atteinte étant celle du métal ayant le plus bas point de fusion. Si la charge faible n'entraîne pas de destruction immédiate, cet accroissement de température en surface aura pour effets:
 - De créer des points chauds, ce qui accroît la réactivité des surfaces et

des produits d'usure vis-à-vis du milieu environnant et favorise toutes les réactions chimiques qui peuvent se produire au cours des glissements.

➤ De faciliter (du fait des chauffages et refroidissements successifs) les modifications structurales et à partir d'un certain niveau de déclencher des mécanismes de diffusion de certains éléments. Ainsi, dans le cas des aciers, on peut trouver des transformations de type martensitique, et certaines zones voient se modifier leur teneur en carbone.

- La charge (pression de contact) et la vitesse introduisent des limites dues aux déformations dans un cas, aux échauffements dans l'autre. L'action simultanée des pressions de contact et de la vitesse peut être:
 - d'accroître la conformité des surfaces par déformation;
 - de favoriser (par l'élévation de température) la diffusion des éléments d'une pièce dans l'autre et la formation de composés à l'interface;
 - de favoriser les réactions superficielles avec le milieu environnant;
 - d'entraîner la fusion des couches superficielles.

La prise en compte de l'action combinée de la vitesse et de la pression de contact peut être réalisée d'une manière empirique par l'utilisation du produit PV (*pression* \times *vitesse*) ou plus exactement μPV qui exprime la puissance spécifique générée dans le contact. En dépit des imprécisions introduites par la méconnaissance partielle de certains paramètres (partage des flux thermiques notamment), ces quantités peuvent être considérées comme des indicateurs du comportement d'un composant tribologique. On peut admettre par exemple les limites en PV suivantes:

- 1 W/mm^2 pour le frottement sec de matériaux de friction classiques,
- $0,4 \text{ W/mm}^2$ pour le frottement sec des céramiques,
- $1,5 \text{ à } 2 \text{ W/mm}^2$ pour le frottement de composites polymères + lubrifiants solides.

- La température, outre l'affaiblissement mécanique des matériaux, favorise les réactions interfaciales et, au-delà d'un certain seuil déclenche les mécanismes de fluage et de diffusion qui augmentent fortement le risque de création de liaisons étendues pouvant conduire au grippage.

III.4.1.2 Prévention

Il faut choisir des couples de matériaux n'offrant aucune possibilité de filiation cristalline résistante. Les suivants sont couramment utilisables en atmosphère non oxydante (attention, l'argent et le cobalt sont compatibles mais pas leurs oxydes).

Couples des matériaux compatibles	
Acier	Argent, Antimoine
Chrome	Argent, Cadmium, Or
Molybdène	Argent, Cuivre, Or, Palladium
Tungstène	Argent, Cuivre
Argent	Cobalt, Rhénium

Tableau III.1 : liste de quelque matériau compatible. [9]

On peut métalliser les pièces, en se méfiant de la fragilisation par l'hydrogène lors des dépôts électrolytiques.

Deux métaux incompatibles peuvent devenir compatibles par l'action d'un troisième élément : ainsi la présence d'étain dans l'aluminium rend ce dernier compatible avec l'acier, au point que l'on fabrique des coussinets en alliage aluminium-étain. De même, l'acier sulfinuzé frotte correctement sur l'aluminium alors que le frottement acier-aluminium est catastrophique.

Pour les métaux ferreux, les traitements thermiques de durcissement sont favorables : trempe, cémentation, nitruration, carbonitruration ...

III.4.2. L'usure par abrasion

L'usure abrasive est due au contact entre une rugosité et la surface d'un solide. La rugosité responsable de l'usure peut être un pic de la surface antagoniste, mais également un débris d'une surface ou plus généralement un troisième corps s'introduit le dans le contact, l'endommagement subi par la surface se présente sous forme de stries parallèles à la direction de glissement

Le processus d'usure par abrasion existe sous deux formes :

- L'abrasion de deux corps où les aspérités de la surface plus dure cisailent les aspérités de la surface plus faible;
- L'abrasion avec trois corps où les particules dures situées entre les surfaces en mouvement provoquent des microcoupures dans une ou dans les deux surfaces

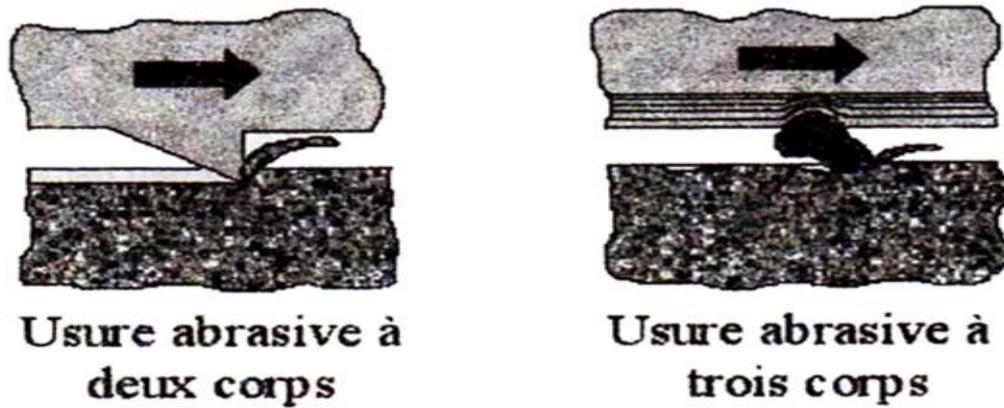


Figure III.3. Les deux types usure par abrasion

III.4.2.1. Paramètres influençant sur l'usure par abrasion

De nombreux paramètres influent sur l'intensité de l'usure abrasive:

- Dimension et morphologie de l'abrasif: l'intensité de l'usure abrasive croît avec la taille des particules. Une particule possédant des angles aigus aura un effet de coupe plus marqué. Des particules arrondies déformeront davantage le métal.
- Nature, dureté, quantité d'abrasif impliquée dans le contact.
- Charge appliquant les grains abrasifs sur la surface.
- Nature, structure et dureté du matériau subissant l'abrasion.
- Vitesse des particules: à basse vitesse ($V < 1$ ou 2 m/s) avec des particules arrondies, l'usure est produite préférentiellement par déplacement de matière par déformation. Lorsque la vitesse croît, l'usure a tendance à croître

III.4.2.2 Prévention

L'abrasion est une usure typique des systèmes télescopiques : tiges de vérins, broches de machines-outils, certains paliers ... Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses.

Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact et faire l'autre aussi « tendre » que possible pour qu'elle puisse « enliser » les particules abrasives. Un coussinet trop dur incrustant des corps étrangers use davantage l'arbre.

Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages, si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

L'usure des matériaux purs est à peu près inversement proportionnelle à leur dureté mais le rapport de proportionnalité varie avec leur structure. Généralement on diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante. Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs, l'écrouissage augmente la dureté et la résistance à l'usure.

Il y a 30 ans on n'utilisait que les fontes et les aciers spéciaux, avec le chrome comme élément d'alliage privilégié. Depuis, la palette s'est élargie à certaines matières plastiques et céramiques.

Pour les métaux ferreux on peut utiliser des structures martensitiques ou apporter un fort pourcentage de phases dures, carbures ou nitrures. On trouve, par ordre de résistance décroissante : fonte blanche traitée : nitruration, sulfinuz, ténifier, fonte blanche à haute teneur en chrome, aciers Hadfield (aciers austénitiques formant une couche martensitique dure par écrouissage), aciers martensitiques, aciers bainitiques.

Certains polymères résistent bien à l'abrasion, car ils absorbent beaucoup d'énergie avant de se fragmenter. Les revêtements durs sont souvent une solution. Cependant, si l'abrasif n'est pas trop dur, on peut parfois utiliser un matériau tendre protégé par des inclusions de matériau très dur.

III.4.3 L'usure par érosion

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.

Elle se manifeste sur les matériaux fragiles par des fissures, et sur les matériaux ductiles par des piqûres et des rayures, et c'est en prenant en considération l'angle d'attaque du lubrifiant.

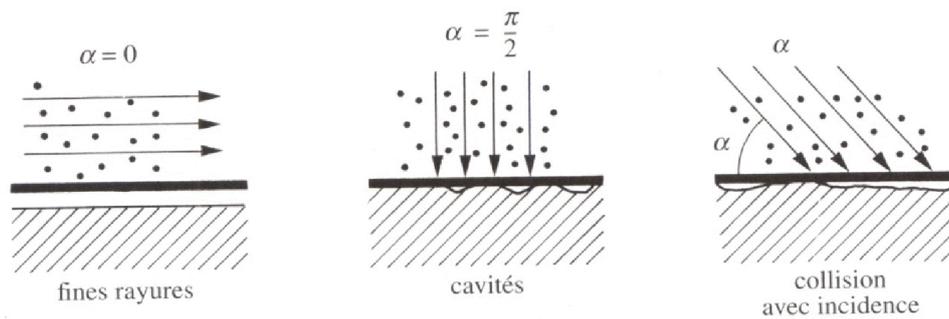


Figure III.4 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans le fluide en mouvement. [12]

III.4.3.1. Paramètre influençant l'usure érosive

Comme dans le cas de l'usure abrasive plusieurs paramètres influencent ce mode d'usure:

- La taille, le nombre, la morphologie et la vitesse des particules.
- L'angle d'impact qui définit le faciès des endommagements observés (fig. III.4). Un faible angle d'incidence favorise l'effet de coupe alors qu'une incidence normale entraîne plus de déformation. L'intensité des endommagements dépend de plus du comportement des matériaux. Les résultats montrent que l'érosion est maximale pour de faibles angles d'attaque dans le cas des matériaux à caractère ductile et qu'au contraire, elle est maximale sous incidence normale avec des matériaux fragiles.

III.4.3.2. Préventions

On peut traiter les surfaces ou les revêtir de métaux ou alliages durs mais le mieux est d'empêcher les impacts par tous les moyens possibles.

En érosion par impact comme en abrasion sous faibles contraintes, l'emploi de certaines matières plastiques ou élastomères est possible, par exemple des polyuréthanes spéciaux utilisés sous forme de revêtements.

Dans tous les autres cas c'est la dureté superficielle du matériau qui intervient : il faut opposer à l'abrasif une surface plus dure que lui et peu fragile.

III.4.4. Usure par corrosion

C'est l'enlèvement par frottement mécanique des produits de réaction formés par attaque chimique des surfaces métallique par des agents corrosifs contenus dans l'ambiance (gaz de combustion dans le cas des moteurs) ou formés dans le lubrifiant par altération : oxydation de l'huile de base hydrolyse des additifs anti-usure ou certains bases de synthèse, décomposition thermique, etc.

Dans un premier stade les surfaces sont soumises à une attaque corrosive dont la vitesse peut présenter les allures de la figure III.5 :

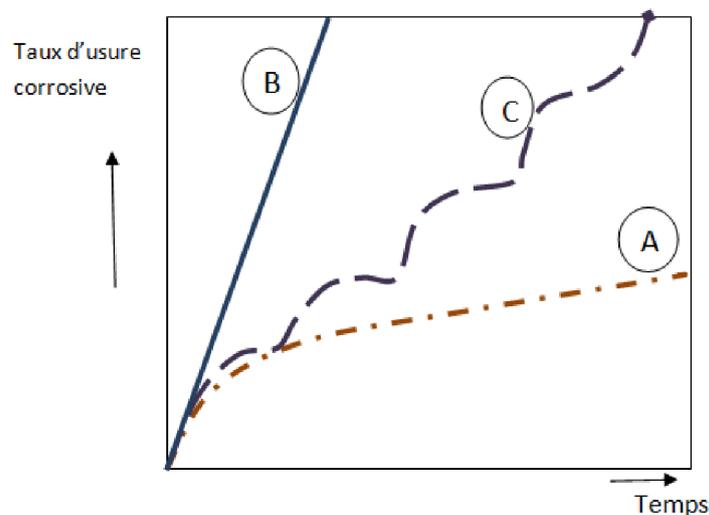


Figure .III.5 : relation d'usure corrosive- temps

- (A) Formation d'un film protecteur cohérent
- (B) Absence de film protecteur
- (C) Usure à rupture

La vitesse est initialement rapide puis diminue dans le temps avec la formation sur les surfaces d'un film cohérent plus ou moins protecteur formé selon les cas d'oxydes métalliques, de sels organique, de surfaces, phosphates, etc. (Figure.III.5 A) ;

Quelquefois, l'attaque chimique garde indéfiniment une vitesse de réaction constante (Figure.III.5 B), les produits de réaction étant alors soit des liquides ou des gaz, soit des solides poreux, fragiles ou non adhérents.

Le second stade de l'usure corrosive : consiste en l'enlèvement par frottement des produits de réaction des surfaces. Dans ce cas, les surfaces sont dénudées de sorte que l'attaque corrosive se poursuit.

Dans la plupart des cas, les produits de corrosion sont plus durs et plus fragiles que les surfaces qui leur ont donné naissance. Alors, le film formé résistera à l'usure tant qu'il sera de très faible épaisseur. Lorsqu'il atteindra une épaisseur critique, le processus d'arrachement par écaillage dû au frottement reprendra et ainsi de suite ; d'où le nom d'usure « à ruptures » donné à ce processus d'enlèvement de matière (Figure III.5 C).

III.4.4.1. Paramètres influençant l'usure corrosive

L'usure par corrosion dépend de la nature de l'agent corrosif et des conditions fonctionnelles suivantes :

- La corrosion des installations chimiques (acides), des huiles dégradées thermiquement à un fort niveau d'acidité, par la présence d'eau dans l'huile;
- La présence de rouille est un cas particulier de corrosion dû à l'O₂ s'il y a présence d'eau dans l'atmosphère.

III.4.4.2 Prévention

Il faut utiliser des matériaux appropriés au milieu, exempts de fissures et de porosités, éviter la formation de couples électrochimiques. Les additifs détergents avec réserve d'alcalinité sont intéressants, de même que les antioxydants (pour l'huile) et les anticorrosifs.

III.4.5. Usure par fatigue de contact

III.4.5.1. Généralités

Les contraintes auxquelles sont soumis les contacts conduisent selon leur intensité à plusieurs types d'endommagements. Si ces contraintes dépassent localement la limite d'élasticité des matériaux, ceux-ci se déforment plastiquement par *surcontrainte* dès l'application de l'effort, après quelques cycles de fonctionnement ou en cas de choc, ce qui conduit à ce qu'il est convenu d'appeler *l'usure par déformation*.

Cela se traduit par des empreintes sur les surfaces. Ce type d'usure est quelquefois désigné par le terme de *brinellage*.

Si le niveau des contraintes reste inférieur aux valeurs critiques de plastification, la répétition des sollicitations s'appliquant à des volumes réduits de matière peut conduire à des phénomènes de fatigue superficielle. Ceux-ci se manifestent physiquement sous forme de modifications structurales et par l'apparition de fissures s'amorçant en sous-couche ou en surface en des sites qu'il n'est pas toujours facile de

prévoir. Ces fissures aboutissent à terme à des piquûres ou écaillages qui peuvent nuire gravement au fonctionnement du système et même engager un processus divergent aboutissant à une rupture catastrophique. Les endommagements dus à la fatigue de contact peuvent être répartis en deux familles suivant leur cause principale: fatigue d'origine mécanique et fatigue d'origine thermique.

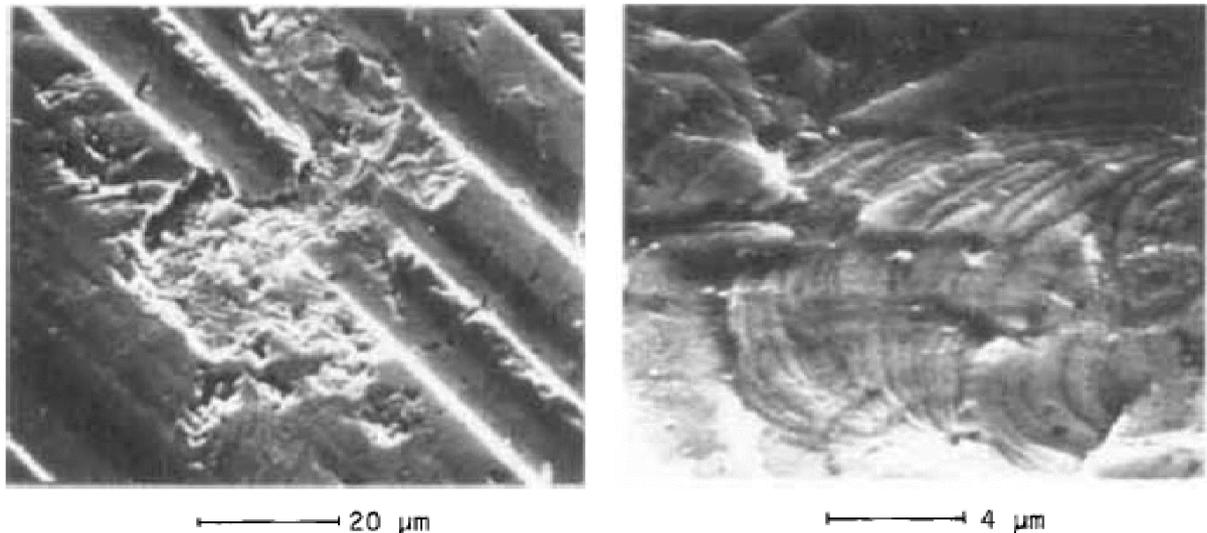


Figure III.6 : Apparence d'une surface endommagée par fatigue.

III.4.5.2. Fatigue mécanique

La fatigue mécanique est liée à l'application répétée des contraintes sur la zone de contact. On la rencontre typiquement dans les contacts de type hertzien des systèmes de transmissions d'énergie ou d'effort (engrenages, contacts cames/poussoirs...), ou de guidage (roulements, contact roue/rail...) sollicités en *roulement*, ou *roulement + glissement*. Elle peut aussi apparaître lors de l'impact répété d'une surface par des particules solides ou des fluides qui peuvent générer des contraintes plus ou moins cycliques dans les couches superficielles, ou encore, à une échelle microscopique, lors du contact répété d'aspérités sur des surfaces solides en mouvement relatif.

L'évolution de la fatigue de contact comporte plusieurs phases.

Tout d'abord, on observe une *phase d'incubation* qui se traduit par l'apparition de *transformations microstructurales*. Ce sont des modifications de la structure du matériau liées aux chargements répétés. Elles apparaissent principalement dans les alliages et les matériaux multi-phases dans lesquels les phases les moins stables auront tendance à se transformer. Ces transformations sont souvent accélérées par la présence d'inclusions dures qui provoquent des contraintes localisées.

Dans une deuxième phase apparaissent des décohésions qui se manifestent par des microfissures.

Enfin, une phase de propagation se déclenche sous l'effet des concentrations de contraintes en front de fissures. Suivant le mode de propagation, les endommagements se manifestent par du satinage, des piqûres, des fissurations à diverses profondeurs ou des écaillages.

III.4.5.3. Fatigue thermique

Certaines configurations de contact, notamment celles où le taux de glissement est important, peuvent être soumises à des flux thermiques élevés pendant des temps très courts. Les gradients thermiques qui en découlent font apparaître, même pour des chargements mécaniques faibles, un faïençage des surfaces: réseau régulier de fissures partant de la surface dont la genèse est encore mal connue. Les contraintes élevées engendrées par les dilatations et contractions thermiques locales successives sont certainement un des moteurs de cette fissuration.

III.4.5.4. Facteurs influençant la fatigue de contact :

Une situation de fatigue de contact se caractérise par l'action de plusieurs paramètres dont la connaissance plus ou moins précise permettra une meilleure maîtrise du fonctionnement et une évaluation plus ou moins fiable de la durée de vie. Ces paramètres peuvent être regroupés en deux familles, l'une liée à la conception, à la construction et au fonctionnement du mécanisme considéré, l'autre prenant en compte la réponse des matériaux aux sollicitations induites.

Les principaux facteurs de la première famille sont la géométrie du contact, son fonctionnement (intensité et application du chargement, cinématique et taux de glissement en particulier), le lubrifiant et le régime de lubrification, les états de surface, la construction générale du système du point de vue mécanique et thermique. Alliages et les matériaux multi-phasés dans lesquels les phases les moins stables auront tendance à se transformer. Ces transformations sont souvent accélérées par la présence d'inclusions dures qui provoquent des surcontraintes localisées.

Dans une deuxième phase apparaissent des décohésions qui se manifestent par des microfissures.

Enfin, une *phase de propagation* se déclenche sous l'effet des concentrations de contraintes en front de fissures. Suivant le mode de propagation, les

endommagements se manifestent par du satinage, des piqûres, des fissurations à diverses profondeurs ou des écaillages.

III.4.5.5. Prévention

Il faut avant tout diminuer les contraintes de contact par une géométrie appropriée, réduire le frottement en évitant absolument l'adhésion. On doit aussi utiliser des matériaux avec aussi peu de défauts que possible, comme les aciers dégazés ou refondus sous vide dont sont faits aujourd'hui les roulements. On choisira des traitements augmentant la dureté et engendrant des contraintes résiduelles de compression : nitruration, cémentation, trempes superficielles, par exemple. La profondeur traitée doit dépasser le point de plus fort cisaillement, sinon le remède peut être pire que le mal

III.5. Mécanismes d'usure des polymères

L'usure est plus complexe que pour les métaux en raison d'une plus grande sensibilité à la température et de la nature spécifique des matériaux, dont la structure cristalline dépend entre autres des appareils de moulage. Après 10^7 cycles les poids moléculaires des couches de surface diminuent jusqu'à 30 %, parfois la destruction du matériau forme une sorte de matière grasseuse. La structure semble d'abord se réorganiser lors du frottement, puis elle se détruit.

L'interaction avec les métaux mérite une attention particulière. La dissolution de ces derniers peut être sélective : ainsi, le laiton frottant contre le polyéthylène s'enrichit superficiellement en cuivre par suite de la dissolution du zinc. L'enlèvement du métal peut former de véritables excroissances sur le polymère, ce que l'on rencontre fréquemment dans les engrenages à contact mixte.

Si les produits de destruction du polymère sont des matières actives, le métal est fragilisé et l'usure s'accroît. Cet effet a été particulièrement étudié par le chercheur soviétique P.A. Reh binder. Le coefficient de frottement dépend alors beaucoup du temps de maintien en contact et l'adhésion augmente lors des arrêts répétés.

III.6. Paramètres tribologiques :

III.6.1. Taux d'usure :

Selon la norme DIN EN 50321, l'usure peut être caractérisée par n'importe quel changement de longueur, volume ou masse et être normalisée selon les conditions de sollicitation, de vie ou de débit.

Et la norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure comme « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance » [15].

Le taux d'usure k_v (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard [9], on suppose que la perte de volume V est proportionnelle à la charge normale F_N et à la distance de glissement d parcourue. Formule III.1

$$V = K_v * F_N * d \quad (\text{III. 1})$$

V : la perte de volume (g).

d : la distance de glissement (m).

F_N : la charge normal (N).

K_v : le taux d'usure $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$.

Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de perte de matière après le rodage initial et avant l'apparition d'un mécanisme secondaire comme par exemple la fatigue, qui dépend fortement de l'état de surfaces des pièces usinées.

Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème .

Pour une application industrielle, l'usure et, juste après, le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques, et la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important.

Le taux d'usure volumétrique k_v s'exprime le plus souvent en $[\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})]$.

III.6.2. Valeur du produit $p v$

La pression de contact et la vitesse de glissement sont les deux paramètres clefs de la sollicitation des matériaux dans un tribosystème. Elles interviennent de diverses manières, et d'abord de manière globale.

- En effet, les valeurs du produit $p\nu$ sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur $p\nu$ en MPa · m/s est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème/contact. Selon les configurations, la pression est la pression hertzienne de contact (contact non conforme, bille/plan par exemple) ou la pression apparente (contact conforme, plan/plan par exemple).

- La valeur $p\nu$ multipliée par le coefficient de frottement : $p\nu \mu$ (W/mm²), détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (*énergie de frottement*) sur l'aire apparente de contact.

Cette énergie est évacuée principalement par conduction thermique, uniformément dans les deux corps, une faible partie étant véhiculée par le lubrifiant. Elle correspond à la puissance thermique générée par frottement et la température de volume des pièces en est une fonction croissante.

L'effet de la pression et de la vitesse ne dépend pas que de la valeur de leur produit : quand l'une de ces grandeurs dépasse une valeur limite, il peut y avoir transition d'un mode d'usure douce (k_V faible) à un mode d'usure sévère (k_V élevé) car les matériaux ou le lubrifiant ne peuvent plus supporter les sollicitations thermiques ou mécaniques et « répondent » par un changement de mécanisme d'usure qui peut aller jusqu'au grippage :

- La pression de contact détermine directement la sollicitation mécanique de la pièce (effet de plastification locale, fatigue...) et de ses couches superficielles (rupture des films superficiels...) : avec le coefficient de frottement, elle détermine les contraintes de traction arrière qui peuvent provoquer la fissuration des couches superficielles fragiles.

