

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou
Faculté de Génie de la Construction
Département de génie mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option: Construction Mécanique

Intitulé du thème:

« Etude des propriétés tribologiques du composite polyester insaturé chargé de poudre de graphite en frottement avec un antagoniste en acier XC48 traité »

Proposé et dirigé par :

Mr: LARBI .S

Présenté par :

Mr: KELLOUD Youcef

Promotion: (2011-2012)

REMERCIEMENTS

Voici venu le temps (et ce n'est pas trop tôt diront certains...) de mettre un point final à ce manuscrit et de clore ce chapitre de ma vie, en adressant mes remerciements les plus sincères aux personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ce travail.

J'exprime mes profonds remerciements à mon encadreur M^r. LARBI.S, pour l'aide compétente qu'il m'a apportée et pour son encouragement. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différents chapitres.

Comme je tiens aussi à exprimer mes remerciements aux personnels du Hall de technologie d'Oued Assi, tout spécialement à M^r.Maghlat. A pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail.

J'exprime aussi mes remerciements à tout le personnel des laboratoires de génie mécanique

Je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail. Plus particulièrement, je remercie M^r A.BILEK pour m'avoir fait le plaisir de présider le jury et M^{rs} S.DJEBALI, M^r M. S RABIA pour l'attention particulière portée au manuscrit en leur qualité d'examineurs.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents ;

À mes chères sœurs ;

À mes chers frères ;

À tous mes amis (es).

Sommaire

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

Chapitre I : Eléments de tribologie

I.1. Introduction	2
I.2. Importance de la tribologie.....	2
I.3. Aspects scientifiques de la tribologie.....	4
I.4. Le système tribologique	4
I.5. Concept du troisième corps.....	5
I.6. Le triplet tribologique.....	5
I.7. Mécanisme d'accommodation de vitesse.....	7
I.8. Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes.....	8
I.8.1. Transformations Tribologiques Superficielles	8
I.8.2. Détachement de particules	8
I.9. Le circuit tribologique	8
I.10. Paramètres tribologique.....	10
I.10.1. Les paramètres opérationnels.....	10
I.10.2. Les paramètres structuraux	10
I.10.3. Les paramètres d'interaction	11
I.11. Mesures tribométriques.....	11
I.12. Conclusion	11

Chapitre II : Frottement

II.1. Introduction.....	13
II.2. Définition du frottement	13
II.3. Lois empiriques du frottement.....	14
II.4. L'origine des lois d'Amontons-Coulomb.....	16
II.5. Comportement du coefficient de frottement.....	18
II.5.1. Vitesse de glissement.....	18
II.5.2. Chemin de glissement parcouru.....	19
II.5.2. Etat de surface.....	20
II.5.3. Nature des métaux.....	20
II.5.4. Charge normale appliquée.....	20
II.5.5. Température ambiante.....	21
II.6. Les actions de contact.....	21
II.6.1. Adhérence et glissement.....	22
II.6.2. Détermination rapide du coefficient de frottement.....	25

II.7. Formulation du coefficient de frottement.....	26
II.8. Importance du coefficient de frottement	27
II.9. Matériaux utilisables pour le frottement.....	28
II.10. Frottement des métaux.....	28
II.11. Frottement des polymères	29
II.12. Frottement des céramiques	30
II.13. Conclusion	31

Chapitre III : Usure

III.1. Objectif.....	32
III.2. Introduction.....	32
III.3. Le phénomène d'usure.....	32
III.4. Les origines d'usure.....	32
III.5. Différents types d'usure.....	33
III.5.1. Usure par adhérence (usure adhésive).....	33
III.5.1.1. Les paramètres influant sur l'usure adhésive	34
III.5.1.1.1. Influence de l'environnement.....	34
III.5.1.1.2. Influence de la charge.....	35
III.5.1.1.3. Influence de la vitesse de glissement (à charge faible).....	36
III.5.1.1.4. Influence combinée – charge et vitesse.....	37
III.5.1.1.5. Influence de la température.....	38
III.5.1.2. Modélisation de l'usure adhésive.....	38
III.5.2. Usures abrasive et érosive.....	39
III.5.2.1. L'usure abrasive.....	39
III.5.2.2. Usure érosive.....	41
III.5.3. Usure par fatigue de contact.....	42
III.5.3.1. Généralités.....	42
III.5.3.2. Fatigue mécanique.....	43
III.5.3.3. Fatigue thermique.....	44
III.5.3.4. Facteurs influençant la fatigue de contact.....	44
III.5.4. Usure par réactions tribochimiques.....	45
III.6. Données et paramètres tribologiques	46
III.6.1. Taux d'usure.....	46
III.6.2. Valeur du produit $P \times V$	48
III.6.3. Densité d'énergie de frottement.....	50

Chapitre IV : Nature et comportement des surfaces en contact

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Définition.....	52
IV.3. Types de surface.....	53
IV.3.1. Surface d'un corps.....	53
IV.3.2. Surface géométrique.....	53
IV.3.3. Surface spécifiée.....	53
IV.3.4. Surface réelle.....	53
IV.3.5. Surface mesurée.....	53

IV.4. État structural et physique.....	57
IV.5. Structure granulaire des surfaces.....	58
IV.6. Les ordres de défauts d'une surface géométrique.....	58
IV.6.1. Défauts de forme.....	58
IV.6.2. Défauts d'ondulation.....	59
IV.6.3. Rugosité.....	59
IV.6.4. Le 5 ^{ème} et 6 ^{ème} ordre	59
IV.7. Caractérisation topographique des surfaces.....	61
IV.7.1. Ligne de référence.....	61
IV.7.2. Longueur de base (<i>li</i>).....	61
IV.7.3. Longueur d'évaluation (<i>ln</i>).....	62
IV.7.4. Ligne de référence des moindres carrés (ligne moyenne).....	62
IV.8. Enregistrement des états de surfaces.....	63
IV.9. Mesure de la rugosité.....	64
IV.9.1. Ecart quadratique moyen du profil (<i>Rq</i>).....	64
IV.9.2. Ligne de référence arithmétique (ligne centrale).....	65
IV.9.3. Ecart arithmétique moyen du profil (<i>Ra</i>).....	65
IV.10. Conclusion.....	66

Chapitre V : Partie expérimentale

V.1. Introduction	67
V.2. Procédure expérimentale.....	67
V.2.1. Dispositif expérimental	67
V.2.2. Nomenclature du banc.....	68
V.2.3. Principe de fonctionnement.....	69
V.3. Chaîne d'acquisition.....	69
V.4. Description du capteur de force.....	71
V.5. Identification des matériaux utilisés.....	71
V.5.1. Matériau des disques.....	71
V.5.2. Matériaux des pions.....	72
V.6. Présentation des couples tribologiques	72
V.6.1. Les disques	72
V.6.2. Les pions	73
V.6.2.1. Elaboration des plaques.....	73
V.7. Traitement thermique.....	74
V.7.1. Introduction.....	74
V.7.2. Cycle d'un traitement thermique.....	75
V.7.3. Traitements thermiques appliqués.....	75
V.7.3.1. Trempe.....	75
V.7.3.2. Le revenu.....	76
V.8. Examen métallographique.....	76
V.8.1. Introduction.....	76
V.8.2. Déroulement du traitement.....	77
V.8.4. Observation microscopique de l'acier XC48 avant traitement thermique.....	78

V.8.5. Observation microscopique de l'acier XC48 après traitement thermique.....	79
V.9. Essai de dureté.....	80
V.9.1. Introduction	80
V.9.2. Déroulement des essais.....	80
V.10. Mesure de l'état de surface des disques	81
V.11. Détermination des caractéristiques mécaniques des résines UP0%G ,UP1%G et UP2.....	82
V.11.1. Introduction.....	82
V.11.2. Machine de flexion.....	83
V.11.3. Géométrie des éprouvettes.....	84
V.11.4. Résultats des essais de flexion trois points.....	84
V.11.5. Interprétation des résultats.....	86
V.11.6. Conclusion	86
V.12. Essais d'usure.....	88
V.13. Résultats et discussions sur les essais d'usure.....	89
V.13.1. Coefficient de frottement.....	89
V.13.2. Perte de masse	97
V.13.3. Taux d'usure k.....	100
V.14. Conclusion.....	102

Conclusion générale

Liste des figures

Chapitre I : Eléments de tribologie

Figure I.1:	Représentation schématique d'un tribosystème	5
Figure I.2:	Représentation schématique des mécanismes d'accommodation de vitesse.....	7
Figure I.3:	Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides	9

Chapitre II : Frottement

Figure II.1:	Dessin de Léonard de Vinci, illustrant ses expériences démontrant l'indépendance du coefficient de frottement vis-à-vis l'aire de contact	14
Figure II.2:	(Gauche) description proposée par Coulomb de l'emboîtement des rugosités de surface, à l'origine des forces de frottement entre surfaces. (Droite) modélisation sommaire de l'emboîtement	16
Figure II.3:	Contact schématique entre deux surfaces. (gauche) deux surfaces commensurables. (droite) deux surfaces incommensurables	17
Figure II.4 :	Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement	19
Figure II.5 :	Evolution du frottement avec la distance de glissement	19
Figure II.6:	Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale N	21
Figure II.7:	Bloc parallélépipédique pressé sur un plan par une force normale N	23
Figure II.8 :	Poussée sans glissement	23
Figure II.8 :	Poussée sans glissement	24
Figure II.10 :	Définition des coefficients de frottement	27

Liste des figures

Chapitre III : Usure

Figure III.1 :	Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive	33
Figure III.2 :	Image montrant une surface endommagée par le processus d'usure adhésif	34
Figure III.3 :	Evolution de l'usure en fonction de la pression de contact	36
Figure III.4 :	Influence de la charge sur un contact – Frotteur en acier : (a) charge faible; (b) charge	36
Figure III.5 :	Différents types d'usure par abrasion	40
Figure III.6 :	Exemples du processus d'usure abrasive, utilisant un microscope à balayage électronique.....	40
Figure III.7 :	Effet de la dureté de l'abrasif sur la résistance à l'usure des métaux	41
Figure III.8 :	Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement	42
Figure III.9 :	Apparence d'une surface endommagée par fatigue	43
Figure III.10 :	Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés	50

Chapitre IV : Nature et comportement des surfaces en contact

Figure IV.1 :	Représentation schématique de la surface.....	54
Figure IV.2 :	Défauts d'ondulation.....	59
Figure IV.3 :	Rugosité de 3ième et 4ième ordre.....	59
Figure IV.4 :	Structure de surfaces (a)stries régulières ;(b) stries orientées ;(c) aspérités irrégulières.....	60
Figure IV.5 :	Grandeurs de rugosité normalisées.....	60
Figure IV.6 :	Profil total.....	60
Figure IV.7 :	Ligne de référence.....	61

Liste des figures

Figure IV.8 :	Longueur de base.....	62
Figure IV.9:	Ligne moyenne.....	62
Figure IV.10 :	Marteau cayère surface plane	64
Figure IV.11 :	Marteau cayère surface bombée.....	64
Figure IV.12 :	Marteau Cayère.....	64
Figure IV.13 :	Ecart quadratique moyen.....	65
Figure IV.14 :	Ligne de référence arithmétique.....	65
Figure IV.15 :	Ecart arithmétique moyen du profil <i>Ra</i>	66

Chapitre V : Partie expérimentale

Figure V.1 :	Vue du tribomètre (pion/disque)	68
Figure V.2 :	Chaine d'acquisition.....	69
Figure V.3 :	Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauge	71
Figure V.4 :	Géométrie du disque.....	73
Figure V.5 :	Geometrie des pions.....	73
Figure V.6 :	Forme du moule utilisé.....	74
Figure V.7 :	Plaques obtenues après polymerisation	74
Figure V.8 :	Cycle d'un traitement thermique.....	75
Figure V.9 :	Four électrique.....	76
Figure V.10 :	Micrographie de l'acier XC48 à l'état recuit.....	78
Figure V.11 :	Micrographie de l'acier XC48 après traitement thermique	79
Figure V.12 :	Duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC ».....	80
Figure V.13 :	Rugosimètre à palpeur.....	82
Figure V.14:	Dispositif d'essai et dimension de flexion trois points.....	83
Figure V.15 :	Machine de flexion Z20	84
Figure V.16 :	Géométrie des éprouvettes de flexion.....	84
Figure V.17 :	Evolution contraintes /déformation de la resine (UP0%G).....	85
FigureV.18 :	Evolution contraintes /déformation de la resine (UP 1% G).....	85
Figure V.19 :	Evolution contraintes /déformation de la resine (UP 2% G).....	86
Figure V.20 :	Influence de l'ajout de graphite sur les contraintes à rupture.....	87
Figure V.21 :	Influence de l'ajout de graphite sur la déformation à rupture	87

Liste des figures

Figure V.22 :	Influence de l'ajout de graphite sur l'énergie de déformation.....	88
Figure V.23 :	Influence de l'ajout de graphite sur le module de Young.....	88
Figure V.24 :	Balance électronique.....	89
Figure V.25 :	Exemple d'évolution de l'effort normal en fonction du temps	90
Figure V.26 :	Exemple d'évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps ...	90
Figure V.27 :	Exemple d'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps	90
Figures V.28 à V.36 :	Variation du coefficient de frottement en fonction du temps	91 à 95
Figure V.37 :	Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'effort normal et de la vitesse linéaire de glissement des trois matériaux étudiés.....	95
Figure V.38 :	Effet de la charge normale sur le coefficient de frottement de (a) PA6 et (b) ses composés dans le glissement sec et la condition lubrifier	96
Figure V.39 :	Evolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue de la résine UP0%G pour $V=0.32\text{m/s}$	98
Figure V.40:	Evolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue de la résine UP1%G pour $V=0.32\text{m/s}$	98
Figure V.41 :	Evolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue de la résine UP2%G pour $V=0.32\text{m/s}$	99
Figure V.42 :	Perte de masse en fonction de la charge pour les trois compositions.	99
Figure V.43 :	Evolution du taux d'usure en fonction de l'effort normal pour les trois compositions pour une vitesse $v=0,32\text{m/s}$	100
Figure V.44 :	Effet de charge normale sur le taux spécifique d'usure (a) de PA6 et (b) de sa PA6/CNT dans le glissement sec et la condition lubrifiée	101
Figure V.45 :	Taux d'usure de chaque matériau, pour une distance de glissement de 15 kms, pour un produit $pv = 2 \text{ m/s MPa}$	101

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Impacts de la tribologie sur la société.....	3
Tableau III.1 : Coefficient de transfert dans différentes conditions de contamination superficielle.....	35
Tableau III.2 : Coefficients d'usure dans différentes situations tribologiques.....	39
Tableau V.2 : Taux d'usure K en fonction de l'effort normal pour les trois compositions	100

Nomenclature des grandeurs physiques

P	Charge normale appliquée [N]
v	Vitesse de glissement [m/s]
T	Température [°C]
t	Temps[s]
μ_s	Coefficient de frottement statique (sans dimension)
μ_d	Coefficient de frottement dynamique (sans dimension)
μ, f	Coefficients de frottement (sans dimension)
μ_r	Coefficient de roulement (sans dimension)
k	Taux d'usure [$\text{mm}^3/\text{N.m}$]
K	Coefficient d'usure
E_f	Densité d'énergie de frottement [N.m]
F_T	Force tangentiel [N]
F_N	Force normal [N]
F_S	Force statique [N]
F_D	Force dynamique [N]
f_0	Coefficient d'adhérence
Ψ	L'index de plasticité
σ	Ecart type de la distribution des hauteurs d'aspérités
R	Rayon de courbure du sommet des aspérités.
Δm	Perte de matière résultant de l'usure [g]
L	Distance de glissement parcourue [m]
T_F	Température de fusion [°K]
H	Dureté
R_a	Rugosité moyenne [μm]
R_q	Rugosité quadratique moyenne [μm]
R_m	Resistance à la traction [Mpa]
A	Allongement [%]
D	diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte en [mm]

Nomenclature des grandeurs physiques

E	Module du Young [MPa]
σ_f	la contrainte normale(MPa).
ϵ	Déformation relative
σ_r	Contrainte à rupture [MPa]
ϵ_r	Déformation à rupture
ρ	masse volumique [g/cm^3]

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La demande industrielle pour l'amélioration de la résistance aux frottements et à l'usure de pièces, tant mécaniques que de structure, est en constante croissance depuis plus de 20 ans. Elle se justifie notamment par la volonté de réduire les pertes considérables liées aux phénomènes de frottement et usure. Il est généralement admis qu'elles 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. Dans ce contexte, la stratégie industrielle est souvent de recourir aux *composites* pour améliorer les performances et allonger la durée de vie d'un système mécanique. En outre, il est demandé de plus en plus fréquemment aux pièces de résister à des sollicitations impliquant simultanément plusieurs phénomènes (frottement, abrasion, corrosion, chocs, ...). Le matériau composite trouve ici tout son intérêt. Chacune des phases, en gardant ses propriétés intrinsèques dans le matériau composite, apporte de nouvelles combinaisons de propriétés physiques, mécaniques, thermiques, ...

Ces dernières années, des composés de polymère sont de plus en plus employés dans des applications tribologiques pour remplacer les matériaux métalliques dus à leurs transformations faciles et excellente résistance à l'usure.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout de graphite à différents pourcentages en masse sur les propriétés tribologiques (coefficient de frottement, perte de masse et taux d'usure) d'un pion en polyester thermodurcissable à différentes vitesses et chargements.

Ce mémoire est organisé en cinq 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 porte sur les états géométriques des surfaces.

Le cinquième 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.

CHAPITRE I:
Eléments de tribologie

1.1. Introduction

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques *tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. La tribologie est ainsi une branche de la mécanique qui concerne le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides. Le Frottement et l'usure se produisent à la surface entre deux solides en contact. La lubrification permet de séparer les surfaces en contact par un film lubrifiant et par conséquent de limiter l'usure. Il s'agit donc d'une science pluridisciplinaire s'appuyant à la fois sur les bases fondamentales de la mécanique et sur les acquis récents de la science des matériaux, en passant par la physico-chimie des surfaces. De tout temps, l'homme a cherché à réduire le frottement et éviter l'usure. De nos jours, la tribologie est présente dans les applications industrielles les plus évoluées (adhérence du contact roue/rail) comme dans la vie de tous les jours (écriture avec une craie sur un tableau, ...).

La tribologie s'est tout d'abord intéressée principalement au volume des matériaux en contact par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces a fait son apparition associée à la physico-chimie des surfaces (approche matériaux) pour enfin arriver à la tribologie des interfaces (approche complémentaire mécanique/matériaux). Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure. [1]

1.2. Importance de la tribologie

On observe des phénomènes de frottement dans tous les systèmes mécaniques, et cette composante tribologique est décisive dans les domaines d'application variés qui vont de la mécanique industrielle aux systèmes du vivant.

La tribologie s'intéresse à l'étude et à l'interprétation scientifique des faits expérimentaux, elle entre en jeu de façon significative dans de nombreux domaines

industriels. La connaissance de la tribologie est devenue une nécessité pour de multiples raisons:

- 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.
- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine de transport,
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits, très nombreux, liés aux contacts mécaniques.

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]

1.3. Aspects scientifiques de la tribologie

La tribologie est un domaine pluridisciplinaire, dans lequel interviennent, bien sur, les bases fondamentales de la mécanique, mais aussi les aspects scientifiques multiples de la science des matières. Les échelles dimensionnelles des phénomènes étudiés vont en général du mètre (caractéristique des dimensions d'une machine) à l'angström (caractéristique des interactions d'origine atomique et moléculaire). L'analyse scientifique de la tribologie peut se structurer en trois grands domaines qui concernent les matériaux, les surfaces et les écoulements de la matière. Le comportement des matériaux apparaît comme un élément essentiel. Selon leur ductilité ou leur fragilité, la nature de leur contact diffère énormément, et les lois de frottement et d'usure varient aussi. La compréhension des lois physico-chimiques des surfaces permet dans certains cas, d'apercevoir l'origine de leurs comportements particuliers. La compréhension de la tribologie nécessite l'application des lois de la mécanique des fluides complexes, de la mécanique des solides, pour pouvoir les régimes de lubrification.

On dit d'une science qu'elle a l'âge de ses instruments de mesure. La tribologie, qui utilise les toutes dernières avancées de la physique, de la chimie, de la mécanique et aussi de l'informatique, est donc une science jeune et actuelle.

Enfin, les efforts entrepris dans le domaine de la tribologie ne concernent pas uniquement les laboratoires de recherche, mais les laboratoires industriels aussi.

1.4. Le système tribologique

La tribologie des interfaces concerne le milieu inter facial entre les deux corps en contact. On définit ainsi un contact tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (Figure I.1) : deux solides (A) et (B) en contact (premiers corps) et le milieu inter facial (I) désigné sous le terme de troisième corps. 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 in situ (détachement de particules des premiers corps). Ce tribosystème se trouve dans un

environnement (E) qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle,

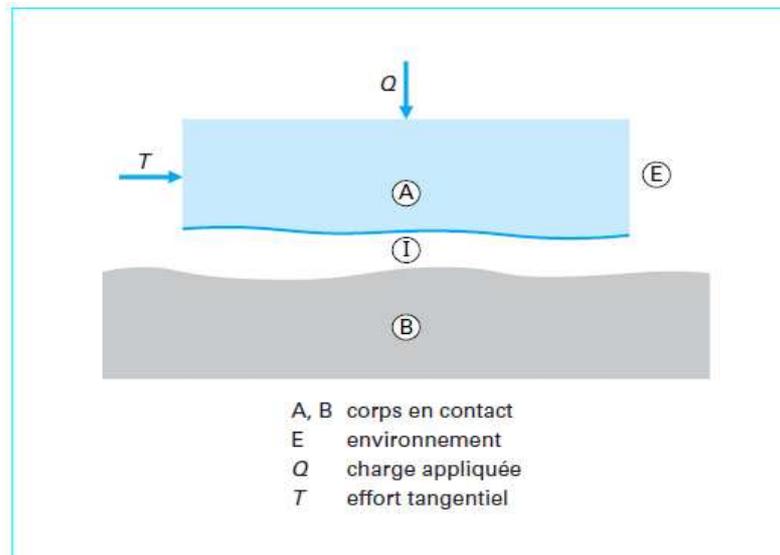


Figure I.1 : Représentation schématique d'un tribosystème [3]

1.5. Concept du troisième corps

Avec l'approche de la tribologie des interfaces, M. Godet et Y. Berthier proposent le concept phénoménologique du troisième corps, 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. [1]

1.6. Le triplet tribologique

Le triplet tribologique est constitué par le mécanisme, de trois 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 extérieures au contact. [4]

✓ Le mécanisme

C'est l'ensemble du système mécanique qui impose les conditions de fonctionnement et via l'équilibre de forces internes (aspect mécanique) et via l'environnement ambiant (aspect physicochimique).

✓ Les premiers corps

Ce sont les matériaux délimitant le contact et à travers lesquels les efforts sont transmis. Ils interviennent par leurs structures et leurs propriétés thermo-mécaniques, 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

C'est le volume de matière séparant les premiers corps. Des '*particules élémentaires*' sont détachées d'un ou des deux premiers corps et s'agglomèrent. Cet agglomérat de particules constitue le troisième corps. Ces particules peuvent être piégées ou refoulées du contact.

- 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 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. On peut injecter un troisième corps dit '*artificiel*' comme le graphite par exemple.

I.7. Mécanisme d'accommodation de vitesse

Le modèle proposé par Y. 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 sites (S_i) où peut s'effectuer l'accommodation de vitesse (Figure I.2). Ces sites sont au nombre de cinq(5) : les deux premiers corps (sites S_1 et S_5), le troisième corps (site S_3) et les interfaces ou écrans entre les premiers corps et le troisième corps constitués de couches de pollution, de molécules adsorbées, ... (sites S_2 et S_4). Chaque site est susceptible d'accommoder les vitesses selon quatre modes différents (M_j) : M_1 correspond à l'accommodation de vitesse par déformation élastique, M_2 par fissuration ou rupture normale, M_3 par cisaillement longitudinal et M_4 par roulement.

Les différentes combinaisons S_iM_j constituent ainsi les vingt mécanismes d'accommodation de vitesse qui peuvent exister dans un contact.

Dans la vie d'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.

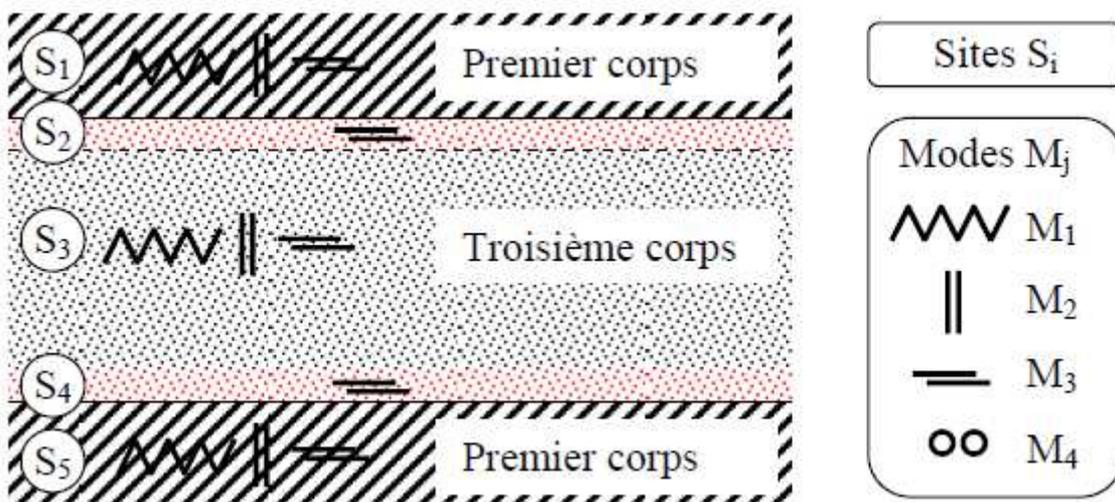


Figure I.2 : Représentation schématique des mécanismes d'accommodation de vitesse.

[5]

1.8. Mécanismes d'endommagement des surfaces frottantes

Les premiers corps réagissent aux contraintes locales selon deux types de comportements : des transformations microstructurales et des détachements de particules.

1.8.1. Transformations Tribologiques Superficielles

Sous l'effet des sollicitations mécaniques et thermiques, les premiers corps subissent des modifications de leurs propriétés superficielles, conduisant à des transformations de phase et des modifications structurales. L'ampleur de ces changements dépend de la pression (pression hydrostatique et la pression du contact local) et les déformations induites par la température. Ces changements sont connus sous le nom '*Transformations Tribologiques Superficielles*' (Tribologically Transformed Structures) ou TTS.

1.8.2. Détachement de particules

L'apparition de TTS entraîne une modification du champ de contraintes et des déformations admissibles par le matériau, conduisant à un détachement de particules par '*fragilisation*' des surfaces du matériau (particules dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres [Jullien, 1996]). Les mécanismes d'usure tels que l'abrasion, l'adhésion etc., peuvent être considérés comme des '*réponses spécifiques*' alimentant le troisième corps.

1.9. Le circuit tribologique

Au cours du frottement, les particules du troisième corps sont constamment en mouvement et sont soumis à des gradients de vitesse. 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 [BER90] 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.3).

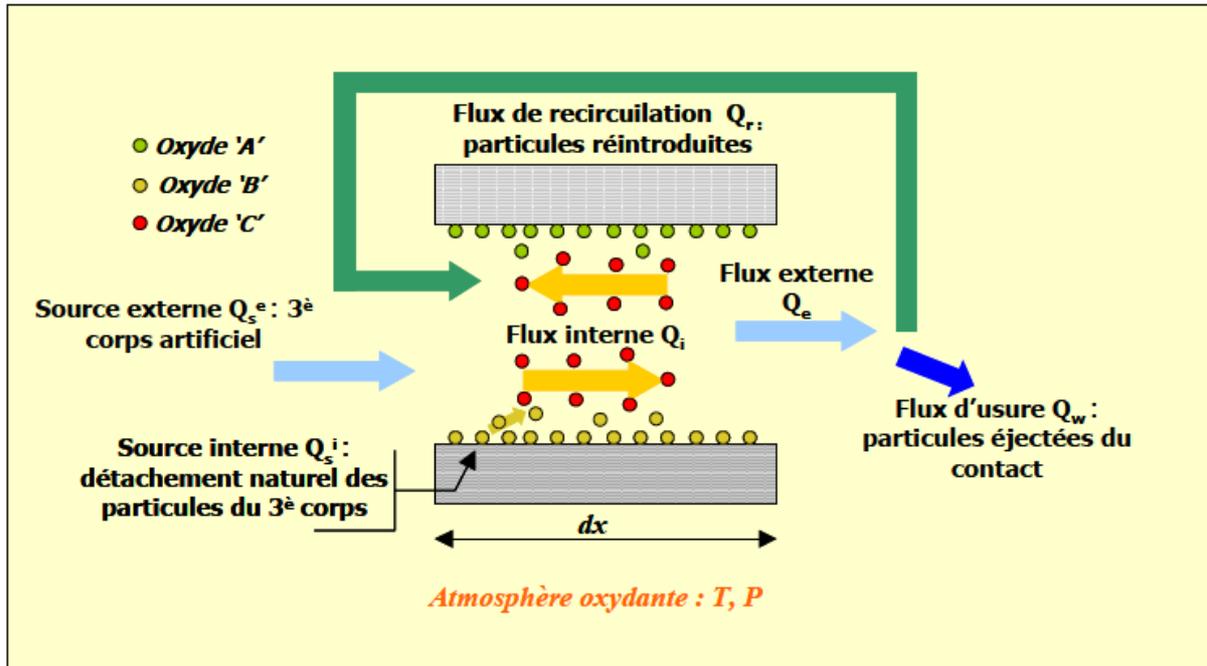


Figure I.3 : Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides. [4]

Suivant les mécanismes de dégradation de surface qui seront décrits dans le paragraphe suivant, des particules peuvent se détacher des premiers corps du fait de leur dégradation. Il s'agit d'une source interne qui conduit à la formation d'un troisième corps naturel dans le contact (débit source interne). L'introduction d'un troisième corps artificiel (lubrifiant solide ou liquide) correspond à une source externe (débit source externe). Ces particules de troisième corps peuvent rester piégées dans le contact ou bien être évacuées hors du contact. On parlera alors de débit interne et externe. Le débit interne représente la circulation du troisième corps dans le contact. Le débit externe est le débit de troisième corps qui s'échappe du contact. Il se divise en deux composantes : un débit de recirculation lorsque les particules sont réintroduites dans le contact et un débit d'usure lorsque les particules sont définitivement perdues pour le contact et ne participent plus à l'accommodation de vitesse.

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,...).

1.10. Paramètres tribologique

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.

1.10.1. 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 **P**, la vitesse **V**, le temps **t** et la température **T**.

1.10.2. 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^{eme} corps, lubrifiant, graisse, sable/eau)
- L'environnement (air, huile, poussière)

Une distinction doit être faite entre les systèmes ouverts qui permettent l'écoulement systèmes fermés dont les composants sont soumis aux processus de frottement et usure de manière continue.

1.10.3. Les paramètres 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.

1.11. 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 déterminée 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 $P \cdot V$.

Les formules et explications nécessaires à ces paramètres sont données dans le chapitre usure.

1.12. Conclusion :

Confronté aux exigences du monde moderne, la tribologie doit affronter des situations nouvelles. L'accroissement des performances, la miniaturisation des composants, les soucis d'économie d'énergie et de matières, les exigences de fiabilité et de longévité, la variété des environnements (vie spatiale, températures élevées, milieux cryogéniques ou chimiquement agressifs, protection environnementale ou

sanitaire...), l'introduction de nouveaux matériaux et l'interdiction de certains d'autres conduisent à mettre en œuvre de nouveaux concepts et de nouvelles solutions pour résoudre les problèmes tribologiques. Des recherches fondamentales et finalisées sont souvent associées pour prendre en compte la complexité et la variété des situations, les approches interdisciplinaires favorisées. L'amélioration des techniques connues ou la création de nouvelles (sustentation magnétiques, nano tribologie, biotechnologie, tribologie spatiale...) fait apparaître de nouveaux aspects concernant la compréhension du frottement, la conception des mécanismes, des matériaux à usage tribologique, des traitements et revêtements de surfaces, des méthodes et moyens de lubrification.

CHAPITRE II :
Frottement

II.1. Introduction

La tribologie est la science des frottements. Le 'frottement' intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. La notion même de frottement est en fait très intuitive pour tout un chacun, essentiellement car nous pouvons ressentir - physiquement - ses effets dans la vie quotidienne : se frotter les mains pour se réchauffer, craquer une allumette, jouer du violon, glisser sur la glace, freiner une voiture, entendre un crissement de craie sur un tableau, etc. On pourrait multiplier les exemples à l'infini. La plupart de ces phénomènes peut se comprendre sur la base des lois du frottement énoncées dès le 18^{ème} siècle par Amontons et Coulomb (mais déjà mises en évidence par Léonard de Vinci 200 ans), à partir de la notion de coefficient de frottement. Pourtant l'évidence apparente de ce '**vieux problème**' cache l'extrême complexité sous-jacente. L'origine du frottement fait intervenir une multitude d'ingrédients, couvrant un spectre très large de phénomènes physiques : rugosité des surfaces, élasticité, plasticité, adhésion, lubrification, thermique, usure, chimie des surfaces, humidité, etc. Il y a donc un contraste paradoxal entre la simplicité de lois du frottement et la complexité des phénomènes sous-jacents, qui a constitué un défi majeur intriguant l'imagination des scientifiques depuis près de 500 ans.

II.2. Définition du frottement

Une définition de ce que nous entendons par *frottement* mérite d'être donnée en raison de la complexité de la nature du frottement et du caractère interdisciplinaire de ce champ de recherche, qui requiert l'expérience et les connaissances des chimistes, des ingénieurs, des métallurgistes et des physiciens. [6]

- 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. Lois empiriques 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.

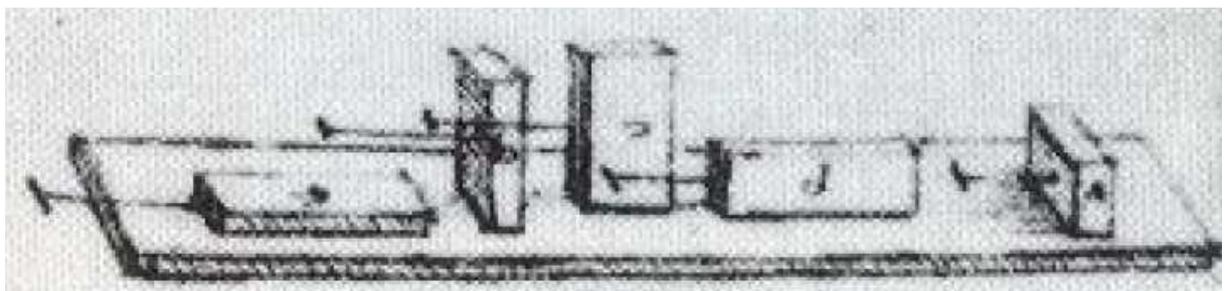


Figure II.1 : dessin de Léonard de Vinci, illustrant ses expériences démontrant l'indépendance du coefficient de frottement vis-à-vis l'aire de contact.

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 : [6]

$$F_T = \mu F_N$$

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 de 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 :

$$\mu_s = F_S / F_N$$

$$\mu_D = F_D / F_N$$

Là où F_S est la force juste suffisamment pour empêcher le mouvement relatif entre deux corps, F_D 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. L'origine des lois d'Amontons-Coulomb

Les lois du frottement énoncées précédemment sont très simples dans leur formulation qui ne nécessite que l'introduction de coefficients sans dimension (μ_s et μ_D). Pourtant l'évidence apparente de ces lois cache l'extrême complexité sous-jacente.

Les premières tentatives d'explication des lois du frottement ont été proposées par Belidor et Coulomb au 18^{ème} siècle, ils ont associé l'existence du frottement à la rugosité des surfaces. L'idée originale se base sur l'emboîtement des rugosités de surface qui conduit à l'existence d'un coefficient de frottement (figure II.2). Une schématisation simple de cette idée est représentée avec deux surfaces présentant des rugosités en dents de scie.

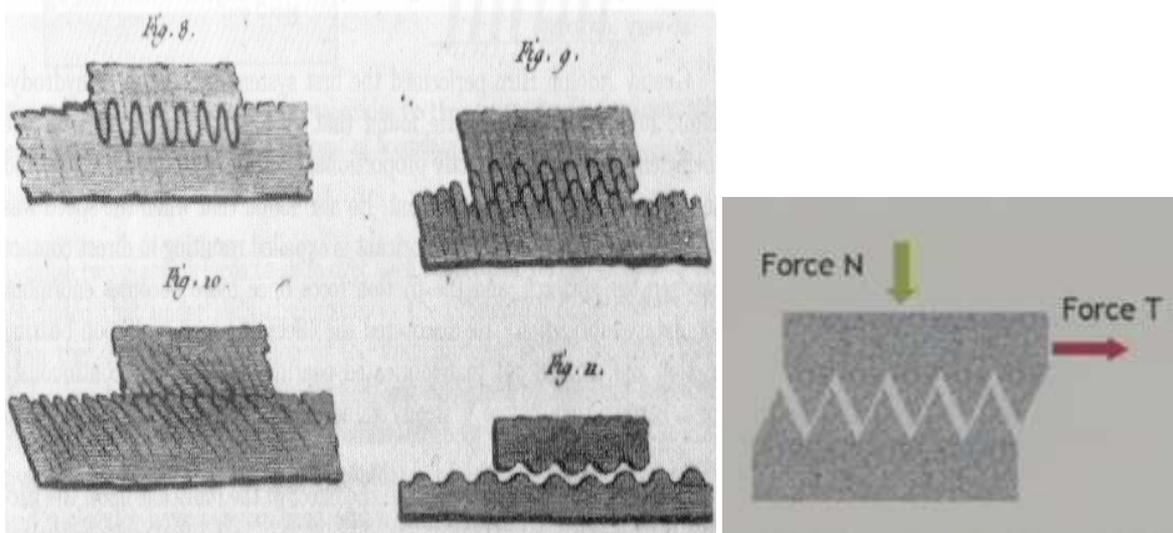


Figure II.2 (Gauche) description proposée par Coulomb de l'emboîtement des rugosités de surface, à l'origine des forces de frottement entre surfaces. (Droite) modélisation sommaire de l'emboîtement.

Si l'on applique une force normale N sur la surface supérieure et une force horizontale T , un bilan des forces horizontales permet de montrer que l'équilibre des forces est rompu lorsque la force tangentielle est supérieure à une valeur de rupture :

$T_{\max} = \mu_s |N|$, définissant ainsi un coefficient de frottement statique $\mu_s = \tan(\alpha)$. L'angle est ici la pente de la rugosité par rapport à l'horizontal. Pour simpliste qu'il soit, cet

argument permet de lier le frottement (statique) aux caractéristiques de la rugosité. De plus, les valeurs expérimentales typiques des coefficients de frottement statique, de l'ordre de 0,3 correspondent, à des pentes de la rugosité de surface de 15-20° environ, est tout à fait compatible avec les caractéristiques typiques mesurable pour les rugosités des surfaces.

