

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



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



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master
Option : construction mécanique

Thème

VALIDATION D'UN
TRIBOMÈTRE
PION-DISQUE VERTICAL

Proposé par:

M^r DJEBALI

Réalisé par :

M^{lle} CHEKIR Nabila

2015/2016

REMERCIEMENTS

Premièrement, je tiens à remercier le grand dieu, le tout puissant de m'avoir donné la force et la patience pour mener à bien ce travail.

Je remercie profondément mon promoteur, M^r DJEBALI.S ainsi que M^r BILEK.A, et M^r LARBI.S pour Leurs conseils et orientations ainsi que leurs regards critiques et constructifs.

Je tiens aussi à remercier infiniment M^r BELDI.M pour son soutien, pour m'avoir fait bénéficier de son expérience et le temps qu'il m'a consacré durant toute cette période de recherche.

Je tiens à présenter mes remerciements aux membres de jurys qui ont accepté de juger ce travail

J'exprime mes vifs remerciements, à tous le personnel du laboratoire de mécanique (SDM) pour leur gentillesse et leur disponibilité. Je remercie aussi le chef d'atelier du hall technologique de Oued-Aissi et un grand merci pour les personnes qui travaillent à la bibliothèque de GM.

Mes profondes gratitude et ma reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont encouragé ou aidé dans mon travail que ce soit de près ou de loin.

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

La mémoire de toutes les personnes qui nous ont quittées.

Mes chers parents Ouiza et M^{ed} Elkhider qui n'ont ménagé aucun effort pour m'aider au moment opportun.

Mes Chers frères : Yahya, Menad, Mebarek, Khelifa et Boualem.

Ma chère sœur : faiza.

Mes neveux et nièces.

Mes oncles, cousins et cousines ainsi que tous mes proches.

Mes belle-soeurs : Nacima, Samia, Sofia, Hayette et Sonia.

Toutes mes chers amis : Massi, Souhila, Fariza, Rosa, cyndy, Fady et Lilia.

Tous ceux qui ont contribué à la réussite et l'aboutissement de ce travail spécialement à Massinissa et Sabrina qui m'ont aidé durant la phase finale.

Tous ceux qui m'ont aidé et ont semé dans mon cœur un grain de plus de courage et d'espoir par un fait, un geste, une parole ou un conseil je dis :

MERCI.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Echelle du contact (taille relative des particules d'usure)

Figure I.2 : le triplet tribologique de Godet et le concept de troisième corps

Figure I.3 : Circuit tribologique de Berthier.

Figure I.4 : système tribologique

Figure I.5 : usure abrasive

Figure I.6 : Usure adhésive

Figure I.7 : usure par érosion

Figure I.8 : Usure par cavitation

CHAPITRE II

Figure II.1 : Vue théorique en coupe d'une surface

Figure II.2 : rapprochement des solides : effets et conséquences.

Figure II.3 : profils mesurés

Figure II.4 : ondulation et rugosité de 3^{em} ordre

Figure II.5 : profil total

Figure II.6 : profil d'une surface

Figure II.7 : longueur d'évaluation et de base

Figure II.8 : ligne d'enveloppe supérieure

Figure II.9 : ligne moyenne

Figure II.10 : paramètres d'ondulation liés aux motifs

Figure II.11 : paramètres de rugosité liés aux motifs

Figure II.12 : paramètres de rugosité liés à la ligne moyenne

Figure II.13 : hauteur du profil

CHAPITRE III

Figure III.1 : Différents types de frottement

Figure III.2 : VAMAS Round-Robin, résultat pour un test de frottement : Coefficient de frottement pour un couple (acier/acier).

Figure III.3 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.

Figure III.4 : Evolution du frottement avec la distance de glissement.

Figure III.5 : Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale FN.

Figure III.6 : l'irrégularité des surfaces en contact

Figure III.7 : Microsoudures créées au niveau du contact

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Différents types d'usure par abrasion

Figure IV.2 : Apparence d'une surface endommagée par fatigue.

Figure IV. 3 : coefficient de frottement (COF) au cours de 5 cycles pour $F_N = 10 \text{ N}$, $V_g = 1 \text{ mm.s}^{-1}$. $Ra_{\text{m\u00e9tal}} = 0,4 \text{ }\mu\text{m}$.

Figure IV.4 : Limite entre les domaines de comportement \u00e9lastique et plastique \u00e0 partir de l'\u00e9volution de l'indice Y en fonction de la pression normalis\u00e9e de contact. ($\tilde{p} = P_{\text{app}}/H$).

Figure IV.5 : Graphe « pression/vitesse de glissement » limite pour diff\u00e9rents mat\u00e9riaux en frottement sec \u00e0 temp\u00e9rature ambiante (contact conforme ; antagoniste acier pour fer et bronze fritt\u00e9s).

CHAPITRE V

Figure V.1 : photographie du tribom\u00e8tre

Figure V.2 : ph\u00e9nom\u00e8ne d'arc-boutement

Figure V.3 : syst\u00e8me d'acquisition.

Figure V.4 : Cha\u00eene d'acquisition « vischay micromesure »

Figure V.5 : Face avant et arri\u00e8re de la cha\u00eene d'acquisition : a) Face avant, b) Face arri\u00e8re

Figure V.6 : la carte ARDOUINO

Figure V.7 : repr\u00e9sentation de la carte « Arduino uno »

Figure V.8 : les jauges de contraintes

Figure V.9 : Les efforts qui agissent sur le capteur force.

Figure V.10 : Montage du pont de jauge sur la cha\u00eene d'acquisition

Figure V.11 : le corp d'\u00e9preuve (capteur)

Figure V.12: cheminement du signal de sortie.

Figure V.13 : repr\u00e9sentation du signal de sorti en fonction de l'effort normal

Figure V.14 : repr\u00e9sentation du signal de sorti en fonction de l'effort tangentiel

Figure V.15 : dimension des disques

Figure V.16 : dimension des pions

Figure V.17 : rugosim\u00e8tre \u00e0 palpeur

Figure V.18 : programme MATLAB

Figure V.19 : \u00e9volution de l'effort normal en fonction du temps

Figure V.20 : \u00e9volution de l'effort tangentiel en fonction du temps

Figure V.21 : \u00e9volution du coefficient de frottement en fonction du temps

Figure V.22 : \u00e9volution de l'effort normal en fonction du temps

Figure V.23 : \u00e9volution de l'effort tangentiel en fonction du temps

Figure V.24 : \u00e9volution du coefficient de frottement en fonction du temps

Figure V.25 : Balance \u00e9lectrique.

Figure V.26 : \u00e9volution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour une vitesse= 2,65 m/s

Figure V.27 : \u00e9volution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour une vitesse= 4,83 m/s

Figure V.28 : Marques d'usure lors de l'essai de perte de masse bronze/acier.

Figure V.29 : l'\u00e9volution de l'effort normal trouv\u00e9 avec le tribom\u00e8tre vertical

Figure V.30 : l'\u00e9volution de l'effort normal trouv\u00e9 avec le tribom\u00e8tre horizontal

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Constituants structuraux des tribo-systèmes usuels

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Quelques exemples de coefficients de frottement statique et cinétique

Tableau III.2 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement

CHAPITRE V

Tableau V.1 : le signal correspondant à l'effort normal

Tableau V.2 : le signal correspondant à l'effort tangentiel

Tableau V.3 : paramètres de rugosités des deux éprouvettes utilisées.

Tableau V.4 : masse du pion avant et après l'expérience

Tableau V.5 : comparaison des résultats du coefficient de frottement des deux tribomètres

Pour le couple PTFE/acier.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERAL :.....	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : ELEMENTS DE TRIBOLOGIE

I.1 Introduction :.....	3
I.2 Surfaces :.....	3
I.3 Tribologie des interfaces :.....	4
I.3.1 Notions sur le piégeage et la séparation :.....	4
I.4 Le triplet tribologique et la notion de troisième corps :.....	5
I.5 Circuit tribologique :.....	6
I.6 Les paramètres tribologiques :.....	8
I.6.1 Les paramètres opérationnels :.....	8
I.6.2 Les paramètres structuraux :.....	8
I.6.3 Les paramètres tribométriques :.....	9
I.6.4 les paramètres d'interaction :.....	9
I.7 Mesure tribométriques :.....	9
I.8 Expérimentation en tribologie :.....	9
I.8.1 Importance économique et particularités technologiques :.....	10
I.8.2 Système tribologique :.....	11
I.8.3 Classification des essais tribologiques :.....	12
a.1 Essais fondamentaux:.....	12
a.2 Essais spécifiques:.....	12
a.3 Essais de simulation:.....	12
b.1 Essais d'abrasion:.....	13
b.2 Essais d'adhésion:.....	14
b.3 Essais d'érosion par particules:.....	14
b.4 Essais de cavitation:.....	15
b.5 Essais de fretting:.....	15
b.6 Essais de fatigue superficielle:.....	16
I.9 Conclusion:.....	16

CHAPITRE II : LA GEOMETRIE DES SURFACES

II.1 Définition :.....	17
II.2 Etat de surface :	17
-II.2.1 Etat physico-chimique d'une surface :	17
-II.2.2 Etat topographique d'une surface :.....	19
-II.2.3 Profilomètre de surface :	19
-II.2.4. Paramètres de rugosité:	20
II.3 Présentation des défauts géométriques de différents ordres d'une surface :	20
II.4 Aspect géométrique des surfaces :.....	20
-II.4.1 Les ordres de défauts :.....	21
-II.4.2 Caractéristiques du profil :	22
-II.4.2.1 Paramètres liés aux motifs :	24
-II.4.2.2 Paramètres liés à la ligne moyenne :.....	25
II.5 Pression de contact :	26
II.6 Conclusion :.....	27

CHAPITRE III : FROTTEMENT

III.1 Introduction :.....	28
III.2 Caractéristiques physiques des frottements :	28
III.2.1 Le frottement sec:.....	28
III.2.2 Frottement visqueux :	28
III.3 Les différents types de frottements :	31
III.4 Lois empiriques de frottement :.....	31
III.5 Théories du frottement :	32
III.6 La difficulté dans la détermination du coefficient de frottement:	33
III.6.1 Comportement du coefficient de frottement :	34
III.6.1.1 Vitesse de glissement:.....	35
III.6.1.2 Chemin de glissement parcouru :.....	36
III.6.1.3 Etat de surface :.....	36
III.6.1.4 Nature des métaux :.....	37
III.6.1.5 Charge normale appliquée :	37
III.6.1.6 Température ambiante :	37

III.6.2	Importance du coefficient de frottement :	38
III.6.3	Valeurs pratiques du coefficient de frottement :	38
III.7	Causes et effets du frottement :	39
III.7.1	Réduction du frottement et de l'usure :	41
III.8	Choix des matériaux :	42
III.9	Frottement des métaux :	42
III.10	Frottement des polymères :	43
III.11	Frottement des céramiques :	44
III.12	Conclusion:	44

CHAPITRE IV : L'USURE

IV.1	Introduction	46
IV.2	Les paramètres influant sur le taux d'usure	46
IV.3	Les origines de l' usure	46
IV.4	Différents types d'usure	46
IV.4.1	L'usure adhésive	46
IV.4.1.1	Paramètres influant sur l'usure adhésive	47
IV.4.1.2	Prévention	48
IV.4.2	L'usure abrasive	49
IV.4.2.1	Paramètres influençant l'usure par abrasion :	49
IV.4.2.2	Prévention	49
IV.4.3	L'usure par fatigue de contact.....	50
IV.4.3.1	Fatigue mécanique	50
IV.4.3.2	Fatigue thermique	51
IV.4.3.3	Facteurs influençant la fatigue de contact	51
IV.4.4	L'usure de corrosion	51
IV.4.4.1	Paramètres influençant l'usure corrosive :	51
IV.4.4.2	Prévention :	52
IV.4.5	l'usure par érosion.....	52
IV.4.5.1	formes particulières de l'usure érosive :	52
IV.5	Propriétés tribologiques des revêtements polymère.....	52
IV.5.1	Usure d'interaction.....	53
IV.5.2	Usure par fatigue des composites.....	54

IV.5.3 Usure par délaminage.....	54
IV.6 mécanisme d'usure des polymères.....	55
IV.7 Lois d'usure :	55
IV.8 Données et paramètres tribologiques	59
IV.8.1 Taux d'usure	59
IV.8.2 Valeur du produit $P \times V$	60
IV.8.3 Densité d'énergie de frottement.....	62
IV.9 Conclusion :	62

CHAPITRE V PARTIE EXPERIMENTALE

V.1 Introduction :	63
V.2 Dispositif expérimental :	63
V.2.1 Description du dispositif :	63
V.2.2 Nomenclature du banc.....	64
V.3 Etude critique du dispositif.....	65
-V.3.1 Problèmes rencontrés.....	65
V.3.2 Les solutions apportées :	65
V.4 Système d'acquisition :	67
V.5 Convertisseur analogique-numérique :	68
V.6 Le capteur de force	70
V.6.1 Les jauges de contraintes.....	70
V.6.2 La mise en place des jauges de contraintes	71
V.6.3 Les capteurs de force basés sur les jauges de contrainte.....	71
V.6.4 Etalonnage du capteur de force	73
V.6.4.1 Etalonnage de la mesure de l'effort normal	74
V.6.4.2 Etalonnage de la mesure de l'effort tangentiel.....	75
V.7 Essais de validation du tribomètre.....	76
V.7.1 Conditions expérimentables	77
V.7.1.a Matériaux et géométrie des éprouvettes :	77
V.7.1.b Rugosité des surfaces de frottement des disques :	77
V.7.1.c Conditions des essais :	78
V.7.2 Résultats des essais :	79
V.7.2.a Couple bronze/acier1 :	80

V.7.2.b. Couple PTFE/acier 2 :	81
V.7.3 Interprétation des résultats	82
V.7.4 Discussions des résultats obtenus.....	82
V.8 Perte de masse :	84
V.9 Comparaison des résultats :.....	86
V.10 Conclusion.....	88
CONCLUSION GENERALE :.....	88

Introduction générale

Le contact règne sur le monde dans lequel nous vivons, que ce soit dans l'univers des êtres vivants (articulation, touché...), mais aussi dans celui des industries (machine, véhicules ...) où les corps en contact interagissent avec leurs environnements : mécanique, électrique, thermique ou physico-chimique... etc. Le contact engendre deux phénomènes complexes importants : le frottement et l'usure dont les matériaux et l'état de surface jouent un rôle déterminant.

Lors de l'étude du contact pion disque sur un tribomètre horizontal, l'examen des courbes de la variation de l'effort normal en fonction du temps, pour les deux contacts pion en bronze avec disque en acier et pion en PTFE avec disque en acier, a montré que dans certains cas l'effort normal augmente ou diminue de façon aléatoire avec le temps alors qu'il est sensé rester constant. Il ne devrait dépendre que de la charge accrochée. Une étude critique menée sur la conception du tribomètre pion-disque utilisé a montré certaines insuffisances concernant particulièrement le système de chargement, la fixation du disque sur la broche et le capteur de forces. Ces erreurs de conception ont entraîné:

un frottement exagéré dans les guidages du système de chargement, un voilage du disque lors de sa rotation à cause d'un guidage insuffisant dans la broche.

Des solutions pour améliorer ces deux fonctions ont été proposées. Elles ont abouti à la conception et la réalisation du tribomètre vertical. Dans ce nouveau tribomètre, l'application de l'effort normal se fait par la gravité. Ceci élimine les efforts parasites dûs au frottement dans les différents guidages du système de chargement horizontal de l'ancienne conception.

Pour éliminer le voilage du disque lors de sa rotation nous avons augmenté la longueur de guidage du porte disque dans la broche. La forme et les dimensions du capteur de forces ont aussi été revues pour améliorer sa sensibilité.

L'objectif principal de notre étude est la validation par l'expérience de ce tribomètre vertical réalisé par nos camarades de la promotion 2012-2013. Pour cela nous avons retenu deux expériences à mener :

étude de l'usure du contact pion disque dans le cas du contact pion en bronze avec disque en acier et pion en PTFE avec disque en acier, évaluation de la perte de masse dans le cas du contact des deux couples cités plus haut.