- La vitesse de glissement est le facteur le plus influent sur les températures éclair, (*flash temperature*) c'est-à-dire les températures transitoires, mais très élevées sur les aires réelles de contact, où les deux corps ne sont séparés que par des films très minces, comme en frottement sec ou en régime mixte [15].

L'élévation locale de la température de contact est susceptible de modifier la nature et les propriétés des surfaces (transitions de phase, ramollissement excessif, fusion... !) ainsi que la rhéologie de l'interface et surtout du lubrifiant liquide, et la réactivité chimique des pièces et du lubrifiant (oxydation...).

Les températures éclair des surfaces sont peu prises en compte, car difficiles à calculer par manque de données sur les grandeurs thermophysiques, et leur évolution avec la température T , et sur la microgéométrie des aspérités des pièces. Elles ont toutefois une forte influence en frottement sec où l'augmentation de la vitesse amène la température de surface des pièces à des valeurs proches de la température de fusion ou de transition vitreuse du matériau (polymère).

Les domaines d'usure (douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans le plan (p, v) (figure III.7) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit $p v$ à prendre en considération :

- Les matériaux présentés dans la figure III.7 possèdent tous un domaine de faible taux d'usure, mais pour des valeurs de p et v sensiblement différentes ;
- En dehors de ce domaine, le taux d'usure dépend fortement de la valeur du produit $p v$ et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine.

III.6.3. Densité d'énergie de frottement

Le modèle initialement développé par Fleischer utilise des formules simples. La perte énergétique $E f$ due au frottement s'écrit :

$$E f = \mu F_N d \quad (\text{III.2})$$

Avec μ coefficient de frottement de Coulomb.

Le produit μF_N représente la force de frottement. La grande similitude entre la formule (III.1) (expression de l'usure) et la formule (III.2) (expression de l'énergie de frottement) est évidente ; elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre de densité d'énergie de frottement apparente ef et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement Formule (III.3).

$$ef = \frac{E f}{V} = \frac{\mu}{k_v} \quad (\text{III.3})$$

La densité d'énergie de frottement apparente ef correspond au potentiel d'énergie total contenu dans un tribosystème.

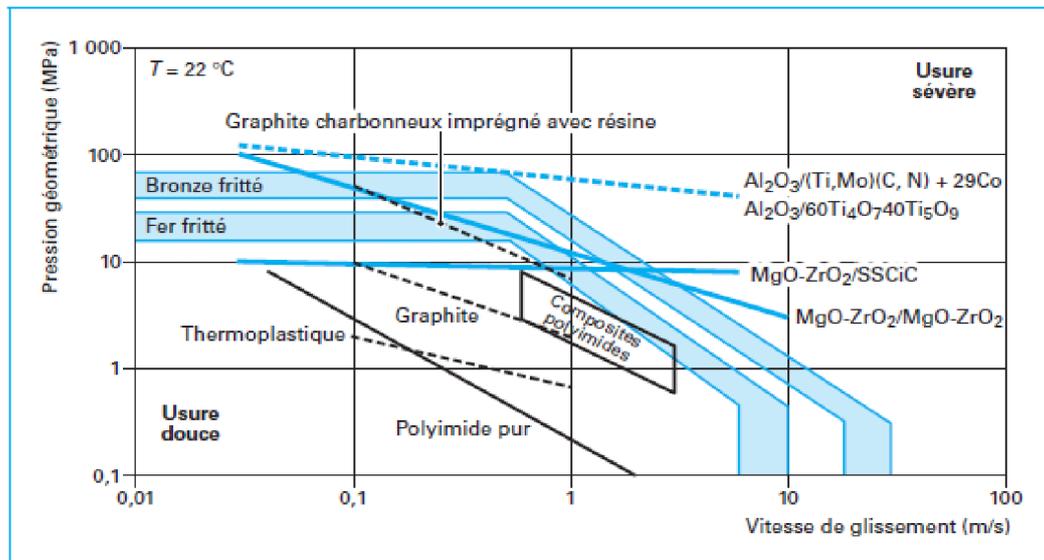


Figure III.7 : Graphe « pression en fonction de la vitesse de glissement »[15]

La (figure III .7) présente la limite de la vitesse de frottement et la pression de contact pour différents matériaux en frottement sec et à la température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés).

III.7. Conclusion

Il est clair que le phénomène d'usure des pièces mécanique frottantes dépend de plusieurs paramètres tels que la charge, la vitesse de glissement, l'état des surfaces en contact, la répartition des pressions, le milieu de fonctionnement... Ces paramètres ont fait l'objet de plusieurs études expérimentales mais le problème reste entier à ce jour.

IV.1. Introduction

La défaillance des pièces mécaniques en service est une cause de réduction de productivité. Elle a pour origine le frottement et l'usure de surfaces en mouvement. Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques qui permettent d'obtenir une caractérisation du frottement et de l'usure. Parmi ces méthodes d'essais, nous avons utilisé celle du dispositif pion-disque qui est disponible au sein du hall technologique à Oued - Aissi. Le présent travail, nous est l'étude de l'influence de la vitesse de glissement et de l'effort normal de contact sur le comportement tribologique du couple acier XC48 traité et le polymère époxy bisphénol A (chargé ou non de poudre de graphite). Dans ce chapitre, nous présentons les étapes suivies pour l'élaboration des échantillons et décrivons les moyens expérimentaux utilisés tels que le tribomètre, la chaîne d'acquisition et le capteur. Les résultats obtenus sont traités et présentés sous forme de graphiques à la fin de ce chapitre.

IV.2. La procédure expérimentale

IV.2.1. Dispositif expérimental

Afin d'étudier les propriétés tribologiques du couple acier (XC48/époxy bisphénol A), les essais ont été effectués sur un tribomètre (pion/disque). Le banc d'essai (Figure IV.1) a été conçu et réalisé à l'université MOULOUD MAMMERI par des étudiants dans le cadre de leur projet de fin d'étude, en utilisant la méthode de l'analyse de valeur en 2006, suivie de sa réalisation en 2007.

Ce dispositif permet d'étudier l'usure et le frottement des matériaux. A partir des efforts normaux et tangentiels mesurés, nous déterminons le coefficient de frottement et le taux d'usure pour les couples matériaux étudiés. Le dépouillement des résultats des mesures est fait par le biais du tableur Excel.

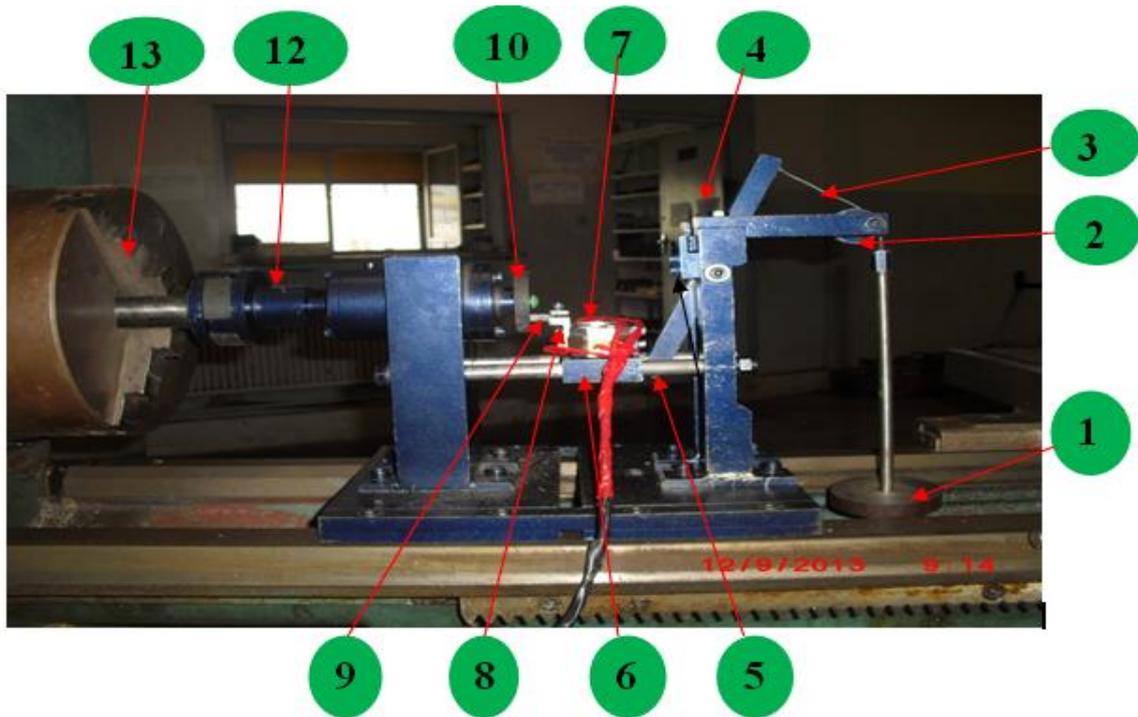


Figure IV.1: Photographie du tribomètre pion-disque.

IV.2.2. Nomenclature du banc

1-masses, 2-poulie, 3-câble, 4-levier, 5-roue, 6-support du capteur, 7-capteur, 8-support du pion, 9- pion, 10-disque, 11-glissière, 12-broche, 13- mandrin

IV.2.3. Principe de fonctionnement

La force normale est appliquée grâce à des masses (1) montées sur la tige qu'on accroche au câble (3), enroulé sur la poulie (2) et fixé à l'extrémité du levier (4) pivotant sur un axe en son milieu. Ce levier transmet l'effort normal au support du capteur (5), guidé par deux glissières (11), le support transmet à son tour l'effort au capteur (7) qui le transmet ensuite au pion (9). Le contact du pion avec le disque est maintenu et contrôlé par la force normale F_N . De l'autre côté, le disque (10) est fixé au bout de la broche (12) par le mandrin du tour grâce à un accouplement élastique. La force tangentielle F_T induite par le contact (pion- disque) et l'effort normal F_N sont mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (14), qui est relié à une chaîne d'acquisition de données qui traite et enregistre-les données.

IV.3. Les conditions d'essais

- l'équipement utilisé (géométrie des contacts)
- les dimensions du pion et de l'échantillon
- le couple de matériaux en contact
- les traitements de surfaces
- l'état des surfaces
- la force normale appliquée F_N
- la pression normale apparente (hertzienne) P
- la distance de glissement d
- la durée t (ou nombre de cycles, fréquence)
- la vitesse v
- la température ambiante ou de l'essai T
- l'humidité relative RH % (l'atmosphère)
- la lubrification
- le nombre de tests

IV.4. Description du capteur de force

Pour mesurer les deux forces normale et tangentielle dues aux frottements, simultanément et sans interférence, nous nous sommes inspirés du capteur utilisé par une entreprise américaine pour mesurer les efforts d'un outil de coupe.

Le détail de montage des jauges de déformation sur l'élément capteur (7) est représenté sur la Figure IV.2.

Les jauges J1, J2, J3 et J4 arrangées en pont complet de Wheatstone permettent de mesurer l'effort normal et les jauges J5, J6, J7 et J8 arrangées aussi en pont complet de Wheatstone permettent de mesurer l'effort tangential. La compensation en température des deux ponts est donc ainsi assurée, la variation des résistances des jauges sous l'effet de la température s'annule directement dans le circuit du pont. Le signal de sortie du pont représentera donc l'effort appliqué sur le pion.

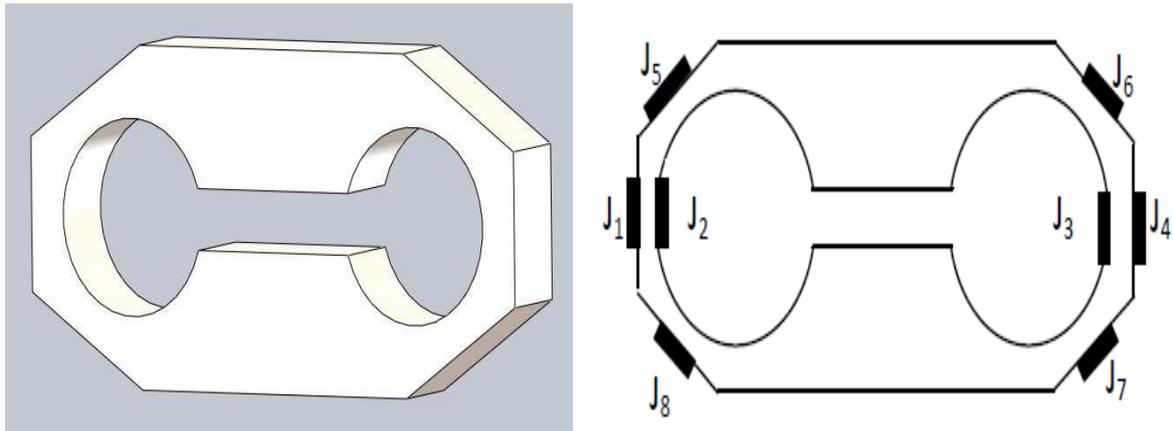


Figure IV.2 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges.

IV.5. Chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition numérique est décrite par la figure suivante :

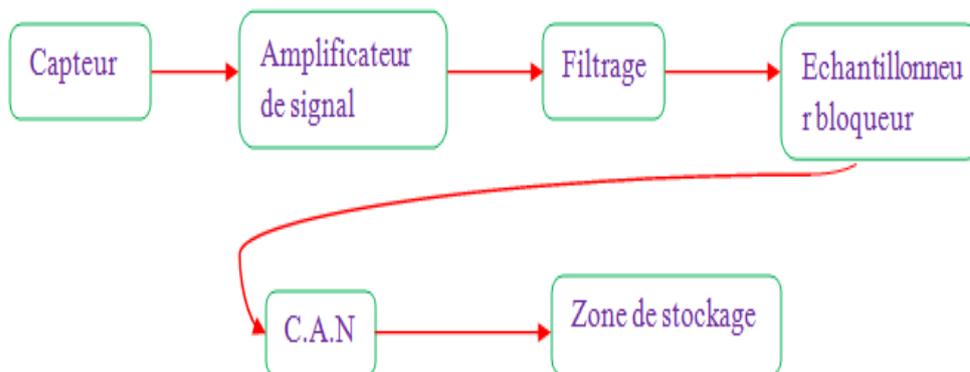


Figure IV.3 : Chaîne d'acquisition.

- Amplificateur du signal : cette étape permet d'adapter le niveau du signal issu du capteur à la chaîne globale d'acquisition.
- Filtre d'entrée : ce filtre est communément appelé filtre anti-repliement. Il élimine les parasites. C'est un filtre passe-bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.
- L'échantillonneur bloquant : son rôle est de prélever à chaque période d'échantillonnage (T_e) la valeur du signal. On l'associe de manière quasi-systématique à un bloquant. Le bloquant va figer l'échantillon pendant le temps nécessaire à la conversion. Ainsi, dans la phase de numérisation, la valeur de la tension de l'échantillon reste constante, assurant une conversion aussi juste que possible.
- Le convertisseur analogique numérique (CAN) : il transforme la tension de l'échantillon (analogique) en un code binaire (numérique). La zone de stockage : elle peut être un support de traitement (ordinateur), un élément de sauvegarde (RAM, disque dur).
- La chaîne d'acquisition utilisée dans notre étude est de type **CONTROLS** (figure IV.3), ses caractéristiques sont les suivantes : Un clavier de 16 touches. Un port série RS232 pour la communication des données à une unité de traitement et de stockage.
- Un Port série RS484/CAN. Huit canaux indépendants possédant chacun six connecteurs femelles, pour la connexion du transducteur et délivrant une tension d'alimentation de 2V.
- À l'aide de deux connecteurs, on branche les deux ponts du capteur aux deux canaux. On procède à l'étalonnage du capteur, et on connecte la chaîne à un ordinateur pour enregistrer et traiter les données en utilisant une connexion hyperterminale.

❖ Procédure

Après étalonnage du capteur, la chaîne d'acquisition est connectée à un ordinateur pour pouvoir enregistrer et traiter les données en utilisant une connexion hyperterminale. Après avoir mis tout en œuvre, nous pouvons démarrer les expériences.

IV.6. Identification des matériaux utilisés

IV.6.1. Matériau des disques

Nous avons utilisé l'acier XC48 qui est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone), du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore, (Norme NFA356554) . Il est largement utilisé dans la fabrication des bielles, essieux, tiges de piston, vilebrequins, arbres moyeux, galets des ponts roulants, ...etc. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques.

IV.6.2. Matériaux des pions

Le matériau de base utilisé est la résine époxy LORN CHEMICAL. C'est un polymère constitué de deux composants. Une résine époxy bisphénol A et un durcisseur spécifique apportant au système une très haute adhérence et un faible jaunissement.

La réaction de durcissement dépend de la réactivité de la résine, de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.), de la nature et du dosage du système catalytique.

Les polymères époxyde (couramment nommés « Epoxy ») peuvent être utilisés sous forme de vernis, mais aussi de peintures en ajoutant des colorants ou de pigments, utilisés pour les avantages qu'ils détiennent :

- ✓ Aspect lisse et brillant.
- ✓ Anti poussière, facile à nettoyer.
- ✓ Bonnes résistances mécaniques et chimiques
- ✓ Imperméable.

De plus leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques bien peuvent être ajustées par l'adjonction de charges, notamment de Silice, de Quartz, de Graphite ou de poudre métallique. Enfin, les durcisseurs servant à la polymérisation des polymères, sont de grande importance, ils déterminent comment et dans quelle application le produit fini sera le mieux utilisé.

Pour nos expériences, nous avons utilisé la résine époxy LORN CHIMICAL, que nous polymérisons grâce à un agent de réticulation (durcisseur). Les fractions massiques sont de 65% pour la résine et 35% durcisseur.

Les pesées sont faites à l'aide d'une balance électronique de capacité de 100g représentée à la Figure IV.4.



Figure IV.4 : Balance électronique.

Les propriétés physiques de la résine et du durcisseur sont dans le tableau IV.1 :

Propriétés	Résine	Durcisseur
Masse volumique à 23° (g/cm ³)	1.5	1.01
Viscosité à 23°	2000	800
Rapport d'emploi en poids(%)	65	35

Tableau IV.1 : Propriétés physiques de la résine et du durcisseur. [16]

IV.7. Présentation des couples tribologiques

IV.7.1. Les disques

Le disque est un plateau de forme cylindrique (figure IV.5), de diamètre 60 mm et d'une épaisseur de 10mm, il possède un trou au centre de diamètre 8mm qui permet la fixation du disque au bout d'arbre de broche du tribomètre à l'aide d'une vis.

Les disques ont été réalisés en tournage à partir des barres rondes laminées à chaud et recuites en XC48 avec les mêmes paramètres d'usinage, leur dureté est HB198.1. Selon la norme ASTM, la composition chimique es de (0.43% à 0.5% de carbone, 0.6% à 0.9% en manganèse, 0.04% en phosphore, et 0.05% de soufre).

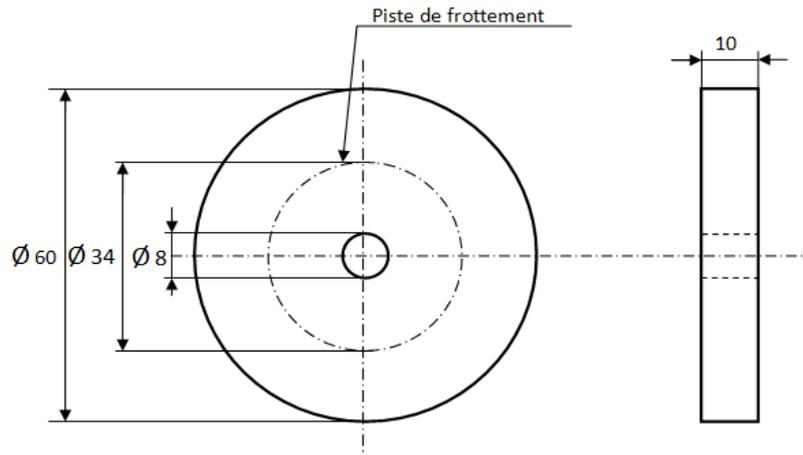


Figure IV.5 : Géométrie du disque.

IV.7.2. Les pions

Les pions (Figure IV.6) sont obtenus à partir d'une découpe des plaques en époxyde (chargées ou pas en poudre de graphite). Les plaques sont obtenues par moulage dans des moules en verre. Nous avons préparé trois mélanges. Résine + durcisseur pour le mélange à 0% de graphite et résine + durcisseur + 1 ou 2% de graphite les mélanges chargés.

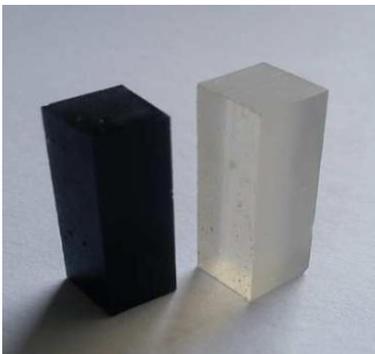


Figure IV.6: géométrie des pions

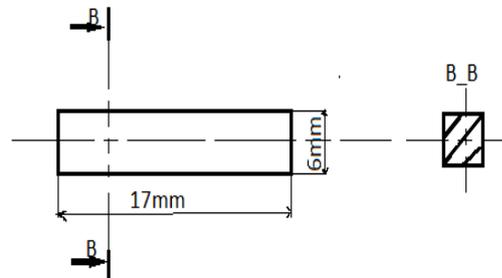


Figure IV.7: Dimensions des pions

Les mélanges sont ensuite homogénéisés, et versés dans des moules en verre que nous avons préalablement préparés. Ces moules ont les mêmes dimensions intérieures que celles des plaques ($100 \times 100 \times 6 \text{ mm}^3$), comme le montre la figure IV.8.

La polymérisation s'est faite à l'air libre (température ambiante), pendant 24 heures.

Après polymérisation, nous avons démoulé les plaques (Figure IV.9), et avons procédé à la découpe des plaques en pions parallélépipédiques aux dimensions voulues à l'aide d'une scie à métaux et d'un étau Figure IV.10.

La préparation des pions se termine par un polissage qui va nous permettre d'obtenir les dimensions voulues (figure IV.7) et un bon état de surface.

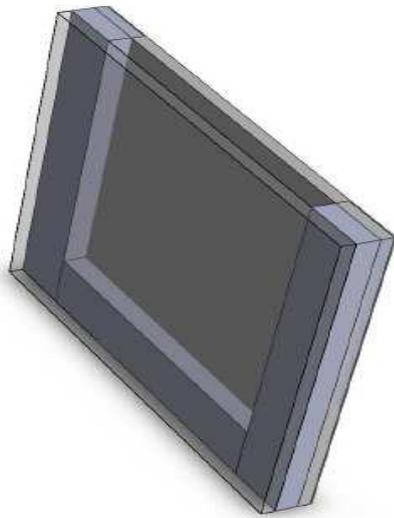


Fig. IV.8: forme du moule utilisé

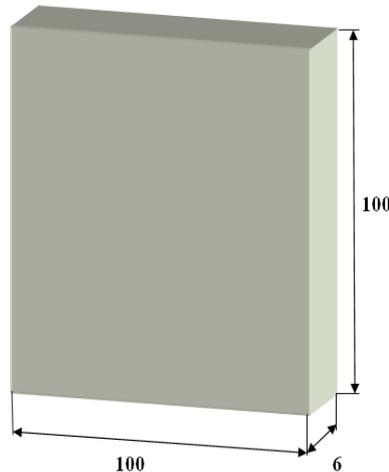


Fig. IV.9 : plaques obtenues



Fig. IV.10 : représente un étau

IV.8. Traitement thermique

IV.8.1. Introduction

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Il comporte par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement. [17]

D'une façon générale, les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique de l'alliage, mais ils permettent d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite d'élasticité σ_r , σ_e , en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure.
- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure), cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).
- De très nombreux alliages métalliques peuvent subir des traitements thermiques, les aciers représentent le domaine d'application le plus vaste.

Les deux buts essentiels des traitements et revêtements de surface sont la **lutte contre le frottement** et la **limitation de l'usure**.

IV.8.2. Cycle d'un traitement thermique

Le traitement thermique est réalisé conformément au cycle de la Figure IV.11.

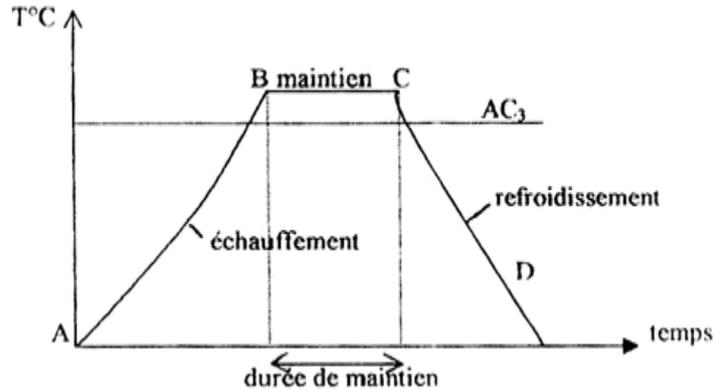


Figure IV.11: Cycle d'un traitement thermique. [17]

- AB : Chauffage à une température supérieure à la température de transformation AC₃.
- BC : Maintien à cette température.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

IV.8.3. Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité.