Cet argument repose sur une hypothèse implicite : l'emboîtement parfait entre les rugosités des deux surfaces, tel qu'illustré sur la figure (droite), et sur la figure (gauche) pour une surface schématique à l'échelle « atomique ». On parle dans ce cas de surfaces commensurables. Ce n'est bien sûr pas le cas en général dans la nature : même à l'échelle atomique, deux surfaces idéales, telles que celles qui sont représentées à l'échelle atomique sur la figure, présentent des légères différences de distance interatomique. Une légère disparité suffit à rendre très irrégulière la répartition des points de contact entre les deux surfaces (voir figure droite), contrairement au cas commensurable (figure gauche). On parle alors de surfaces incommensurables.

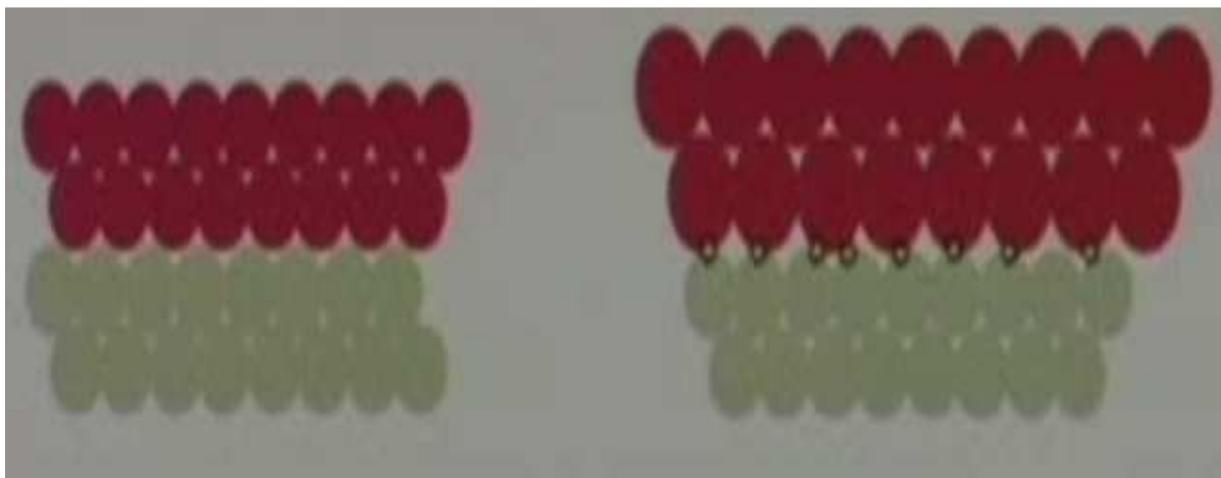


Figure II.3 : contact schématique entre deux surfaces. (Gauche) deux surfaces commensurables. (Droite) deux surfaces incommensurables.

On peut montrer comme précédemment que la répartition irrégulière des contacts entre surfaces incommensurables conduit à l'annulation des forces de frottement tangentielle : la force de frottement statique est identiquement nulle entre surfaces

incommensurables ! Autrement dit, on aboutit à la conclusion que le frottement entre deux surfaces commensurables est non nul, tandis qu'il s'annule exactement si ces deux surfaces sont incommensurables.

Ce résultat très étonnant à été confirmé pour la première fois dans des expériences très récentes par le groupe de M. Hirano et collaborateurs au japon, puis confirmé par d'autres groupes de recherche, notamment pour des surfaces de graphite. [18]

II.5. Comportement du coefficient de frottement

Le coefficient de frottement dynamique, dans un glissement à sec (sans lubrification), est affecté par un nombre de paramètres plus important que le coefficient de frottement statique et a peu de signification sans une définition précise des conditions de frottement. [2]

Les principaux paramètres qui interviennent sont :

II.5.1. 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 .

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure II.4, 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.4.

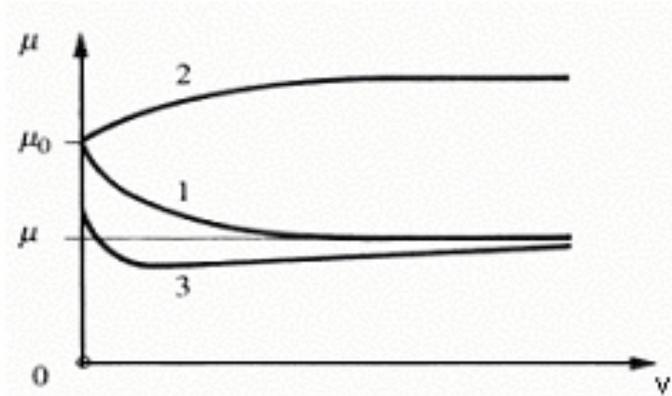


Figure II.4 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.

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

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.5.2. Chemin de glissement parcouru

La figure II.5 représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement.

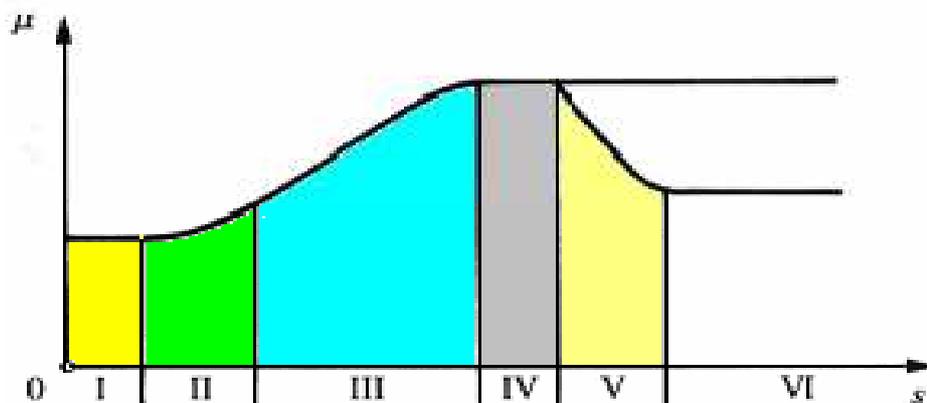


Figure II.5 : Evolution du frottement avec la distance de glissement.

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.5.2. Etat de surface

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

II.5.3. 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.5.4. Charge normale appliquée

La figure II.7 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.

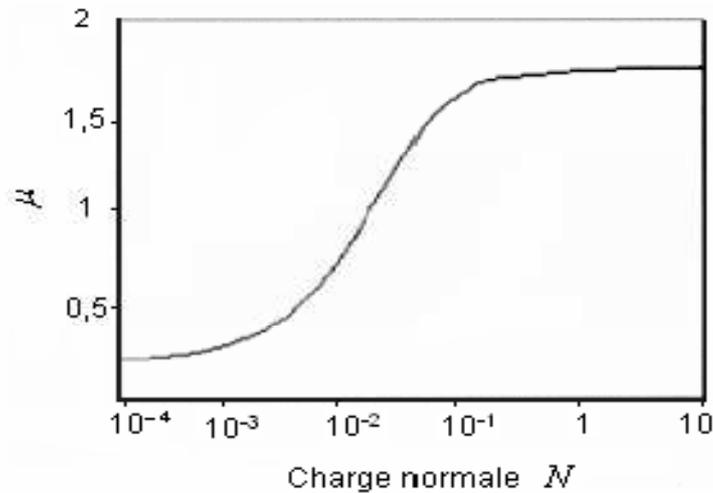


Figure II.6: Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale N .

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.5.5. 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.

II.6. Les actions de contact

Le terme action de contact désigne l'ensemble des efforts extérieurs, force et moment, appliqués sur un système mécanique par d'autres objets qui le touche. Ce sont ces efforts que nous allons tenter de représenter ici, sous la forme de modèles. La plupart du temps, leur répartition est très complexe et il est difficile, voire impossible de les modéliser autrement que par des méthodes statiques : par exemple, le comportement global d'un pneumatique sur une chaussée peut être étudié sans trop de

problème, mais pas le contact, à l'instant t , entre les sculptures du pneumatique et les aspérités du revêtement.

Pour être efficace, il faut parfois renoncer à tout connaître. Reste à déterminer les limites de l'étude.

Le mouvement relatif général de deux surfaces en contact peut être considéré comme la combinaison de trois mouvements élémentaires : le glissement, le pivotement et le roulement. Selon le cas, chacun de ces trois mouvements peut être empêché ou freiné par l'adhérence et/ou le frottement. Par exemple, dans des conditions normales, les roues d'un véhicule roulent sans glisser sur le sol. En outre, il existe des interactions : sans direction assistée, il est beaucoup plus facile de tourner le volant d'une automobile lorsqu'elle est arrêtée, le fait que le pneu roule lui permet de pivoter plus facilement.

Il est bien rare qu'une machine puisse fonctionner sans que l'on ait tenu compte des résistances passives. L'ingénieur doit donc :

- Les mettre à profit pour garantir l'adhérence d'une roue sur le sol, l'efficacité d'un frein ou d'un embrayage, la tenue en service d'un assemblage boulonné,....
- Ou les combattre, afin d'améliorer les rendements mécaniques, d'économiser l'énergie, d'obtenir de meilleures performances

Dans les deux cas, il doit être capable de définir et de quantifier les phénomènes susceptibles de se produire, ce qui suppose qu'il puisse créer des modèles rendant aussi fidèlement que possible de la réalité.

II.6.1. Adhérence et glissement

Un bloc parallélépipédique est pressé sur un plan par une force normale N . naturellement, cette force est compensée par l'ensemble des actions exercées par le plan sur le bloc, actions qui n'ont pas été dessinées ici puisque le bloc n'est pas isolé.

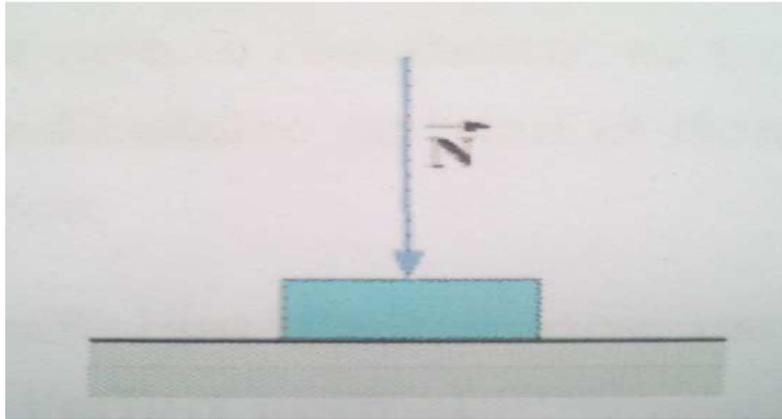


Figure II.7 : Bloc parallélépipédique pressé sur un plan par une force normale N .

Appliquons maintenant au bloc une force T parallèle au plan, cette fois, le bloc a été isolé, ce qui nous permet de dessiner la résultante R de toutes les petites forces élémentaires qu'il reçoit de la part du plan. Tant que T reste faible, rien ne bouge, le bloc est en équilibre : les trois forces ont des supports coplanaires, concourants, et leur somme est nulle. Remarquons, en passant, que le point d'application de la résultante R n'est pas au centre du bloc mais légèrement décalé « vers l'avant ».

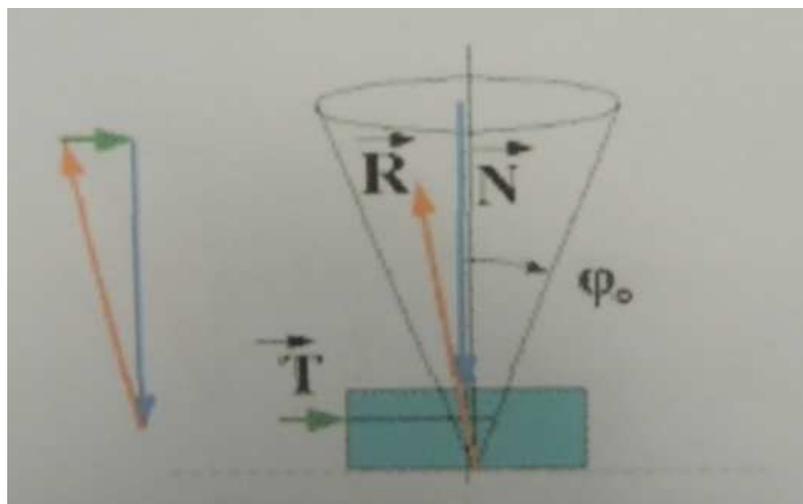


Figure II.8 : Poussée sans glissement.

Le fait que la poussée T ne provoque aucun mouvement prouve qu'il existe dans le contact des forces suffisantes pour maintenir le bloc immobile. On dit alors qu'il y a adhérence (et non pas adhésion, terme utilisé dans le cas du collage).

La résultante R est dans le même plan que N et T , elle est située, par rapport à la normale, du côté qui lui permet de contrebalancer l'effet de T .

L'angle φ_0 que fait \mathbf{R} avec la normale n a pas une valeur fixe, il est d'autant plus grand que la poussée est plus forte, mais il ne peut, en aucun cas dépasser une certaine valeur φ_0 dite angle limite d'adhérence ou plus simplement angle d'adhérence.

Si l'on fait tourner la direction de \mathbf{T} autour de la normale, \mathbf{R} suit le mouvement et la conclusion est la même. Il s'ensuit que la résultante \mathbf{R} se trouve dans ou à la limite sur un cône de révolution dont l'axe est perpendiculaire au plan et dont le demi-angle au sommet vaut φ_0 . Ce cône est appelé cône d'adhérence.

Le facteur d'adhérence f_0 , ou coefficient d'adhérence, est la limite supérieure du rapport des normes de l'effort tangentiel et de l'effort normal :

$$f_0 = \tan\varphi_0 \geq \frac{\|\mathbf{T}\|}{\|\mathbf{N}\|}$$

Supposons maintenant que nous poussions suffisamment fort pour faire glisser le bloc. Si celui-ci a une vitesse constante \mathbf{v} , alors nous pouvons à nouveau faire comme s'il était en équilibre, c'est-à-dire que les trois forces \mathbf{N} , \mathbf{T} et \mathbf{R} qui s'exercent sur lui sont toujours coplanaires, concourantes, et leur somme est nulle.

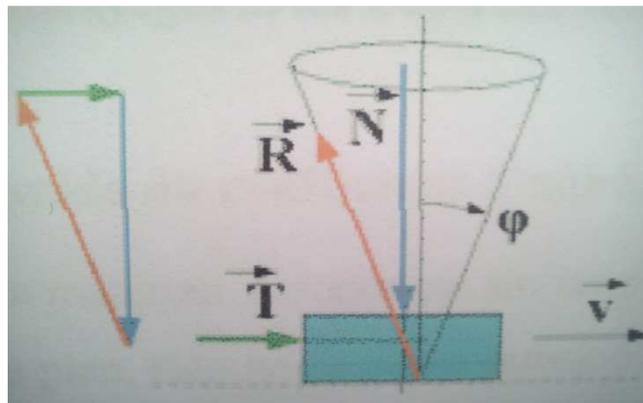


Figure II.9: Glissement

Nous constatons cette fois que la résultante \mathbf{R} est toujours inclinée du même angle de frottement 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, que nous appellerons cône de frottement.

Le facteur de frottement ou coefficient de frottement f est cette fois égale au rapport (constant) des normes de l'effort tangentiel et de l'effort normal :

$$f = \tan\varphi = \frac{\|\vec{T}\|}{\|\vec{N}\|}$$

Retenons que :

A l'arrêt, la force de contact est sur le cône de frottement le coefficient de frottement correspond à une égalité.

S'il y a pas glissement la force de contact est dans ou à la limite sur le cône d'adhérence le coefficient d'adhérence correspond à une inégalité.

Dans la plupart des problèmes de la mécanique rationnelle qui font intervenir le frottement, on fait l'hypothèse que les deux coefficients d'adhérence et de frottement sont égaux et constants.

Ce n'est évidemment qu'une approximation plus ou moins grossière.

Le coefficient de frottement, comme nous le verrons, dépend d'une foule de paramètres parfois invraisemblables. Pour deux matériaux donnés, il peut varier dans d'énormes proportions selon la vitesse de glissement, la lubrification,....

Généralement le coefficient de frottement d'adhérence est plus important que le coefficient de frottement. Il s'ensuit qu'il est plus difficile de provoquer un mouvement que de le maintenir une fois qu'il a démarré. Cependant, un coefficient de frottement qui diminue quand la vitesse augmente est générateur de vibrations, c'est pourquoi l'on recherche souvent des couples de matériaux dont le coefficient de frottement croît légèrement quand la vitesse de glissement augmente ; c'est le cas par exemple, pour les embrayages et les freins des véhicules.

II.6.2. Détermination rapide du coefficient de frottement

Imaginons un objet fait d'un matériau A reposant sur un plan horizontal fait d'un matériau B. si l'on incline légèrement le plan, rien ne se passe puisque la

résultante des actions de contact, directement opposée au poids de l'objet, se situe dans le cône d'adhérence.

En continuant d'incliner le plan, très progressivement, il arrive un moment où cette résultante se trouve juste sur le cône d'adhérence, on se trouve alors à la limite du glissement. La moindre inclinaison supplémentaire provoque alors le glissement, puisque la résultante des efforts de contact ne pourra plus s'opposer au poids. L'angle limite d'inclinaison du plan n'est autre que l'angle d'adhérence des deux matériaux A et B, dans l'état où il se trouve (qualité de la surface, lubrification éventuelle, etc.).

II.7. Formulation du coefficient de frottement

Soient deux corps A et B appuyant l'un sur l'autre avec une force \mathbf{Q} , et se mouvant l'un par rapport à l'autre en restant en contact.

Le cas le plus général est celui du « frottement de glissement » (figure II.10 a). Si l'on désigne par \mathbf{T} la force tangentielle au plan tangent commun à A et B le coefficient de frottement de glissement f est un nombre sans dimension :

$$f = T/Q$$

Lorsqu'il s'agit de « frottement de pivotement », c'est-à-dire lorsqu'il existe un point de A qui coïncide pendant tout le mouvement avec un point de B, le mouvement s'obtient en exerçant un couple \mathbf{C} (figure II.10 b). Le coefficient de pivotement f est alors homogène à une longueur :

$$f = C/Q$$

Lorsqu'il s'agit d'un « frottement de roulement », c'est-à-dire lorsqu'un point ou une ligne de contact de A et de B joue le rôle de centre instantané de rotation, le mouvement peut s'obtenir en déplaçant la direction de la force \mathbf{Q} parallèlement à elle-même d'une longueur \mathbf{H} (figure II.10 c). Le coefficient de frottement de roulement f est un nombre sans dimension :

$$f = H/R$$

Avec R rayon de courbure de A.

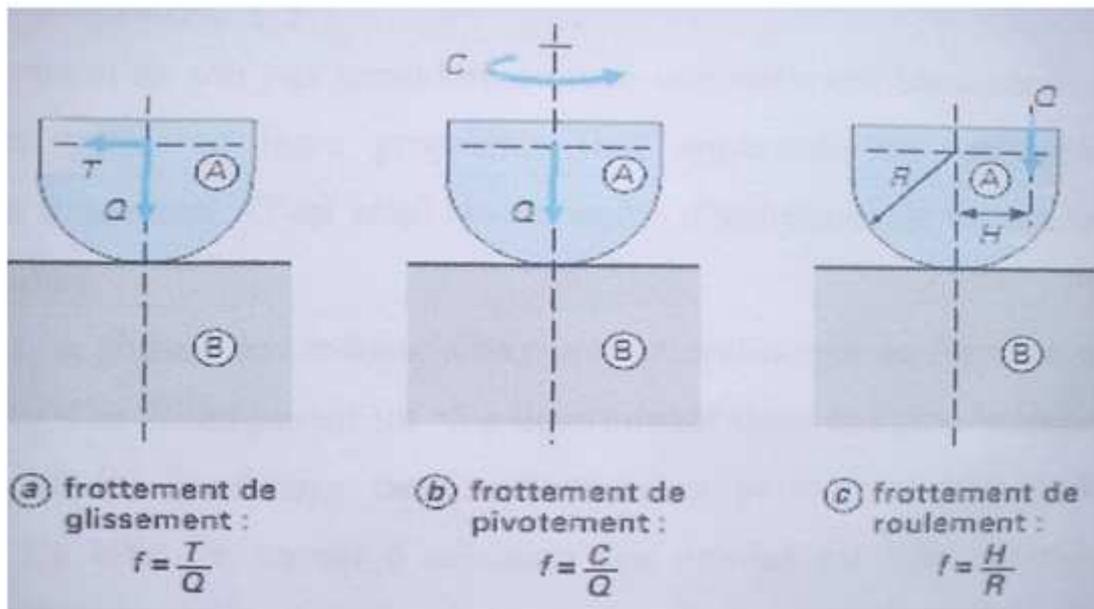


Figure II.10 : définition des coefficients de frottement.

II.8. 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 Q , V et f , correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement.

Le réseau de contraintes mécaniques superficielles évolue 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.9. Matériaux utilisables pour le frottement

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.10. 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). [7]

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 10 nm 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 réactivité physico-chimique des matériaux se modifie : les films réactifs voient leur action s'amplifier, ce qui peut largement faire évoluer les facteurs de frottement.

II.11. 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 composants tribologiques élémentaires : coussinets, engrenages, composants 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.12. Frottement des céramiques

Les céramiques techniques forment une classe de matériaux qui inclut une grande variété de composés réfractaires inorganiques, qui sont pour la plupart mis en œuvre par frittage ou compression isostatique à chaud. Il en résulte des matériaux qui combinent une masse volumique plus faible que celle des métaux avec d'excellentes propriétés mécaniques, notamment une grande dureté, une bonne résistance chimique, et, dans certaines situations, une plus grande résistance à l'usure que les métaux.

Le glissement à sec céramique/céramique se caractérise par un frottement relativement élevé. Les valeurs de frottement dynamique classiquement mesurées dans l'air se situent entre 0,3 à 1. Dans le vide ou en présence de gaz sec, on observe des valeurs situées entre 0,5 à 0,9, mais ces valeurs sont généralement plus faibles que celles observées pour les métaux dans les mêmes conditions, du fait de la moindre aptitude des céramiques à développer des liaisons adhésives.

II.13. Conclusion

Le coefficient de frottement est bien établi, mais légèrement mal compris. C'est un paramètre commode et utile pour la construction, mais le soin devrait être pris en lui attribuant une signification fondamentale. Pour des centaines d'années, les coefficients de frottement ont atteint beaucoup d'objectifs utiles, comme faciliter la conception des machines et des bâtiments, amélioration des dispositifs pour la sûreté (comme freins, pneus,...), et amélioration du processus industriel.

Les données statiques et cinétiques du coefficient de frottement énuméré dans les tables ne devraient pas être appliquées aux situations considérablement différentes de celles employées pour les obtenir. Les caractéristiques du comportement du frottement, tels que le rodage et la stabilité de la force de frottement, peut être plus important pour la conception et l'optimisation des machines que la valeur moyenne seul du coefficient de frottement.

CHAPITRE III :
Usure

III.1. Objectif

La durée de vie des composants mécaniques est très souvent limitée par les endommagements des surfaces actives de ces composants. Ce chapitre est consacré à la description des principaux mécanismes physiques, chimiques et mécaniques à l'origine de ces endommagements et à celle de l'influence des paramètres les plus significatifs qui interviennent pour enclencher ou entretenir ces mécanismes.

III.2. Introduction

Le terme usure, dans son acception la plus large, exprime la détérioration des composants due à l'usage. L'usure est générée par plusieurs mécanismes physiques, chimiques ou mécaniques indépendants ou non. En fait, l'usure considérée comme un phénomène global est très difficile à décrire du point de vue quantitatif. Il en résulte que les différentes approches théoriques sont faites à partir d'hypothèses simplificatrices tendant à dissocier les processus mis en jeu pour mieux les appréhender. [8]

III.3. Le phénomène d'usure

La détérioration d'une matière produit des déchets. Qu'on appelle l'usure, c'est la conséquence du frottement et se produit au niveau de la zone de contact.

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont: [9]

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

III.4. Les origines d'usure

- Les déformations plastiques,
- La fissuration,
- Les transformations physico-chimiques des surfaces,

- Adhésion : transfert à l'échelle atomique, grippage, micro grippage.

III.5. Différents types d'usure

Les mécanismes de dégradation des surfaces rencontrés sont nombreux. L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces.

III.5.1. Usure par adhérence (usure adhésive)

La théorie de l'usure d'adhésion a été proposée par Blondeau et Tabor et bien développée par Archad. [9]

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.

L'usure de deux surfaces dépend de la section de cisaillement des jonctions :

- Si le cisaillement est produit sur la surface initiale de séparation des corps, l'usure est nulle;
- Si le cisaillement est produit à l'intérieur des corps ayant la résistance la plus petite, un fragment du matériel de ce corps est transféré sur la surface de l'autre corps.

Quelquefois on observe un transfert de la surface plus dure vers la surface plus friable. Les particules d'usure libre sont formées pendant le processus suivant le frottement par détachement des particules du matériel transféré.

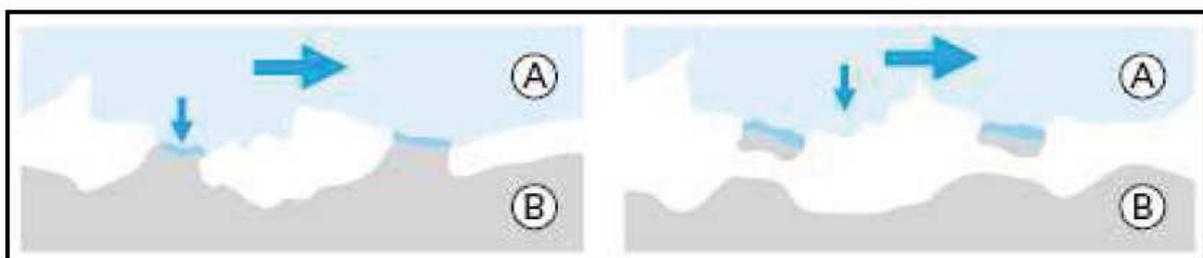


Figure III.1 : Phénomènes élémentaires de l'usure adhésive [1].

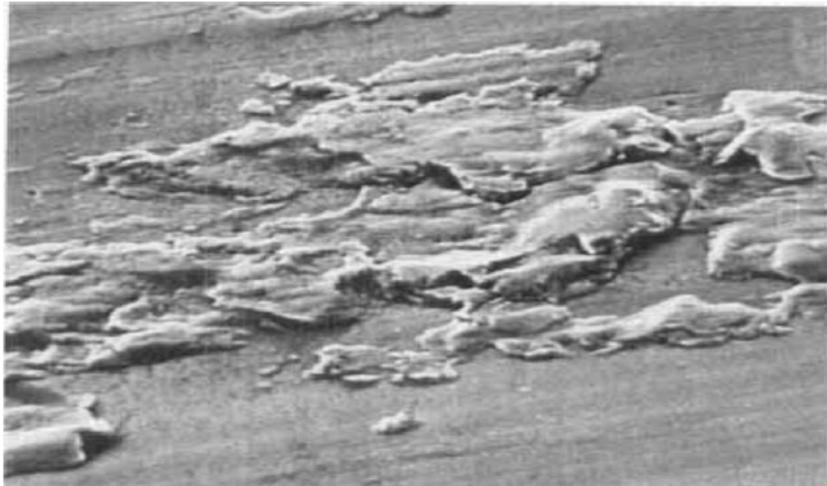


Figure III.2 : Image montrant une surface endommagée par le processus d'usure adhésif [10].

IV.5.1.1. Les 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.

IV.5.1.1.1. Influence de l'environnement

La perte de matière d'une pièce frottante par adhésion dépend du nombre de jonctions métalliques et de leur taille. 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. Le tableau ci dessous donne les valeurs possibles du ***coefficient de transfert*** dans différentes ambiances, c'est-à-dire la probabilité de transfert d'une particule de la surface d'un frotteur sur la surface antagoniste. On notera que ce coefficient peut varier de 1 à 100, tandis que le facteur de frottement varie de 1 à 10.

Conditions	Surfaces propres (ultravide)	Sans lubrifiant (dans l'air)	Fluide peu lubrifiant (eau, essence, liquide non mouillant)	Lubrifiant de bonne qualité (huile minérale, fluide mouillant)	Excellent lubrifiant (huile minérale très visqueuse, huile synthétique)
Contact entre métaux identiques	3×10^{-1}	4×10^{-2}	7×10^{-4}	4×10^{-5}	10^{-6}
Contact entre métaux différents	2×10^{-3}	8×10^{-4}	5×10^{-4}	4×10^{-5}	10^{-6}

Tableau III.1 : Coefficient de transfert dans différentes conditions de contamination superficielle [8].

IV.5.1.1.2. Influence de la charge

Il existe une charge critique au-delà de laquelle l'usure croît considérablement (figure III.3). Sous faible charge, le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge. L'augmentation de la charge se traduit d'abord par un accroissement du nombre de points de contact (figure III.4a), et ensuite par un accroissement de la taille des jonctions (figure III.4b). Les aspérités se déforment plastiquement et contribuent ainsi à une augmentation rapide de l'usure.

A faible vitesse, la pression critique est de l'ordre du tiers de la dureté Brinell. Au-delà de cette pression, l'aire réelle de contact devient une fraction importante de l'aire apparente et la déformation plastique tend à se généraliser favorisant l'adhésion. L'index de plasticité permet de déterminer le risque de déformation plastique des surfaces rugueuses:

$$\Psi = \frac{F_N}{H} \left(\frac{\sigma}{R} \right)^{1/2}$$

Lorsque cet index est inférieur à 0,6 la déformation des aspérités est majoritairement élastique, lorsqu'il est supérieur à 1 la déformation est majoritairement plastique.

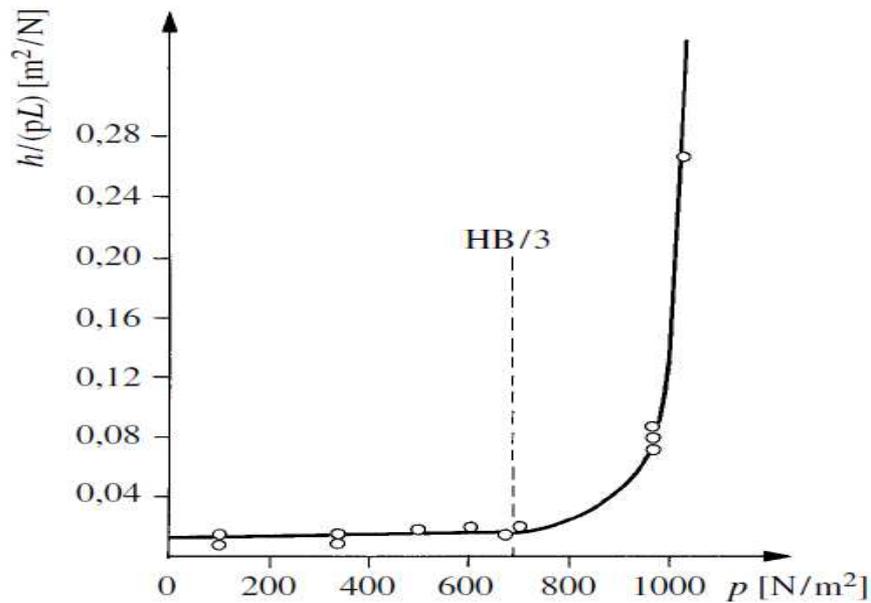


Figure III.3 : Evolution de l'usure en fonction de la pression de contact [8].

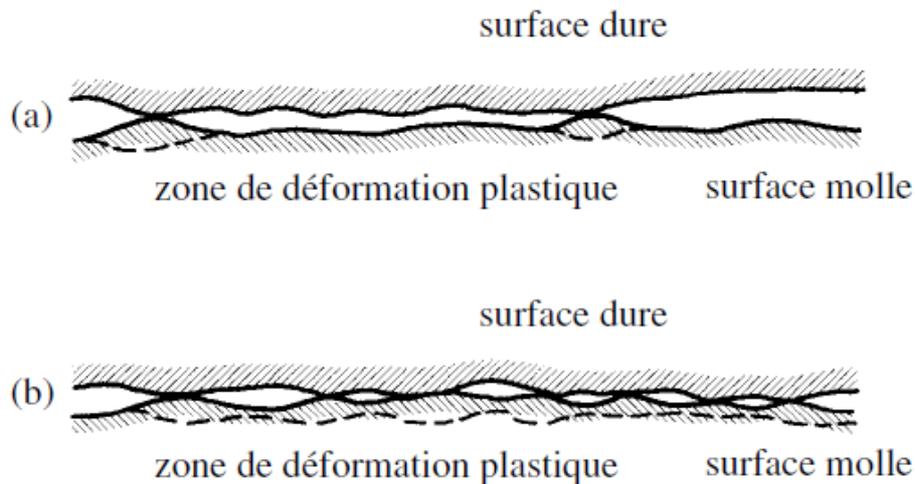


Figure III.4 : Influence de la charge sur un contact – Frotteur en acier : (a) charge faible; (b) charge élevée [8].

III.5.1.1.3. Influence de la vitesse de glissement (à charge faible)

Le principal 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.

III.5.1.1.4. Influence combinée – charge et vitesse

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/mm² pour le frottement sec de matériaux de friction classiques,
- 0,4 W/mm² pour le frottement sec des céramiques,
- 1,5 à 2 W/mm² pour le frottement de composites polymères + lubrifiants solides.

Toutefois, la pression et la vitesse n'ont pas une action totalement symétrique. Les fortes pressions favorisent les déformations et endommagements mécaniques tandis

que les grandes vitesses induisent plutôt des modifications superficielles physicochimiques des matériaux: triboréactions, fusions...

III.5.1.1.5. Influence de la température

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. Pour prendre en compte l'effet de la température, on se réfère généralement à la température de fusion T_F des matériaux

III.5.1.2. Modélisation de l'usure adhésive

HOLM et ARCHARD ont proposé une modélisation empirique de la phase linéaire de l'usure. Cette modélisation s'appuie d'une part sur le fait que le contact des surfaces ne se fait que par un nombre réduit d'aspérités réparties aléatoirement sur la surface et d'autre part que ces aspérités doivent supporter la charge et maintenir les déformations dans le domaine d'élasticité. Ils supposent donc que le volume usé est proportionnel à la charge appliquée, à la distance parcourue et inversement proportionnel à la résistance mécanique des matériaux exprimée par la limite de fluage en compression assimilée à la dureté:[8]

$$\Delta V = \frac{KWL}{H}$$

Avec

ΔV : perte de matière résultant de l'usure exprimée en variation de volume,

L : distance parcourue,

W : charge appliquée,

H : dureté du matériau le plus mou obtenue par indentation,

K : coefficient d'usure sans dimension lié à la probabilité qu'une aspérité en contact produise une particule d'usure.

Le coefficient d'usure caractérise la sévérité du processus d'usure et permet de comparer différentes classes de matériaux (tab III.2).

	Métaux identiques	Métaux compatibles	Métaux partiellement compatibles	Métaux incompatibles
Glissement sec	1500×10^{-6}	500×10^{-6}	100×10^{-6}	15×10^{-6}
Lubrification partielle	300×10^{-6}	100×10^{-6}	20×10^{-6}	3×10^{-6}
Bonne lubrification	30×10^{-6}	10×10^{-6}	2×10^{-6}	$0,3 \times 10^{-6}$
Excellente lubrification	1×10^{-6}	$0,3 \times 10^{-6}$	$0,1 \times 10^{-6}$	$0,03 \times 10^{-6}$

Tableau III.2 : Coefficients d'usure dans différentes situations tribologiques [8].

Dans certaines applications, frottement des élastomères, polymères ou même métaux, la valeur de H en surface est souvent difficile à définir et l'on utilise fréquemment une loi de la forme:

$$\Delta V = kWL$$

Avec $k = \text{taux d'usure}$ dimensionné [mm^3/Nm].

III.5.2. Usures abrasive et érosive

Ces deux types d'usure sont provoqués par l'action de particules qui viennent agresser la surface d'un solide. Ils se manifestent par des rayures, griffures, polissages, arrachements de micro copeaux, voire cavités sur les surfaces agressées.

IV.5.2.1. L'usure abrasive

L'abrasion est l'opération mécanique consistant à enlever la matière sur une surface par des phénomènes de microcoupure. 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.

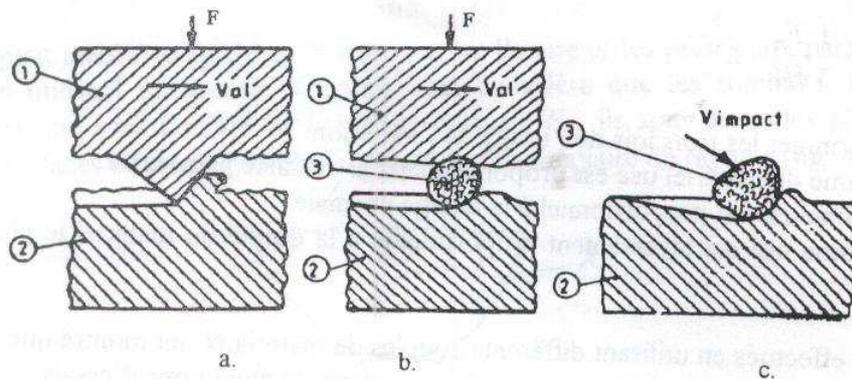


Figure IV.5 : Différents types d'usure par abrasion [9].

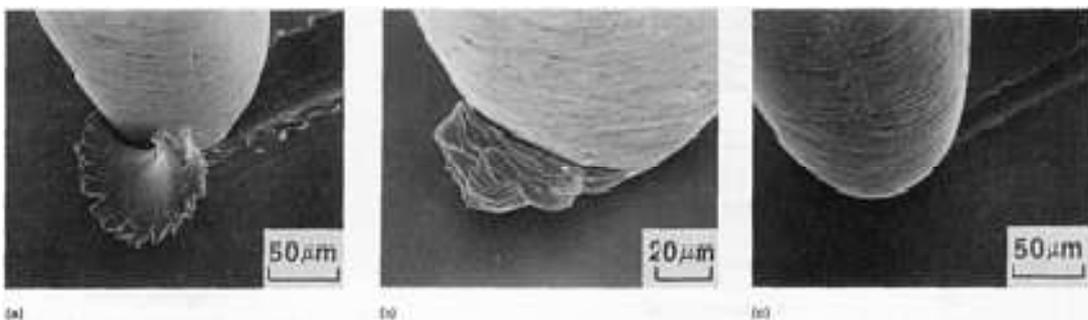


Figure III.6. : Exemples du processus d'usure abrasive, utilisant un microscope à balayage électronique.