Une comparaison des résultats obtenus avec les deux tribomètres est présentée à la fin de l'étude.

Notre mémoire est articulé autour de deux parties essentielles ; une étude bibliographique sur la tribologie et une étude expérimentale sur le comportement tribologique de deux contacts pion en bronze avec disque en acier et pion en PTFE avec disque en acier.

CHAPITRE I : ELEMENTS DE TRIBOLOGIE

I.1 Introduction :

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : *le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact*. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux en général.

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

Les phénomènes de frottement et d'usure ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, *le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants*. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage).

Le nom Tribologie vient du grec (tribein : frotter) et (logos : parole, étude ou science); ainsi la tribologie est l'étude ou la science du frottement. Plus généralement la tribologie concerne l'étude des surfaces en contact et en mouvement relatif, elle regroupe ainsi la lubrification, le frottement et l'usure des éléments de machine.

I.2 Surfaces :

La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux en présence mais aussi par les caractéristiques géométriques du contact. Citons par exemple l'énergie superficielle : elle influe sur les propriétés de frottement à sec des matériaux au travers des forces d'adhésion mais aussi sur le comportement du contact en régime lubrifié au travers des phénomènes de mouillage et d'étalement.

I.3 Tribologie des interfaces :

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 particule [15].

-I.3.1 Notions sur le piégeage et la séparation :

La notion d'écran est utile pour comprendre pourquoi deux surfaces métalliques quelconques peuvent être mises en contact sans "coller" l'une à l'autre. Elle n'est pas suffisante pour décrire le processus de frottement en dynamique. Rappelons, en effet, que le mouvement peut détruire les surfaces et que les débris sont formés et déposés dans un espace confiné (le contact) dont il n'est pas toujours facile de sortir. La notion de piégeage apparaît clairement si l'on tient compte de l'échelle du contact. En effet, une particule d'usure au moment de sa formation mesure nettement moins que le micron. Par ailleurs, la dimension minimale d'un contact est rarement inférieure à 100 microns (figure I.1). La particule détachée est donc piégée à l'intérieur du contact où son rôle est complexe.

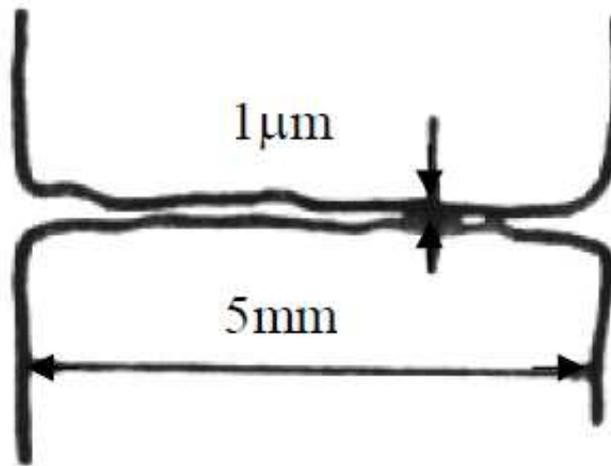


Figure I.1 : Echelle du contact (taille relative des particules d'usure)

I.4 Le triplet tribologique et la notion de troisième corps :

Le concept du triplet tribologique (mécanisme, premiers corps, troisième corps) [1], implique la superposition de phénomènes à trois échelles différentes. Il se compose tout d'abord d'un mécanisme qui sollicite le contact et impose un chargement (F), une cinématique (v) et un environnement de frottement (HR , T). Viennent ensuite les deux premiers corps constitués par les matériaux en contact qui supportent les sollicitations imposées par le mécanisme. Le troisième corps est l'élément intercalaire systématiquement présent dans le contact et qui transmet la charge (portance) d'un premier corps à l'autre.

Le troisième corps représente ainsi l'ensemble des éléments s'intercalant entre les deux premiers corps (Figure : I.2). Il est composé :

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

L'ordre de grandeur caractéristique du troisième corps est le micromètre, alors que les écrans ont une épaisseur de quelques nanomètres. Ces derniers sont composés de dépôts artificiels ou de couches naturelles physisorbées, chimisorbées, oxydées, dépendant de l'historique de préparation des surfaces des premiers corps en contact (figures I.2) [1].

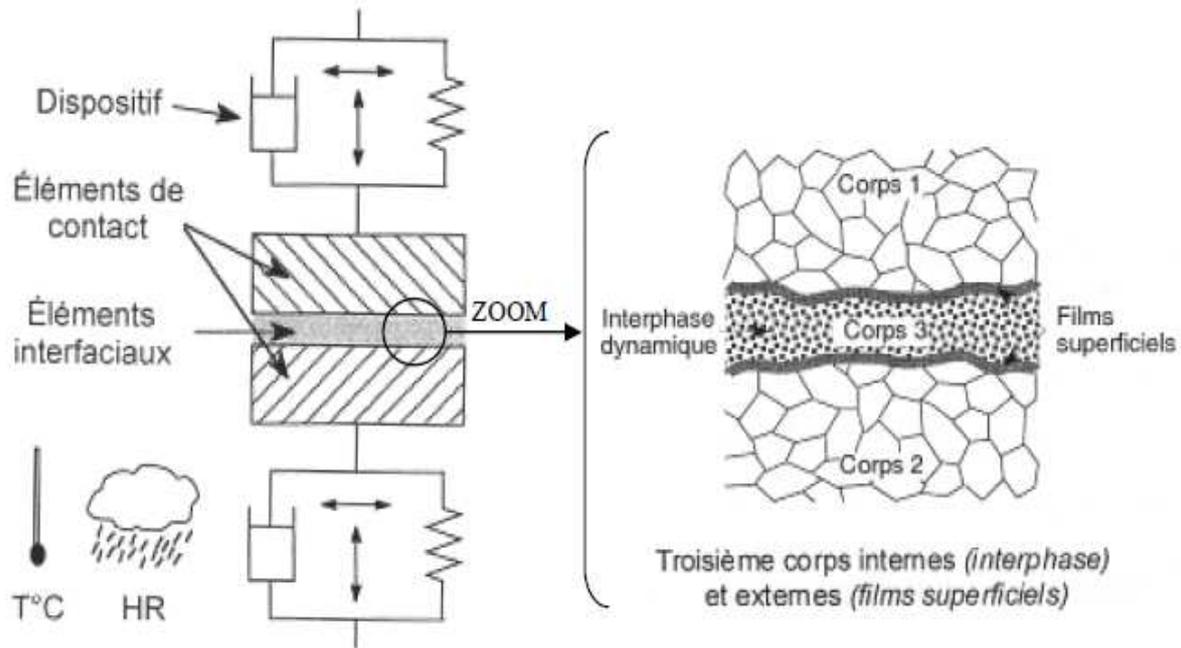


Figure I.2 : le triplet tribologique et le concept de troisième corps [1]

I.5 Circuit tribologique :

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 [1] (figure I.3).

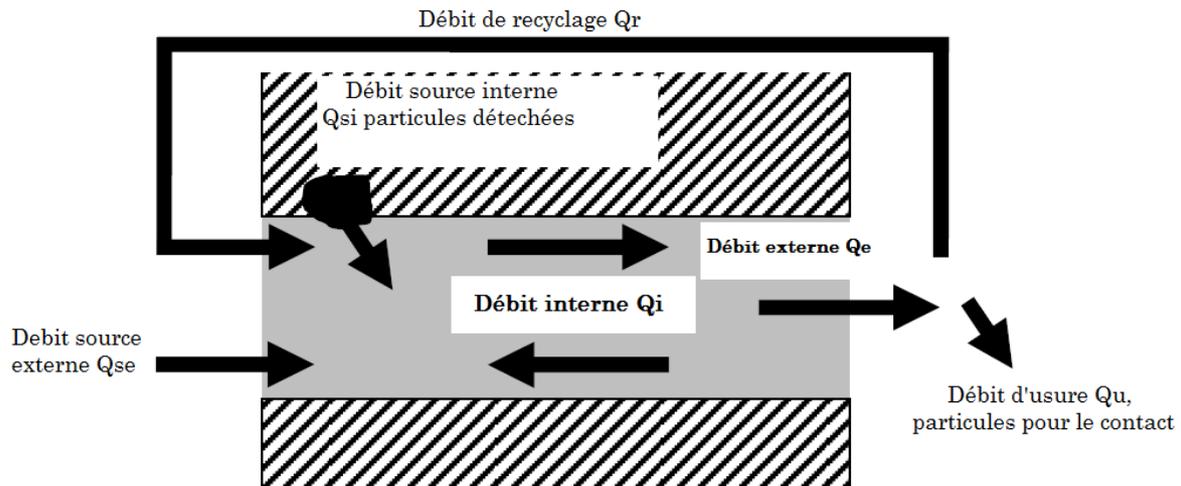


Figure I.3 : Circuit tribologique [1].

Le détachement de particules ou débit source interne (Q_{si}) alimente le contact en troisième corps dont le mouvement se traduit par le débit interne (Q_i). Les particules éjectées du contact constituent le débit externe (Q_e) qui se partage à son tour en un débit de recyclage (Q_r) qui permet la réalimentation du contact et un débit d'usure (Q_u) qui concerne les particules définitivement perdues par le système tribologique. Dans le cas de la lubrification liquide ou solide, il faut tenir compte de l'élément artificiel apporté au système tribologique que l'on traduit par le débit source externe (Q_{se}). Il apparaît ainsi, qu'en aucun cas la mesure du volume de dégradation des premiers corps n'est représentative de l'usure du couple tribologique testé. Si aucun lubrifiant n'est apporté au contact ce qui se traduit par $Q_{se}=0$, le terme de débit source (Q) ne représente que le débit source interne. Ainsi les relations d'équilibre des débits pour différents types de circuits tribologiques (conservation de la quantité de matière) :

- Circuit ouvert : $\begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e \\ Q_u = Q_e \end{cases}$ soit $\begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e \end{cases}$
- Circuit fermé : $\begin{cases} Q_i = Q_s - Q_e + Q_r \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases}$ soit $\begin{cases} Q_i = Q_s - Q_u \\ Q_u = Q_e - Q_r \end{cases}$

I.6 Les paramètres tribologiques :

Les paramètres tribologiques sont caractéristiques des systèmes mécaniques qui ont des surfaces qui interagissent en mouvement relatif. La résistance au mouvement (friction) ou la résistance à l'endommagement des surfaces (usure) dans un environnement donné est en relation avec l'action d'un ou plusieurs sollicitations. Un système tribologique est donc caractérisé par les paramètres tribométriques, associés avec les conditions opérationnelles, les paramètres microstructuraux des matériaux et les paramètres d'interactions dépendant du contact et du mode de lubrification.

-I.6.1 Les paramètres opérationnels :

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

-I.6.2 Les paramètres structuraux :

Ils ont liés aux mécanismes élémentaires des tribo-systèmes des produits et des machines ; le modèle classique d'un tribo-système est constitué de quatre composants principaux.

Une distinction doit être faite entre les systèmes fermés (les composants sont soumis aux processus de frottement et d'usure d'une manière continue) et les systèmes ouverts (avec écoulement de matière à l'interface dans le cas de machines de mise en forme). Le tableau I.1 donne la liste des principaux paramètres structuraux d'un tribo-système ouvert ou fermé.

Tribo-système	Élément (1)	Élément (2)	Interface (3)	Environnement	Type système
Boite de vitesse	Engrenage(1)	Engrenage(2)	Lubrifiant	Air	Fermé
Roue/rail	Roue	Rail	3em corps	Air	Ouvert
Glissière	Glissière	Support	Graisse	Air	Ouvert
Roulement	Billes	Cage	Lubrifiant	Huile	Ferme
Pneu/route	Pneu	Sol	Sable, eau	Poussière	Ouvert
Moulin	roue	Cage	minerais	Air	Ouvert

Tableau I.1 : Constituants structuraux des tribo-systèmes usuels

-I.6.3 Les paramètres tribométriques :

Ce sont des valeurs qui résultent des mesures des interactions à l'interface de contact, dans des systèmes tribologiques. Des caractéristiques tribologiques peuvent offrir un intérêt : les variations induites au frottement, le changement de composition des surfaces, la caractérisation des débris d'usure.

-I.6.4 les paramètres d'interaction :

Ils caractérisent l'action des paramètres opérationnels sur les composants du tribo-système. Il caractérise le mode de contact (distribution des contraintes de contacts) ou le type de lubrifiant pour un couple de matériaux donné. Des conditions peuvent être associées au processus de frottement et d'usure (adhésion, abrasion ...). Les forces d'interaction entre les surfaces en contact dépendent, de la nature physico-chimique et des énergies de surfaces. Les contraintes de contacts, dépendent de la géométrie du contact, de l'élasticité, la viscosité, plasticité ou dureté des métaux et de la force externe statique ou dynamique. Les modes de déformation au contact sont gouvernés par la topographie (état de rugosité) des surfaces.

I.7 Mesure 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 verticale sont mesurées, ce qui permet ensuite d'évaluer le taux d'usure et le coefficient de friction.

I.8 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'autres parts, 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.8.1 Importance économique et particularités technologiques :

Le développement de la tribologie est toujours fortement lié à la situation économique, notamment depuis la révolution industrielle. Les résultats d'une étude publiée par le Cetim en 1994 confirment encore une fois que l'économie potentiellement réalisable est de l'ordre de 26 milliards d'euros par an en France, soit 1 % du PIB, si toutes les connaissances acquises en tribologie étaient appliquées à l'industrie [2]. Si la tribologie joue un rôle non négligeable dans le développement économique, la tribométrie ou les essais tribologiques constituent une base essentielle de cette science, car les connaissances physiques sur de nombreux phénomènes de contact restent encore à approfondir, notamment au niveau de l'adhésion, du fretting ou de la cavitation. La plupart de lois en tribologie (Coulomb, Achard) proviennent encore de l'expérience dans des domaines spécifiques.

- ❖ La tribométrie est définie comme l'ensemble de technologies qui permettent de mesurer le comportement tribologique d'un système en frottement. Par rapport aux mesures de la résistance mécanique des matériaux qui dépend de la cohésion de ses

composants, la mesure du comportement tribologique est nettement plus complexe à cause de la nature de ce comportement qui n'est pas une propriété intrinsèque, mais une réponse d'un système.

- ❖ Dans l'industrie mécanique, les essais tribologiques sont indispensables dans de nombreuses étapes de la production : depuis la mise en forme des métaux (laminage, emboutissage forgeage, usinage...), jusqu'au fonctionnement des composants mécaniques (freins de véhicules, commandes de vols des avions, distributeurs de billets de banque...) pour maîtriser le frottement, garantir la durée de vie en optimisant le choix de matériaux et de traitements de surfaces, l'état de surface et la lubrification.

-I.8.2 Système tribologique :

Comme le comportement tribologique n'est pas une propriété intrinsèque des matériaux, mais une réponse d'un système tribologique, il est nécessaire de connaître ce système avant toute mesure.

Un système tribologique comprend trois éléments (Figure I.4) [2] :

- les deux pièces en contact (matériaux, forme géométrique, rugosité...) ;
- le troisième corps (lubrifiant, débris d'usure, dépôt, polluant...) ;
- l'environnement (température, humidité...).

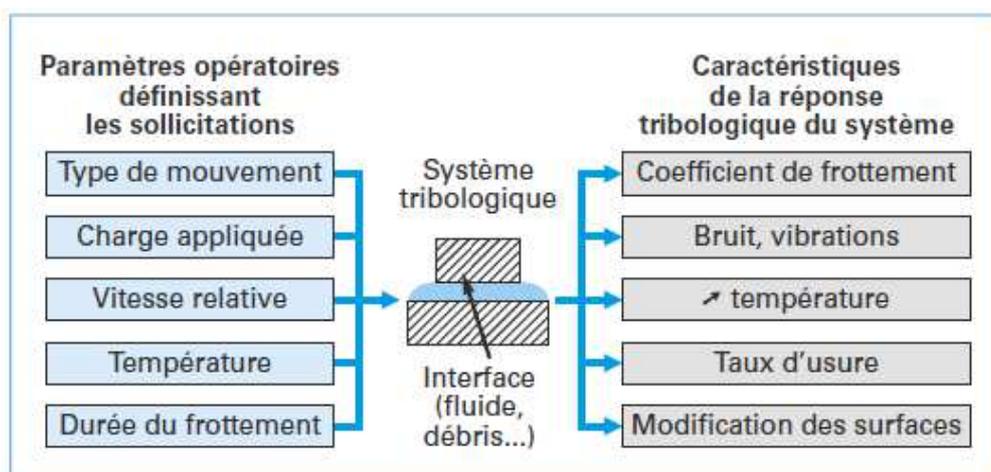


Figure I.4 : système tribologique [2]

Avec des sollicitations exercées sur les deux pièces en contact : contraintes de contact, vitesse de glissement ou d'impact..., ces trois éléments donnent des réponses résultant des interactions. L'objectif des essais tribologiques est d'entendre les réponses de ce système

(force de frottement, usure, bruits et vibrations, échauffement...) en fonction des sollicitations données (pression de contact, vitesse de glissement, température...).