IV.8.4. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques

L'appareil de chauffage doit permettre :

- D'atteindre et de maintenir toutes les parties de la pièce à une température.
- D'éviter une dénaturation du métal et principalement une décarburation dans le cas des aciers.
- De présenter des possibilités de préchauffage lorsque la température à atteindre est élevée.

En général seul le chauffage dans une enceinte fermée possédant une régulation automatique de température est susceptible d'offrir la solution cherchée.

IV.8.5. Traitement thermique des disques

Le traitement thermique été réalisé au laboratoire de science des matériaux du département de génie mécanique.

IV.8.6. La trempe

Nous avons fait subir une trempe à nos disques, son rôle est généralement de permettre d'obtenir des structures hors équilibre dans les conditions où nous les rencontrons, à l'échelle aussi bien cristalline que micrographique.

La trempe est utilisée pour augmenter la dureté, la résistance à la rupture mais diminue la résilience et l'allongement.

IV.8.7. Procédure

Nous avons installé les échantillons sur des tiges filetées et nous les avons mis dans un four électrique (figure IV.12) de puissance 11 kW dont la température maximale est 1200°C. Le processus de la trempe est comme suit :

- Chauffage lent (≈ 400 °C), puis rapide avec une vitesse de chauffage ($5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) à une température d'austénitisation en fonction du pourcentage de carbone. Dans notre cas nous avons chauffé les échantillons à une température de 850°
- Maintien à cette température pendant une heure et trente minutes (1h30 min) pour permettre la dissolution des carbures.
- Refroidissement rapide dans l'eau froide.



Figure IV.12 : Photo du four électrique.

IV.9. Polissage des disques

IV.9.1. Introduction

Le Polissage nous a permis d'obtenir des états de surfaces de haute qualité (très lisse).

Les pièces sont soumises à une action mécanique en milieu abrasif. En fonction de leurs dimensions, de leurs formes et de leur degré de rugosité, elles sont traitées par lots de plus ou moins grandes importances.

Un résultat optimal nécessite des pièces nettoyées, exemptes de copeaux et de traces de dépôts de tous genres. La qualité finale dépend directement de l'état de surface des pièces usinées et de leur dureté. Plus les pièces sont moins dures, meilleurs sont les résultats. De ce fait, les aciers trempés sont polis avant l'opération de "revenu». [18]

IV.9.2. Avantages du polissage

- une qualité très élevée des états de surfaces.
- l'aptitude à atteindre les zones les moins accessibles.
- l'uniformité de la couche de matière enlevée.
- une meilleure résistance à la corrosion

IV.9.3. Mode opératoire

Le polissage des disques et des pions est réalisé à l'aide de la polisseuse (Figure IV.13). Nous avons utilisé des papiers abrasifs de différentes granulométries, de plus rugueux au moins rugueux (80, 120, 400, 800, 1000) pour éliminer le maximum de stries sur les différentes faces. Nous terminons le polissage par une opération de finition au feutre imbibé d'une solution d'abrasif à base d'alumine diluée dans l'eau.



Figure IV.13 : Polisseuse du laboratoire SDM.

IV.10. Examen métallographique

IV.10.1. Introduction

L'examen métallographique a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallurgiques (métaux purs, combinaisons, solutions solides, eutectiques et eutectoïdes) de la structure de l'échantillon.

IV.10.2. Déroulement des tests

La première opération consiste à polir la surface que nous voulons observer pour la rendre aussi plane que possible en utilisant des papiers abrasifs de plus en plus fins. Nous ne cessons d'utiliser l'un d'eux que lorsque les stries provenant du papier précédent ont disparu. La pièce est ensuite lavée de façon à ne laisser aucune trace. Il faut obtenir une surface polie analogue à celle d'un miroir.

L'échantillon poli est par la suite observé au microscope afin de nous rendre compte du fini du polissage.

La deuxième opération est l'attaque chimique des échantillons. Elle se fait à l'aide de réactifs appropriés qui permettent de différencier les constituants. Le réactif chimique utilisé pour nos échantillons est le Nital qui est une solution composée de l'acide nitrique dans l'alcool éthylique (4ml d'acide nitrique avec 100 ml d'éthanol). Nous injectons la solution sur la surface polie, avec un temps de maintien de 2 à 5 seconds suivi d'une opération de nettoyage à l'eau et d'un séchage par flux d'air sur la surface traitée.

L'examen micrographique se fait à l'aide d'un microscope métallographique de type « OLYMPUS PME3 », équipé d'un système de prise de photos, qui permet l'observation des échantillons, avec un grossissement pouvant atteindre 400 fois. Nous avons pris des micrographies des échantillons avant et après les traitements thermiques .

IV.10.3. Microscopie Optique

L'observation métallographique sur les surfaces préparées des échantillons a été réalisée à l'aide d'un microscope optique.

L'échantillon est posé sur la platine qui peut se déplacer dans trois directions. La lumière fournie par la lampe est transmise horizontalement sur le prisme qui la réfléchit verticalement. Le faisceau de lumière est focalisé sur l'échantillon par la lentille de l'objectif.

La lumière est réfléchiée par la surface du métal à analyser et transmise vers le haut à partir des mêmes lentilles et tombe sur un miroir semi transparent qui la renvoie par la suite sur la lentille oculaire. De cette façon, l'image agrandie peut être visualisée. La (figure IV.14) illustre le microscope optique utilisé dans notre travail.

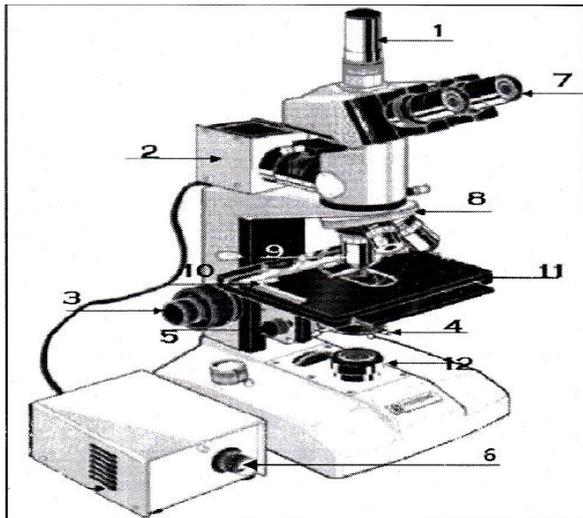
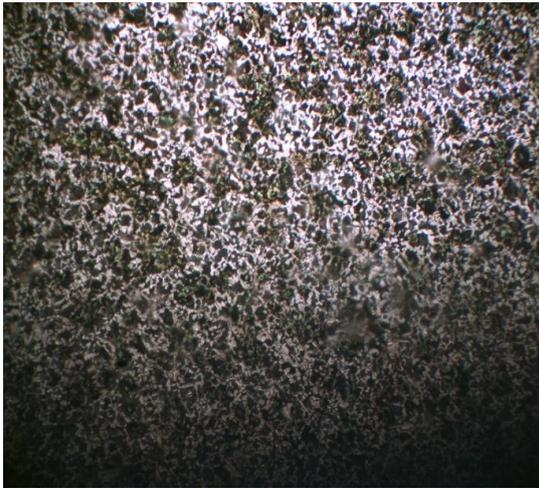
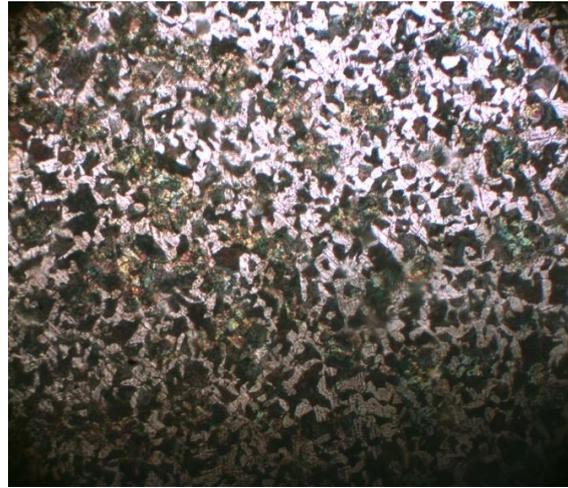
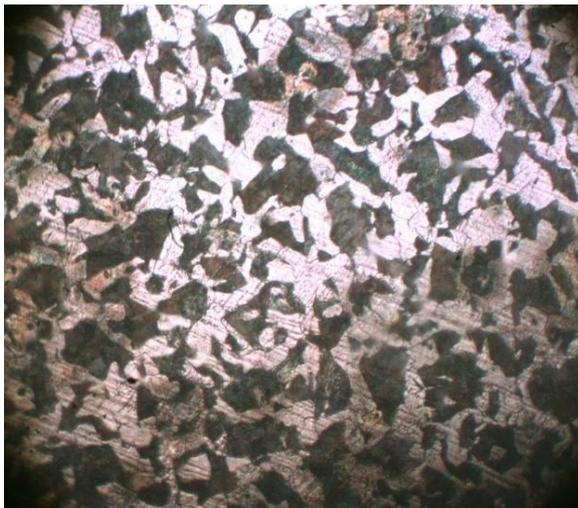
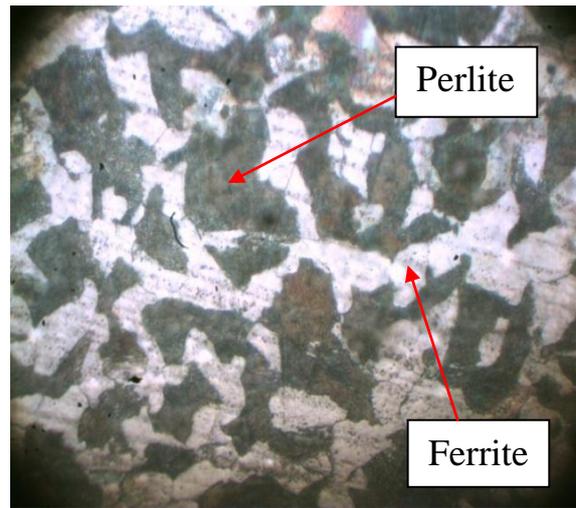
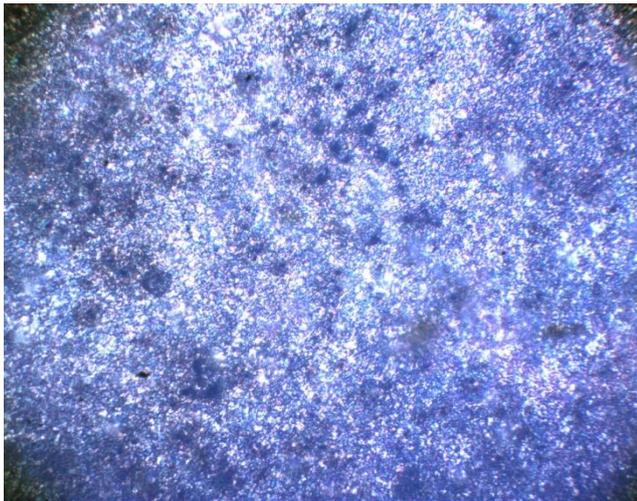
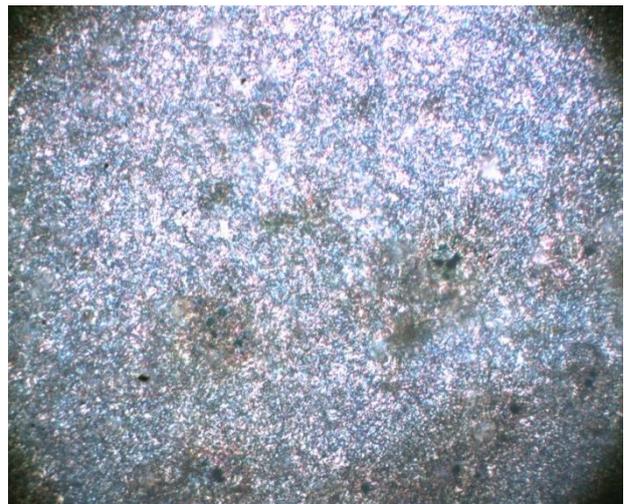


Figure IV.14: Microscope Optique (MO). [19]

- 01** Emplacement de la camera
- 02** Bouton pour déplacement transversal d l'échantillon
- 03** Bouton de mise au point de l'image
- 04** Bouton pour déplacement longitudinal de l'échantillon
- 05** Lampe pour observation par réflexion
- 06** Potentiomètre de réglage de l'intensité de lumière
- 07** Oculaires avec des agrandissements de 10 fois
- 08** Porte objectifs
- 09** Objectifs de grandissements
- 10** Porte échantillon
- 11** Platine
- 12** Lampe pour utilisation de transmission

IV.10.4. Observation microscopique de l'acier XC48 avant traitement thermique :**Grossissement x40****Grossissement x100****Grossissement x200****Grossissement x400****Figure. IV.15** Micrographie de l'acier XC48 avant le traitement thermique.

La figure IV.15 représente la micrographie de l'acier XC48 à l'état recuit (recuit de normalisation) prise au grossissement 40, 100, 200. Cette micrographie montre une phase perlitique de couleur sombre noyée dans une phase ferritique de couleur blanche. La phase perlitique est plus abondante que la phase ferritique.

IV.10 .5. Observation microscopique de l'acier XC48 après traitement thermique**Grossissement x40****Grossissement x100****Grossissement x200****Figure IV.16** : Micrographie de l'acier XC48 après traitement thermique.

Après la comparaison des micrographies de l'acier à ses deux états (avant et après la trempe) Figure IV.15 et IV.16, nous observons bien avant la trempe, l'apparition de deux phases distinctes la ferrite en couleur blanche et la perlite en couleur noire. Après la trempe la phase perlitique s'est installée dans la ferrite, ce qui est expliqué par installation des atomes contenant le carbone dans les matrices du fer, créant des contraintes dans ces dernières, et obtient un durcissement.

IV.11. Essai de dureté

IV.11.1. Introduction

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration : un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé.

IV.11.2. Essai BRINELL

IV.11.2.1. Le principe

Dans l'essai de dureté Brinell, le pénétrateur est une bille polie en acier trempé ou en carbure de tungstène. Son diamètre D vaut normalement 10 mm, mais aussi 5 mm, 2,5 mm et 1 mm. Elle est appliquée sur le métal avec une charge F (normalement 3000 kgf). Après suppression de la charge, elle laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d , d'autant plus grand que la bille a pénétré plus profondément dans le métal, donc que celui-ci est moins dur (Figure IV.16).

Pour éviter la déformation de la pièce, son épaisseur doit être d'au moins huit fois la profondeur de l'empreinte pour éviter aucune déformation visible sur la face opposée.

IV.11.2.2 Déroulement des essais

La pratique de la dureté nécessite une préparation des échantillons sur la face qui fait l'objet de l'essai. Cette préparation consiste tout d'abord à faire un polissage pour la pièce à tester. Les mesures de la dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide des d'uromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC ». On mesure le diamètre d avec un agrandissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli, cet d'uromètre est alimenté par une tension de 220V et une fréquence de 50Hz. (Figure IV.17)

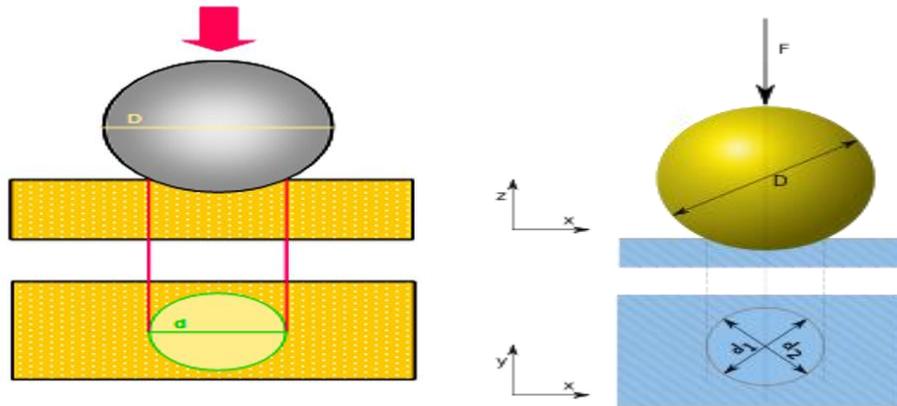


Figure IV.17 : Principe de l'essai de dureté BRINELL. [20]

La dureté Brinell ou nombre de Brinell est notée HB ou BH,

La dureté Brinell s'exprime par le rapport de la charge F à la surface S de la calotte sphérique imprimée dans le matériau :

$$HB = F/S$$

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

Avec :

S : la surface de la calotte sphérique

F : la charge appliquée (60N pour les échantillons non trempés et 100N pour les échantillons trempés.)

D : diamètre de la bille

d : diamètre de l'empreinte.



Figure V.18 : Duromètre de type « WOPERT DIA TESTOR RC »

Nous avons réalisé les essais de dureté BRINELL (HB) pour des échantillons de l'acier XC48 avant et après la trempé. Nous avons effectué trois mesures de dureté pour chaque état (avant et après), et calculé la valeur moyenne.

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux ci- dessous :

Essais	1	2	3	Moyenne
Avant la trempe	209	189.46	177.8	198.1 Mpa
Après la trempe	465.98	448.34	483.65	466 Mpa

Tableau IV.2 : Résultats des essais de dureté Brinell (HB) de l'acier XC48 à différents états

Nous constatons bien la différence significative de la dureté pour les deux états (recuit et trempé) dus aux avantages de traitement thermique (Augmentation de la dureté).

IV.12. La microdureté

IV.12.1. introduction

Cette méthode permet de se libérer de la dispersion et de l'imprécision des déterminations des duretés des matériaux rencontrés avec les mesures classiques de dureté.

Elle a le même principe de la méthode statique, mais avec une charge appliquée à l'indenteur inférieur à (1kg), et la taille de l'empreinte laissée par la pointe sur la surface peut varier de quelques centaines de micromètres. Elle permet de résoudre de nombreux problèmes tels que: la mesure de la dureté des couches minces, évaluation de l'érouissage local, exploration d'alliages à phases multiples, etc. [21].

Pour les matériaux polymères nous avons effectué des essais KNOOP (HK0.01). Il emploie un pénétrateur de diamant pyramidal à base rhombique dont la géométrie est montrée à la Figure IV.19.

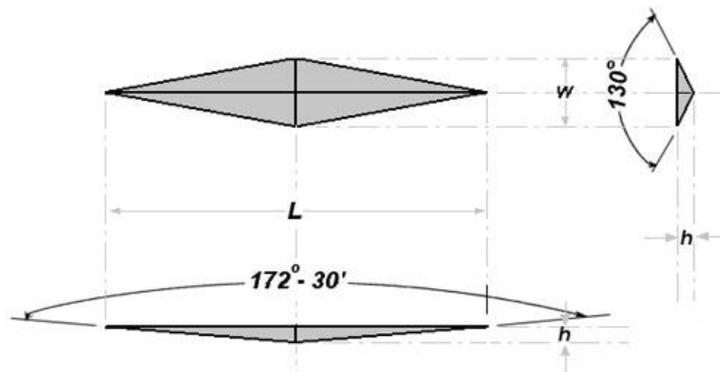


Figure IV.19: schéma d'une empreinte avec un pénétrateur KNOOP.

IV.12.2. Essai de dureté Knoop

Dans l'essai Knoop, le pénétrateur est en diamant de forme géométrique pyramidal à base losange, dont les diagonales sont sensiblement dans le rapport de 7 à 1. L'angle au sommet dans le sens de la grande diagonale est de $172^{\circ} 30'$ et l'angle transversal est de 130° (figure IV.20).

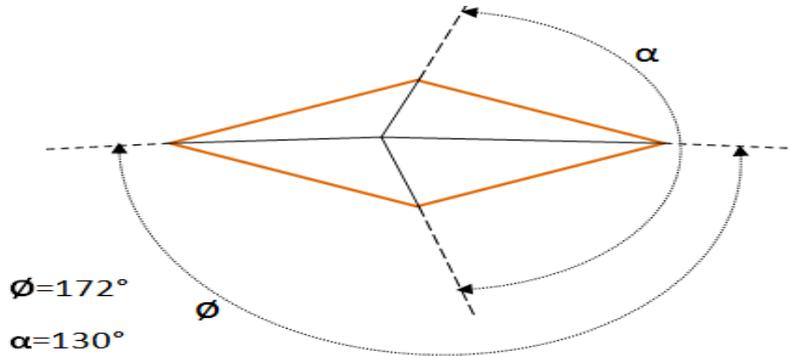


Figure IV.20 Pyramide à base losange. [21]

L'avantage du pénétrateur Knoop est de donner une empreinte suffisamment grande pour une très faible charge, en sollicitant donc un volume très réduit de matière.

La dureté Knoop HK s'exprime par le rapport de la charge appliquée F à la surface projetée A de l'empreinte :

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{F}{Cl^2} = \frac{F}{0.07028 l^2} = 14.23 \frac{F}{l^2}$$

F (N) : La charge appliquée au pénétrateur.

A (mm^2) : la surface de l'empreinte.

l (mm) : Longueur de la plus grande diagonale imprimée.

C : Rapport constant de l à la surface projetée. $C = 7,028 \cdot 10^{-2}$. Echantillon polyphasé ou celle d'un échantillon très fragile et mince.

❖ Des phénomènes influençant les mesures des microduretés nécessitent certaines précautions opératoires tels que :

-L'empreinte doit être suffisamment nette pour permettre une lecture précise, ce qui exige un bon état de surface de la pièce testée.

-La légère croissance de dureté jusqu'à la charge de 1kg, montre la nécessité de spécifier la charge sous laquelle la mesure a été fait pour obtenir des résultats comparables.

-Prendre en considération la charge maximale à appliquer de manière que la dureté du métal support n'intervienne pas dans les mesures.

IV.12.3. Mesure de la microdureté

Pour les tests de microdureté, nous prenons les échantillons des mêmes plaques que celles qui ont servi à la réalisation des pions. Ils ont une forme parallélépipédique, avec des facettes parallèles et bien polies. Les essais consistent à appliquer une force de 0.01 Kgf avec un pénétrateur de forme pyramidale (Figure IV.20), et ce pendant 20 seconds. La décharge est automatique. Le pénétrateur laisse une empreinte de forme losange allongé.

L'empreinte qui en résulte est mesurée à l'aide d'un microscope hautement performant en combinaison avec un oculaire micrométrique filaire, ou, depuis plus récemment, automatiquement avec un logiciel d'analyse d'images. La valeur de dureté est déterminée à l'aide d'une formule comprenant la zone mesurée et la charge appliquée. Les mesures électroniques automatiques ou les mesures d'images sont des méthodes plus courantes et plus pratiques pour générer des valeurs de dureté Knoop.

À l'aide du microduromètre (Figure IV.21), nous pouvons déterminer la dureté de l'époxy vierge et chargé de 1% ET 2% de poudre de graphite. Les résultats sont présentés dans le (tableau IV.3).

Essais	1	2	3	La moyenne
Résine vierge	12	12	11	11.66 HK
1%G	12	13	13	12.66 HK
2%G	14	16	12	14 HK

Tableau IV.3 : résultats de la micro dureté Knoop de l'époxy (RV, 1%G, 2%g).



Figure IV.21 : Photo du microduromètre. [20]

IV.12.4. Analyse des résultats

Les résultats nous montrent l'évolution de la micro dureté avec le pourcentage d'ajout de graphite (Tableau IV.3). Cette dernière augmente avec l'augmentation du pourcentage de graphite. Ce qui nous permet de conclure que l'une des propriétés du graphite est d'améliorer la dureté du polymère époxyde.

IV.13. Les essais de flexion

IV.13.1. Introduction

Si l'ajout de graphite aux polymères peut contribuer à la baisse du coefficient de frottement car considéré comme un lubrifiant solide, nous ne savons rien de l'évolution des propriétés mécaniques de ces matériaux. Nous nous proposons d'étudier dans cette partie l'effet de l'ajout de graphite au polymère époxy bisphénol A au travers de l'essai de flexion trois points

IV.13.2. Flexion trois points

La détermination des caractéristiques mécaniques intrinsèques et le comportement d'un matériau quelconque nécessite la pratique d'un certain nombre d'essais mécaniques tels que la flexion trois points, quatre points, et la traction compression etc.

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action d'une charge.

Pour les besoins de notre étude nous avons opté pour l'essai de flexion trois points (figure IV.22).

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis par l'intermédiaire d'une panne située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante. Le but est de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux telles que le module de Young, la résistance en flexion, la flèche maximale...etc. ; Les paramètres mesurés sont la force appliquée et la flèche au centre de l'éprouvette.