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.

RABINOVICZ attribue ce fait aux pertes de propriétés mécaniques des matériaux avec l'échauffement. Au-delà d'une vitesse critique de déformation, l'enlèvement de matière par effet de coupe devient prépondérant et l'on observe l'apparition d'un copeau quelle que soit la forme de la particule. [8]

Une loi empirique globale analogue à celle d'Archard est généralement proposée pour décrire l'usure abrasive. Le volume usé par abrasion est proportionnel à la charge appliquée et à la distance parcourue par le corps abrasif et inversement proportionnel à la dureté du matériau abrasé:

$$\Delta V = K WL/H$$

Les plages usuelles d'évolution du coefficient d'usure K sont:

- $K = 0,5$ à $5 \cdot 10^{-3}$ pour l'abrasion à 3 corps,
- $K = 5$ à $50 \cdot 10^{-3}$ pour l'abrasion à 2 corps.

Pour les matériaux de très grande dureté à comportement fragile tels que les céramiques, ZUM GAHR constate que cette loi ne s'applique plus. Il observe, en effet, un mode d'endommagement par fracturation lorsque la *ténacité* caractérisée par le coefficient K_{IC} devient inférieure à $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. [8]

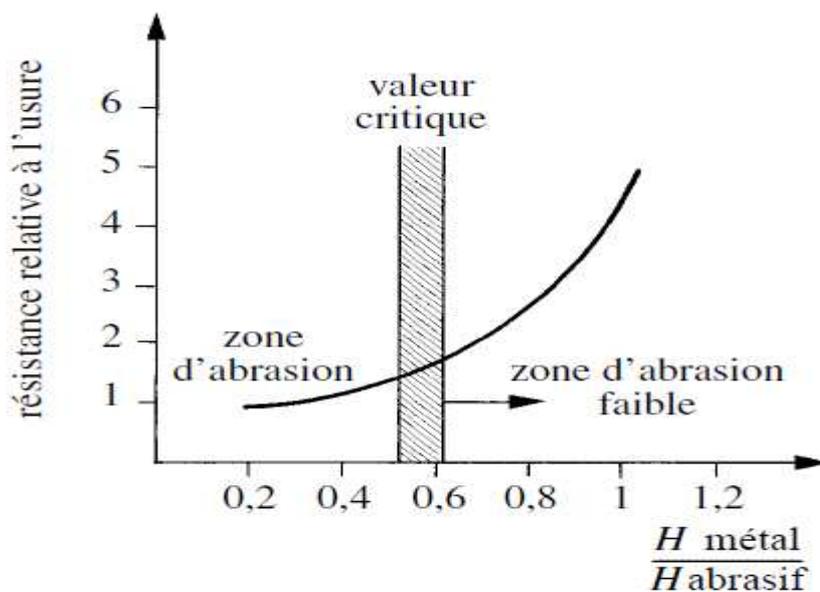


Figure III.7 : Effet de la dureté de l'abrasif sur la résistance à l'usure des métaux [8].

III.5.2.2. Usure érosive

L'*usure érosive* se définit comme la perte de matière provoquée par l'action de particules contenues dans un fluide en mouvement et qui viennent heurter une surface solide. 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.8). 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.

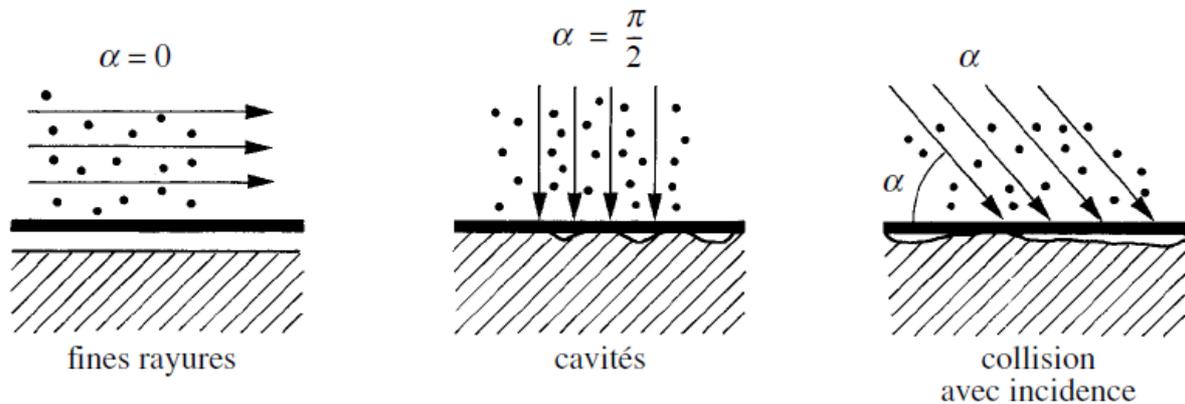


Figure III.8 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement [11].

III.5.3. Usure par fatigue de contact

III.5.3.1. 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.

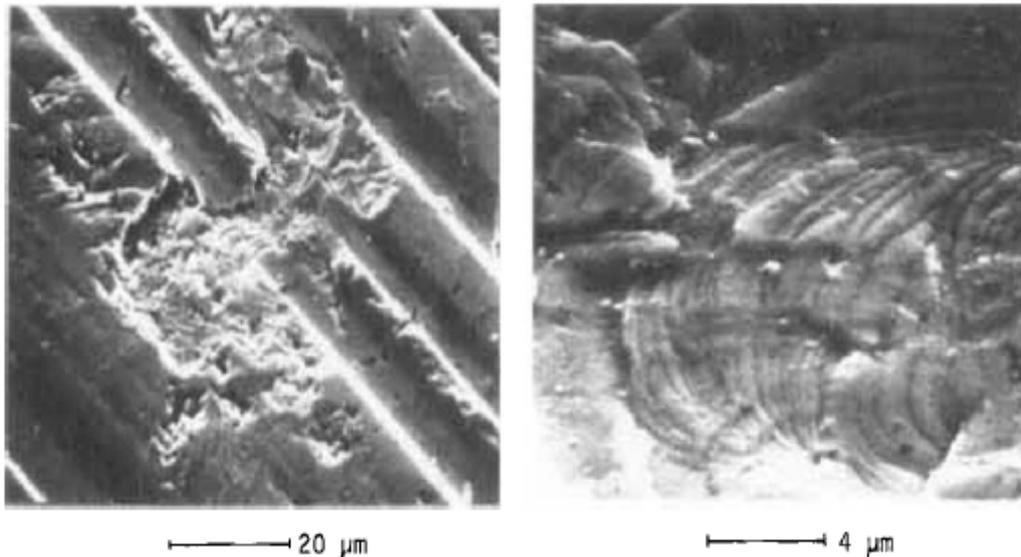


Figure III.9 : Apparence d'une surface endommagée par fatigue [10].

III.5.3.2. *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 multiphasés 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.5.3.3. 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.5.3.3. 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.

III.5.4. Usure par réactions tribochimiques

En présence d'un environnement réactif, du fait des pressions et des températures élevées imposées au contact, des phénomènes complexes peuvent se produire et notamment des réactions entre l'environnement et le matériau constituant la surface (*tribooxydation* en milieu oxygéné par exemple). Suivant la nature et les caractéristiques du composé formé, ces réactions peuvent être bénéfiques, dans le cas des films réactifs issus des additifs des lubrifiants, ou néfastes au fonctionnement.

Dans le cas fréquent de la tribooxydation. QUINN a montré que plusieurs mécanismes peuvent intervenir : [8]

- Oxydation des débris métalliques de petites tailles formés lors du contact direct des aspérités dans certaines conditions de fonctionnement.
- Réactions chimiques des métaux constituant les surfaces avec l'oxygène produisant une couche d'oxyde qui limite l'ampleur du contact métallique si elle est suffisamment adhérente et résistante pour supporter les sollicitations mécaniques.
- Dans le cas contraire, cette couche protectrice peut se fragmenter et se détruire sous l'action des contraintes mécaniques ou par fatigue superficielle et donner naissance à des débris. Suivant leur nature et leurs propriétés, les débris ainsi générés peuvent avoir une action bénéfique s'il s'agit de composés utiles et lubrifiants (FeO par exemple dans le cas d'alliages ferreux) ou au contraire préjudiciable s'ils sont durs et abrasifs (ex: Fe₂O₃ ou Fe₃O₄).

La répétition de l'un ou plusieurs de ces mécanismes peut entraîner l'endommagement des surfaces et la perte de matière. Ainsi que l'a indiqué Quinn, la tribooxydation est fortement influencée par la cinétique de formation des oxydes et par leurs propriétés: ductilité, résistance mécanique, adhérence avec le substrat.

Elle dépend aussi des propriétés de ce dernier. Une bonne résistance mécanique du substrat peut éviter la rupture du film. On obtient généralement des taux d'usure faibles lorsque les duretés du film et du substrat sont voisines.

Il apparaît aussi que la température, combinée aux pressions locales très élevées et aux taux de cisson extrêmement importants que l'on observe dans les zones de contact, peut favoriser l'intervention de ces réactions tribochimiques dont la thermodynamique est encore mal maîtrisée. La rhéologie des films ainsi créés reste aussi l'un des points fondamentaux du fonctionnement d'un contact, notamment à grande vitesse ou peuvent apparaître des phénomènes de *plasticité adiabatique*.

L'accumulation de chaleur dans un volume très faible peut amener la matière dans ce volume à se plastifier, voire à fondre, donnant lieu à une couche mince dotée de propriétés spécifiques, pouvant jouer le rôle de lubrifiant [6].

III.6. Données et 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 de ou masse et être normalisée selon les conditions de sollicitation, de vie ou de débit. Dans cet esprit la norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure comme « le volume perdu divisé par la charge normale et la distance »

Le taux d'usure k (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume V est proportionnelle à la charge normale F_N et à la distance de glissement L parcourue. [12]

$$V = k V F_N \dots \dots \dots (1)$$

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 la topographie des pièces usinées.

Les différentes écoles tribologiques soulignent toujours que la notion de taux d'usure pose divers problèmes et doit être précisée pour chaque mécanisme d'usure. Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation. Il

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

En ce qui concerne la quantification de l'usure, il faut bien admettre que l'application de lois ou de modèles d'usure à l'usage général est très limité, en général par manque de connaissance des propriétés des matériaux et de leur évolution avec la température ; mais la modélisation de l'usure ou la prévision d'un taux d'usure sont des sciences qui débutent.

Quoi qu'il en soit, pour une application industrielle, l'usure et le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques ; la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important. Demeurent deux questions :

- Comment peut-on alors intégrer le taux d'usure dans une approche industrielle ou technique et écarter les réserves des scientifiques ?
- Comment valoriser par leur utilisation les dizaines de milliers de résultats tribologiques obtenus chaque année ?

Il n'y a aucun doute, que tous les tribosystèmes, que ce soit dans une application industrielle ou une machine d'essai, possèdent un taux d'usure, qui est défini par le couple de matériaux, la configuration du système et la sollicitation et qu'on peut le déterminer en fin de vie. Le taux d'usure est la « réponse » du tribosystème à une sollicitation.

Le taux d'usure volumétrique k_v s'exprime le plus souvent en $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ et se calcule à partir du volume d'usure ou de la perte de volume (ou de masse), de la charge normale et de la distance de glissement parcourue. Ces trois valeurs sont parfois difficiles à déterminer ou simplement à connaître. Notons que certains auteurs l'expriment en mm^2/kgf ou en mm^2/N

D'autres utilisateurs raisonnent un peu différemment. Par exemple, dans l'industrie des systèmes de freinage, on définit le taux d'usure comme la perte de matière en masse ou en volume par mégajoule (MJ) d'énergie dissipée par le couple de matériaux,

ce qui revient à supposer que le volume perdu est proportionnel à la densité d'énergie de frottement apparente e_f^* , c'est-à-dire en première approximation que le taux d'usure k est proportionnel au coefficient de frottement μ , soit $k = e_f^* \mu$

III.6. 2. Valeur du produit $P \times V$

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 $p v$ sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur $p v$ en MPa . m/s (pour les anglo-saxons en psi.ft/min) 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 $p v$ multipliée par le coefficient de frottement : $p v \mu$ (W/mm^2), détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact A (Friction Power Intensity) ; 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 faible) à un mode d'usure sévère (k élevé) (figure III.10), 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 température) 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. 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 thermo physiques, et leur évolution avec la température T , et sur la micro géométrie 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) (voir figure 1) : 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 1 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.

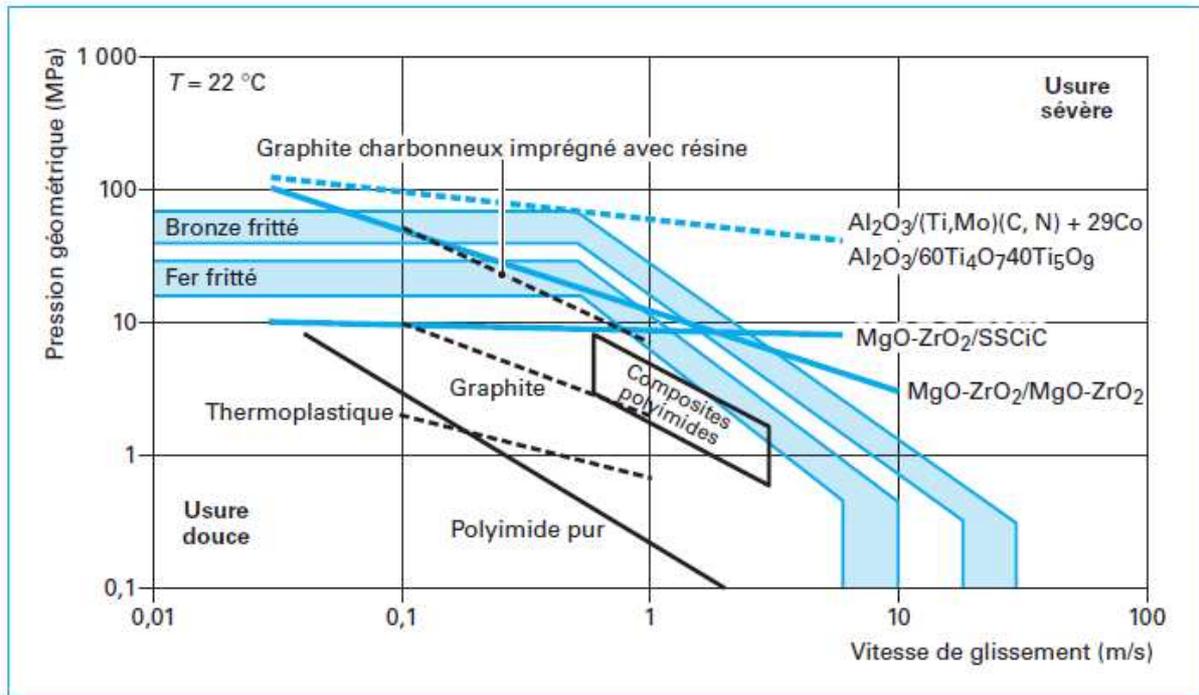


Figure III.10 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés [12].

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 :

$$E_f = \mu F_N L \dots\dots\dots (2)$$

Avec μ coefficient de frottement de Coulomb

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

$$e_f^* = \frac{E_f}{V} = \frac{\mu}{k}$$

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

CHAPITRE IV :

Nature et comportement des surfaces en contact

IV.1. Introduction

Le frottement et l'usure impliquent les deux surfaces de contact ou précisément les interfaces, où se produisent des transformations multiples et irréversibles qu'il faut considérer de plusieurs points de vue :

- Etat géométrique microgéométrique,
- Etat de propreté,
- Etat physicochimique, structure des couches superficielles,
- Etat historique.

Les surfaces usinées ne sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

On sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur le fonctionnement et la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions : guidage, étanchéité,.... Quelle que soit la qualité de fabrication, il existe toujours une échelle suffisamment petite pour qu'ils soient mesurables et la nécessité de les décrire ne date pas d'hier.

Plus la qualité d'une surface est proche de la perfection, plus elle est difficile à obtenir et plus son cout est élevé. Des surfaces inutilement précises cause des pertes économiques qui peuvent être considérables.

IV.2. Définition

En tribologie, la surface ne se limite pas uniquement à la notion d'aire d'appui des corps, mais concerne plus généralement les **éléments du contact qui jouent un rôle sur le frottement**, c'est-à-dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...). Ces éléments sont les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, les caractéristiques géométriques incluant, par extension, la forme des pièces. [3]

IV.3. Types de surface

La normalisation précise les termes (types) de surface à utiliser :

IV.3.1. Surface d'un corps

Elle est constituée par l'ensemble des points qui délimitent la portion de l'espace où se trouve la matière de ce corps.

IV.3.2. Surface géométrique

C'est la surface parfaite, idéale. Sur le dessin, elle est définie géométriquement par le bureau d'études, à l'aide de cotes nominales.

IV.3.3. Surface spécifiée

Elle résulte de la surface géométrique, transformée par le bureau des études qui prescrit des limites de réalisation de cette surface à l'aide de symboles et de valeurs numériques en complément des cotes nominales du dessin.

IV.3.4. Surface réelle

C'est celle qui est obtenue au cours de la fabrication.

IV.3.5. Surface mesurée

Elle résulte de l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure. Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique, de mesure appliquée, de la précision de l'instrument de mesure utilisé et de la nature même de la surface réelle.

IV.4. État structural et physique

D'une façon générale, les caractéristiques d'une surface diffèrent de celles du matériau (dans la masse), d'une part parce que la symétrie de la structure atomique est rompue (modification des forces de liaison, de la concentration en défauts...), d'autre part parce que l'effet des contraintes extérieures, et notamment de l'environnement (atmosphère, température par exemple) peut modifier considérablement les couches superficielles en créant des concentrations d'éléments très différentes des valeurs moyennes volumiques.

Après qu'elle ait été préparée (par traitements thermiques, par usinages...) et placée dans son environnement de travail, une surface est constituée d'une succession de couches dont une représentation schématique typique est proposée (figure IV.1).

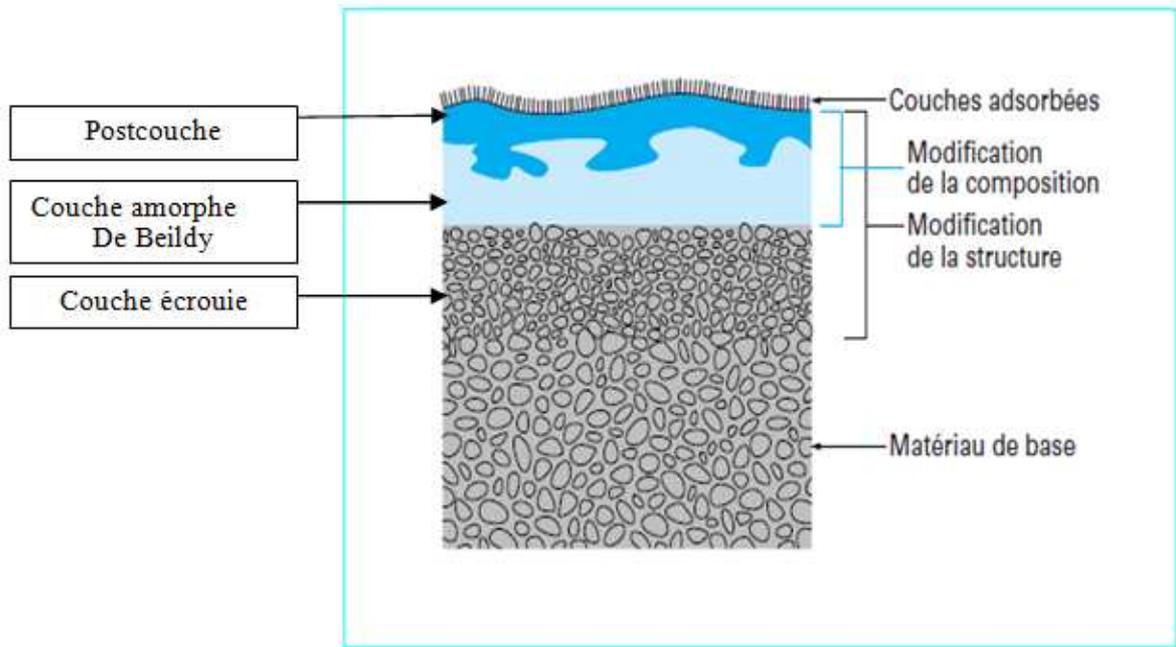


Figure IV.1 : Représentation schématique de la surface. [3]

Couche adsorbée

C'est la fixation de molécules sur les surfaces, qui provient des gaz et des liquides ambiants.

Dans l'atmosphère, toute pièce est instantanément recouverte d'une couche absorbée formée surtout d'oxygène, avec d'autres gaz comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, etc. aucun nettoyage mécanique ou chimique ne peut les éliminer totalement des surfaces métalliques, à moins que l'on ne procède sous vide et à chaud (1000°C ou plus).

Les couches absorbées, épaisses de 0,2 à 8 nm, liées rigidement aux solides, sont plus solides sur les reliefs. Il existe d'ailleurs une rugosité optimale pour leur accrochage. Leur forme est déterminée par les structures cristallines sous-jacentes. On peut dire qu'elles jouent un rôle essentiel dans les processus de frottement. Deux corps frottant dans le vide sans préparation spéciale voient leur coefficient de frottement multiplié par un facteur 2 à 4. Après dégazage sous vide, il peut atteindre 100.

Pratiquement aucune de nos machines ne fonctionnerait, si l'adsorption n'existait pas !

Postcouche

Une Postcouche qui est le fruit des interactions entre le matériau et l'environnement (par exemple film réactionnel résultant de l'oxydation), ou de modifications significatives de la composition du matériau de base lors de son élaboration (par exemple enrichissement superficiel en graphite lors de l'usinage des fontes grises). L'épaisseur de la Postcouche est comprise entre 0,01 et 0,1 mm.

Couche amorphe de Beilby

La structure cristalline du métal est détruite sur une épaisseur de 0,1 à 5 μm , qui dépend du mode d'élaboration de la pièce. On y trouve des atomes ou molécules du matériau et de l'environnement des oxydes, nitrures,...

Pour les alliages, la composition devient hétérogène, complexe et mouvante en fonction de la ségrégation des éléments, laquelle est provoquée ou non par le frottement. Engendrée surtout lors d'opérations comme la rectification ou le polissage, la couche de Beilby répartit les charges et consolide les films d'oxydes mais on préconise parfois de l'ôter par super finition.

Couche écrouie

En profondeur, en partant des aspérités, on trouve une couche de matériau plus ou moins écrouie. Le degré d'écrouissage et la profondeur de la couche écrouie dépendant du procédé de fabrication de la pièce, que ce soit par formage (forgeage, filage,...), ou par enlèvement de copeaux (tournage, fraisage, brochage,...).

La transformation des surfaces destinées au frottement comporte presque toujours une phase d'ébauche par un outil coupant, suivie d'une finition par abrasion : rectification, polissage, sablage, etc. un tiers environ de l'énergie de coupe se perd dans les pièces. Le champ de forces au passage de l'outil provoque deux sortes de déformations non élastiques : d'une part les microcristaux glissent les uns par rapport aux autres au niveau des joints de grains, d'autre part des glissements se produisent dans les

microcristaux eux-mêmes par cisaillement. L'écrouissage extrême rejoint l'état amorphe. Les couches écrouies gardent à jamais le souvenir de leur usinage.

L'écrouissage est réduit par lubrification. Il varie beaucoup, et de manière complexe, avec les conditions de coupe : par exemple, la profondeur de passe influe d'avantage avec les aciers rapides qu'avec les carbures et les céramiques.

Couches profondes

Le métal sous les couches écrouies est une construction cristalline imparfaite, un arrangement de grains conditionné par l'élaboration, la composition chimique, l'histoire thermique et mécanique de la pièce. Les structures obtenues par moulage, laminage, forgeage, dépôt de matière, ... sont très différentes.

Les zones non défigurées par l'usinage n'en sont pas moins accessibles aux efforts de frottement, aux effets thermiques, à la fatigue, etc. et elles présentent de nombreux défauts :

- Inclusion : particulièrement dangereuses lorsqu'elles sont alignées en files. Elles peuvent favoriser l'usinage (sulfures) mais se révèlent désastreuses pour le frottement. C'est une erreur de croire qu'un métal à usiner frotera bien. Dans les matériaux ferreux, on trouve essentiellement des sulfures, des oxydes enfermés lors du forgeage et des silicates. Les inclusions peuvent modifier localement le module d'Young et créer un véritable effet d'entaille.
- Trous et porosités : qui engendrent des concentrations de contrainte et stockent diverses matières peu recommandables (grains d'abrasifs ou copeaux, par exemple) qui seront remises ultérieurement en circulation dans le mécanisme.
- Solubilisation d'hydrogène générateur de fragilité : particulièrement dans le fer, le cuivre, l'aluminium, l'étain, l'argent. D'autres gaz dissous dans les matériaux liquides forment des bulles lors du refroidissement.

- Dendrites de ségrégation : on retrouve souvent des alignements de certains constituants dans la structure du métal. La distribution des éléments chimiques, homogène à grande échelle ne l'est plus au niveau des grains élémentaires. La surface peut être enrichie en composés à haut point de fusion (ségrégation positive) ou inversement. Dans les aciers, le phosphore et le soufre ont une forte tendance à créer des ségrégations. c'est défauts favorisent la corrosion et créent des zones de cheminement des fractures.
- Contraintes rémanentes : ou résiduelles, provoquées par le refroidissement brutal, l'usinage ou la juxtaposition d'états allotropiques différents : la transformation d'austénite en martensite, par exemple, s'accompagne de changements de volume. En règle générale les contraintes rémanentes de compression jouent un rôle favorable pour le frottement et c'est l'inverse pour les contraintes de traction.
- Défauts de traitement thermique : la décarburation diminue de façon catastrophique la limite d'endurance. Les tapures de trempes allant souvent de pair avec la présence d'impuretés offrent un cheminement préférentiel à la corrosion. La surchauffe qui accroît la taille des grains sensibilise le métal à l'effet d'entaille et rend dangereuses les stries d'usinage. La formation d'un excès de cémentite engendre une fragilisation sensible lors des contacts brutaux d'aspérités.

IV.5. Structure granulaire des surfaces

L'existence des structures polycristallines sous-entend la présence de discontinuités entre les grains élémentaires formant les pièces et plus particulièrement leur surface.

Les atomes des joints des grains n'appartiennent pas aux plans réticulaires de ces derniers mais à une structure perturbée avec les zones renfermant un excès d'énergie

potentielle appelée énergie interraciale (Grussard), ce qui produit des effets très spécifiques.

Par exemple les joints sont plus rigide à froid que les cristaux voisins mais à chaud c'est le contraire. La résistance maximale du verre qui devrait en théorie atteindre 11000 MPa, dépasse à peine 20 en pratique. En réduisant les défauts Griffith à réussi à obtenir 630 MPa en laboratoire. Dans ces conditions il est clair que les notions de dureté, de limite d'élasticité, de résistance à la rupture, ... sont sans intérêt sur des ensembles de grains trop restreints pour que l'on puisse appliquer la loi des grands nombres.

Le frottement déplace les grains les un par rapport aux autres, surtout si les joints contiennent du plomb ou de l'oxyde de plomb. Les glissements dans les grains et la rotation de ces derniers qui use leurs interfaces peuvent aboutir à des fractures dans les zones de fort cisaillement et à une décohésion, par frottement sous forte charge. La présence d'oxyde entre les grains est prouvée jusqu'à plusieurs dixièmes de mm de profondeur, surtout dans le frottement sec à grande vitesse.

Les plans de glissement dans les microcristaux comme les joints des grains, constituent des voies de pénétration pour les éléments apportés lors des traitements des surfaces, ainsi que l'on peut le constater dans les couches sulfinezées où l'on distingue parfaitement des lignes de sulfure et de fer. Ces derniers favorisent plus tard des déformations utiles à l'accommodement des surfaces lors du rodage.

IV.6. Les ordres de défauts d'une surface géométrique

On sait que les cotes dimensionnelles des pièces sont sujettes à tolérances, mais les surfaces proprement dites sont aussi affectées par des irrégularités qui jouent un grand rôle dans le fonctionnement des mécanismes. On a classé les irrégularités selon l'échelle qu'il faut choisir pour les observer. [3]

IV.6.1. Défauts de forme

Les défauts de forme ou erreurs macrogéométriques, dites de premier ordre, proviennent des déformations de la pièce et de la machine-outil lors de l'usinage, telles

que: les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité. Les défauts de forme se rapportent à la surface géométrique. On les mesure avec un comparateur dont la touche de rayon R décrit une surface enveloppe appelée parfois surface apparente.

IV.2.2. Défauts d'ondulation

Les irrégularités du deuxième ordre (figure IV.2) consistent en ondulations régulières engendrées par des vibrations de la pièce ou de la machine-outil, les ondulations sont apparentes à l'œil nu.

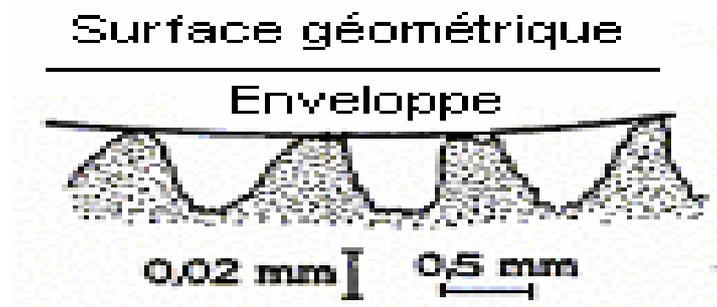


Figure IV.2 : Défauts d'ondulation. [13]

IV.6.3. Rugosité

A plus petite échelle, visible seulement à la loupe ou au microscope, on rencontre la rugosité. Elle résulte de stries ou sillons 3^{ème} ordre (figure IV.3) défauts périodiques de pas A_R voisin de 0.1 mm et une période A_w . Ces stries formées par l'avance progressive de l'outil (tournage, rabotage).

Le 4^{ème} ordre ou les aspérités se forment lors de l'arrachage de la matière par les outils.

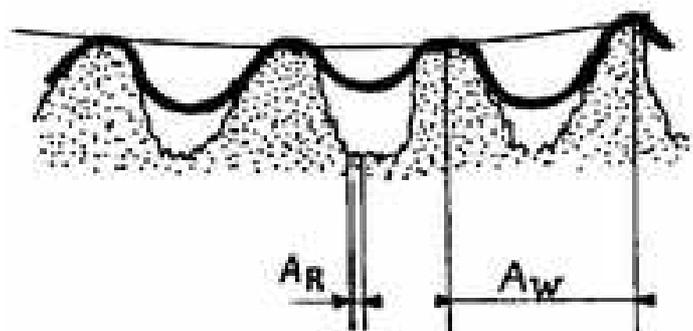


Figure IV.3 : Rugosité de 3^{ème} et 4^{ème} ordre. [13]

IV.6.4. Le 5^{ème} et 6^{ème} ordre : correspondent respectivement aux structures cristallines et moléculaires. Une surface réelle résulte de la superposition de la rugosité et des défauts de forme (figure IV.4).

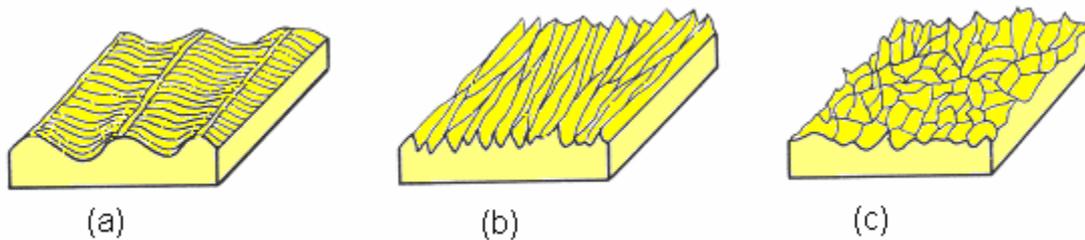


Figure IV.4 : Structure de surfaces (a)stries régulières ;(b) stries orientées ;(c) aspérités irrégulières.

Vu son importance fonctionnelle, on exprime la rugosité par des grandeurs normalisées (figure IV.5).

- Rugosité moyenne R_a
- Rugosité quadratique moyenne R_q

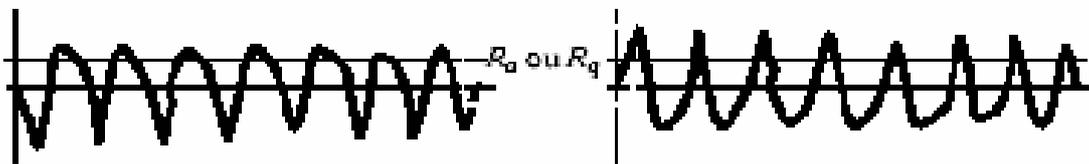


Figure IV.5 : Grandeurs de rugosité normalisées.

Le profil total est la somme des écarts du premier au quatrième ordre.

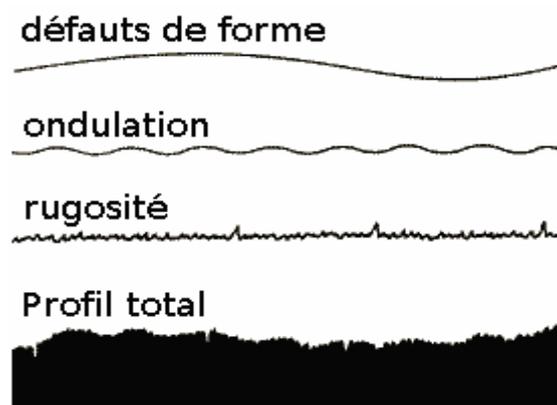


Figure IV.6 : profil total. [14]

Il est clair que toutes les opérations de mise en forme ou de mise à la cote d'une pièce mécanique jouent un rôle déterminant sur la nature des couches superficielles.

IV.7. Caractérisation topographique des surfaces

La topographie des surfaces a une grande influence sur les propriétés d'un système tribologique. Elle couvre un large domaine allant du niveau micrométrique au niveau nanométrique. [2]

Les surfaces sont caractérisées par :

IV.7.1. Ligne de référence

Ligne par rapport à laquelle les paramètres statistiques qui caractérisent le profil d'une surface sont déterminés (figure IV.7).

Les paramètres essentiels qui caractérisent le profil d'une surface sont la hauteur des irrégularités. Les irrégularités sont les crêtes et les creux du profil (aspérités).

Les crêtes et les creux sont définis comme les endroits du profil où la pente devient nulle. La hauteur des irrégularités est mesurée perpendiculairement à la ligne de référence.

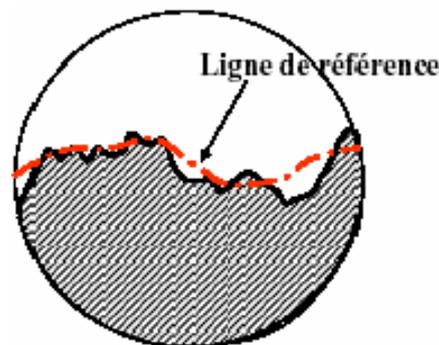


Figure IV.7: Ligne de référence.

IV.7.2. Longueur de base (li)

Longueur sur la ligne de référence utilisée pour séparer les irrégularités constituant la rugosité de surface (figure IV.8). Plus la longueur de base est courte, plus les irrégularités de rugosité sont fines.

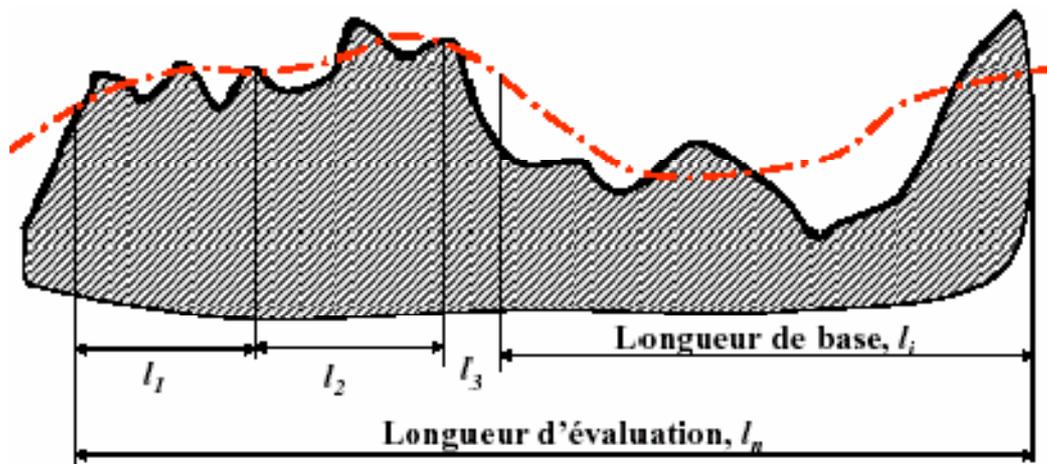


Figure IV.8 : Longueur de base.

IV.7.3. Longueur d'évaluation (l_n)

Longueur utilisée pour déterminer les valeurs de paramètres de rugosité d'une surface (figure IV.9). La longueur d'évaluation peut contenir plusieurs fois la longueur de base.

IV.7.4. Ligne de référence des moindres carrés (ligne moyenne)

Ligne de référence divisant le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (figure IV.10), la somme des carrés des écarts des crêtes et des creux mesurés à partir de cette ligne soit minimale.

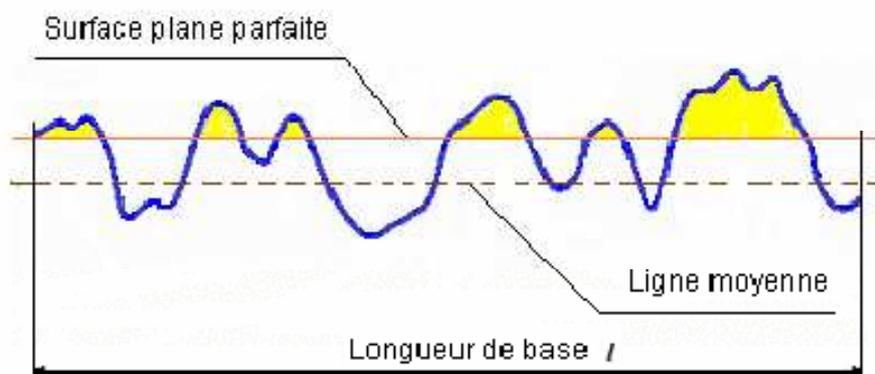


Figure IV.9: Ligne moyenne

IV.8. Enregistrement des états de surfaces

Le rôle des rugosités de surface n'a pas échappé aux scientifiques qui se sont intéressés à la mécanique des contacts. Léonard de Vinci (1480), Amonton (1699), Belidor (1737), Coulomb (1787) avaient détecté son importance dans l'évolution du coefficient de frottement.

