

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

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME

Master académique en Génie mécanique
Option : Construction mécanique

THEME :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AJOUT DE LA
POUDRE DE GRAPHITE SUR LES PROPRIETES MECANQUES ET
TRIBOLOGIQUES D'UN POLYMERE EPOXYDE BISPHENOL A

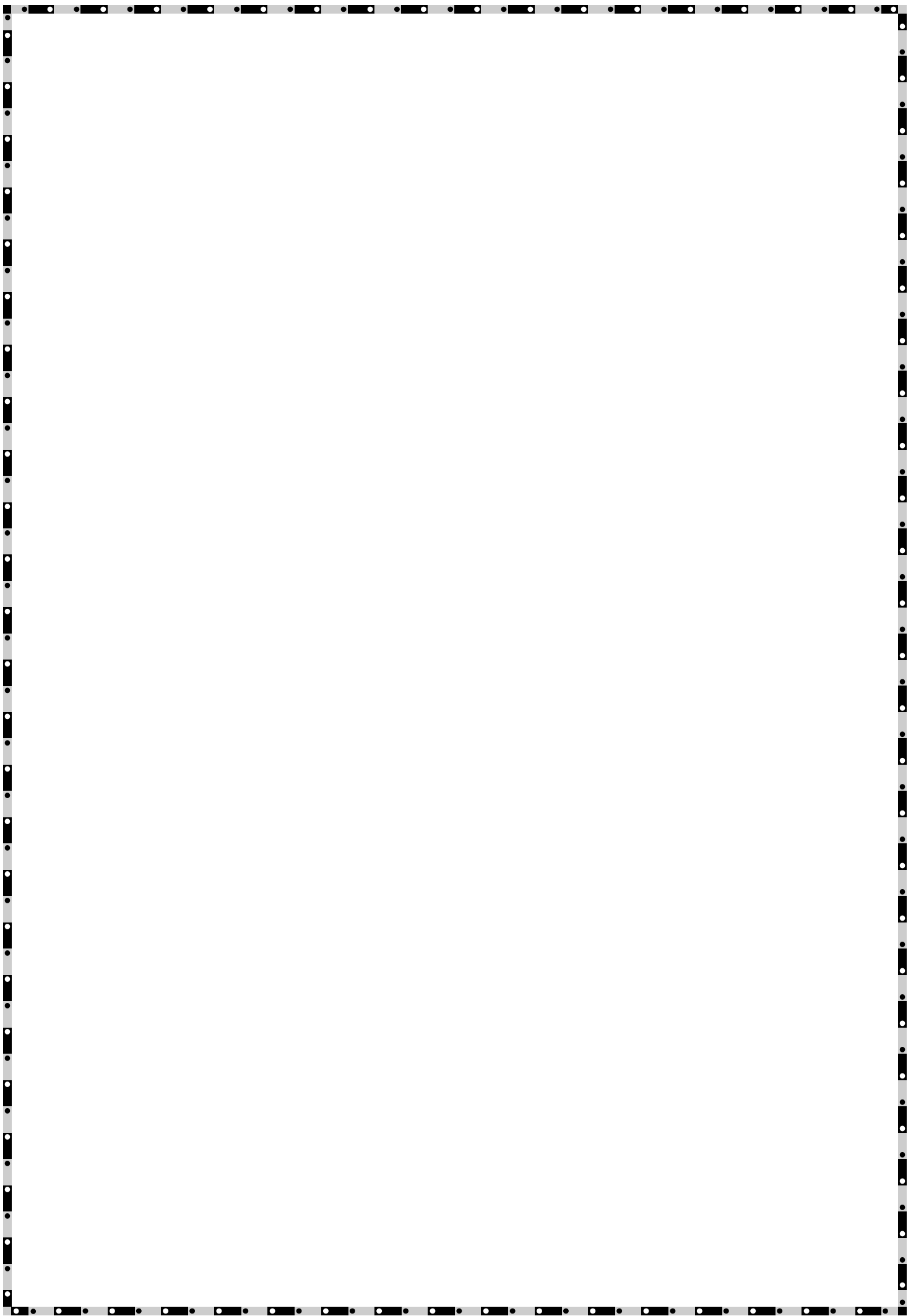
Présenté par :

M^{me} : AIT GHERBI Chafia

Promoteur :

M^r : S. LARBI

2015/2016



Remerciements

Remerciements

Au terme de cette étude, je remercie **DIEU** de m'avoir donné la volonté et le courage d'achever ce travail dans de bonnes conditions.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance à mon promoteur, monsieur LARBI Said qui m'a proposé ce sujet. Je le remercie très chaleureusement pour sa disponibilité, son aide et ses orientations.

Merci aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait de juger ce travail.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à mes parents, à mon mari, mes frères et sœurs et mes oncles maternelles qui m'ont soutenu et encouragé pour aller au bout de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant mes études, mes amis et mes collègues, qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué à l'accomplissement de ce travail.

Dédicaces

A ma famille et à tous
mes amis ...

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Eléments de tribologie

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition	4
I.3. Importance scientifique et économique de la tribologie	4
I.4. Le système tribologique et la notion du troisième corps.....	5
I.5. Phénomènes observables	6
I.6. Le milieu ambiant	6
I.7. Tribologie des interfaces (théorie du troisième corps)	7
I.8. Le triplet tribologique	8
I.9. Mécanisme d'accommodation de vitesse	11
I.10. Le circuit tribologique.....	12
I.11. Paramètres tribologiques	13
I.11.1. Les paramètres opérationnels	13
I.11.2. Les paramètres structuraux	13
I.11.3. Les paramètres d'interaction	14
I.11.4. Les paramètres tribométriques.....	14
I.12. Mesure tribométriques	14
I.13. L'expérimentation en tribologie	15

I.14. Essais tribologiques	15
I.14.1. Paramètres de contact.....	17
I.15. Conclusion	18

Chapitre II : Frottement

II.1. Introduction	19
II.2. Définition.....	19
II.3. Provenance des lois du frottement.....	20
II.4. Type de frottement.....	20
II.4.1. Frottement sec.....	20
II.4.2. Frottement semi fluide	22
II.4.3. Frottement fluide	22
II.5. Le coefficient de frottement.....	22
II.6. Comportement du coefficient de frottement	23
II.6.1. La vitesse de glissement.....	23
II.6.2. Chemin de glissement parcouru	24
II.6.3. Etat de surface.....	25
II.6.4. Nature des matériaux	25
II.6.5. Charge normale appliquée.....	25
II.6.6. Température ambiante.....	26
II.7. Importance du coefficient de frottement	26
II.8. Valeurs pratiques du coefficient de frottement.....	26
II.9. Energie de surface	28

II.10. La difficulté rencontrée dans la détermination du coefficient de frottement.....	29
II.11. Les matériaux en tribologie.....	30
II.12. Frottement des métaux	31
II.13. Frottement des polymères	32
II.14. Conclusion.....	32

Chapitre III : Usure

III.1. Introduction.....	34
III.2. Définition	34
III.3. Loi d'usure ou loi d'Archad.....	35
III.4. Les différents mécanismes d'usure	36
III.4.1. L'usure adhésive.....	36
III.4.1.1. Paramètres influençant sur l'usure adhésive.....	37
III.4.1.2. Prévention	38
III.4.2. L'usure abrasive	39
III.4.2.1. Paramètres influençant sur l'usure abrasive	40
III.4.2.2. Prévention	40
III.4.3. L'usure par érosion	41
III.4.3.1. Paramètres influençant l'usure par érosion.....	42
III.4.3.2. Prévention	42
III.4.4. Usure par corrosion	42
III.4.4.1. Paramètres influençant l'usure corrosive	44

III.4.4.2. Prévention	44
III.4.5. L'usure par fatigue.....	44
III.4.5.1. Fatigue mécanique.....	45
III.4.5.2. Fatigue thermique	45
III.4.5.3. Facteurs influençant la fatigue de contact	45
III.4.5.4. Prévention	46
III.4.6. Usure des polymères	46
III.5. Paramètres tribologiques	47
III.5.1. Taux d'usure	47
III.5.2. Valeur du produit P.V	48
III.5.3. Densité d'énergie de frottement	49
III.6. Conclusion	50

Chapitre IV : Lubrification

IV. Introduction.....	51
IV.2. Définition	51
IV.3. Types de lubrifiants	51
IV.3.1. Lubrifiants solides	51
IV.3.2. Lubrifiants liquides	51
IV.3.3. Graisses.....	52
IV.4. Types de lubrifiants solides.....	52
IV.4.1. Les métaux mous	52
IV.4.2. Les polymères	52

IV.4.3. Les lubrifiants solides minéraux sans structure lamellaire	53
IV.4.4. Les lubrifiants solides à structure lamellaire.....	53
IV.4.5. Mélange de lubrifiants solides	53
IV.5. Lubrifiants solides avec additifs	54
IV.6. Conclusion	54

Chapitre V : Partie expérimentale

V.1. Introduction	55
V.2. Procédure expérimentale.....	56
V.2.1. Dispositif expérimental.....	56
V.2.2. Nomenclature du banc.....	56
V.2.3. Principe de fonctionnement	57
V.3. Le capteur de force	57
V.3.1. Etalonnage du capteur.....	58
V.3.1.1. Etalonnage de l'effort tangentiel.....	59
V.3.1.2. Etalonnage de l'effort normal	60
V.4. Caine d'acquisition	60
V.5. Convertisseur analogique-numérique	61
V.6. Logiciel Labview.....	62
V.7. Variateur de vitesses	62
V.8. Présentation des matériaux utilisés	63
V.8.1. Matériaux des disques	63
V.8.2. Matériau des pions et éprouvettes de traction	63

V.8.2.1. Résines époxydes	64
V.9. Présentation des couples tribologiques.....	65
V.9.1. Les disques	65
V.9.2. Les pions	65
V.10. Traitement thermique des disques	66
V.10.1. Etapes du traitement thermique.....	66
V.11. Polissage des disques	67
V.12. Rugosité des disques.....	67
V.13. Les essais de traction.....	68
V.13.1. Introduction.....	68
V.13.2. Essai de traction	68
V.13.3. Description de la machine de traction.....	69
V.13.4. Géométrie des éprouvettes	70
V.13.5. Résultats des essais de traction	70
V.13.6. Interprétation des résultats.....	73
V.13.7. Conclusion	74
V.14. Essais d'usure	75
V.14.1. Introduction.....	75
V.14.2. Résultats et discussions.....	76
V.14.2.1. Coefficient de frottement	76
V.14.3. Conclusion	80
Conclusion générale.....	81

Annexe..... 83

Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

Fig (I.1) : Représentation schématique d'un système tribologique	5
Fig (I.2) : Définition du troisième corps	10
Fig (I.3) : Le triplet tribologique et le concepts du troisième corps.....	10
Fig (I.4) : Mécanismes d'accommodation de vitesse d'après Berthier	11
Fig (I.5) : Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides	12
Fig (I.6) : Tribomètre bille/disque ou pion sur disque	17
Fig (I.7) : Principe de la mesure.....	17
Fig (II.1) : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement	23
Fig (II.2) : Evolution du coefficient de frottement avec la distance de glissement.....	24
Fig (II.3) : Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale.....	26
Fig (II.4) : Programme VAMAS Round- Robin, résultats pour un couple (acier/acier)	29
Fig (III.1) : Usure par adhésion	37
Fig (III.2) : Les deux types d'usure par abrasion.....	39
Fig (III.3) : Mécanisme de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement.....	41
Fig (III.4) : Relation d'usure corrosive-temps	43
Fig (III.5) : Graphe pression/vitesse de glissement limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante	49
Fig (V.1) : Vue du tribomètre pion /disque vertical	56
Fig (V.2) : Le capteur et les zones d'emplacement des jauges.....	58
Fig (V.3) : Cheminement du signal de sortie	59

Fig (V.4) : Etalonnage de l'effort tangentiel	59
Fig (V.5) : Droite d'étalonnage de l'effort tangentiel	59
Fig (V.6) : Chaine d'acquisition VISHAY MICROMESURE	61
Fig (V.7) : La carte ARDUINO	61
Fig (V.8) : Programme Labview pour l'acquisition des données.....	62
Fig (V.9) : Variateur de vitesse	63
Fig (V.10) : Balance électronique.....	64
Fig (V.11) : Pions	65
Fig (V.12) : Epoxy versé.....	65
Fig (V.13) : Plaques d'époxy	66
Fig (V.14) : Plaque sur l'étau.....	66
Fig (V.15) : Polisseuse à disques.....	67
Fig (V.16) : Rugosimètre à palpeur	68
Fig (V.17) : Mors de la machine de traction	69
Fig (V.18) : Géométrie des éprouvettes de traction.....	70
Fig (V.19) : Evolution contrainte/déformation de l'époxy vierge à 0% G	71
Fig (V.20) : Evolution contrainte /déformation de l'époxy à 1% G	71
Fig (V.21) : Evolution contrainte /déformation de l'époxy à 2% G	72
Fig (V.22) : Evolution contrainte /déformation de l'époxy à 3% G	72
Fig (V.23) : Influence de l'ajout du graphite sur l'allongement à la rupture	73
Fig (V.24) : Influence de l'ajout du graphite sur la contrainte de rupture.....	73
Fig (V.25) : Influence de l'ajout du graphite sur le module d'Young.....	74
Fig (V.26) : Evolution de l'effort normal en fonction du temps.....	76
Fig (V.27) : Evolution de l'effort tangentiel en fonction du temps	77

Fig (V.28) : Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps.....	77
Fig (V.29) : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse	78
Fig (V.30) : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge.....	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement	28
Tableau III.1 : Liste de quelques matériaux compatibles.....	38
Tableau IV.1 : Avantages et inconvénients de l'utilisation de films lubrifiants polymères	53

Introduction générale

Introduction générale

Le domaine industriel est un secteur d'activités regroupant plusieurs problématiques, qui sont notamment d'ordre mécanique et sont liées aux conditions environnementales extrêmes d'utilisation.

La tribologie intéresse tous les domaines d'activité car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régi par des contacts. Ils contribuent au fonctionnement des liaisons entre solides que ce soit dans les systèmes vivants ou dans les machines, dans les mécanismes les plus élémentaires comme les plus complexes. On en trouve aussi bien dans les articulations humaines que dans celles des satellites, en micromécanique comme dans les engins de travaux publics, dans la mise en forme des matériaux comme dans les organes de transmissions d'énergie ou de guidage.

Au sein des pièces mécaniques en contact, on rencontre de sévères conditions en termes de pression et de température.

De plus ces pièces sont soumises à des contacts et frottements permanents, entraînant des dégradations en surface (fissures ; écaillages; ...) pouvant aller jusqu'à l'usure totale, donc à une fin de vie avancée de ces pièces.

Le coût occasionné par telles problématiques s'avère élevé en termes de main d'œuvre et d'immobilisation de l'appareil.

L'étude des problèmes de frottement-usure en mécanique fait appel aux connaissances expérimentales en tribologie.

La tribologie est une science pluridisciplinaire qui étudie les phénomènes susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, qu'il s'agisse de frottement, d'usure ou de lubrification. Dans la tribologie l'usure est la conséquence du frottement, elle correspond à une perte d'usage par suite de déformations plastiques, fracturations ou d'un enlèvement de matière d'un corps ou des deux corps en glissement.

Pour remédier à ce problème on utilise les lubrifiants afin de réduire le frottement et l'usure des surfaces en contact. Parmi ces lubrifiants on trouve les lubrifiants solides qui sont souvent déposés sous forme de revêtement de surface ou incorporés dans le matériau dans le but d'aboutir à une combinaison optimale des propriétés.

Introduction générale

Ces dernières années, les polymères sont de plus en plus employés dans des applications tribologiques pour remplacer les matériaux métalliques pour leur facilité de transformation et leur excellente résistance à l'usure.

A titre d'exemple, il est envisagé de mélanger une résine polymère avec du graphite afin de réduire le coefficient de frottement et de minimiser l'usure. C'est d'ailleurs l'objectif de ce travail qui est la contribution à l'étude de l'influence de l'ajout de la poudre de graphite sur les propriétés mécaniques et tribologiques d'un polymère époxyde bisphénol A.

Ce mémoire comprend cinq chapitres

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur 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 la lubrification et spécifiquement sur les lubrifiants solides.

Le cinquième chapitre concerne l'étude expérimentale qui se subdivise en deux parties : la première porte sur les essais de traction et la deuxième sur les essais d'usure. 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 de frottement qui est le rapport entre l'effort tangentiel et l'effort normal, ainsi que l'effet de l'ajout du graphite à la résine sur les propriétés mécaniques en traction.

Le mémoire se termine par une conclusion générale suivi d'un annexe qui comporte les résultats des essais d'usure.

Chapitre I

Éléments de tribologie

I.1. Introduction :

Dans le monde actuel, des produits de plus en plus performants et fiables doivent être développés dans un délai de plus en plus court pour garantir la compétitivité de l'entreprise, comme par exemple l'allègement des pièces en agissant sur le choix du matériau et la réduction de l'usure en se servant des lubrifiants.

Une grande partie des défaillances des pièces travaillantes s'amorce à la surface de contact des matériaux en mouvement relatif ; de ce fait, le comportement tribologique des matériaux et les performances des lubrifiants ou des revêtements dans un contact glissant déterminent la qualité de la conception, les ingénieurs ont donc besoin d'un accès aux connaissances expérimentales les plus récentes en tribologie.

Le frottement est la cause principale de l'usure et de la perte d'énergie. L'usure est la cause de la perte de matière et des performances mécaniques des systèmes. Pour y remédier on minimise le frottement entre les solides en contact et on prévient leur endommagement à l'aide des lubrifiants.

Les premières études de tribologie concernaient les volumes (corps massifs) en contact, puis leur surface. Aujourd'hui, la tribologie se concentre sur le rôle des interfaces.

Le mot tribologie vient du grec (tribein) qui signifie frottement et logie qui signifie étude, il a été utilisé pour la première fois en 1966 en Grande Bretagne pour désigner l'ensemble des sciences et techniques qui s'intéressent au frottement, à la lubrification et à l'usure des matériaux.

La tribologie est aujourd'hui un large domaine d'études et de recherches pluridisciplinaires qui a pour objectif de réduire l'usure des matériaux et augmenter la durée de vie et la fiabilité des systèmes mécaniques et mécatroniques, aussi de maîtriser le frottement qui, dans certaines applications on cherche à augmenter le frottement (freins), alors que dans d'autres, on cherche à le réduire (sport de glisse).

I.2. Définition :

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Science faisant appel à la pluridisciplinarité, elle requiert des connaissances relatives aux surfaces, à la physicochimie à la science des matériaux et à la mécanique sur des échelles allant du nanomètre au millimètre.

Les contributions historiques pour le frottement [AMONTONS, 1699], [COULOMB, 1773] et pour la mécanique du contact [HERTZ, 1896], [BOUSSINESQ, 1885] sont aujourd'hui bien connues et ont été analysées afin de bien cerner leurs limitations. Il faut admettre cependant que toute prédiction de l'usure n'est possible que pour des cas particuliers et que les modèles proposés ne permettent pas d'extrapoler des taux d'usure d'un problème industriel à un autre [1].

La tribologie présente trois aspects distincts :

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

I.3. Importance scientifique et économique de la tribologie :

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

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

Dans tous les domaines on fait appel à la tribologie afin de mesurer dynamiquement la friction et l'usure dans le but de :

- Assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des machines ;
- Diminuer le coût d'obtention des surfaces frottantes ;
- Améliorer le rendement et la longévité des machines ;

- Assurer la sécurité des biens et des personnes, particulièrement dans le domaine du transport ;
- Contribuer à la santé publique et au confort, par exemple en diminuant les bruits liés aux contacts mécaniques ;
- Limiter les déchets ;
- Atteindre des vitesses plus élevées ;
- Améliorer la lubrification.

1.4. Le système tribologique et la notion du troisième corps :

Un système tribologique ou tribosystème se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps est un opérateur qui transmet la charge (portance) d'un premier corps sur l'autre et accomode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées). L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de **frottement**.

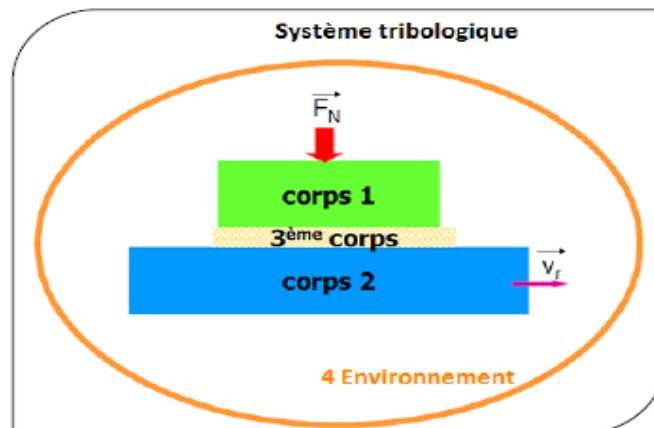


Figure I.1 : Représentation schématique d'un système tribologique.

- Les deux premiers corps sont soumis à des torseurs cinématique (vitesses) et dynamique (force et moments).
- Le milieu interfacial ou le 3^{ème} corps qui est soumis à des sollicitations mécaniques, thermique, physicochimique.

- Le milieu ambiant dont le rôle peut être déterminant dans le comportement du contact.