-I.8.3 Classification des essais tribologiques :

Les essais tribologiques peuvent être classés en fonction des [2] :

- a) domaines d'application ;
- b) modes d'usure.

Dans le premier cas, ils peuvent être classés selon trois catégories.

-a.1 Essais fondamentaux:

Les essais fondamentaux ont pour but de comprendre les phénomènes fondamentaux de la tribologie. La conception de ces essais est souvent simple et ingénieuse (bille/plan, galet/cylindre...) afin de minimiser le nombre de paramètres à étudier. Les conditions d'essais et l'environnement sont bien contrôlés avec des observations microscopiques *in situ* (dans un MEB par exemple). Ces essais sont souvent pratiqués dans les laboratoires de recherche.

-a.2 Essais spécifiques:

Les essais spécifiques sont conçus pour comparer différentes solutions dans des conditions proches de celles de sollicitations réelles de certaines pièces types tout en gardant une simplicité au niveau des modes de contact (pion-disque, plan/plan, cylindre/ plan...). La plupart des essais normalisés font partie des essais spécifiques. Ces essais sont souvent utilisés par les fournisseurs de matériaux, de traitements de surface et de lubrifiants pour caractériser leurs produits sur base commune. Ils sont de plus en plus utilisés, dans les cahiers des charges, par les constructeurs afin de garantir les fonctionnalités tribologiques des produits venant du monde entier.

-a.3 Essais de simulation:

Les essais de simulation sont des tests de validation pour vérifier les fonctionnalités des composants. Ils consistent à reproduire les réponses d'un tribosystème réel sur un banc d'essai ou sur une machine réelle avec souvent des pièces réelles entières ou partielles au lieu des éprouvettes standards (segment/chemise de moteur, vanne de gaz de bouteille d'oxygène, joint/vitre de voiture, frein à tambour de manette de gaz d'avion...). L'intérêt de ces essais est de reproduire les mécanismes d'usure du système réel en simplifiant un certain nombre de paramètres.

Les difficultés de ces essais résident dans l'intégration des capteurs de mesures sur les pièces réelles sans modifier les conditions de sollicitations.

Les essais tribologiques peuvent également être classés selon la nature de la mesure en :

- Essais de frottement ;
- Essais d'usure.

Les essais de frottement sont essentiellement classés selon le mode de contact et le type de mouvement, alors que les essais d'usure sont basés sur le mode d'usure qui se produit sur l'échantillon. Les essais de frottement couramment utilisés sont :

- 1/ Bille/plan ;
- 2/ Plan/plan ;
- 3/ Cylindre/plan ;
- 4/ Cylindre/cylindre ;
- 5/ Axe/palier.

Ces modes peuvent être combinés avec un mouvement en rotation ou en translation.

On range les essais d'usure dans six catégories :

-b.1 Essais d'abrasion:

L'usure abrasive est produite par le frottement de matériaux abrasifs souvent plus durs que le matériau à tester. Les traces d'usure se caractérisent par la déformation plastique macroscopique en formant des rayures ou des copeaux (figure I.5). Pour le choix de matériaux des socs de charrue, des dents de godet ou des plaques de blindage de concasseur par exemple, on a souvent besoin de connaître la résistance à l'abrasion des matériaux à utiliser. Afin de comparer la résistance à l'abrasion des différents candidats, des essais ont été conçus pour caractériser l'usure d'une éprouvette en frottement contre un matériau abrasif (une meule abrasive par exemple : abrasion à deux corps) ou un antagoniste support dans un milieu abrasif (une pièce en acier ou en élastomère dans du sable par exemple : abrasion à trois corps). Le point important de ces essais est de maintenir une abrasivité constante en renouvelant l'abrasif durant l'essai, car la modification de l'abrasif au niveau de la taille, et l'angularité durant l'essai peuvent changer l'agressivité de l'antagoniste.



Figure I.5 : usure abrasive [2]

-b.2 Essais d'adhésion:

L'usure adhésive se produit lorsque la jonction formée entre deux surfaces en contact est plus résistante que l'un des deux matériaux. Dans ce cas, la séparation des deux surfaces en contact a lieu dans l'un des premiers corps, ce qui forme un transfert sur son antagoniste (figure I.6). La tenue à l'usure d'un couple de matériaux dépend essentiellement de leur compatibilité tribologique. Les essais d'adhésion ont pour but de comparer cette tenue selon différentes configurations de contact. Ils sont généralement utilisés pour comparer différentes solutions de matériaux et de surfaces. Les caractéristiques de débris d'usure ont souvent des influences non négligeables sur les résultats d'essais.

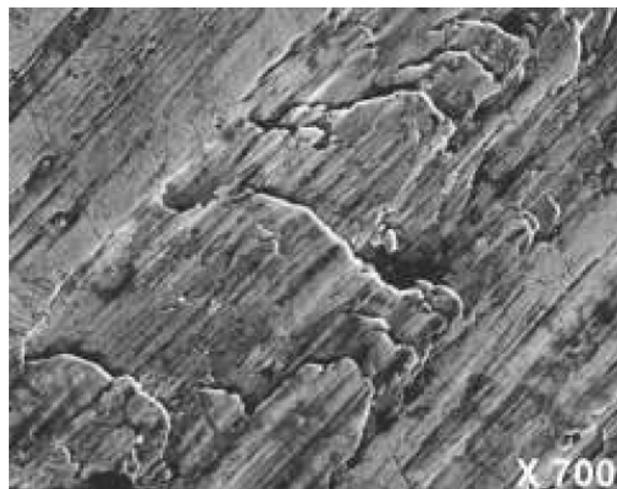


Figure I.6 : Usure adhésive [2]

-b.3 Essais d'érosion par particules:

Il est constitué de particules abrasives. Mais contrairement à l'abrasion qui génère une déformation plastique macroscopique visible au microscope optique, l'érosion provoque de l'usure à une échelle beaucoup plus faible avec peu de rayures mais en laissant des

ondulations visibles à l'œil. L'usure érosive dépend plutôt de la vitesse, de la masse de particules et du nombre d'impact, alors que l'abrasion dépend de la pression de contact. Les essais d'érosion sont donc souvent réalisés par un jet d'abrasif sur une plaque ou par un rotor tournant dans un milieu abrasif (Figure : I.7).

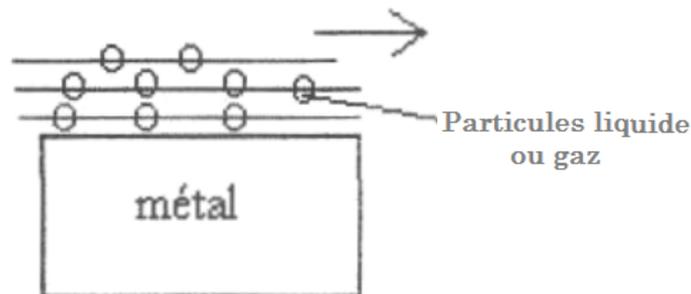


Figure I.7 : usure par érosion

-b.4 Essais de cavitation:

La cavitation est provoquée par l'impact des micro-jets à l'issue d'une implosion dissymétrique des bulles lorsqu'elles rentrent dans une zone de surpression près d'une surface solide. Les traces de cavitation se caractérisent par des cratères d'impact dont l'intensité dépend de la variation de la pression (figure I.8). L'implosion des bulles est générée soit par une pièce vibrante dans un liquide, soit par un écoulement de fluide turbulent qui provoque des zones de dépression et de surpression.

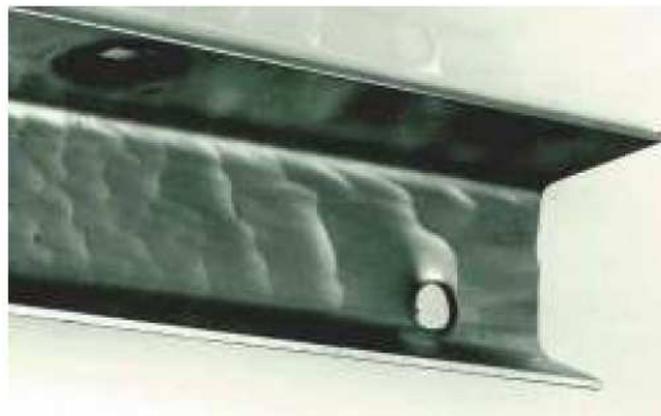


Figure I.18 : Usure par cavitation [2]

-b.5 Essais de fretting:

Le *fretting* est l'usure par frottement à faible amplitude généralement de quelques micromètres à quelques centaines de micromètres. On observe souvent des débris d'usure de couleur rouge, ocre ou noire très fins autour de la trace de contact. Les essais de *fretting* sont

faits soit par une bille contre une éprouvette montée sur machine de traction en charge oscillante, soit par une éprouvette entraînée par un mouvement alternatif par un système mécanique ou un pot vibrant.

-b.6 Essais de fatigue superficielle:

La fatigue superficielle se caractérise par des fissures générées par des contraintes cycliques de contact. On note des fissures parallèles ou perpendiculaires à la surface de contact selon les directions des contraintes principales. Les essais de fatigue superficielle sont conçus pour avoir un champ de contraintes demandé en combinant la forme de contact des deux pièces, le taux de glissement et le coefficient de frottement en mettant du lubrifiant.

I.9 Conclusion:

En conclusion de ce chapitre, différentes notions liées à la tribologie ont été données. Ces notions de bases sont développées car la compréhension des phénomènes rencontrés lors des essais dans le chapitre V repose essentiellement sur ces notions.

Tous ce que nous avons pu voir et définir dans ce chapitre nous a révélé que la tribologie est une science très vaste, elle intéresse tous les domaines d'activité (conservations d'énergie, productivité, développement et fabrication de nouveaux équipements), ainsi que dans les systèmes vivants (les articulations humaines) car l'univers technique qui nous environne est essentiellement régit par le contact.

CHAPITRE II : LA GEOMETRIE DES SURFACES

II.1 Définition :

En tribologie la surface n'est pas le simple contour délimitant la matière dans l'espace mais elle comprend toutes les couches du corps considéré, qui interviennent dans les phénomènes tribologiques dont le frottement, le contact...etc.

La surface d'un solide délimite son volume et constitue le lieu où vont se développer les interactions entre ce solide et le milieu environnant.

II.2 Etat de surface :

Une surface peut être caractérisée par ces propriétés mécaniques, physico-chimiques, topographiques ou structurales. L'ensemble de ces caractéristiques définit ce que l'on appelle l'état de surface.

-II.2.1 Etat physico-chimique d'une surface :

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (gaz adsorbés, produits organiques), d'oxydes. Dans le cas de métaux elle peut être écaillée. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologique des corps en contact [4] (Figure II.1).

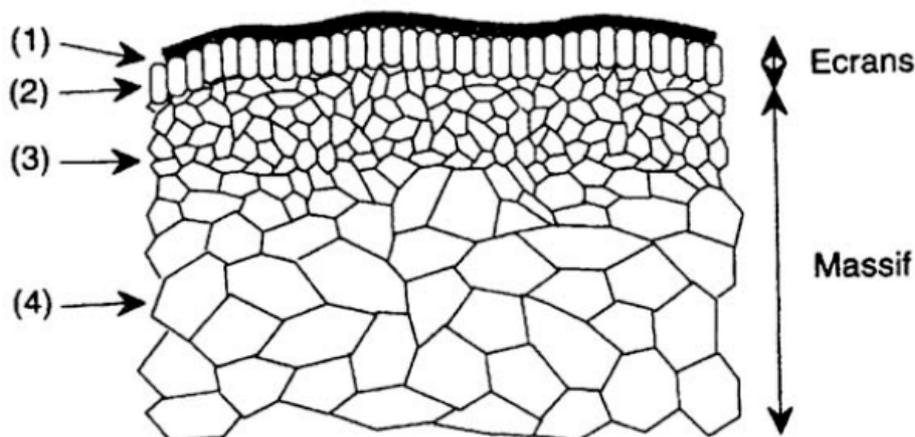


Figure II.1 : Vue théorique en coupe d'une surface [4]

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone (1) est un film de contamination (0,2 - 8 nm) constitué de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes elle peut atteindre 80 nm. La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée (0,02 – 0,05 mm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) est le matériau massif.

Lorsque l'usure est limitée à l'enlèvement des films de surface, elle est appelée «usure douce». Ces écrans détruits peuvent être reconstitués par réaction avec l'environnement. Lorsque l'usure s'étend au massif, elle est appelée usure « destructrice » ou « sévère ».

- Exemple dans le cas du glissement d'un pion sur un disque :

Les surfaces de contact de deux corps frottants peuvent ne pas jouer des rôles symétriques. Par exemple, dans le cas du glissement d'un pion sur un disque : la surface de contact du pion est constamment sollicitée, alors qu'un point de la piste du disque ne l'est qu'au passage du pion. Les distances cinématiques sont alors différentes. L'exposition au champ de contraintes développées dans le pion et le disque ne sera pas la même, et les effets de fatigue vont être différents. L'usure du pion et du disque sera différente également ainsi que les coefficients de frottement. Par exemple, pour des conditions expérimentales identiques, un pion de cuivre frottant sur un disque d'alumine présente un coefficient de frottement type Coulomb de 0,2 qui s'élève jusqu'à 1,5 lorsque le pion est en alumine et le disque en cuivre.

Le contact peut être selon les géométries des corps :

- Ponctuel (sphère/sphère, sphère /plan,...)
- Linéaire (cylindre/plan)
- Surfaccique (rotule dans sphère)
- Conformel (cylindre/cylindre) ou contraformel (cylindre dans cylindre creux).

Le contact statique entre deux solides ne s'effectue donc pas sur la surface apparente commune aux deux solides, mais sur un ensemble de zones discrètes (aussi appelées aspérités) dont la somme des aires donne la surface réelle de contact. Dans le cas d'un frottement de glissement, les zones de contact sont sans cesse renouvelées.

Le rapport aire réelle sur aire apparente peut varier de façon significative : il est alors plus facile de raisonner en terme de force appliquée plutôt que de pression. La surface réelle de contact est sensible à la charge appliquée. De nombreuses études se sont intéressées à la

LA GEOMETRIE DES SURFACES

variation de l'aire réelle de contact en fonction du mode de déformation des aspérités : élastiques pour le modèle d'Archard (années 50), élasto-plastiques pour le modèle de Greenwood-Williamson (années 60).

-II.2.2 Etat topographique d'une surface :

La topographie est une caractéristique géométrique de grande importance (figure II.2). La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles. Il faut aussi garder à l'esprit qu'un état poli miroir ne correspond pas forcément à la rugosité idéale des surfaces pour conférer une vie saine au système tribologique. Par exemple, dans le cas de deux matériaux frottants de dureté différente, la diminution de la rugosité du corps le plus dur est une bonne solution pour diminuer le frottement et l'usure par abrasion alors qu'une certaine rugosité du corps le moins dur facilite la rétention d'un lubrifiant et limite également le frottement et l'usure par adhésion.