La caractérisation de la rugosité s'est faite, jusqu'au premier tiers du XIX^{ème} siècle, uniquement par comparaison visuelle et avec des étalons de microgéométries obtenues par les méthodes d'usinages les plus courantes. La version moderne la plus connue de ces étalons est le RUGOTEST. Il est d'ailleurs encore en application dans certains ateliers.

Par la suite, la métrologie des rugosités a fait appel à des appareils de mesure directe des défauts grâce à des enregistrements de profils de surfaces. La mise au point du premier profilomètre par contact fut accomplie en 1933 par Abbot et Firestone. Cet appareil s'est régulièrement perfectionné, notamment avec l'amélioration de la résolution verticale résultant de l'utilisation de capteurs de déplacement de plus grande sensibilité. Récemment des appareils de mesure sans contact sont apparus; ces appareils évitent de modifier la surface au cours de mesurage.

Une méthode d'enregistrement des états de surface s'avère très intéressante, elle est due à l'abbé Cayère, qui fut voici quelques décennies un éminent professeur de technologie. Un « marteau » spécial donne des répliques d'états de surface par écrasement d'un métal mou, aluminium recuit ou autre. [14]

Pour une surface plane, on utilise un marteau bombé, inversement, pour une pièce bombée, on utilise un marteau plan.

On lâche ce marteau depuis des hauteurs croissantes, jusqu'à ce que le métal remplisse complètement les « vallées » qui séparent les aspérités. Cela donne une réplique en creux, dite « empreinte Cayère », qui peut servir pour mesurer les hauteurs des aspérités.

On a :

$$x = \frac{l^2}{2R}$$

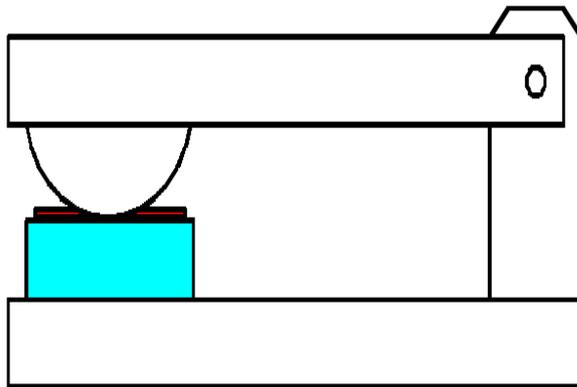


Figure IV.10 : marteau cayère –
surface plane.

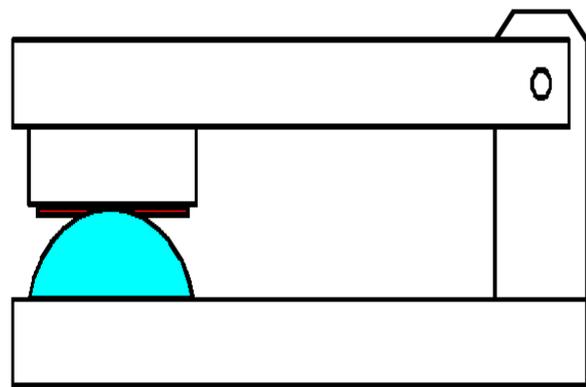


Figure IV.11 : marteau cayère –
surface bombée.

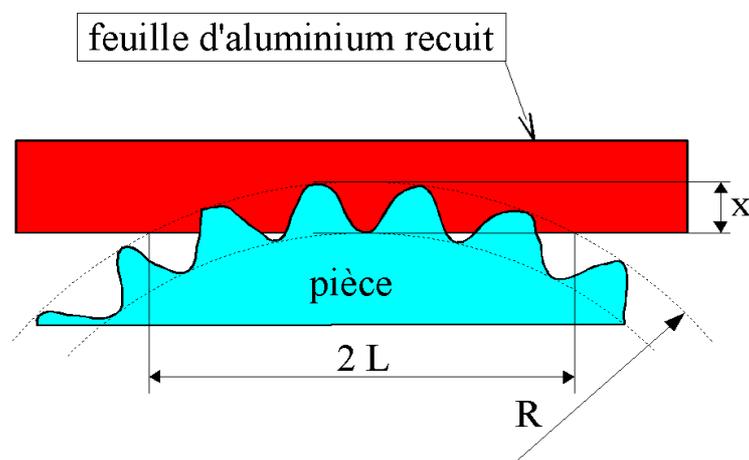


Figure IV.12 : marteau Cayère.

$$g = \frac{L}{x}$$

L'intérêt majeur des empreintes Cayère est de visualiser l'évolution des surfaces, par exemple lors d'un essai d'usure.

Divers appareils restituent l'enregistrement tridimensionnel des états de surface sous forme de graphique tridimensionnels.

IV.9. Mesure de la rugosité

IV.9.1. Ecart quadratique moyen du profil (Rq)

Valeur moyenne quadratique des écarts du profil par rapport à la ligne de référence des moindres carrés à l'intérieur de la longueur de base (figure IV.13).

$$R_q = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

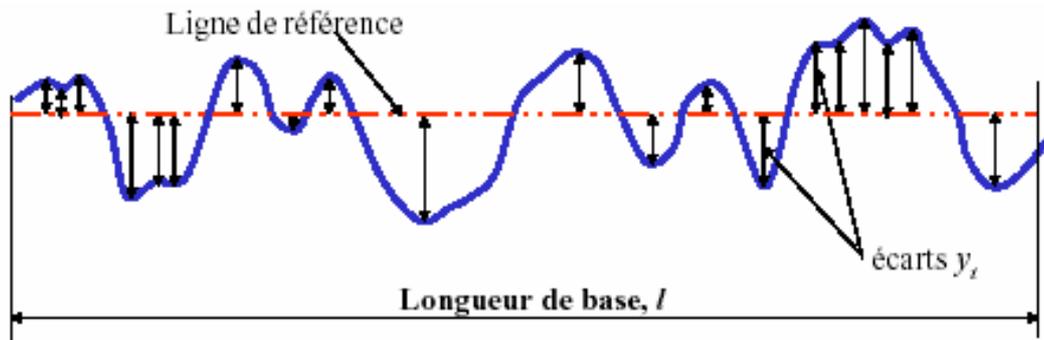


Figure IV.13 : Ecart quadratique moyen.

IV.9.2. Ligne de référence arithmétique (ligne centrale)

Ligne de référence divisant le profil de telle sorte qu'à l'intérieur de la longueur de base (figure IV.14) les sommes des aires des solides et des vides compris entre celle-ci et le profil soient identiques.

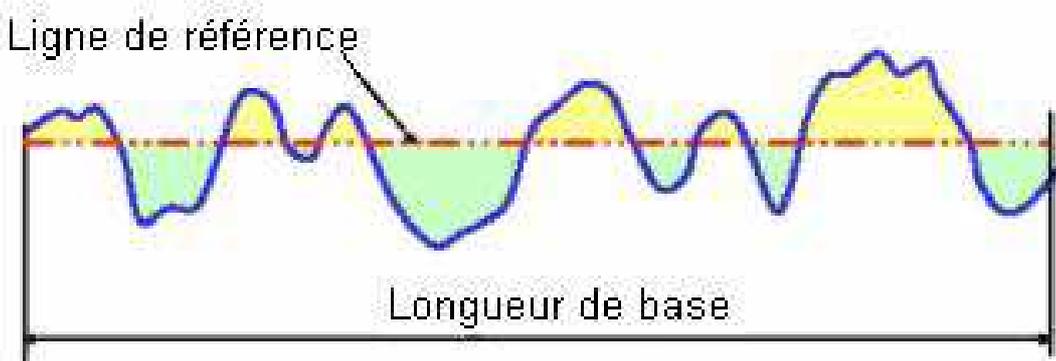


Figure IV.14: Ligne de référence arithmétique.

IV.9.3. Ecart arithmétique moyen du profil (R_a)

Est la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts du profil par rapport à la ligne de référence arithmétique à l'intérieur de la longueur de base (figure IV.15).

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i|$$

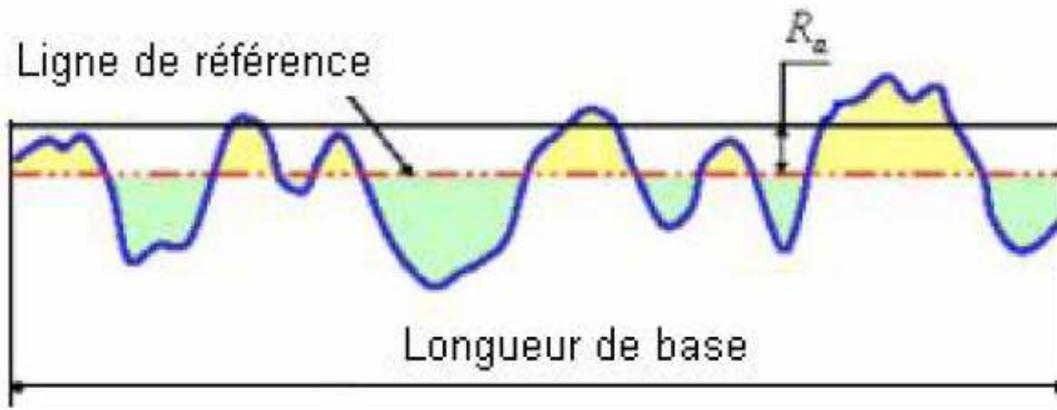


Figure IV.15: Ecart arithmétique moyen du profil R_a .

IV.10. Conclusion

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. La rugosité joue un rôle essentiel puisque elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles.

CHAPITRE V :
Partie expérimentale

V.1. Introduction

Le présent travail a pour objectif d'étudier l'influence de la vitesse de glissement et de l'effort normal de contact sur le comportement au frottement et à l'usure du couple acier XC48 traité (HV579) et le polymère polyester à base de styrène (chargé ou non de poudre de graphite).

Dans ce chapitre nous présentons les étapes suivies pour l'élaboration des échantillons (pions et disques), les moyens expérimentaux utilisés tels que le tribomètre, la chaîne d'acquisition, le rugosimètre et le capteur...

V.2. Procédure expérimentale

V.2.1. Dispositif expérimental

Afin d'étudier les propriétés tribologiques du polyester chargé, les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre (pion/disque) (**figure V.1**) a fait l'objet d'une étude de conception au sein de l'université MOULOUD MAMMARI par des étudiants dans le cadre de leur projet de fin d'étude, en utilisant la méthode de l'analyse de la valeur en 2006 puis une réalisation en 2007, dirigées par M^f LARBI .S.

Ce dispositif permet d'étudier le frottement et l'usure des matériaux ; il mesure les efforts normal et tangentiel. La détermination du coefficient de frottement, du taux d'usure et de la perte de masse pour un couple de matériaux donné se traite après dépouillement des résultats des mesures par le biais du tableur Excel.

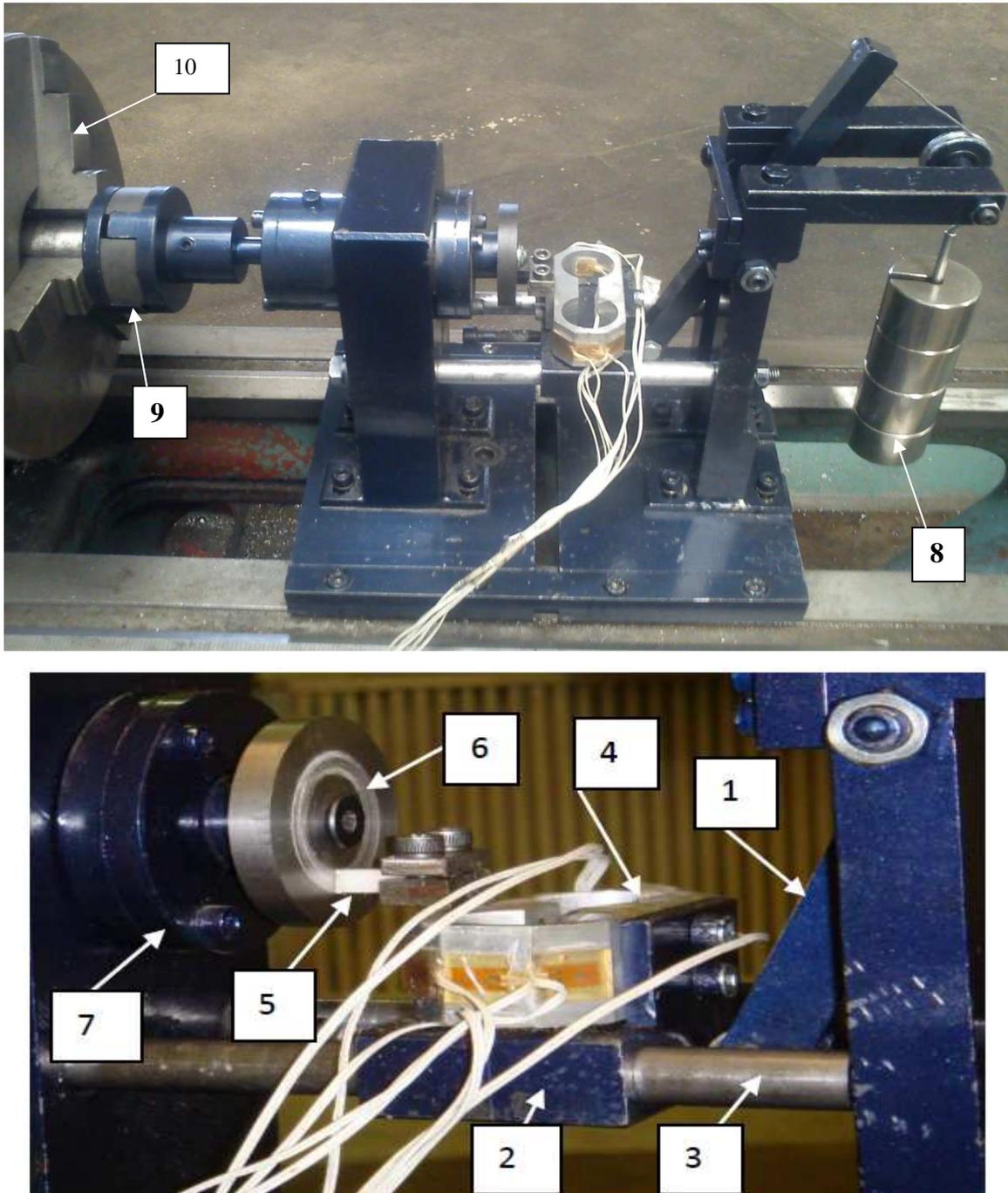


Figure V.1 : vue du tribomètre (pion/disque).

V.2.2. Nomenclature du banc

1-levier, 2-support du capteur, 3-glissière, 4-capteur, 5-pion (éprouvette), 6- disque (éprouvette), 8-masses, 9-accouplement élastique, 10- mandrin du tour.

V.2.3. Principe de fonctionnement

Le dispositif, se monte sur les glissières d'un tour. Le mouvement de rotation est transmis au disque (6) via un accouplement élastique(9). L'effort normal est appliqué en continu pendant le processus de frottement entre le pion (5) et le disque (6) grâce au levier (1) sur lequel on monte les masses mortes (8).

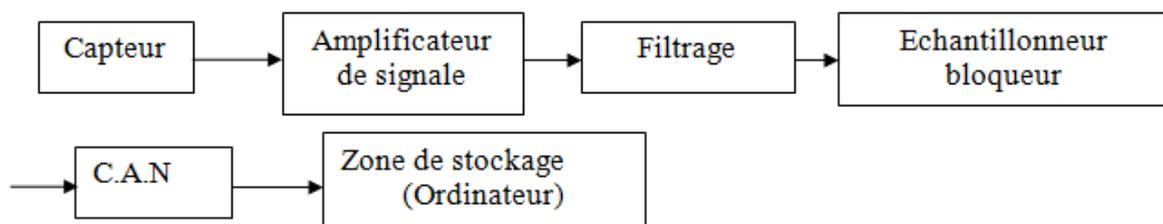
La force tangentielle F_t induite par le contact (pion /disque) et l'effort normal F_N sont mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (4) qui est relié à une chaîne d'acquisition qui traite et enregistre les données.

V.3. Chaîne d'acquisition



Figure V.2 : Chaîne d'acquisition.

La chaîne d'acquisition numérique peut être représentée par la figure suivante :



- 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. Ainsi il élimine les parasites. C'est un filtre passe bas que l'on caractérise par sa fréquence de coupure et son ordre.
- L'échantillonneur bloqueur : 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 bloqueur. Le bloqueur 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 V.2) 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.

A l'aide de deux connecteurs, on branche les deux ponts du capteur aux deux canaux.

On procède à l'étalonnage de capteur, et on connecte la chaîne à un ordinateur pour enregistrer et traiter les données en utilisant une connexion hyper terminal.

V.4. Description du capteur de force

Pour capter les deux forces normale et tangentielle due 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. [15]

Le détail de montage des jauges de contraintes sur l'élément capteur (4) fixé sur le coulisseau(2) guidé à l'aide des glissières(3) est représenté sur la (figure V.3) .

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 tangentiel. 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.

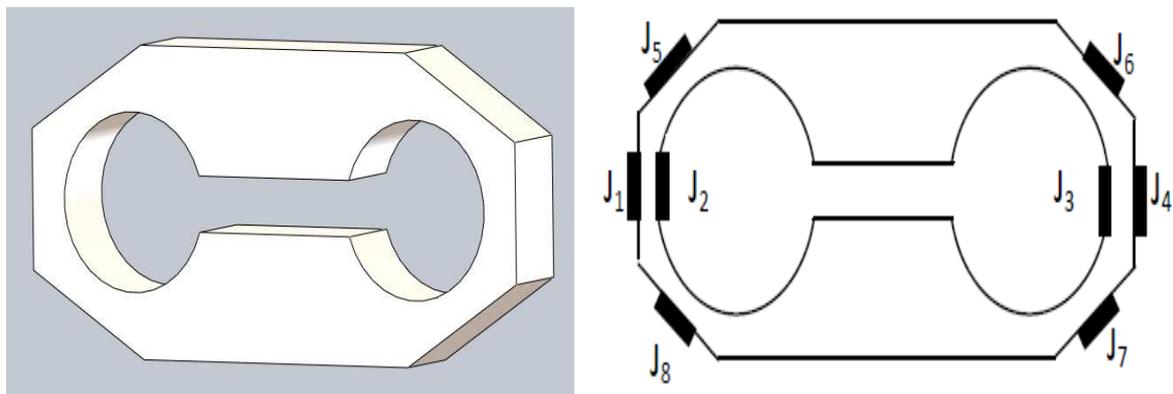


Figure V.3 : Corps d'épreuve du capteur et les zones d'emplacement des jauges

V.5. Identification des matériaux utilisés

V.5.1. 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 moyens, galets des ponts roulants, ...etc. Il est

employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques.

V.5.2. Matériaux des pions

Le matériau de base utilisé est une résine polyester insaturé isophtalique et pré-accélééré RISINER 55-E1323 fabriquée par l'entreprise EUROMERE, contenant un monomère insaturé (généralement le styrène) de 32 % en masse est réticulée à température ambiante par addition d'un catalyseur de type peroxyde organique et d'un accélérateur.

Elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

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.

Le durcisseur utilisé est de type (PMEC 50), Peroxyde –Méthyle-Ethyle-Ceton, à raison de 3% en masse. Il est le plus couramment utilisé pour la fabrication de stratifiés à température ambiante.

La charge utilisée est une poudre de graphite commerciale qui n'a subi aucun traitement chimique.

V.6. Présentation des couples tribologiques

V.6.1. Les disques

La figure V.4 montre la géométrie des disques. Ils ont été réalisés en tournage à partir des barres rondes laminées à chaud et recuites en XC48 avec les mêmes paramètres d'usinage. La fixation des disques sur la broche du tribomètre est réalisée à l'aide du trou central et d'une vis de fixation.

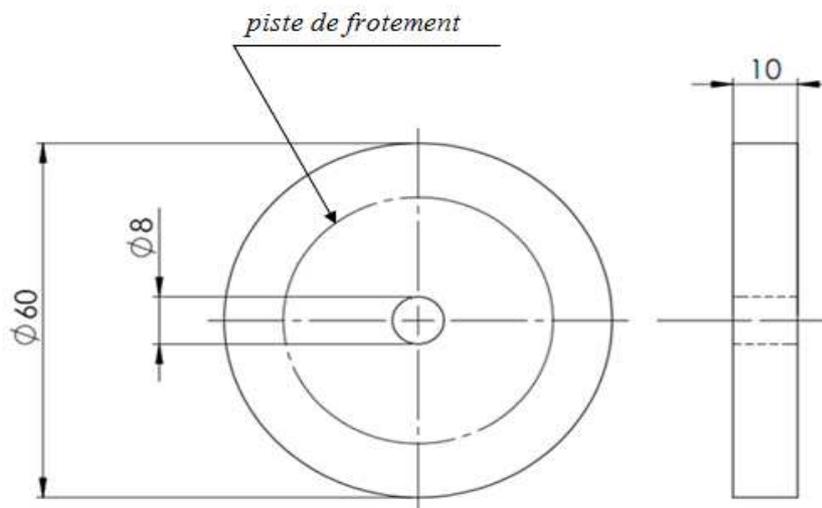


Figure V.4 : Géométrie du disque

V.6.2. Les pions

Les pions (Figure V.5) obtenus à partir de plaques en polyester chargé à différents pourcentage en masse de poudre de graphite obtenues par moulage puis découpées et fraisées sous forme parallélépipédique de section carrée 6x6 mm² et de longueur 17mm .

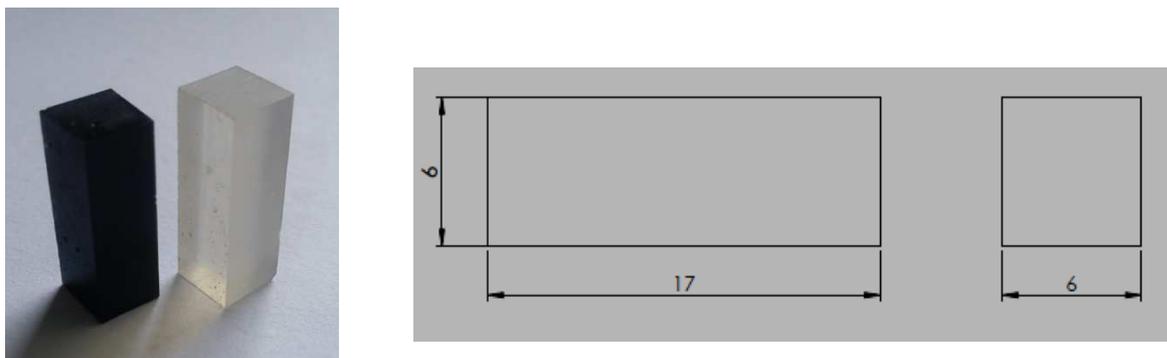


Figure V.5 : géométrie des pions

V.6.2.1. Elaboration des plaques

L'élaboration des plaques (figure V.6) débute par la préparation des différents mélanges (résine + durcisseur) pour la plaque UP0%G et (résine + durcisseur) + charge

pour les plaques UP1%G et UP2%G de poudre de graphite. Les mélanges sont ensuite homogénéisés l'un après l'autre.

Après homogénéisation, les mélanges sont versés dans des moules (figure V.6) correspondants préalablement préparés.

Après polymérisation et démoulage, les plaques (figure V.7) sont ensuite découpées aux dimensions requises à l'aide d'une tronçonneuse à scie diamantée et refroidie à l'eau.

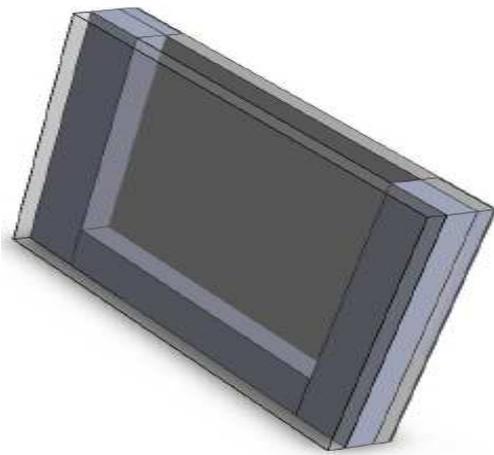


Figure V.6 : forme du moule utilisé

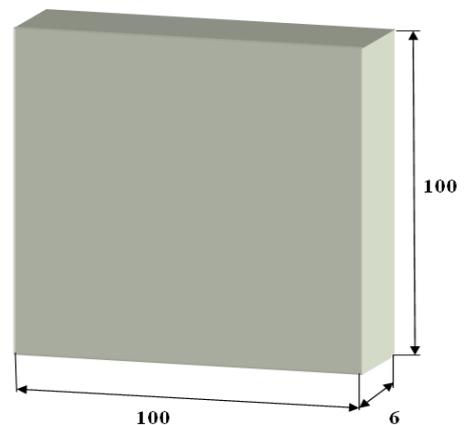


Figure V.7 : plaques obtenues après Polymerisation

V.7. Traitement thermique

V.7.1. Introduction

Techniquement, un traitement thermique est défini par la variation de la température du métal en fonction du temps.

D'une façon générale, les traitements thermiques ne modifient pas la composition Chimique de l'alliage, mais ils permettent de modifier (en général améliorer) les caractéristiques suivantes :

- . Résistance à l'usure.
- . Résistance à la corrosion.
- . Résistances mécaniques, telles que la dureté (H), la résistance à la traction (R_m), la résilience (K) et l'élasticité $A\%$.

De très nombreux alliages métalliques peuvent subir des traitements thermiques, les aciers représentent le domaine d'application le plus vaste.

V.7.2. Cycle d'un traitement thermique

Généralement, un traitement thermique comprend trois étapes

- Un chauffage à une température dépendant du type de traitement voulu.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

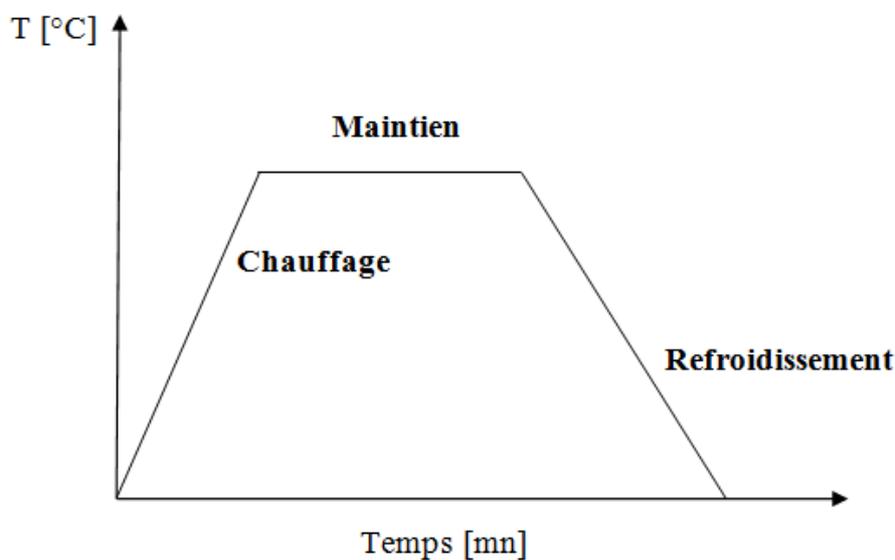


Figure V.8 : Cycle d'un traitement thermique

V.7.3. Traitements thermiques appliqués

Les traitements thermiques ont été réalisés au laboratoire de sciences des matériaux du département de génie mécanique

.

V.7.3.1. Trempe

Le rôle d'une trempe est généralement, à l'inverse des recuits, de permettre d'obtenir des structures hors équilibre dans les conditions où on les rencontre, 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.

Procédure :

Nous avons installé les échantillons dans un four électrique (figure V.8) de puissance 11 kw dont la température maximale est 1200°C. Le processus de la trempe est comme suit :

- Les disques ont été chauffés à une température de 850°C.
- 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 V.9 : four électrique

V.7.3.2. Le revenu

Le revenu a pour rôle essentiel de faire évoluer une structure hors d'équilibre, obtenue par trempe, vers un état proche de l'équilibre.

Le revenu s'effectue à température modérée inférieure à la température de trempe et à celle de recuit, pendant des durées limitées.

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- Chauffage à une température de 250°C.
- maintien à cette température pendant quarante minutes (40mn).
- refroidissement à l'air ambiant.

V.8. Examen métallographique

V.8.1. 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.

V.8.2. Déroulement du traitement

La première opération consiste à polir la surface qu'on veut 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. Pour cela nous utilisons une polisseuse sur laquelle sont montés les papiers abrasifs des différents grades (8001200).

L'opération de finition est réalisée grâce à un feutre disposé sur le plateau de la polisseuse est imbibé par une solution d' Al_2O_3 dilué dans H_2O .

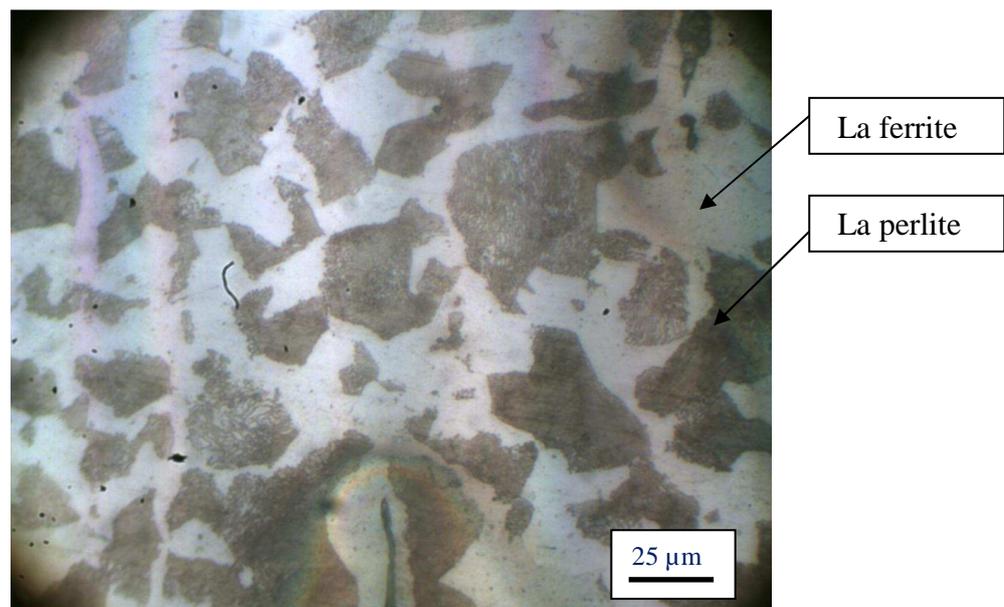
L'échantillon poli est observé au microscope afin de nous rendre compte du fini du polissage.

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.

V.8.3. Observation microscopique de l'acier XC48 avant traitement thermique

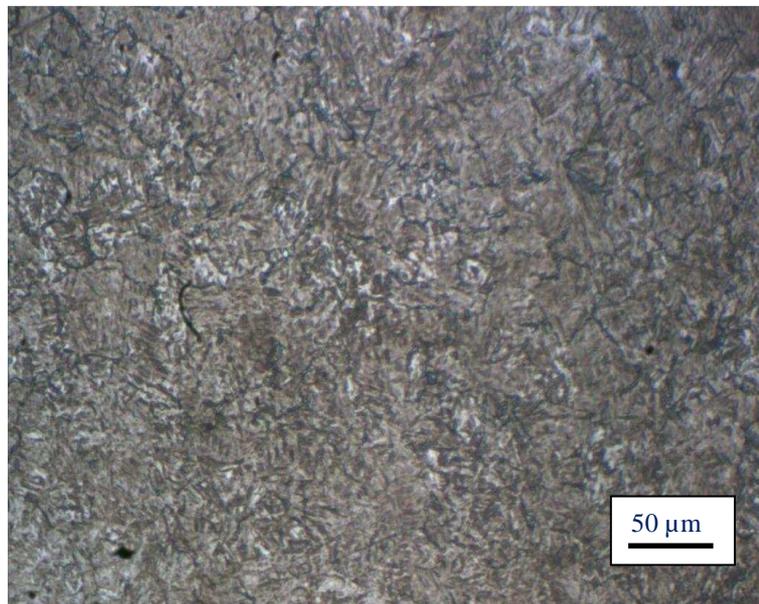
Grossissement x200



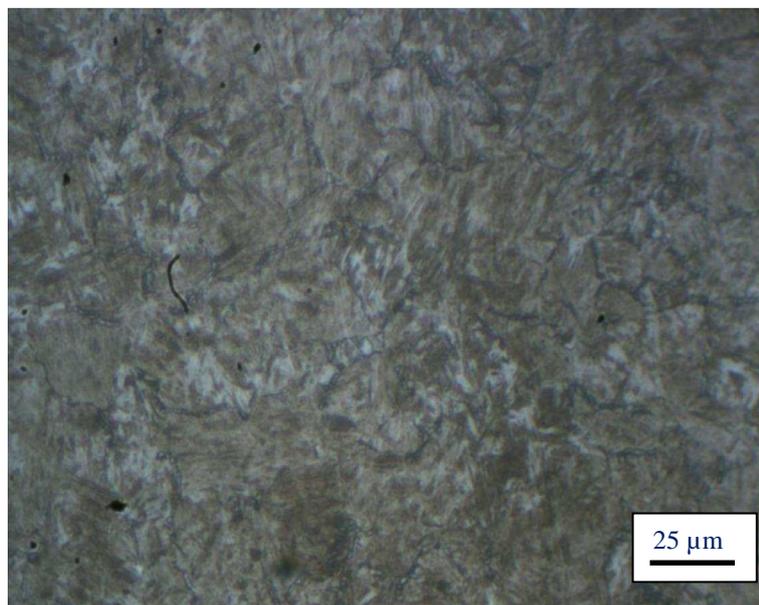
Grossissement x400

Figure V.10 :Micrographie de l'acier XC48 à l'état recuit.

La figure V.10 représente la micrographie de l'acier XC48 à l'état recuit (recuit de normalisation) prise aux grossissements 200 et 400. 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.

V.8.4. Observation microscopique de l'acier XC48 après traitement thermique

Grossissement x 200



Grossissement x400

Figure V.11 : Micrographie de l'acier XC48 après traitement thermique

La micrographie de l'acier XC48 après trempe et revenu montre que la structure générale est composée essentiellement de martensite fine et de grains fins de cémentite

V.9. Essai de dureté

V.9.1. 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.

V.9.2. 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.

Les mesures de la dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide des duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC » (figure V.11), constitué de deux parties :

- la première permet d'effectuer l'essai de type VICKERS qui consiste à appliquer une charge de (588 N) avec un pénétrateur en forme de pyramide à base carrée.
- la deuxième permet de mesurer l'empreinte de la pyramide avec un agrandissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli.



Figure V.12 : duromètres de type « WOPERT DIA TESTOR RC »

Nous avons réalisé les essais de dureté Vickers(HV) pour des échantillons de l'acier XC48 sous les deux états de la matière. Une filiation de cinq mesures de dureté pour chaque état a été réalisée. La valeur moyenne est ensuite calculée.

La formule qui permet de calculer la dureté (HV) est la suivante :

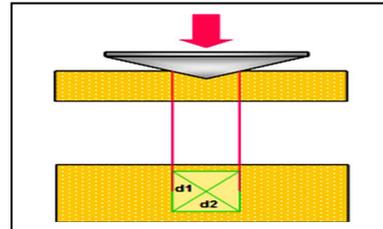
$$Hv = 0.189 * \frac{F}{D^2}$$

Avec :

F : la charge appliquée (588N)

D : diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte en mm

Le tableau V.1 résume les valeurs trouvées.



Essais	1	2	3	4	5	moyenne
Etat recuit	192,55	214,37	182,66	178,06	214 ,37	196,40
T+R 250°C	574,03	630	548,8	584,8	525,19	579,76

Tableau V.1 : Résultats des essais de dureté Vickers (Hv) de l'acier XC48 à différents états.

Nous constatons bien la différence significative de la dureté pour les deux états (recuit et trempe revenu).

V.10. Mesure de l'état de surface des disques

Avant de réaliser les essais tribologiques, les paramètres de rugosité des disques ont été mesurés à l'aide d'un appareil **Mitutoyo SJ.201** (figure V.13) qui est un rugosimètre à palpeur, qui délivre à partir de l'exploration suivant une ligne de contact.

Avant de commencer les mesures, nous devons étalonner l'appareil, en mesurant la rugosité d'une pièce de référence (étalon de rugosité) et régler la différence entre la valeur mesurée et la valeur de référence.

L'opération de mesure se fait à l'aide d'un palpeur (stylet) installé sur l'unité de détection (échantillon) qui se déplace sur une distance choisie dans un intervalle de

0,25 à 12,5 mm qui permet de détecter les irrégularités infimes présentes sur la surface de la pièce. Les résultats sont affichés sur l'écran de l'unité d'affichage.



Figure V.13 : rugosimètre à palpeur.

V.11. Détermination des caractéristiques mécaniques des résines UP0%G, UP1%G et UP2

V.11.1. Introduction

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

Pour les besoins de notre étude nous avons opté pour l'essai de flexion trois points (figure V.14). L'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 dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux tels que le module de Young, la résistance à la flexion, la flèche maximale...etc.

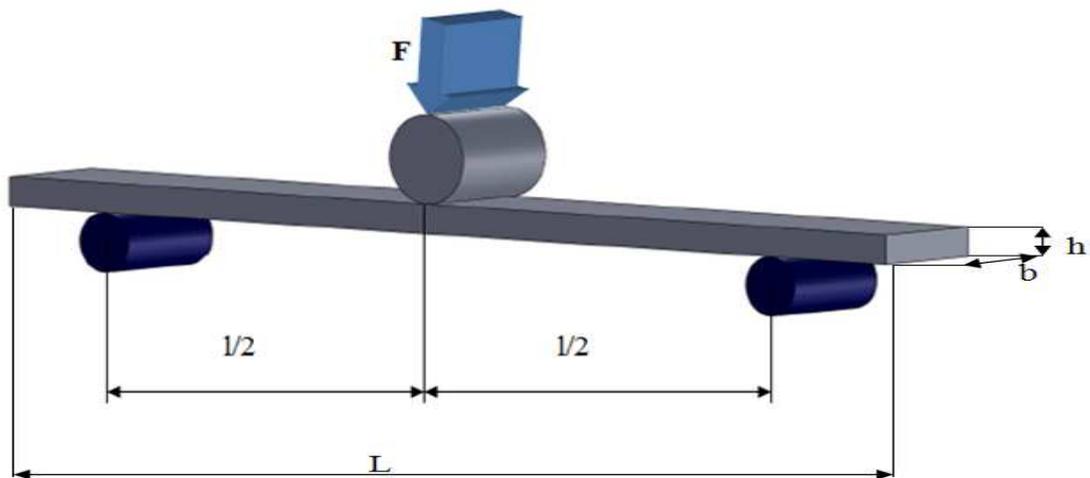


Figure V.14: Dispositif d'essai et dimension de flexion trois points

Avec :

F : la charge appliquée [N]

L : longueur totale de l'éprouvette

h : épaisseur de l'éprouvette

b : largeur de l'éprouvette

l : longueur entre appuis

V.11.2. Machine de flexion

Les essais de flexion trois points sont réalisés sur la machine de flexion **Z 20** (figure V.15), 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 50000 N et sa vitesse maximale peut aller jusqu'à 500 mm/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 V.15 : machine de flexion Z20.