Le troisième corps est l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre. Ainsi il représente l'ensemble des éléments s'intercalant entre les deux premiers corps (Figure : I.1). Il est composé :

- de films superficiels (contaminants, molécules adsorbées, films d'oxydes...), induits par la réactivité des surfaces ;
- de particules détachées (débris) s'accumulant lors du frottement, induits par les processus de dégradation des surfaces ;
- L'ordre de grandeur caractéristique du troisième corps est le micromètre, alors que les écrans ont une épaisseur de quelques nanomètres. Ces derniers sont composés de dépôts artificiels ou de couches naturelles physisorbées, chimisorbées, oxydées, dépendant de l'historique de préparation des surfaces des premiers corps en contact [2].

I.5 Phénomènes observables :

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

- L'un des plus évidents est la résistance au déplacement que l'on exprime par un facteur de frottement et les variations instantanées des efforts normaux et tangentiels sont la source de vibration, les excitations très riches en fréquences générées au niveau des surfaces peuvent se traduire par des bruits.
- L'énergie dissipée dans le contact va en très grande partie, plus de 95% se transforme en énergie thermique, celle-ci se dissipe dans le milieu ambiant et dans chacun des deux solides ce qui provoque leur échauffement.

I.6. Le milieu ambiant :

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

- Sa nature : liquide ou gaz, composition chimique, température et son débit éventuel.
- Ses propriétés mécaniques et physiques qui interviennent dans le comportement mécanique du contact, dans l'énergie mise en jeu et dans sa dissipation.

- Ses propriétés chimiques comme la réactivité du milieu ambiant avec les matériaux constituant les solides en contact, qui est à l'origine de la création ou de la destruction des films superficiels dont la présence modifie considérablement le comportement du contact ; si bien qu'un environnement oxydant favorise la formation ou le maintien des films.

I. 7. Tribologie des interfaces (théorie du troisième corps) :

La tribologie matérialise l'interface entre les corps frottants, en lui affectant des propriétés différentes de celles des corps massifs qui la bordent. Elle se rapproche à ce titre de la lubrification qui confère au film d'huile des caractéristiques propres. La tribologie des interfaces (film intermédiaire) a l'avantage, de mieux rendre compte de la réalité des phénomènes de contact et du rôle de chaque élément qui compose ce contact suite à des travaux expérimentaux d'une grande finesse qui s'appuient sur des techniques de visualisation. Sur le plan fondamental, elle présente différemment l'usure et le frottement. Elle remet en cause les processus classiques d'usure et les substitue par l'enchaînement plus complexe des processus suivants : détachement de particules, piégeage de ces particules et formation d'un lit de particules, établissement d'un régime stationnaire de détachement et d'élimination de ces particules.

Le contact entre deux surfaces métalliques en mouvement peut détruire les surfaces et les débris commencent leur vie dans le contact. Si les débris sont piégés dans le contact, le contact à deux corps devient un contact à trois corps. Ce passage se produit très rapidement au bout de quelques dizaines de passages de friction.

Le troisième corps est un 'opérateur' séparant les deux premiers corps et transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre et accommode, en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement), l'essentiel de la différence de vitesse entre ces deux corps. Le rôle du troisième corps dans un frottement sec non lubrifié, en examinant la zone de contact et en suivant l'évolution des interfaces depuis leur formation jusqu'à leur élimination [1].

Les lubrifiants liquides ou solides sont considérés comme des troisièmes corps artificiels puisqu'ils sont introduits dans le contact par une alimentation extérieure. La notion de circuit tribologique a été introduite pour décrire l'évolution des particules d'usure dans le contact. Ces particules sont, dans un premier temps, arrachées des surfaces frottantes et

constituent le débit source. Si un lubrifiant solide est utilisé, l'ensemble (particules détachées, lubrifiants) va constituer le troisième corps. Dans un second temps, une partie des particules constituant ce troisième corps sera éjectée hors de la surface, alors que de nouvelles particules d'usure seront détachées des surfaces antagonistes et viendront alimenter le contact [3].

Concept du troisième corps :

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

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

I.8. Le triplet tribologique :

Le triplet tribologique est constitué par le mécanisme, les deux premiers corps et le troisième corps. Il permet de décrire les interactions entre les différents éléments qui entourent le contact, c'est-à-dire la boucle ou circuit qui représente l'équilibre des forces extérieur au contact [4].

Il aborde des sujets dont les dimensions s'échelonnent entre le nanomètre et le millimètre et des unités de temps entre la microseconde et l'année.

❖ Le mécanisme :

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

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

❖ Les premiers corps :

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

Les contraintes locales sont générées par le chargement normal et le déplacement tangentiel imposé et affectent le volume du matériau. La profondeur (pénétration) affectée par ces contraintes locales est au voisinage de 50 μm .

❖ Le troisième corps :

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

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

En d'autres termes, les débris piégés dans le contact diminuent l'interaction entre les premiers corps et les protège au moins partiellement contre l'usure. Ce concept d'auto protection ou de portance suggère la définition suivante : **un bon matériau sacrifie sa surface pour sauvegarder son volume [1].**

Selon GODET et al 1980 on peut définir le troisième corps selon deux façons :

- Au sens des matériaux, en se fondant sur la variation de composition au voisinage de la surface. Notons que la composition des troisièmes corps n'est pas du tout homogène. Elle dépendra de la composition des surfaces des premiers corps changée éventuellement par une tribochimie.
- Au sens cinématique, en se limitant à l'épaisseur au travers de laquelle la différence de vitesse entre les deux premiers corps est accommodée.

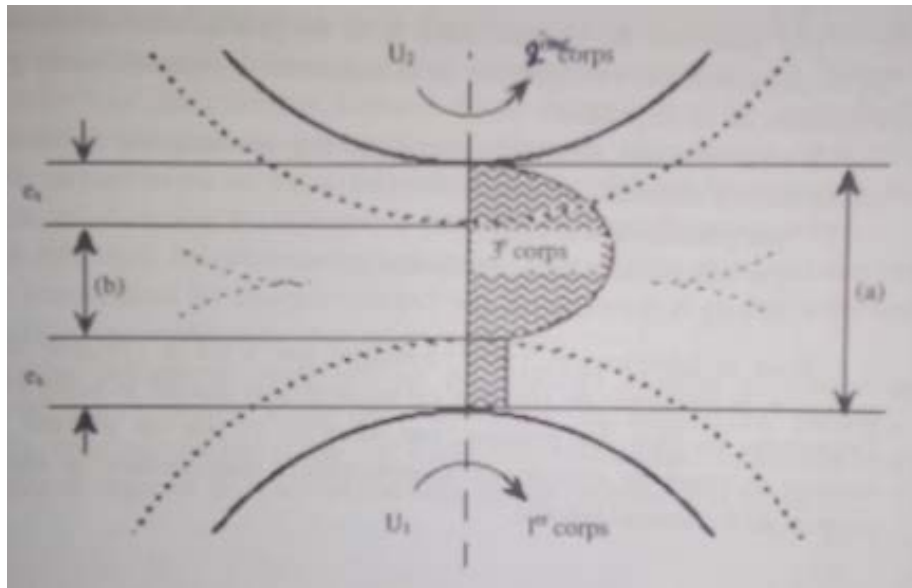


Figure 1. 2 : Définition du troisième corps : a) au sens des matériaux ; b) au sens cinématique. [1]

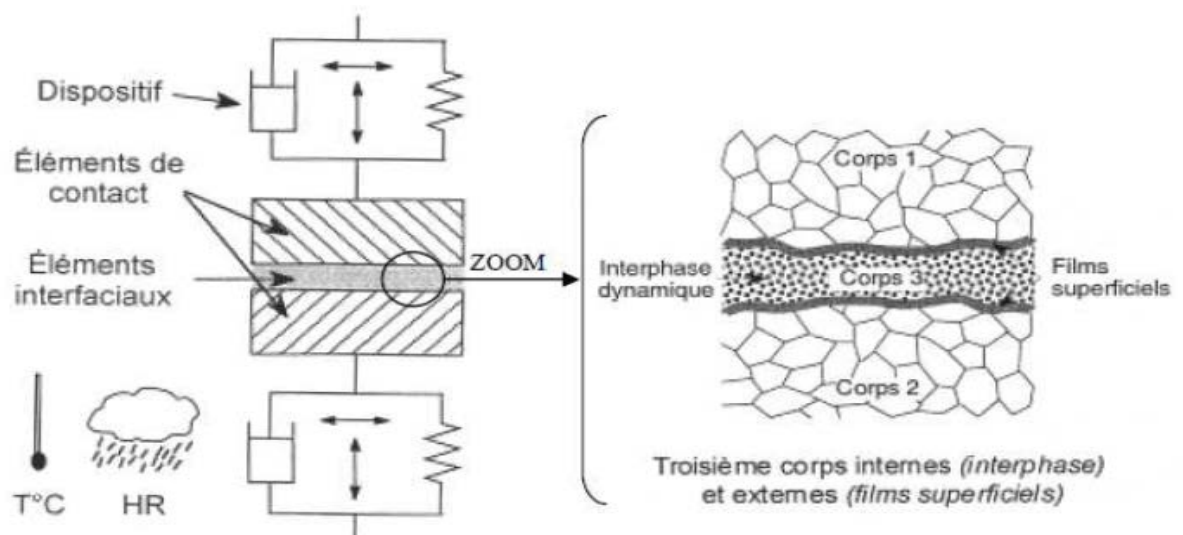


Figure 1.3 : Le triplet tribologique et le concept du troisième corps.

I.9. 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.4**). Ces sites sont au nombre de cinq (05) : 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. [1]

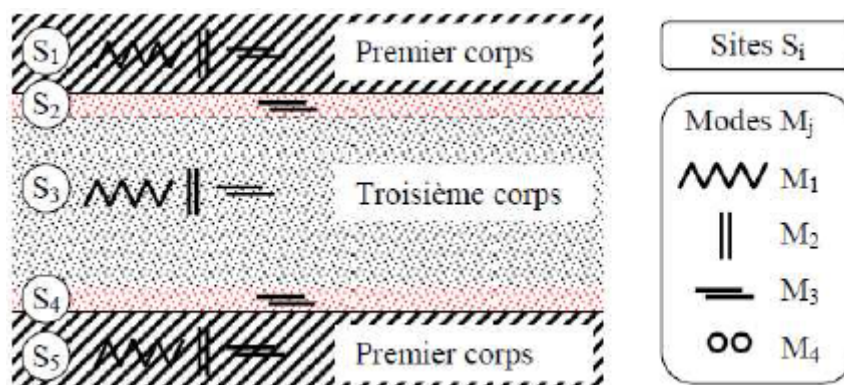


Figure 1.4 : Mécanismes d'accommodation de vitesses d'après Berthier.

I. 10. Le circuit tribologique :

Au cours du frottement l'ensemble des détériorations de la surface et la perte de matériau donnent les caractéristiques de l'usure. Ce processus se traduit par un enchaînement d'événements liés essentiellement à la présence du troisième corps : détachement des particules, piégeage et formation de débris pour aboutir à l'établissement d'un régime stationnaire traduisant l'équilibre entre détachement et élimination des particules. Cet enchaînement demande de ne pas confondre particules détachées et particules d'usure, et il est fortement influencé par la géométrie des premiers corps et la rigidité du mécanisme («signature du tribomètre »). Le gradient de vitesse auquel sont soumis les débris qui constituent le troisième corps (adhérent ou non après ouverture du contact) peut se traduire en termes de débits, dont les différentes composantes participent au processus d'usure défini comme le circuit tribologique.

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 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.5).

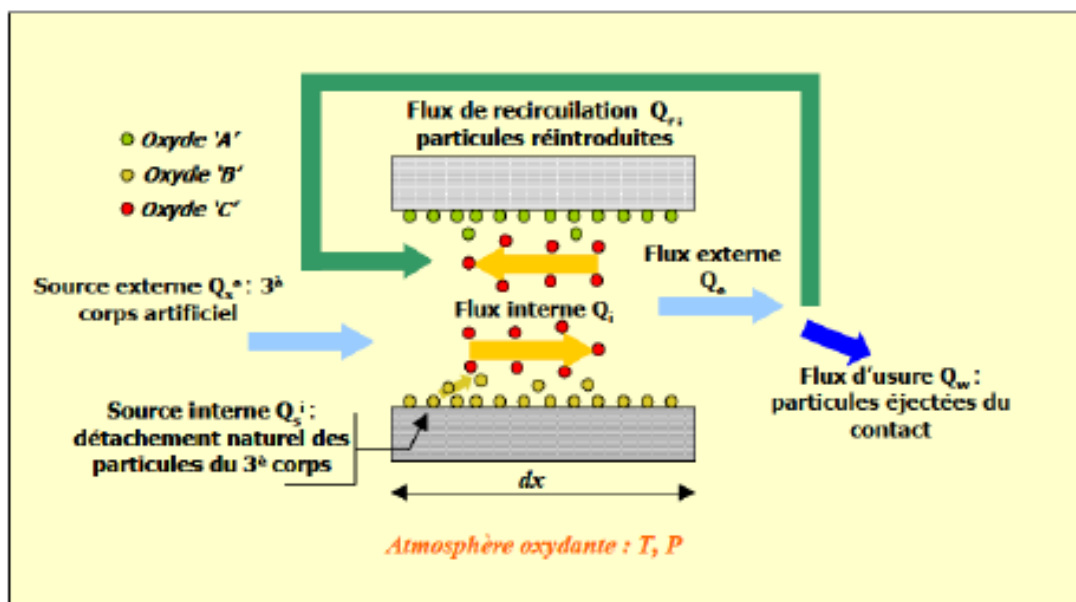


Figure I.5 : Représentation schématique du circuit tribologique dans le cas d'un contact entre deux solides. [4]

L'usure n'est pas relative à la dégradation des premiers corps ce qui correspondrait au débit interne de troisième corps. Comme on a 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 comme (Support de charges, accommodation de vitesses, ...).

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

I.11. Paramètres tribologiques :

Les paramètres tribologiques sont des caractéristiques mécaniques qui ont des surfaces qui interagissent en mouvement relatif. Un système tribologique est donc 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].

I.11.1 Les paramètres opérationnels :

Ils caractérisent les conditions fonctionnelles du tribosystème. Ce sont, dans la plupart des cas, des variables indépendantes qui peuvent être modifiées pour les tests.

Les principaux paramètres opérationnels sont la charge appliquée F , la vitesse V , le temps t et la température T .

I.11.2 Les paramètres structuraux :

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

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

Une distinction doit être faite entre les systèmes ouverts, qui permettent l'écoulement de matière à l'interface dans le cas des machines de mise en forme et les systèmes fermés dont les composants sont soumis aux processus de frottement et d'usure de manière continue.

I.11.3 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 la topographie (état de rugosité) des surfaces.

I.11.4 Les paramètres tribométriques :

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

I.12. Mesures tribométriques :

La tribométrie s'intéresse à la mesure des forces de frottement. L'appareil « pion sur disque » mesure le taux d'usure à sec et en milieu humide. L'échantillon est placé sur un disque tournant à une vitesse angulaire choisie. Une bille fixée à une tige pouvant se déplacer verticalement, est appuyée sur la surface à étudier pour un nombre fixe de rotations du disque. La force tangentielle et la force normale sont mesurées, ce qui permet ensuite d'évaluer le taux d'usure et le coefficient de frottement.

I.13. L'expérimentation en tribologie :

Le coût et les difficultés techniques en vue d'obtenir des mesures fiables des valeurs de frottement et d'usure en service, favorisent le développement d'essais de simulation en laboratoire. Le choix entre plusieurs méthodes pour lesquelles les conditions d'essais sont liées à deux alternatives fondamentales :

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

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

Plusieurs questions fondamentales se posent avant de choisir une méthode d'essai :

- Quelles sont les conditions d'essais et leurs limites ?
- Le comportement d'un matériau dans des conditions imposées est-il connu ?
- Existe-t-il des essais normalisés adaptés au problème posé ?

I.14. Essais tribologiques :

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

Il existe de nombreuses méthodes d'essais tribométriques qui permettent d'obtenir une caractérisation du frottement, de la lubrification et de l'usure. Les études fondamentales du comportement tribologique des matériaux utilisent des concepts géométriques simples et les principaux types de géométrie des interfaces de contact sont représentés schématiquement dans la figure I-4.

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

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

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

La normalisation des essais en tribologie présente de nombreuses difficultés en raison de la complexité des phénomènes de frottement et d'usure. Ces essais normalisés peuvent cependant servir par exemple à établir une base commune pour évaluer les performances d'un nouveau couple de matériaux pour le sélectionner ou comme certificat de contrôle de qualité.

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

Les tribomètres :

Les tests tribologiques sont conduits à l'aide de tribomètres, qui peuvent travailler à l'air ou sous atmosphère contrôlée, à sec ou en présence de lubrifiant. Les paramètres imposés sont généralement la charge appliquée, la vitesse de glissement et les conditions environnementales (taux d'humidité, atmosphère contrôlée, pression...).

Les grandeurs mesurées sont généralement la force de frottement, la température des surfaces, la résistance de contact et l'usure. [3]

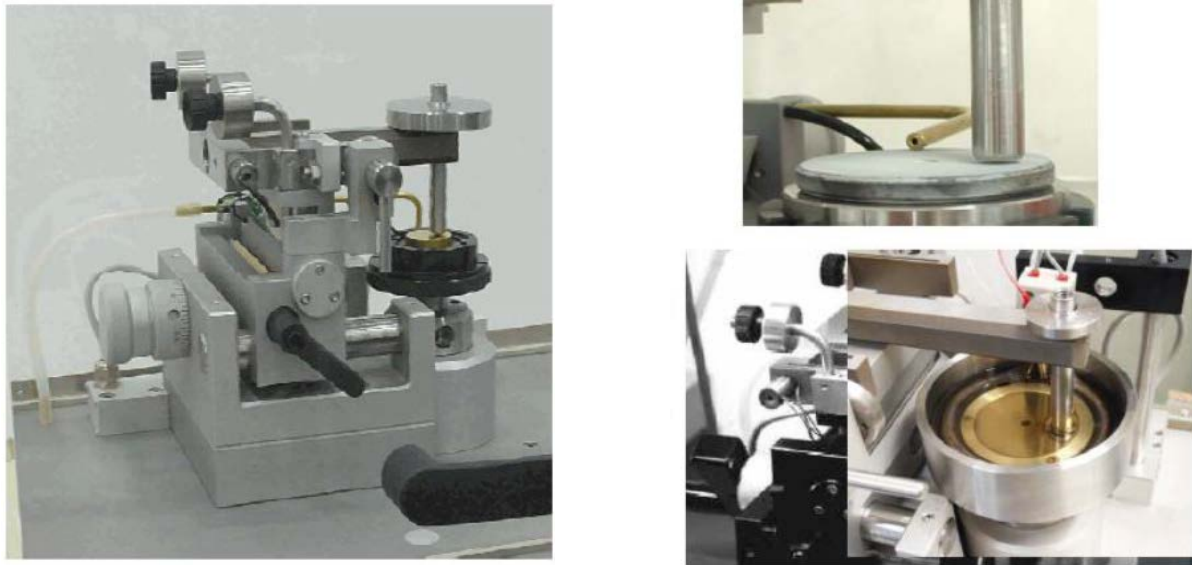


Figure I.6 : Tribomètre bille/ disque ou pion sur disque

I.14.1 Paramètres de contact :

- Surfaces : matériaux, topographie, géométrie
- Sollicitations : charge, vitesse, température
- Ambiance : environnement, lubrification
- Mode de déplacement : résistance, dissipation d'énergie, portance

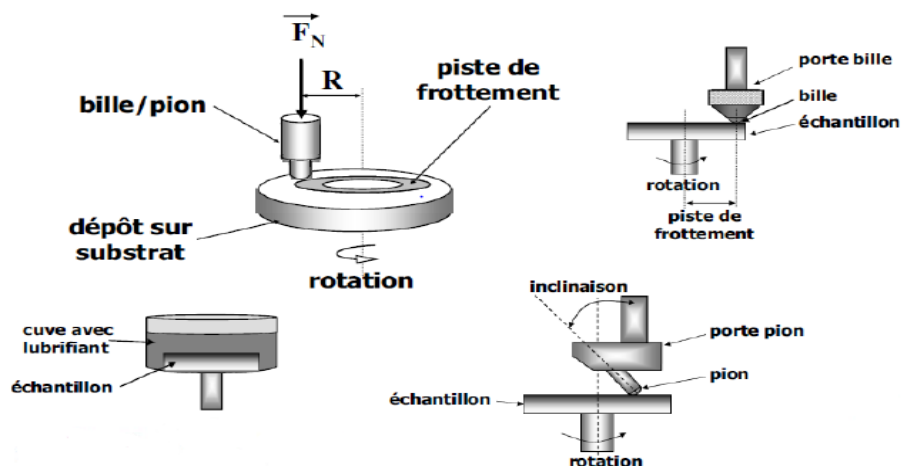


Figure I.7 : Principe de la mesure.

I.15. Conclusion :

La tribologie est une science très vaste, elle intéresse les domaines d'activité tels que la conservation d'énergie, productivité, développement et fabrication de nouveaux équipements, ainsi que dans les systèmes vivants (les articulations humaines) car l'univers technique qui nous entoure est essentiellement régit par le contact.

La tribologie permet d'étudier, comprendre et d'apporter des solutions pour les problèmes liés à l'usure et au frottement, 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 :

Tous les aspects de nos vies sont affectés par les phénomènes de friction, que ce soit d'une manière positive ou négative. Le frottement est important dans la vie quotidienne, c'est le cas pour les opérations comme marcher, démarrer, arrêter, un roulement à billes, une chaîne de vélo, fixer des pièces, tenir les objets....

La théorie du frottement semble toujours être en retard de plusieurs étapes par rapport à la pratique. Ces dernières années les techniques d'expérimentation à l'échelle atomique et celles de simulations par ordinateurs se sont développées.