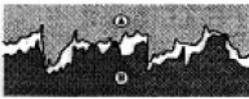
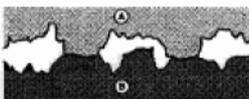
Effets		Schématisation du contact (rugosité, défauts de forme...)	Incidences prévisibles sur le frottement
Imbrication			<ul style="list-style-type: none"> - Résistance au déplacement - Déformations, ruptures... des aspérités
Déformations élastiques, plastiques	Cas général		<ul style="list-style-type: none"> - Modification de la topographie : rugosité portance... - Écrouissages
	Pénétration (dureté de A > dureté de B)		<ul style="list-style-type: none"> - Résistance au déplacement - Labourage de B par A - Transfert de B sur A
Adhésion			<ul style="list-style-type: none"> - Résistance au déplacement

Figure II.2 : rapprochement des solides : effets et conséquences [1].

-II.2.3 Profilomètre de surface :

La caractérisation d'une surface d'un échantillon est obtenue par des mesures profilométriques d'une zone représentative de cette surface. Ces mesures sont faites usuellement avec un profilomètre constitué d'une pointe de diamant, avec un rayon

d'extrémité de 2 μm , se déplaçant linéairement sur la surface [13]. Les mouvements verticaux et horizontaux de la pointe sont amplifiés et enregistrés.

-II.2.4. Paramètres de rugosité:

Deux paramètres de variation de hauteur z sont communément utilisés pour décrire la rugosité d'une surface : la valeur de rugosité moyenne R_a , définie comme la moyenne de la déviation verticale du profil par rapport à la ligne centrale et la valeur de la racine carrée moyenne de la rugosité R_q ou RMS, définie comme la racine carrée de la moyenne du carré des déviations [15].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l z^2 dx}$$

II.3 Présentation des défauts géométriques de différents ordres d'une surface :

- Ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2nd ordre),
- ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3ième et 4ième ordre).

II.4 Aspect géométrique des surfaces :

Les surfaces usinées sont jamais parfaites, elles présentent au contraire des défauts de toutes sortes dus aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc. on sait depuis longtemps que ces défauts influent profondément sur la tenue en service des mécanismes et la bonne exécution de leurs fonctions : guidage, étanchéité, ... quelque soit la qualité de la fabrication, il existe toujours une échelle suffisamment petite pour qu'ils soient mesurables.

-II.4.1 Les ordres de défauts :

On appelle «profil mesuré» l'exploration de la surface réelle par des instruments de mesure. Le degré d'approximation de la surface mesurée par rapport à la surface réelle dépend de la technique de mesure appliquée. De la précision de l'instrument de mesure utilisé.

Un palpeur sphérique explorant une surface vient successivement en contact avec les sommets des aspérités «saute de crête en crête». Pour mettre en évidence des défauts de plus en plus petits, il faut diminuer le rayon de ce palpeur, ainsi, l'enveloppe de ses positions successives et la trajectoire du centre du palpeur se rapproche du profil de la surface réelle.

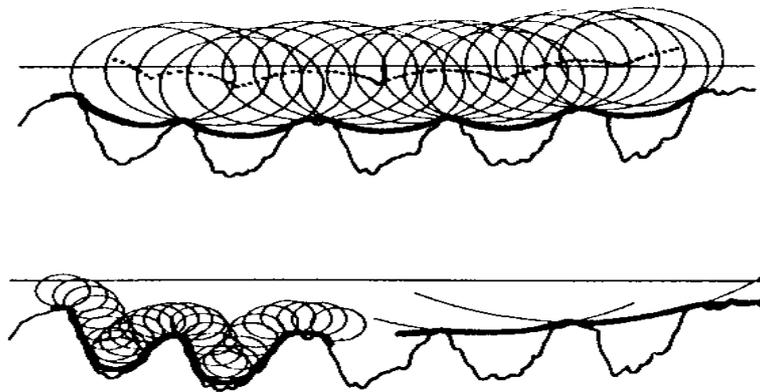


Figure II.3 : profils mesurés.

1^{er} ordre : écart de forme et de position : les défauts de planéité, cylindricité, parallélisme, perpendicularité se constatent avec un comparateur dont la touche de rayon R décrit une surface enveloppe appelée parfois surface apparente. On obtient l'écart du premier ordre par référence à la surface géométrique.

2^{em} ordre : ondulation : l'écart des positions des deux palpeurs coaxiaux, dont l'un est le palpeur de rayon R précédemment utilisé pour déterminer le défaut de forme et l'autre une sphère de très petit rayon r , possède généralement une longueur d'onde moyenne ou pas moyenne AW , dont l'ordre de grandeur est un petit nombre de millimètre. L'ondulation est oscillation de basse fréquence provenant essentiellement des imperfections des machines-outils.

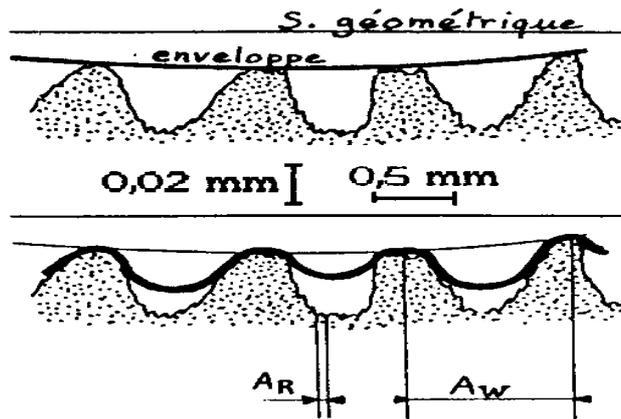


Figure II.4 : ondulation et rugosité de 3^{em} ordre

3^{em} et 4^{em} ordre : rugosité : ces micros ondulations, dues à des vibrations de haute fréquence, accompagnent le passage des outils coupants et l'enlèvement de la matière. Le 3^{em} ordre correspond à des séries ou sillons, défauts périodiques ou pseudopériodiques de pas AR voisin de 0,1mm, le 4^{em} ordre provient des arrachements qui sont apériodiques.

5^{em} et 6^{em} ordre : ils correspondent respectivement aux structures cristallines et moléculaires.

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

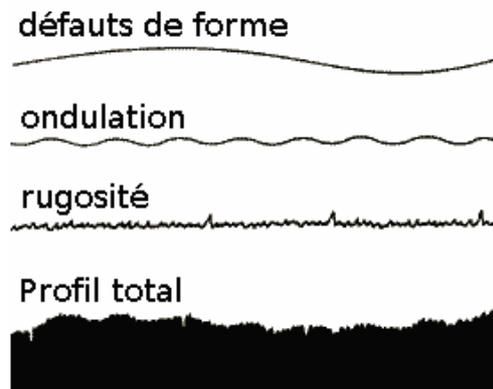


Figure II.5 : profil total [5]

-II.4.2 Caractéristiques du profil : [5]

Si on coupe normalement une surface par un plan, on obtient une couche appelée profil de surface, c'est à partir de ce profil qu'on analyse les différents défauts de la surface. (Figure II.6).

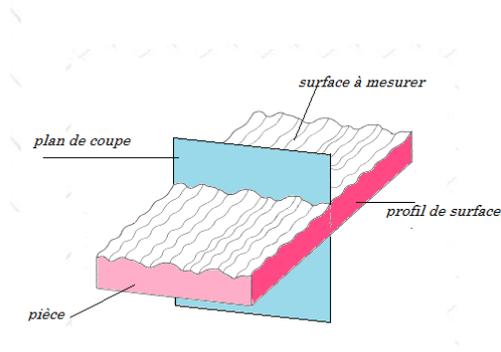


Figure II.6 : profil d'une surface

Longueur d'évaluation l_n :

Longueur, mesurée suivant la direction générale du profil.

Longueur de base l_r :

Partie de la longueur d'évaluation utilisée pour séparer les irrégularités du profil.

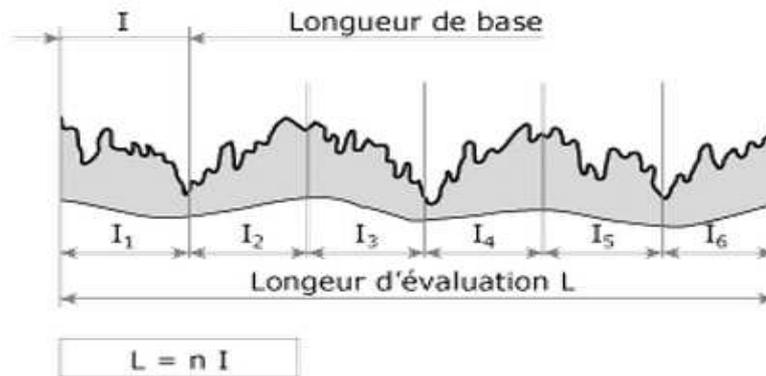


Figure II.7 : longueur d'évaluation et de base

Ligne enveloppe supérieure :

Segment de droite joignant les points les plus hauts de la saillie local du profil.

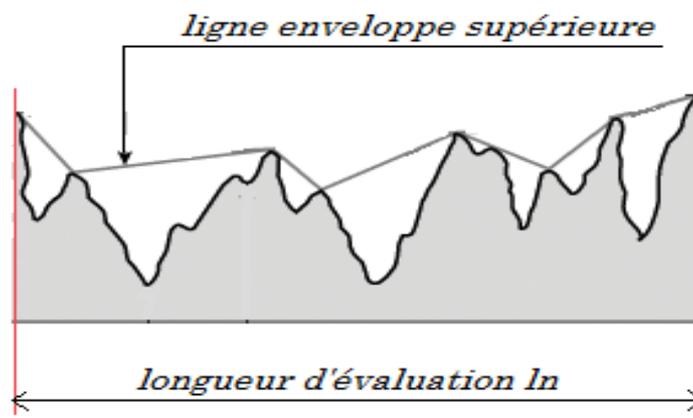


Figure II.8 : ligne d'enveloppe supérieure

Ligne moyenne :

C'est une droite ayant une direction générale du profil et qui divise le profil de telle sorte qu'à l'intérieure de la longueur de base, la somme des carrés des écarts de cette ligne soit minimale (ligne des moindre carrées).

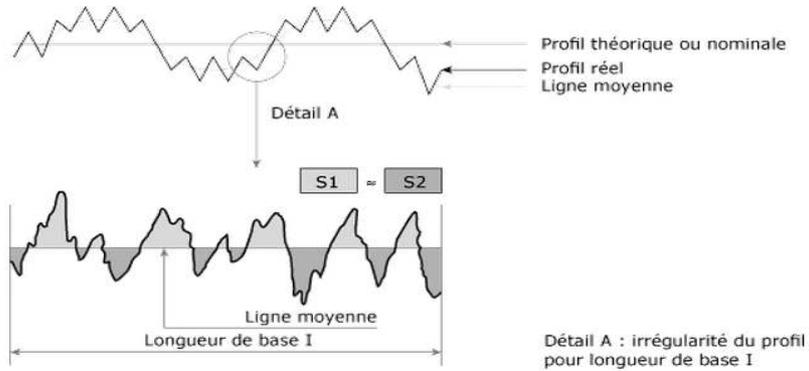


Figure II.9 : ligne moyenne

-II.4.2.1 Paramètres liés aux motifs :

Profondeur moyenne d'ondulations W :

C'est la moyenne des distances saillies creux des écarts du deuxième ordre.

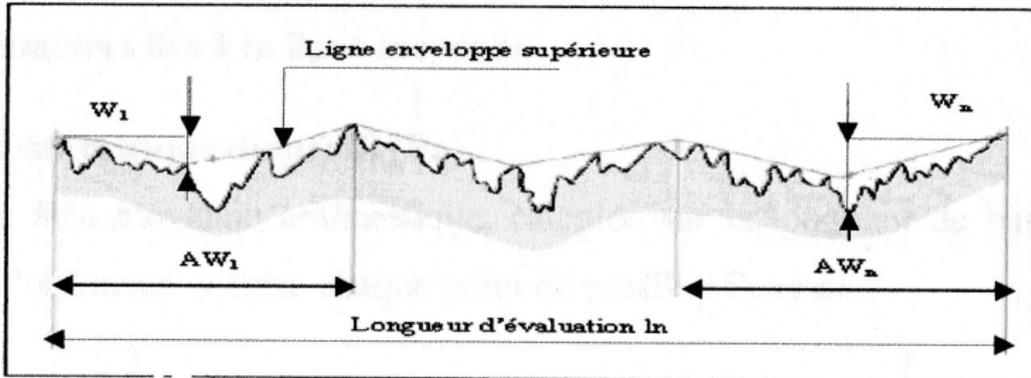


Figure II.10 : paramètres d'ondulation liés aux motifs

$$W \approx \frac{W_1 + \dots + W_n}{n} \text{ avec } n \geq 3$$

Pas moyen d'enduction AW :

C'est la moyenne des distances saillie-saillie des écarts du deuxième ordre.

$$AW \approx \frac{AW_1 + \dots + AW_n}{n} \text{ avec } n \geq 3$$

Profondeur moyenne de rugosité R :

C'est la moyenne des distances saillie-creux des écarts du troisième et quatrième ordre.

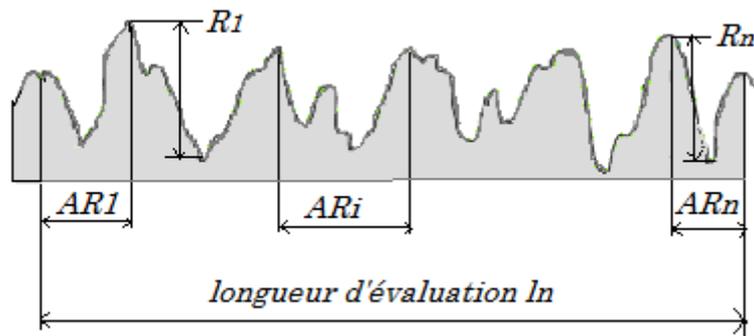


Figure II.11 : paramètres de rugosité liés aux motifs

$$R \approx \frac{R_1 + \dots + R_n}{n} \text{ avec } n \geq 8$$

Pas moyen de rugosité AR :

C'est la moyenne des distances saillie-saillie des écarts de troisième et quatrième ordre.

$$AR \approx \frac{AR_1 + \dots + AR_n}{n} \text{ avec } n \geq 8$$

-II.4.2.2 Paramètres liés à la ligne moyenne :

Ecart moyen arithmétique du profil (R_a)

R_a est égale à la moyenne arithmétique, calculé sur la longueur de base, de la valeur absolue de l'ordonnée Z entre chaque point du profil et l'axe OX .

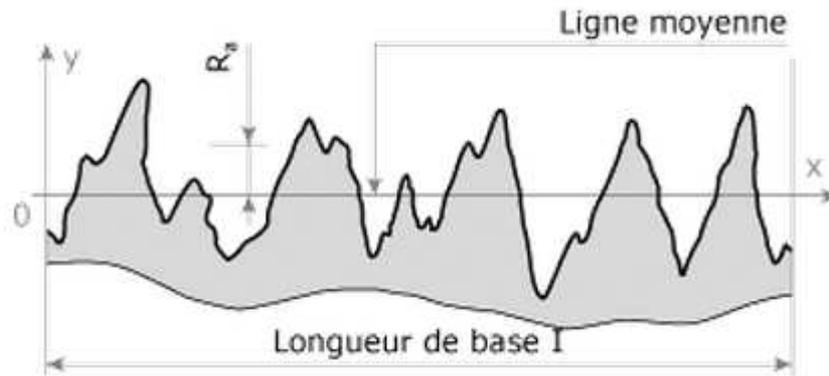


Figure II.12 : paramètres de rugosité liés à la ligne moyenne

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Z| dx$$

Hauteur maximale du profil Rz :

C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

Hauteur maximale des saillies Rp :

C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne moyenne.

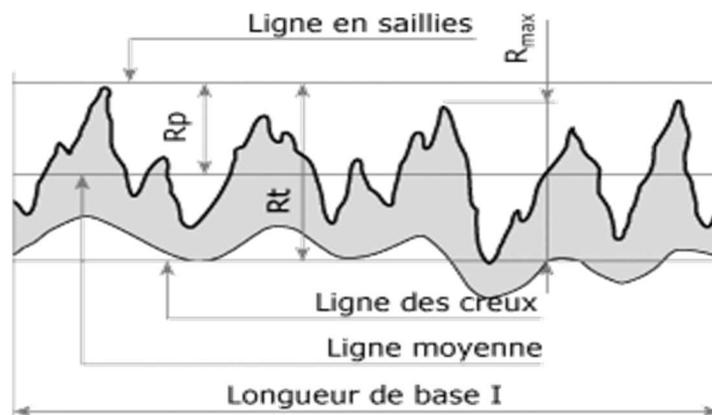


Figure II.13 : hauteur du profil

II.5 Pression de contact :

Les surfaces fonctionnelles utilisées en frottement sont uniquement des plans, des cylindres et des sphères.