V.11.3. Géométrie des éprouvettes

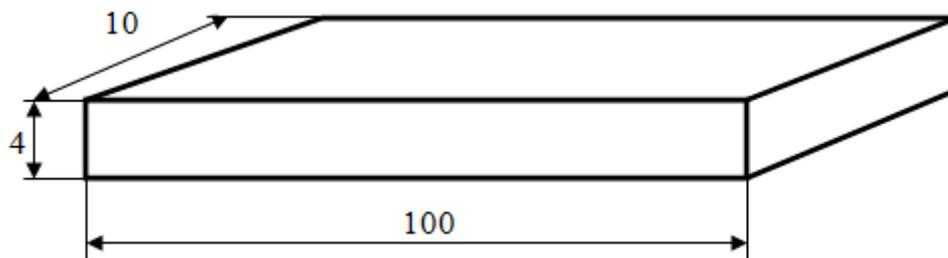


Figure V.16 : géométrie des éprouvettes de flexion

V.11.4. Résultats des essais de flexion trois points

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

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad , \quad \epsilon = \frac{6hw}{l^2}$$

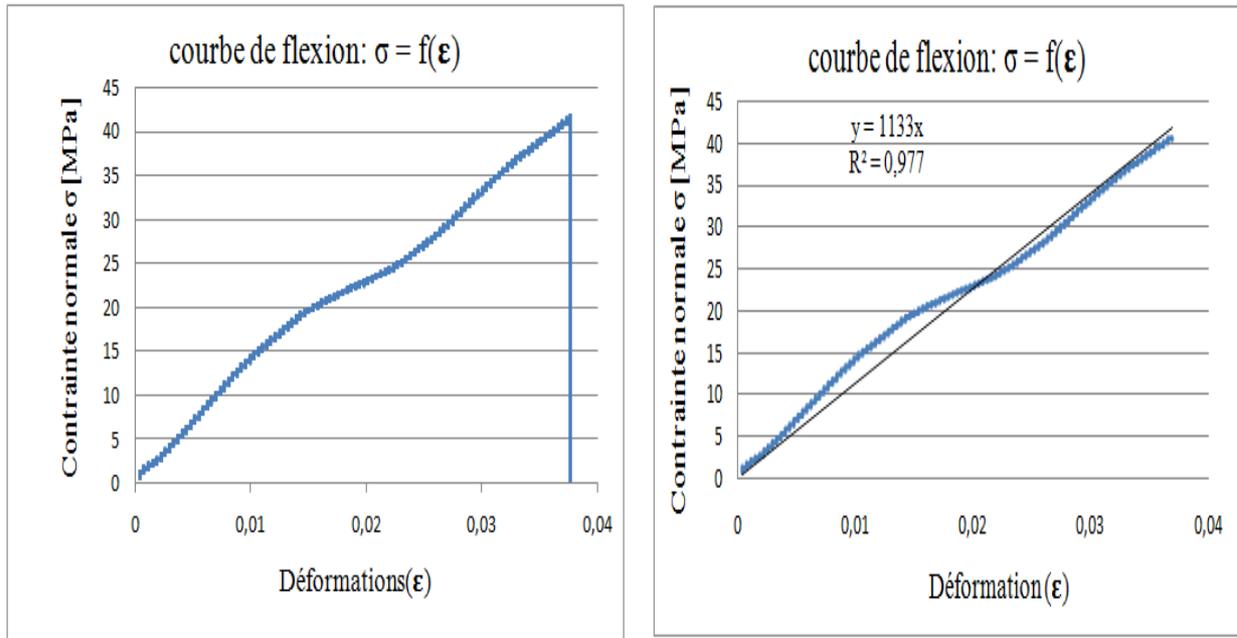
Avec :

σ_f : la contrainte normale(MPa).

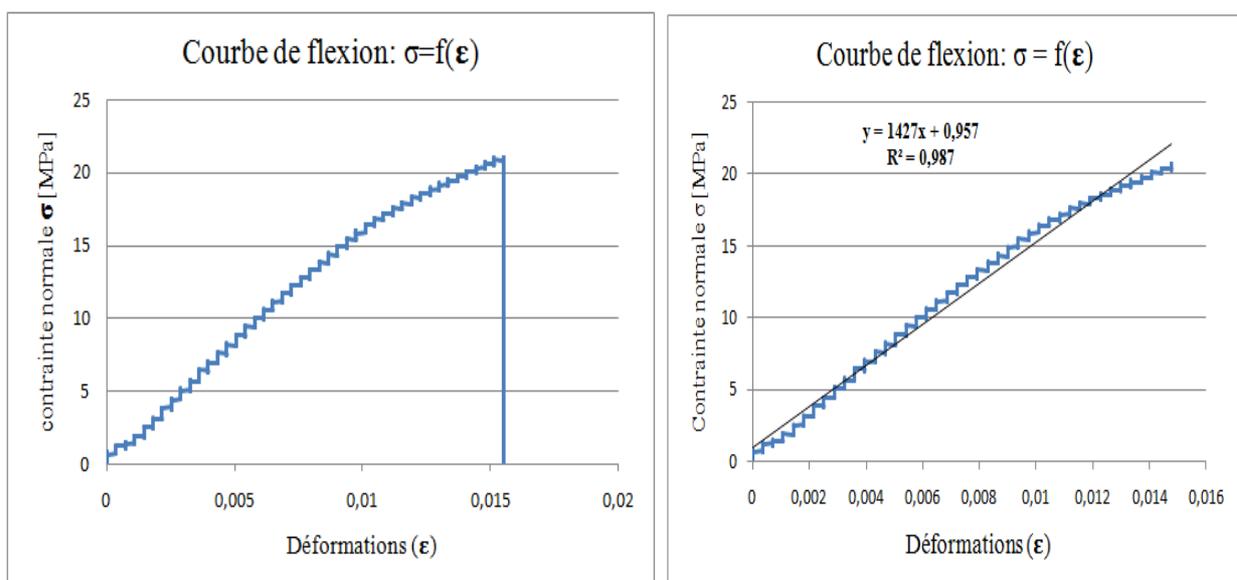
ϵ : la déformation relative.

w : flèche de l'axe neutre (mm).

Les figures V.17 à V.19 montrent les résultats de la variation de la contrainte en fonction de la déformation pour les trois matériaux testés.



FigureV.17 :Evolution contraintes /déformation de la resine (UP0% G)



FigureV.18 :Evolution contraintes /déformation de la resine (UP 1% G)

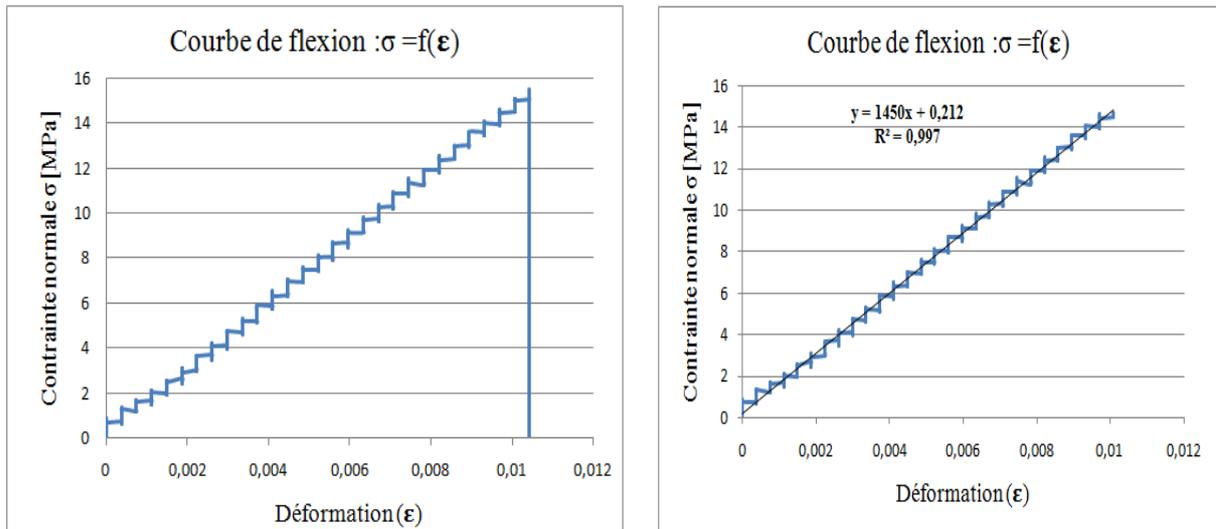


Figure V.19 : Evolution contraintes /déformation de la resine (UP 2% G)

V.11.5. Interprétation des résultats

Nous relevons selon les courbes contraintes déformations des lots UP0%G, UP1%G et UP2%G un comportement fragile.

La fragilité est très apparente pour les résines chargées, parce que la poudre de graphite a limité le mouvement des chaînes de la résine en polyester physiquement ou chimiquement.

Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec dispersion de la contrainte à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts générés par la mauvaise agitation qui influence considérablement la résistance à la rupture.

Cette dernière est plus importante pour les lots d'éprouvettes de la résine (UP0%G), elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de graphite dans les résines UP1%G et UP2%G (figure V.20), donc l'ajout de certaines charges très fines comme le **graphite** au polyester, donne des propriétés mécaniques telles que la résistance à rupture σ_R , la déformation à rupture ϵ_R (figure V.21), et l'énergie de rupture W (figures V.22), inférieures par rapport à la résine vierge, cela est dû principalement à la structure des particule du graphite et de leur tendance à l'agglomération.

Par contre la rigidité qui est caractérisée par le module de Young E (figure V.23), qui est une caractéristique très intéressante, non seulement pour évaluer l'état de copolymérisation d'une résine connue, mais également pour suivre l'évolution du comportement d'une résine au cours d'un vieillissement naturel ou accéléré, est améliorée par la présence de cette charge.

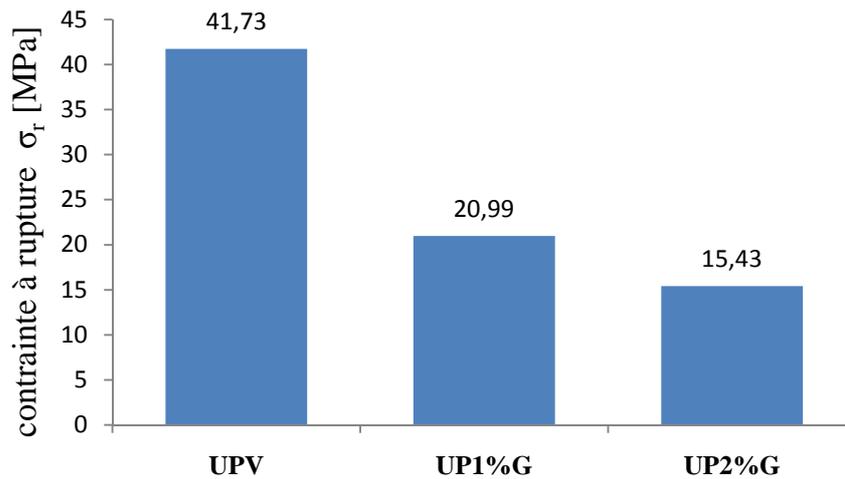


Figure V.20 : influence de l'ajout de graphite sur les contraintes à rupture

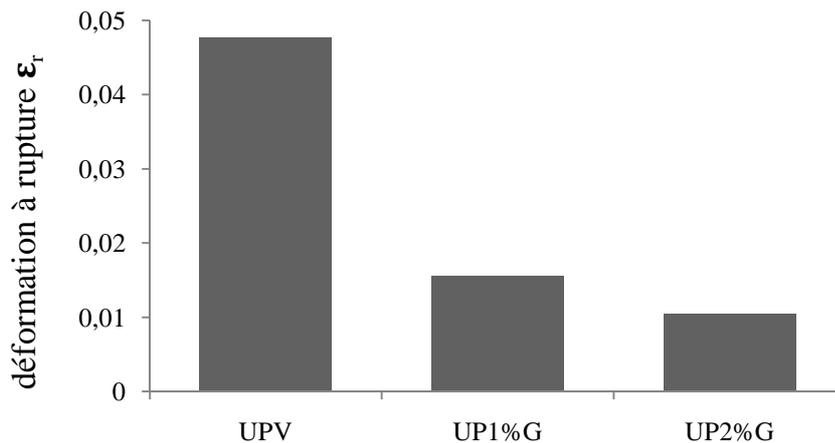


Figure V.21 : influence de l'ajout de graphite sur la déformation à rupture

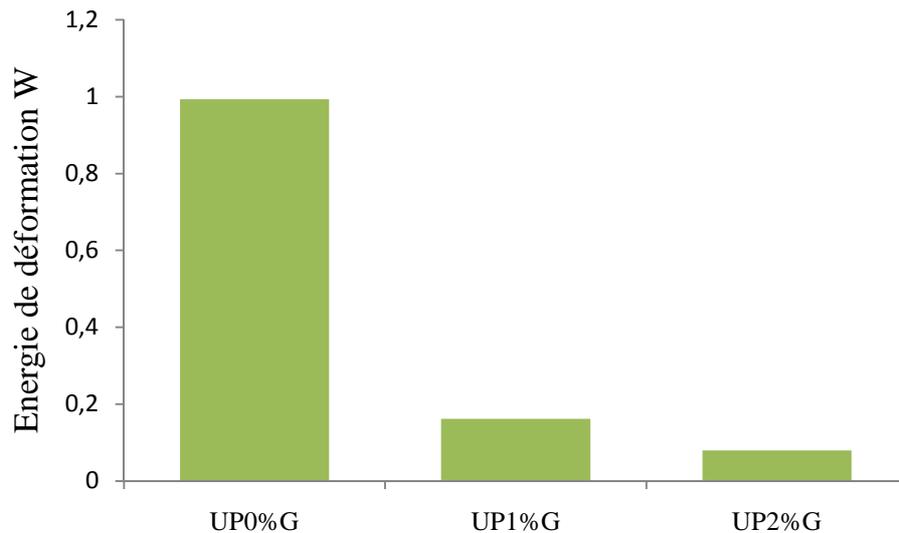


Figure V.22 : influence de l'ajout de graphite sur l'énergie de déformation

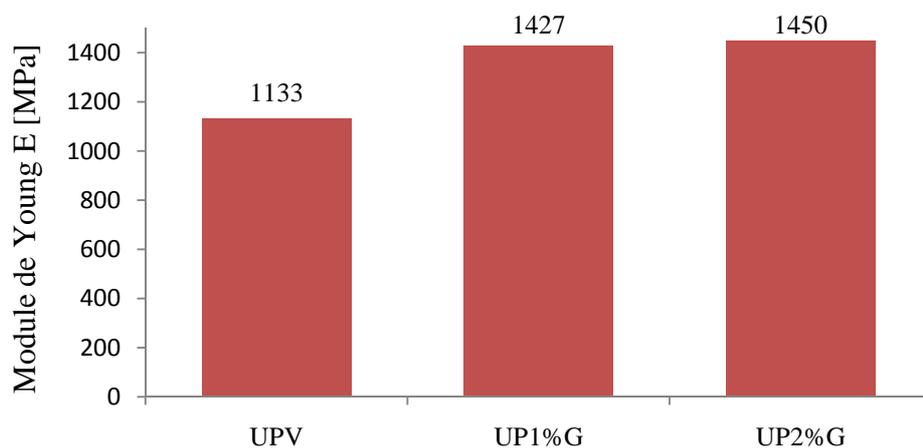


Figure V.23 : influence de l'ajout de graphite sur le module de Young.

V.11.6. Conclusion

L'ajout de certaines charges très fines comme le *graphite* au polyester, donne des propriétés mécaniques telles que la résistance à rupture σ_R , la déformation à rupture ϵ_R , et l'énergie de rupture W , inférieures à celles de la résine non chargée, en revanche le module de YOUNG est amélioré par la présence de cette charge.

V.12. Essais d'usure

Tous les essais ont été réalisés sans lubrification et dans des conditions de température ambiante et de pression atmosphérique sensiblement identiques.

Pour chacune des compositions, nous avons effectué des essais d'usure à trois vitesses de glissement (0.08, 0.32 et 0.63 m/s) et quatre efforts normaux (11, 16, 22 et 28N). Pour chaque combinaison des ces paramètres, une série de trois essais a été réalisée. Avant chaque essai, les échantillons (pions et disques) sont nettoyés à l'acétone puis séchés et un contrôle de rugosité est effectué.

Pour quantifier la perte de masse et le taux d'usure, les échantillons (pions) ont été pesés avant, pendant et après chaque expérience à l'aide d'une balance électronique (figure V.22) dotée d'une précision de 10^{-4} g. Les essais ont été réalisés à une vitesse de glissement $V=0.32\text{m/s}$ et à trois efforts normaux ($F_n = 11, 16$ et 22 N).



Figure V.24 : balance électronique

V.13. Résultats est discussions sur les essais d'usure

V.13.1. 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 de frottement « F_T » en fonction du temps. Pour

illustration, un exemple de ces courbes est présenté en figures V.25 et V.26. La courbe donnant l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps (Figure V.27) est déduite des courbes de $F_N(t)$ et $F_T(t)$ en effectuant le rapport $F_T(t) / F_N(t)$.

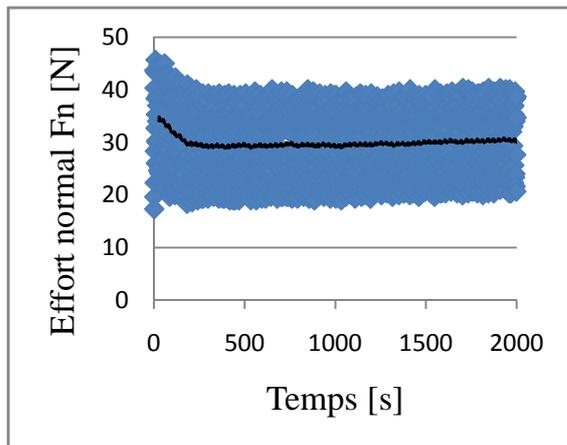


Figure V.25 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

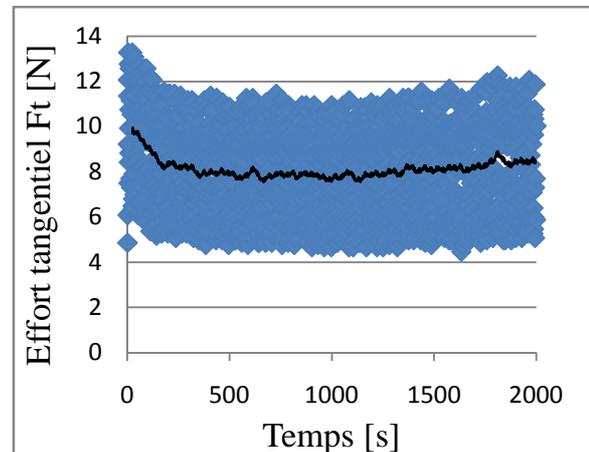


Figure V.26 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

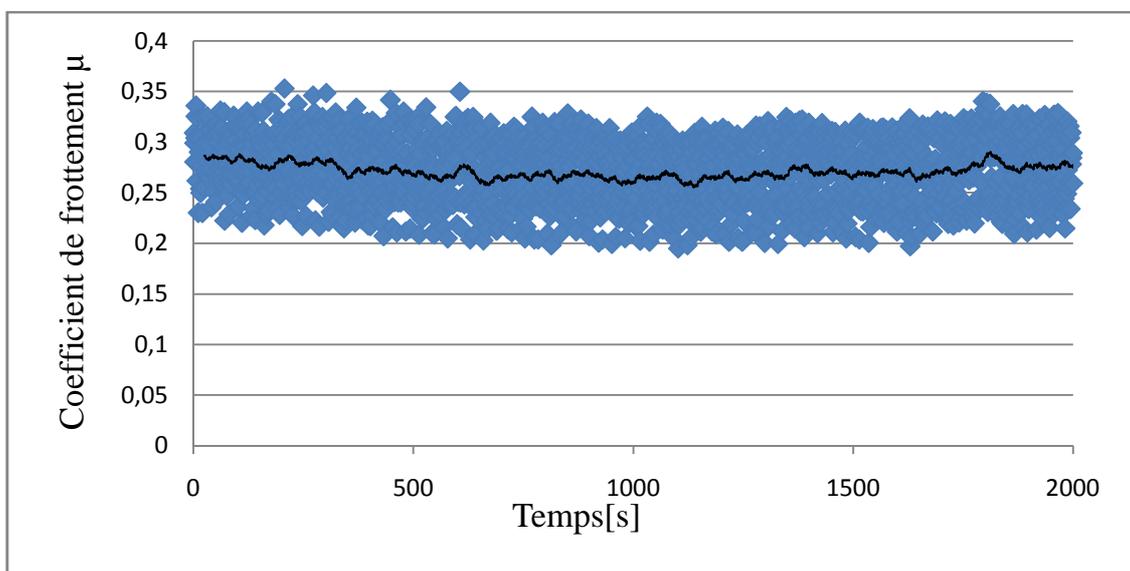


Figure V.27 : Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps.

Nous avons choisi de représenter quelques graphiques de variation du coefficient de frottement en fonction du temps des trois matériaux dans l'étude à une charge $P=11,29\text{N}$, et 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.

Pour le couple UP0%G/XC48

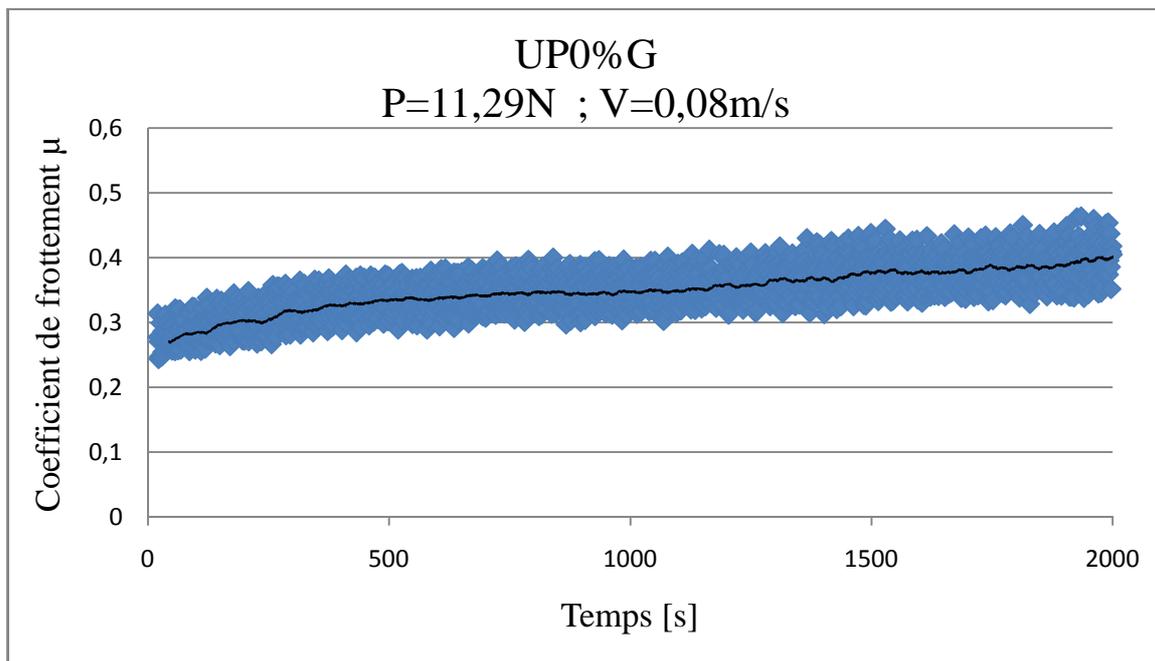


Figure V.28: coefficient de frottement en fonction du temps

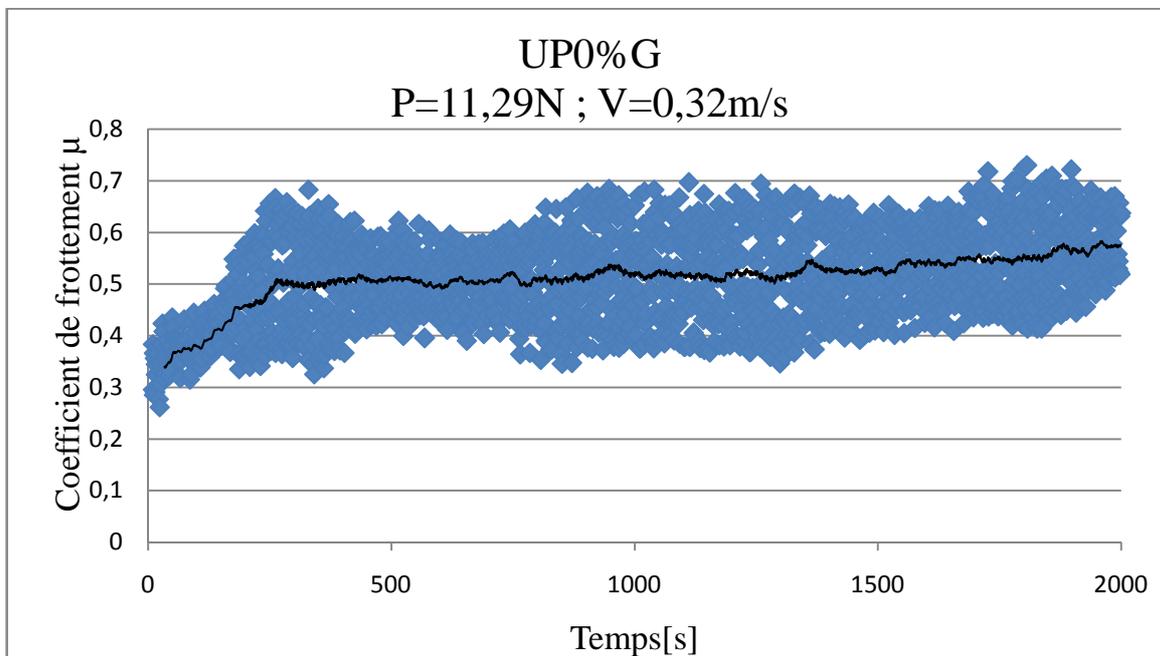


Figure V.29: coefficient de frottement en fonction du temps

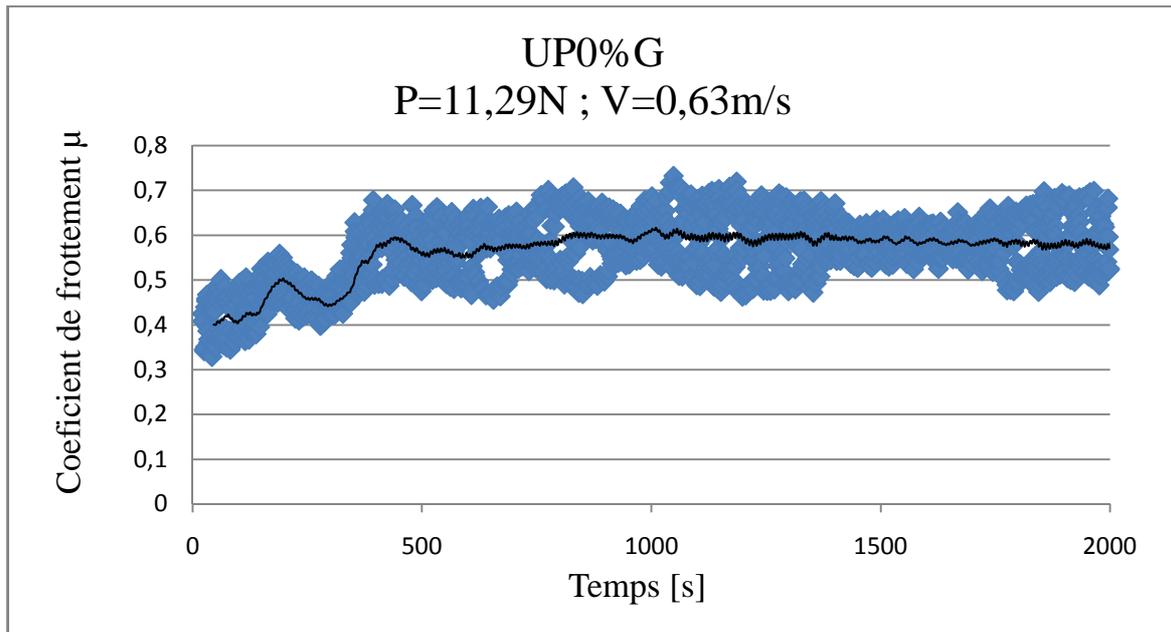


Figure V.30 : coefficient de frottement en fonction du temps

Pour le couple UP1%G/XC48

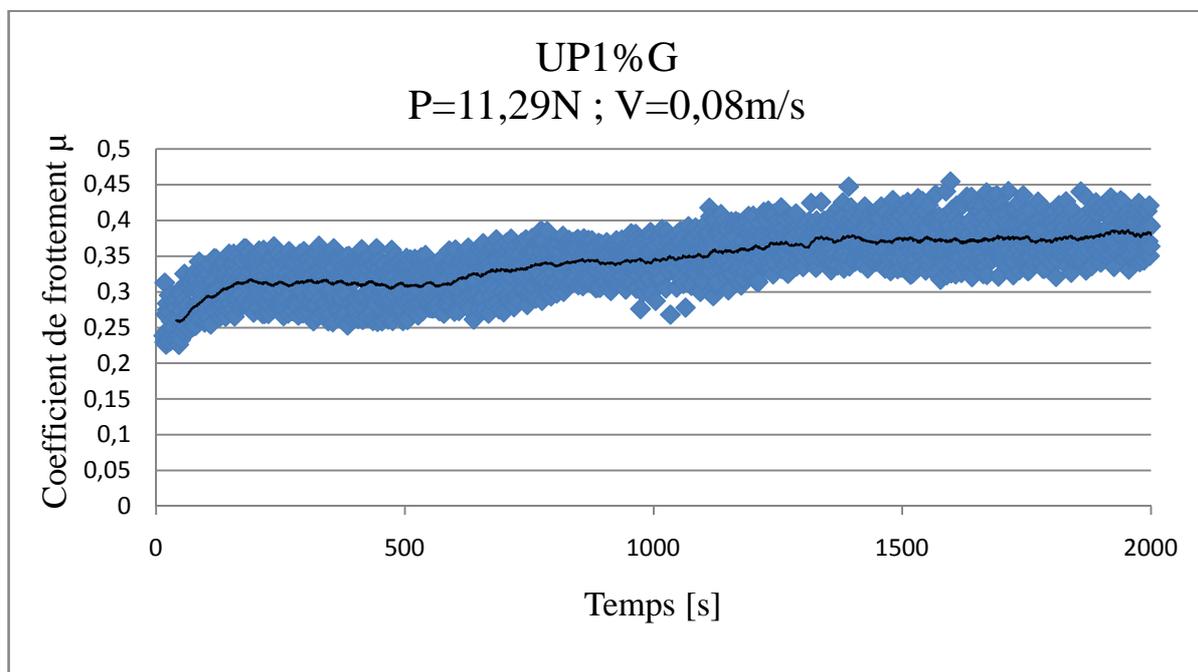


Figure V.31 : coefficient de frottement en fonction du temps

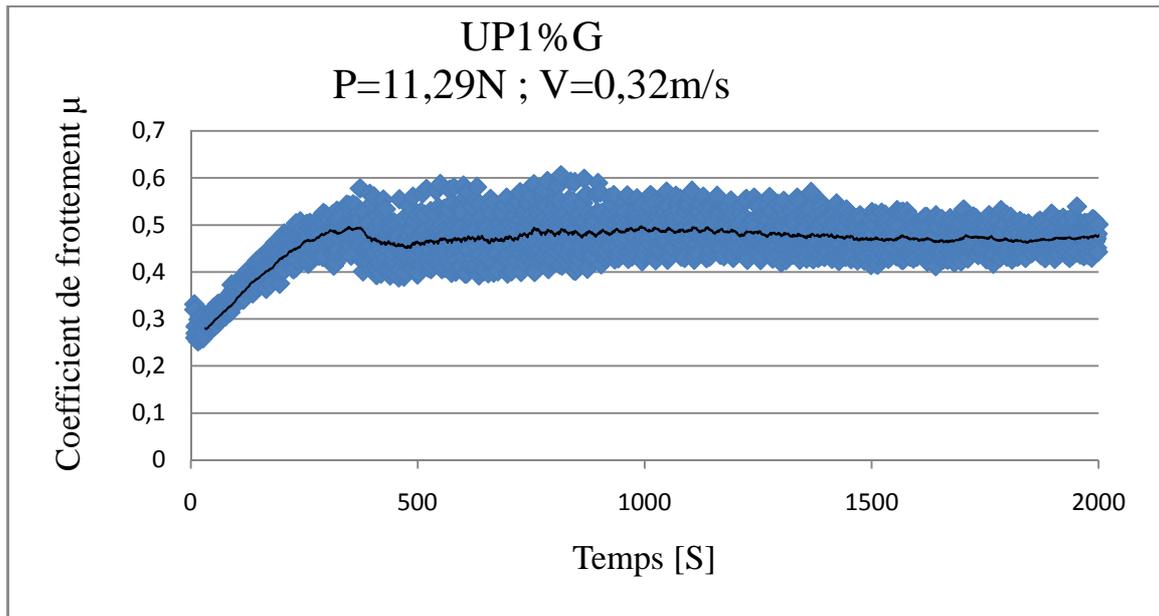


Figure V.32 : coefficient de frottement en fonction du temps

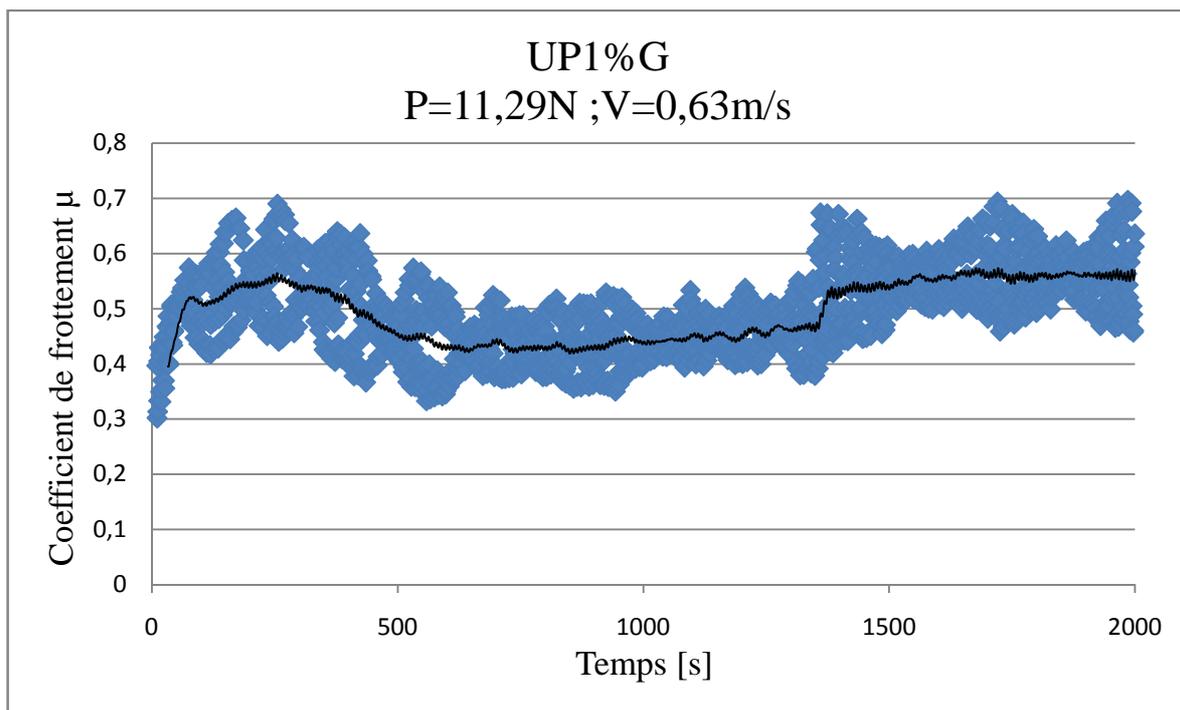


Figure V.33 : coefficient de frottement en fonction du temps

Pour le couple UP2%G/XC48

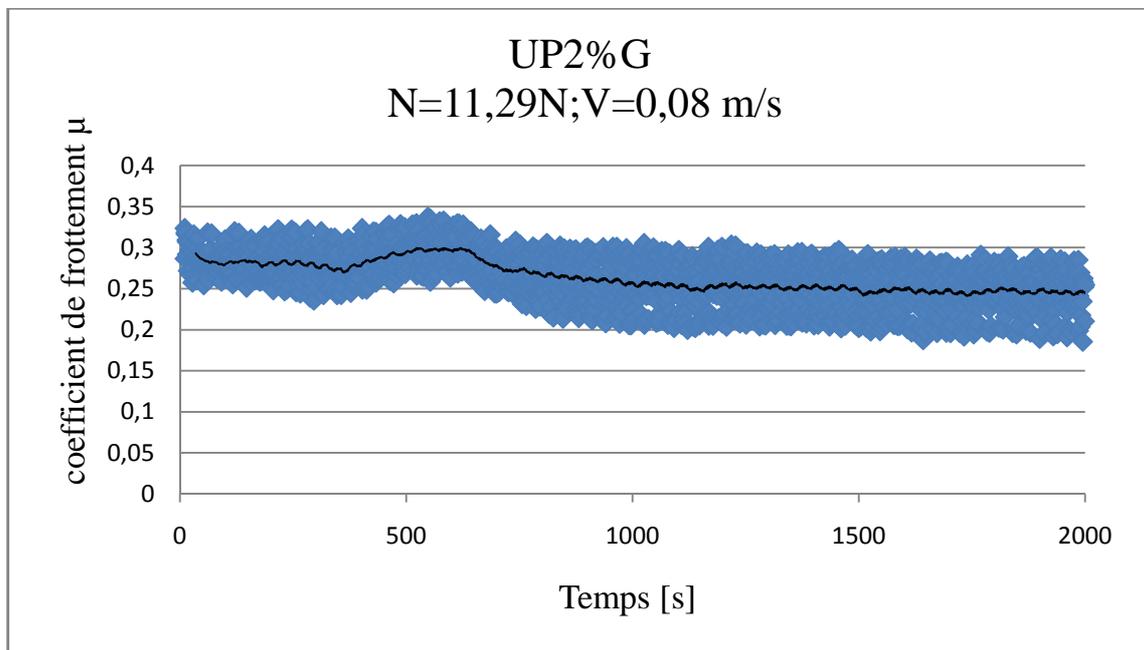


Figure V.34: coefficient de frottement en fonction du temps

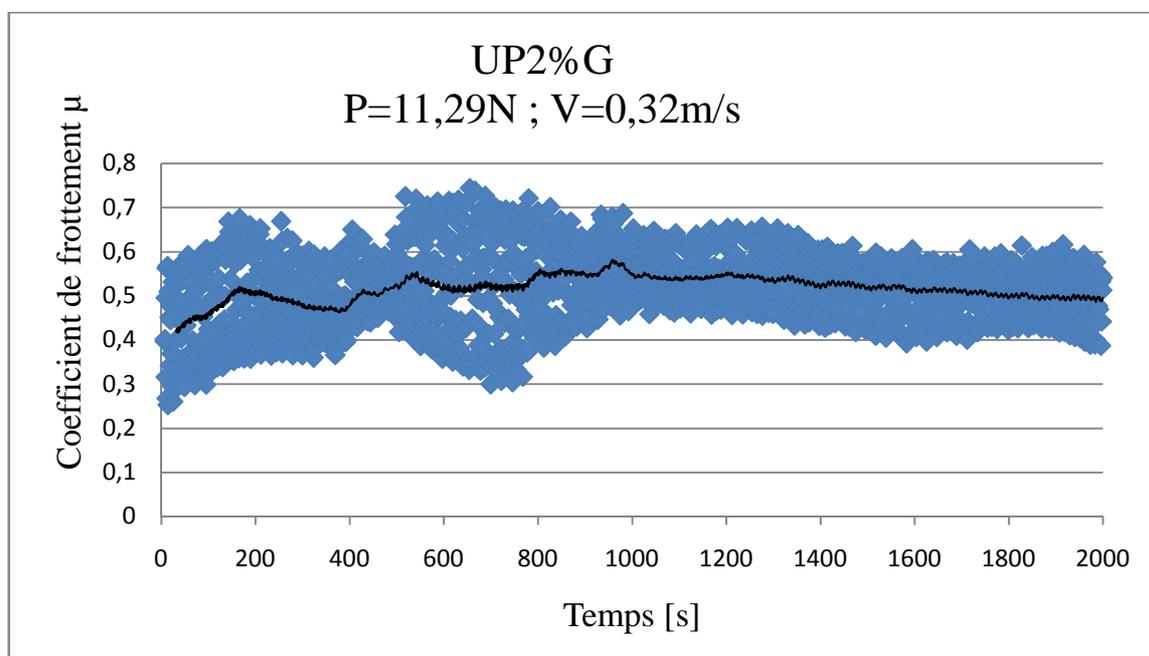


Figure V.35 : coefficient de frottement en fonction du temps

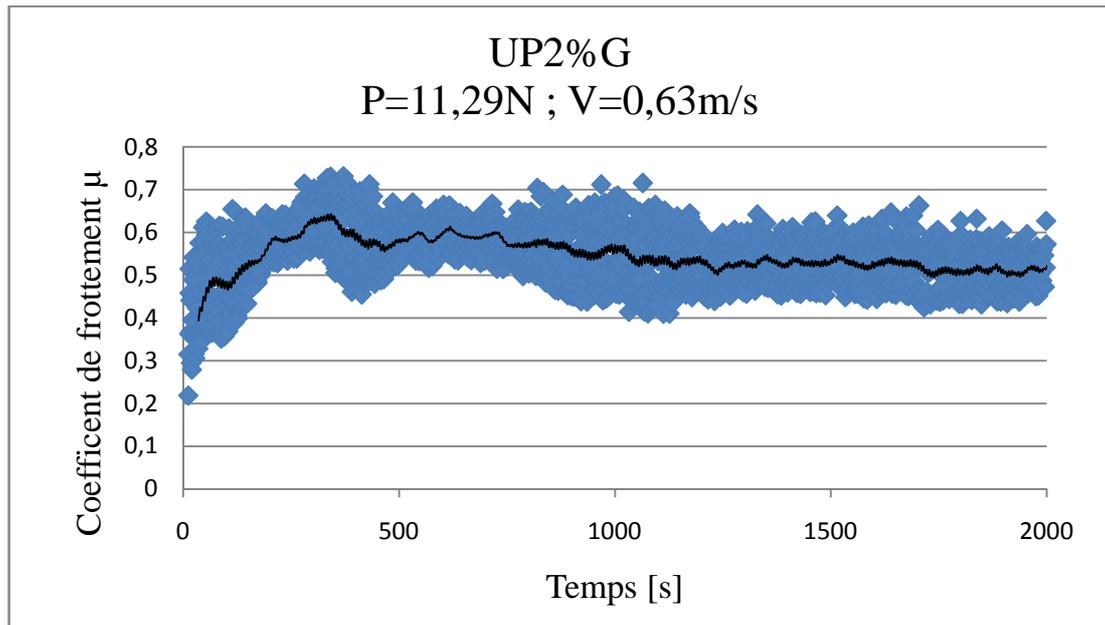


Figure V.36: coefficient de frottement en fonction du temps.