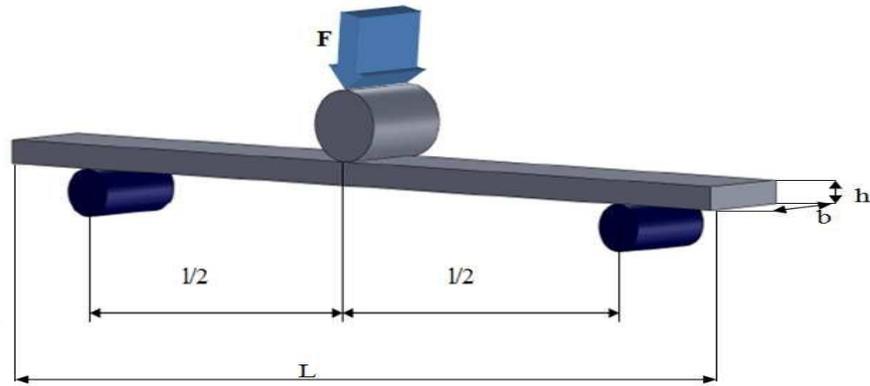


Figure IV.22: Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points.

Avec :

- F : charge appliquée ;
- r_1 : rayon de cylindre de la panne ;
- r_2 : rayon des cylindres d'appuis ;
- L : longueur entre appuis ;
- l : longueur totale de l'éprouvette ;
- h : hauteur de la poutre ;
- b : largeur de la poutre.

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, la face supérieure de l'éprouvette soumise à une contrainte de compression et la face inférieure à une contrainte de traction (Figure IV.23). Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement, sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre. En fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai, il y a compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement. La courbe de contrainte –déformation est donnée par la Figure IV.24.

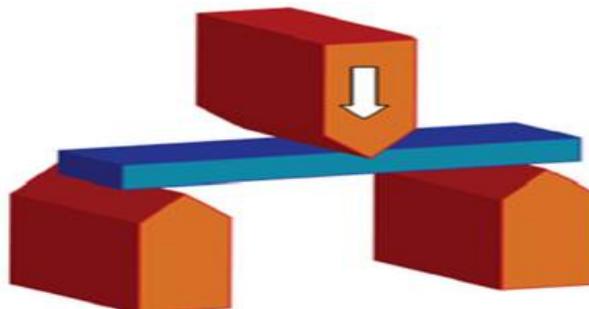


Figure IV.23 : Test de flexion trois points

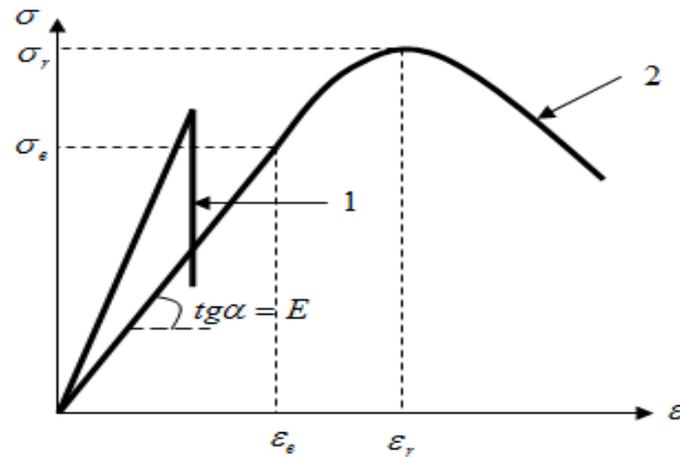


Figure IV.24: Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile; 2) matériau ductile

IV.13.3. Machine de flexion

Les essais de flexion trois points sont réalisés sur la machine de flexion **Z20** (Figure IV.25), au niveau du laboratoire de recherches (LMSE) du département de Génie Mécanique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. La Z20 est une machine automatique à commande électrique connectée à un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition et de traitement des données où nous enregistrons les dimensions de l'éprouvette à tester et nous choisissons la vitesse de l'essai. La force maximale de cette machine est de 50000N et sa vitesse maximale peut aller jusqu'à 500mm/min. Elle est constituée de deux traverses; l'une fixe l'autre mobile, guidées par deux colonnes.

La courbe obtenue est la force(N) en fonction du déplacement (mm).

Nous avons effectués des essais de flexion à une même vitesse qui est de 2mm/mn et une température de 25°C.



Figure IV.25 : machinedeflexionZ20.

IV.13.4. Géométrie des éprouvettes

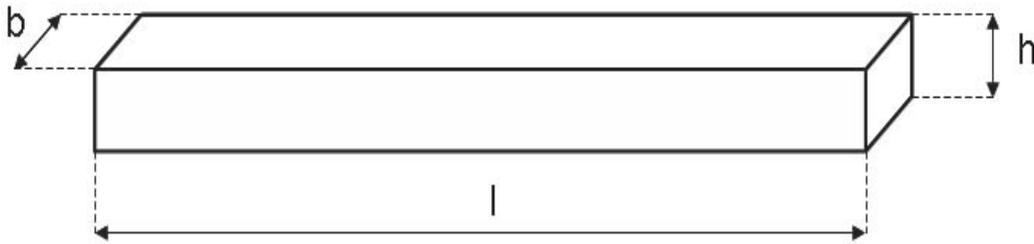


Figure IV.26 : Géométrie des éprouvettes de flexion.

- b : la largeur (mm).
- h : épaisseur (mm).
- l : longueur (mm).

Les échantillons sont classés par épaisseurs car le procédé d'élaboration ne permet pas d'avoir une épaisseur rigoureusement constante. Ils sont ensuite réparties en lots dont l'épaisseur moyenne est sensiblement la même, ceci en vue de l'uniformité des essais.

IV.13.5. Résultats des essais de flexion trois points

Nous présentons ici les résultats des propriétés mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité E , la contrainte à la rupture σ_r , la déformation à la rupture ε et la flèche maxi à la rupture f_{max} .

Pour une représentation plus cohérente des résultats des essais, nous avons utilisé les formules de passage suivantes données par la théorie des poutres:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad , \quad \varepsilon = \frac{6hw}{L^2}$$

Avec:

σ_f : la contrainte normale (MPa).

ε : La déformation.

w : flèche de l'axe neutre (mm).

F : force appliquée

L : distance entre appuis

Les Figures IV.27 à IV.29, montrent la variation de la contrainte en fonction de la déformation pour les trois matériaux testés.

Lot A	b (mm)	h (mm)	σ_{\max} (MPa)	E(MPA)	ϵ	f_{\max} (mm)
A1	15,28	3,76	12,91	565,3	0,17	35,9
A2	15,04	3,48	20,39	644,1	0,18	37,6
A3	14,8	3,36	26,56	932,7	0,12	28,1

Tableau IV.4 : Les caractéristiques mécaniques des éprouvettes du lot A

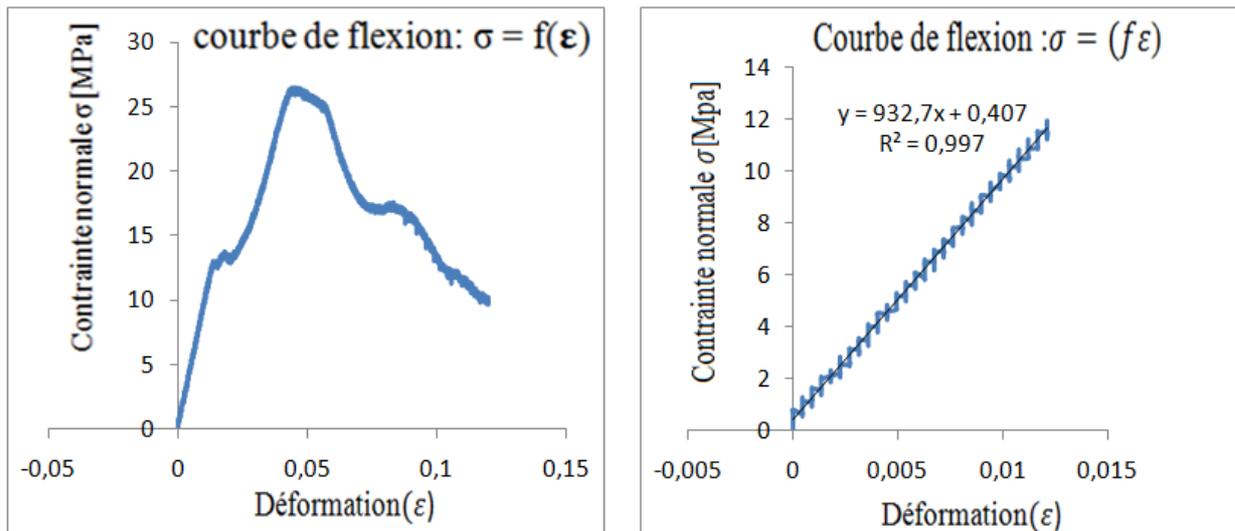


Figure IV.27 : Evolution contraintes/déformation de la résine (EP0%G)

Lot B	b(mm)	h(mm)	σ_{\max} (MPa)	E(MPA)	ϵ	f_{\max} (mm)
1	14,78	4,04	16,57	678,3	0,084	22.2
2	15,37	4,08	18,58	907,7	0,03	8.1
3	15,04	4,03	18,92	944,8	0,037	9.6

Tableau IV.5 : Les caractéristiques mécaniques des éprouvettes du lot B

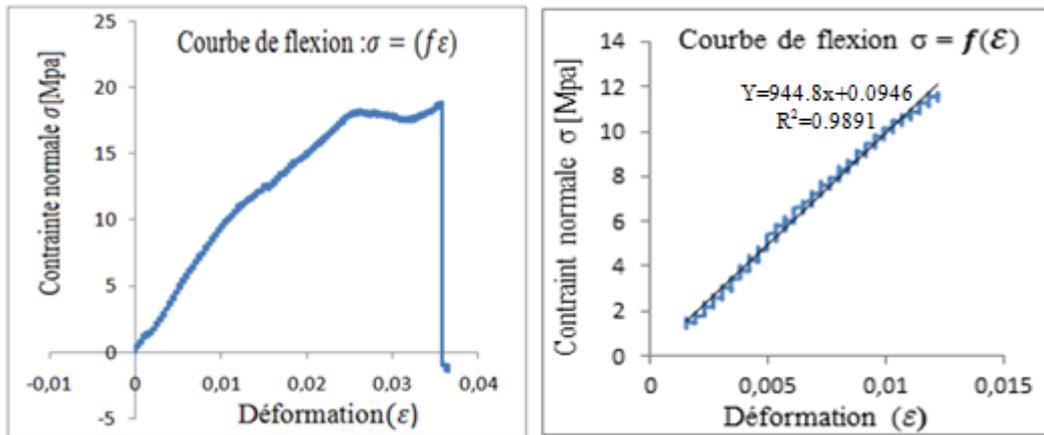


Figure IV.28 : Evolution contraintes/déformation de la résine (EP1%G)

Lot C	b (mm)	h (mm)	σ_{max} (MPa)	E(MPA)	ϵ	f_{max} (mm)
1	15,48	3,85	9	948,2	0,029	8,1
2	15,25	3,83	14,63	992,5	0,056	15,7
3	15,03	3,81	7,04	934,8	0,031	8,7

Tableau IV.6. Les caractéristiques mécaniques des éprouvettes du lot C

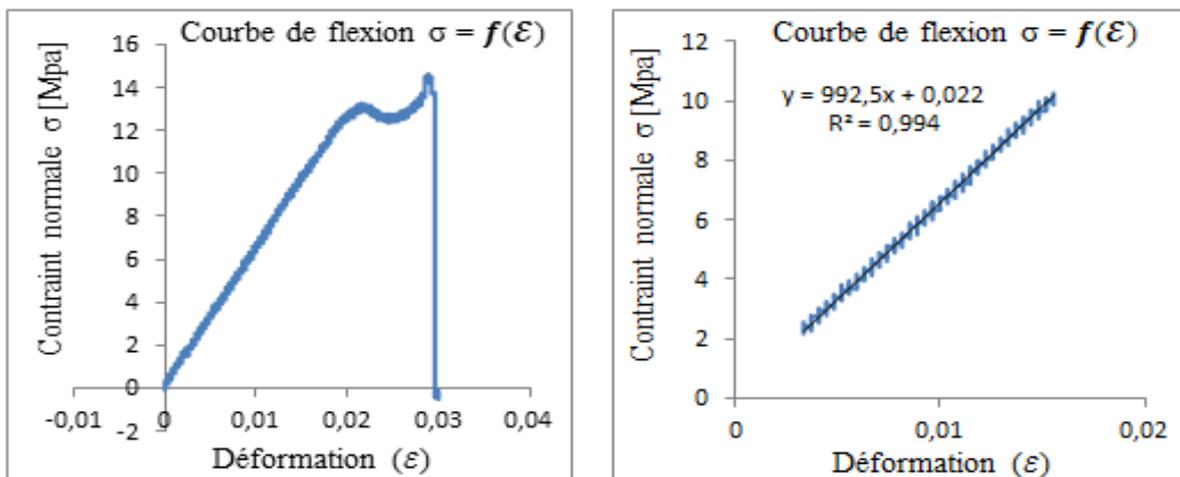


Figure IV.29 : Evolution contraintes/déformation de la résine (EP2%G)

IV.13.6. Interprétation des résultats

Nous observons que tous les matériaux n'ont pas le même comportement. Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec une dispersion dans les contraintes de rupture, la limite d'élasticité et dans le module de YOUNG. Ceci est dû principalement à l'existence de défauts qui influencent considérablement la résistance à la rupture, à la présence du micro vides dans le matériau et par rapport aux conditions de polymérisation. En effet, la différence dans les

conditions d'élaboration des mélanges conduit à la non homogénéité de la composition. La présence plus ou moins importante de graphite à l'endroit de la découpe de l'échantillon influe sur la qualité de la polymérisation et par conséquent sur les propriétés mécaniques. Nous observons que le comportement de la résine époxyde 0%G a un comportement ductile (Figure IV.27), par contre la résine chargée de 1% et 2% de graphite représentent un comportement fragile qui nous donne un module de YOUNG et une dureté HK plus élevés (Figures IV.28 et IV.29). Nous remarquons donc une évolution de module d'élasticité en fonction du pourcentage de graphite (Figure IV.32) parce que la poudre de graphite a sans doute limité le mouvement des chaînes de la résine époxyde.

Contrairement au module de YOUNG, la résistance à la rupture et la déformation maximale diminuent avec l'augmentation du pourcentage de graphite dans les résines EP1%G et 2%G (Figure IV.30 et IV.31). Elles sont plus importantes pour les lots d'éprouvettes de la résine vierge (EP0%).

Cela est probablement dû à la structure des particules du graphite et de leur tendance à l'agglomération.

La dispersion observée dans nos résultats pour toutes les propriétés mesurées est essentiellement due à l'élaboration des mélanges (répartition de la poudre de graphite dans le volume des éprouvettes), dimensions variables des éprouvettes, présences de micro – cavité et en enfin condition de polymérisation.

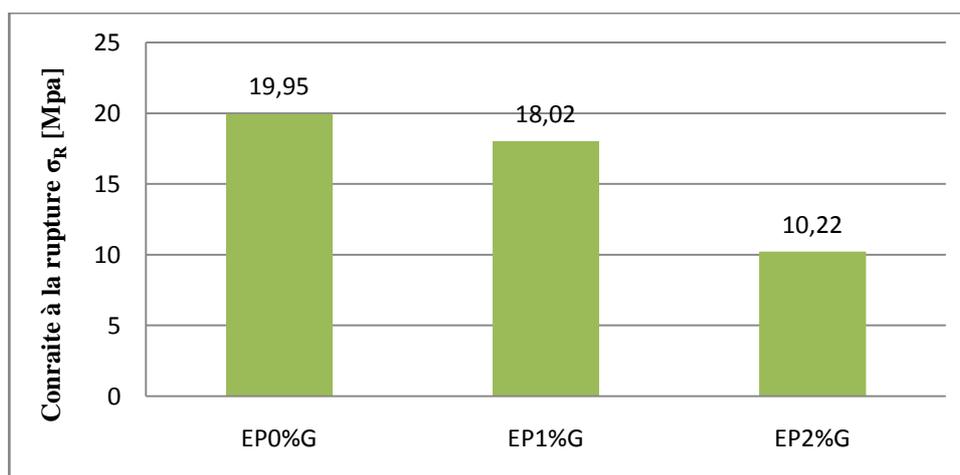


Figure IV.30:influence de l'ajout de graphite sur les contraintes à rupture

Le calcul de la valeur moyenne de la déformation à rupture du Lot C ne prend en considération que les échantillons 1 et 3. (Les résultats obtenus sur l'échantillon 2 sont considérés comme entachés d'erreurs).

Le calcul de la valeur moyenne de la déformation à rupture du Lot C ne prend en considération que les échantillons 1 et 3. (Les résultats obtenus sur l'échantillon 2 sont considérés comme entachés d'erreurs).

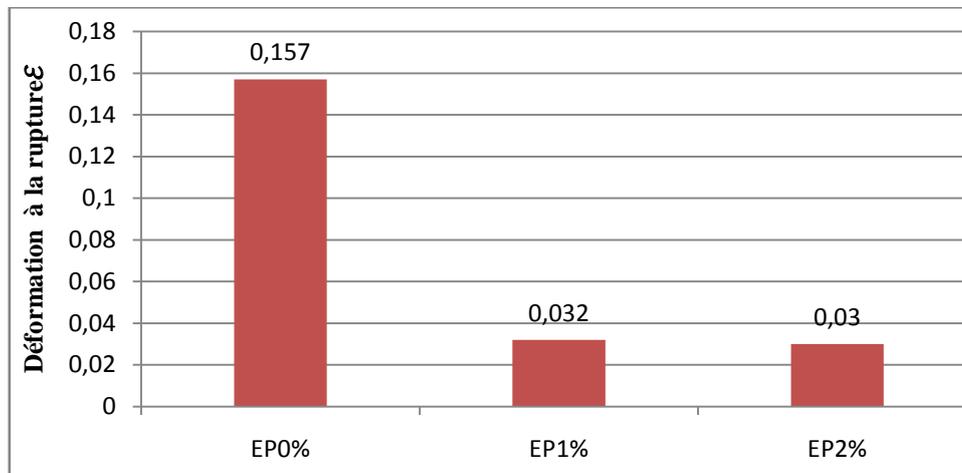


Figure IV.31:influence de l'ajout de graphite sur les déformations à rupture

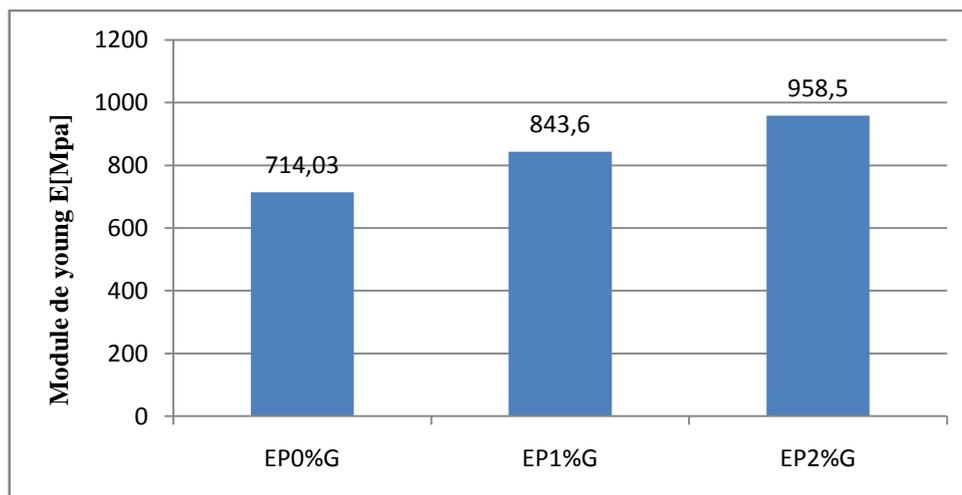


Figure IV.32:influence de l'ajout de graphite sur le module d'élasticité

IV.13.7. Conclusion

Nous avons réalisé des essais mécaniques (flexion trois points) pour déterminer les propriétés mécaniques des trois matériaux : résine vierge (EP0%) et les résines chargées (EP1%G) et (EP2%G). Nous avons constaté que la résistance à rupture σ_R et la déformation à rupture ϵ de compositions (EP1%G) et (EP2%G) sont inférieures à celles de la résine vierge. Le module de YOUNG est amélioré par l'augmentation de la charge. Les résultats obtenus sont confirmés par les essais de la micro dureté Knoop dont la dureté HK est plus importante avec l'ajout de graphite.

IV.14. Essais d'usure

IV.14.1. Introduction

Nous présentons à la suite de cette partie les résultats des essais d'usure que nous avons effectués et les discussions de ces résultats. Pour le besoin de notre étude, nous avons préparé des disques en acier XC48 trempés qui constituent le matériau antagoniste et des pions en résine époxy chargée ou non de poudre de graphite qui représente le matériau frotteur. Les compositions des matériaux des pions sont les suivantes :

- 1) Résine époxy vierge (EP0%G)
- 2) Résine chargée avec 1% de graphite (EP1%G)
- 3) Résine chargée avec 2% de graphite (EP2%G)

Les essais d'usure se sont déroulés à quatre vitesses sous quatre charges différentes.

Pour une meilleure précision de nos résultats, chaque essai est répété trois fois. Pas moins de cinquante-quatre disques et cent huit pions ont été nécessaires pour mener à terme nos expériences.

Les conditions de déroulement des essais sont :

- Température ambiante
- Pression atmosphérique
- Absence de lubrification
- Durée de l'essai $T=2000$ secondes

IV.14.2. Les paramètres des essais :

Nous avons choisi pour les essais d'usure une combinaison de quatre charges et trois vitesses $[V ; F_N]$. Quatre charges (8N ; 13.5N ; 17.5N ; 22.5N) et trois vitesses (0.08 m/s ; 0.32m/s ; 0.63m/s). Ce qui correspond respectivement sur le tour à des vitesses de rotation N de (45tr/min ; 180tr/min ; 355tr/min). Ces vitesses sont obtenues par la relation (IV.1). Pour chaque combinaison de ces paramètres, une série de trois essais a été réalisée.

$$V = \frac{2 \times N \times \pi \times r}{60 \times 1000} \quad (\text{IV.1})$$

V : vitesse linéaire de glissement (m/s).

N : vitesse de rotation du mandrin du tour.

r : rayon de la trajectoire circulaire

- **Mode opératoire**

Après avoir fixé le disque sur la broche du tribomètre et le pion dans le porte pion, nous sélectionnons la fréquence de rotation correspondante à la vitesse choisie à l'aide de la boîte de vitesse du tour et procédons à la mise en route (rotation du disque). Nous disposons ensuite la charge choisie sur le porte poids et mettons le pion en contact avec le disque.

L'enregistrement des données de la mesure (effort normal et tangentiel) délivrées par le capteur sont transmises à la mémoire de l'ordinateur via la chaîne de mesure grâce à une connexion HyperTerminal.

La fréquence d'enregistrement des données est de une seconde et chaque essai dur 2000 secondes.

Les valeurs numériques des essais sont par la suite traitées à l'aide du tableur EXCEL et présentées comme la moyenne des trois séries de mesures, sous forme de graphiques à la suite de ce chapitre et dans l'annexe A au mémoire.

IV.14.3. Résultats et discussions sur les essais d'usure

IV.14.3.1. Coefficient de frottement

A partir des mesures enregistrées lors des essais, nous traçons les courbes de l'effort normal « F_N » et de l'effort tangentiel « F_T » en fonction du temps. Pour illustration, un exemple de ces courbes est présenté en Figures IV.33 et IV.34. La courbe donnant l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps (Figure IV.35) est déduite des courbes de $F_N(t)$ et $F_T(t)$ en effectuant le rapport $F_T(t)/F_N(t)$.

Nous avons choisi de prendre la moyenne de trois graphiques de la variation de coefficient de frottement en fonction du temps des trois matériaux d'étude à une charge $F_N=8.24\text{N}$ et trois vitesses $v=0,08\text{m/s}$, $v=0,32\text{m/s}$, $v=0,63\text{m/s}$. Le reste des figures est donné à l'annexe A.