Si les contacts théoriquement ponctuels comme celui d'une bille et d'un plan ou théoriquement linéique comme celui d'un cylindre monté dans un autre avec du jeu (palier

cylindrique), l'étaient vraiment, ils subiraient en charge des pressions infinies, ce qui est impossible. En fait, les charges sont supportées par des aires de contact très petites, dont l'étendue dépend de la géométrie locale et de l'élasticité des matériaux. A leur niveau, les pièces subissent des contraintes dues à l'effort normal et d'autres, qui se superposent aux premiers, dues aux efforts tangentiels.

Lors des contacts surfaciques, plan contre plan par exemple, les zones réelles d'appui sont très restreintes. Il y en a au moins trois non alignées et l'expérience montre que leurs comportements est très proche de celui d'un contact bille sur plan.

II.6 Conclusion :

Cette illustration met en évidence que la surface d'un corps est constitué de plusieurs couches constituées de multiples paramètres qui jouent un rôle très imposant dans l'étude des phénomènes tribologiques.

CHAPITRE III : LE FROTTEMENT

III.1 Introduction :

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, ingénieurs, des métallurgistes et physiciens.

Le frottement est défini comme la résistance au mouvement lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [15].

On appelle coefficient de frottement, μ , le rapport entre la résistance au frottement T et la force normale F appliquée entre les deux surfaces en contact :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N}$$

III.2 Caractéristiques physiques des frottements :

On distingue deux principaux types de frottements:

Le frottement sec et le frottement visqueux.

-III.2.1 Le frottement sec:

Le frottement sec est indépendant de la vitesse de glissement. Il se décompose en deux situations issues de la loi de Coulomb

Rappelons que 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 hauteurs plus ou moins variables, d'une géométrie plus ou moins variable. Ainsi lorsque les surfaces sont

LE FROTTEMENT

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. 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 : d'abord, les forces de frottement 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 sec statique : le frottement statique est une force (ou un couple) qui tend à garder un corps en état statique.

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 que, 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. Mathématiquement, le frottement statique \vec{f}_s est opposé à la composante tangentielle $F_{tangentielle}$ de la force appliquée et son intensité, est inférieure ou égale au coefficient de frottement statique μ_s multiplié par le poids apparent N :

$$\vec{f}_s \parallel - \vec{f}_{tangentielle}$$
$$f_s \leq \mu_s N$$

LE FROTTEMENT

Dès que la force tangentielle dépasse la valeur maximale du frottement statique, l'objet se met à glisser, entraîné par la force appliquée. Le même raisonnement peut se transposer dans le cas de couple de frottement.

- Frottement sec cinématique (dynamique):

Lorsqu'un objet glisse sur une surface, la force de frottement est appelée frottement cinétique. Ce frottement tend à ralentir l'objet. L'observation expérimentale montre que, en première approximation, l'intensité du frottement cinétique varie en fonction du poids apparent de l'objet et du coefficient de frottement cinétique, mais pas de l'aire de contact ni de la vitesse. Le coefficient de frottement cinétique, tout comme le coefficient de frottement statique, varie selon le type de matériaux en contact.

Mathématiquement, le frottement cinétique \vec{f}_c n'est plus nécessairement opposé à la composante tangentielle de la force appliquée (qui peut d'ailleurs devenir nulle), mais il l'est à la vitesse de l'objet, et son intensité est égale au coefficient de frottement cinétique μ_c multiplié par le poids apparent N .

$$\vec{f}_c \parallel -\vec{v} \quad |f_c| = \mu_c N$$

Corps en contact	μ_s	μ_c
Acier sur acier (sec)	0.78	0.42
Acier sur acier (gras)	0.10	0.05
Acier sur acier (surfaces polies)	100	100
Bois sur bois	0.5	0.3
Métal sur glace	0.03	0.01
Pneu sur route sèche	0.8	0.6
Pneu sur route mouillée	0.15	0.1
Téflon sur téflon	0.04	0.04
Cuir sur fonte	0.28	0.56

Tableau III.1 : Quelques exemples de coefficients de frottement statique et cinétique [8]

-III.2.2 Frottement visqueux :

Un frottement visqueux est une force (ou un couple) de frottement qui dépend de la vitesse relative des deux corps en mouvement. Il s'exprime différemment selon qu'il s'agisse du contact entre deux solides lubrifiés ou du déplacement d'un corps dans un milieu fluide qui

LE FROTTEMENT

concerne les contacts entre fluide et récipients et les contacts des couches de fluides entre elles.

III.3 Les différents types de frottements :

Lorsque deux solides A et B sont en contact figure III.1a, on peut distinguer deux types de frottement :

Si A et B glissent l'un par rapport à l'autre, il apparaît un frottement de glissement figure III.1b, lorsque A roule sur B figure III.1c, on parle de frottement de roulement. Quand un corps se déplace dans un fluide (un gaz ou un liquide), on parle de frottement visqueux ou frottement fluide figure III.1d [6]. En générale le contact entre deux corps aux surfaces rugueuses provoque une grande force de frottement qui joue le rôle d'obstacle, et freine le mouvement relatif entre les deux surfaces.

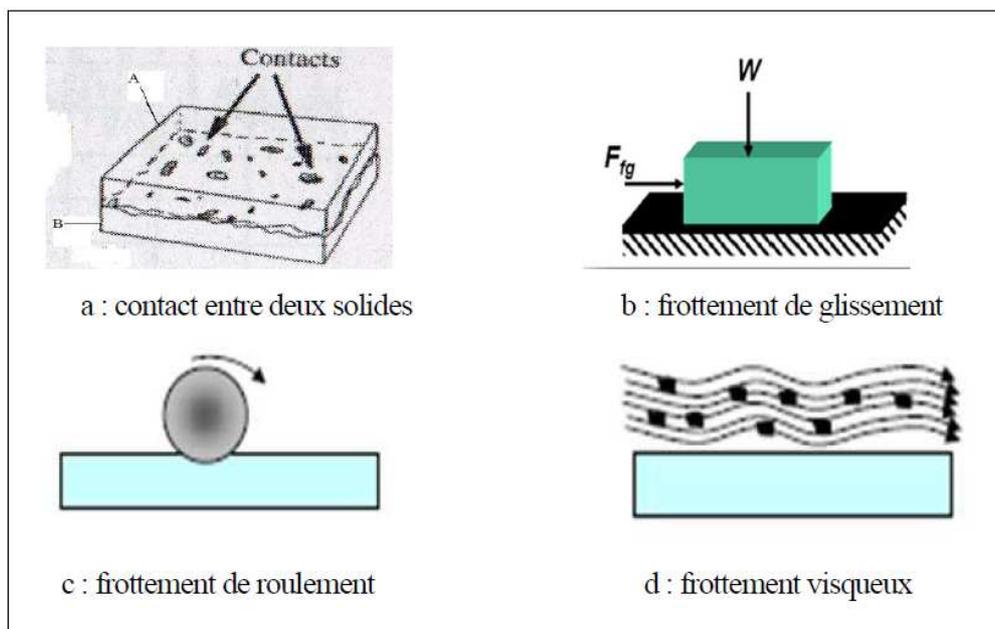


Figure III.1 : Différents types de frottement [6]

III.4 Lois empiriques de frottement :

Léonard de Vinci (1452-1519) fut le premier à faire une approche scientifique du frottement. Il étudie les principes et élabore, en 1508, deux énoncés :

- Le premier stipule que la force que l'on doit appliquer pour permettre le glissement est proportionnelle à la charge.

LE FROTTEMENT

- Le second énoncé mentionne que la force de frottement est indépendante de l'aire de contact.

En 1699 Guillaume Amontons tire les mêmes conclusions que de Vinci et il a énoncé deux lois. Une des lois d'Amontons s'énonce comme suit :

- La force de frottement F_t est proportionnelle à la charge normale F_n permettant de définir un coefficient de frottement μ .

Charles Coulomb en 1785 a postulé que :

- La force de frottement est en général indépendante de la vitesse de glissement.

Cependant il faut noter, comme l'indique le titre, que ces *lois de frottements* sont de nature empirique et qu'à ce jour il n'existe pas de lois de frottement basées sur des principes physiques et aucun principe fondamental de la physique n'est violé dans le cas où ces lois ne sont pas respectées.

III.5 Théories du frottement :

Le modèle classique du frottement par glissement admet que la force de frottement résulte de deux sources : une force d'adhésion et une force de déformation au niveau des aspérités des surfaces. Les aspérités en contact microscopique de la plupart des surfaces réelles sont déformées plastiquement sous la charge jusqu'à ce que la surface de tous les contacts soit suffisante pour supporter les charges. Avec cette hypothèse on peut écrire l'égalité suivante :

$$A \cdot P_0 = F_N$$

Où A est la surface apparente du contact, P_0 , la pression de transition plastique du matériau en contact. Pour tenir compte de la déformation nécessaire au labourage par les aspérités, on introduit le terme P_e à la force de frottement F_T , c'est-à-dire :

$$F_T = A \cdot T + P_e$$

Avec :

T : l'effort tranchant nécessaire à la rupture des jonctions formées du contact.

P_e : peut être négligeable en première approximation. On peut écrire :

$$F_T = A \cdot T = \frac{F_N \cdot T}{P_0} = \mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{T}{P_0}$$

LE FROTTEMENT

μ est le coefficient de frottement qui est une propriété du système tribologique.

Si une force tangentielle F_T est appliquée un écoulement plastique supplémentaire surviendra, ce qui provoque une augmentation additionnelle de l'aire de contact par la suppression de la contrainte normale tangentielle. Le contact résulte sous ces forces ou contraintes sera de la forme :

$$A^2 = \left(\frac{F_N}{P_0}\right)^2 + \alpha \left(\frac{F_T}{P_0}\right)^2$$

Où F_N/P_0 est l'aire dérivée du modèle simple ne considérant que l'effort de la charge normal et le terme $\alpha \left(\frac{F_T}{P_0}\right)^2$ représente la contribution de la force de frottement ou de cisaillement.

Beaucoup de matériaux ont un mince film contaminé à la surface qui possède une contrainte critique de cisaillement T_F différente de celle du reste du métal de masse. Donc on peut écrire $T_F = C \cdot T_{max}$ où T_{max} désigne la contrainte critique de cisaillement de la masse du métal et C un paramètre inférieur à 1. Le film de métal cisillera lorsque $F_T = T_F(A)$ dans ce cas peut prendre la forme suivante :

$$\mu = \frac{C}{\sqrt{\alpha(1 - C^2)}}$$

Dans le processus d'abrasion les aspérités du matériau le plus dure pénètrent dans le matériau le plus doux et ça par labourage majeur. En prenant une aspérité qu'on assimile à un cône de demi-angle θ on peut obtenir la formule :

$$\mu = \frac{2}{\pi} * \cot g(\theta)$$

Cette dernière est semblable à celle d'un plan lisse.

D'autres chercheurs ont fait intervenir l'énergie de surface.

III.6 La difficulté dans la détermination du coefficient de frottement:

Une étude qui a été faite et dirigé par le JIFT 2006 (journées internationales francophone de tribologie), elle avait comme but « d'étudier l'influence de la dynamique de chargement sur le comportement tribologique du contact » qui nous a permis d'avoir une autre vision vis avis les

LE FROTTEMENT

résultats qu'on obtient dans nos propres essais tribologiques et bien comprendre la difficulté dans la 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 chaque un 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. Il montre ainsi 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 concluants. Figure III.2 [7].

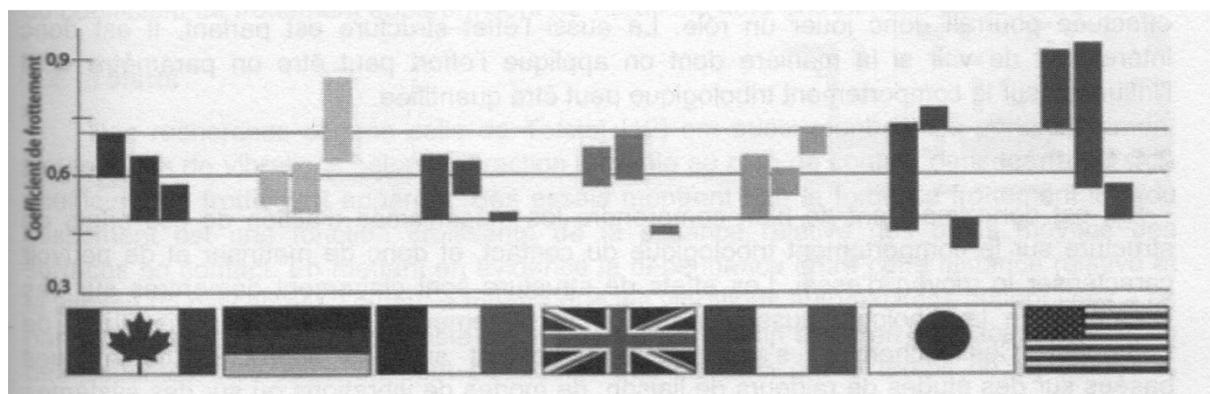


Figure III.2 : VAMAS Round-Robin, résultat pour un test de frottement :
Coefficient de frottement pour un couple (acier/acier) [7].

-III.6.1 Comportement du coefficient de frottement :

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

LE FROTTEMENT

-III.6.1.1 Vitesse de glissement:

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

On distingue :

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

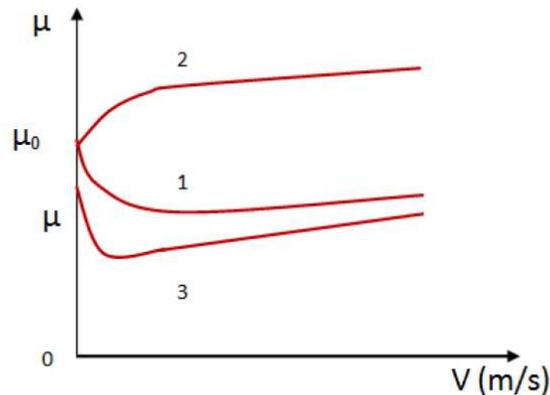


Figure III.3 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement [8].

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure III.3, 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 III.3).

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.

-III.6.1.2 Chemin de glissement parcouru :

LE FROTTEMENT

La (figure III.4) représente l'allure de l'évolution du coefficient de frottement dynamique de surfaces techniques sèches avec le chemin de glissement.

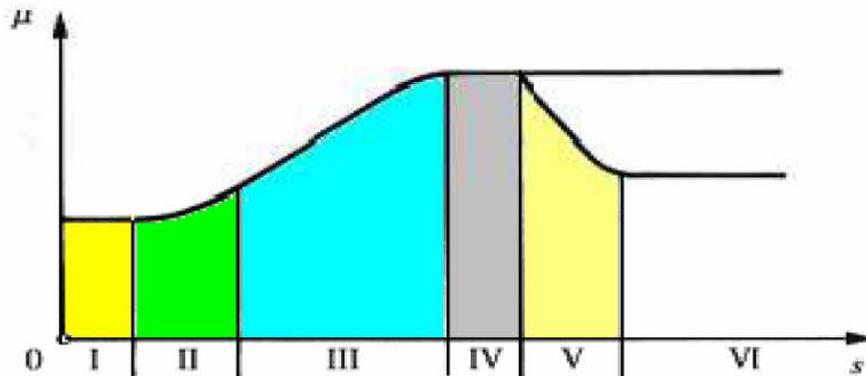


Figure III.4 : Evolution du frottement avec la distance de glissement. [8]

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

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

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

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

V : On observe parfois qu'un matériau dur se polit lorsqu'il frotte contre une surface tendre. Le coefficient de frottement diminue parce que le labourage est moins intense.

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

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

-III.6.1.3 Etat de surface :

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

-III.6.1.4 Nature des métaux :

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

-III.6.1.5 Charge normale appliquée :

La figure III.5 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.