Les histogrammes de la figure V.37 représentent la variation du coefficient de frottement pour les trois compositions de matériaux aux charges et vitesses

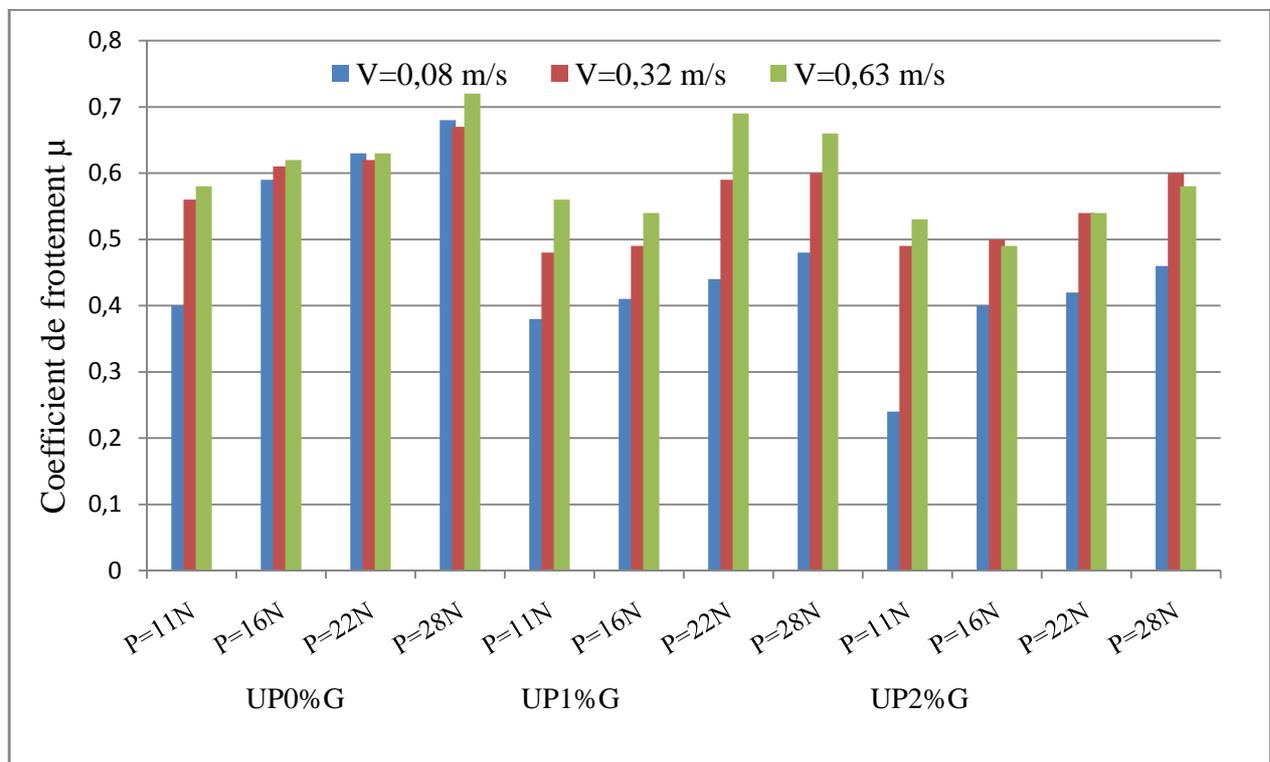


Figure V.37 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de l'effort normal et de la vitesse linéaire de glissement des trois matériaux étudiés.

Nous pouvons observer l'évolution du coefficient de frottement pour les trois matériaux de l'étude en fonction du temps. Au commencement, nous observons une augmentation du coefficient de frottement lié à la période initiale de rodage. Après la période initiale de rodage, le coefficient de frottement se stabilise à une certaine valeur. Cette valeur est au fait, la valeur caractéristique du coefficient de frottement « μ ».

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'évolution du coefficient de frottement moyen en fonction de la vitesse et de la charge est présentée sur la figure(V.37). Ces résultats montrent que :

❖ Dans la plupart des essais le coefficient de frottement augmente avec l'effort normal et la vitesse de glissement pour les trois matériaux étudiés. Le même résultat est obtenu par d'autres chercheurs (pour la charge seulement) sur le PA6 et son composite à base de fibre de carbone (figure V.35). [15]

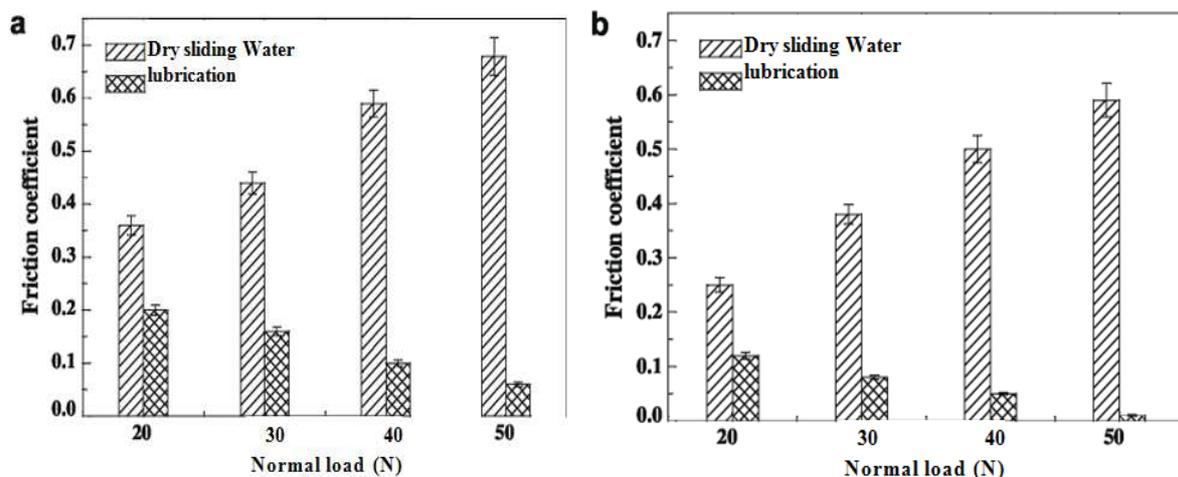


Figure V.38 : Effet de la charge normale sur le coefficient de frottement de (a) PA6 et (b) ses composés dans le glissement sec et la condition lubrifier [16].

❖ les compositions UP1%G et UP2%G ont présenté un coefficient de frottement plus faible par rapport à la résine UP non chargé .Cependant, on peut constater que l'échauffement de la surface de composés de UP1%G et UP2%G était inférieur à celui de UP0%G, parce que le graphite a une conductivité thermique plus élevée par rapport à la résine non chargé et a amélioré la dissipation de la chaleur de friction accumulée. En outre, le graphite peut agir en tant que lubrifiant solide d'où sa contribution à la réduction du coefficient de frottement.

V.13.2.Perte de masse

➤ Pour les trois compositions étudiées, la perte de masse augmente avec la distance de glissement et suit une loi linéaire. La pente de la droite à tendance à augmenter pour les efforts normaux importants signe d'une usure par abrasion plus importante.

➤ On observe l'augmentation de la perte de masse en fonction de la distance parcourue. Cette augmentation est plus apparente pour la résine UP non chargée. Les matériaux renforcés présentent un peu moins de perte de masse pendant la distance de glissement. Nous déduisons que l'ajout du graphite au polyester diminue la vitesse d'usure. Le graphite est connu pour sa structure constituée d'un empilage de plaques hexagonales au sommet des quels se trouvent les atomes présentant des liaisons faibles avec leurs voisins. Il est friable, doux et constitue donc **un bon lubrifiant solide** d'où sa contribution à la baisse de la perte de masse.

Les figures V.39 à V.41 montrent l'évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue des trois matériaux étudiés pour une vitesse linéaire de glissement $V=0.32$ m/s.

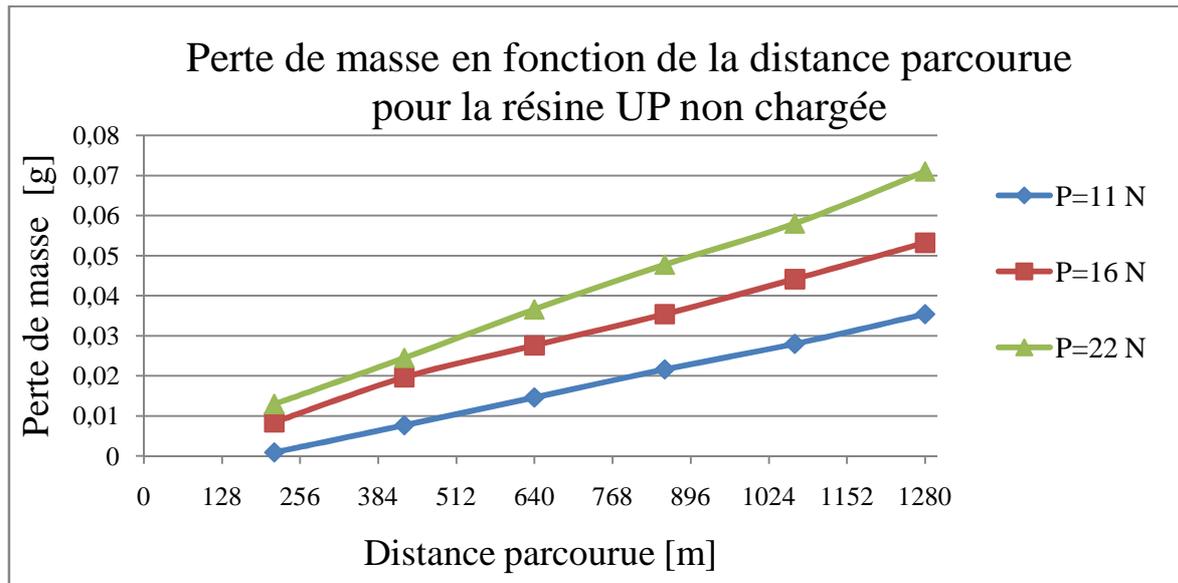


Figure V.39 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue de la résine UP0%G pour $V=0.32\text{m/s}$.

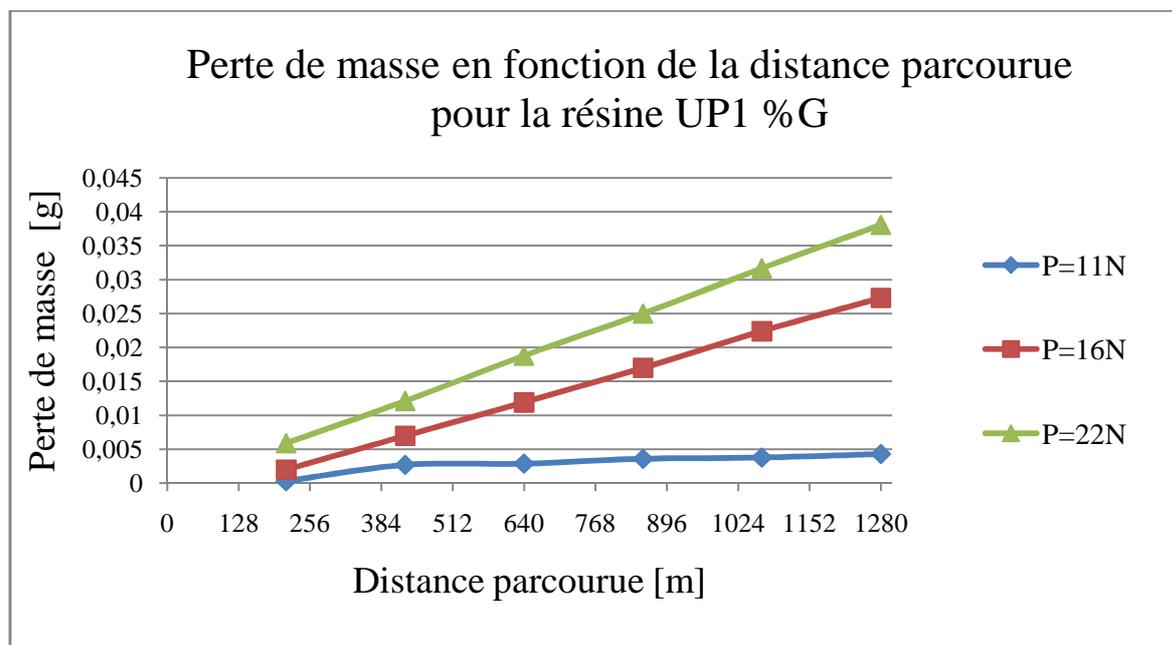


Figure V.40: évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue de la résine UP1%G pour $V=0.32\text{m/s}$.

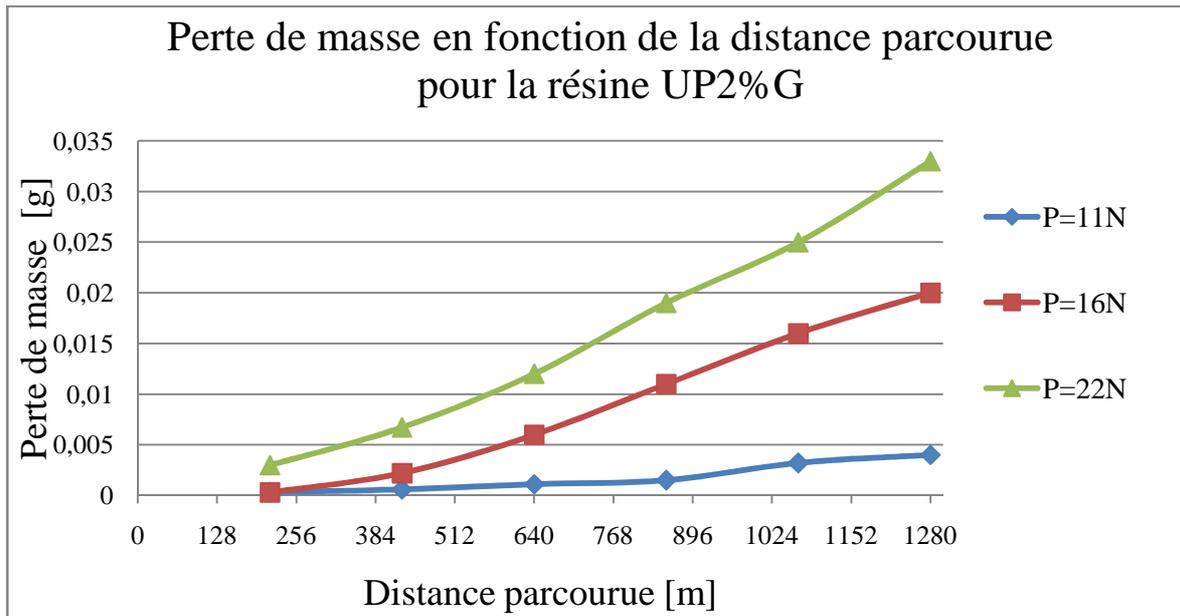


Figure V.41 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue de la résine UP2%G pour $V=0.32m/s$.

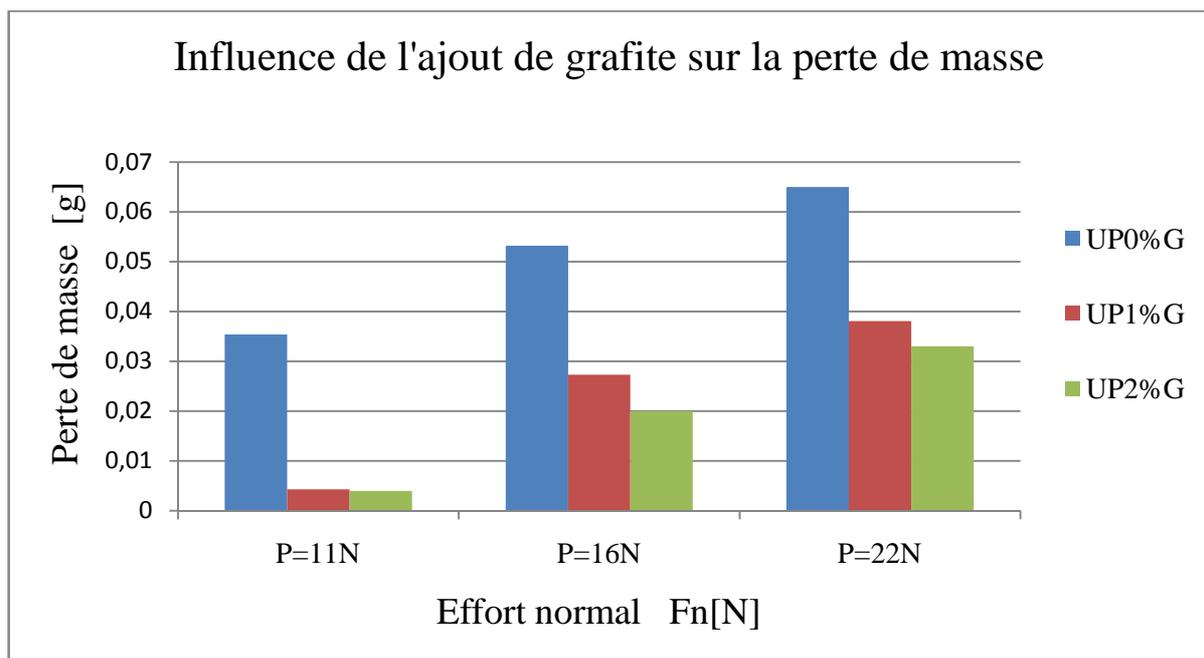


Figure V.42 : Perte de masse en fonction de la charge pour les trois compositions.

V.13.3. Taux d'usure k

La norme DIN EN 50324 (ASTM G99) définit le taux d'usure comme le volume de matière perdu divisé par l'effort normal F_N et la distance parcourue L . Le taux d'usure K (ou rapport de proportionnalité, voir DIN EN 50321) est dérivé de la loi d'Archard et suppose que la perte de volume ΔV est proportionnelle à l'effort normal F_N et à la distance de glissement L .

Le taux d'usure (K) a été calculé en utilisant l'équation suivante :

$$K = \frac{\Delta v}{F_n L} = \frac{\Delta m}{\rho F_n L}$$

F_n : Effort normal [N] ; L : distance parcourue [m] ; Δm : perte de masse [g] ; ρ : masse volumique [g/cm^3]

Le tableau V.2 donne les résultats du calcul du taux d'usure K en fonction de la charge pour les trois compositions.

Taux d'usure K [$10^{-8}\text{cm}^2/\text{N}$]			
Matériaux	$F_n=11\text{N}$	$F_n=16\text{N}$	$F_n=20\text{N}$
UP0%G	20,41	20,45	20,58
UP1%G	2,47	10,04	10,98
UP2%G	2,30	7,68	9,5

Tableau V.2 : Taux d'usure K en fonction de l'effort normal pour les trois compositions

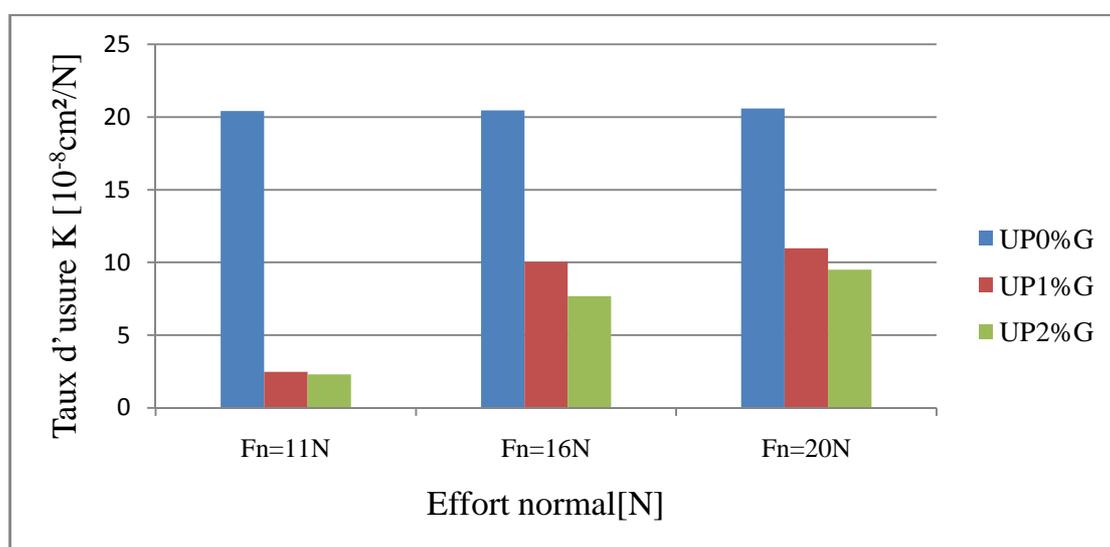


Figure V.43 : Evolution du taux d'usure en fonction de l'effort normal pour les trois compositions pour une vitesse $v=0,32\text{m/s}$
 Selon La figure V.43, les matériaux renforcés (UP1%G, UP2%G) présentent un comportement optimum à l'usure. Nous déduisons donc que l'ajout de graphite diminue la vitesse d'usure.

Le même résultat est obtenu par d'autres chercheurs sur la PA6 et son composite à base de fibre de carbone (figure V.44) et sur le PEEK et ses composites à base de fibre de carbone ou du verre (figure V.45).

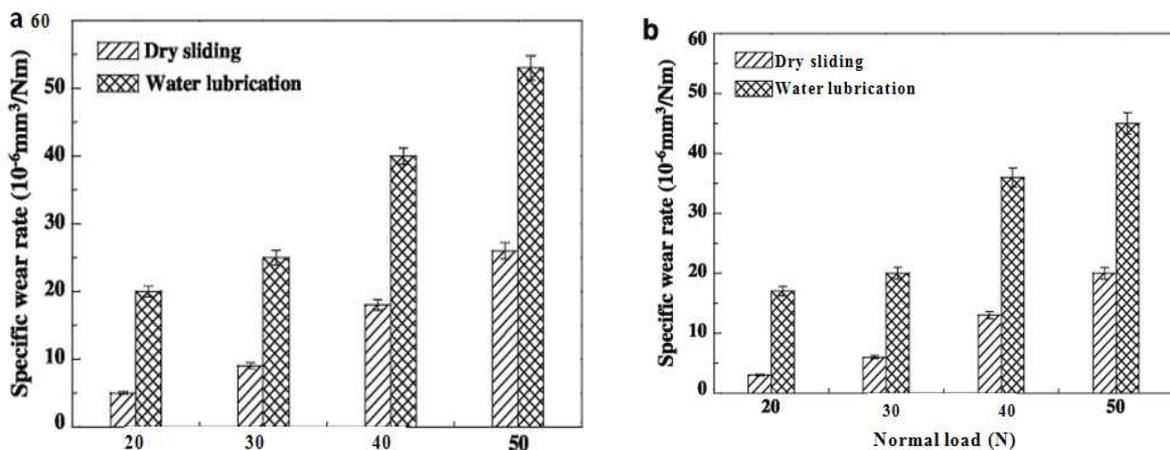


Figure V.44 : Effet de charge normale sur le taux spécifique d'usage (a) de PA6 et (b) de sa PA6/CNT dans le glissement sec et la condition lubrifiée [16].

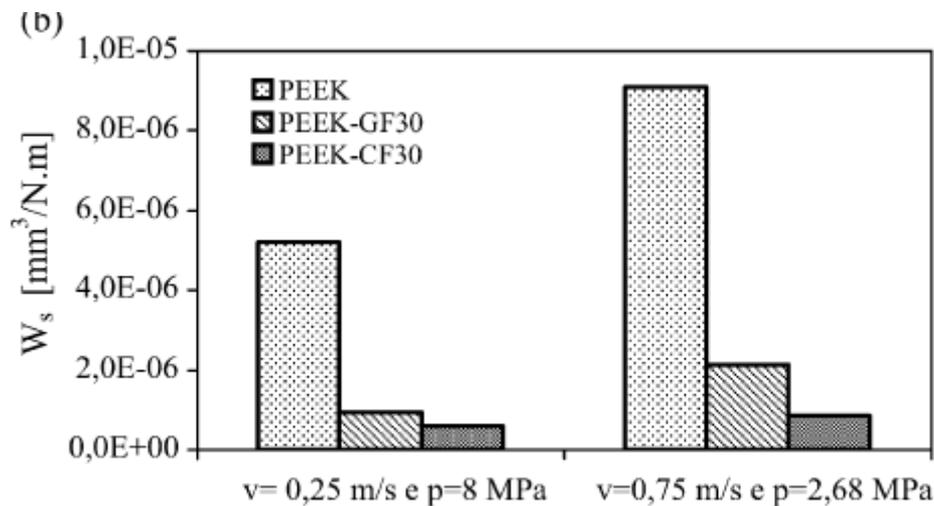


Figure V.45 : Taux d'usure de chaque matériau, pour une distance de glissement de 15 kms, pour un produit $pv = 2\text{ m/s MPa}$ [17].

V.14. Conclusion

À la fin de ce travail, nous pouvons énoncer les quelques conclusions pour les conditions ayant permis la caractérisation du comportement tribologique (frottement et usure) des composés de la résine polyester UP vierge, UP1%G et du UP2%G de poudre de graphite contre des disques en acier XC48 traité, en glissement sec.

- 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. Le mécanisme d'usure activé est celui par abrasion. Le volume des débris est différent. Il est faible dans les cas des petites charges et petites vitesses.
- nous avons constaté clairement que le coefficient de frottement croît avec l'augmentation de l'effort normal et la vitesse linéaire de glissement mais décroît avec l'augmentation du pourcentage du graphite.
- L'incorporation du graphite dans la résine polyester a amélioré la résistance à l'usure considérablement.
- UP2%G a présenté le meilleur comportement au frottement et à l'usure dans la gamme des conditions considérées des essais, en comparaison avec UP0%G et leUP1%G.
- Nous pouvons considérer au vu des résultats que l'ajout de graphite joue le rôle de lubrifiant solide d'où sa contribution à la baisse de la perte de masse par diminution du coefficient de frottement.

*CONCLUSION
GENERALE*

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale.

Il nous a permis d'une part d'acquérir une expérience dans le domaine de l'expérimentation à savoir la manipulation des différents appareils tels que la machine de flexion, le rugosimètre, la chaîne d'acquisition D'autre part de 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.

L'ajout de certaines charges très fines comme le *graphite* au polyester, donne des propriétés mécaniques telles que la résistance à rupture σ_R , la déformation à rupture ϵ_R , et l'énergie de rupture W , inférieures à celles de la résine non chargée, en revanche le module de YOUNG est amélioré par la présence de cette charge.

Cette étude a permis aussi d'apporter des réponses à certaines questions relatives au frottement et à l'usure d'un pion en polyester insaturé chargé ou non de poudre de graphite frottant à sec contre un disque en acier XC48 traité.

Les résultats ont montré que le coefficient de frottement croît avec l'augmentation de l'effort normal de contact et décroît avec l'augmentation du pourcentage de graphite.

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. Le mécanisme d'usure activé est celui par abrasion. Le volume des débris est différent. Il est faible dans les cas des petites charges et petites vitesses.

L'incorporation du graphite dans la résine polyester a amélioré la résistance à l'usure considérablement.

La composition UP2%G a présenté le meilleur comportement au frottement et à l'usure dans la gamme des conditions considérées des essais, en comparaison avec UP0%G et UP1%G.

Nous pouvons considérer au vu des résultats que l'ajout de graphite joue le rôle d'un lubrifiant solide d'où sa contribution à la baisse de la perte de masse par diminution du coefficient de frottement.

Usure et frottement sont deux phénomènes étroitement liés, étudiés par la tribologie, mais leur relation mutuelle est loin d'être comprise actuellement et dépend fortement, et peut intuitive, des conditions de contact (pression, vitesse, ...), de l'environnement (température, humidité) et des matériaux impliqués : ainsi le changement d'un des deux matériaux peut amener une baisse de frottement, mais une augmentation de l'usure. Ces deux phénomènes sont très importants sur le plan pratique.