Ces techniques donnent de l'espoir pour la compréhension des processus complexes intervenant dans les contacts tribologiques.

En ayant un contact frottant, on a obligatoirement la notion d'usure qui est moins restrictive car elle s'applique à tout événement conduisant à une perte de fonction des composants ou systèmes ou bien détérioration due à l'usage.

L'usure des surfaces frottantes se traduit, le plus souvent au cours du fonctionnement par une élévation de température, modifications géométriques et dimensionnelles, transformations physico chimique ou encore par enlèvement de matière.

Alors on doit réduire ou carrément supprimer l'usure afin de prolonger la durée de vie et la fiabilité des machines et mécanismes, ce qui nécessite de multiples approches et connaissances en divers domaines de la science.

II.2. Définition :

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. [1]

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.

Il est défini aussi comme résistance au mouvement qui existe lorsqu'un solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qui le touche.

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 relativement à l'autre [ASTM, 1990]. Pour d'autres normes, le frottement se résume à l'action agissant contre le mouvement relatif de corps en contact [DIN, 1977].

II. 3. Provenance des lois du frottement :

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

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

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

$$\mathbf{F}_T = \mu \mathbf{F}_N$$

La résistance au frottement \mathbf{F}_T est proportionnelle à la charge normale \mathbf{F}_N permettant de définir un coefficient de frottement μ .

II.4. Types de frottement :

II.4.1. Frottement sec :

Mis en évidence par COULOMB, ce frottement apparaît lorsque deux surfaces matériellement distinctes sont en contact et ont tendance à glisser l'une contre l'autre. Ce phénomène en lui-même n'est pas un phénomène unique. En effet, il est la combinaison de plusieurs effets :

- Tout d'abord, la cause la plus intuitive du frottement réside dans le fait que les surfaces de contact ne sont pas parfaites, elles présentent des crêtes et des creux de hauteur plus ou moins variable, de géométrie plus ou moins variable. Ainsi lorsque les surfaces sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, les aspérités de l'une viennent se placer dans les creux de l'autre.
- Sous l'action du poids d'un des corps (dans le cas où les surfaces de contact sont horizontales mais ceci est valable à chaque fois qu'il existe une composante de l'action d'un des corps perpendiculaire aux surfaces de contact), les corps en contact se déforment légèrement et les crêtes de l'un viennent s'encaster plus profondément dans les creux de l'autre.
- Une troisième considération réside dans le fait qu'au niveau des points de contact, les atomes des matériaux d'une des surfaces se trouvent dans le voisinage très proche des atomes de l'autre surface. Il apparaît donc une attraction atomique entre les deux surfaces au niveau des points de contact.

C'est pourquoi il est faux de penser que si les deux surfaces sont parfaitement lisses (jusqu'au niveau atomique), le glissement pourra s'opérer parfaitement.

De ces considérations, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

Tout d'abord, les forces de frottements n'apparaissent que lorsqu'un mouvement tangentiel ou une tendance au mouvement tangentiel (par l'intermédiaire d'une force de composante tangentielle non nulle) existe. Par exemple lorsqu'une assiette repose sur une table, la réaction de la table sur l'assiette est uniquement verticale. La force de frottement horizontale n'apparaît qu'au moment où l'on essaie de faire glisser l'assiette sur la table en lui appliquant une force horizontale.

Or il existe deux types de frottement sec :

- Frottement statique : le frottement statique est une force (ou un couple) qui tend à garder un corps en état statique ou bien, qui empêche un mouvement de démarrer. C'est lui qui nous permet d'avancer en s'appuyant sur le sol.

Lorsqu'une force est appliquée sur un objet reposant sur une surface (considérée comme immobile), la composante de cette force qui est parallèle à la surface est compensée par une force de frottement statique opposée, qui maintient l'objet immobile pour autant que la composante parallèle de la force appliquée ne dépasse pas une valeur maximale.

L'observation expérimentale montre qu'en première approximation, cette valeur maximale ne dépend que du poids apparent du corps et d'un coefficient de frottement statique, mais pas

de l'aire de contact. Le coefficient de frottement statique, lui, dépend de la nature des surfaces en contact.

$$\mathbf{F}_{\text{FS max}} = \mu_s \cdot \mathbf{F}_N$$

- Frottement cinétique : C'est la force qui tend à freiner un corps glissant sur une surface. Cette force F_{FC} est égale et de sens opposé à la force motrice nécessaire pour maintenir le corps en mouvement uniforme. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{F}_{\text{FC}} = \mu_c \cdot \mathbf{F}_N$$

Le frottement cinétique est habituellement inférieur au frottement statique. Cela veut dire qu'il faut une force plus grande pour vaincre l'adhérence (due au frottement statique).

Les frottements cinétiques contrairement aux frottements statiques, consomment de l'énergie puisqu'ils entraînent des déplacements.

II.4.2. Frottement semi fluide :

Ce type de frottement est obtenu lorsqu'on interpose entre les surfaces frottantes une couche fluide, dont l'épaisseur n'est pas suffisante pour que l'influence du frottement ne se fasse plus sentir.

II.4.3. Frottement fluide :

Ou frottement hydrodynamique qui apparaît lorsque l'épaisseur de la couche fluide est suffisamment importante par rapport à la hauteur des aspérités des surfaces en contact. Dans ce cas, le frottement vient du glissement des couches élémentaires du fluide l'une par rapport à l'autre.

II.5. Le coefficient de frottement :

Considérons un corps solide de forme parallélépipédique déposé sur un plan horizontal soumis à un effort normal F_N , en appliquant un effort F parallèle au plan pour mettre le corps en mouvement, alors en augmentant la vitesse de 0 à une vitesse donnée.

Ce déplacement provoque l'apparition d'une force de frottement F_T dirigée dans le sens inverse du glissement. Pour accéder au coefficient de frottement μ , on a besoin de F_T , F_N , il est défini par l'expression suivante :

$$\mu = F_T / F_N$$

On observe souvent une évolution de la force de frottement en dents de scie. Cette évolution correspond au phénomène de stick slip qui résulte d'une succession d'adhésions et de rupture aux points de contact entre les surfaces entre les surfaces antagonistes. [3]

Les coefficients de frottement dépendent de plusieurs paramètres d'origines diverses :

- La nature des matériaux en contact ;
- La rugosité des surfaces en contact ;
- La température.

Le coefficient de frottement est indépendant de :

- La taille et la formes des surfaces en contact ;
- La valeur de l'effort normal.

II.6. Comportement du coefficient de frottement :

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

II.6.1. La vitesse de glissement :

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

On distingue :

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

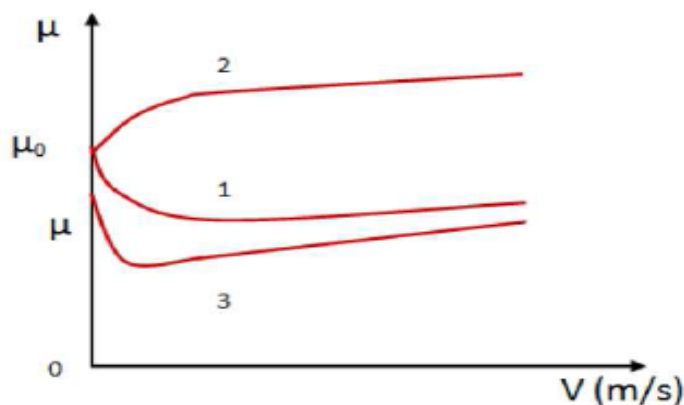


Figure II.1 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement. [5]

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure II.1, 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.1). 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.6.2 Chemin de glissement parcouru :

La (figureII.2) représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement.

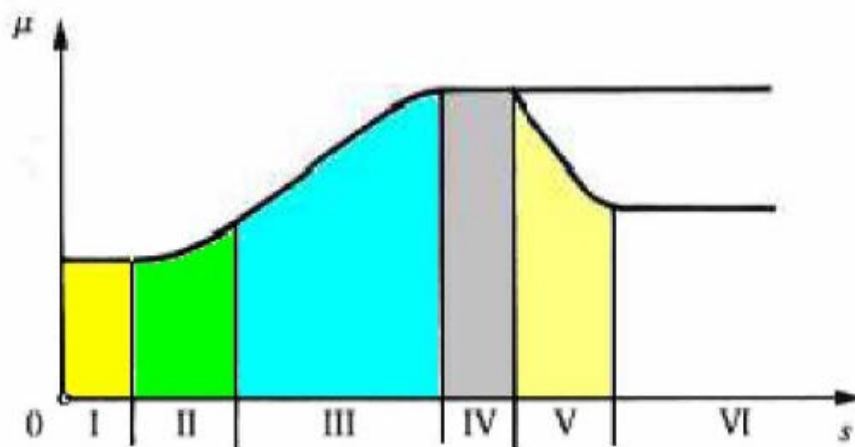


Figure II.2 : Evolution du coefficient de frottement avec la distance de glissement. [5]

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'incruster 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.6.3. Etat de surface :

La topographie des surfaces a une grande influence sur les propriétés d'un système tribologique, aussi elle couvre un large domaine allant du niveau micrométrique au niveau nanométrique. [1]

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

II.6.4. Nature des matériaux :

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.6.5. Charge normale appliquée :

La figure II.3 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.

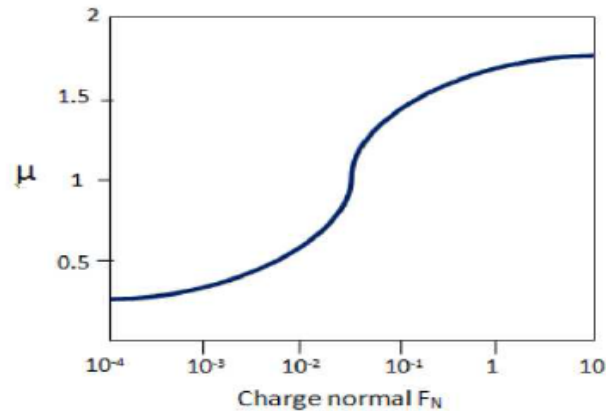


Figure II.3 : Variation du coefficient de frottement en fonction de la charge normale N .

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1 à 10nm) 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.6.6. Température ambiante :

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève ; puis, au-delà de 500°C à 800 °C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue. Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà. [6]

II.7. Importance du coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs F , V et f , correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement. [7]

Le champ 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'engrainement, assemblage freinés, ...) 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 freinés, 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.8. Valeurs pratiques du coefficient de frottement :

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

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

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

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

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

Cette transition est attribuée à l'incrustation du film d'oxydes de fer sous l'effet de la charge élevée assurant le maintien du contact entre films d'oxydes. La fonte grise et les bronzes ou le plomb glissant sur un acier non allié donnent des valeurs faibles du coefficient de frottement $\mu = [0,2 ; 0,4]$. [1]

Le tableau II.1 suivant donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux. [8]

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

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement. [8]

II.9. Energie de surface :

L'énergie de surface d'un solide est une grandeur particulièrement importante pour comprendre et prévoir de nombreux phénomènes de surface, tels que l'adhésion, le frottement et le collage. Elle rend compte de la réactivité des matériaux et traduit la dissymétrie du champ des forces auquel sont soumis les atomes de surface.

L'énergie de surface est sensible à la température, en augmentant la température, on fait vibrer les atomes du réseau avec une amplitude de plus en plus importante, conduisant à une diminution de l'énergie de cohésion du matériau. [3]

Les métaux ont des valeurs d'énergie de surface relativement hautes. Il en résulte de hauts coefficients de frottement pour des surfaces métalliques pures. La contamination des surfaces métalliques amène à une réduction des énergies de surfaces. [1]

II.10. La difficulté rencontrée dans la détermination du coefficient de frottement :

Une étude qui a été faite et dirigé par le JIFT 2006 (journées internationales francophone de tribologie) avait comme but « d'étudier l'influence de la dynamique de chargement sur le comportement tribologique du contact » nous a permis d'avoir une autre vision vis avis des résultats obtenus dans nos propres essais tribologiques et bien comprendre la difficulté de détermination du coefficient de frottement.

L'expérience se résume à une étude qui a été faite dans plusieurs laboratoires de sept pays différents (Canada, USA, Japon, France, Grande Bretagne, Italie, Allemagne) où un protocole bien défini (« le mode de contact, l'état micro géométrique des surfaces, la charge appliquée, la cinématique, l'ambiance (température humidité...) et le matériau des surfaces ») était fixé pour chacun de ces laboratoires, mais sur des tribomètres différents. L'étude a démontré une diversité dans les résultats sur le frottement et l'usure, la diversité de ces résultats témoigne sur la complexité des phénomènes observés. Ce qui montre aussi que le comportement tribologique n'est pas uniquement lié aux conditions stationnaires d'essai définies dans le protocole (par exemple vitesse de glissement constante ou charges constantes), mais qu'interviennent aussi des facteurs d'influence liés à l'équipement. La figure montre la diversité du coefficient de frottement (acier/acier) en fonction des sept pays. Les résultats sont montrés dans la figure II.4. [9]

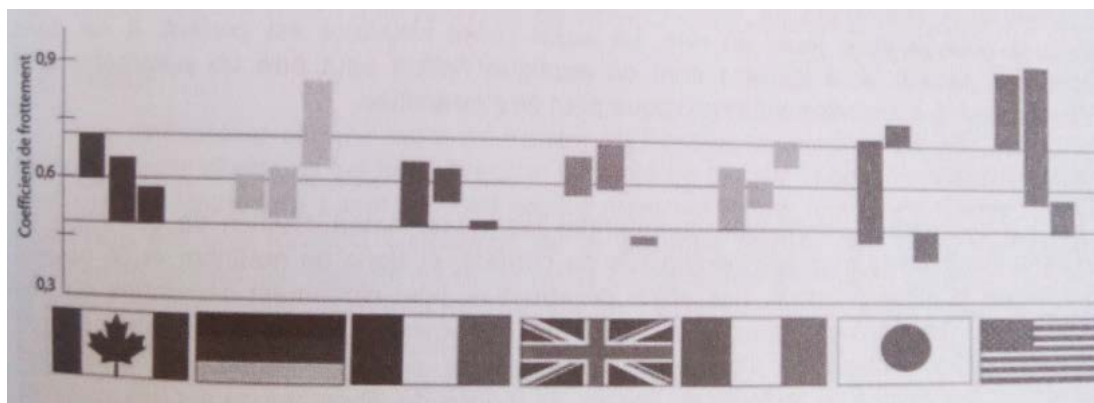


Figure II.4 : Programme VAMAS Round-Robin, résultat pour un test de frottement : Coefficient de frottement pour un couple (acier/acier) [9].

II.11. Les matériaux en tribologie :

Le choix d'un couple de matériau pour une application tribologique ne peut se faire que si les conditions de sa mise en œuvre sont parfaitement connues. Ces conditions englobent la géométrie et la pression de contact, la nature du mouvement des corps antagonistes, la vitesse de déplacement relatif, la nature et l'épaisseur du corps interposé (lubrifiant ou autre) et l'ambiance (température, humidité, espèces chimiques réactives).

L'une des règles de sélection des couples de matériaux est la règle dite **compatibilité tribologique**. Cette règle stipule que des matériaux insolubles entre eux seront peu ou pas adhésifs l'un vis-à-vis de l'autre et constitueront un bon couple frottant. Malgré cela, elle doit être utilisée avec précautions, car elle n'est pas toujours vérifiée. [3]

L'ingénieur ou le technicien dispose aujourd'hui de d'une multitude de matériaux pour application tribologique, comme les métaux, les polymères, les céramiques, les composites, les lubrifiants...

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 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 de 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.12. Frottement des métaux :

Le glissement d'un métal sur un autre métal dans l'air se rencontre dans de nombreuses applications. Leur coefficient de frottement varie de $\mu = 0,5$ à $1,5$ pour des glissements non lubrifiés. Il faut cependant se rappeler que le comportement au frottement dépend de la composition et de la microstructure du matériau, des conditions de mesure et du système tribologique. [1]

Les surfaces métalliques propres, placées dans le vide ou des atmosphères, présentent généralement une adhésion marquée. L'absence de contaminations fait que des liaisons inter-faciales 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) [10]. 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 dépendent de la structure cristalline. En présence d'air, la plupart des métaux s'oxydent naturellement en formant des films de 1 à 10nm d'épaisseur. Ces films jouent un rôle déterminant dans le comportement tribologique, dans la mesure où les conditions de fonctionnement permettent leur maintien ou leur renouvellement. En effet le travail d'adhésion des oxydes est bien inférieur à celui des métaux, ce qui réduit le terme d'adhésion du facteur de frottement, limitant l'apparition des liaisons inter-faciales. En général, le frottement métal oxydé/ métal oxydé est inférieur à celui métal nu/métal nu. Les conditions de charge et de vitesse d'une part, les propriétés mécaniques et physico-chimiques des métaux et des oxydes d'autre part, régissent le comportement global.

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

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

-La précipitation de la réactivité physico-chimique des matériaux qui abaissent largement les facteurs de frottement.

II.13. Frottement des polymères :

Les polymères sont utilisés dans diverses applications, où la résistance à l'usure et à la corrosion, la légèreté, la facilité de mise en œuvre et de maintenance, le coût, sont les critères principaux qui orientent le choix. Proposés par les firmes spécialisées sous forme de poudre, paillettes, granules, bondes, ils peuvent être mis en forme par moulage, extrusion ou usinage, ce qui facilite la mise en œuvre de composant tribologique élémentaire : coussinets, engrenages, 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 mécaniques, thermiques ou tribologiques : métaux conducteurs tels que le cuivre ou le bronze, fibres 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 polymères 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 bidimensionnel ou tridimensionnel. Une réaction chimique de réticulation se produit lors de l'opération de mise en forme.

II.14. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons pu constater que le frottement est un phénomène compliqué à étudier malgré la simplicité de ces lois, il dépend de plusieurs facteurs (état de surface, dureté, environnement, vitesse, charge, lubrification, ...). Aussi ces facteurs dépendent d'autres paramètres plus complexes.

Cependant, le coefficient de frottement n'est pas une propriété du matériau, mais de l'ensemble du système tribologique, alors on ne doit jamais utiliser les coefficients trouvés par

l'expérimental, dans des situations semblables, puisqu'il est sensiblement dépendant de plusieurs paramètres que nous ne pourrions jamais reproduire à cent pour cent.

Chapitre III

Usure

III.1. Introduction :

Les surfaces en contact de frottement subissent un endommagement qui peut être défini comme une modification de la topographie ou de la microstructure des couches superficielles. Or l'étude de ces endommagements fait partie du délicat domaine de la tribologie, science des interactions de surface, notamment du frottement.

Dans l'ensemble des secteurs industriels concernés par l'usure, plus de deux tiers des problèmes rencontrés relèvent de la mécanique (dans ce domaine, 30 % des avaries sont imputables à l'usure). Liée aux déplacements de deux corps l'un par rapport à l'autre, l'usure se rencontre plus particulièrement sur toutes les machines dont les fonctions utilisent les actions de contact : transmission des forces ou mouvements entre les différentes parties constitutives, guidages en rotation ou translation, assemblages, étanchéités.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs mais elle présente aussi des aspects favorables. L'affûtage d'un outil, la finition d'une surface par rectification, l'écriture de la craie sur le tableau ou du crayon sur le papier sont des exemples d'usures abrasives utiles.

III.2. Définition :

L'usure désigne la détérioration de surface par un processus d'enlèvement régulier de matière. Cet enlèvement peut être dû aux mouvements relatifs des pièces en contact ou à des agents extérieurs. [11]

Les paramètres influant le taux d'usure sont :

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

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

- L'**ultime finition** des surfaces lors du **rodage** : les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, les portées s'améliorent, les films d'huile s'amincissent. Une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce. Si l'usure se ralentit lors de la mise en fonctionnement, on constate une amélioration de l'état de surface, et réciproquement.
- La **vie utile** correspond au régime d'**usure douce** : la couche superficielle très dure qui semble se former est éliminée peu à peu sous forme de petites écailles. L'usure douce diminue la rugosité, tandis que l'usure sévère l'accroît.
- Enfin, la **vieillesse** se caractérise par une usure sévère qui aboutit à la mise hors d'usage.

III.3. Loi d'usure ou loi d'Archard :

Le type d'usure le plus courant qui touche les organes des mécanismes est de type adhésif, qui peut se poursuivre d'une usure corrosive et même l'usure abrasive. En pratique le taux d'usure varie au cours du temps. [11]

Loi d'Archard :

$$V = K \cdot W \cdot x / P \dots\dots\dots(1)$$

V : Le volume de matière usée.

K : Coefficient d'usure (en fonction du matériau et du type de lubrification).

W : Effort normal appliqué.

P : Contrainte d'écoulement du matériau le plus tendre (dureté).

x : Distance de glissement parcourue.

En résumé, la loi d'Archard permet d'estimer approximativement les taux horaire d'usure de nombreux composants. L'analyse de l'usure sur un composant peut ainsi vérifier s'il y a cohérence entre le taux horaire d'usure, le mode de lubrification et la nature des matériaux en contact. Ce type d'analyse se révèle donc un précieux concours pour identifier une anomalie de fonctionnement.