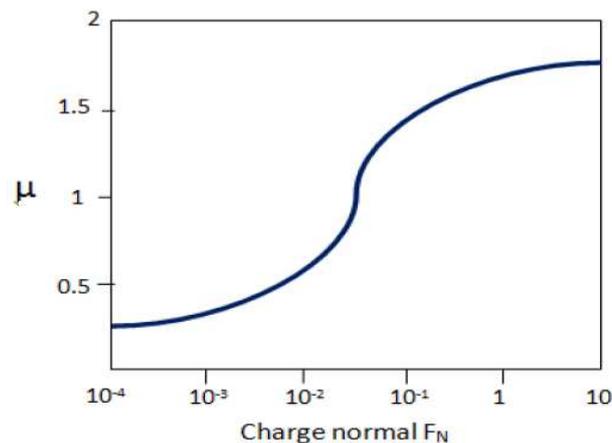


Figure III.5 : Variation du coefficient de frottement μ en fonction de la charge normale F_N [8].

Avec l'augmentation de la charge appliquée, le film d'oxyde (1à10nm) 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.

-III.6.1.6 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

LE FROTTEMENT

de contact tendent vers une plastification étendue. Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement (400 à 600 °C), puis diminue au-delà. [6]

-III.6.2 Importance du coefficient de frottement :

Le coefficient de frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs (F_n , V , et μ), correspondant respectivement à la charge, à la vitesse et au coefficient de frottement [9]. Le champ des contraintes mécaniques superficielles augmente dangereusement avec l'accroissement du coefficient de frottement. Sauf dans le cas particulier de l'utilisation positive du frottement, par exemple pour accroître les caractéristiques d'adhérence entre deux corps (mécanismes d'engrènement, assemblage frettés, ...) ou pour absorber de l'énergie (freinage), on cherche donc à abaisser le plus possible le coefficient de frottement. La maîtrise du coefficient de frottement est un critère déterminant pour la fiabilité et la sécurité de fonctionnement de certains composants tels que les assemblages frettés, vissés. Ainsi le rôle de certains traitements de surfaces est principalement dévolu au contrôle des couples de serrage sur les éléments de visserie, de boulonnerie.

-III.6.3 Valeurs pratiques du coefficient de frottement :

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

Le coefficient de frottement d'un métal glissant sur un autre sans lubrification dans l'air varie de

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

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

LE FROTTEMENT

valeur du coefficient de frottement est relativement élevée ($\mu \approx 1$) pour de faibles charges ($F_n < 10^{-3} N$).

La valeur de μ s'abaisse pour une charge $F_n > 10^{-2} N$ ($\mu \leq 0,5$). 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 $\mu = [0,2 ; 0,4]$. Le tableau III.2 suivant donne des valeurs des coefficients de frottement de glissement pour quelques combinaisons de matériaux. [10]

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 III.2 : Valeurs des coefficients de frottement de glissement. [10]

III.7 Causes et effets du frottement :

Les causes de la résistance au glissement (frottement) sont dues :

- d'une part aux irrégularités des surfaces en contact, ce qui détermine un enchevêtrement des aspérités; d'où la nécessité d'un effort tangentiel pour franchir où creuser ces aspérités (figure III.6).

LE FROTTEMENT

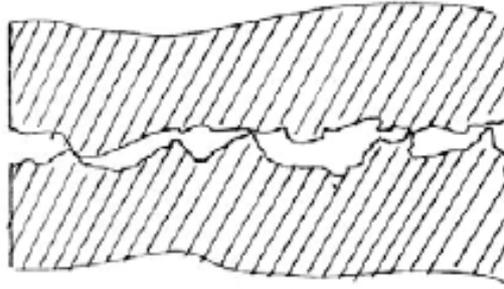


Figure III.6 : l'irrégularité des surfaces en contact

- d'autre part, l'étendue réelle des surfaces en contact étant réduite à quelques zones où la pression est très forte, il en résulte une déformation importante et une véritable soudure à froid dans le cas de deux métaux (figure III.7). La force de traction doit cisailer les zones de jonction qui se sont ainsi formées. Il y a donc arrachement de particules et élévation de température

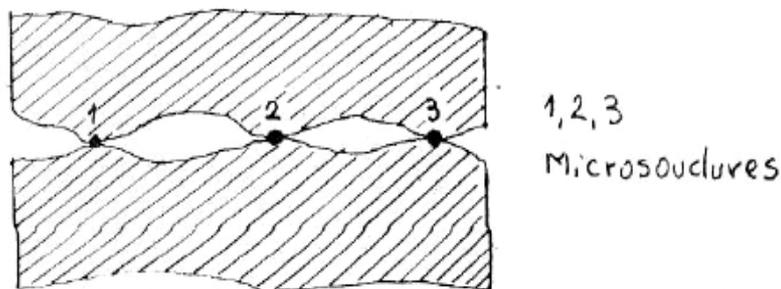


Figure III.7 : Microsoudures créées au niveau du contact

- et enfin lorsque les surfaces de frottement ont subi un polissage très poussé, la résistance au glissement est encore notable; les forces d'attraction moléculaire jouent donc un rôle important.

Donc les forces de frottement procèdent de deux origines distinctes :

a. Lorsque, même à faible charge, deux surfaces rugueuses se déplacent l'une par rapport à l'autre, leurs aspérités s'entrechoquent et il faut développer un effort important pour perpétuer le mouvement (tant que les surfaces ne sont pas rodées).

b. Deux surfaces polies pressées l'une contre l'autre ont tendance à adhérer l'une sur l'autre et à se souder l'une à l'autre lors d'un déplacement faible, même sous l'effet d'une charge faible. Si les surfaces sont parfaitement polies et propres, l'absence d'une couche d'air interfaciale conduit à un contact généralisé et à un effort de frottement considérable (cas de deux vitres parfaitement nettoyées avec un solvant volatil). Les attractions intermoléculaires

LE FROTTEMENT

provoquent alors un coefficient de frottement supérieur à 100 et il faut exercer un effort d'une tonne-force pour déplacer une masse de 10 Kg.

Les effets du frottement sont considérables dans les machines et diminuent par conséquent leur rendement car une partie de l'énergie motrice est utilisée pour vaincre les frottements. Le travail utile W_u est inférieur au travail moteur W_m d'où : le rendement : $W_u / W_m < 1$.

Les effets du frottement ont des conséquences majeures sur l'échauffement et risque de grippage. L'énergie mécanique dépensée pour vaincre le frottement se transforme en énergie calorifique en provoquant l'échauffement des surfaces en contact et qui peut conduire à la dilatation des pièces, modification du jeu entre pièces (par exemple : le cas d'un alésage et d'un arbre, la dissipation de cette chaleur étant en général plus rapide. Pour l'alésage que pour l'arbre; le jeu fonctionnel subit une réduction si l'échauffement est trop important, il peut se produire un blocage de l'arbre dans l'alésage par grippage (microsoudures au point de contact).

L'échauffement peut conduire aussi à la modification des propriétés des matériaux. Les effets du frottement peuvent entraîner aussi l'usure des pièces en contact, tel que l'arasement des aspérités des surfaces en contact, l'arrachement des microsoudures aux points de contact, l'abrasion des surfaces par les particules arrachées etc. Donc il en résulte un enlèvement de matière et une modification du jeu initial, quelques fois de la forme (ovalisation).

-III.7.1 Réduction du frottement et de l'usure :

Maîtriser la grandeur et l'effet du frottement sur le comportement des pièces en contact entraînera une protection contre l'usure adhésive générée de ce contact. Pour réduire le frottement on peut ainsi agir soit :

1. Sur la conception technologique et géométrique :

Elle consiste à diminuer les échauffements inter-faciaux et à veiller sur les concepts technologiques suivants :

- Réduction du risque de grippage.
- Réduction des pressions de contact et de vitesse.
- Refroidissement convenable des surfaces.
- Amélioration de l'état de surface.

2. Interposition d'un film lubrifiant

La deuxième possibilité de protéger les deux surfaces antagonistes contre l'usure adhésive est l'interposition entre les deux surfaces un film lubrifiant ou autolubrifiant à faible résistance au cisaillement.

III.8 Choix des matériaux :

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

- Propriétés mécaniques : dureté, limite d'élasticité, résistance à la compression, au fluage, à la fatigue, résilience, aptitude au vieillissement et amortissement des vibrations et des chocs.
- Propriétés physico-chimiques : masse volumique, température limite d'utilisation, coefficient de dilatation, conductivité thermique, conductivité électrique, résistance à l'oxydation et à la corrosion et aptitude aux traitements.
- Facilité du rodage, résistance à l'abrasion, à l'adhésion et aux propriétés anti-usure, grippage, à la corrosion de contact, à l'érosion, à la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.
- Propriétés techniques : facilité de mise en œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, auto-réparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident ;
- Comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,
- Propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités 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.

III.9 Frottement des métaux :

Les surfaces métalliques propres, placées dans le vide ou des atmosphères, présentent généralement une adhésion marquée. L'absence de contaminations fait que des liaisons inter-

LE FROTTEMENT

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). [11] 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.

III.10 Frottement des polymères :

Les polymères sont utilisés dans un grand nombre d'applications, où la résistance à l'usure et à la corrosion, la légèreté, la facilité de mise en œuvre et de maintenance, le coût, sont les critères principaux qui orientent le choix. Proposés par les firmes spécialisées sous forme de poudre, paillettes, granules, bondes, ils peuvent être mis en forme par moulage, extrusion ou usinage, ce qui facilite la mise en œuvre de composant tribologique élémentaire : coussinets, engrenages, composant de roulement. De plus, il est relativement facile de leur associer des charges métalliques, minérales ou organiques, sous forme de poudre, fibres ou tissus, qui améliorent à la fois leurs propriétés mécaniques, thermiques ou tribologiques : métaux

LE FROTTEMENT

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.

III.11 Frottement des céramiques :

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

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

III.12 Conclusion:

Tous ce que nous avons pu mettre au point sur le frottement dans ce chapitre nous a dévoilé que le frottement est un phénomène compliqué malgré la simplicité des ces lois. Ces dernières sont en fonction d'un grand nombre de facteurs (état de surface, dureté, milieu de fonctionnement, la vitesse, la charge, température, la lubrification...). Ces facteurs dépendent

LE FROTTEMENT

aussi de plusieurs autres paramètres plus complexes sachant que le frottement n'est pas une propriété intrinsèque au matériau, par conséquent les données statiques et cinétiques du coefficient de frottement énumérées dans les tables ne devraient pas être appliquées aux situations considérablement différentes de celles employées pour les obtenir.

CHAPITRE IV : L'USURE

IV.1 Introduction:

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

Avec le frottement l'usure est un vaste domaine couvert par la tribologie. Il existe certes des théories de l'usure, mais de nombreux effets sont inexpliqués. L'usure détruit les surfaces fonctionnelles des surfaces et cause avec la corrosion, d'énormes pertes. On est toujours intéressé à réduire, voir supprimer l'usure pour prolonger la vie d'une machine. La prévention de l'usure repose essentiellement sur l'expérience acquise dans l'exploitation industrielle.

IV.2 Les paramètres influant sur le taux d'usure:

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

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

IV.3 Les origines de l'usure:

- Les déformations plastiques;
- La fissuration;
- Les transformations physicochimiques des surfaces;
- L'adhésion : grippage, micro grippage.

IV.4 Différents types d'usure:

-IV.4.1 L'usure adhésive:

La théorie de l'usure d'adhésion a été développée par Archad. C'est quand deux corps en contact forment sur leurs surfaces des soudures froides appelées jonctions. Pour réaliser le mouvement relatif, ces jonctions doivent être cisailées.

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

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

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

-IV.4.1.1. Paramètres influençant 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;
- d'entraîner la fusion des couches superficielles. La prise en compte de l'action combinée de la vitesse et de la pression de contact peut être réalisée d'une manière empirique par l'utilisation du produit PV (*pression* \times *vitesse*) ou plus exactement μPV qui exprime la puissance spécifique générée dans le contact. En dépit des imprécisions introduites par la méconnaissance partielle de certains paramètres (partage des flux thermiques notamment), ces quantités peuvent être considérées comme des indicateurs du comportement d'un composant tribologique. On peut admettre par exemple les limites en PV suivantes:
 - $1 W/mm^2$ pour le frottement sec de matériaux de friction classique,
 - $0,4 W/mm^2$ pour le frottement sec des céramiques,
 - $1,5$ à $2 W/mm^2$ pour le frottement de composites polymères + lubrifiants solides.
- 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.

-IV.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. 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 : trempé, cémentation, nituration, carbonituration ...

-IV.4.2 L'usure abrasive:

L'abrasion est l'opération mécanique consistant à enlever le matériel sur une surface par des phénomènes de micro-coupe. 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 micro-coupures dans une ou dans les deux surfaces figure (IV.1).

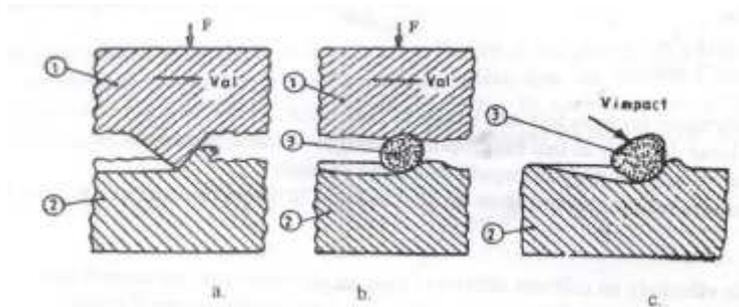


Figure IV.1 : Différents types d'usure par abrasion

-IV.4.2.1. Paramètres influençant l'usure par abrasion :

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

- Dimension et morphologie de l'abrasif: l'intensité de l'usure abrasive croit 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 croit, l'usure a tendance à croître

-IV.4.2.2 Prévention:

L'abrasion est une usure typique des systèmes télescopiques : tiges de vérins, broches de machines outils, certains paliers ... Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne

étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, 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.

-IV.4.3 L'usure par fatigue de contact :

Le phénomène de fatigue (figure : IV.2) est dû au contact de deux corps ayant un mouvement relatif présente une importance à l'échelle macroscopique et microscopique.

L'usure par la fatigue macroscopique est produit pour des corps de géométrie quelconque spécifiques au tribo-systèmes pouvant appliquer un roulement avec et sans glissement.

La fatigue microscopique apparaît au contact des rugosités des surfaces en glissement

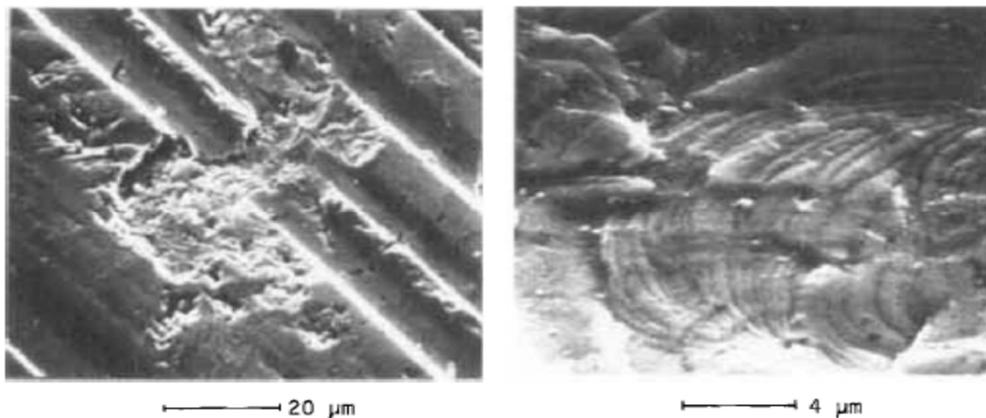


Figure IV.2 : Apparence d'une surface endommagée par fatigue. [2]

-IV.4.3.1 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.

-IV.4.3.2 Fatigue thermique:

Certaines configurations de contact, notamment celles où le taux de glissement est important, peuvent être soumises à des flux thermiques élevés pendant des temps très courts. Les gradients thermiques qui en découlent font apparaître, même pour des chargements mécaniques faibles. Les contraintes élevées engendrées par les dilatations et contractions thermiques locales successives sont certainement un des moteurs de cette fissuration.