ANNEXES

ANNEXE-A-

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

Pour le couple UP0%G/XC48

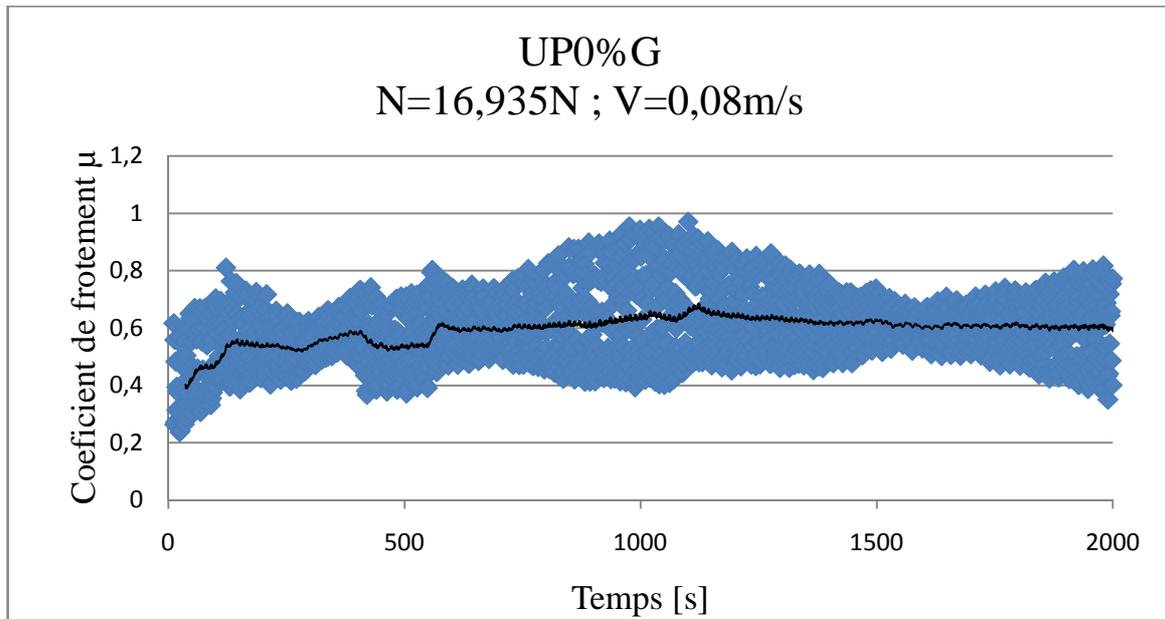


Figure A.1 : Coefficient de frottement en fonction du temps

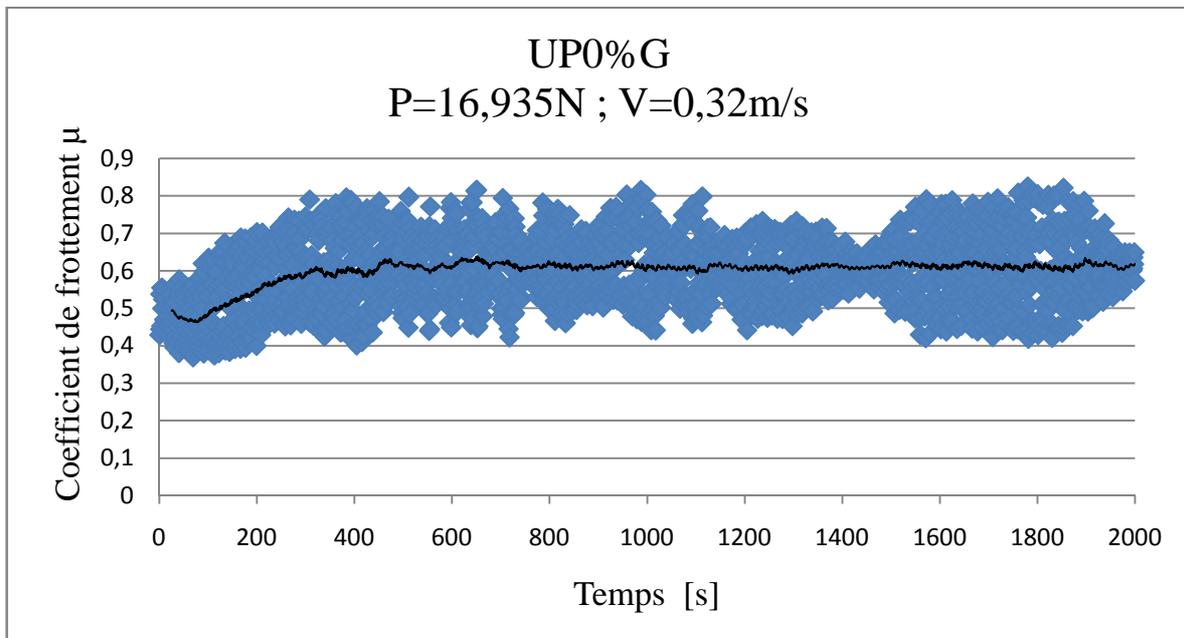


Figure A.2 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

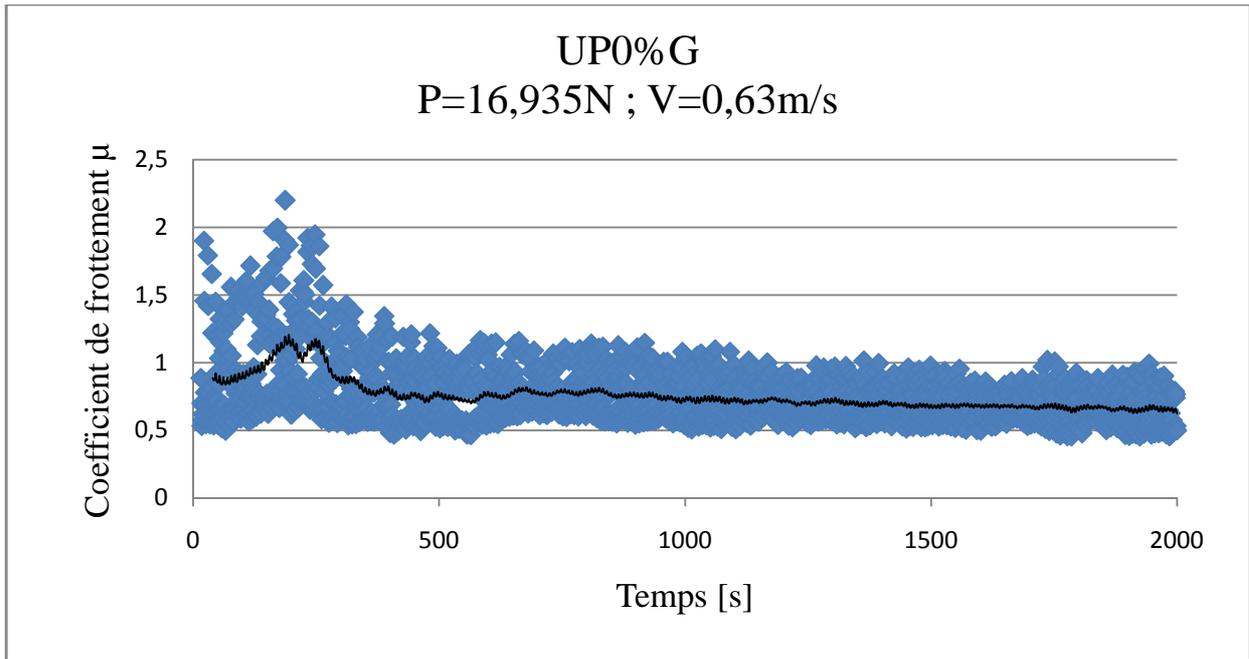


Figure A.3 : Coefficient de frottement en fonction du temps

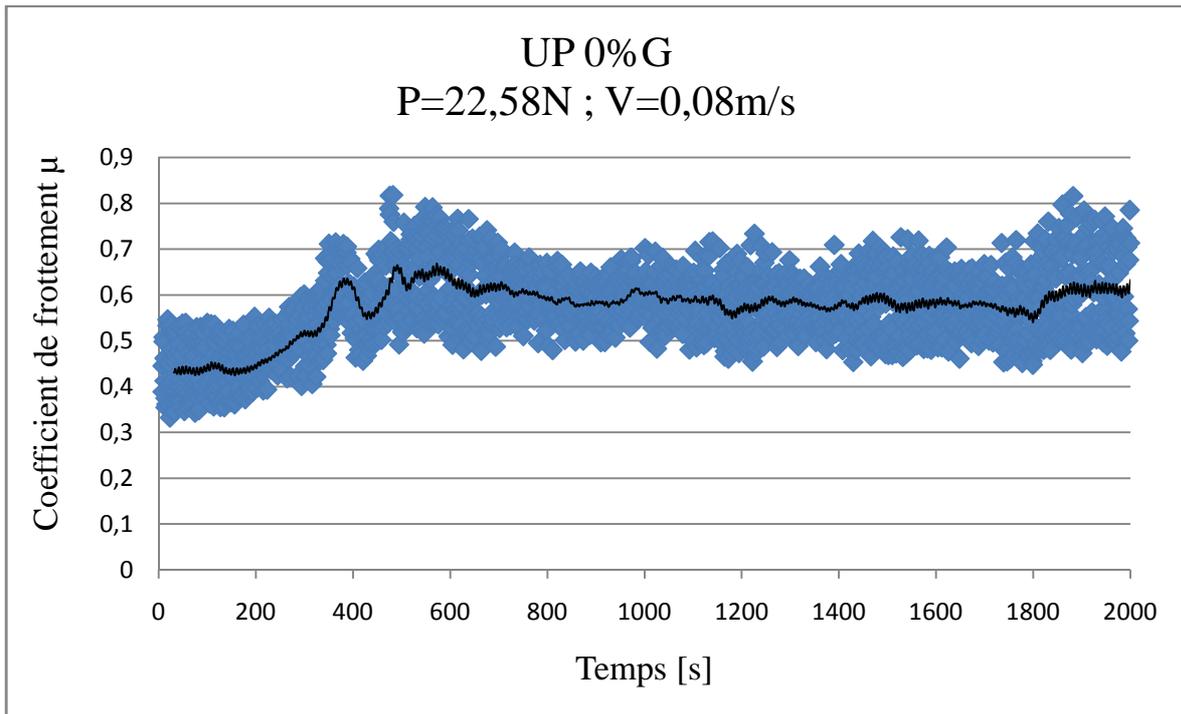


Figure A.4 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

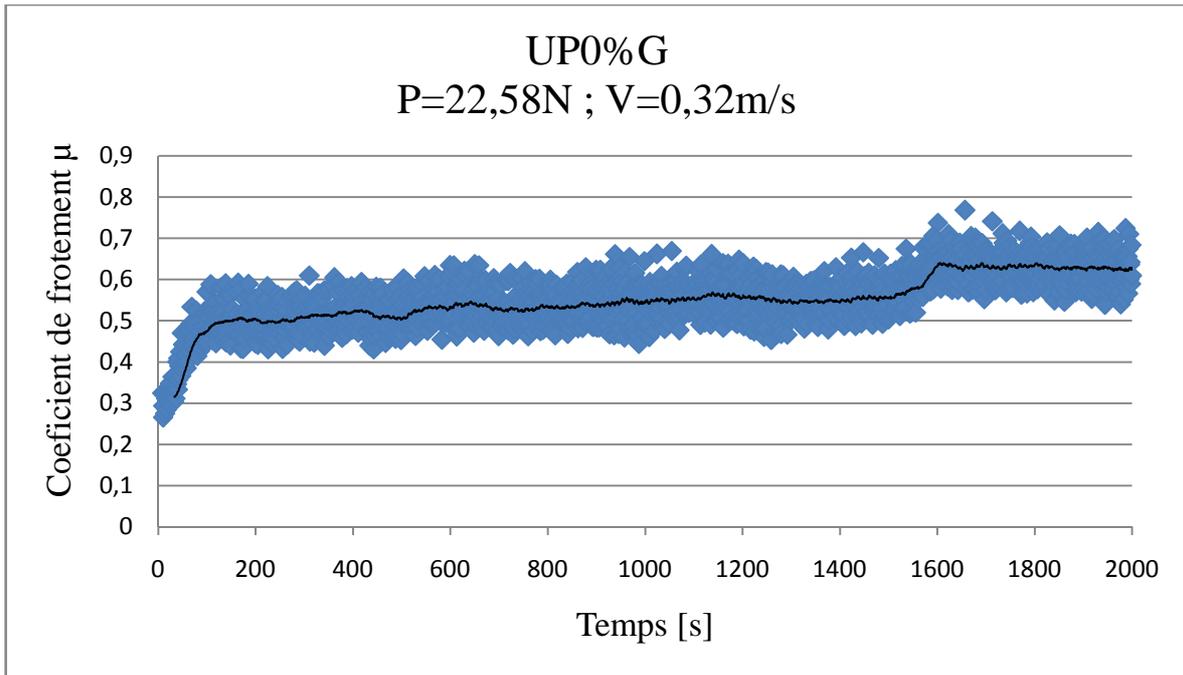


Figure A.5 : Coefficient de frottement en fonction du temps

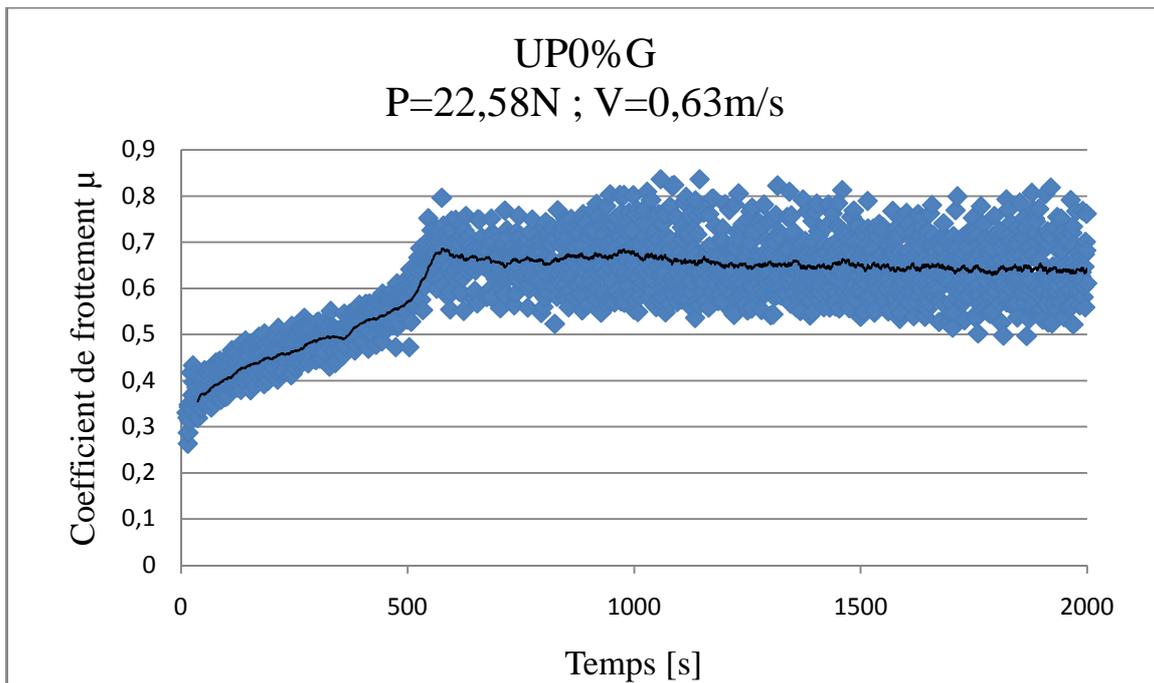


Figure A.6 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

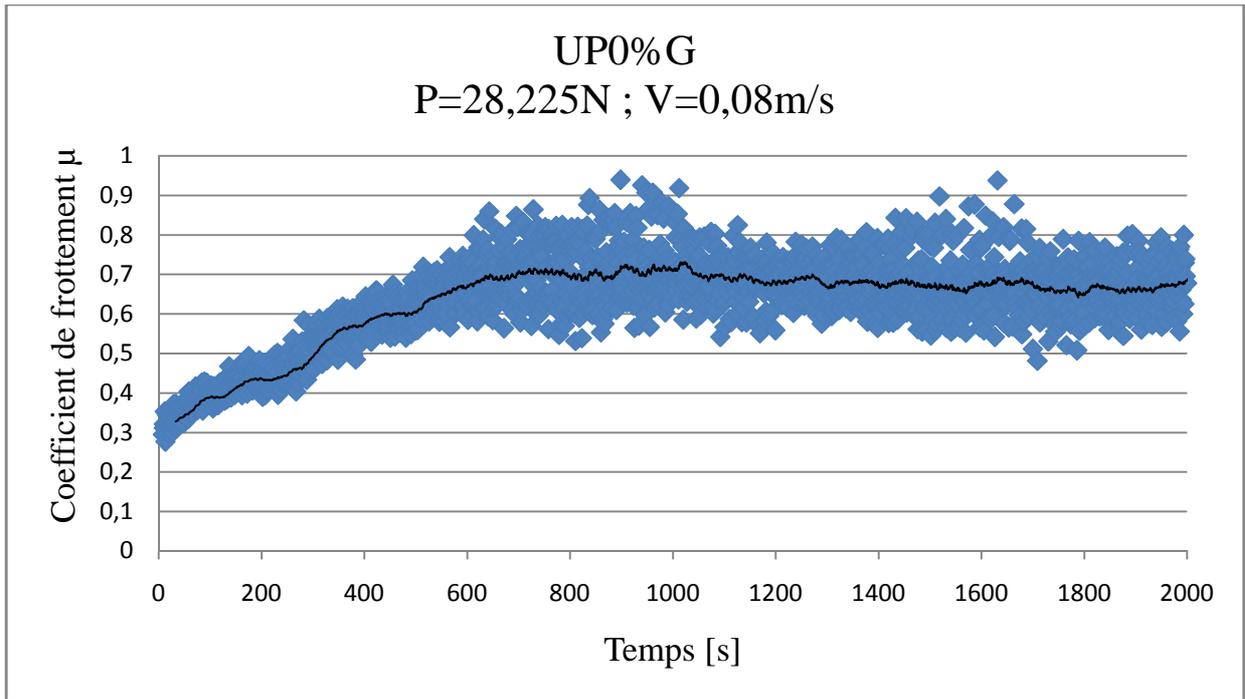


Figure A.7 : Coefficient de frottement en fonction du temps

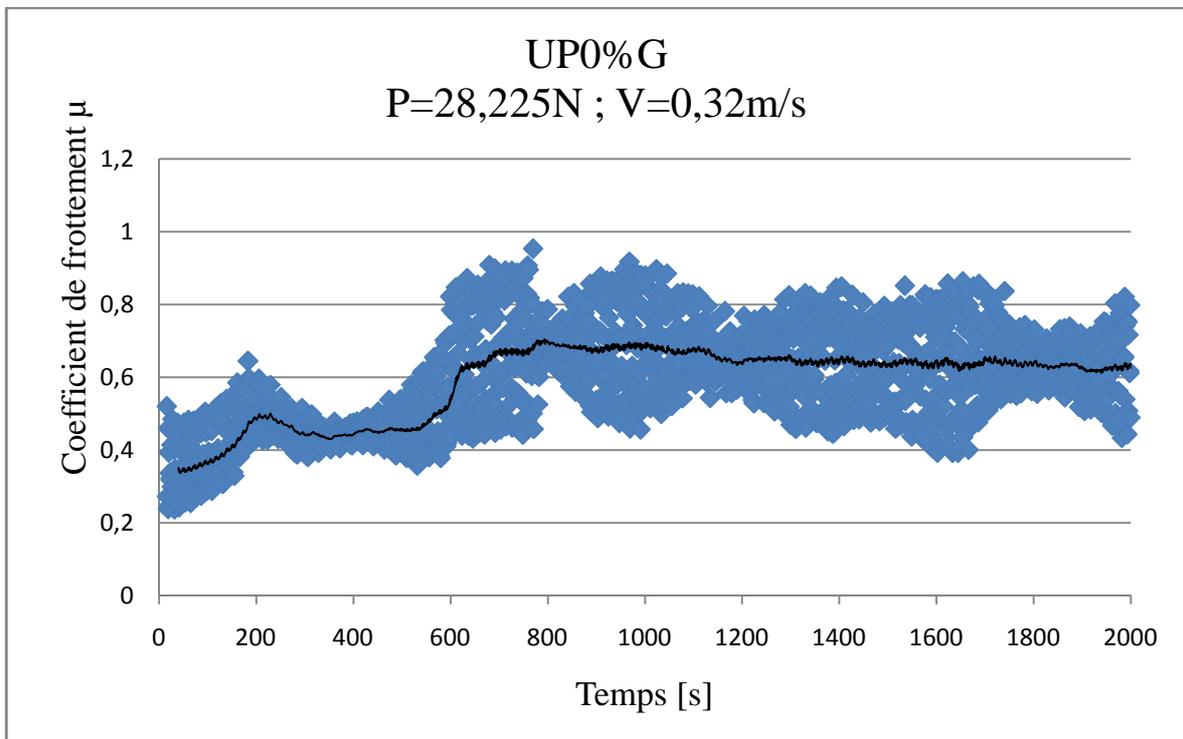


Figure A.8 : Coefficient de frottement en fonction du temps

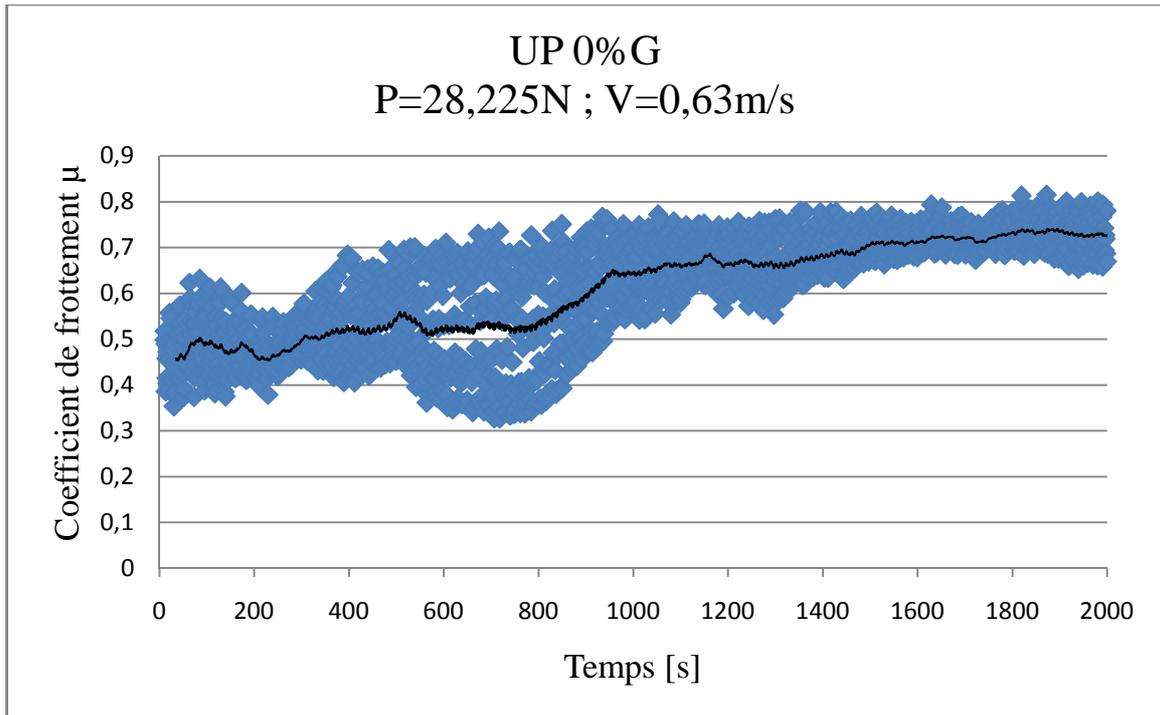


Figure A.9 : Coefficient de frottement en fonction du temps

Pour le couple UP1%G/XC48

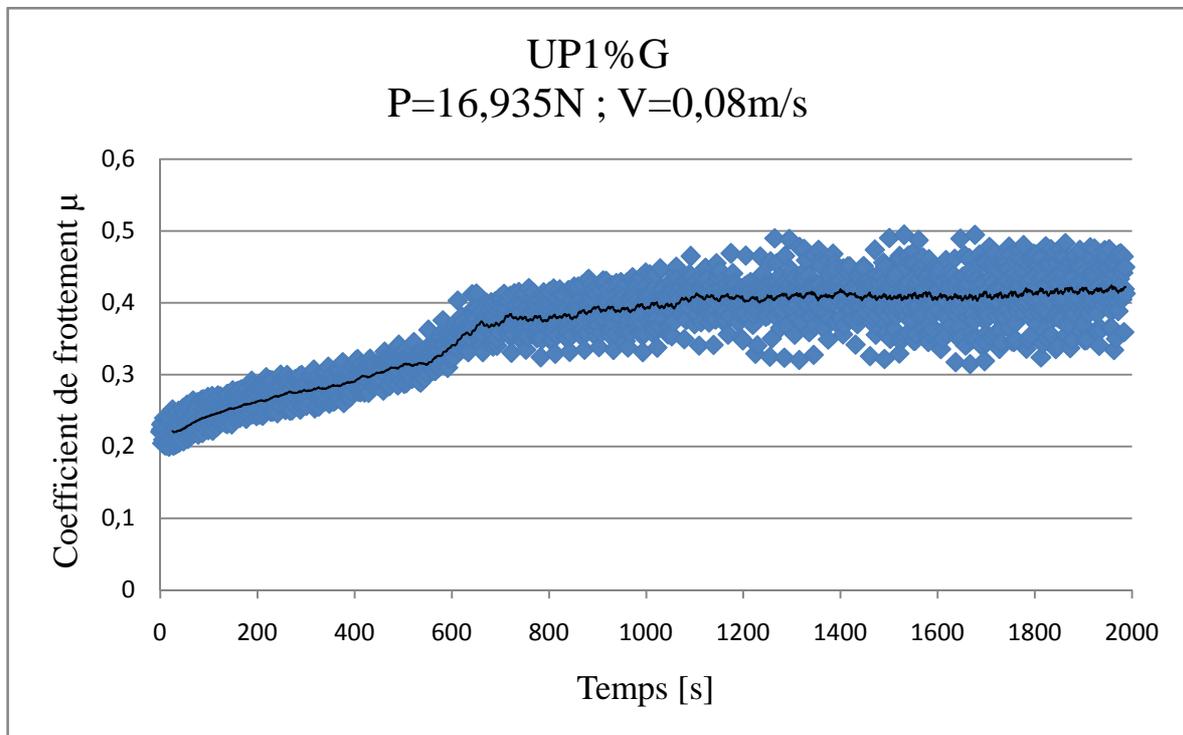


Figure A.10 : Coefficient de frottement en fonction du temps

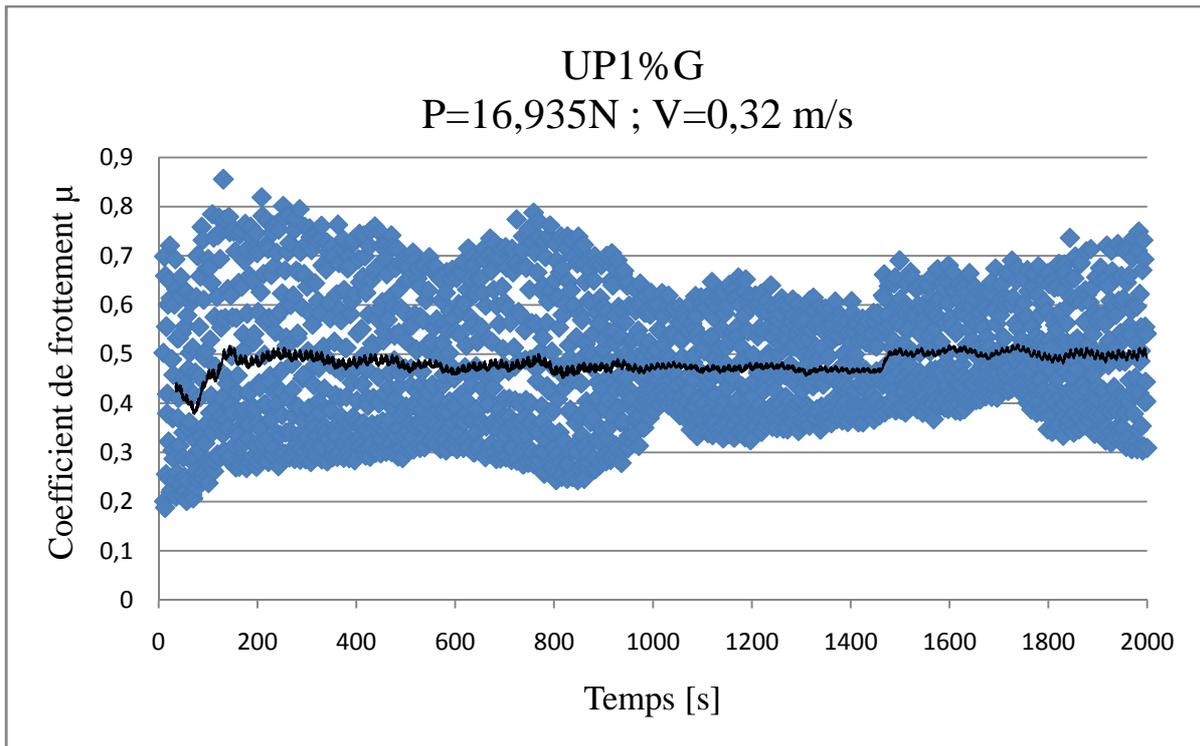


Figure A.11 : Coefficient de frottement en fonction du temps

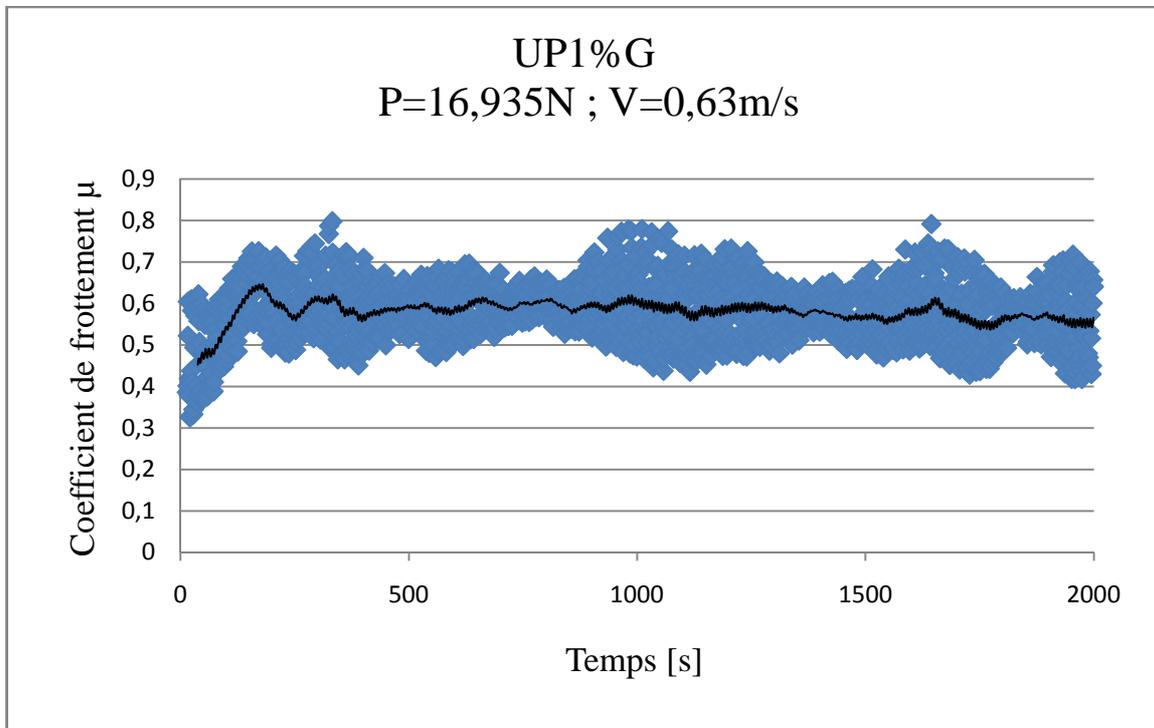


Figure A.12 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

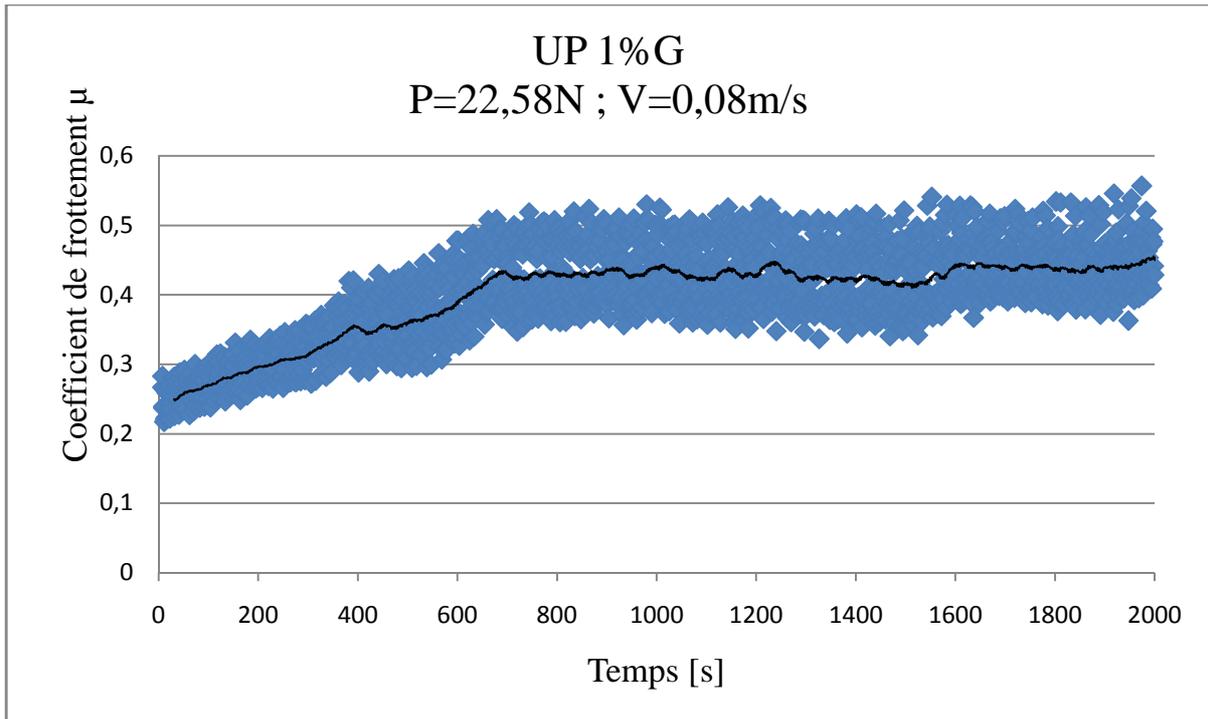


Figure A.13 : Coefficient de frottement en fonction du temps

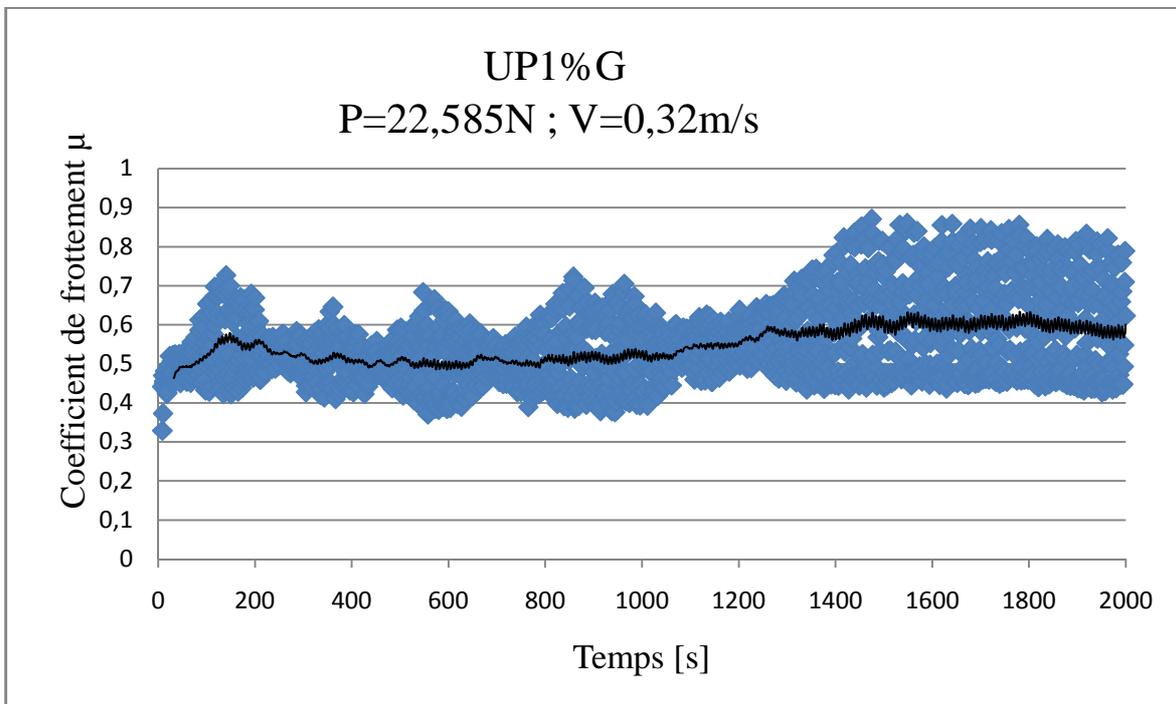


Figure A.14 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

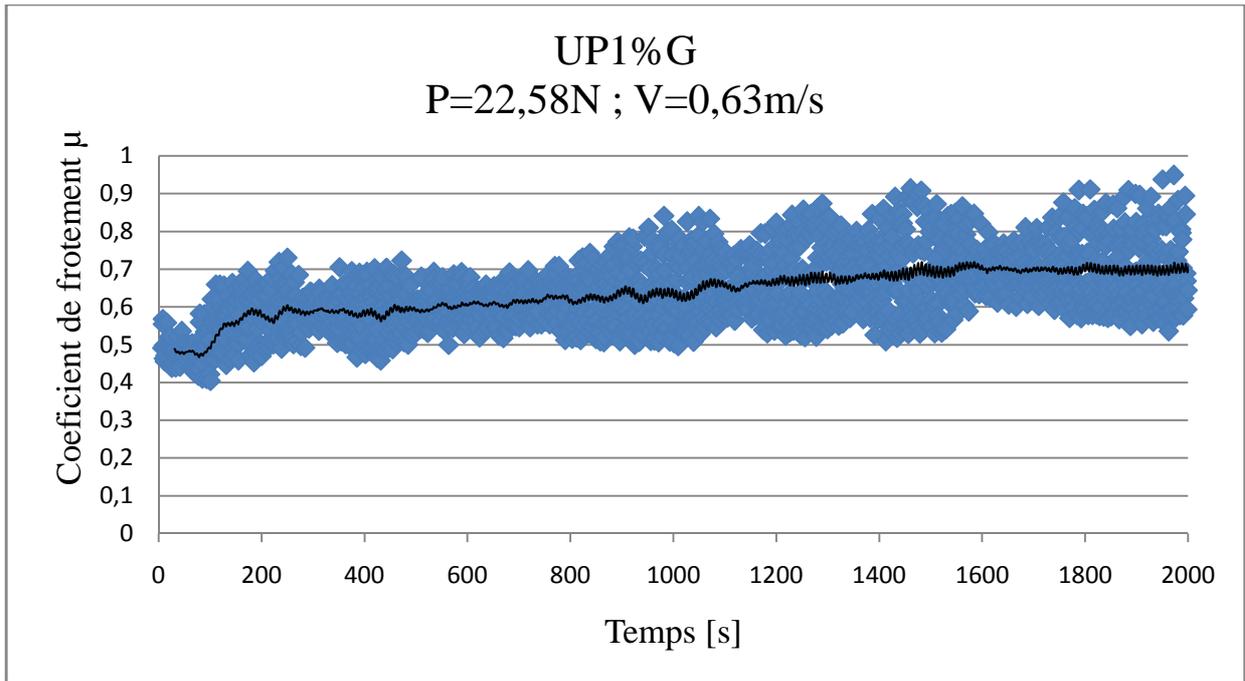


Figure A.15 : Coefficient de frottement en fonction du temps

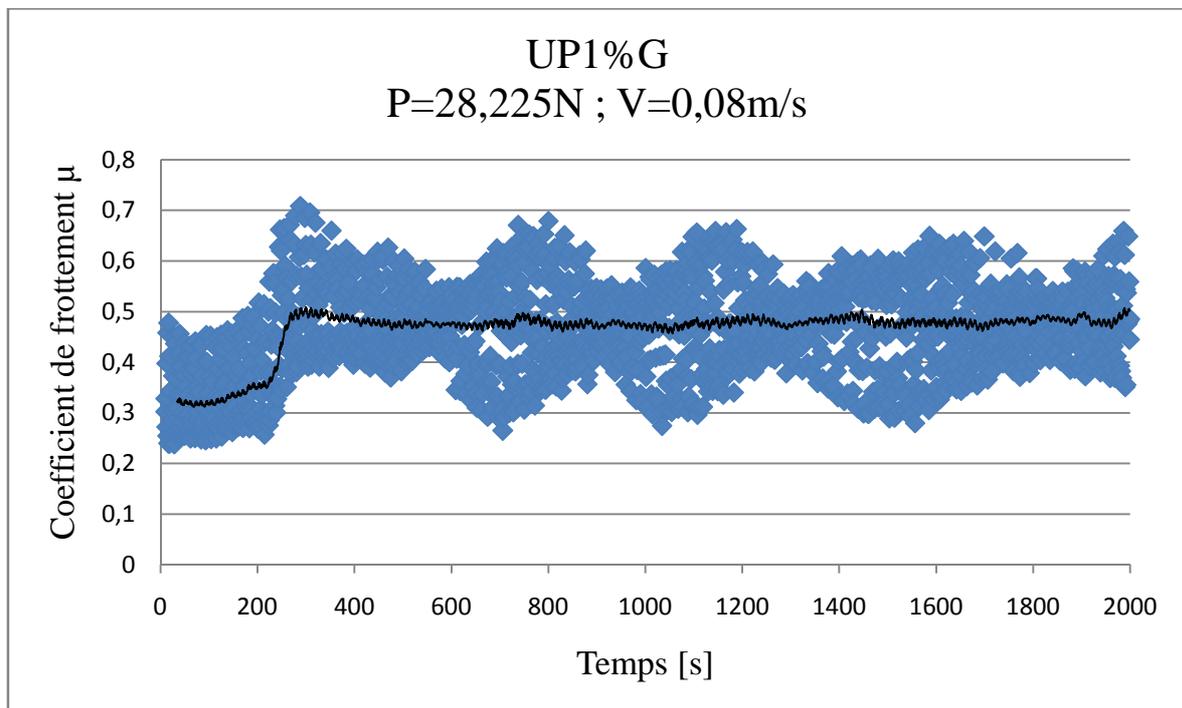


Figure A.16 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

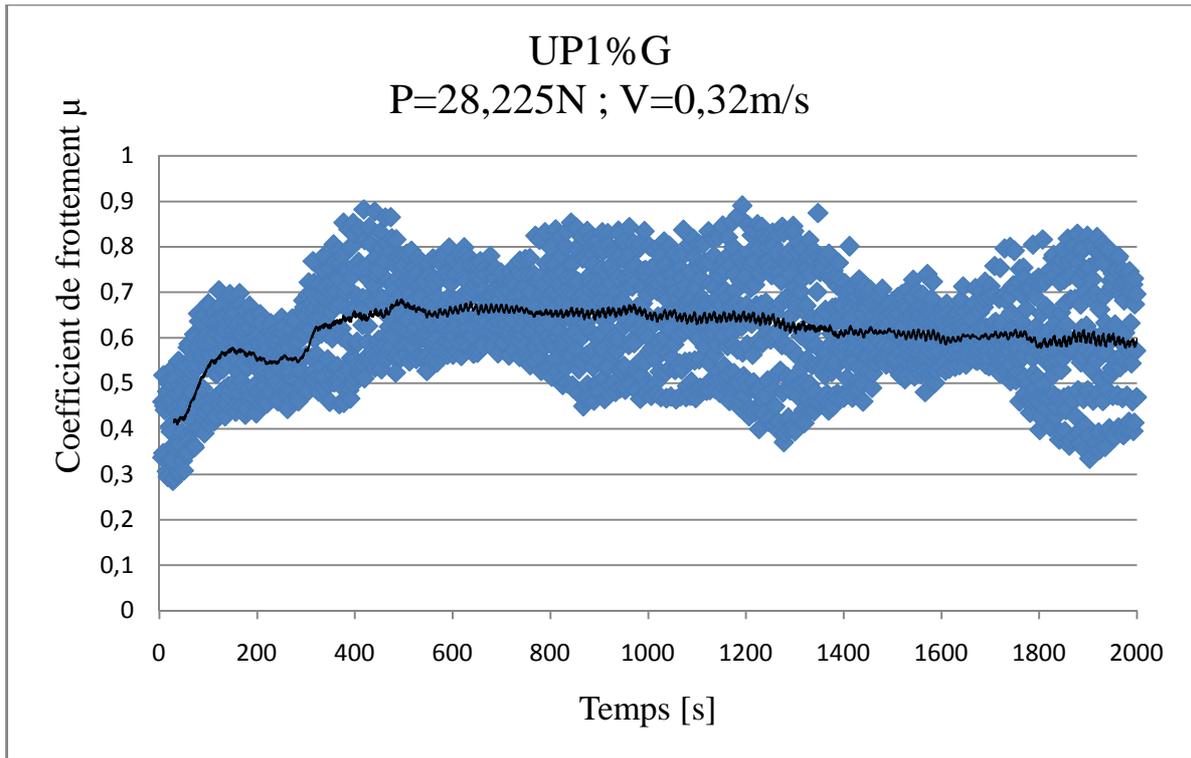


Figure A.17 : Coefficient de frottement en fonction du temps

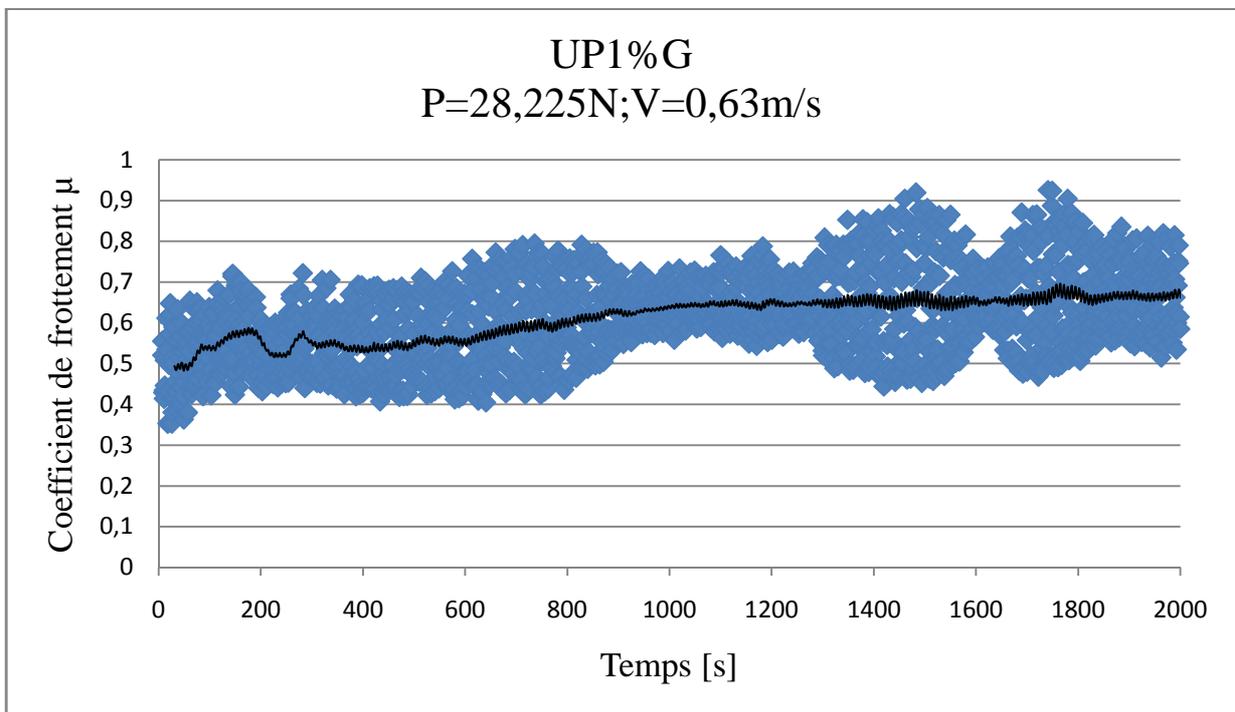


Figure A.18 : Coefficient de frottement en fonction du temps

Pour le couple UP2%G/XC48

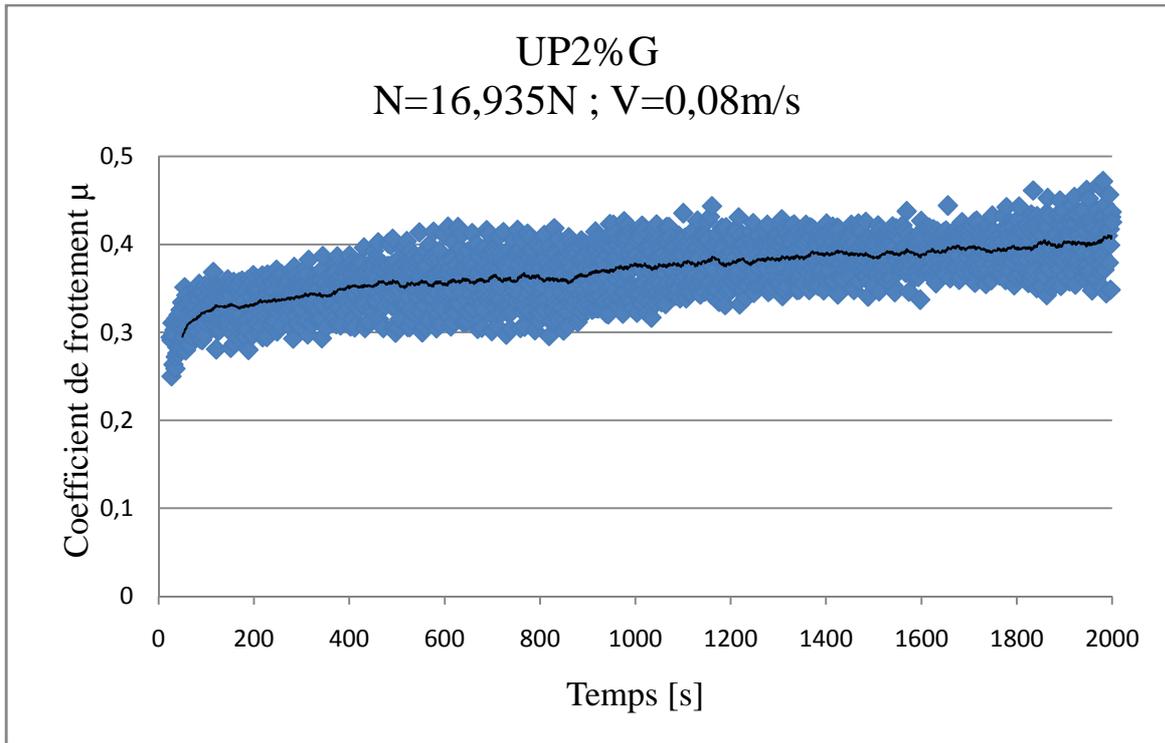


Figure A.19 : Coefficient de frottement en fonction du temps

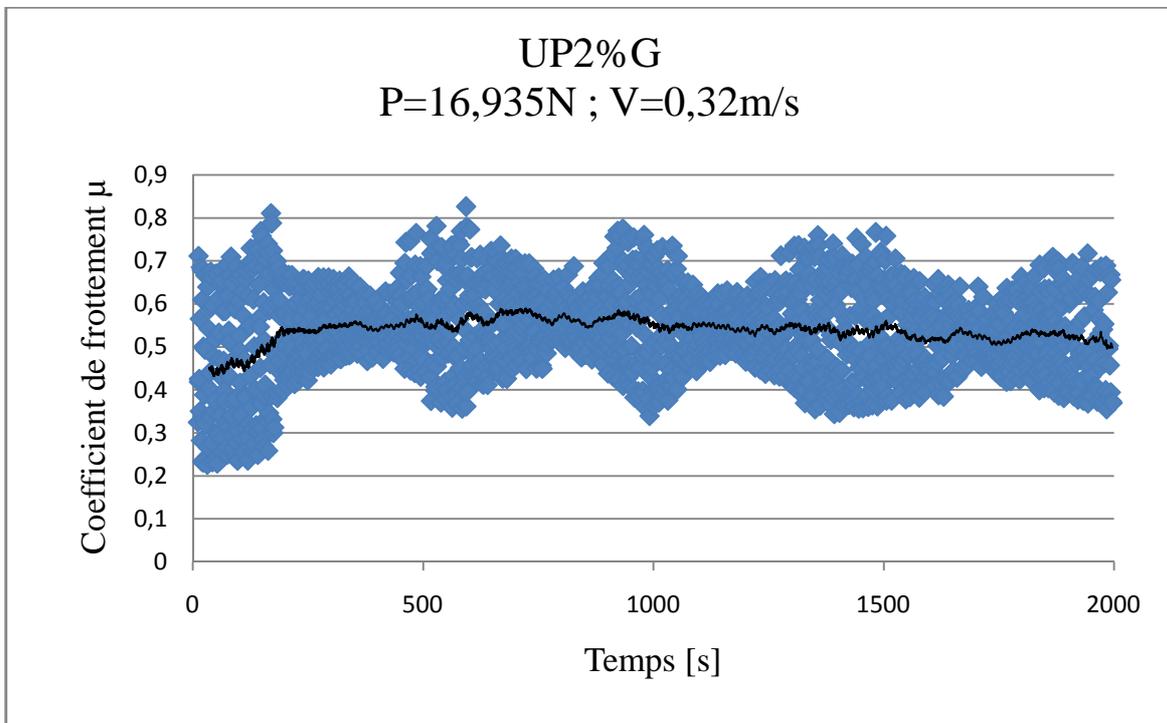


Figure A.20 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

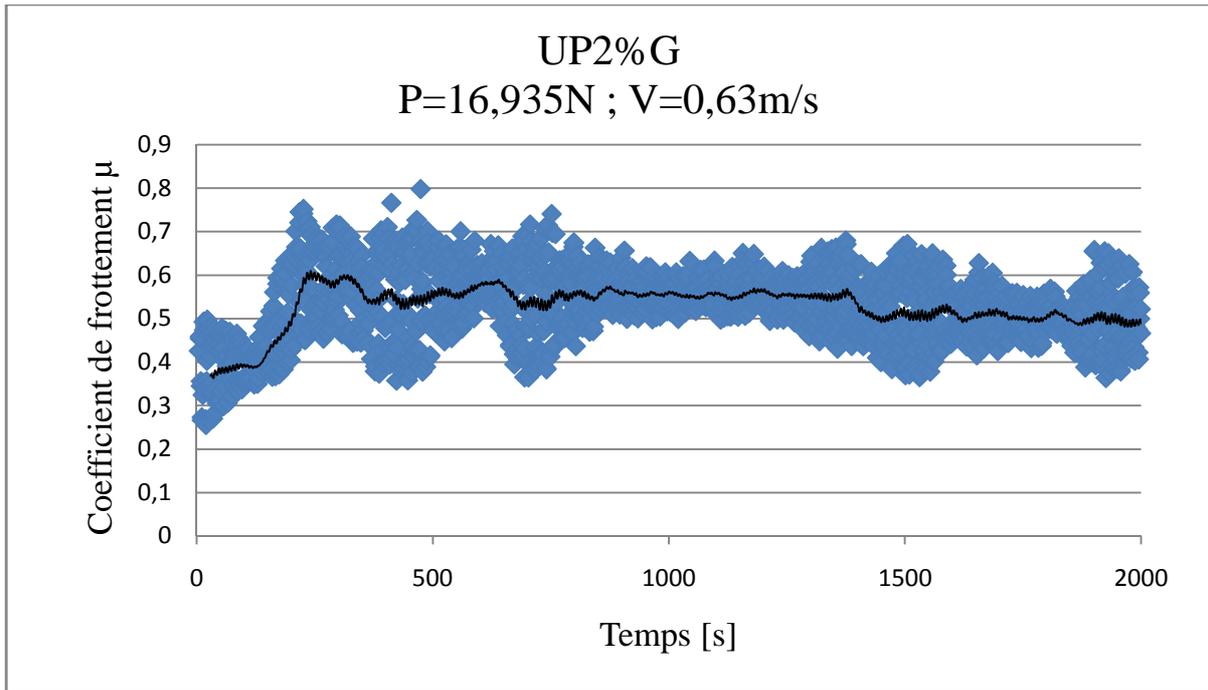


Figure A.21 : Coefficient de frottement en fonction du temps

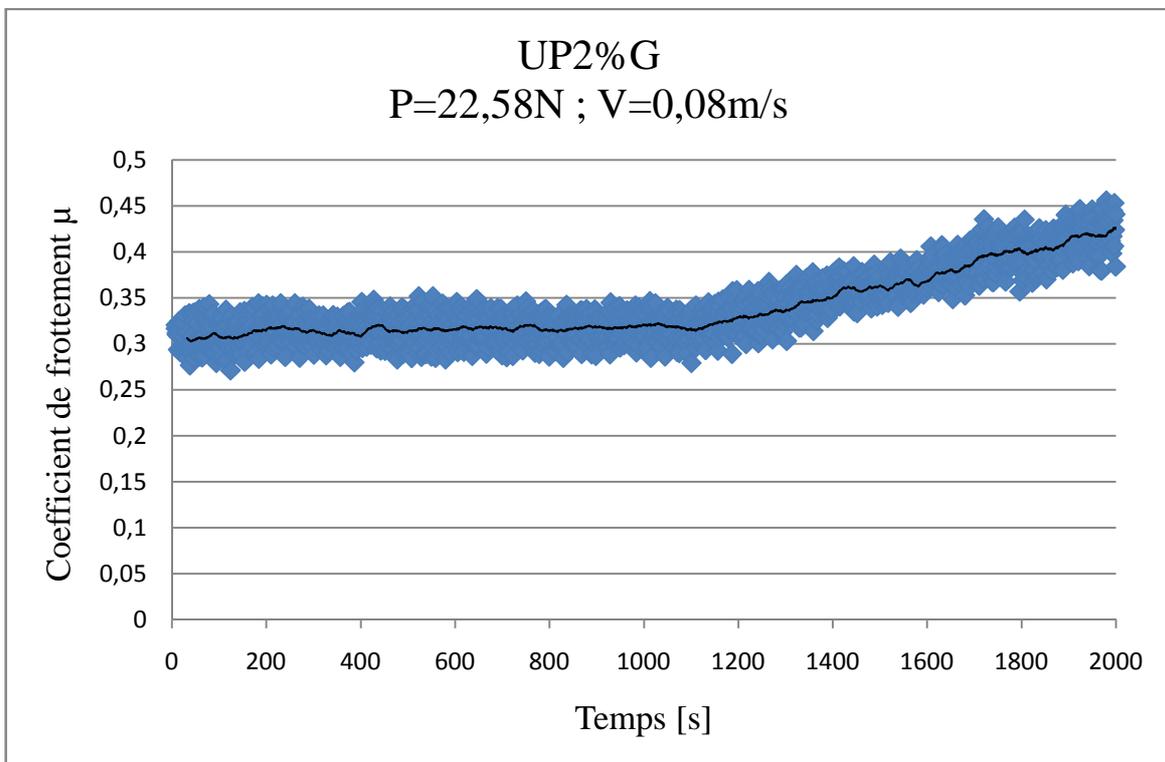


Figure A.22 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-A-

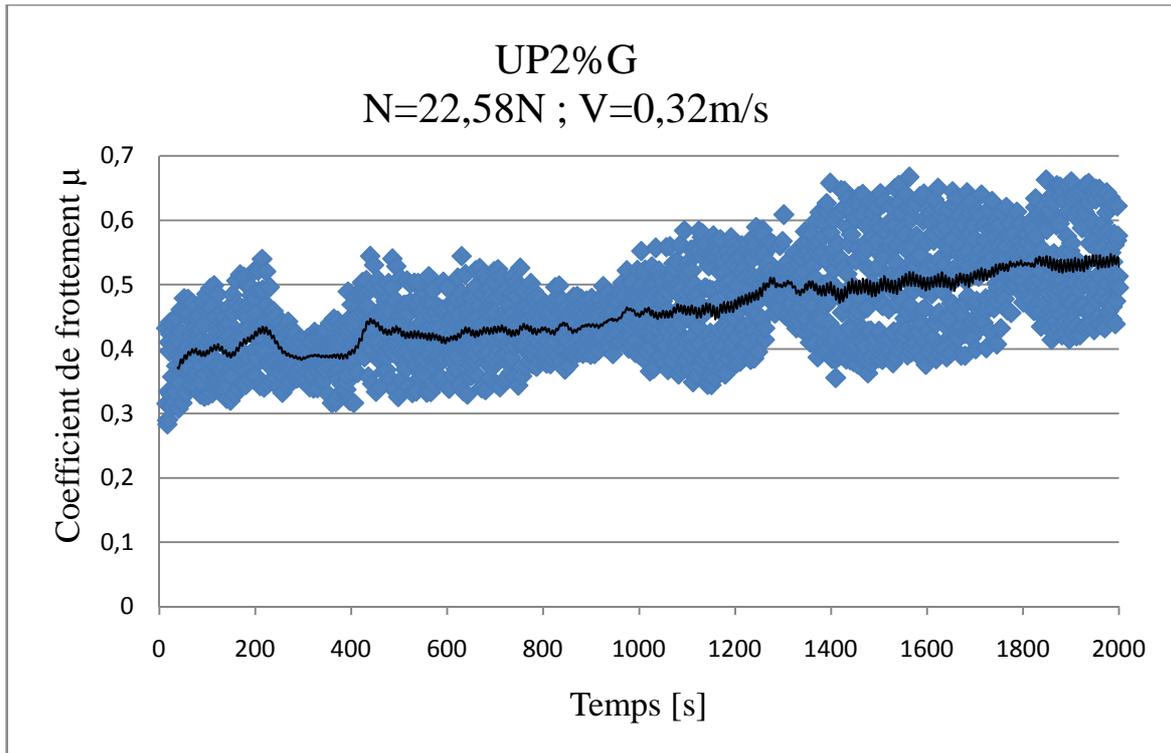


Figure A.23 : Coefficient de frottement en fonction du temps

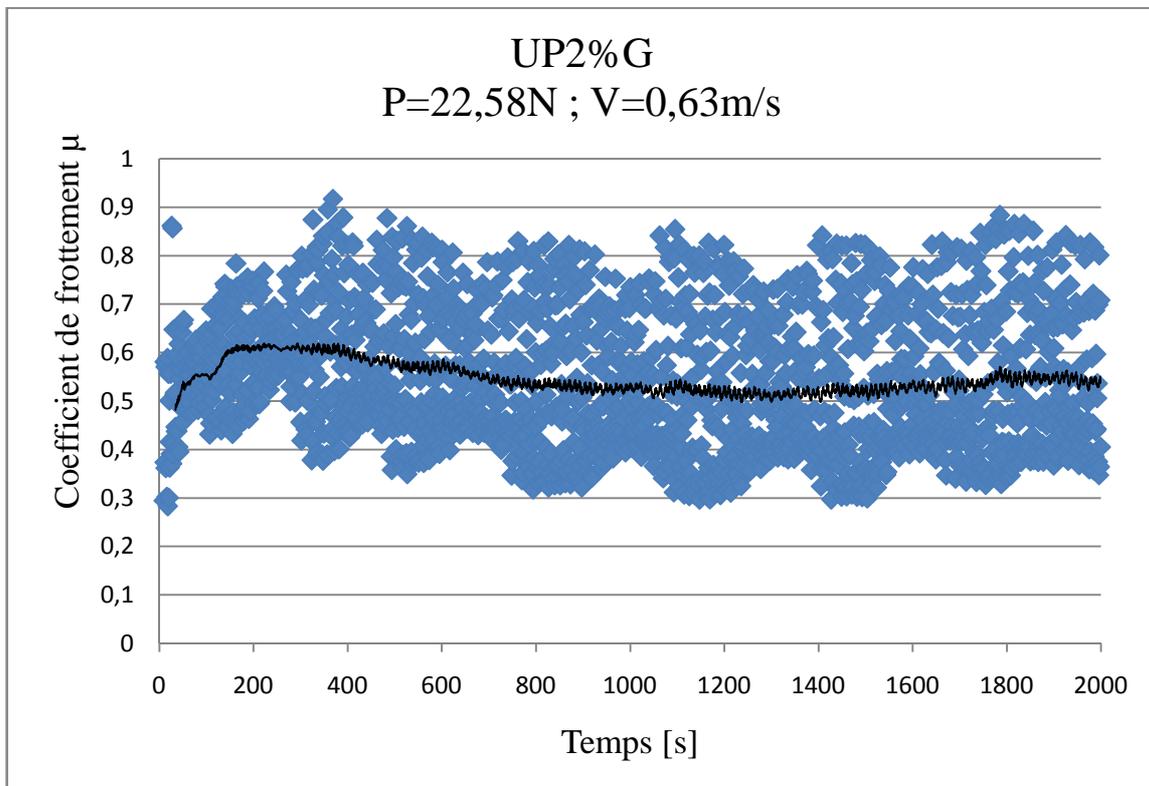


Figure A.24: Coefficient de frottement en fonction du temps

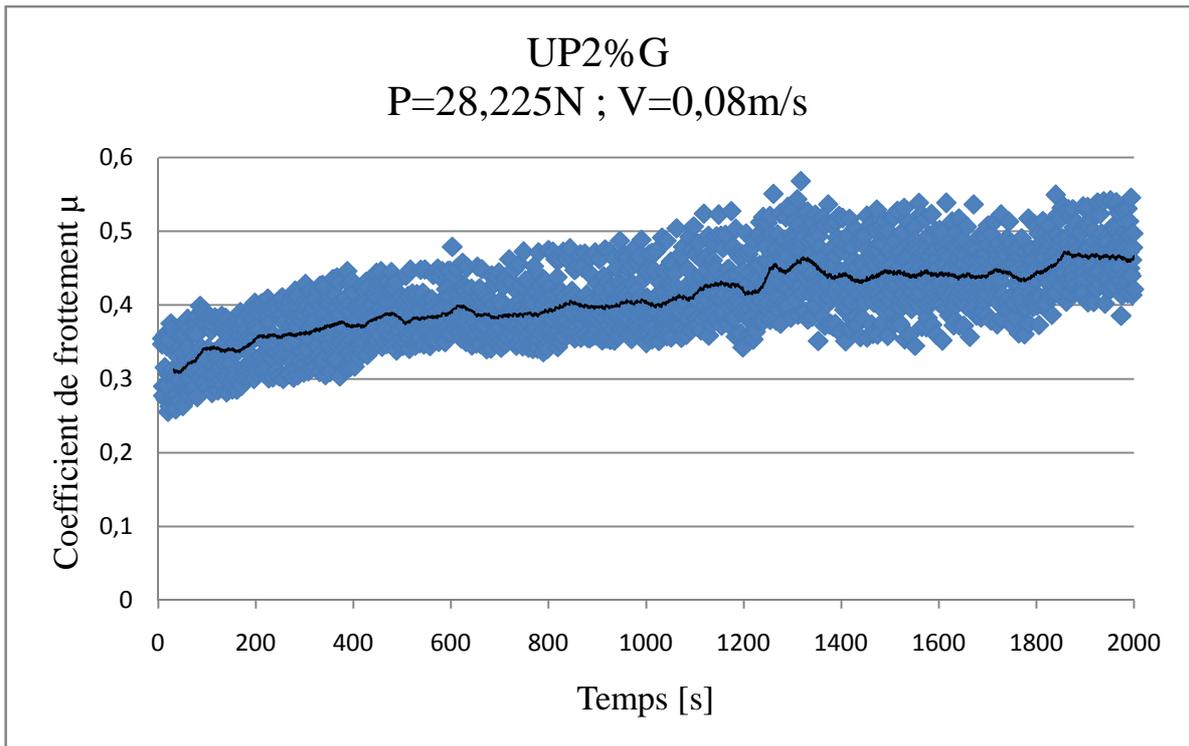


Figure A.25 : Coefficient de frottement en fonction du temps

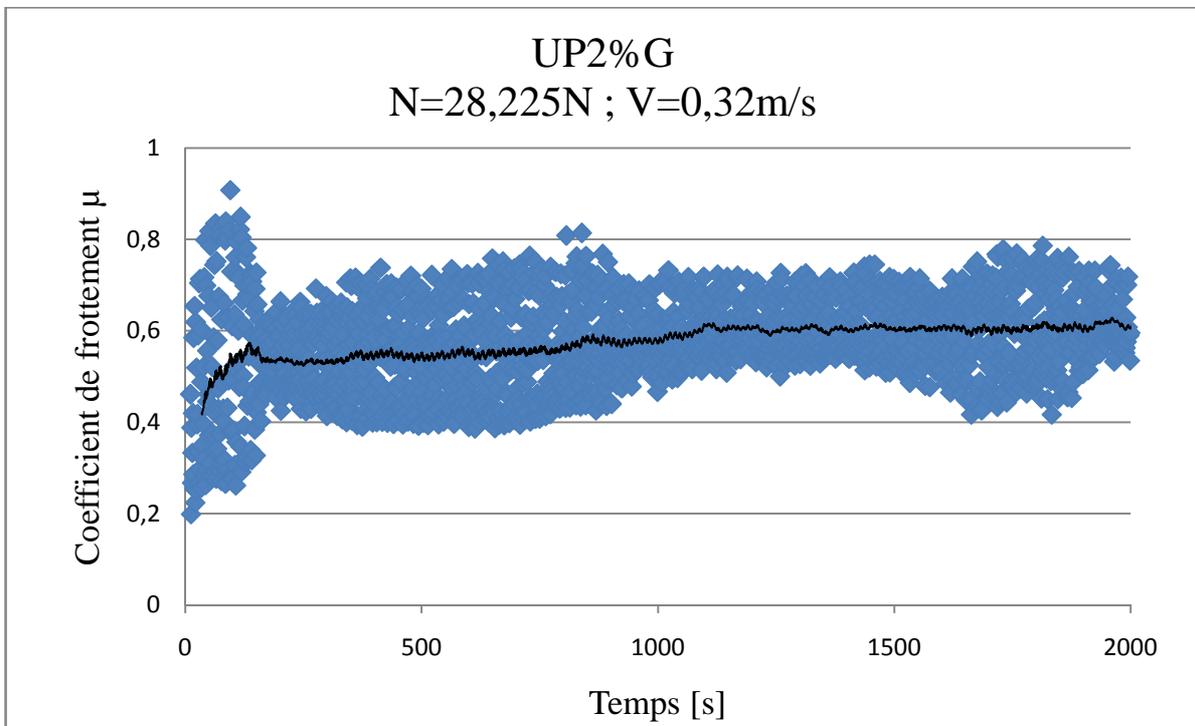


Figure A.26 : Coefficient de frottement en fonction du temps

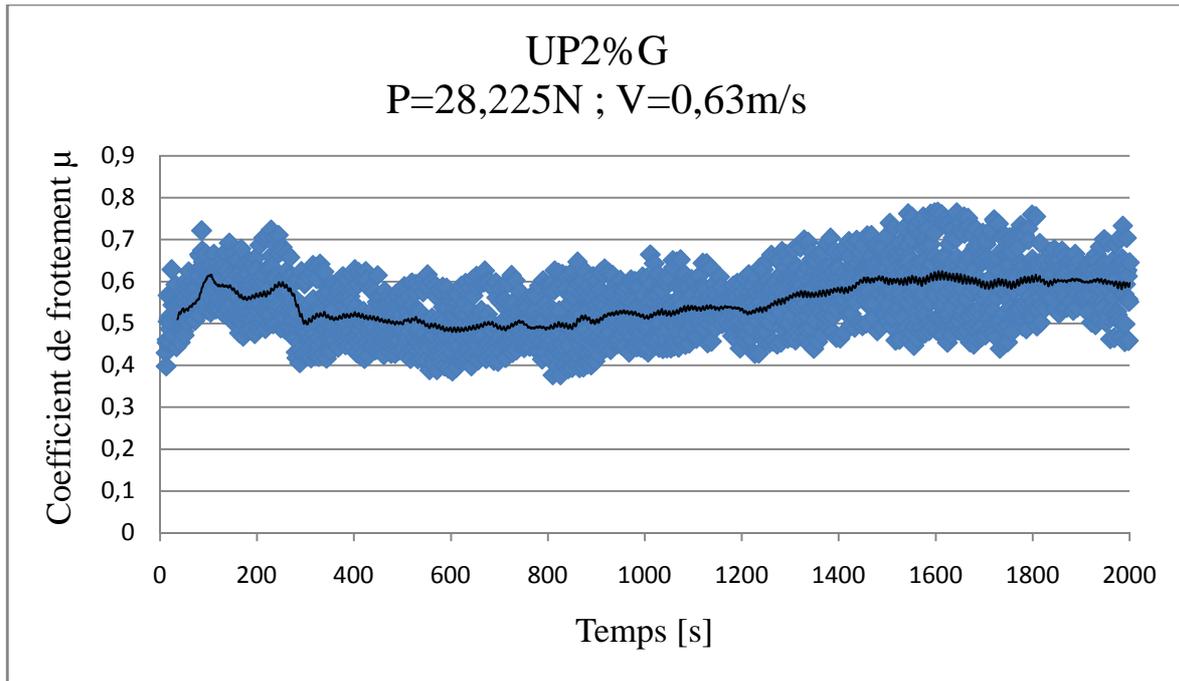


Figure A.27 : Coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE-B-

Rugosité des disques :

Disque	Rugosité (Ra) [μm]	disque	Rugosité (Ra) [μm]
1	0,17	21	0,16
2	0,24	22	0,24
3	0,19	23	0,25
4	0,20	24	0,18
5	0,11	25	0,22
6	0,16	26	0,23
7	0,24	27	0,17
8	0,25	28	0,19
9	0,18	29	0,24
10	0,22	30	0,12
11	0,23	31	0,23
12	0,21	32	0,17
13	0,12	33	0,25
14	0,16	34	0,13
15	0,24	35	0,18
16	0,23	36	0,20
17	0,14	37	0,21
18	0,19	38	0,25
19	0,24	39	0,14
20	0,12	40	0,19

Tableau B.1 : Rugosité (Ra) des disques

ANNEXE-C-

Perte de masse des pions

Les tableaux C.1, C.2, C.3 représentent la perte de masse des pions des trois matériaux étudiés à différentes charges et vitesses pour un temps de 2000 s.

Pion	Poids avant expérience [g]	Poids après expérience [g]	Perte de masse moyenne[g]
P=11,29N ; V=0,08m/s			
1	0,66673	0,66614	0,00054
2	0,70142	0,70093	
3	0,71704	0,71650	
P=11,29N ; V=0,32m/s			
4	0,71436	0,70309	0,00424
5	0,70172	0,70107	
6	0,70668	0,70587	
P=11,29N ; V=0,63m/s			
7	0,68988	0,66757	0,01630
8	0,68294	0,67387	
9	0,69250	0,67498	
P=16,935N ; V=0,08m/s			
20	0,70969	0,70922	0,00050
21	0,72931	0,72895	
22	0,72649	0,72582	
P=16,935N ; V=0,32m/s			
23	0,72945	0,71982	0,01154
24	0,76057	0,74672	
25	0,70267	0,69152	
P=16,935N ; V=0,63m/s			
26	0,71873	0,69419	0,02308
27	0,72739	0,70431	
28	0,71977	0,69815	
P=22,58N ; V=0,08m/s			
29	0,76731	0,76648	0,0008
30	0,69756	0,69690	
31	0,70690	0,70599	
P=22,58N ; V=0,32m/s			
32	0,77986	0,75170	0,01792
33	0,71947	0,69035	
34	0,76016	0,74849	
P=22,58N ; V=0,63m/s			
35	0,75870	0,72784	0,02643
36	0,69702	0,67022	
37	0,78269	0,76104	

ANNEXE-C-

P=28,225N ; V=0,08m/s			
38	0,70816	0,70697	0,00124
39	0,70370	0,70263	
40	0,72599	0,72451	
P=28,225N ; V=0,32m/s			
41	0,77986	0,75170	0,02298
42	0,71947	0,69035	
43	0,76016	0,74849	
P=28,225N ; V=0,63m/s			
44	0,70816	0,70697	0,032815
45	0,70370	0,70263	
46	0,72599	0,72451	

Tableau C.1 : perte de masse des pions de la résine UP0%G à différentes charges et vitesses pour un temps de 2000 s.

ANNEXE-C-

Pion	Poids avant expérience [g]	Poids après expérience [g]	Perte de masse moyenne[g]
P=11,29N ; V=0,08m/s			
1	0,74546	0,74479	0,00052