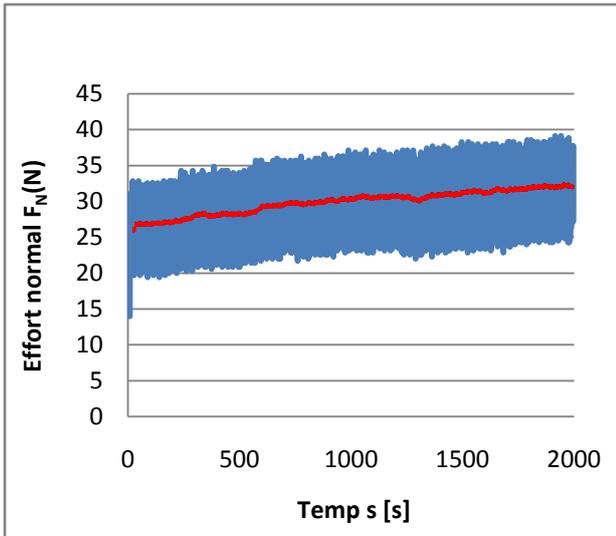


Figure IV.33 : L'évolution de l'effort normal en fonction du temps

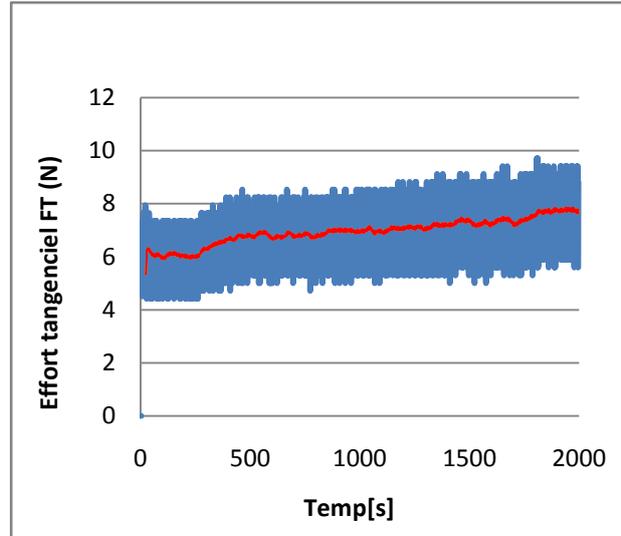


Figure IV.34 : L'évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

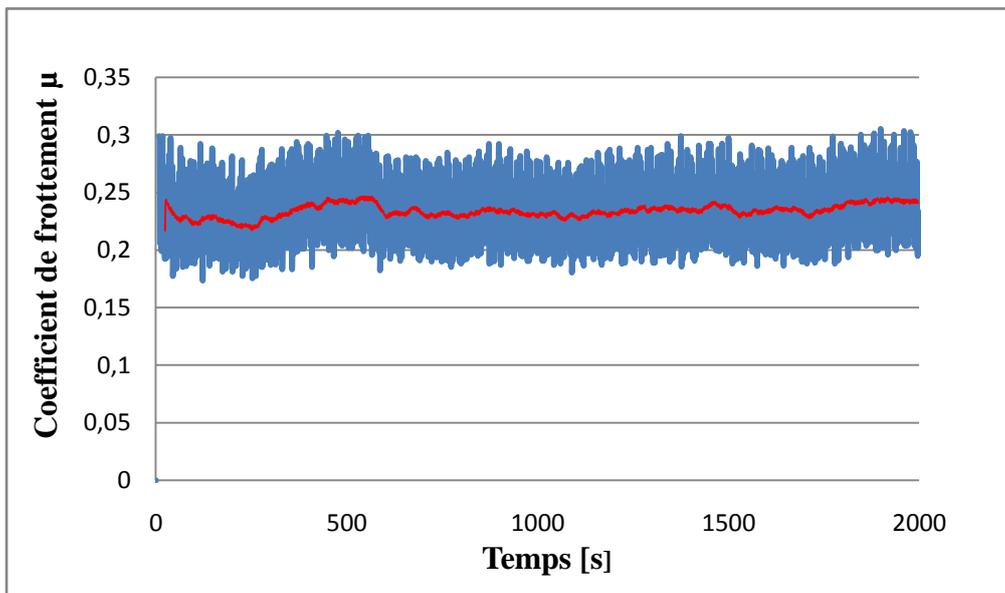


Figure IV.35 : L'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps

- Couple EP0%G/XC48

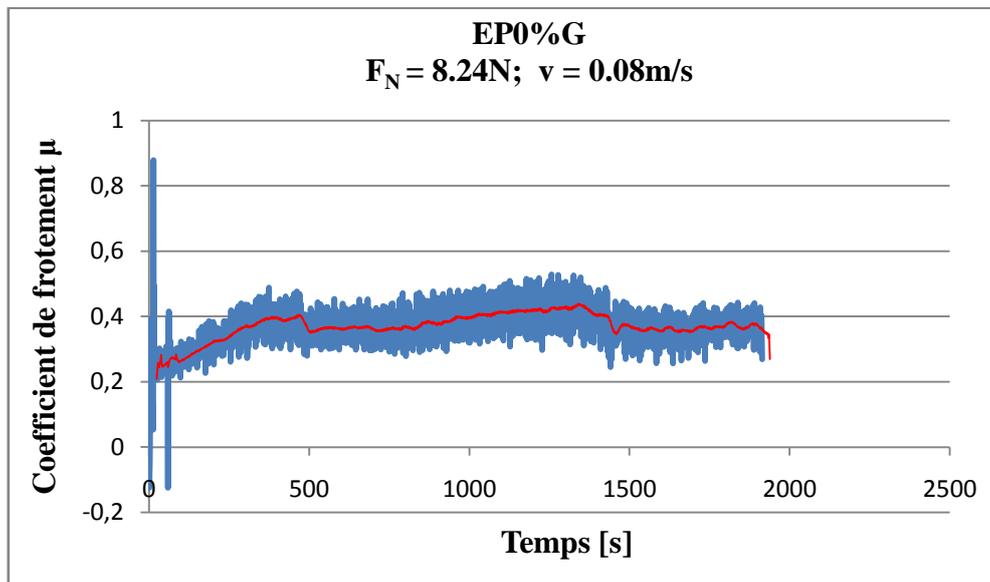


Figure IV.36 : Coefficient de frottement en fonction du temps

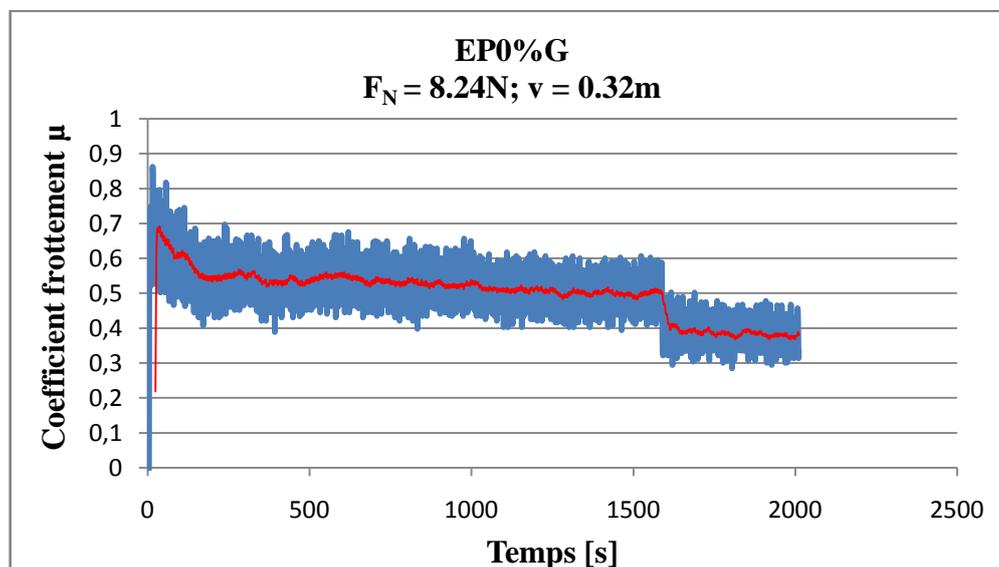


Figure IV.37 : Coefficient de frottement en fonction du temps

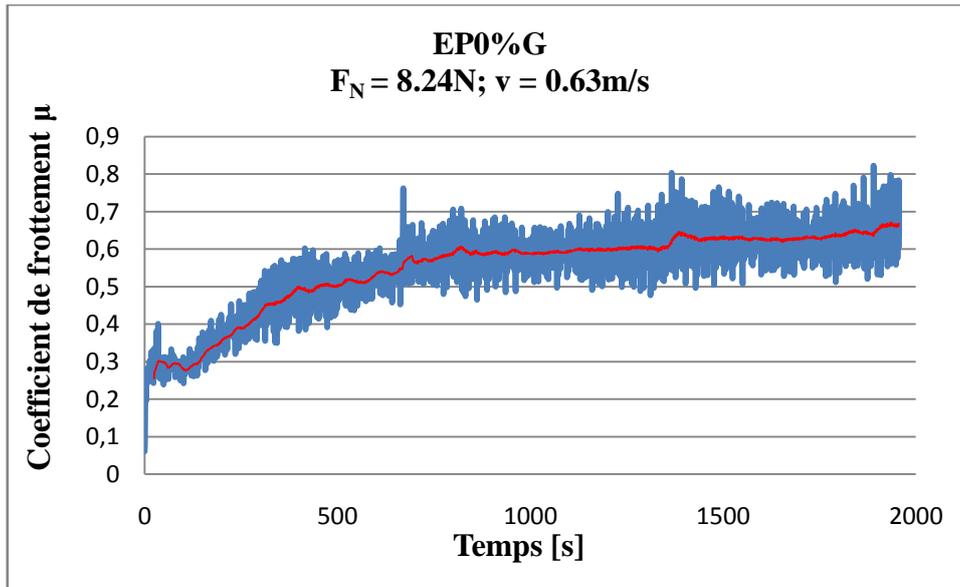


Figure IV.38 : Coefficient de frottement en fonction du temps

- Couple EP1%G/XC48

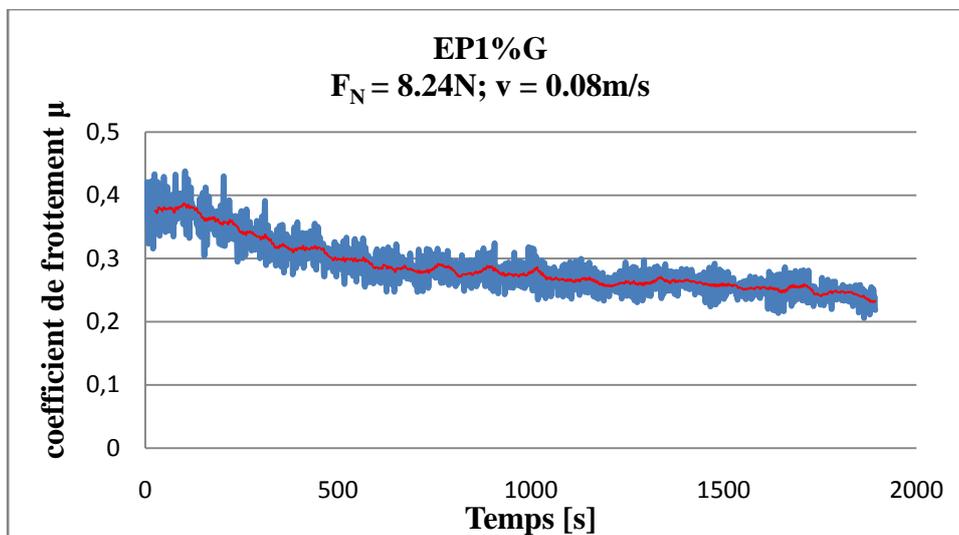


Figure IV.39 : Coefficient de frottement en fonction du temps

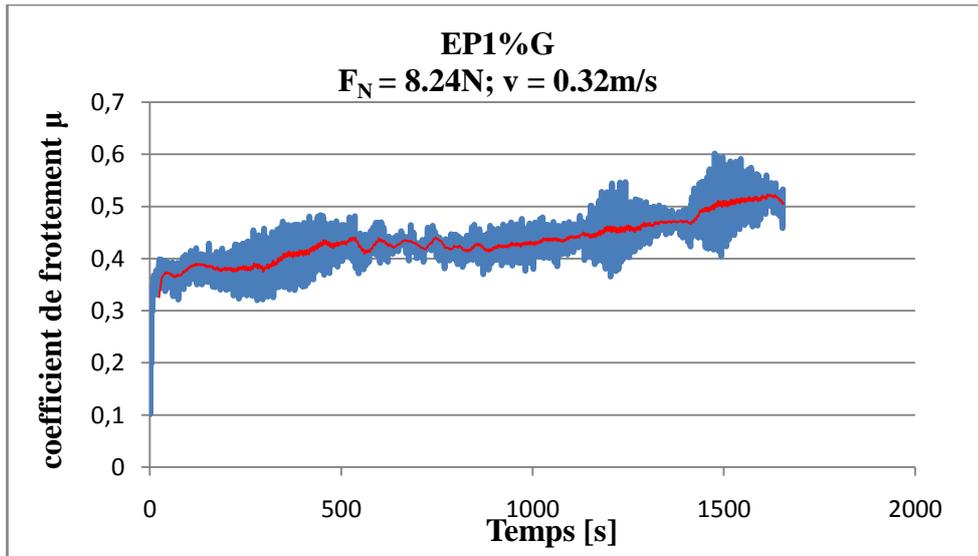


Figure IV.40 : Coefficient de frottement en fonction du temps

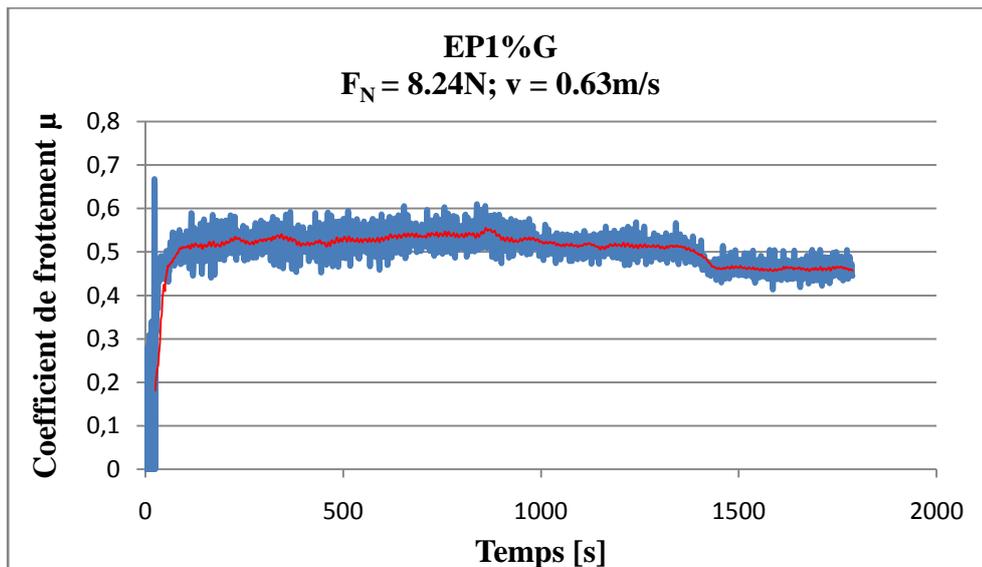


Figure IV.41 : Coefficient de frottement en fonction du temps

- **Couple EP2%G/XC48**

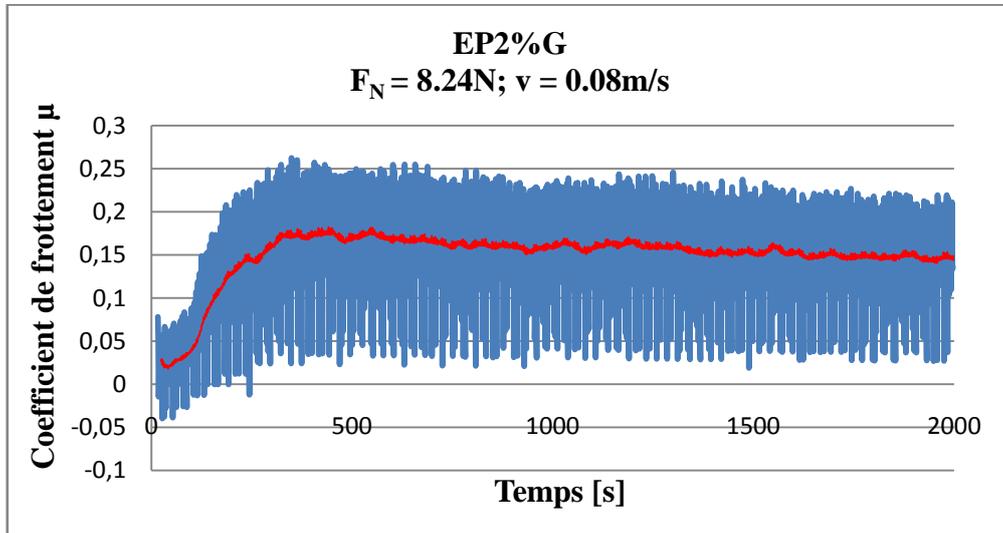


Figure IV.42 : Coefficient de frottement en fonction du temps

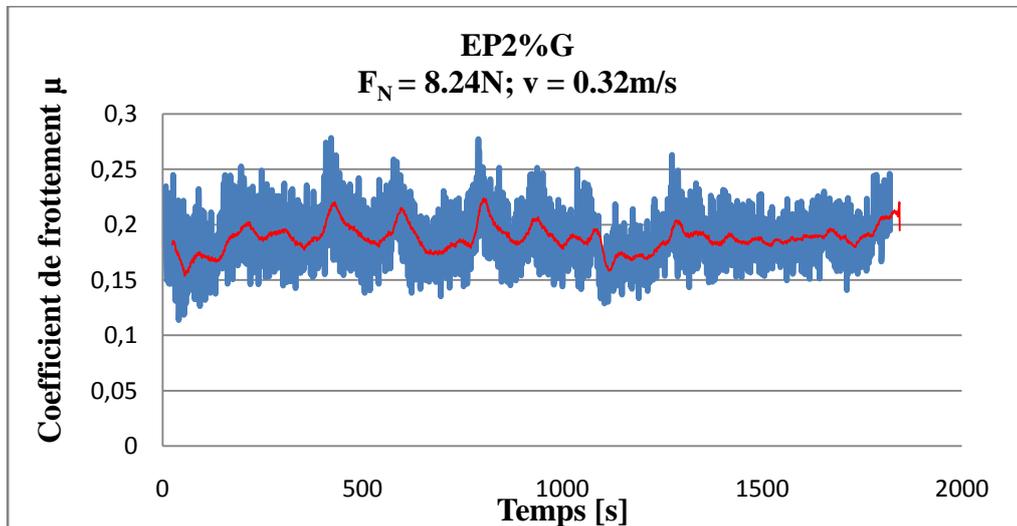


Figure IV.43 : Coefficient de frottement en fonction du temps

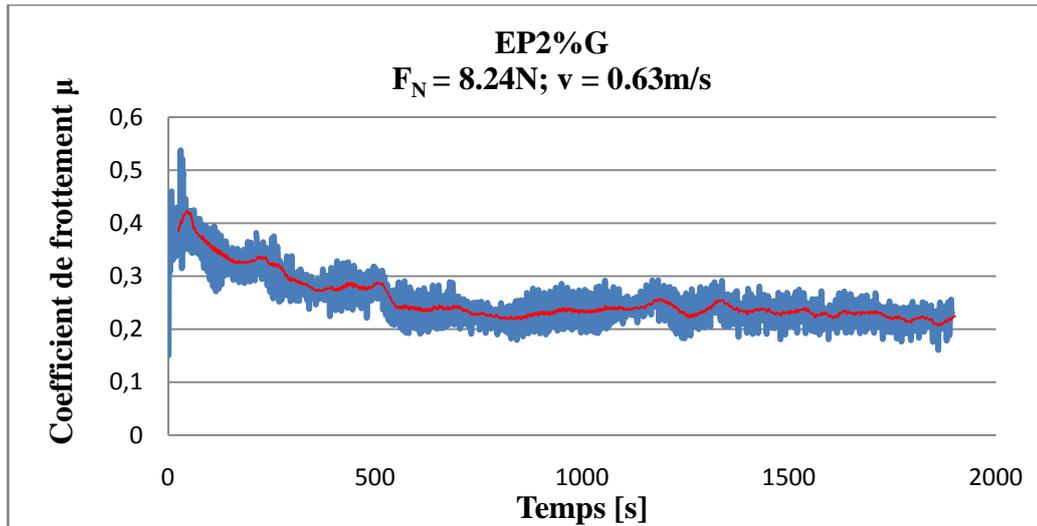


Figure IV.44 : Coefficient de frottement en fonction du temps

Les histogrammes de la (figure IV.45) représentent la variation du coefficient de frottement pour les trois compositions de matériaux aux charges et vitesses ci-contre.

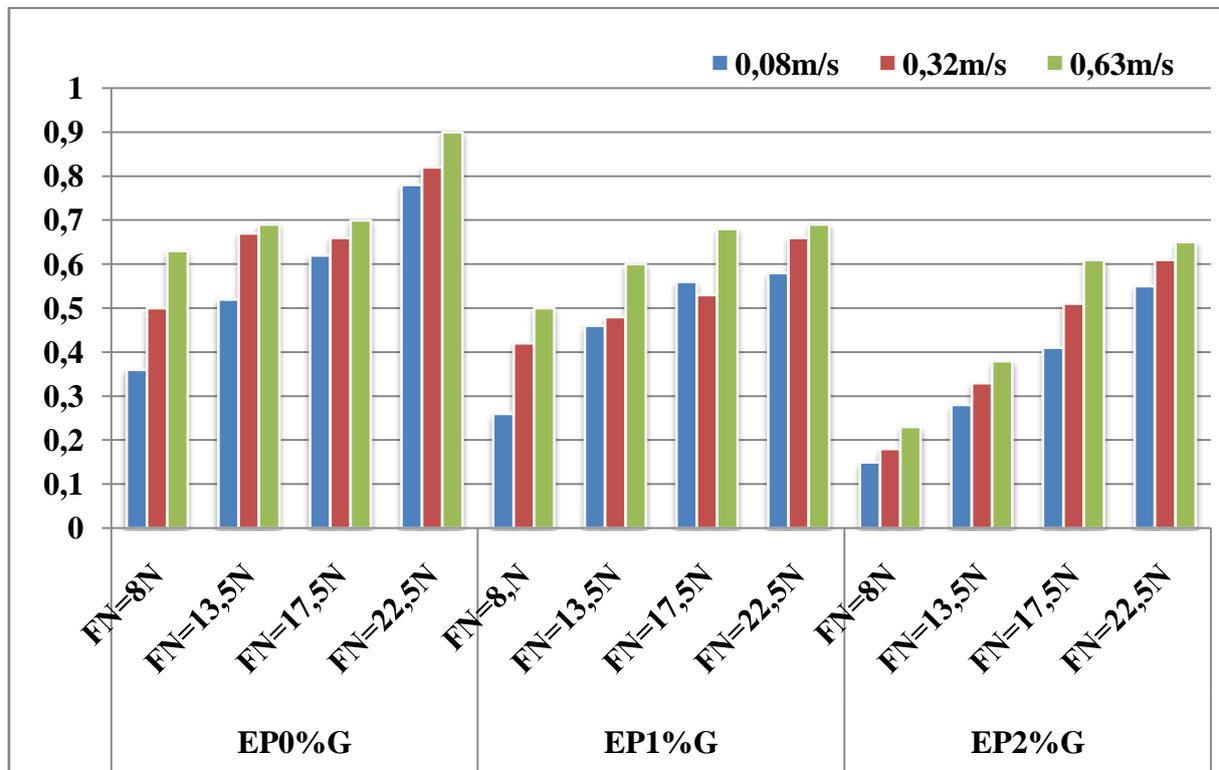


Figure IV.45 : Coefficient de frottement μ de EP0%G ; EP1%G ; EP2%G en fonction de la charge F_N et la vitesse v .

IV.14.3.2. L'observations durant et après les essais

Au cours des expériences nous avons observé un arrachement de matière du côté du pion qui s'échappe du contact. Blanchâtre dans le cas du couple (XC/EP0%G) et noirâtre dans les deux cas des couples (XC48/EP1%G) et (XC48/2%G). C'est le cas d'une usure abrasive. A la fin de l'expérience, la piste de frottement du pion sur le disque est bien visible, des débris d'époxy restent collés sur le disque, signe d'une usure par adhésion.

Les dimensions des débris sont différentes. Elles sont très petites dans le cas des petites charges et petites vitesses. Dans le cas des grandes vitesses et grandes charges les débris sont importants ce qui se traduit par une fissuration des pions en EP1%G et EP2%G et détérioration de quelques-uns et par une déformation plastique des pions de EP0%G.

Nous avons remarqué l'échauffement des disques à différents degrés de température en fonction de la charge et de la vitesse.

IV.14.3.3. Observations et discussion des graphiques

Nous relevons les courbes d'évolution du coefficient de frottement des trois matériaux étudiés en fonction de la durée du glissement. Initialement, une augmentation rapide du coefficient de frottement μ associée à la période de rodage, suivie d'une période de stabilité à une valeur, qui représente le coefficient de frottement de ce système tribologique. Cette phase est la période de fonctionnement normal.

Les courbes présentent aussi de légères fluctuations dues probablement aux vibrations du système, au frottement dans le guidage du porte capteur et aux battements de la surface du disque en contact avec le pion.

L'histogramme de la figure IV.42 regroupe toutes les valeurs du coefficient de frottement des trois matériaux en fonction des charges et des vitesses d'essais.

Pour un même matériau, le coefficient de frottement croit en fonction de la charge et la vitesse.

Ces résultats sont confirmées par d'autres études de l'effet du renfort du PEEK par 30% en poids de fibres de carbone ou de fibres verre sur le coefficient de frottement, et l'ajout du graphite au le polyester figures IV.44 et IV.45.