III. 4. Les différents mécanismes d'usure :

III. 4. 1. L'usure adhésive :

La théorie de l'usure d'adhésion a été développée par Archard. L'usure adhésive se caractérise par la formation de jonctions (microsoudures) entre les surfaces frottantes. Dans le cas des jonctions faibles, le cisaillement se produit à l'interface et l'usure sera nulle. Lorsque les jonctions sont fortes, le cisaillement se produit au sein du matériau le plus mou qui est transféré sur le matériau le plus dur. [3]

Si la rupture ne se produit pas exactement dans le plan d'adhésion original, il y aura transfert de matière d'une surface sur l'autre et usure adhésive. Deux cas peuvent alors se présenter :

- La jonction est plus faible que l'un et l'autre des corps métalliques, la rupture se produit le long de la surface définissant la jonction. L'usure des surfaces est très faible ou nulle. Ce qui se produit si la liaison est dominée par les forces de type Van Der Walls.
- La jonction est plus résistante que les matériaux qui lui ont donné naissance, la rupture aura lieu dans la masse du métal le plus faible, il y a transfert du matériau le plus tendre sur le matériau le plus dur. [1]

Le phénomène d'adhésion est donc conditionné par la nature des liaisons interatomiques.

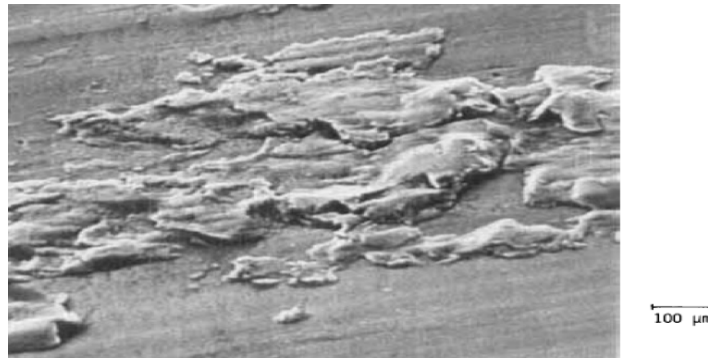


Figure III.1 : Usure par adhésion.

III. 4. 1.1. Paramètres influençant sur l'usure adhésive :

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

- **Le milieu ambiant** tend à accélérer le phénomène ou à le ralentir et il favorise ou défavorise l'existence de jonctions métal-métal et le transfert qui en résulte.
- L'augmentation de **la charge** se traduit d'abord par un accroissement du nombre de points de contact, et ensuite par un accroissement de la taille des jonctions. Les aspérités se déforment plastiquement et contribuent ainsi à une augmentation rapide de l'usure.
- L'effet de **la vitesse** agit sur la température superficielle, la température maximale atteinte est celle du métal ayant le plus bas point de fusion. 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 permet :
 - ❖ 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 ;
- **La température**, outre l'affaiblissement mécanique des matériaux, favorise les réactions inter-faciales et, au-delà d'un certain seuil déclenche les mécanismes de fluage et de diffusion qui augmentent fortement le risque de création de liaisons étendues pouvant conduire au grippage.

III. 4. 1. 2. Prévention :

Il faut choisir des couples de matériaux n'offrant aucune possibilité de filiation cristalline résistante. Les suivants sont couramment utilisables en atmosphère non oxydante (attention, l'argent et le cobalt sont compatibles mais pas leurs oxydes). On peut métalliser les pièces, en se méfiant de la fragilisation par l'hydrogène lors des dépôts électrolytiques.

Couples de métaux compatibles	
Acier	Argent, Antimoine
Chrome	Argent, Cadmium, Or
Molybdène	Argent, Cuivre, Or, Palladium
Tungstène	Argent, Cuivre
Argent	Cobalt, Rhénium

Tableau III.1 : Liste de quelques matériaux compatibles. [8]

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

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

○ **Le rôle des particules adhésives dans l'usure d'un contact sec :**

D'après les résultats des actes des journées internationales francophones de tribologie 2004 sur le rôle des particules adhésives dans l'usure d'un contact sec, l'influence de la pression appliquée et la vitesse de glissement et du milieu ambiant sur les formations de particules adhésives est démontrée.

Par des modèles numériques, certains chercheurs ont aboutis à des simulations qui permettent la représentation dynamique du détachement de particules et de leur écoulement, jusqu'à leur éjection du contact.

En revanche, pour un contact confiné, l'usure représente un équilibre entre les débits source et d'usure en fonction de la quantité de 3^{ème} corps dans le contact.

Pour diminuer l'usure, on peut jouer sur les deux propriétés des deux débits, en contrôlant les détachements de particules, mais aussi en contrôlant l'éjection de ces particules.

III. 4. 2. L'usure abrasive :

L'usure abrasive intervient lorsqu'un matériau dur est amené au contact d'un matériau mou. Ce type d'usure se manifeste par des rayures, des sillons ou la formation de copeaux.

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

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

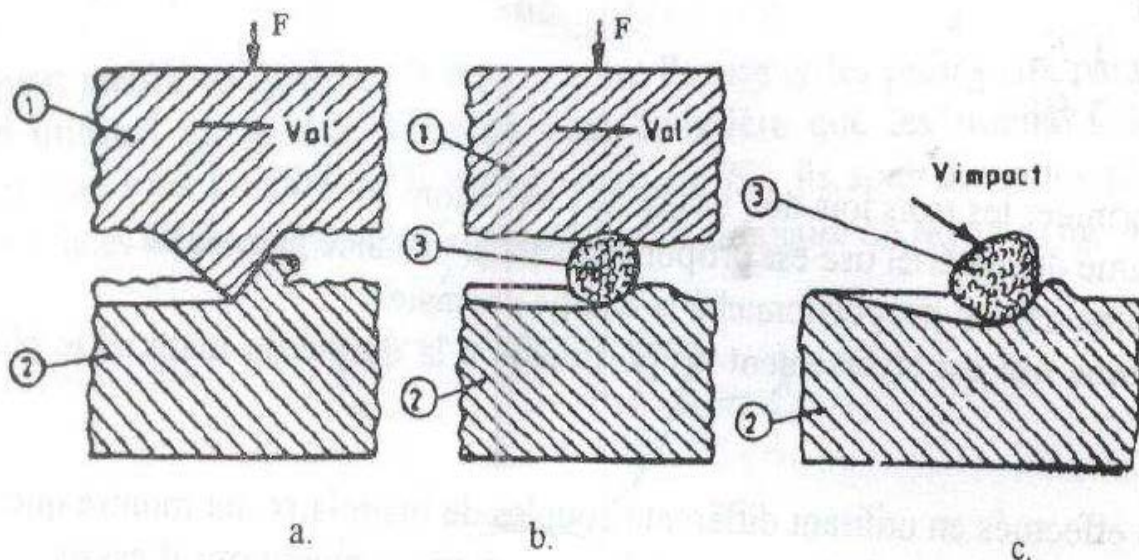


Figure III. 2 : Les deux types d'usure par abrasion.

III. 4. 2.1. Paramètres influençant sur l'usure abrasive :

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

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

III. 4. 2. 2. Prévention :

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

Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact. Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes. Il faut impérativement prévoir des sculptures ou des moletages si aucune circulation de lubrifiant ne permet cette évacuation.

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

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

III. 4. 3. L'usure par érosion :

L'érosion est une usure abrasive particulière, par définition c'est la perte de matière d'une surface due au contact d'un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides. [1]

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.3). 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.

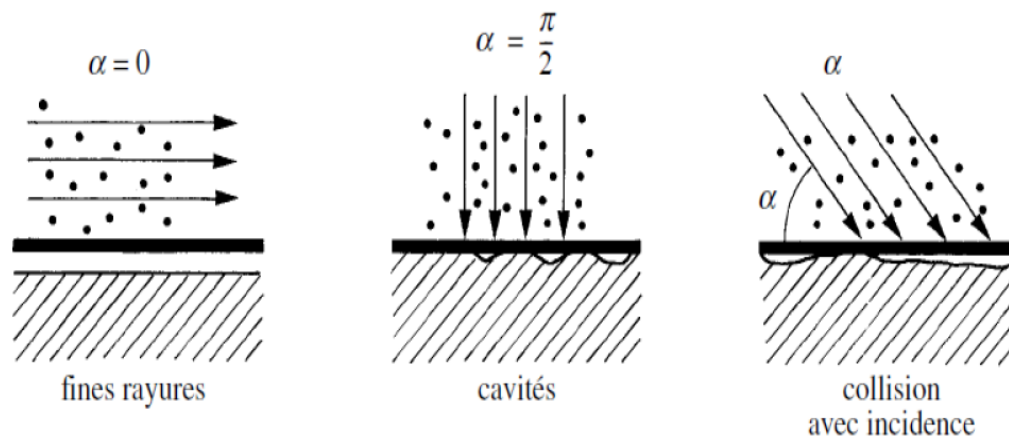


Figure III. 3 : Mécanismes de l'érosion d'une surface par des particules solides contenues dans un fluide en mouvement [7].

Le matériau déplacé peut être accommodé par déformation élastique par la formation de bourrelets de déformation plastique aux bords du cratère ou par extraction de débris. [1]

III. 4. 3.1. Paramètres influençant l'usure par érosion :

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. 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 maximale sous incidence normale avec des matériaux fragiles.

III. 4. 3. 2. Prévention :

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

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

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

III.4.4. Usure par corrosion :

La corrosion n'est pas directement liée aux mouvements des pièces, mais elle interagit avec le frottement. C'est l'enlèvement par frottement mécanique des produits de réaction formés par attaque chimique des surfaces métallique par des agents corrosifs contenus dans l'ambiance (gaz de combustion dans le cas des moteurs) ou formés dans le lubrifiant par altération : oxydation de l'huile de base hydrolyse des additifs anti-usure ou certains bases de synthèse, décomposition thermique, etc.

La tribocorrosion, ou dégradation des corps par frottement en milieu corrosif résulte de l'interaction des phénomènes mécaniques et corrosifs. [1]

Dans un premier stade les surfaces sont soumises à une attaque corrosive dont la vitesse peut présenter les allures de la figure III.4 :

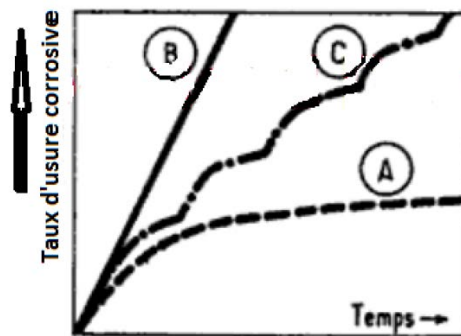


Figure III.4 : Relation d'usure corrosive-temps

La vitesse est initialement rapide puis diminue dans le temps avec la formation sur les surfaces d'un film cohérent plus ou moins protecteur formé selon les cas d'oxydes métalliques, de sels organique, de surfaces, phosphates, etc. (fig.III.4 A).

Quelquefois, l'attaque chimique garde indéfiniment une vitesse de réaction constante (fig.III.4 B), les produits de réaction étant alors soit des liquides ou des gaz, soit des solides poreux, fragiles ou non adhérents.

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

Dans la plupart des cas, les produits de corrosion sont plus durs et plus fragiles que les surfaces qui leurs ont donné naissance. Alors, le film formé résistera à l'usure tant qu'il sera de très faible épaisseur. Lorsqu'il atteindra une épaisseur critique, le processus d'arrachement par écaillage dû au frottement reprendra et ainsi de suite ; d'où le nom d'usure « à ruptures » donné à ce processus d'enlèvement de matière (Fig. III .4 C).

Les métaux ferreux produisent en abondance une poudre rouge ou brune d'oxyde de fer Fe_2O_3 , sous forme de particules plates et allongées. Toutefois, le phénomène ne concerne pas seulement les aciers, ni même les métaux, il se produit aussi avec certaines matières plastiques.

La corrosion de contact s'attaque particulièrement aux pièces de haute qualité : moteurs d'avions, clavetages et cannelures, manchonnages et emmanchements, roulements, mors de machines de fatigue, portées de culasse sur bâtis de moteurs ... On peut dire qu'il s'agit d'une usure « de luxe ». Elle touche aussi les lames de ressorts et les assemblages : têtes

de rivets, voisinage des points de soudure, liaisons boulonnées ... Le phénomène est commun, difficile à éviter, et il ne s'arrête jamais de lui-même.

III. 4. 4. 1. Paramètres influençant l'usure corrosive :

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

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

III. 4. 4. 2. Prévention :

La protection contre la corrosion se fait par réduction de la teneur en agent oxydant de la solution agressive. Aussi l'ajout d'additifs au milieu agressif peut réduire la perte de matière.

Il faut utiliser des matériaux appropriés au milieu, sans fissures et porosité en évitant des couples électrochimiques. Les additifs détergents avec réserve d'alcalinité sont intéressants, de même que les antioxydants et les anticorrosifs.

III. 4. 5. L'usure par fatigue :

L'usure par fatigue de surface se produit lorsqu'un matériau est soumis à des sollicitations cycliques. Sous l'effet des contraintes introduites dans les couches superficielles, des fissures se développent au sein du matériau, dans un plan parallèle à la surface. Lorsqu'elles atteignent une certaine taille critique, ces fissures donnent naissance à des particules d'usure. On parle également d'usure par délamination. [3]

L'usure par fatigue est lente et habituellement masquée par l'abrasion ou l'adhésion. Elle est induite par le frottement de roulement ou de roulement avec glissement sous fortes charges répétées, on la rencontre essentiellement dans les engrenages et les roulements dont elle constitue le mode normal de destruction.

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.

III. 4. 5. 1. 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 contraintes localisées.

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

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

III. 4. 5 .2. Fatigue thermique :

C'est une dégradation par alternance d'échauffements et de refroidissements, qui touche des pièces comme les cylindres de laminoirs, les matrices de forge, mais aussi les surfaces rectifiées dans de mauvaises conditions.

III. 4. 5. 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. 4. 5. 4. Prévention :

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

III. 4. 6. Usure des polymères :

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

Les mécanismes d'usure dominants sont l'adhésion, l'abrasion et la fatigue. Dans le cas de couples métal / polymère, pour une surface métallique lisse, l'usure des polymères s'effectue principalement par adhésion (polymères mous) ou par fatigue de surface (polymères durs). Concernant l'usure adhésive, elle se caractérise par un important transfert de matière du polymère sur le métal, suivi d'un état stationnaire durant lequel le coefficient de frottement reste stable et l'usure est faible. Pour les surfaces très rugueuses, l'usure du polymère s'effectue par abrasion

Lorsque la rugosité augmente, l'aire réelle de contact diminue et entraîne la diminution du coefficient de frottement et de l'usure. [3]

III. 5. Paramètres tribologiques :

III. 5. 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]

$$V = K. L. F_N \dots\dots\dots(2)$$

V : La perte de volume (g).

L : La distance de glissement (m).

F_N : L'effort normal (N).

K : Le taux d'usure $\text{mm}^3 / (\text{N.m})$.

Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de la 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.

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 KV 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.

III. 5. 2. Valeur du produit $P \cdot V$:

La pression de contact et la vitesse de glissement sont les deux paramètres clés 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 $P \cdot V$ sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de matériaux. La valeur $P \cdot V$ en $(\text{Mpa} \cdot \text{m/s})$ est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème / contact.

La valeur $P \cdot V$ multipliée par le coefficient de frottement, détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact.

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

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

Les domaines d'usure (douce ou sévère) des matériaux sont donc définis par des graphes dans le plan (p, v) (voir figure III. 6) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit (p, v) à prendre en considération :

- Les matériaux présentés dans la figure (III. 6) 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 $p \cdot v$ et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine.

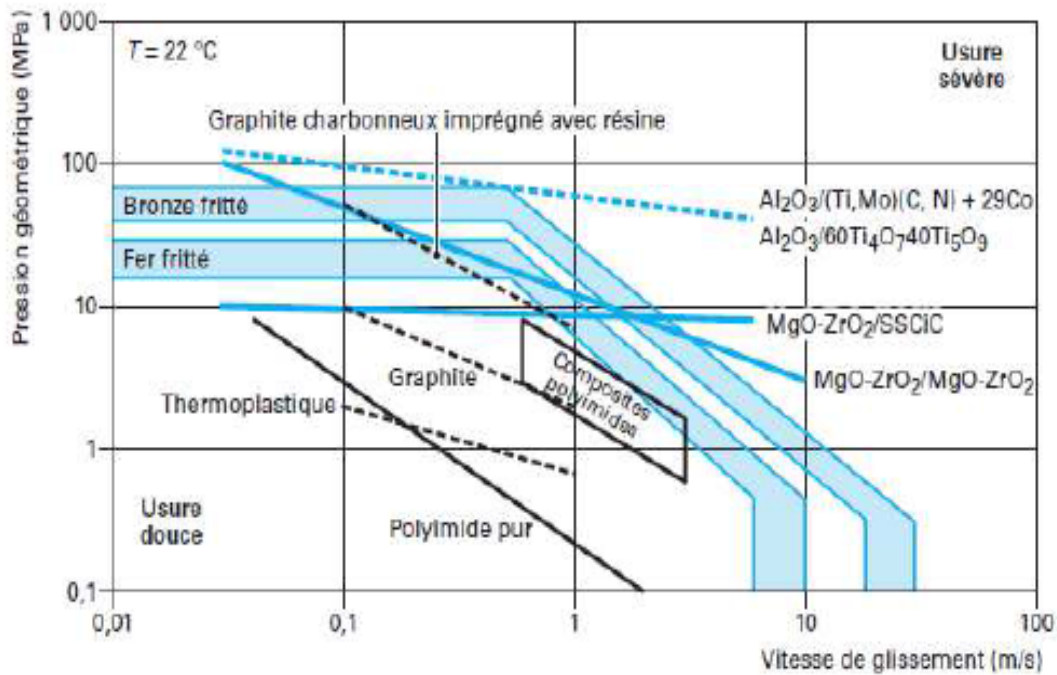


Figure III. 5 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour différents matériaux en frottement sec à température ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze frittés [13].

III. 5. 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 :

$$E_f = \mu \cdot F_N \cdot L \dots\dots\dots (3)$$

Avec μ coefficient de frottement de Coulomb.

Le produit $\mu \cdot F_N$ représente la force de frottement. La grande similitude entre la formule (2) (expression de l'usure) et la formule (3) (expression de l'énergie de frottement) est évidente ; elle a conduit Fleischer à introduire le paramètre ef de densité d'énergie de frottement apparente et à supposer que le volume d'usure est proportionnel à l'énergie de frottement par :

$$ef = E_f / V = \mu / K \dots\dots\dots (4)$$

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

III. 6. Conclusion :

En conclusion, le phénomène d'usure des pièces mécaniques en contact dépend de plusieurs paramètres comme la charge, la vitesse de glissement, l'état des surfaces en contact, la répartition des pressions, le milieu environnant, ...

Pour limiter le nombre de défaillances et s'assurer de leur éradication, on fait appel à plusieurs études sur le comportement thermique, thermomécanique, vibratoire ou tribologique.

Chapitre IV

Lubrification

IV. 1. Introduction :

Les problèmes de frottement préoccupait l'humanité dès ses débuts, par exemple dans les tombes égyptiennes, les paliers des roues de chariot contenaient déjà une graisse animale lubrifiante et un bas-relief illustrant le transport d'un colosse égyptien, qui montre un homme versant un liquide dans le sillon du traîneau.

On peut dire que l'invention de la roue a été le premier pas vers la lubrification qui consiste à réduire le frottement et l'usure des surfaces en contact en introduisant un film entre les surfaces en contact glissant.

Les lubrifiants sont utilisés afin d'accroître la durée de vie des pièces frottantes et celles des mécanismes et réduire les coûts de maintenance.

IV. 2. Définition :

Un lubrifiant est un film de séparation de faible résistance au cisaillement agissant aux interfaces de deux surfaces en contact glissant et utilisé pour accomplir différents rôles. Sa fonction est de réduire le frottement et l'usure et de prévenir la défaillance des composants. [1]

Il est également utilisé pour :

- Refroidir les surfaces de frottement par la réduction de la chaleur générée par friction et de la convection dans la matière ;
- Enlever les débris générés par le processus d'usure ;
- Protéger les surfaces de l'eau en réduisant la corrosion ;
- Neutraliser et protéger les surfaces métalliques des produits de combustion acides dans les moteurs.

IV. 3. Types de lubrifiants :

A / Lubrifiants solides :

Utilisés pour la lubrification sous conditions extrêmes (friction sévères)

B / Lubrifiants liquides :

Désignant des matières grasses qui sont à l'état liquide à température ambiante et qui ne se mélangent pas à l'eau.

C / Graisses :

Une graisse est un produit pâteux plus ou moins consistant utilisé comme lubrifiant. Les graisses forment une pellicule qui diminue le frottement et favorise le glissement.

IV. 4. Types de lubrifiants solides :

Les matériaux anti-frottement sont utilisés dans le cas où les huiles et les graisses ne sont pas adaptées. Ils doivent répondre à une triple exigence :

- être mous et se cisailer facilement ;
- être parfaitement adhérents à la surface des matériaux à protéger ;
- être stable et ne pas subir de modifications chimiques ou structurales lors leur mise en œuvre.

Sous l'appellation de lubrifiants solides se trouvent regroupés plusieurs types de produits :

IV. 4. 1. Les métaux mous :

Ce sont généralement le plomb, étain, or, argent, cuivre, indium. Depuis très longtemps ils sont utilisés en horlogerie, mais récemment leur usage s'est étendu aux industries aéronautiques, électrotechnique, ...

Ces métaux déposés sur les surfaces à protéger et permettent de réduire le coefficient de frottement, l'usure des pièces et les risques de grippage même sur de larges plages de températures. [1]

IV. 4. 2. Les polymères :

On trouve le polyéthylène PE, polyamide PA, et le PTFE (polytétrafluoréthylène) qui possèdent de bonnes propriétés de frottement. Ils sont utilisés pour la fabrication de pièces qui n'auront pas besoin d'être lubrifiées.