2	0,72010	0,71969	
3	0,70643	0,70595	
P=11,29N ; V=0,32m/s			
4	0,74888		0,00091
5	0,67821	0,67711	
6	0,70474	0,70401	
P=11,29N ; V=0,63m/s			
7	0,71985	0,70333	0,02136
8	0,71027	0,68994	
9	0,71155	0,68430	
P=16,935N ; V=0,08m/s			
10	0,69347	0,69283	0,00055
11	0,68869	0,68805	
12	0,69380	0,69342	
P=16,935N ; V=0,32m/s			
13	0,72565	0,71176	0,00987
14	0,70686	0,70101	
15	0,68264	/	
P=16,935N ; V=0,63m/s			
16	0,66613	0,66554	0,022375
17	0,69573	0,69511	
18	0,71803	0,71730	
P=22,58N ; V=0,08m/s			
19	0,72155	0,72112	0,00057
20	0,68474	0,68406	
21	0,69134	0,69072	
P=22,58N ; V=0,32m/s			
22	0,72546	0,72446	0,02118
23	0,71304	0,71169	
24	0,71221	0,65100	
P=22,58N ; V=0,63m/s			
25	0,67545	0,64896	0,02612
26	0,69495	0,67294	
27	0,71806	0,68818	
P=28,225N ; V=0,08m/s			
28	0,65911	0,65837	0,00064
29	0,69190	0,65960	
30	0,66637	0,65392	
P=28,225N ; V=0,32m/s			
31	0,70031	0,69956	

ANNEXE-C-

32	0,69690	0,67521	0,02407
33	0,66549	0,63904	
P=28,225N ; V=0,63m/s			
34	0,71945	0,68734	0,03969
35	0,65616	0,61297	
36	0,69394	0,65017	

Tableau C.2 : perte de masse des pions de la résine UP1%G à différentes charges et vitesses pour un temps de 2000 s.

ANNEXE-C-

Pion	Poids avant expérience [g]	Poids après expérience [g]	Perte de masse moyenne[g]
P=11,29N ; V=0,08m/s			
1	0,74381	0,74300	0,00055
2	0,72588	0,72549	
3	0,69022	0,68976	
P=11,29N ; V=0,32m/s			
4	0,68664	0,67934	0,0059
5	0,70966	0,69947	
6	0,71490	0,71469	
P=11,29N ; V=0,63m/s			
7	0,67572	0,67398	0,00660
8	0,69556	0,67925	
9	0,69440	0,69263	
P=16,935N ; V=0,08m/s			
10	0,71954	0,71830	0,00141
11	0,71289	0,71154	
12	0,71196	0,71032	
P=16,935N ; V=0,32m/s			
13	0,71112	0,70915	0,00558
14	0,71199	0,70915	
15	0,68904	0,67710	
P=16,935N ; V=0,63m/s			
16	0,72064	0,70844	0,01797
17	0,68904	0,66966	
18	0,70957	0,68722	
P=22,58N ; V=0,08m/s			
19	0,72333	0,72253	0,00074
20	0,69174	0,69105	
21	0,70047	0,69972	
P=22,58N ; V=0,32m/s			
22	0,70568	0,70134	0,01342
23	0,66106	0,63753	
24	0,75904	0,74665	
P=22,58N ; V=0,63m/s			
25	0,67341	0,66079	0,01198
26	0,70457	0,68696	
27	0,71614	0,71043	
P=28,225N ; V=0,08m/s			
28	0,73870	0,73754	0,00106
29	0,67435	0,67349	
30	0,71757	0,71639	
P=28,225N ; V=0,32m/s			
31	0,72867	0,72467	

ANNEXE-C-

32	0,66966	0,66187	0,00431
33	0,65727	0,65611	
P=28,225N ; V=0,63m/s			
34	0,70868	0,67918	0,02950
35	0,73877	0,70937	

Tableau C.1 : perte de masse des pions de la résine UP2%G à différentes charges et vitesses pour un temps de 2000 s.

*Références
bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : *M. DELQUE, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Thèse doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.*
- [2] : *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 M^{ed} Boudiaf de M'sila, 2006.*
- [3] : *M. CARTIER., P. KAPSA, usure des contacts mécaniques, éléments de tribologie, Techniques de l'ingénieur, BM 5066.*
- [4] : *A. S. ADAMOU, Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et a haute température, Thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2005.*
- [5] : *B. ETCHEVERRY, Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites NiP – Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite, Thèse doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, 2006.*
- [6] : *G. Zambelli, L. Vincent, Matériaux et contacts-une approche tribologique, Suisse, PUR (1998).*
- [7] : *René Gras, tribologie principe et solutions industrielles, l'usine nouvelle DUNOD 2008.*
- [8] : *Hans Jörg Mathieu, Erich Bergmann, René Gras, Traité des matériaux, analyse et technologie des surfaces, couches minces et tribologie*
- [9] : *A. BENFOUGHAL, analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone-carbone dans un contact électrique, mémoire magister, université MENTOURI Constantine, 2010.*
- [10] : *HORST CZICHOS, Tribology a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear.*
- [11] : *Centre technique des industries mécaniques (CETIM), Traitement et revêtement de surface pour application tribologique.1995.*
- [12] : *M. WOYDT, technique de l'ingénieur, Application des données tribologiques des matériaux, BM 7 006.*
- [13] : *DERRIEN, JACQUES, Surface des solides, propriétés électroniques, Techniques de l'Ingénieur, notice A245, 2*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [14] : *Tribologie /applications pratiques, un livre de Wikibooks, www : wikibooks.org/tribologie/application pratique.*
- [15] : *G. BOOTHROYD. Fundamentals of metal machining and machine tools. Mc Graw-hill book company 1975.*
- [16] : *H. Meng & al, Friction and wear behaviour of nanotubes reinforced polyamide composites under dry sliding and water lubricated condition, Journal of composite science and technology 69 (2009).*
- [17] : *J. Paulo Davim, Rosária Cardoso, Effect of the reinforcement (carbon or glass fibres) on friction and wear behaviour of the PEEK against steel surface at long dry sliding, Journal of composite science and technology 266 (2009).*
- [18] : *K. Lyes, Etude de l'effet des traitements thermiques et la vitesse sur le coefficient de frottement d'un tribosystème pion / disque, mémoire master, UMMTO 2011 ;*