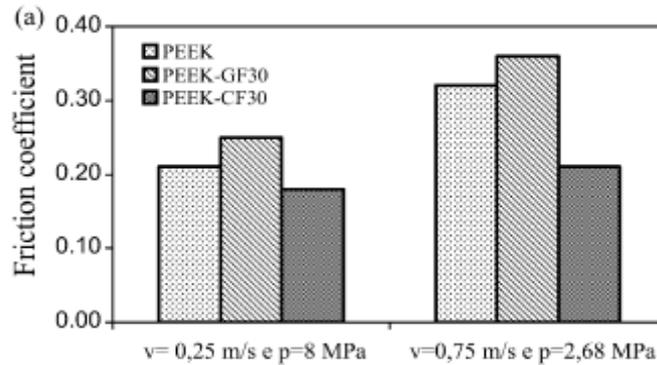


Figure IV.46 : L'effet du renfort en fibre de carbone ou de verre du PEEK [22]

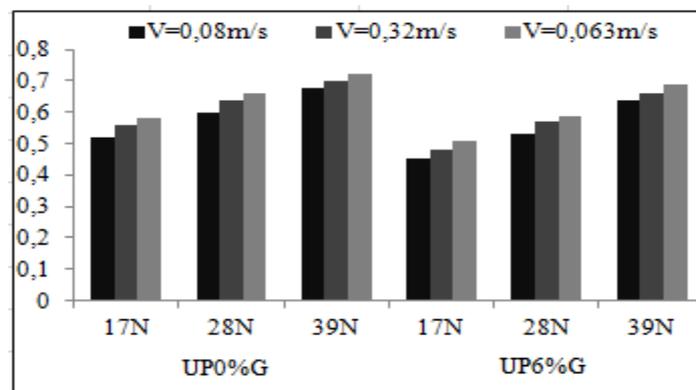


Figure IV.47 : Évolution du coefficient de frottement en fonction de l'effort normal et de la vitesse de glissement.[23]

Pour les mêmes combinaisons (charge ; vitesse), le coefficient de frottement μ est faible dans les résines chargées par rapport aux résines vierges. Nous avons constaté que le coefficient de frottement diminue avec l'ajout du graphite. Par ailleurs l'échauffement de la surface des échantillons en EP0%G est élevé en comparaison avec celles de EP1%G et EP2%G. Cette différence est due à l'importante conductivité thermique du graphite par rapport à la résine non chargé ; par conséquent la dissipation de la chaleur de friction accumulée est bien améliorée. En outre, le graphite peut agir entant que lubrifiant solide d'où sa contribution à la réduction du coefficient de frottement.

IV.15. Conclusion

A l'issue de ce travail, qui nous a permet d'étudier le comportement tribologique (frottement et usure) des couples (EP0%/XC48), (EP1%/XC48), (EP2%/XC48) en glissement sec, en fonction de la vitesse et la charge, compte tenu de la méthode utilisée nous avons constaté :

Au cours des essais, nous avons observé un détachement de matière à partir du pion. Une partie s'échappe sous forme de débris et l'autre reste collée sur la piste de glissement du disque. Ce qui fait un signe d'usure abrasive.

La matière détachée forme un film solide séparant les deux surfaces de contact. Pour les résines chargées, ce film contient du graphite. Grâce à la capacité du graphite à évacuer la chaleur, il permis de garder la température des surfaces relativement basse, par conséquence le coefficient de frottement diminue.

Le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation de la charge et la vitesse. Il diminue avec le pourcentage de graphite.

L'ajout du graphite à l'EPOXYDE améliore ses propriétés tribologiques lors du glissement sec contre l'acier XC48 traité.

Conclusion générale

Ce travail fructueux que nous avons mené nous a permis de bien comprendre et découvrir la tribologie (comme une science qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification et l'immensité des paramètres qui interagissent dans un contact de deux corps en mouvement relatif). Dans cette étude nous avons étudié l'influence de l'ajout de graphite sur les propriétés mécaniques et tribologique de la résine. L'enchainement suivi nécessite une série d'expériences dans le domaine de l'expérimentation à savoir la manipulation de la machine de flexion, le microduromètre, chaîne d'acquisition, tribomètre etc...

Nous avons constaté que l'ajout de graphite à l'époxy influe sur les propriétés mécaniques telles que la résistance à rupture σ_R , la déformation à rupture ϵ . Elles sont inférieures à celles de la résine vierge. En revanche le module de YOUNG E et la dureté HK sont améliorés par la présence de la même charge.

Pour répondre à la problématique de notre étude (frottement à sec d'un couple acier XC48 traité / résine époxy chargée ou non de poudre de graphite). Nous avons fait varier la vitesse, l'effort normal et le pourcentage de graphite. Les résultats obtenus montrent :

- Le coefficient de frottement croit en fonction de la charge et la vitesse pour les trois compositions étudiées.
- Le coefficient de frottement diminue avec l'augmentation du pourcentage de graphite.
- Le mécanisme d'usure abrasive (détachement de matière à partir des pions) est prévalent au début de l'essai.
- Le mécanisme d'usure adhésive (collage de particules détachées sur la piste de glissement du disque) est initié après la période de rodage et reste prédominant jusqu'à la fin de l'essai.
- L'époxy chargé de 2%G présente le meilleur comportement mécanique et tribologique (le module de YOUNG élevé, le coefficient de frottement plus faible).

En tenons compte des résultats obtenus, nous pouvons considérer que le graphite joue le rôle d'un lubrifiant solide d'où sa contribution à la baisse du coefficient de frottement.

Référence bibliographique

- [1] Ressource Internet. WWW.fr.scribd.com/doc/142553320/d02-0-Tribologie-Intro-4.
- [2] A. ABDELMALEK. *Influence des paramètres mécaniques lors de l'endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55. Mémoire de MAGISTER. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 2006.*
- [3] Ressource Internet. [WWW.aeres-evaluation .Fr/.../EVAL-0690187D-S211004448-UR-RAPPORT](http://WWW.aeres-evaluation.Fr/.../EVAL-0690187D-S211004448-UR-RAPPORT).
- [4] L. KIFOUICHE. *Etude de l'effet de la dureté et de la charge sur le coefficient de frottement d'un tribosystème pion/disque. Mémoire de fin d'études de Master UMMT.2010/2011.*
- [5] A.S. ADAMOU. *Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et à haute température. Thèse de doctorat. Ecole doctorale : matériaux-structure-mécanique. INSA de. 2005*
- [6] Ressource Internet. WWW.Ethesis.inp-Toulouse.fr/archive/00000431/02/Etcheverry2.triboo.
- [7] G. Zambelli, L. Vincent. *Matériaux et contacts - une approche tribologique. Edition Suisse Romande, PUR. 1998.*
- [8] A. ELHADI. *Influence des paramètres mécaniques lors de L'endommagement par les phénomènes Tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55. Mémoire Magister. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 2006.*
- [9] Ressource Internet. WWW.Tribologie /applications pratiques, un livre de Wikibooks.
WWW.wikibooks.org/tribologie/applications pratiques.
- [10] M.CARTIER P.KAPSA, *Usure des contacts mécaniques. Problématique et définitions. Techniques de l'ingénieur.*
- [11] René Gras. *Tribologie. Principe et solutions industrielles .Edition de l'usine nouvelle, DUNOD. 2008.*
- [12] J. DHERS. *Usure, avaries, corrosion : facteurs de destruction des matériels industriels. Edition technique et vulgarisation. Paris 1978.*

Référence bibliographique

- [13] Ressource Internet. [WWW.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique /zoom/coulomb /frottement/ index.php](http://WWW.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique/zoom/coulomb/frottement/index.php) C.BLONDELL, B.WOLFF. AMPERE et l'histoire de l'électricité.
- [14] A. BENFOUGHAL. *Analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone-carbone dans un contact électrique. Mémoire de Magister. Université MENTOURI Constantine. 2010.*
- [15] M. WOYDOT. *Application des données tribologiques des matériaux. Techniques de l'ingénieur. BM 7 006.*
- [16] *Fiche technique, LORN CHEMICAL, VERNIS EPOXY LORN.*
- [17] Ressource Internet. WWW.Univ-Biskra.dz/enseignant/BENSAADA traitement %20thermique.pdf.
- [18] Ressource Internet. WWW.ceramaret.ch/pdf/fr/polissage-fr.pdf.
- [19] A. SENNANE. *Etude expérimentale de l'usure d'un élastomère SBR utilisé dans la pneumatique. Mémoire de Master. UMMTO. 2012.*
- [20] Ressource Internet. [WWW.umvf.univnantes.fr/onthodologie /enseigneent/chap4/ site/html/](http://WWW.umvf.univnantes.fr/onthodologie/enseigneent/chap4/site/html/).
- [21] A. BEN MENACER. *Etude de la microdureté Vickers des poudres chimiques de Ni –P. Mémoire de Master en physique des Matériaux. Université de Batna.2012.*
- [22] P. DAVIM, R. CARDOSO; *Effect of the reinforcement (carbon or glass fibers) on friction and wear behavior of the PEEK against steel surface at long dry sliding. Revue wear. 2009.*
- [23] S. LARBI, S. DJEBALI, A.BILEK ; *Effet de l'ajout du graphite sur les propriétés tribologiques d'un polyester insaturé à base de styrène. ACMA. Fez Marocco.2012.*

ANNEXES

Variation de coefficient de frottement en fonction du temps à différentes charges et vitesses pour les trois matériaux étudiés.