Les avantages de l'utilisation des polymères comme lubrifiants solides sont présentés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lubrification à vie, propre ▪ Protection contre la corrosion ▪ Protection contre les agressions chimiques 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas de dissipation thermique, risque d'échauffement ▪ Déformation sous charge ▪ Sensibles aux radiations

Tableau IV. 1 : Avantages et inconvénients de l'utilisation de films lubrifiants polymères

IV. 4. 3. Les lubrifiants solides minéraux sans structure lamellaire :

Ces composés ne permettent pas d'obtenir un très faible coefficient de frottement, mais leur stabilité thermique permet leur utilisation dans le cas de frottement à chaud (moteur, réacteur,...). Ils réduisent le frottement en limitant les dégradations des matériaux en contact. [1]

IV. 4. 4. Les lubrifiants solides à structures lamellaires :

Les plus utilisés sont le graphite et le bisulfure de molybdène (MoS_2). Ces deux matériaux se caractérisent par une structure en feuillets dite lamellaire. Ils sont constitués d'un empilement de plans atomiques liés entre eux par de faibles liaisons. Au cours du frottement, lorsque le cisaillement s'opère parallèlement à ces plans, ces derniers glissent les uns sur les autres, en facilitant le déplacement relatif des solides en contact en jouant le rôle d'un lubrifiant. [3]

IV. 4. 5. Mélange de lubrifiants solides :

Différents lubrifiants solides peuvent être mélangés afin d'obtenir un cumul de propriétés. On peut par exemple mélanger une résine polymère avec des composés à structure lamellaire (graphite). Ces lubrifiants sont facile à utiliser et de faible coût. [1]

IV. 5. Lubrifiants solides avec additifs :

Ils sont utilisés comme revêtement, ou comme additifs dans les matériaux composites destinés à des applications tribologiques. Ces deux matériaux sont sensibles à l'environnement, car en atmosphère sèche, le graphite perd ses propriétés lubrifiantes, alors qu'en présence d'humidité la couche d'eau adsorbée lui confère d'excellentes propriétés de lubrification, contrairement au bisulfure de molybdène, le frottement et l'usure augmentent avec le taux d'humidité.

Les performances tribologiques du graphite et du bisulfure de molybdène peuvent être améliorées par l'ajout d'additifs comme le PTFE, ce qui confère au composé une meilleure tenue en atmosphère humide.

Ainsi les qualités du graphite peuvent être améliorées par l'addition de fluor en formant un composé $(CF_x)_n$, le fluor a pour effet de réduire sensiblement les liaisons entre plans atomiques et de diminuer la résistance au cisaillement, afin de réduire le coefficient de frottement. [3]

IV. 6. Conclusion :

La lubrification est très importante dans la maintenance industrielle, elle permet d'avoir un bon fonctionnement de machines. Néanmoins, dans la majorité des entreprises la mise en place d'une gestion efficace de lubrification est négligée.

Le développement de nouveaux lubrifiants requiert une connaissance du rôle que joue la tribologie dans l'amélioration des performances des éléments de machine, en contribuant à la longévité des organes tout en minimisant l'énergie.

Chapitre V

Partie expérimentale

V.1. Introduction :

Pour limiter le nombre de défaillance des pièces et assurer la longévité des mécanismes, on fait appel à plusieurs études, notamment la tribologie.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de l'ajout de lubrifiant solide tel que la poudre de graphite sur les propriétés tribologiques et mécaniques d'un polymère Epoxy à base de bisphénol A.

Le banc d'essais utilisé pour les expériences (Figure V.1) a été conçu et réalisé par nos camarades de la promotion 2012/2013 à l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, dans le cadre de leur projet de fin d'études, en utilisant la méthode de l'analyse de la valeur.

L'étude expérimentale est réalisée en deux étapes :

La première étape consiste à effectuer des essais de traction en vue de déterminer l'effet de l'ajout de la poudre de graphite au polymère Epoxy bisphénol A sur ses propriétés mécaniques (contrainte de rupture, déformation à rupture et le module de Young).

La deuxième étape consiste en la réalisation d'essais de frottement pour déterminer l'évolution des propriétés tribologiques du polymère (coefficient de frottement) en fonction du pourcentage de graphite sous différentes vitesses de glissement et chargements.

Les résultats expérimentaux de ces deux parties, nous permettrons de déterminer la composition qui offre le meilleur compromis entre ces deux propriétés.

Dans ce chapitre, nous présenterons les matériaux de l'étude et la procédure d'élaboration des éprouvettes de traction, des pions et des disques ainsi que les moyens expérimentaux (tribomètre, chaîne d'acquisition, capteur, variateur électronique de vitesse, machine de traction universelle...).

Les résultats obtenus seront traités et présentés à la fin de ce chapitre.

V.2. Procédure expérimentale :

V. 2. 1. Dispositif expérimental :

Afin d'étudier les propriétés tribologiques du couple acier (XC48 trempé et revenu/ Epoxy chargé ou non de poudre de graphite), les essais tribologiques ont été effectués sur un tribomètre (pion sur disque) vertical, qui permet la détermination du coefficient de frottement et du taux d'usure des couples de matériaux. L'acquisition des résultats est faite à l'aide du logiciel LABVIEW.

V. 2. 2. Nomenclature du banc :

1-Bâti, 2- Plaque coulissante, 3- axes, 4- bague de guidage, 5- Porte capteur, 6-Capteur de force, 7- Disque, 8- masse morte, 9- liaison glissière, 10 - moteur électrique, 11 -Poulie, 12- volant, 13- Poignée.

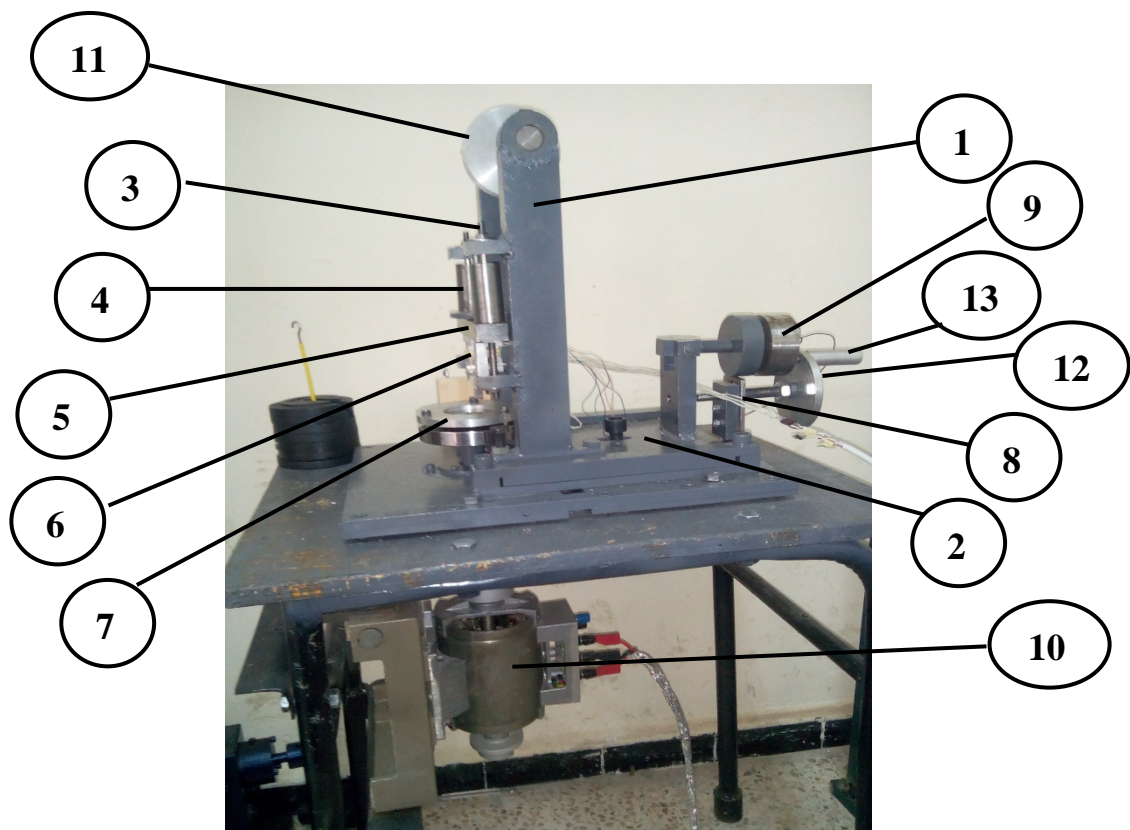


Figure V.1 : Vue du tribomètre pion/disque vertical.

V.2.3. Principe de fonctionnement :

Son principe consiste à appliquer une charge verticale sur un pion immobile en contact avec la face plane d'un disque en rotation. Lors de l'essai de frottement un capteur à jauges de contrainte enregistre les valeurs de l'effort tangentiel et de l'effort normal grâce aux déformations des jauges. Ce tribomètre permet la variation de la vitesse linéaire en changeant le rayon de la piste de glissement du pion sur le disque grâce à la liaison glissière d'une plaque coulissante avec le bâti. Le dispositif est muni d'un système de compensation avec des masses mortes qui assure la mise à zéro du système de mesure en tenant compte du poids du mécanisme de chargement. Il dispose d'un moteur électrique d'une puissance de 220W tournant à 1400 tr/min qui entraîne la broche porte disque (figure V.1). L'effort tangentiel F_T induit par le contact (pion/disque) et l'effort normal F_N , sont mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (6), qui est relié à une chaîne d'acquisition qui enregistre les données.

V. 3. Le capteur de force :

Pour mesurer les forces normale et tangentielle due aux frottements, simultanément et sans interférence, le tribomètre figure V.1 utilise un capteur à jauges de déformation inspiré d'une conception américaine de capteur de mesure des efforts d'un outil de coupe. Le capteur Figure (V.2), placé au-dessus du porte pion permet de mesurer l'effort normal appliqué et l'effort tangentiel engendré, au moyen de deux ponts complets, l'un pour l'effort normal et l'autre pour l'effort tangentiel.

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.

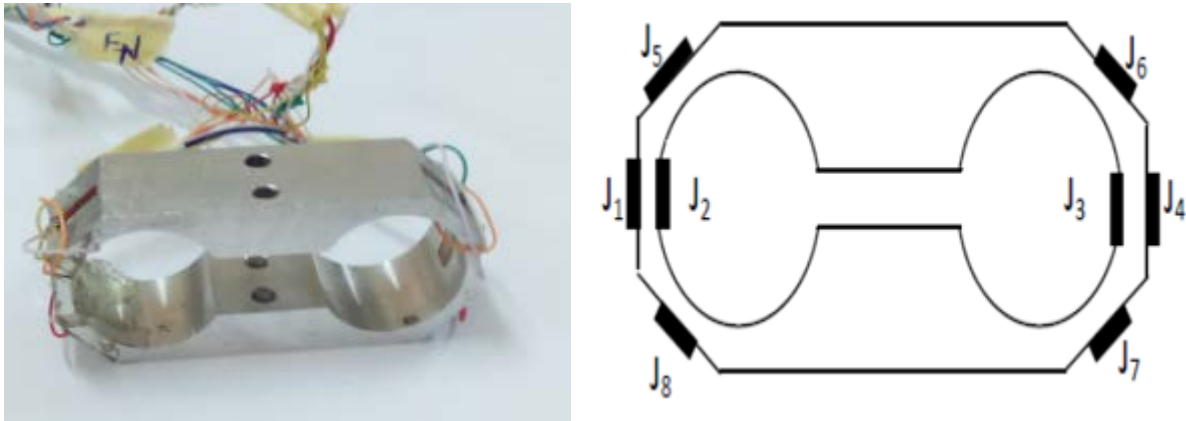


Figure V.2 : Le capteur et les zones d'emplacement des jauges.

V. 3. 1. Etalonnage du capteur :

Le signal de sortie du capteur de force (Tension exprimée en millivolts) est amplifié jusqu'à 2000X (volt) et filtré à l'aide de la chaîne d'acquisition pour réduire les bruits parasites. Par la suite, le signal analogique est converti en valeurs numériques par le CAN (convertisseur analogique numérique) Arduino. Une fois que les résultats sont obtenus, nous procédons à l'opération d'étalonnage qui consiste à faire correspondre à chaque chargement effectué une valeur numérique.

Les résultats sont reproduits sur une courbe qui représente le signal de sortie (valeurs numériques) en fonction de la charge appliquée ($U=f(N)$), où la tangente de la droite correspond au facteur d'étalonnage.

Enfin, le signal de sortie est récupéré par l'ordinateur dans le but d'analyser et traiter les résultats grâce au logiciel LABVIEW. Le cheminement du signal de sortie depuis sa sortie du capteur jusqu'à l'ordinateur est donné par la figure V.3.

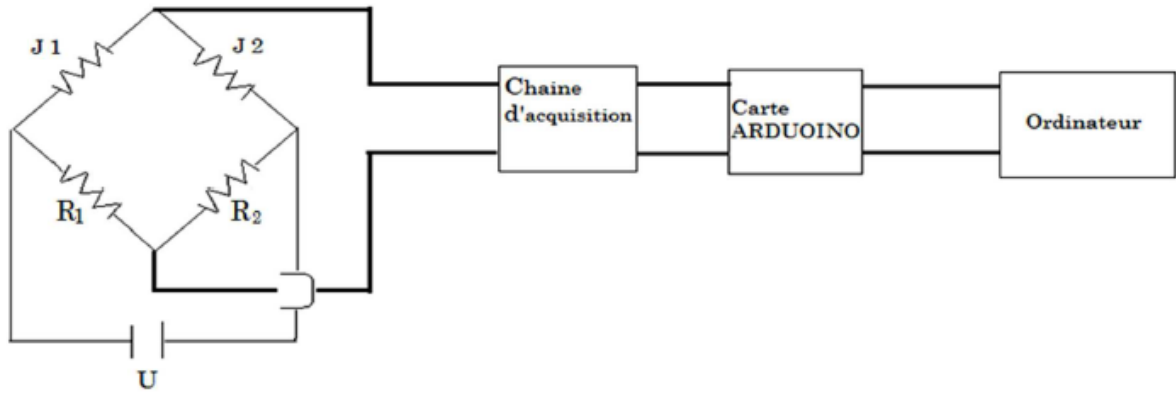


Figure V.3 : Cheminement du signal de sortie.

V. 3. 1. 1. Etalonnage de l'effort tangentiel :

Le capteur est placé en dehors du banc d'essais de façon qu'on puisse étalonner l'effort tangentiel en mettant plusieurs chargements tout en observant la variation de la tension de sortie du capteur de force. A l'aide du tableur Excel, on trace une droite d'étalonnage montrée dans la figure V. 5.



Figure V. 4 : Etalonnage de l'effort tangentiel.

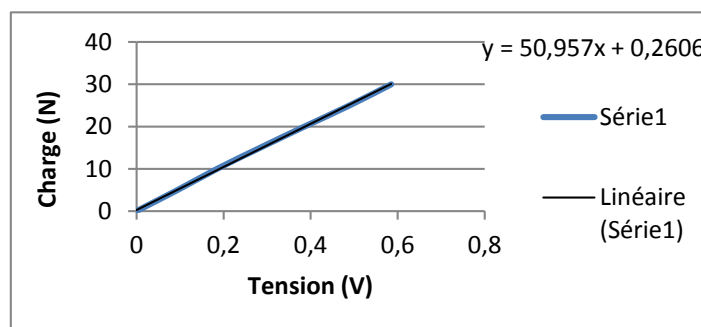


Figure V. 5 : Droite d'étalonnage de l'effort tangentiel.

V. 3. 1. 2. Etalonnage de l'effort normal :

L'étalonnage de l'effort normal se fait de la même façon que l'effort tangentiel en appliquant plusieurs chargements tout en mesurant la tension de sortie.

Après étalonnage du capteur, la chaîne d'acquisition est connectée à l'ordinateur pour pouvoir enregistrer et traiter les données.

V. 4. Chaîne d'acquisition :

Le système d'acquisition est le système d'enregistrement et de traitement du signal depuis sa sortie du capteur de force jusqu'à sa représentation sur un ordinateur figure V.6.

Pour relever les données de forces mesurées au cours de l'essai de frottement, nous avons utilisé une chaîne d'acquisition de fabrication « vischay micromesure 12 voies », qui est constituée de dix entrées analogiques et dix sorties. Le conditionnement de nos capteurs permet la remise à zéro, l'équilibrage des ponts, l'amplification et le gain du signal d'entrée.

Cette acquisition permet d'enregistrer les valeurs dans l'ordinateur, en se servant du logiciel LABVIEW qui nous donne l'effort normal et tangentiel, ainsi que le rapport entre les deux qui est égal au coefficient de frottement.

La chaîne d'acquisition numérique est représentée dans la figure V.6 :

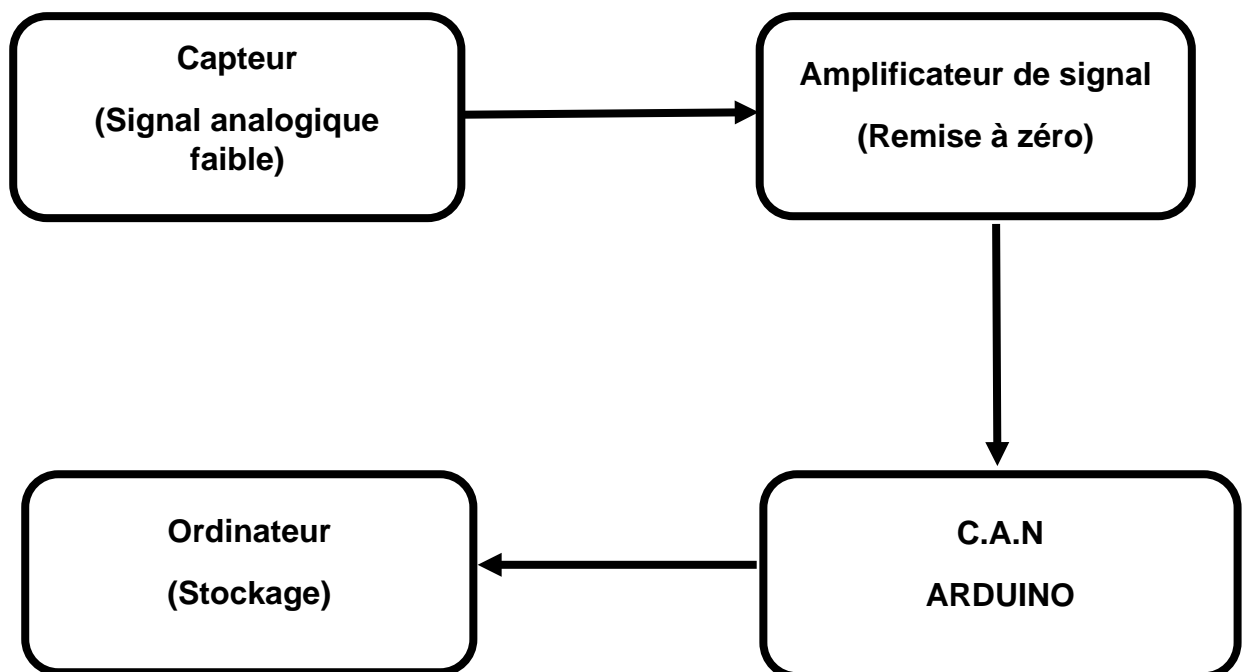




Figure V. 6 : Chaine d'acquisition VISHAY MICROMESURE

V. 5. Convertisseur analogique-numérique :

Un convertisseur analogique – numérique (CAN) est un dispositif électronique permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique.

Les convertisseurs se présentent généralement sous forme de carte. Il existe plusieurs sortes de convertisseurs de différentes marques. Celui que nous avons utilisé pour traiter et analyser nos résultats est la carte « ARDUINO ».

L'Arduino est une famille de cartes électroniques à microcontrôleur open-source née en Italie en 2005. C'est un circuit imprimé comportant tous les composants électroniques nécessaires pour faire fonctionner un microcontrôleur, il est associé à une interface USB lui permettant de communiquer avec un ordinateur. Voir figure : V.7.

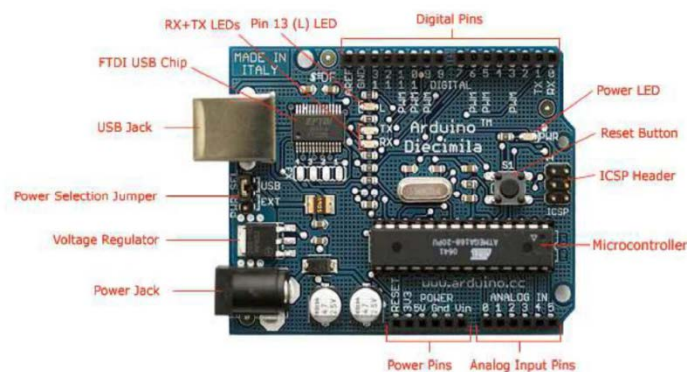


Figure V. 7 : La carte ARDUINO.

V. 6. Logiciel LABVIEW :

Le logiciel LABVIEW est le cœur d'une plate-forme de conception de systèmes de mesure et de contrôle. Créé à l'origine sur *Apple Macintosh* en 1986, LABVIEW est utilisé principalement pour la mesure par *acquisition de données*, pour le contrôle d'instruments et pour l'automatisme industriel.