-IV.4.3.3 Facteurs influençant la fatigue de contact:

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

-IV.4.4 L'usure de corrosion :

Lorsque le couple de frottement est utilisé dans un milieu corrosif, des réactions se produisent sur l'une ou les deux surfaces de couple de frottement ; elles ont un rôle protecteur pour la surface. Souvent les couches dues aux réactions sont enlevées par frottement de sorte que le processus corrosif peut se répéter.

-IV.4.4.1 Paramètres influençant l'usure corrosive :

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

- La corrosion des installations chimiques (acides), des huiles dégradées thermiquement à un fort niveau d'acidité, par la présence d'eau dans l'huile;

- La présence de rouille est un cas particulier de corrosion dû à l'O₂ s'il y a présence d'eau dans l'atmosphère;
- La tribo-corrosion est le résultat de l'enlèvement de la couche de corrosion chimique sous une action mécanique.

-IV.4.4.2 Prévention :

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

-IV.4.5 l'usure par érosion:

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

-IV.4.5.1 formes particulières de l'usure érosive :

a) L'érosion fluide

- Erosion d'impact : est due aux contraintes qui existent sur la surface d'un corps solide lors du contact avec le jet de fluide. Ces contraintes peuvent atteindre des valeurs suffisamment grandes pour provoquer des fissures ; ces dernières s'agrandissent et conduisent au détachement des particules du matériel ;
- Les phénomènes de cavitation : qui apparaissent sur les surfaces des couples de frottement sont présents sous différentes formes ; ils peuvent conduire au détachement de matériel.

b) L'érosion solide

L'érosion solide est due au passage d'un courant de fluide sur la surface du solide ; ceci provoque un déplacement de particules du solide.

IV.5 Propriétés tribologiques des revêtements polymère :

L'intérêt de revêtements composites à limiter l'usure ou améliorer le frottement, est soutenu par de nombreuses études. Indiquant l'étude faite par [Laurent BOISSONNET,

Benjamin DUFFAU, Pierre MONTMITONNET] qui s'est intéressée sur l'évolution couplée du frottement et de l'usure dans un contact entre une surface métallique dans un revêtement polymère, leurs étude s'intéresse aux relations entre frottement et usure pour un assemblage polymère – métal caractérisé par un contact sous haute pression(localement, plus de 500 MPa), mais à basse vitesse (quelques mm.s⁻¹) et avec une faible longueur de glissement (inférieure à 10 mm). Pour simuler ce contact, des essais tribologiques bille – plan en régime linéaire alternatif ont été mis au point, sous deux formes duales : le revêtement « usable », polymère, est soit en contact permanent (bille revêtue sur tôle métallique plane et rugueuse), soit en contact transitoire (bille métallique rugueuse sur tôle plane revêtue de polymère). Leurs résultats mènent à conclure que dans les deux cas, le frottement augmente fortement à partir d'une certaine longueur de glissement, puis se stabilise. En observant les surfaces en microscopie optique et électronique, on montre qu'une forte usure du polymère se produit, et que les particules d'usure se déposent pour une grande part dans la rugosité de la surface métallique. Les observations montrent que ce piégeage de particules d'usure est la cause principale de l'augmentation du frottement. Un paramètre essentiel est la rugosité du métal, dont l'usure et la croissance du frottement sont des fonctions croissantes.

La croissance du frottement est modélisée sur la base du concept de troisième corps et d'un bilan de la circulation des particules d'usure. La comparaison aux courbes expérimentales de frottement montre la pertinence de ces modèles (Figure : IV.3) [13].

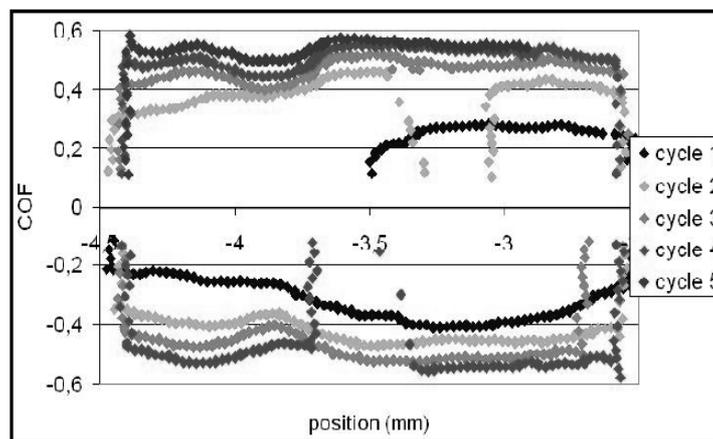


Figure IV.3 : coefficient de frottement (COF) au cours de 5 cycles.

$F_n = 10 \text{ N}$, $V_g = 1 \text{ mm.s}^{-1}$. $R_{\text{amétal}} = 0,4 \text{ }\mu\text{m}$. [13]

-IV.5.1 Usure d'interaction :

La source de nombreux problèmes rencontrés par les industriels réside dans le fait que les constituants fibres et matrice étant choisis avec soin et soumis à des contrôles précis,

l'interface issue de leur interaction échappe en partie aux efforts d'analyse et de prévision. En peut mettre en jeu des méthodes micromécaniques de caractérisation de l'interface fibre ensimée/résine : déchaussement d'une goutte de résine, déchaussement d'une microindentation.

Les résultats de ces essais permettent d'optimiser le choix d'un ensimage, ils ne semblent pas utilisables pour prévoir par le calcul le comportement d'un composite. L'examen microscopique des fibres rompues montre qu'en général la surface d'adhérence, c'est-à-dire celle où subsistent des éléments de matière attachés à l'ensimage correspond à une faible partie de la surface latérale de la fibre.

-IV.5.2 Usure par fatigue des composites :

L'usure par fatigue des composites tient à la formation des délaminages dans les couches externes du composite, en se propageant ensuite à l'intérieur jusqu'à rupture. Le drapage du composite, la nature de la résine et des fibres ont donc un rôle important à jouer. Toutefois, leur résistance à la fatigue varie selon les fibres, la résine, le drapage et l'efficacité de l'ensimage. On ne peut pas aborder la fatigue des matériaux composites sans tenir compte de l'effet de l'endommagement dû aux impacts de faible énergie sur l'amorçage de la rupture par fatigue. Toutes proportions gardées, le rôle des impacts dans la fatigue des composites peut être comparé à celui des rayures d'usinage à la surface des matériaux métalliques.

En particulier, les chocs de faible énergie provoquent des délaminages à l'intérieur des composites qui peuvent se propager sous sollicitation cyclique. Ce phénomène est d'autant plus dangereux qu'aucune manifestation d'endommagement préliminaire n'apparaît à la surface du composite impacté.

-IV.5.3 Usure par délaminage:

L'endommagement par délaminage se traduit par une décohésion plane interfaciale qui produit un dédoublement du composite, dans son épaisseur.

Ce type de dommage plan qui se propage selon un front, sous des sollicitations de traction et de cisaillement.

Le délaminage se progresse essentiellement par fissuration inter laminaire, responsable du dédoublement du matériau composite dans son épaisseur, mais il est associé également à un

réseau très important de fissures inter laminaires qui dépend du drapage. Dans les composites à fibre de carbone stratifié, on observe perpendiculairement au plan de délaminage de longues fissures inter laminaire dans les plis à 0°C. Ces fissures apparaissent un peu en avant du front de délaminage sous l'action du tri-axialité des contraintes avant toutes décohésions à l'interface des plis. Il semble donc que le délaminage proprement dit résulte d'un endommagement préalable de la résine en avant du front, entraînant d'abord la formation de fissures inter laminaires dans une zone.

IV.6 mécanisme d'usure des polymères:

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

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

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

IV.7 Lois d'usure :

De nombreux auteurs [15] ont dénombré plus de 300 lois relatives au frottement et à l'usure sur une période allant de 1947 à 1992. Ils remarquent que beaucoup de lois sont dérivées des méthodes de la mécanique des solides en incluant les propriétés des matériaux, des quantités thermodynamiques ou bien encore des variables supposées fondamentales pour les auteurs de ces lois. Ils arrivent à un classement chronologique de ces lois en trois catégories :

L'USURE

-Les lois à caractère empirique ont vu le jour entre les années 1950 et 1970. Elles prennent en compte principalement des paramètres relatifs aux conditions de tests. Il est impossible de transposer de telles lois à d'autres essais que ceux pour lesquels elles ont été établies.

Les lois basées sur la mécanique du contact sont apparues principalement entre les années 1970 et 1980. Certaines d'entre elles tiennent compte des propriétés des matériaux. Un des précurseurs les plus connus est J.F. Archard qui a défini l'usure de la manière suivante [15] :

$$W = K_A \frac{dP}{HB} \longrightarrow (1)$$

Où W : le volume perdu exprimé en m^3 , K_A une constante mesurée expérimentalement (coefficient d'usure), d la distance (m) parcourue pendant le glissement, P est la charge appliquée (N) et HB est la dureté du matériau (N/m^2). Le rapport P/HB introduit une grandeur qui fait intervenir les effets de structure. La simplicité de ce modèle traduit également ses limitations. Par exemple, pour un même couple de matériaux testés dans différentes conditions de charge et de vitesse, le coefficient d'usure K_A peut varier dans un rapport 100.

Le coefficient d'usure de proportionnalité K_A est utilisé souvent pour séparer l'usure douce de l'usure sévère. Ce coefficient compris entre 10^{-4} et 10^{-9} peut apparaître satisfaisant pour les chercheurs et il dépend des conditions géométriques et thermodynamiques lors du contact. [15].

- Enfin, les lois basées sur les mécanismes d'endommagement se sont développées depuis les années 1980. Elles incluent les mécanismes des dislocations, les propriétés en fatigue, la rupture en cisaillement.

La principale limitation précisée par ARCHARD est oublié par les utilisateurs et que cette loi ne considère que l'usure par adhésion.

Une seconde forme faite intervenir la nature du matériau le plus mou par l'intermédiaire de sa contrainte d'écoulement σ_y et la surface S du contact.

$$W = K_A \frac{PS}{\sigma_y}$$

Il a été montré que la loi d'ARCHARD peut être étendue à d'autres mécanismes, en glissement dominant.

L'USURE

Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation (1) peut s'écrire :

$$V = K \cdot W$$

Où K : est égal à $\frac{K}{H}$

W : est égal à $\|P\| \cdot L$

W a la dimension d'un travail. Par convention, il est appelé "travail d'usure". Dans le cas où la force normale de contact varie au cours du temps (par exemple, dans une situation d'impacts-glissements, $\|F_n\|$ présente de très fortes variations de courte durée lors des chocs), la définition de W devient :

$$W = \int_{t_0}^{t_1} \|P\| * \|V_t\| \cdot dt$$

Où :

W : Travail d'usure,

$\|F_n\|$: Module de la force normale au cours du contact,

$\|V_t\|$: Module de la vitesse de glissement au cours du contact,

t_0 : Instant de début du calcul,

t_1 : Instant de fin du calcul.

Dès lors, par analogie avec les lois usuelles de la mécanique, il est possible de définir une "puissance d'usure" en posant :

$$P = \|F_n\| * \|V_t\|$$

Où :

P : Puissance d'usure

Dans le cas où un régime stationnaire est atteint, la puissance d'usure est supposée constante au cours du temps.

Une autre loi d'usure d'ARCHARD de forme linéaire et qui fait intervenir le temps t désiré pour évaluer l'usure et sous forme :

$$V = K * P * t$$

L'USURE

Le coefficient K est fourni par l'utilisateur ou il est pris dans une base de données. Il est différent pour les deux corps en présence et dépend des conditions géométriques et thermodynamiques dans le contact. L'intervalle de temps t utilisé pour le calcul de l'usure ne correspond pas au temps de simulation effectif mais à l'intervalle de temps sur lequel l'utilisateur désire évaluer l'usure.

Une autre forme dérivée de la première loi fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact par le biais du produit PV en MPa.m/s (pression multipliée par la vitesse de glissement) proportionnelle à la vitesse d'usure $\frac{dh}{dt}$ (h étant la profondeur de la piste d'usure).

$$\frac{dh}{dt} = K * P * V$$

On pourra concevoir à partir des considérations basées sur la mécanique des contacts [15] et en s'appuyant sur la (figure : IV.6) que la limite entre le comportement élastique et le comportement plastique d'un contact sur un diagramme donnant un indice Y dépendant du matériau et de l'état de surface en fonction de la pression normalisée de contact P égale au rapport entre la pression apparente de contact P_{app} et la dureté H .

Cette approche fait intervenir à la fois des caractéristiques géométriques et mécaniques du contact. L'indice Y est obtenu par la relation suivante :

$$Y = \frac{E^*}{H} \left(\frac{\sigma}{\beta} \right)^{1/2}$$

Où :

σ : écart type de la distribution des hauteurs du profil composé des deux surfaces ;

B : Le rayon de courbure moyen des aspérités du profil composé ;

E^* : Le module de Young équivalent ;

H : La dureté du corps le moins dur ;

Et pour un large éventail de pression de contact rencontré dans la pratique, si l'indice Y est inférieur à 0,6 le contact est de type élastique alors que Y est supérieur à 1, le contact est de type plastique.

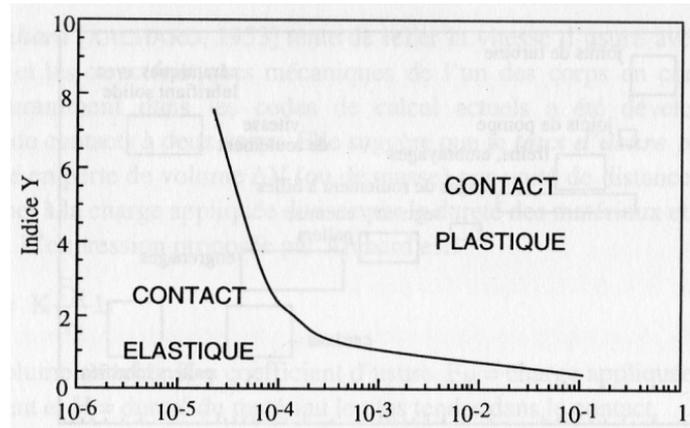


Figure IV.4 : Limite entre les domaines de comportement élastique et plastique à partir de l'évolution de l'indice Y en fonction de la pression normalisée de contact. ($\tilde{p} = p_{app}/H$). [15]

Après un teste d'usure. Il est toujours possible de trouver une fonction qui corrèle plusieurs paramètres. Mais les paramètres utilisés sont fonctions des moyens d'investigation disponible et de la culture des chercheurs.

La définition d'une surface n'a pas de sens tant que l'on ne différencie pas une surface apparente et une surface réelle puisque ce sont souvent les débris d'usure qui supportent effectivement la charge.

L'évolution du volume usé pour caractériser l'usure est entièrement dépendante de la façon dont on nettoie la piste de frottement après un essai [15].

IV.8 Données et paramètres tribologiques:

-IV.8.1 Taux d'usure:

La norme DIN EN 50324 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) est dérivé de la loi d'Archard, en éliminant la dureté comme paramètre, et suppose que la perte de volume V est proportionnelle à la charge normale F_N et à la distance de glissement L parcourue. [12]

$$V = K_V F_N L \rightarrow (2)$$

Cette formule caractérise bien la phase stationnaire de perte de matière après le rodage initial et avant l'apparition d'un mécanisme secondaire comme par exemple la fatigue, qui dépend fortement de la topographie des pièces usinées. Les différentes écoles tribologiques soulignent toujours que la notion de taux d'usure pose divers problèmes et doit être précisée pour chaque mécanisme d'usure. Toutefois le taux d'usure est aujourd'hui utilisé couramment dans le monde entier et décrit l'évolution du niveau d'usure d'un couple de matériaux avec la sollicitation. Il faut toutefois noter que le taux d'usure ne traduit pas directement une propriété intrinsèque des matériaux en contact ou du tribosystème.