➤ Couple EP0%G/XC48

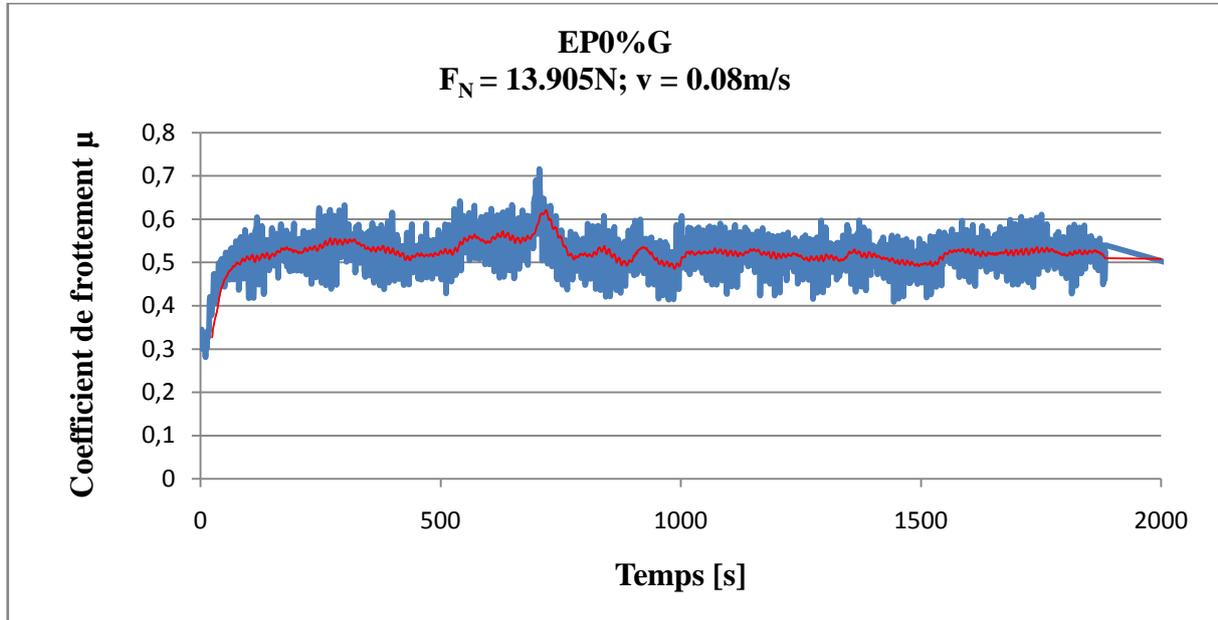


Figure A.1 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

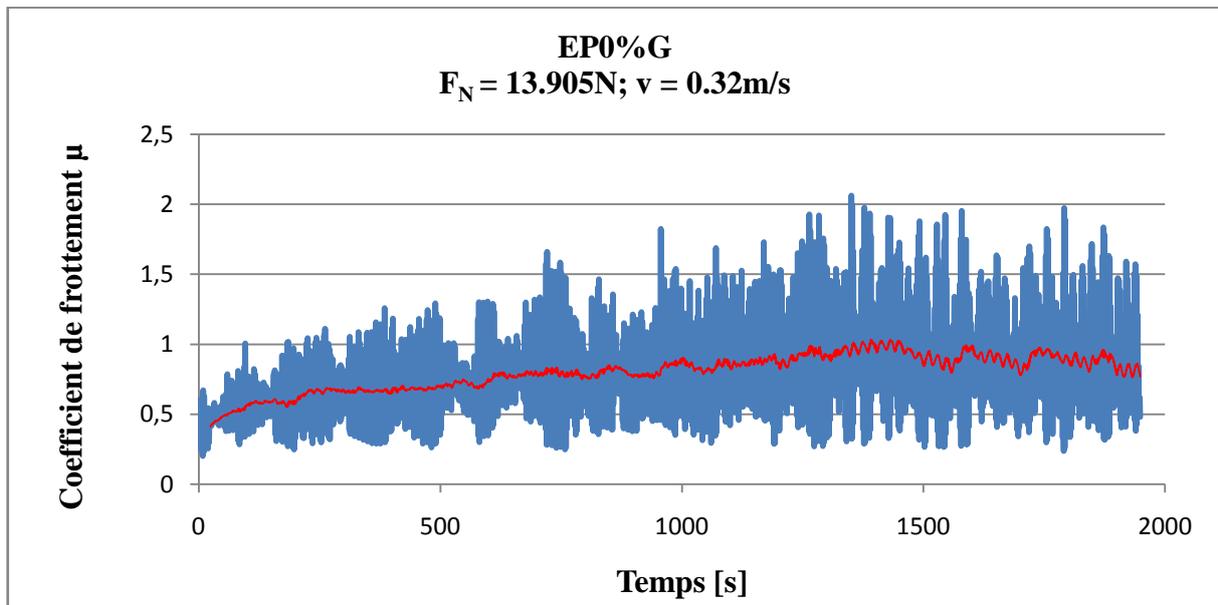


Figure A.2 : Évolution d coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

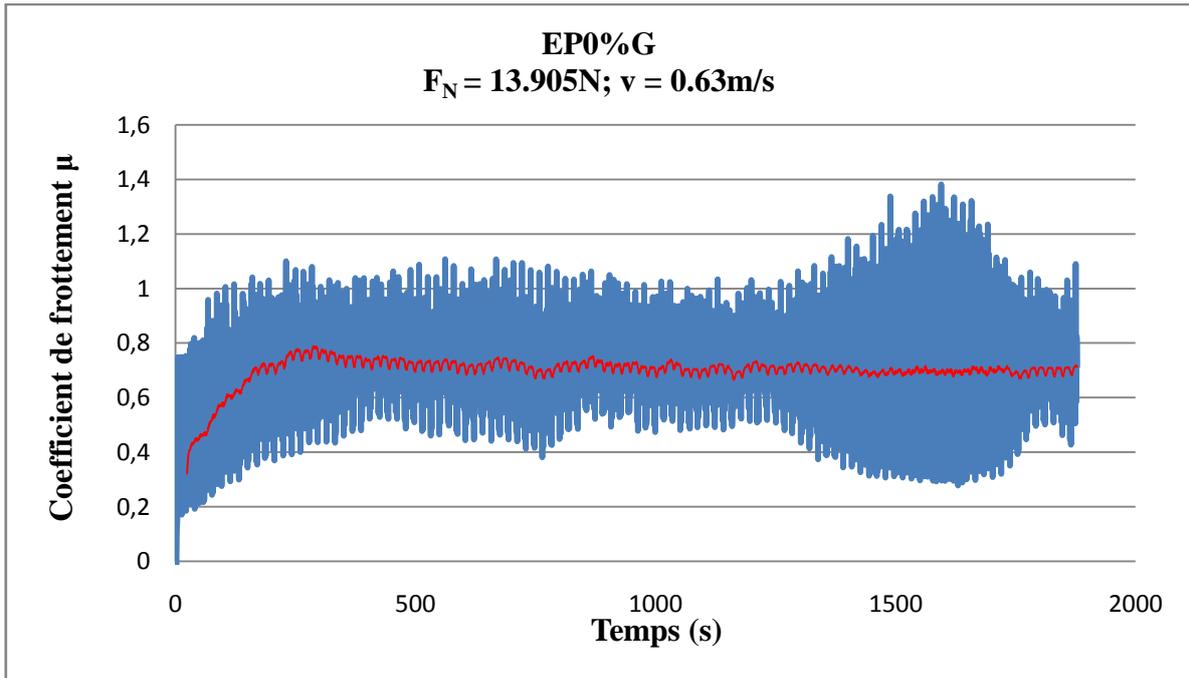


Figure A.3 : Évolution du coefficient de frottement en fonction du temps

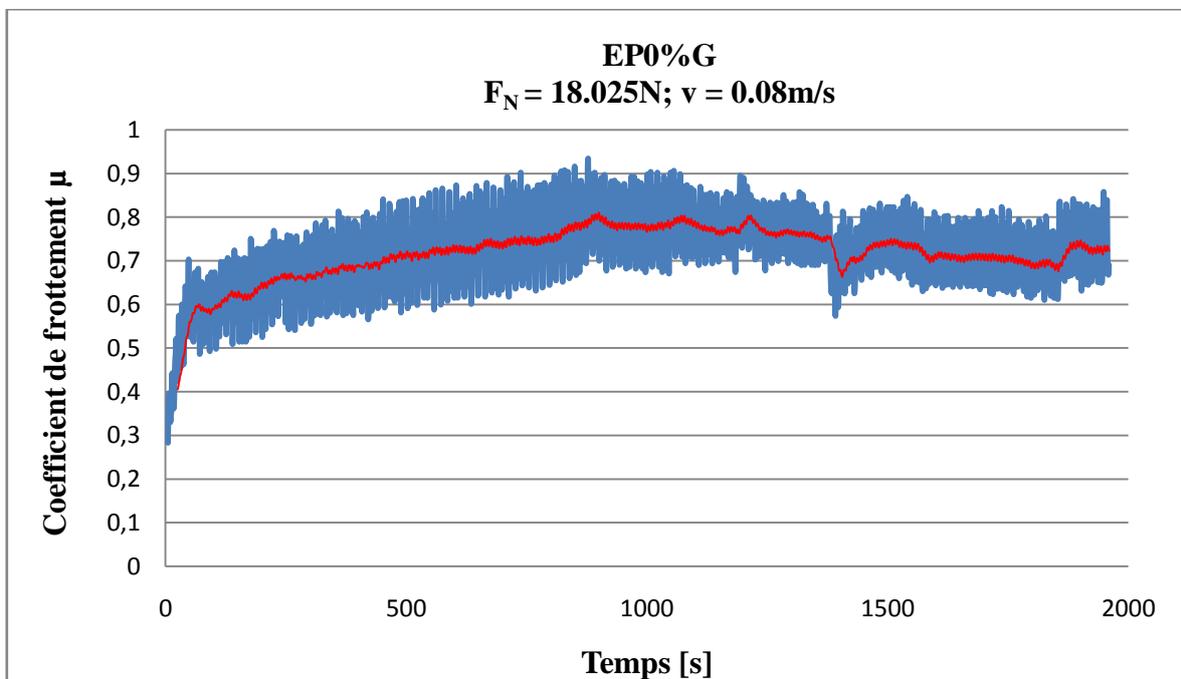


Figure A.4 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

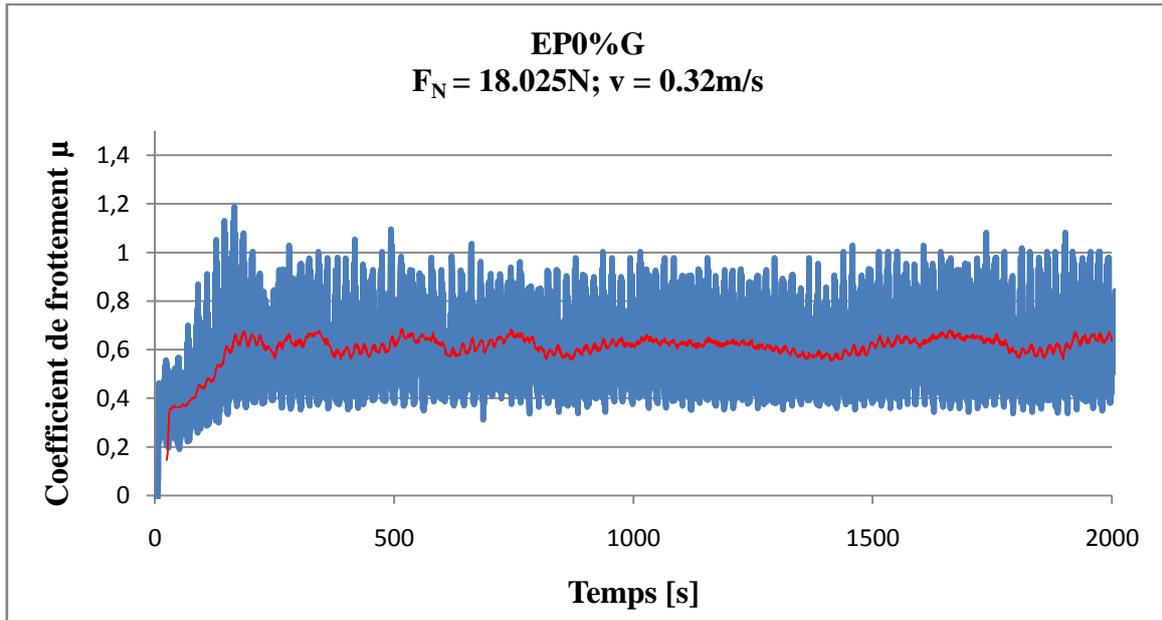


Figure A.5 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

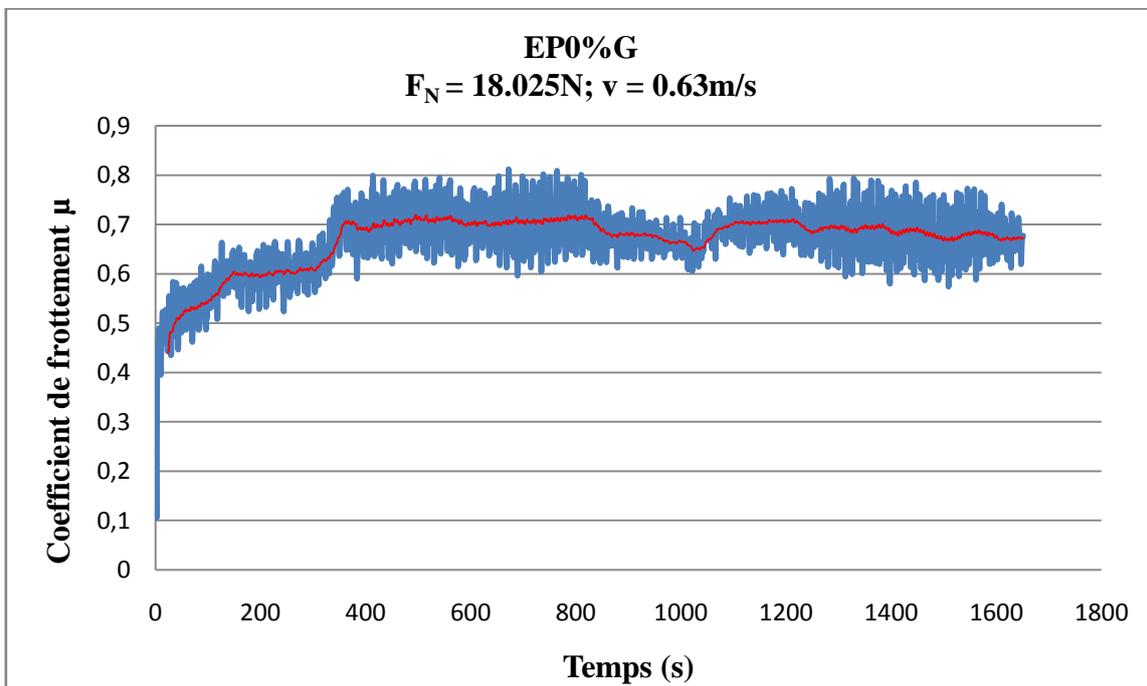


Figure A.6 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

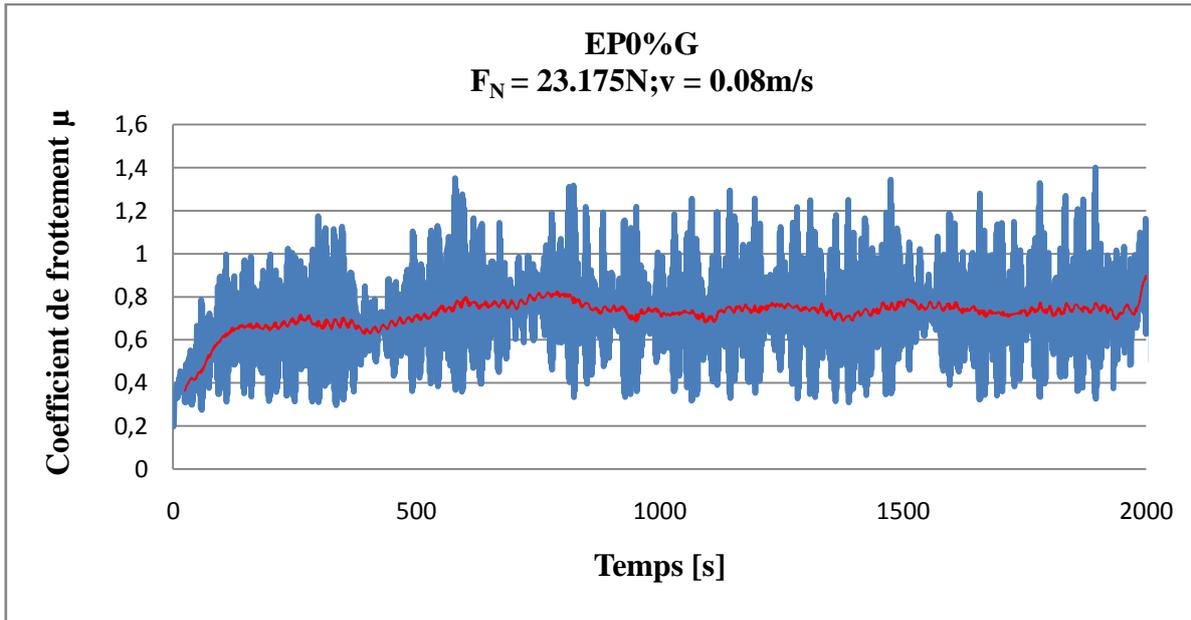


Figure A.7 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

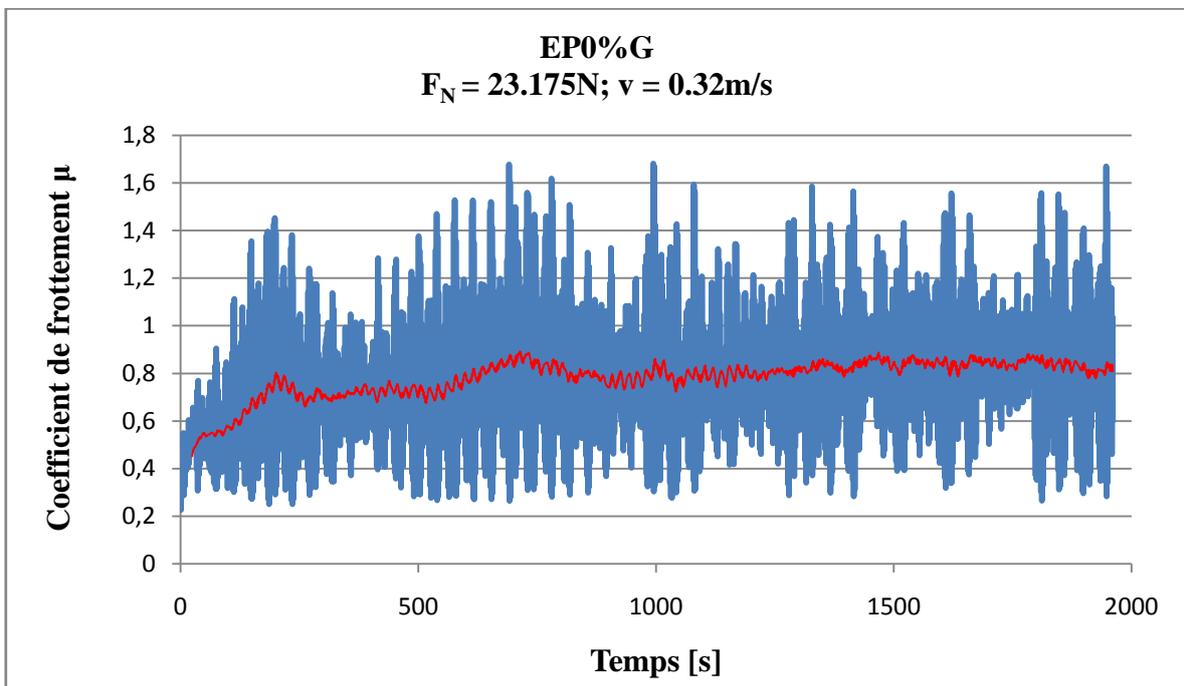


Figure A.8 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

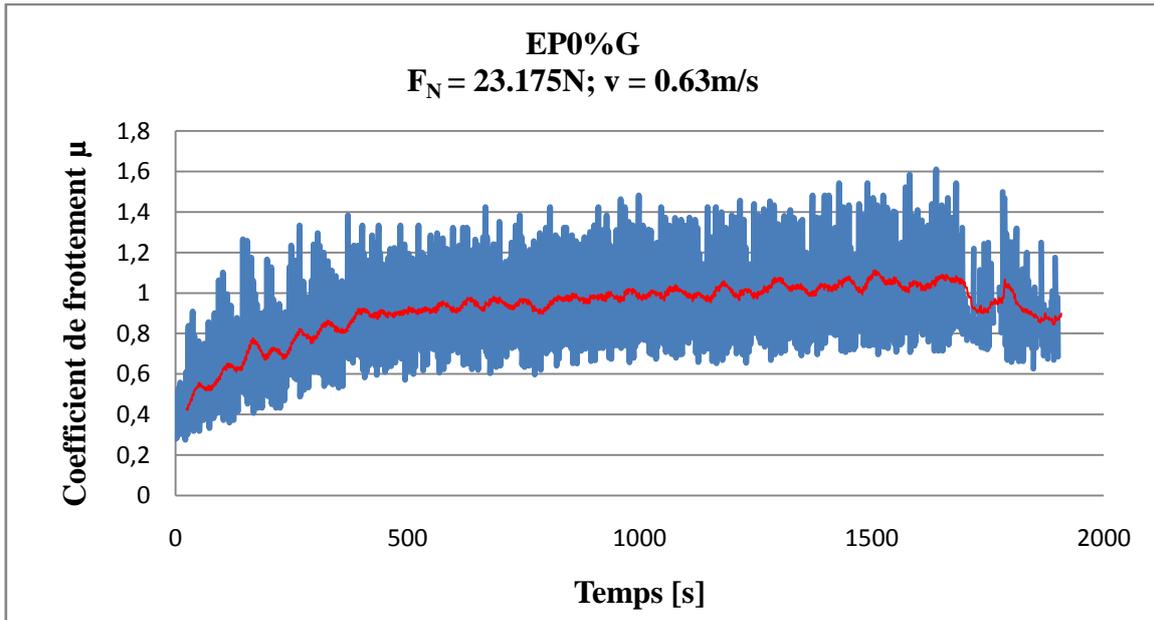


Figure A.9: Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

➤ **Couple EP1%G/XC48**

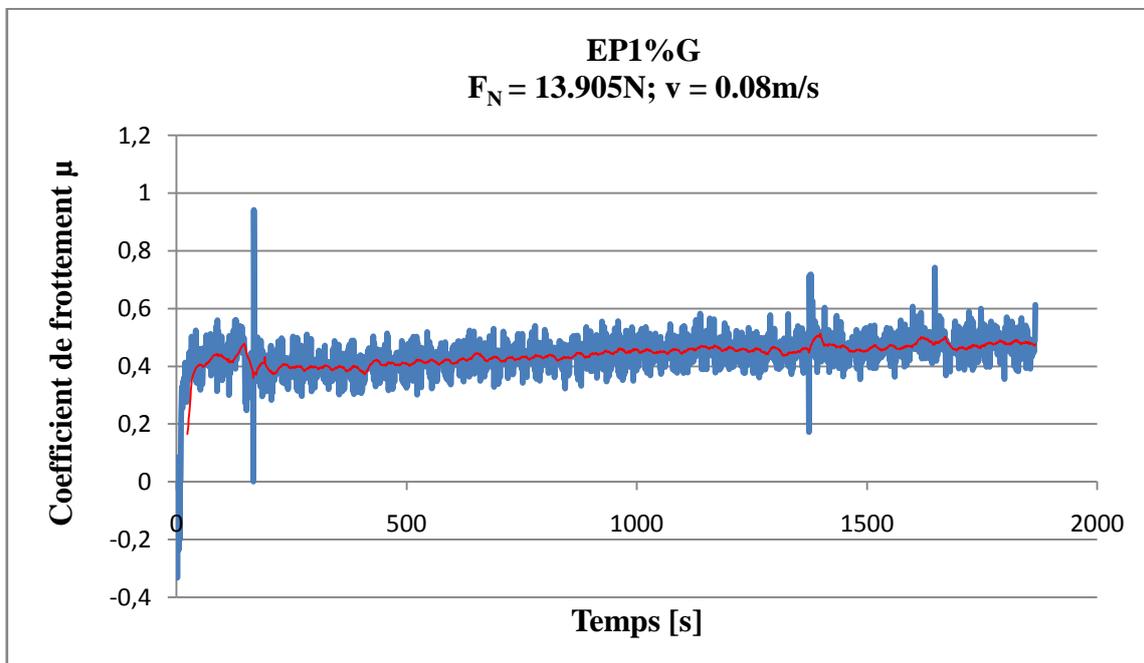


Figure A.10 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

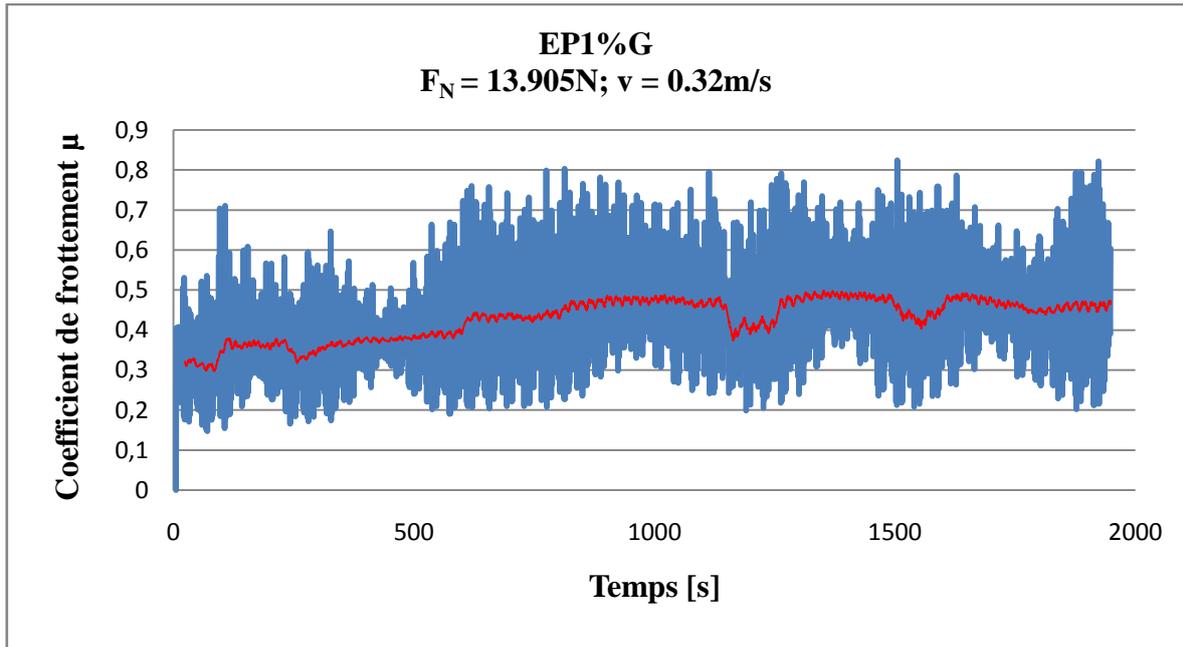


Figure A.11 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

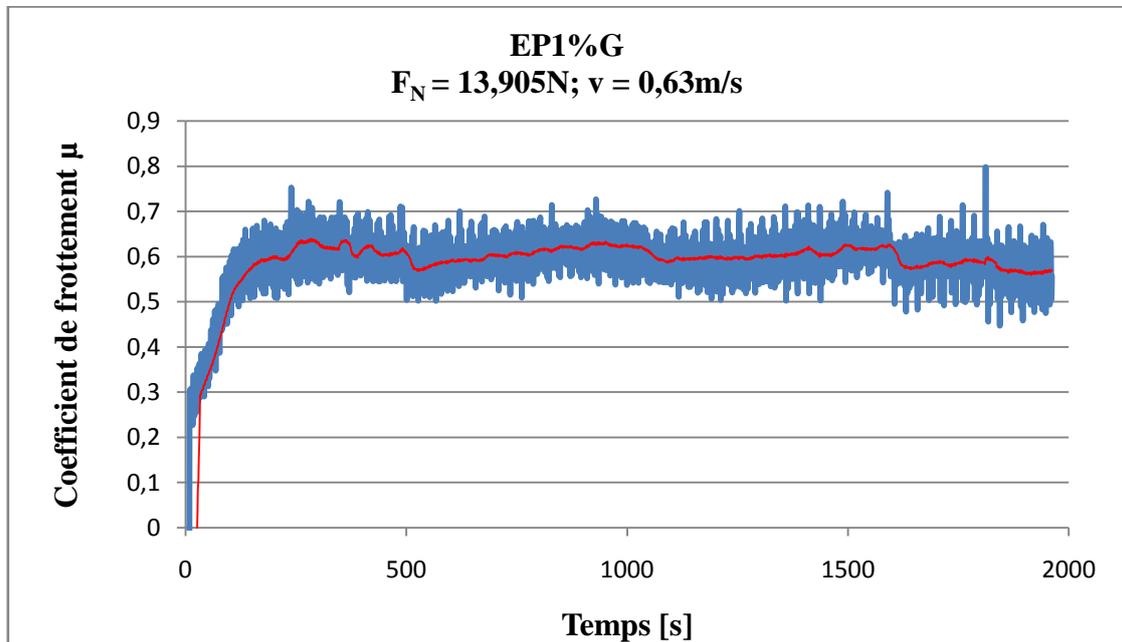


Figure A.12 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

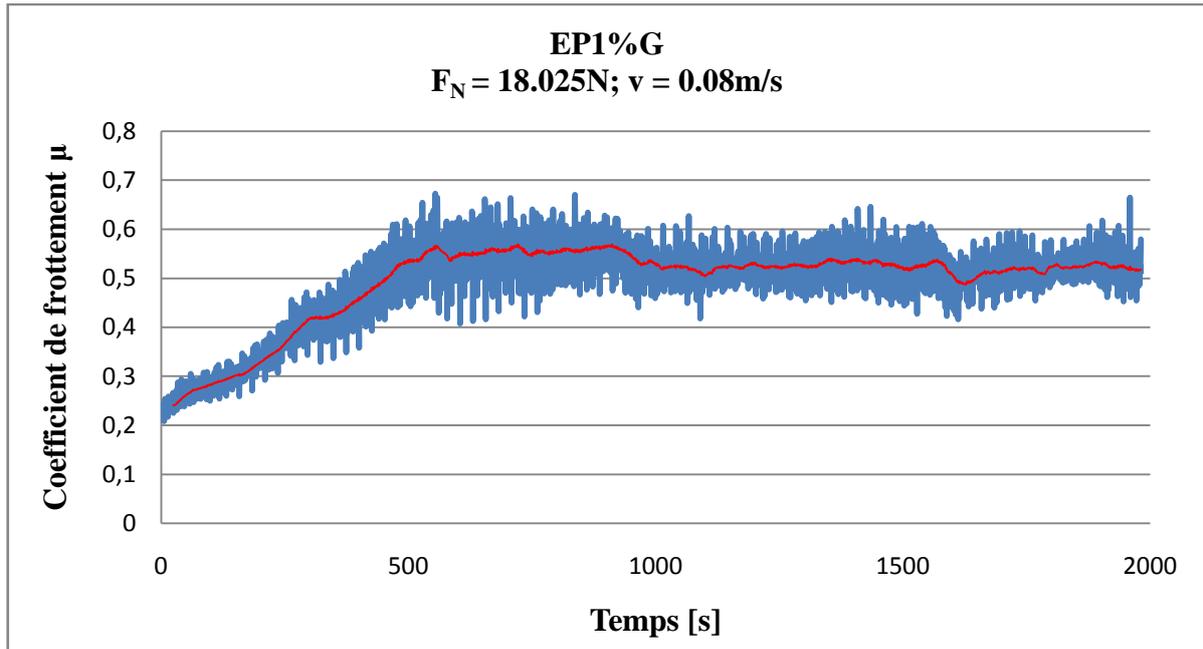


Figure A.13 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

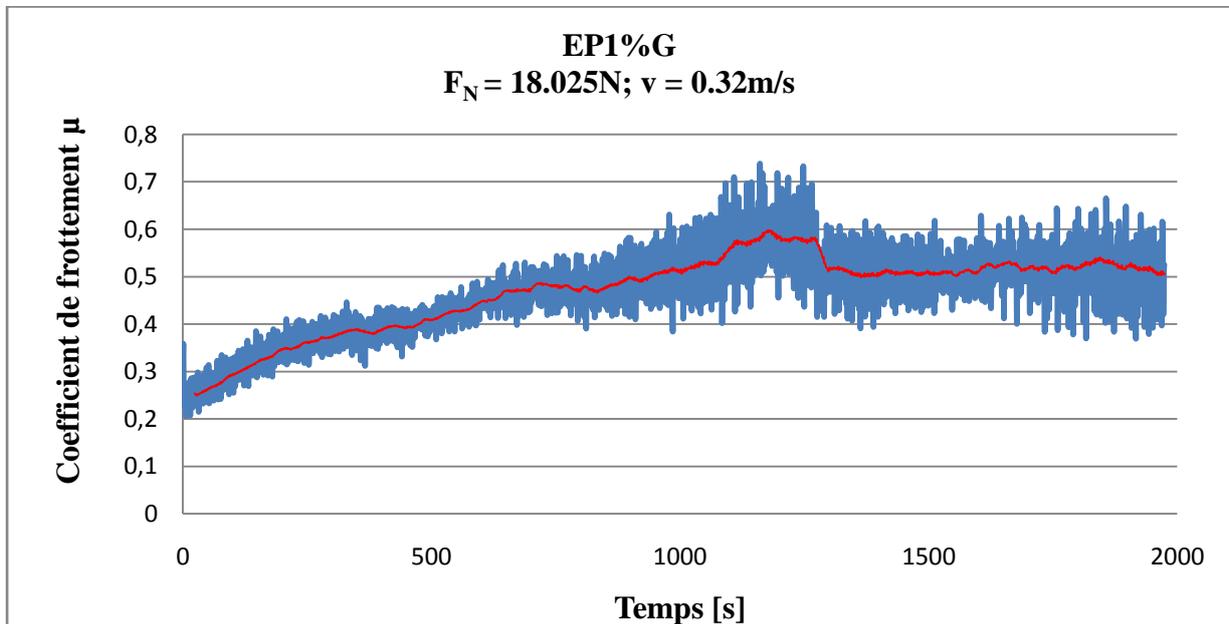