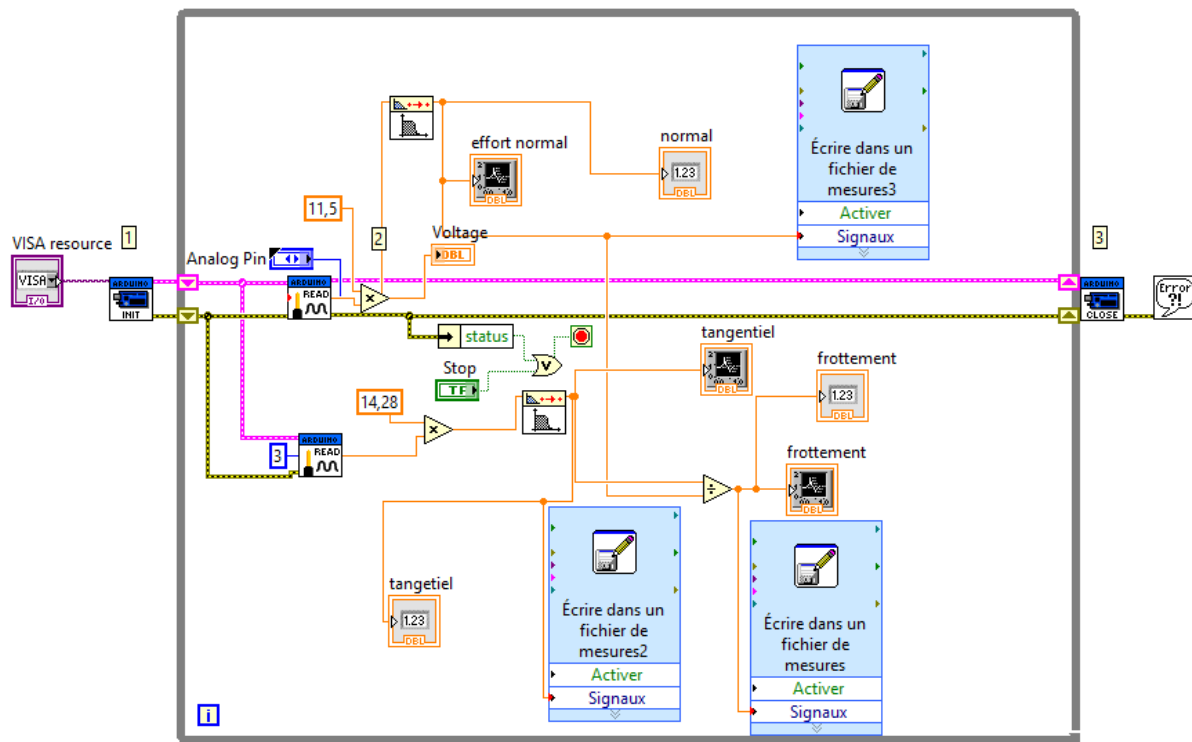


Figure V. 8 : Programme Labview pour l'acquisition des données.

V. 7. Variateur de vitesses :

Le variateur de vitesse Altivar 31 de puissance 7,5Kw pour les moteurs asynchrones est utilisé pour résoudre le problème de grippage lors des essais à des vitesses de rotation importantes, ce variateur nous permet de jouer sur la vitesse de rotation du moteur.

Lorsque le variateur est en marche, la valeur affichée correspond à la valeur de l'un des paramètres de surveillance. Par défaut, la valeur affichée est la fréquence de sortie appliquée au moteur.

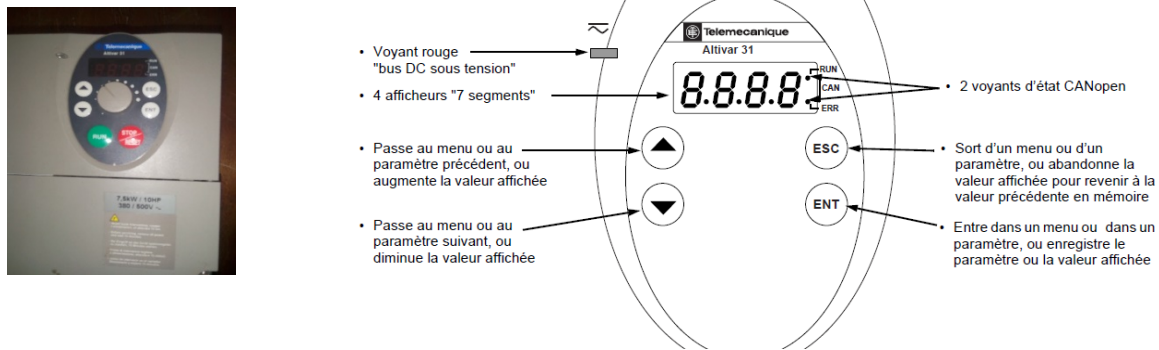


Figure V.9 : Variateur de vitesse.

V. 8. Présentation des matériaux utilisés :

V. 8. 1. Matériau des disques :

Nous avons utilisé l'acier XC48 qui est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique, défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone), du manganèse, du silicium, du soufre et du phosphore, (Norme NFA356554).

Il est largement utilisé dans la fabrication des bielles, essieux, tiges de piston, vilebrequins, arbres moyeux, galets des ponts roulants, ...etc. Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques.

V. 8. 2. Matériau des pions et éprouvettes de traction :

Le matériau de base utilisé est la résine époxy LORN CHEMICAL. Une résine époxy à base de bisphénol A et un durcisseur apportant au système une très haute adhérence. Les fractions massiques sont de 66,6% pour la résine de masse volumique $1,17 \text{ g/cm}^3$ et 33,3% de durcisseur de masse volumique $1,05 \text{ g/cm}^3$.

La réaction de durcissement (polymérisation), dépend de la réactivité de la résine, la forme voulue, la nature et le dosage du système catalytique.

V. 8. 2. 1. Résines époxydes :

Ces résines sont la plupart du temps employées avec un agent de réticulation appelé **durcisseur**. Parfois, on adjoint au durcisseur un **accélérateur** qui est chargé de faire démarrer la réaction et parfois aussi, on ajoute des adjuvants supplémentaires dont les plus importants sont les **charges**.

Dans la plupart des cas, les résines époxydes réticulent avec un durcisseur pour former un réseau tridimensionnel, qui est stable et infusible. Le choix du durcisseur est encore plus important, parfois deux durcisseurs ont sensiblement le même comportement à une même température, mais il peut se trouver que l'un d'eux par la meilleure fluidité qu'il confère au mélange, permette une mise en œuvre à température plus basse que l'autre. [14]

Ces systèmes constituent des matières thermodurcissables qui rentrent dans nombreux domaines d'applications tels que l'industrie aéronautique, automobile, électrique, outillages, sport, stratifiés et composites, revêtements de surfaces réparation de fissures...

De plus leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques peuvent être ajustées par l'adjonction de charges, comme dans notre cas c'est le **graphite** pesé à l'aide d'une balance électronique représenté dans la figure suivante.



Figure V. 10 : Balance électronique.

V. 9. Présentation des couples tribologiques :

V. 9. 1. Les disques :

Le disque est un plateau de forme cylindrique de diamètre 60mm et d'une épaisseur de 10mm, il possède un trou au centre de diamètre 10mm qui permet la fixation du disque au bout d'arbre de la broche du tribomètre.

Nous avons rencontré une difficulté d'en trouver la matière voulue (acier XC48), alors comme solution on a utilisé d'anciens disques de dureté importante de l'ordre de 500 HV environ, mais le problème est qu'ils étaient avec un trou de perçage de 8mm alors que nous avons besoin d'un trou de 10mm.

A cause de la dureté on n'a pas pu augmenter le trou de perçage, pour y remédier, on a opté à un traitement thermique des disques afin de pouvoir les percer.

V. 9. 2. Les pions :

Les pions (Figure V.11) sont obtenus à partir d'une découpe des plaques en époxyde (chargé ou non d'une poudre de graphite). Les plaques sont obtenus par moulage dans des moules en plexyglace. Nous avons préparé quatre mélanges (résine + durcisseur) avec 0%, 1%, 2% et 3% de graphite.

Les mélanges sont ensuite homogénéisés et versés dans les moules que nous avons préalablement préparés (figure V.12). On obtient des plaques de mêmes dimensions (100x100x6), comme le montre la figure V.13.

La polymérisation est faite à l'air libre pendant deux jours. Après polymérisation, nous avons démoulé les plaques et découpé en pions parallélépipédiques de section carrée 6x6 mm² à l'aide d'une scie à métaux et d'un étau. Voir figure V.14.



Figure V. 11 : Pions.



Figure V. 12 : Epoxy versé.



Figure V.13 : Plaques d'époxy



Figure V.14 : Plaque sur l'étau

La préparation des pions se termine par un polissage qui va nous permettre d'obtenir les dimensions souhaités et un bon état de surface.

V. 10. Traitement thermique des disques :

Le traitement thermique a été réalisé au laboratoire de sciences des matériaux du département de génie mécanique, afin de pouvoir percer les disques (recuit), ensuite une trempe et un revenu pour augmenter la dureté.

V. 10. 1. Etapes du traitement thermique :

A / Recuit :

Son principe est d'amener le métal au maximum de ses caractéristiques de ductilité, alors revenir à la dureté initiale. La structure obtenue (perlite et ferrite) présente une meilleure usinabilité. [15]

Procédé :

Le procédé consiste en un chauffage au-dessus de la température d'austénisation à 850°C suivi d'un maintien en température pendant 30 minutes, pour homogénéiser la structure, puis d'un refroidissement dans un four de traitement thermique.

C'est un recuit complet qui facilite l'usinage et la déformation à froid, en faisant disparaître les constituants les plus durs. [15]

B / Trempe :

Lorsque la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide, les atomes de carbone n'ont plus le temps de diffuser et les transformations n'ont plus le temps de se réaliser.

L'austénite n'a plus le temps de perdre son carbone et ne peut se transformer ni en ferrite ni en perlite, La solution obtenue, sursaturée en carbone est appelée martensite, elle est très dure et très fragile. [15]

Procédé :

On chauffe la pièce jusqu'à atteindre la température d'austénisation 850°C suivi d'un maintien en température pendant une heure, puis on refroidit rapidement à l'eau. Si la vitesse de refroidissement est suffisamment rapide, toute l'austénite se transforme en martensite.

C / Revenu :

Après trempe, la martensite, très dure et très fragile et pratiquement inutilisable en l'état. Afin de corriger l'effet de fragilisation, tout en conservant un bon ensemble de caractéristiques (R_r , R_e , dureté), on pratique un revenu. [15]

Procédé :

Il s'applique aux pièces trempées et consiste en un chauffage à 200°C pendant deux heures de maintien, puis un refroidissement lent à l'air libre. Le traitement permet d'amener les caractéristiques mécaniques au niveau souhaité.

V. 11. Polissage des disques :

Cette technique de polissage utilise l'action mécanique de l'abrasion. Le frottement des grains du matériau plus dur permet d'enlever les grains moins durs. Il est nécessaire d'utiliser un fluide qui sert de lubrifiant.



Figure V. 15 : Polisseuse à disques

V. 12. Rugosité des surfaces 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.16) qui est un rugosimètre à palpeur,

qui sert à déterminer rapidement la rugosité des surfaces. Le rugosimètre mesure la profondeur de la rugosité moyenne Rz et la valeur de l'écart arithmétique moyen Ra en μm . Ce rugosimètre, d'utilisation facile, permet un contrôle rapide des surfaces. Il entre en contact avec la surface en quelques secondes et mesure directement Ra ou Rz.



Figure V.16 : Rugosimètre à palpeur.

V. 13. Les essais de traction :

V. 13. 1. Introduction :

Le graphite qui est considéré comme lubrifiant solide ne nous permet pas d'avancer que son ajout aux polymères peut contribuer à la baisse du coefficient de frottement. De plus, l'évolution des propriétés mécaniques de ce composite nous est inconnue.

Nous proposons dans cette partie d'étudier l'effet de l'ajout de la poudre de graphite aux polymères époxy au travers de l'essai de traction.

V. 13. 2. Essai de traction :

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental et le plus utilisé pour la caractérisation mécanique des matériaux.

Etant purement uni-axial, il permet de déterminer les principales caractéristiques telles que le module d'élasticité, le coefficient de poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction.

Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces mécaniques.

V. 13. 3. Description de la machine de traction :

Les essais de traction sont réalisés sur la machine IBERTEST de capacité 100KN située au niveau du laboratoire de Résistance des Matériaux du département de Génie Mécanique à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. C'est une machine automatique à commande hydraulique connecté à un ordinateur muni d'un logiciel d'acquisition et de traitement des données Wintest où nous enregistrons les dimensions de l'éprouvette à tester et nous choisissons la vitesse de l'essai. La force maximale de la machine est de 10 tonnes et sa vitesse maximale peut atteindre 10 mm/min.

Une éprouvette de géométrie parfaitement définie est encastrée à ses deux extrémités aux mors de la machines. L'un de ces mors fixe est relié pour la mesure de l'effort à un système dynamométrique par une rotule ; l'autre mors mobile est relié à un système d'entraînement à vitesse de déplacement constante $V = 2 \text{ mm / min}$.



Figure V. 17 : Mors de la machine de traction.

La courbe obtenue après l'essai est la contrainte (MPa) en fonction de la course (%L). Mais nous avons tracé les courbe contrainte / déformation à l'aide du tableur Excel.

V. 13. 4. Géométrie des éprouvettes :

Les éprouvettes de formes parallélépipédique de longueur 100mm, largeur $b=10\text{mm}$ et épaisseur $e=4\text{mm}$.

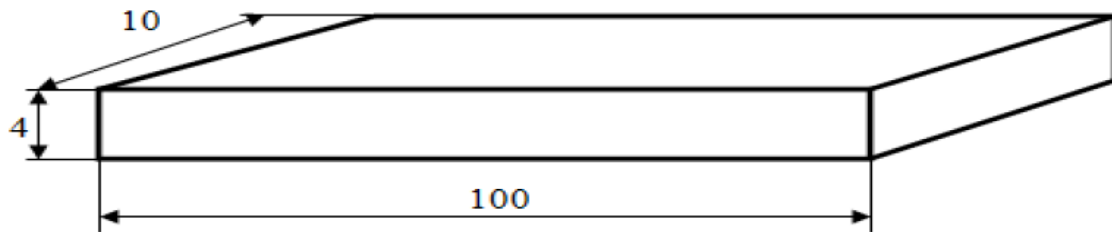


Figure V.18 : Géométrie des éprouvettes de traction.

V. 13. 5. Résultats des essais de traction :

Pour une représentation plus cohérente des résultats des essais nous avons utilisé les formules de passage suivantes :

$$\sigma = F / S$$

$$S = b \cdot e$$

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

σ : la contrainte normale (MPa).

F : la force appliquée (N).

S : la section de l'éprouvette (mm^2).

ε : la déformation.

b : largeur de l'éprouvette.

e : épaisseur de l'éprouvette.

Les figures suivantes montrent la variation de la contrainte en fonction de la déformation pour des différents pourcentages de graphite.

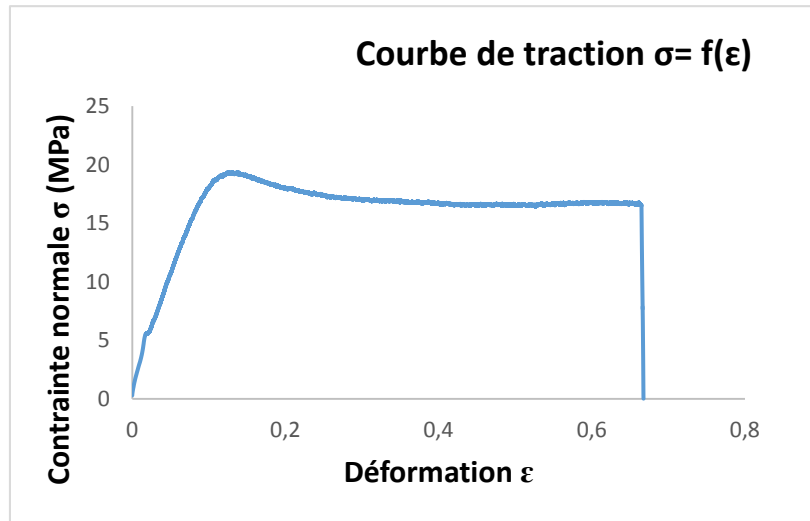


Figure V. 19 : Evolution contrainte / déformation de l'époxy vierge à 0% graphite.

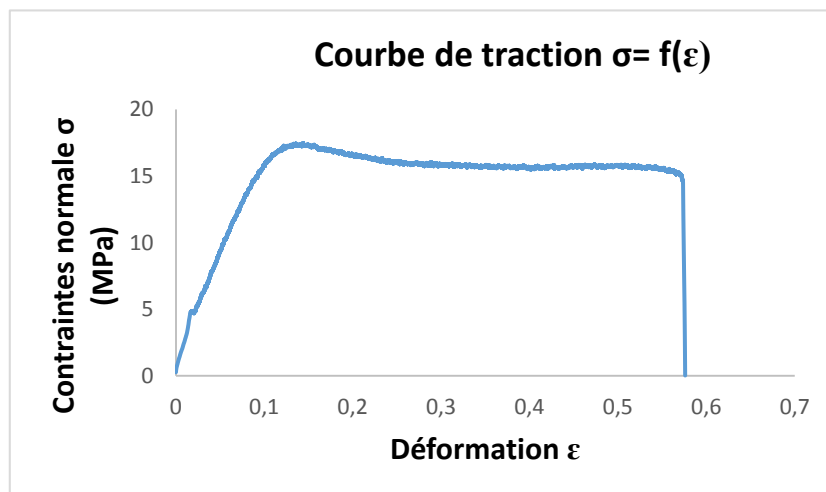


Figure V. 20 : Evolution contrainte / déformation de l'époxy à 1% de graphite.

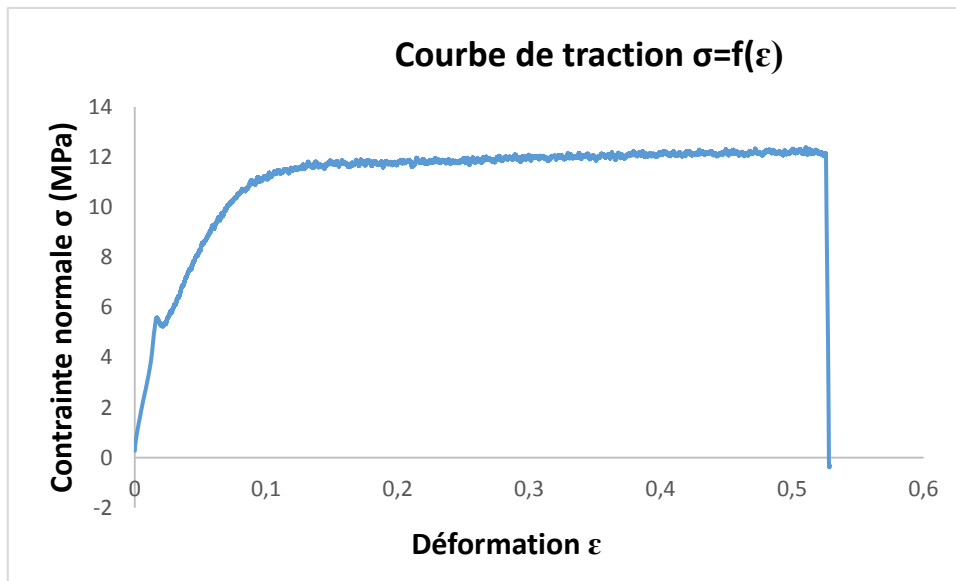


Figure V. 21 : Evolution contrainte / déformation de l'époxy à 2% de graphite.

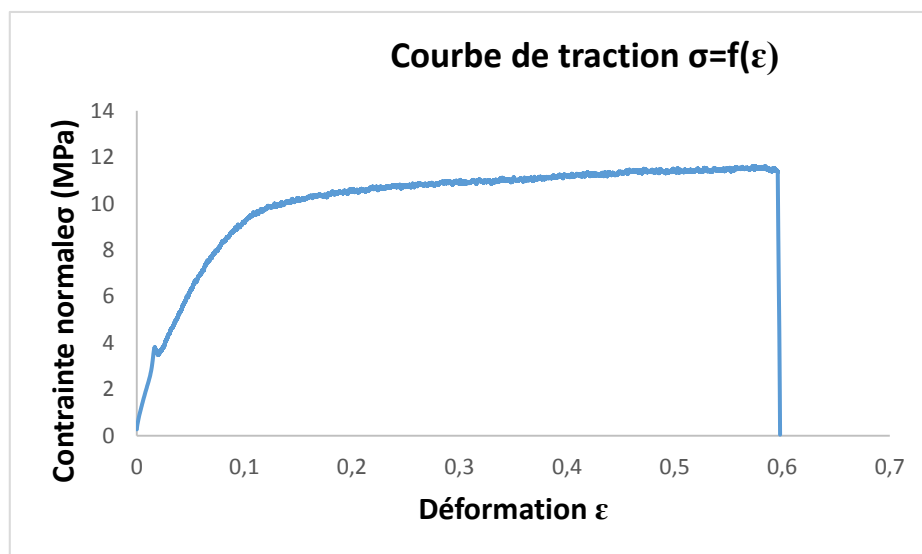


Figure V.22 : Evolution contrainte/ déformation de l'époxy à 3% de graphite.

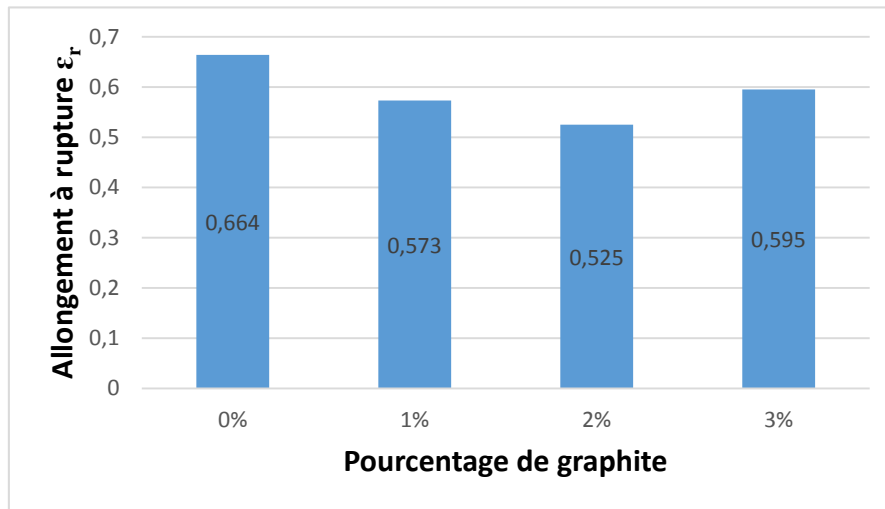


Figure V.23 : Influence de l'ajout du graphite sur l'allongement à la rupture.

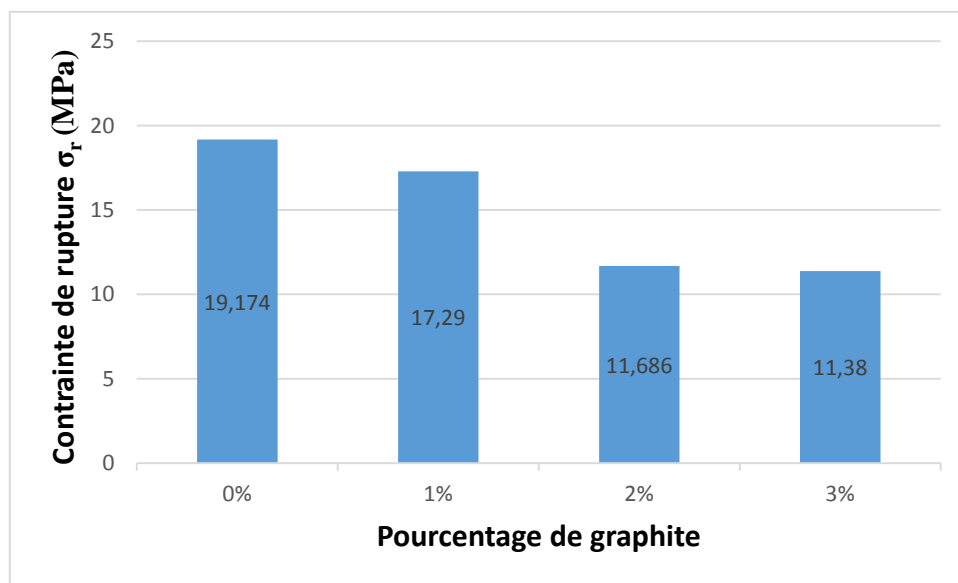


Figure V.24 : Influence de l'ajout du graphite sur la contrainte de rupture.

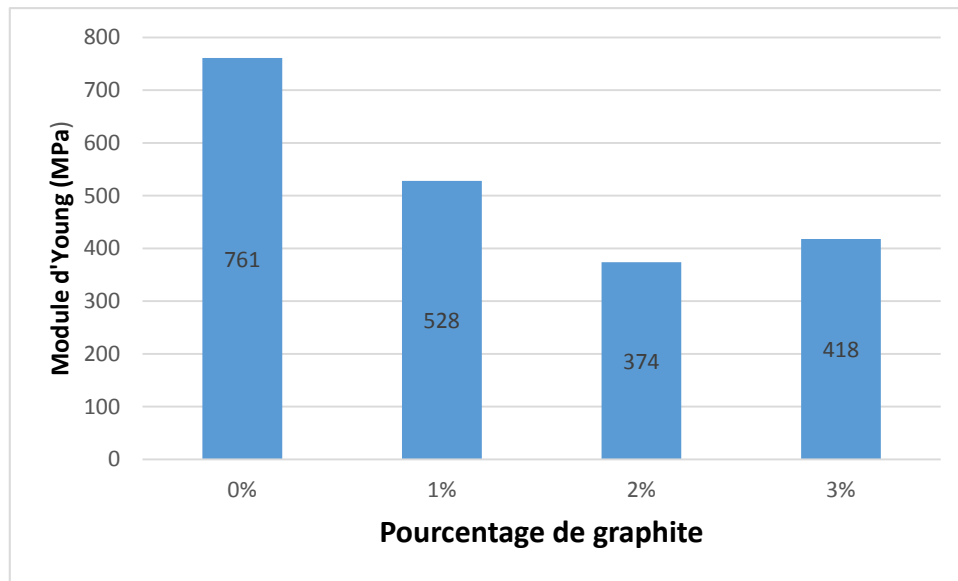


Figure V.25 : Influence de l'ajout du graphite sur le module d'Young.

V. 13.6. Interprétation des résultats :

Nous avons réalisé des essais de traction, afin de déterminer les propriétés mécaniques de quatre matériaux : époxy vierge à 0%G, époxy chargé avec 1%G, 2%G et 3%G.

Sur les figures V.19 à V.25, nous observons que les matériaux testés à différents pourcentages de graphite ne présentent pas le même comportement alors que celles des éprouvettes du même pourcentage présentent un comportement similaire, ceci est dû principalement à l'existence de défauts générés par la mauvaise agitation et le milieu ambiant qui influence considérablement la résistance à la rupture. Cette dernière est plus importante pour le lot d'éprouvettes d'Epoxy à 0%G, elle diminue avec l'accroissement du pourcentage de graphite dans l'Epoxy.

Les résultats montrent une diminution des propriétés mécaniques (module d'Young, contrainte de rupture, allongement à la rupture).

V. 13. 7. Conclusion :

L'ajout de certaines charges comme la poudre de graphite à l'Epoxy donne des propriétés mécaniques telles que la résistance à la rupture, la déformation à rupture et le module d'Young inférieures par rapport à l'Epoxy vierge, cela est dû principalement à la structure des particules de graphite et leur tendance à l'agglomération.

Nous considérons que c'est des résultats qui nécessitent une confirmation par de nouvelles expériences, le temps qui nous ait impartis étant court, nous n'avons pas pu refaire ces expériences pour infirmer ou confirmer l'allure des histogrammes de variation des paramètres cités précédemment en fonction du coefficient de frottement.

Nous pensons que ce premier jet de résultats expérimentaux est concluant malgré quelques dispersions, mais cela nous encourage beaucoup plus à poursuivre plus en profondeur cette étude.

V. 14. Essais d'usure :

V.14.1. Introduction :

Dans cette partie du travail, nous présentons les résultats des essais d'usure et les discussions de ces résultats. Les essais ont été réalisés sans lubrification et dans des conditions de température ambiante et de pression atmosphérique sensiblement identiques.

Pour les besoins de notre étude, nous avons préparé des disques en acier XC48 traité qui représentent le matériau antagoniste et les pions en résine époxy chargée ou non de poudre de graphite avec différents pourcentages. Les compositions du matériau frotteur (Pions) sont les suivantes :

1. Résine époxy vierge EP 0%G ;
2. Résine chargée d'1% de graphite EP 1%G ;
3. Résine chargée d'2% de graphite EP 2%G ;
4. Résine chargée d'3% de graphite EP 3%G.

Nous avons effectué les essais à deux vitesses linéaires de glissement (0,4 m/s et 0,6 m/s) sous deux chargements (20N et 30N) pendant une période de 1200 secondes. Pour une meilleure précision des résultats, chaque essai est répété deux fois. Pas moins de vingt disques et trente pions ont été nécessaires pour mener à terme nos expériences.

➤ **Mode opératoire :**

Après avoir fixé le disque sur la broche du tribomètre et le pion sur le porte pion, nous choisissons la fréquence de rotation correspondante à la vitesse choisie à l'aide du variateur de vitesse. Nous appliquons ensuite la charge choisie sur le

porte pion et mettons en contact le pion et le disque, puis l'essai d'usure commence.

L'enregistrement des données (effort normal et tangentiel) délivrées par le capteur sont transmis à la mémoire de l'ordinateur via la chaîne d'acquisition.

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

V. 14. 2. Résultats et discussions :

V. 14. 2. 1. Coefficient de frottement :

A partir des mesures enregistrées lors des essais, nous traçons les courbes de l'effort normal F_N et de l'effort tangentiel F_T en fonction du temps. Comme illustration nous présentons un exemple de ces courbes en figures V. 26 et V. 27 respectivement. La courbe donnant l'évolution du coefficient de frottement en fonction du temps (Figure V. 28) est déduite en effectuant le rapport F_T / F_N .

Nous avons choisi de prendre la moyenne des deux graphiques de la variation du coefficient de frottement en fonction du temps pour les quatre matériaux étudiés. Le reste des figures est donné dans l'annexe A.

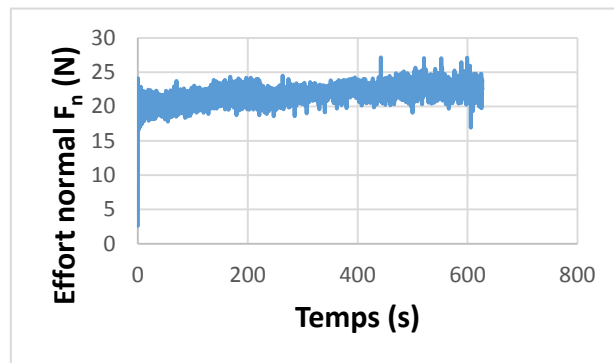


Figure V. 26 : Evolution de l'effort normal en fonction du temps

2% G à $V_2=0,6$ m/s et $F_N=20$ N

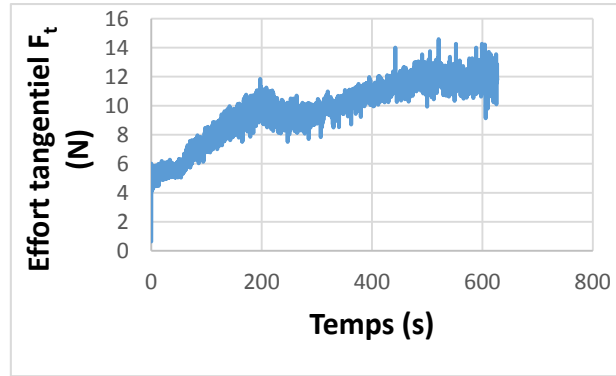


Figure V.27 : Evolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

2% G à $V_2=0,6$ m/s et $F_N=20$ N.

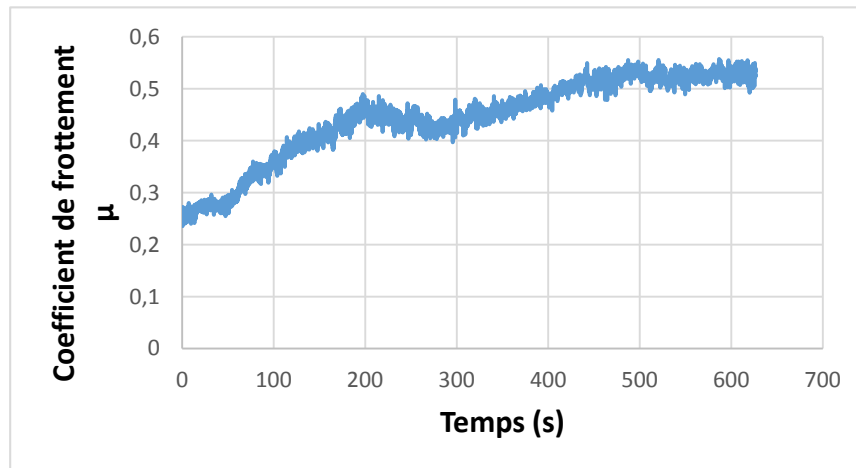


Figure V. 28 : Evolution du coefficient de frottement en fonction du temps

2% G à $V_2=0,6$ m/s et $F_N=20$ N.

Sur la figure V.25, nous pouvons décrire la variation du coefficient de frottement en fonction du temps comme suit : Aux premiers instants, nous remarquons une augmentation du coefficient de frottement générée par le mécanisme d'usure par abrasion avec écrêtement de surfaces (période de rodage), puis le mécanisme d'usure par adhésion de sorte que la matière détachée du pion lors des essais s'échappe sous forme de débris et l'autre se colle sur la piste de glissement du disque. Durant cette période, le coefficient de frottement augmente puis après un certain temps il commence à se stabiliser à une valeur constante μ .

Les histogrammes de la figure V. 29 et V. 30 représentent la variation du coefficient de frottement des quatre compositions en fonction de la vitesse et de la charge.

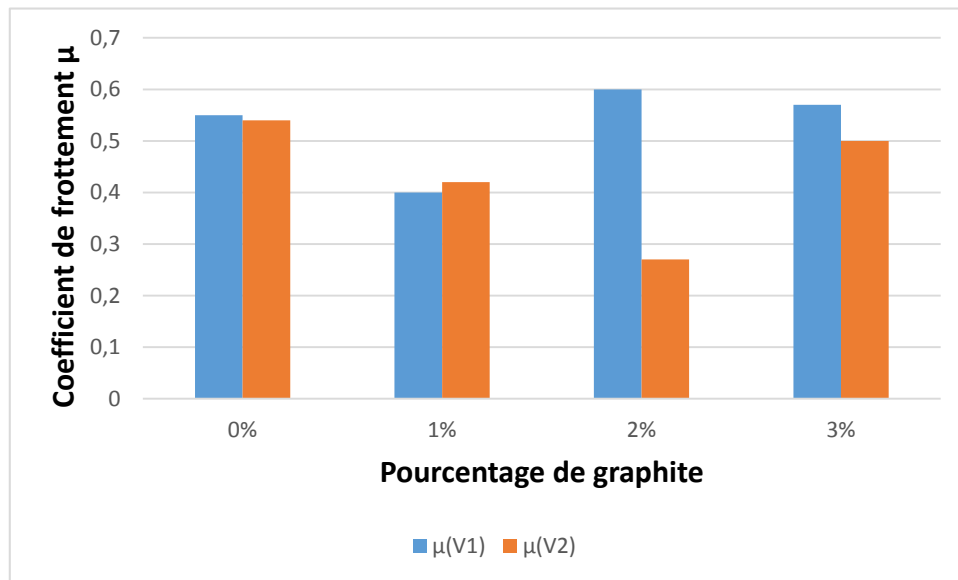


Figure V. 29 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la vitesse.

Pour le chargement de 20 N, globalement la vitesse de glissement entraîne une diminution du coefficient de frottement pour les quatre compositions, mis à part la composition de 1% qui n'a pas générée cette décroissance et qui peut constituer une expérience singulière à confirmer ultérieurement.

La composition à 2% G a entraîné une décroissance très significative du coefficient de frottement en comparaison des quatre compositions, cette composition demande aussi à être confirmée.

L'effet de la vitesse de glissement sur la valeur du coefficient de frottement n'a pas encore trouvé sa véritable explication dans la littérature. Certains chercheurs présentent des résultats qui montrent une décroissance de ce paramètre, contrairement à d'autres où ce paramètre est en nette augmentation. Ce type de résultats est valable aussi bien dans le cas des matériaux métalliques ou des polymères.

Nous pensons de notre côté à une diminution du coefficient de frottement en regard de l'accroissement de la température et de la chaleur dégagée par cette cinématique qui entraîne un ramollissement du matériau favorable au développement du mécanisme d'usure par adhésion, source de l'accroissement du coefficient de frottement.

Il est vrai que nous ne sommes qu'au début de nos expériences qui ont pour objectif premier beaucoup plus la validation de notre tribomètre que l'obtention de résultats significatifs.

Effectivement, ces résultats montrent un certain nombre d'incohérences qui demandent à être écartés par une meilleure conception des différents systèmes (guidage, entraînement en rotation, chargement) et une meilleure qualité du signal de sortie par un meilleur choix de l'équipement électronique, ce qui permettra à coup sûr, l'élimination des bruits de fond, des bruits parasites ainsi que les phénomènes d'interférence par champ magnétique.

Les résultats de la figure V. 29 montrent un effet bénéfique de l'ajout du graphite sur la valeur du coefficient de frottement. En effet, ce dernier montre une nette baisse de ce paramètre pour la composition de 1%G par rapport au matériau vierge.

La composition à 2%G montre une baisse du coefficient de frottement pour la vitesse $V_2=0,6\text{m/s}$ contrairement à $V_1=0,4\text{m/s}$ qui montre beaucoup plus une augmentation du coefficient de frottement. Nous pensons que cette expérience mérite une confirmation.

La composition à 3%G ne montre pas de baisse comparativement au matériau vierge car la valeur du coefficient de frottement est sensiblement la même. Nous pouvons avancer l'idée d'une composition limite en graphite dans l'Epoxyde, ce qui nous permet de délimiter la limite du pourcentage de graphite dans lequel nos prochaines expériences se dérouleront.

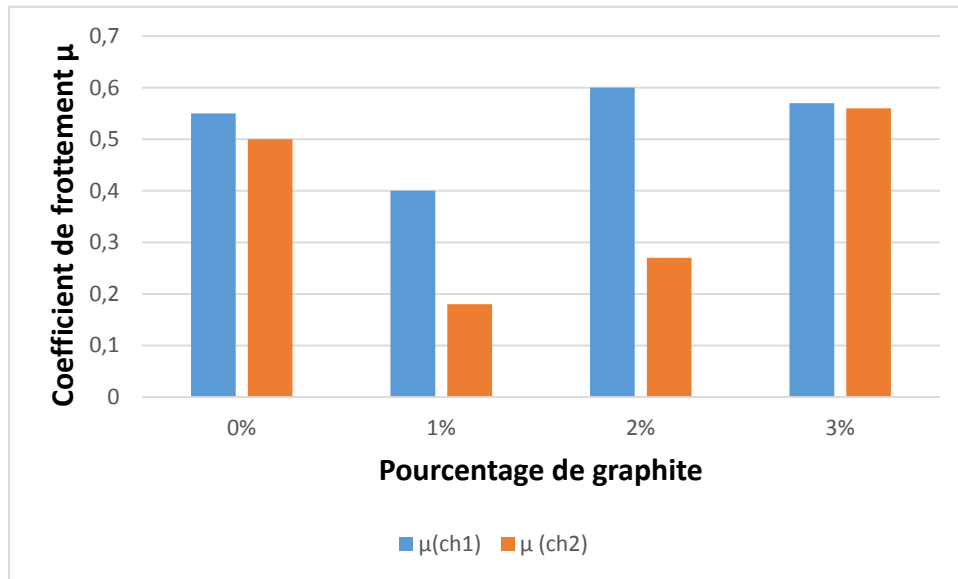


Figure V. 30 : Evolution du coefficient de frottement en fonction de la charge.

Nous remarquons la diminution du coefficient de frottement pour les quatre compositions avec l'augmentation de la charge pour une vitesse de glissement $V1= 0,4\text{m/s}$.

Les compositions 0% et 3% montrent une légère diminution du coefficient de frottement, alors que pour les compositions à 1% et 2% de graphite, nous remarquons une baisse considérable du coefficient de frottement, nous pensons que cette expérience mérite une confirmation.

L'étude expérimentale de l'influence de la vitesse de glissement, chargement appliqué et du pourcentage de graphite sur le coefficient de frottement a donné des résultats, qui sont à notre avis assez satisfaisant dans la mesure où il y a une certaine reproductibilité des résultats.

Cependant pour certaines valeurs de vitesse, chargement et pourcentage de graphite, l'allure des courbes ou des histogrammes n'est pas respectée, par exemple, cas de rupture du pion au niveau de l'encastrement après déformation plastique.

V. 14. 3. Conclusion :

Nous constatons que l'ajout de graphite joue le rôle de lubrifiant solide qui contribue à la baisse du coefficient de frottement avec certaines dispersions dû à l'équipement. Ce que nous devons confirmer ou infirmer par d'autres essais.

Conclusion générale

Conclusion générale

A l'issue de ce modeste travail de recherche, nous pouvons conclure sans prétention qu'il nous a permis de découvrir une jeune science qu'est la tribologie, d'une importance capitale pour l'industrie à l'échelle planétaire au vu des pertes économiques qu'elle engendre, particulièrement pour les pays industrialisés. Nous avons constaté, sur la base de notre recherche bibliographique combien cette science est encore à l'état embryonnaire. L'expérimentation en tribologie pose encore de nombreuses difficultés et les résultats expérimentaux présentent une dispersion encore très élevées. Les résultats du programme VAMAS initié par le groupe français de tribologie lors des journées internationales francophones de tribologie (JIFT 2006) constitue une preuve sans aucune équivoque. Le même constat est déjà fait par les membres de l'équipe 'caractérisation du comportement mécanique des matériaux du laboratoire de mécanique structure et énergétique. L'étude expérimentale que nous avons menée, nous a permis avant tout, d'atteindre l'objectif assigné à ce mémoire à savoir, 'l'initiation à la recherche' car nous avons vraiment goûté au sens profond du terme aux problèmes qui se posent à l'expérimentateur. Nous avons par ailleurs utilisé de nombreux et divers équipements expérimentaux, confrontés aux problèmes de mesure de grandeurs physiques, d'étalonnage de systèmes de mesure, de parasitage et filtrage de signaux électriques etc.