Figure A.14 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

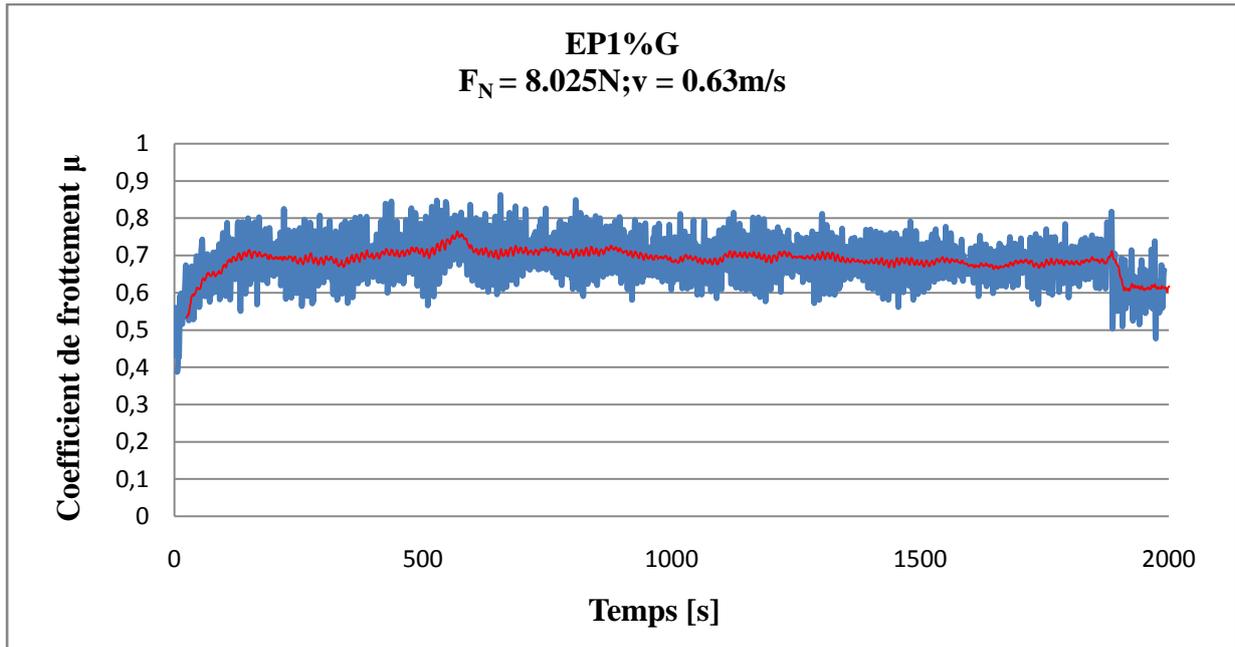


Figure A.15 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

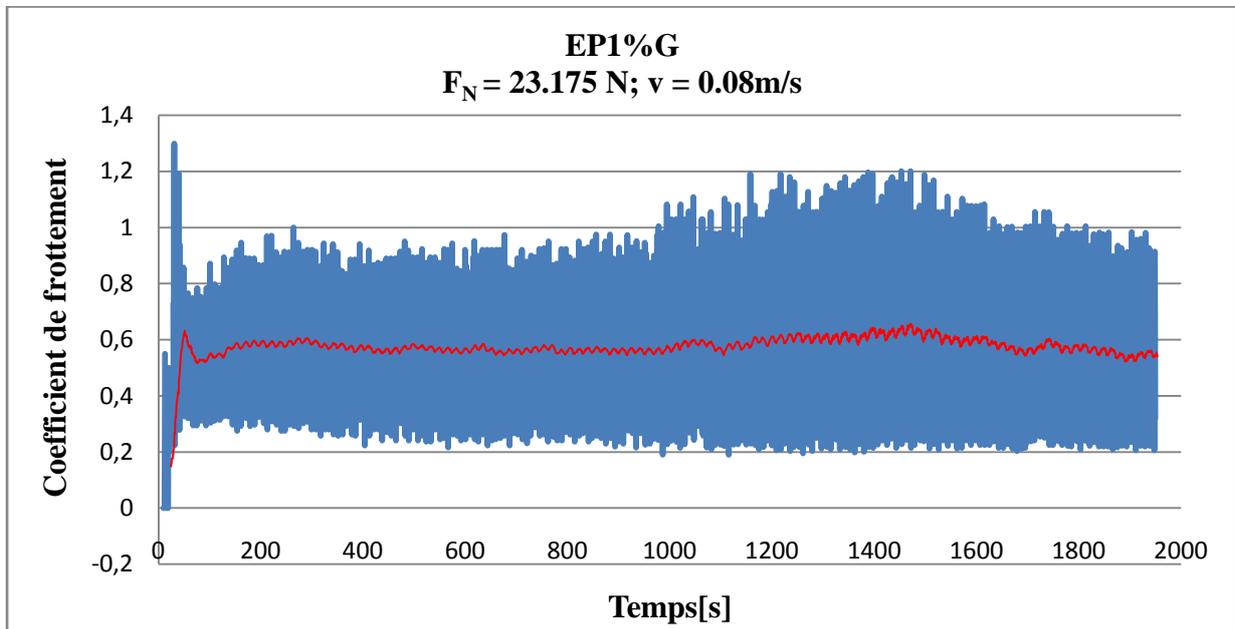


Figure A.16 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

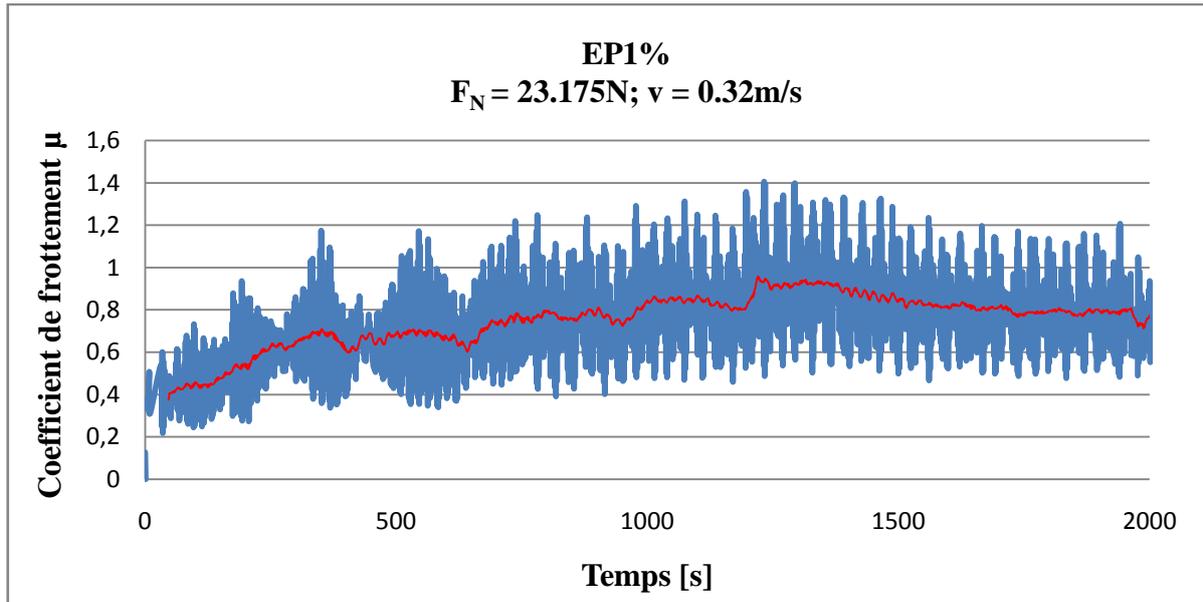


Figure A.17 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

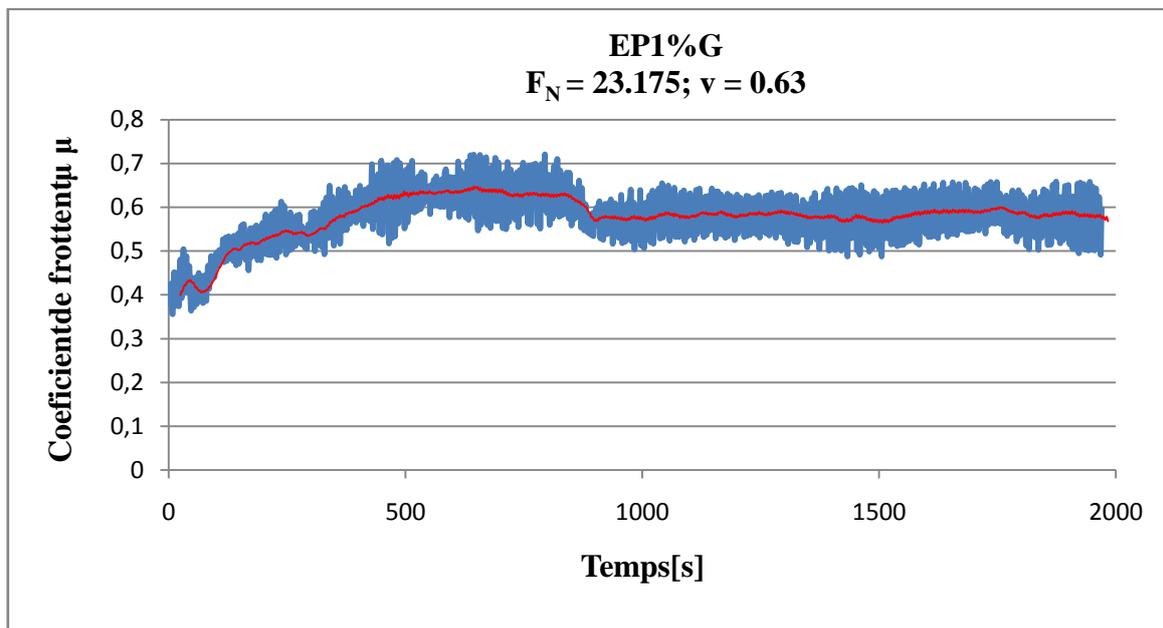


Figure A.18 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temp

ANNEXES

➤ Couple EP2%G/XC48

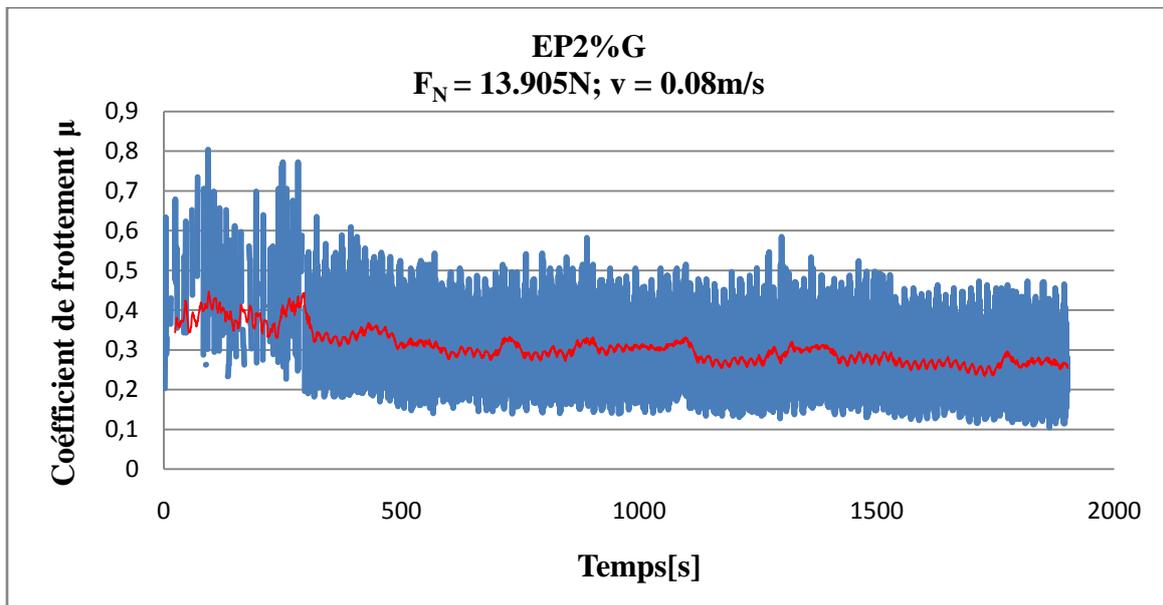


Figure A.19 : Coefficient de frottement en fonction du temps

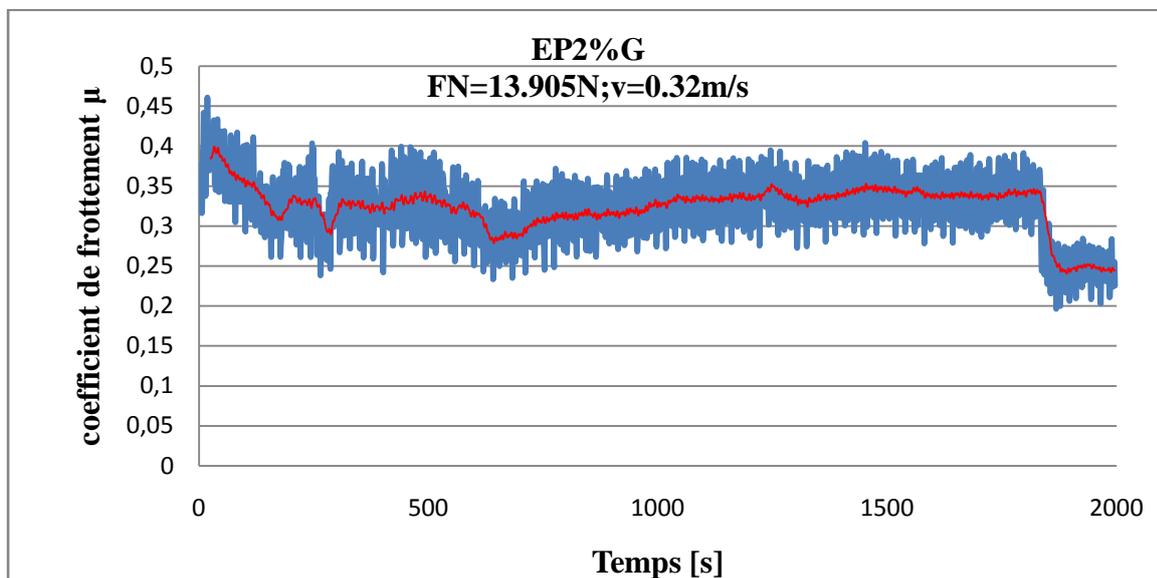


Figure A.20 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

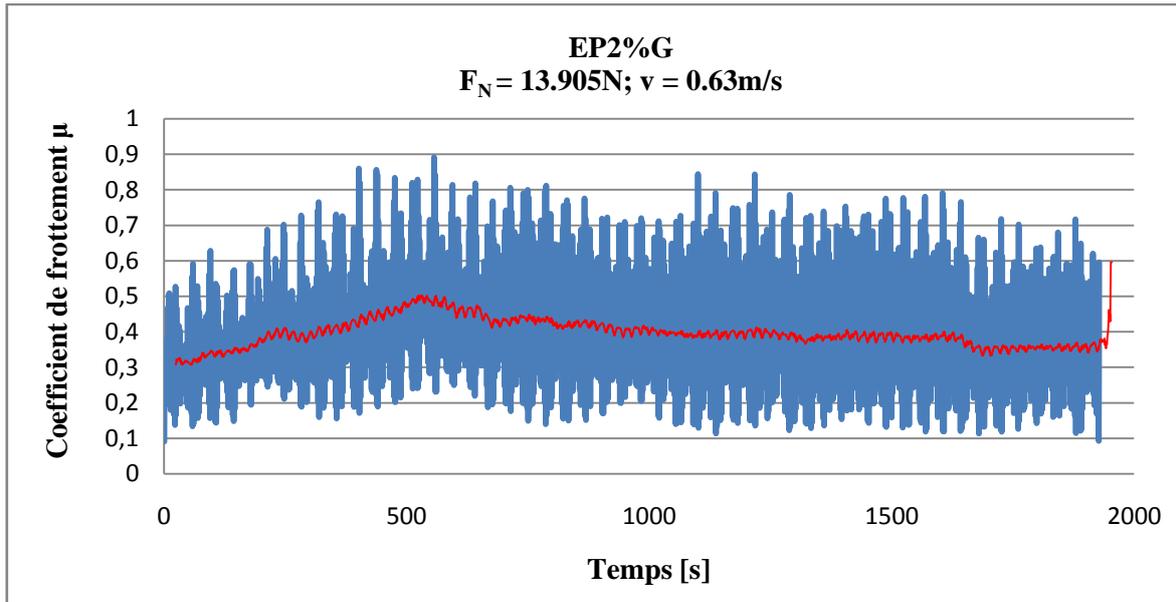


Figure A.21 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

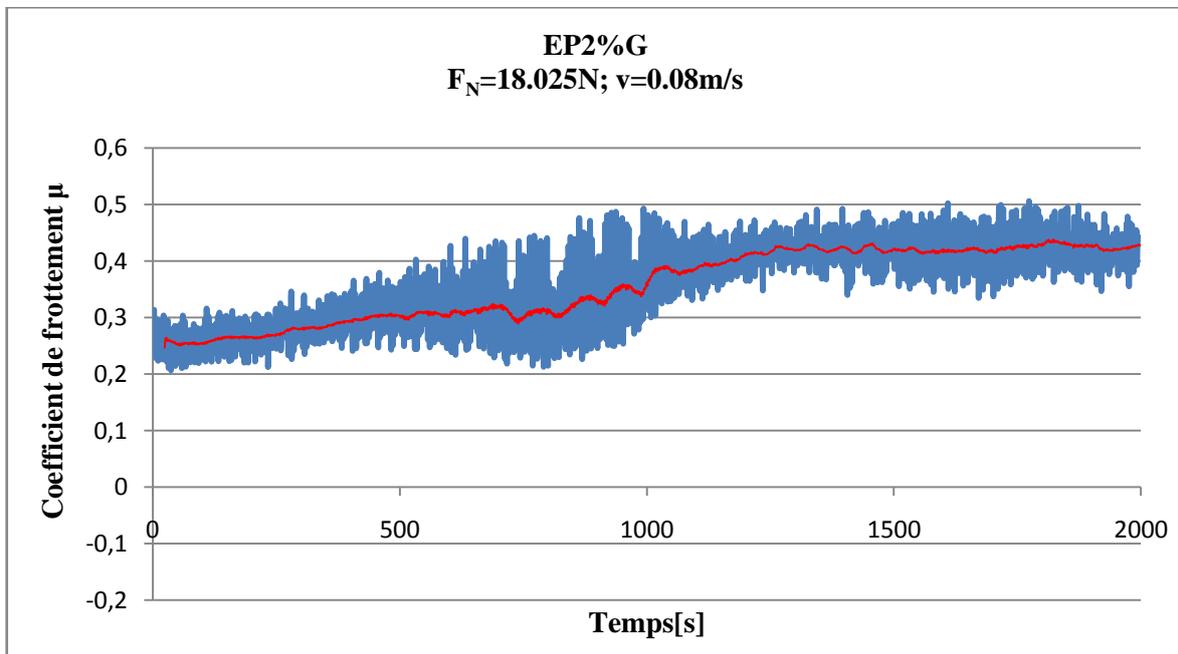


Figure A.22 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

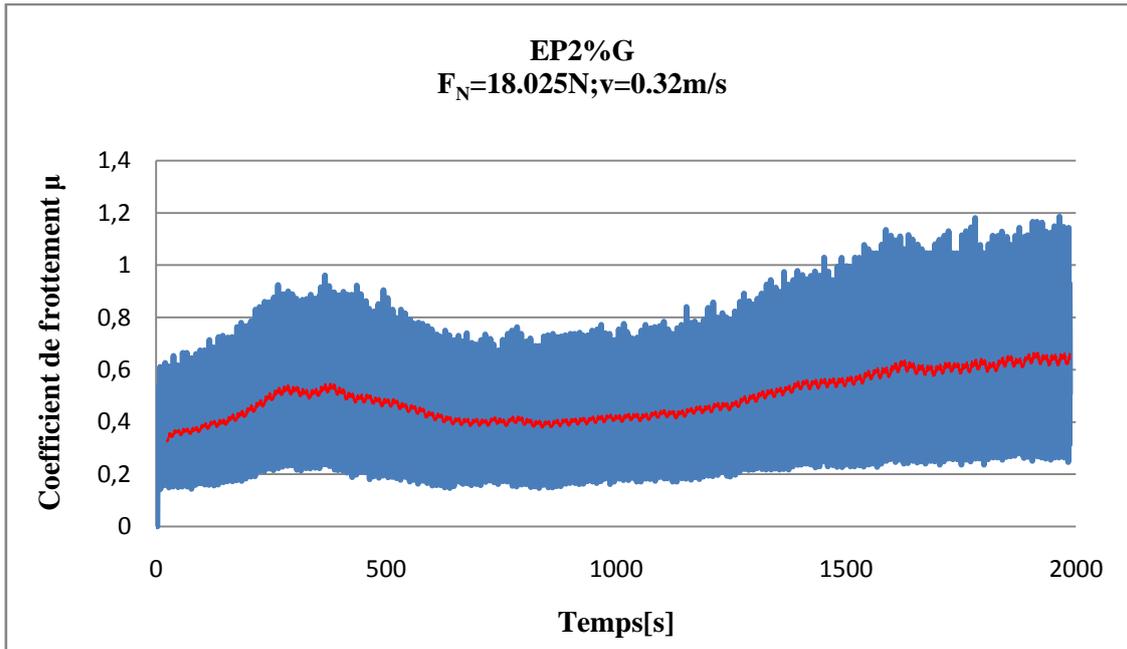


Figure A.23 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

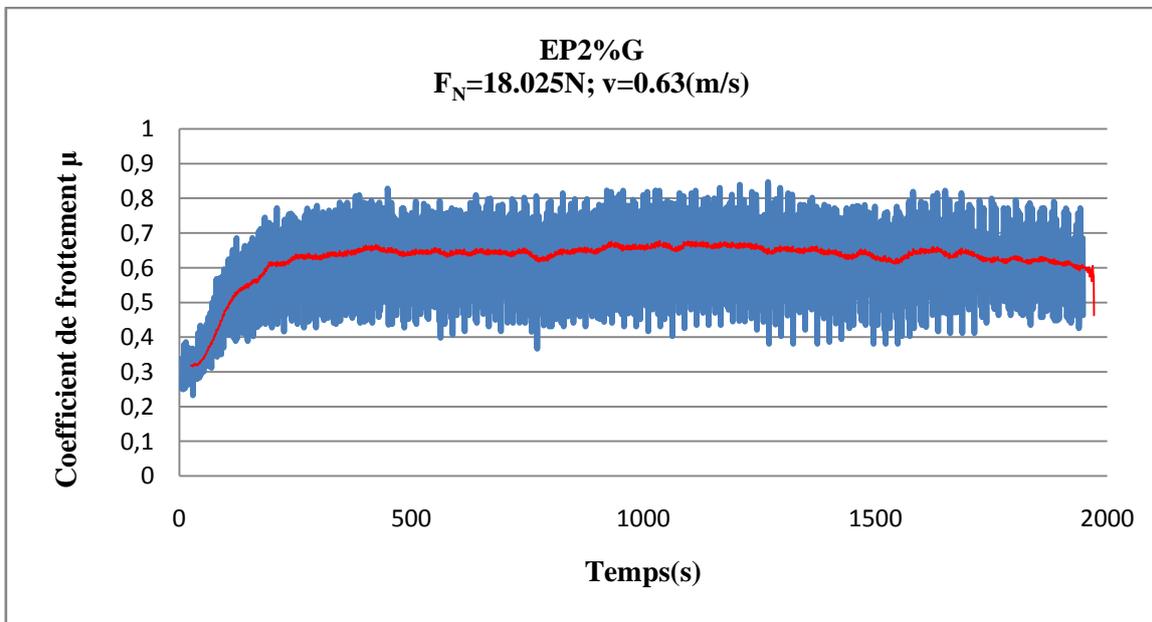


Figure A.24 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

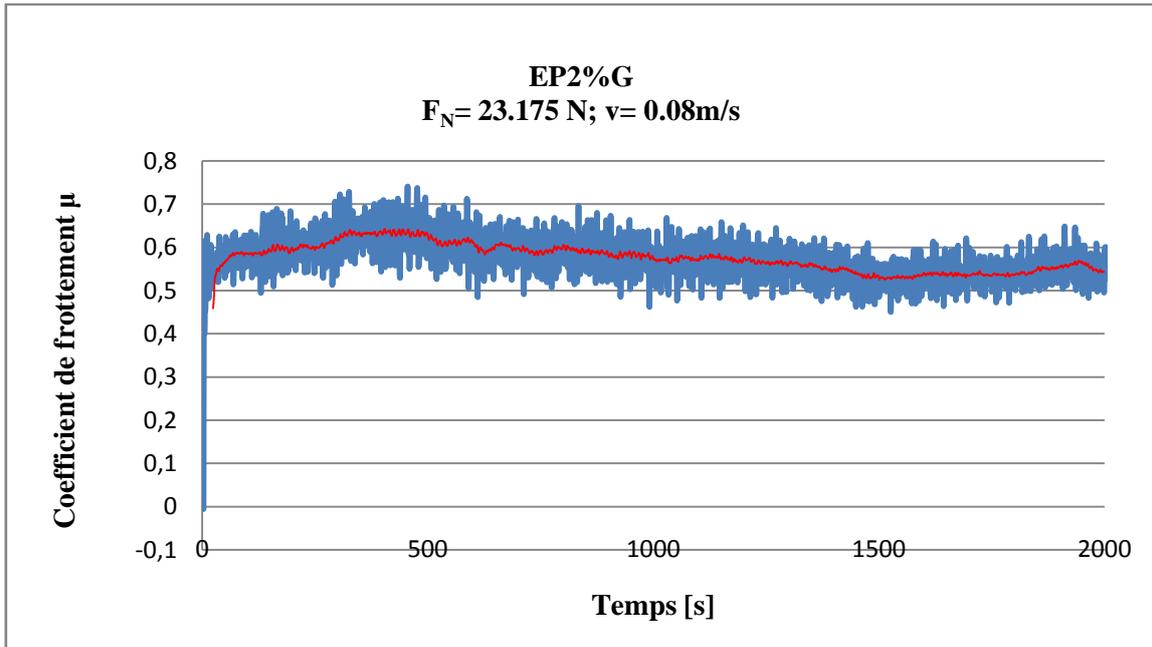


Figure A.25 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

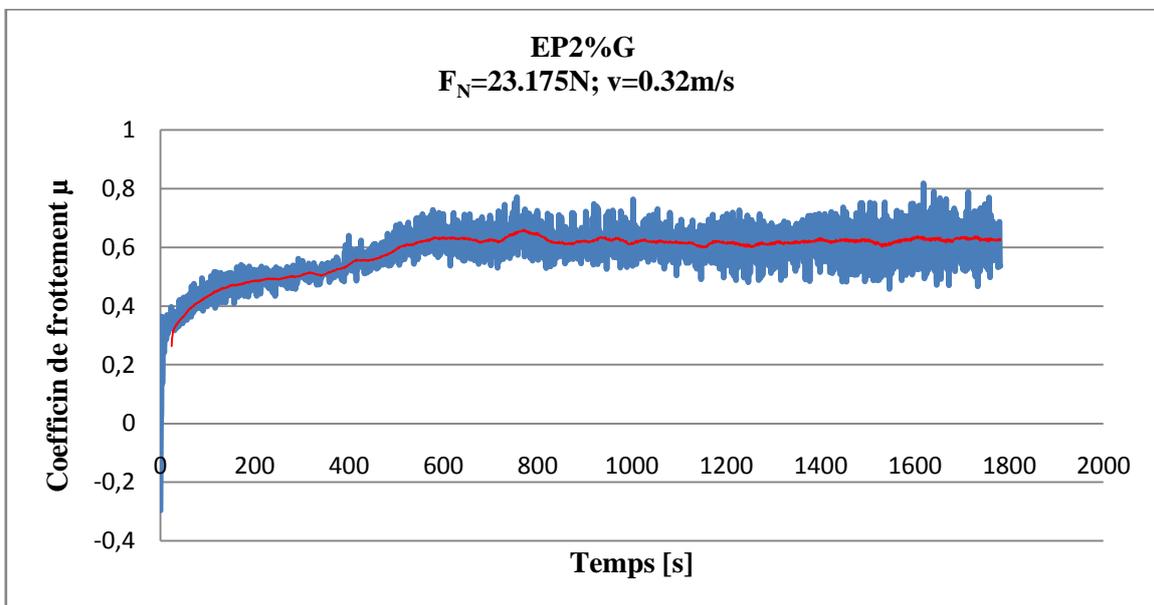


Figure A.26 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXES

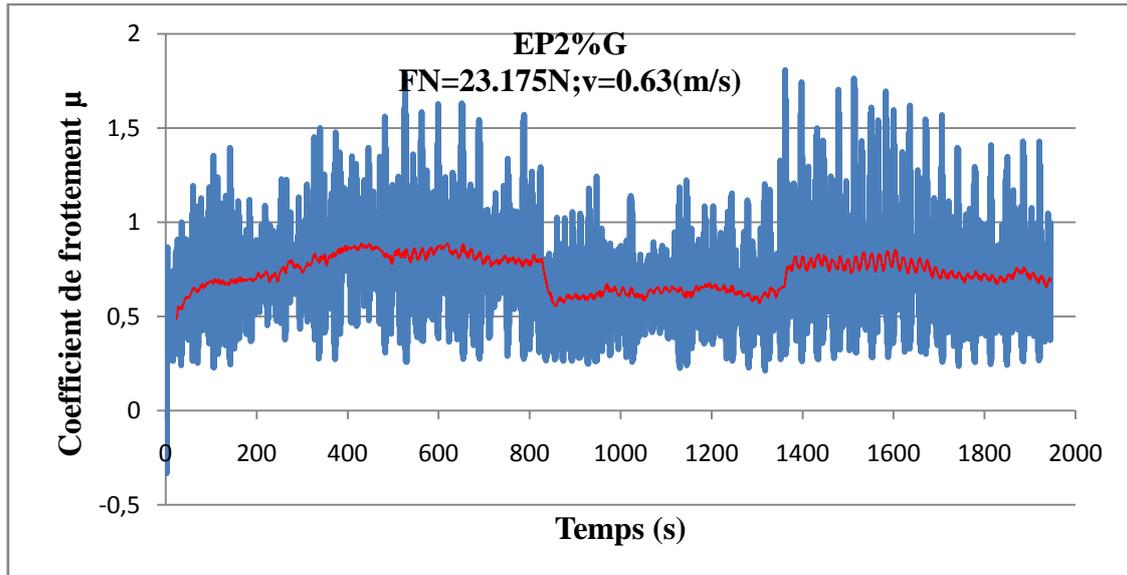


Figure A.27 : Évolutions du coefficient de frottement en fonction du temps