Nous avons aussi réalisé des échantillons, effectué des traitements thermiques, des mesures de dureté, d'état de surface, des essais de caractérisation du comportement mécanique de matériaux et enfin des essais de frottement.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'ajout de charges comme la poudre de graphite à l'Epoxy bisphénol A entraîne des propriétés mécaniques inférieures à celles du matériau vierge.

Cependant, les essais de frottement montrent la baisse de ce dernier avec l'augmentation du pourcentage de graphite malgré quelques dispersions due sans doute à la qualité de notre équipement.

En étudiant les résultats expérimentaux obtenus sur notre tribomètre, nous pouvons aisément remarquer que le graphite joue le rôle de lubrifiant solide d'où sa contribution à la baisse du coefficient de frottement.

Les présents résultats peuvent aisément permettre à des utilisateurs de choisir le compromis utile qui répondra le mieux à leur cas.

Conclusion générale

Enfin, nous souhaitons que les camarades des promotions à venir continuent cette étude en essayant de remédier à toutes les difficultés expérimentales que nous avons rencontrées et signalées dans ce mémoire.

ANNEXES

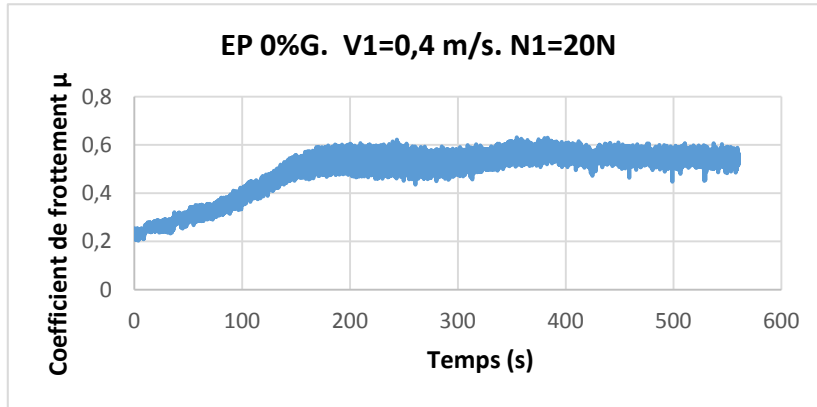


Figure A.1 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

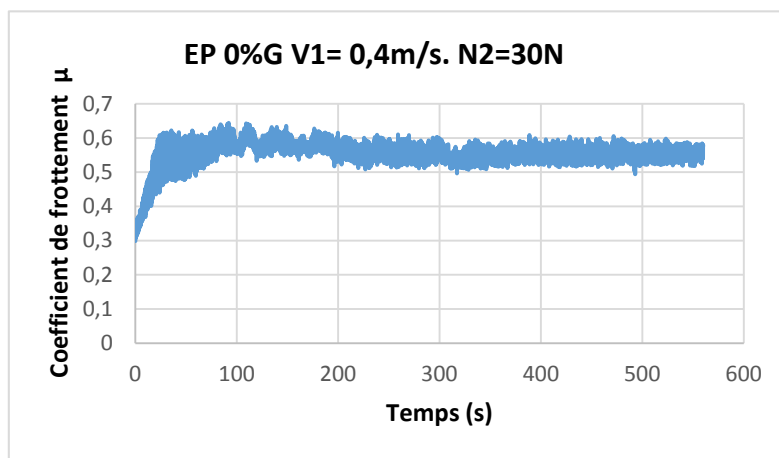


Figure A.2 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

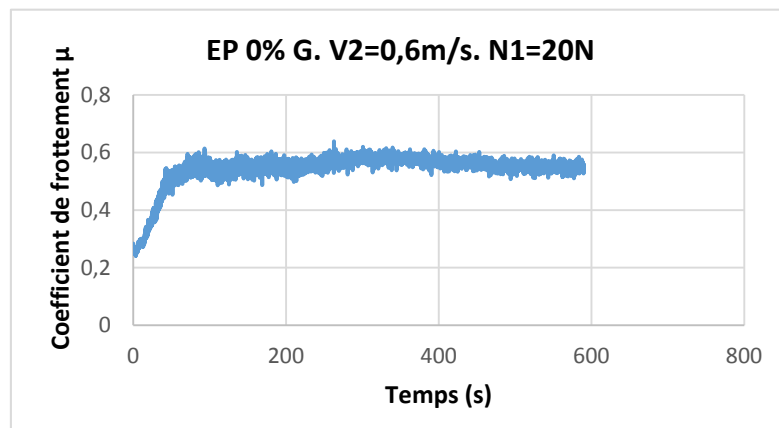


Figure A.3 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

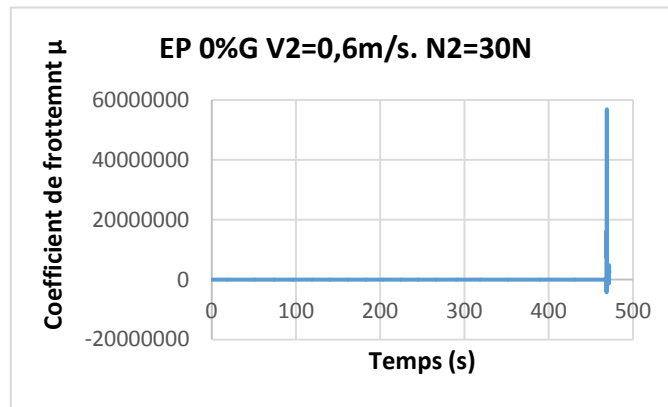


Figure A.4 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

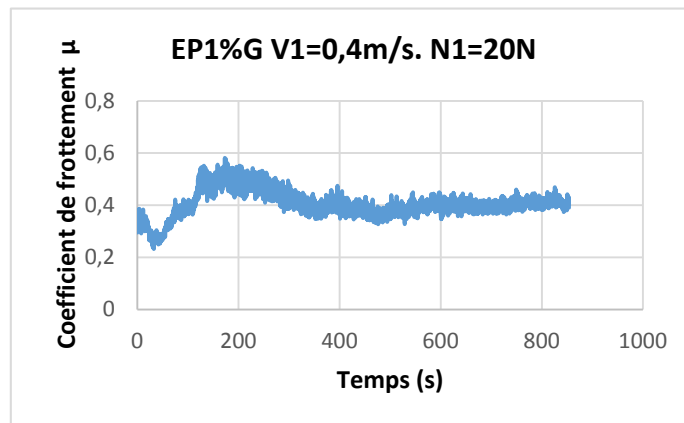


Figure A.5 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

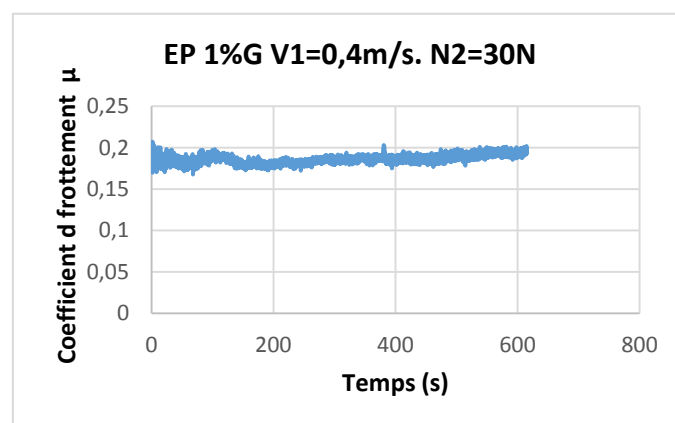


Figure A.6 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

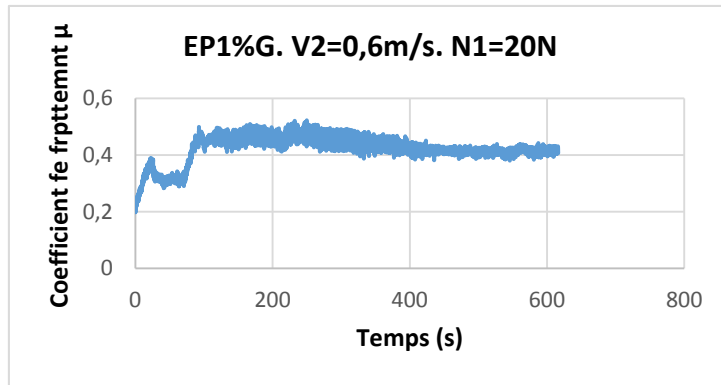


Figure A.7 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

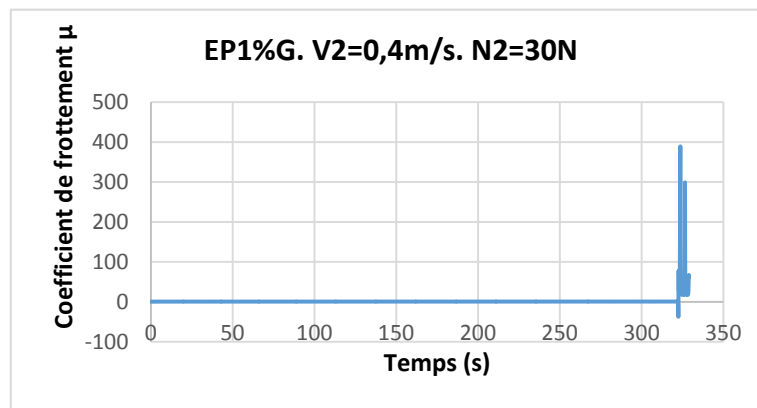


Figure A.8 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

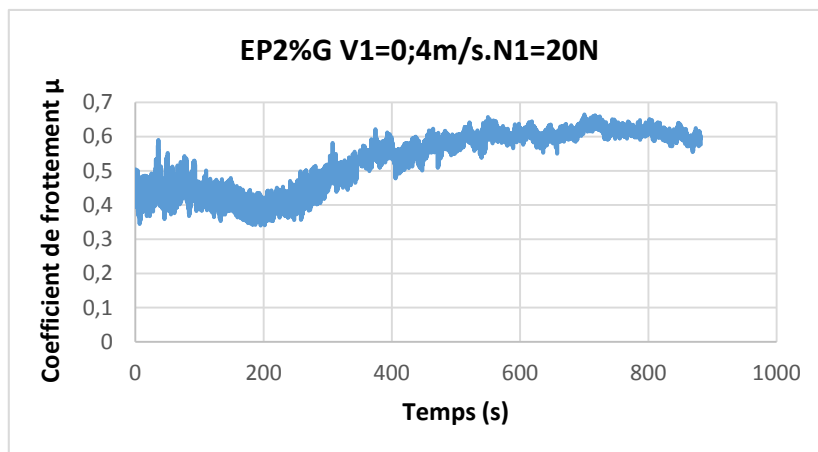


Figure A.9 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

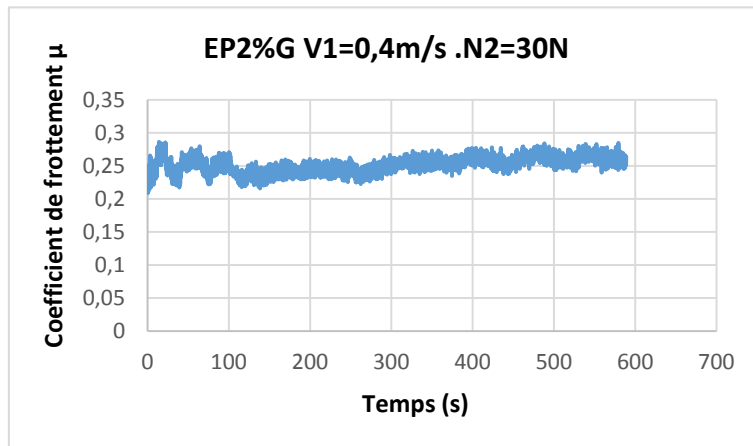


Figure A.10 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

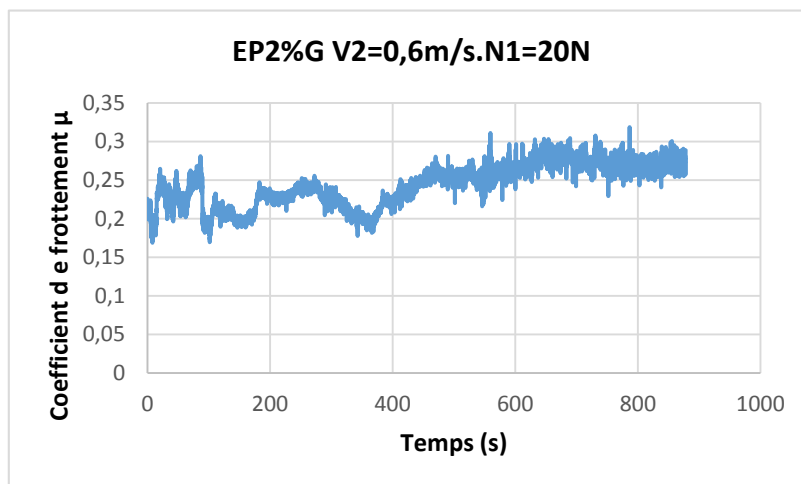


Figure A.11 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

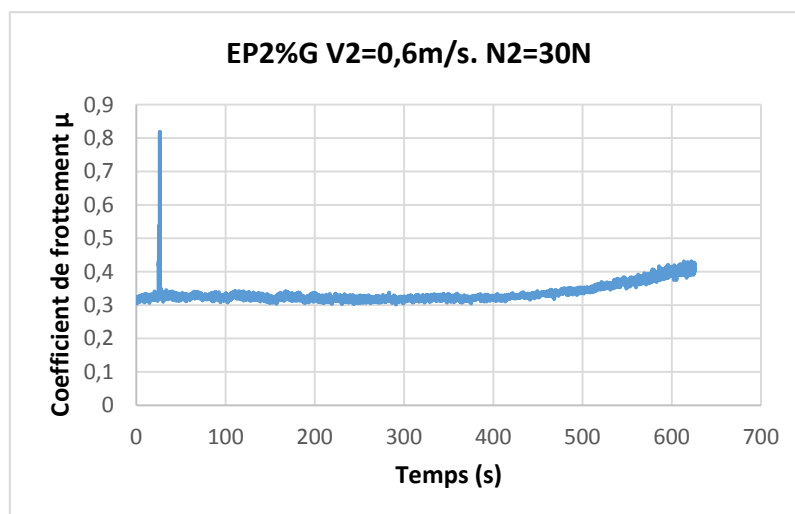


Figure A12 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

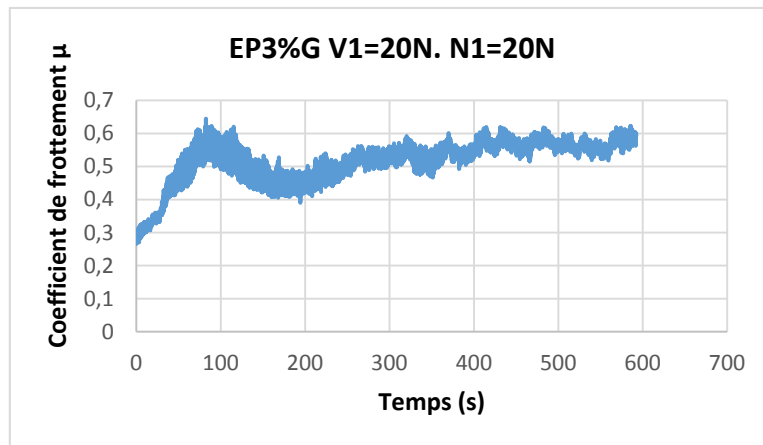


Figure A.13 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

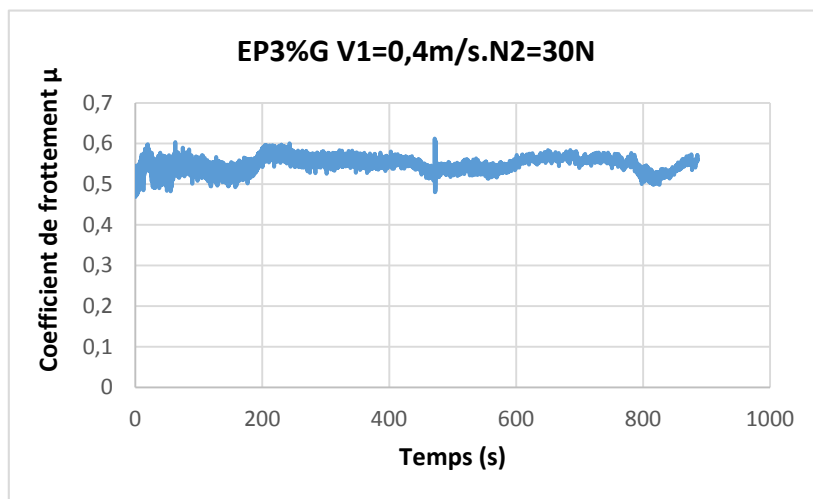


Figure A.14 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

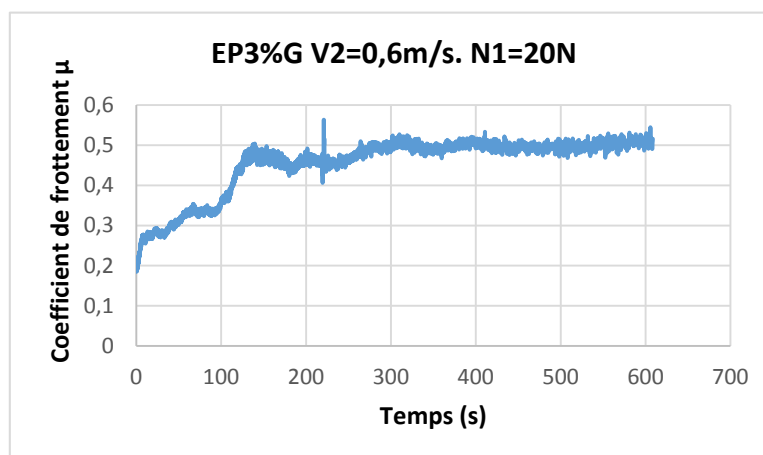


Figure A.15 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

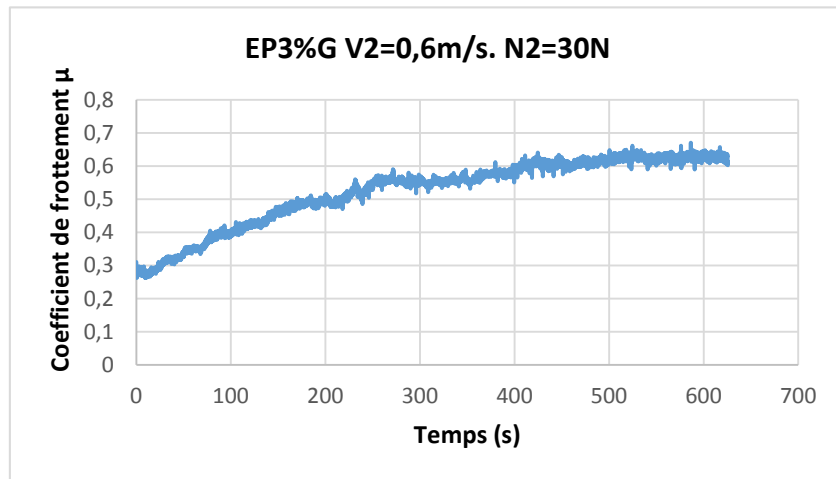


Figure A.16 : Coefficient de frottement en fonction du temps.

*Références
bibliographiques*

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : G. Zambelli, L. Vincent. Matériaux et contacts - une approche tribologique. Edition Suisse Romande, PUR. 1998.
- [2] : THESE présentée en vue d'obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse École doctorale : Matériaux – Structure – Mécanique Spécialité : Science et Génie des Matériaux Par ETCHEVERRY Bernard Titre de la thèse Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites.
- [3] : Jamal Takadoum. Matériaux et surfaces en tribologie .Paris, 2007.
- [4] : A.S. ADAMOU. Comportement tribologique et réactivité de l'alliage 718 en atmosphère contrôlée et à haute température. Thèse de doctorat. Ecole doctorale : matériaux structure-mécanique. INSA de. 2005.
- [5] : A. ELHADI. Influence des paramètres mécaniques lors de L'endommagement par les Phénomènes Tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55.
- [6] : A. ABDELMALEK. Influence des paramètres mécaniques lors de l'endommagement par les phénomènes tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55. Mémoire de MAGISTER. Université Mohamed Boudiaf de M'sila. 2006.
- [7] : M.CARTIER P.KAPSA, Usure des contacts mécaniques. Problématique et définitions. Techniques de l'ingénieur.
- [8] : Ressource Internet. WWW.Tribologie /applications pratiques, un livre de Wikibooks. WWW. wikibooks.org/tribologie/applications pratiques.
- [9] : Tribologie et couplages multiphysiques, actes des journées internationales francophones de tribologie (JIFT 2006).
- [10] : J. DHERS. Usure, avaries, corrosion : facteurs de destruction des matériels industriels. Edition technique et vulgarisation. Paris 1978.
- [11] : Jean Lois Ligier. Avaries en lubrification, Paris, 2004.
- [12] : 25èmes Journées Internationales Francophones de Tribologie 29 31 mai 2013 Ecole Centrale de Lyon.
- [13] : Jean Louis Fanchon. Guide des sciences et technologies industrielles. Mars 2003, Italie.
- [14] : Marc Berry (Méthode de caractérisation mécaniques des matériaux. 2006-2007.
- [15] : M. DELQUE, Influence de la microstructure sur le comportement tribologique de dépôts composites projetés plasma, Thèse doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2007.