En ce qui concerne la quantification de l'usure, il faut bien admettre que l'application de lois ou de modèles d'usure à l'usage général est très limitée, en général par manque de connaissance des propriétés des matériaux et de leur évolution avec la température ; mais la modélisation de l'usure ou la prévision d'un taux d'usure sont des sciences qui débutent. Quoiqu'il en soit, pour une application industrielle, l'usure et le frottement restent les deux grandeurs les plus déterminantes de par leurs implications économiques ; la connaissance de la nature exacte des différents mécanismes d'usure contribuant à un taux d'usure est un problème moins important.

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 $mm^3/(N \cdot m)$ 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.

-IV.8.2 Valeur du produit $P \times V$:

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

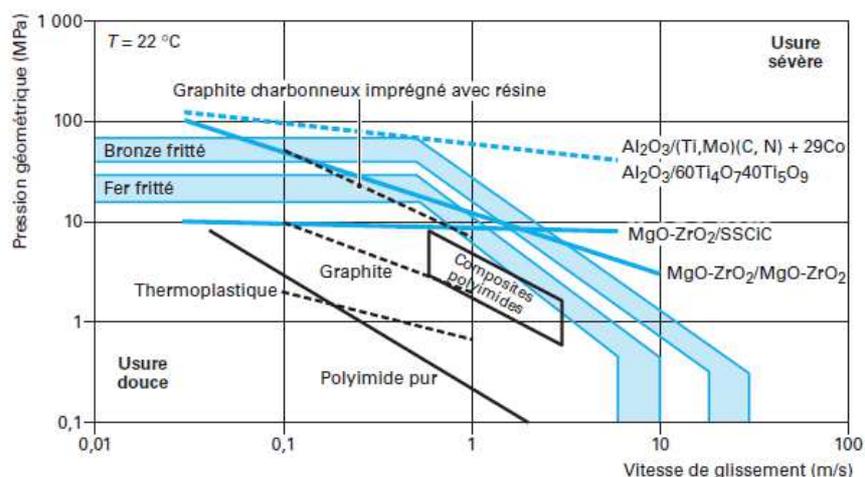
- En effet, les valeurs du produit pv sont fréquemment utilisées dans les fiches des producteurs de matériaux pour préciser les limites d'utilisation des matériaux et couples de

matériaux. La valeur pv en Mpa.m/s (pour les anglo-saxons en psi.ft/min) est le produit de la pression de contact par la vitesse de glissement et caractérise la sollicitation énergétique du tribosystème/contact.

- La valeur pv multipliée par le coefficient de frottement : $pv\mu$ (W/mm²), détermine la puissance dissipée sous forme de chaleur (énergie de frottement) sur l'aire apparente de contact A (Friction Power Intensity) ; cette énergie est évacuée principalement par conduction thermique, uniformément dans les deux corps, une faible partie étant véhiculée par le lubrifiant. Elle correspond à la puissance thermique générée par frottement et la température de volume des pièces en est une fonction croissante. L'effet de la pression et de la vitesse ne dépend pas que de la valeur de leur produit : quand l'une de ces grandeurs dépasse une valeur limite, il peut y avoir transition d'un mode d'usure douce (k faible) à un mode d'usure sévère (k élevé) (figure IV.5), 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 IV.5) : on note que la nature du matériau modifie largement la valeur limite du produit pv à prendre en considération :

- Les matériaux présentés dans la figure IV.5 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 pv et il importe de le déterminer si on souhaite travailler dans ce domaine.



-IV.8.3 Densité d'énergie de frottement:

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

$$E_f = \mu F_N L \rightarrow (3)$$

Avec μ coefficient de frottement de Coulomb Le produit μF_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 :

$$ef^* = \frac{E_f}{V} = \frac{\mu}{K_V}$$

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

IV.9 Conclusion :

En conclusions de ce chapitre on peut conclure que le phénomène d'usure des pièces mécanique frottantes dépend de plusieurs paramètres tels que la charge, la vitesse de glissement, l'état de surface en contact, la répartition des pressions... etc.

CHAPITRE V
PARTIE EXPERIMENTALE

V.1 Introduction :

L'objectif de notre étude est la validation d'un tribomètre vertical réalisé par nos camarades de la promotion 2012-2013. Cette validation se fera par la réalisation d'essais d'usure sur deux couples de matériaux, bronze/acier et PTFE/acier ; les essais consistent en la mesure de l'effort normal et tangentiel développés au point de contact du pion avec le disque sous une charge et une vitesse données. A partir de ces mesures nous déduirons le coefficient de frottement dans les zones de contact de ces couples de matériaux.

Avant l'entame des essais nous avons effectué une étude critique du tribomètre dans le but de relever ses insuffisances et d'apporter les correctifs nécessaires.

Le tribomètre vertical est venu pour apporter des améliorations au tribomètre horizontal déjà existant. Les améliorations effectuées concernent essentiellement la mesure de l'effort normal. Afin de vérifier cela, une étude comparative des mesures données par le tribomètre horizontal et le tribomètre vertical sera présentée à la fin du chapitre.

V.2 Dispositif expérimental :

-V.2.1 Description du dispositif :

Le dispositif à valider est un tribomètre pion-disque vertical. Il permet d'étudier le frottement et l'usure des couples de matériaux. Son principe consiste à appliquer une charge verticale sur un pion immobile (9) en contact avec la face plane d'un disque en rotation (8). Lors de l'essai de frottement un capteur à jauges de contrainte (7) 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 (9) sur le disque (8) grâce à la liaison glissière (14) d'une plaque coulissante (2) avec le bâti (1). Le dispositif est muni d'un système de compensation avec des masses mortes (11) 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 (15) d'une puissance de 220W tournant à 1400 tr/min qui entraîne la broche porte disque (figure V.1).

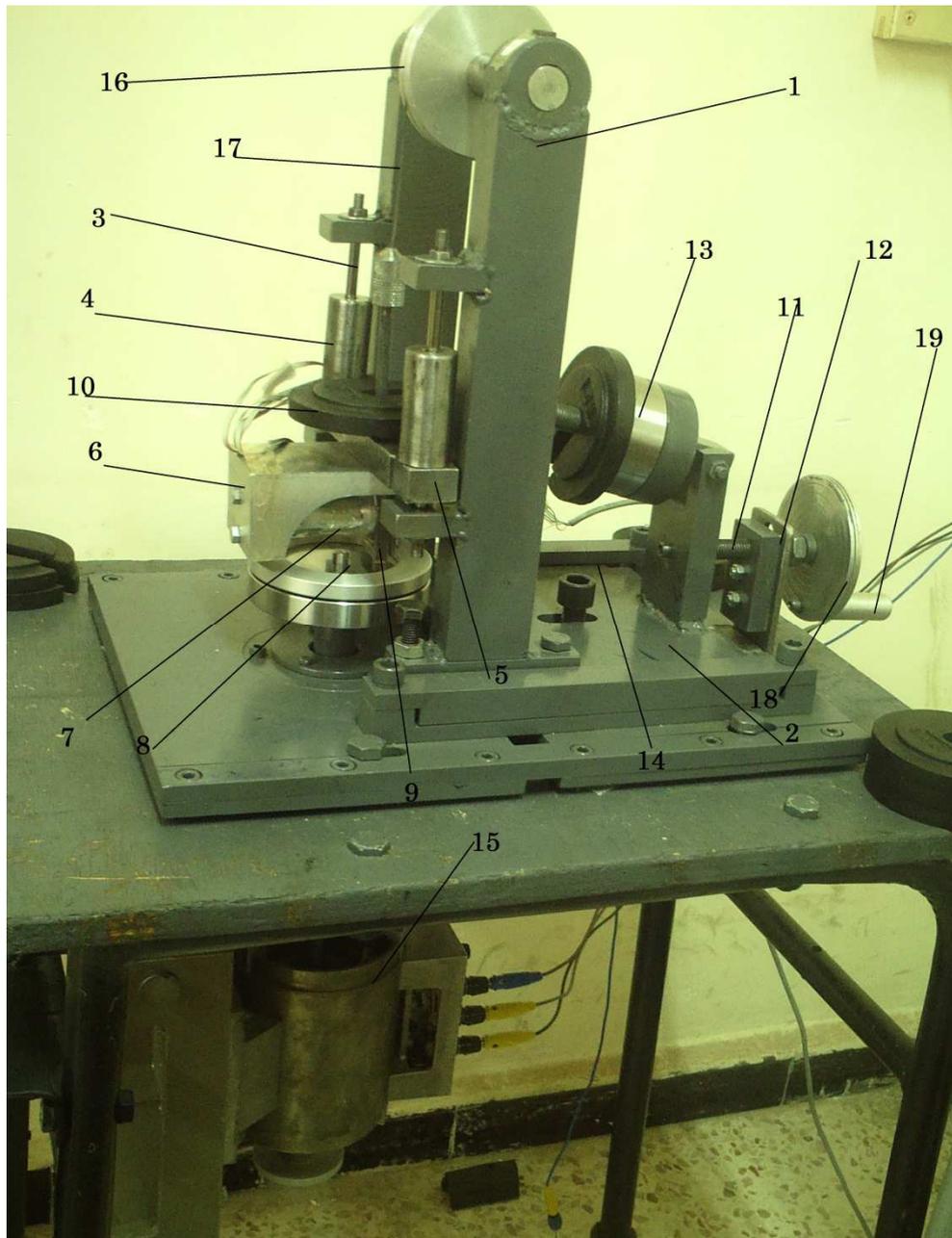


Figure V.1 : vue du tribomètre

-V.2.2 Nomenclature du banc:

1-Bâti, 2- Plaque coulissante, 3- axes, 4- bague de guidage, 5- Poutre, 6- Porte capteur, 7- Capteur de force, 8- Disque, 9- Pion, 10- Charge, 11- vis de manœuvre, 12- Plaque, 13- masse morte, 14- liaison glissière, 15- moteur électrique, 16- poulie, 17- Câbles, 18- volant, 19- Poignée.

V.3 Etude critique du dispositif:

-V.3.1 Problèmes rencontrés:

Dés le lancement des essais de validation du tribomètre nous avons été confrontés à certains problèmes liés à la qualité de précision de la fabrication des éléments composant le prototype.

Parmi ces imperfections de réalisation nous pouvons citer :

- Blocage de la plaque coulissante (2). La translation de la plaque permettant le changement de vitesse par la variation du rayon de contact pion/disque n'est donc plus possible.
- Rupture de la plaque sur laquelle est guidée en rotation la vis de manœuvre (11). Cette rupture est due à un mauvais alignement du trou de guidage et du trou taraudé.
- Mauvais guidage en translation du système porte pion et porte capteur sur les deux colonnes de guidage (3). Ce mauvais guidage est probablement dû à un guidage insuffisant (type centrage court) et un entraxe des colonnes de guidage irrégulier.

-V.3.2 Les solutions apportées :

- Un bon graissage de la liaison (14) a permis à la plaque (2) de coulisser librement.
- La liaison par soudage de la plaque dans laquelle est guidée en rotation la vis de manœuvre (11) est remplacée par une liaison par vis.
Cette dernière nous permet d'ajuster l'alignement des axes du trou de guidage et du trou taraudé à tout moment.
- Plusieurs solutions ont été testées pour le mauvais guidage en translation du système porte pion et porte capteur. Une seule d'entre elle a été fructueuse.

- Remplacement des colonnes de guidage par des nouvelles, croyant que l'arc-boutement est causé par l'usure des colonnes. Ces colonnes sont de même diamètre que les anciennes.
- Remplacement des colonnes de guidage par des colonnes de diamètre inférieur ($\varnothing 7$) pour pouvoir contrôler l'entraxe. Un soin particulier a été apporté à la qualité de l'état de surface des colonnes.
- Augmentation de la longueur de guidage des anciennes bagues dans la poutre (5) pour avoir une liaison de type centrage long qui réduit le risque d'arc-boutement. Cette augmentation de longueur est obtenue avec des bagues (4) de longueur 80 mm, liées complètement à la poutre. La liaison bague/poutre est obtenue par vissage de la bague dans la poutre. La longueur de guidage 80 mm est calculée à l'aide de la relation :

$$\Delta \leq \frac{L}{2f}$$

Où :

- Δ : distance entre la direction de l'action mécanique et l'axe de la liaison.
- L : longueur du guidage
- f : coefficient d'adhérence entre les surfaces de contact

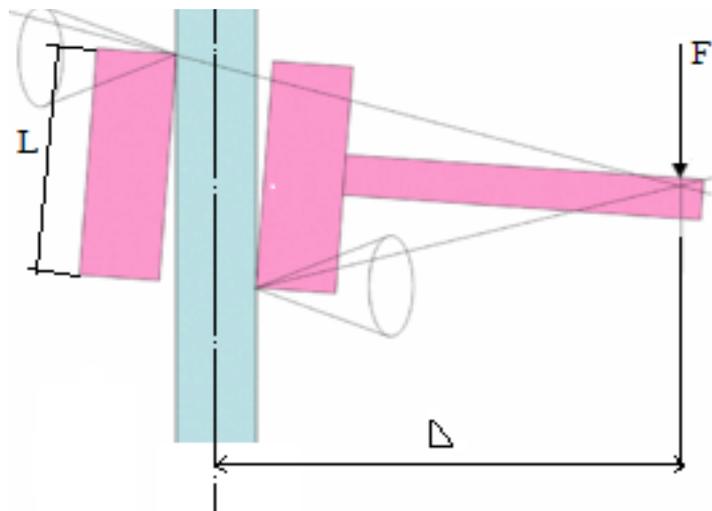


Figure V.2 : phénomène d'arc-boutement

Les colonnes sont maintenant guidées sur une longueur suffisante pour éviter l'arc-boutement.

Avec cette troisième solution le problème de coincement du système de chargement lors de sa descente et montée est réglé.

V.4 Système 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.3.



Figure V.3 : système d'acquisition.

La chaîne d'acquisition utilisée, de fabrication « vischay micromesure », est constituée de dix entrées analogiques et dix sorties. Le conditionnement de nos capteurs permet la mise à zéro, l'équilibrage des ponts, l'amplification et le gain de signal d'entrée figure : V.4.



Figure V.4 : Chaîne d'acquisition « vischay micromesure »

PARTIE EXPERIMENTALE

Elle contient deux faces figure V.5.

- a) La face avant nous renseigne sur les différentes manipulations que peut offrir la chaîne.
- b) La face arrière nous montre le positionnement des connecteurs de j'auges- capteurs

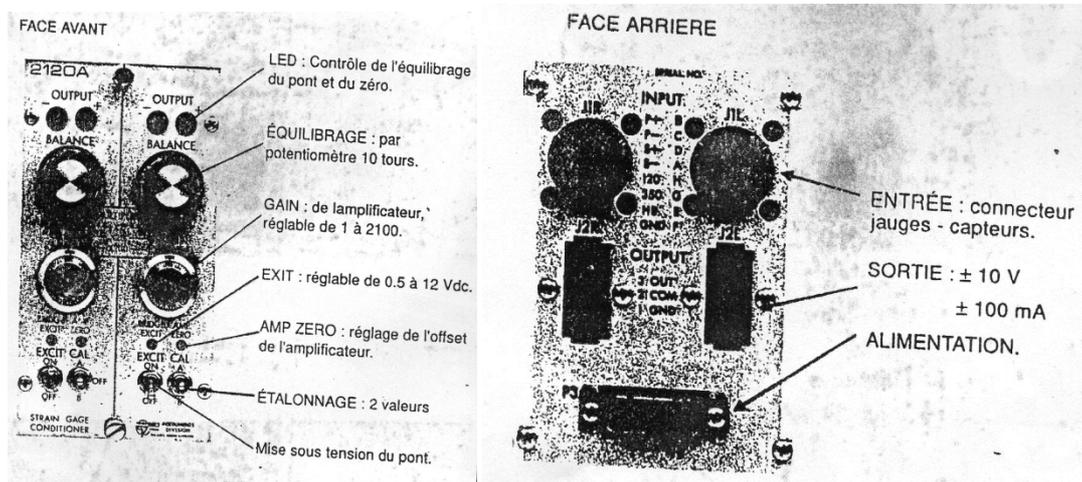


Figure V.5 : Face avant et arrière de la chaîne d'acquisition : a) Face avant, b) Face arrière

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 qu'on a utilisé pour traiter et analyser nos résultats est la carte « ARDOUINO uno »

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. Figure : V.6.

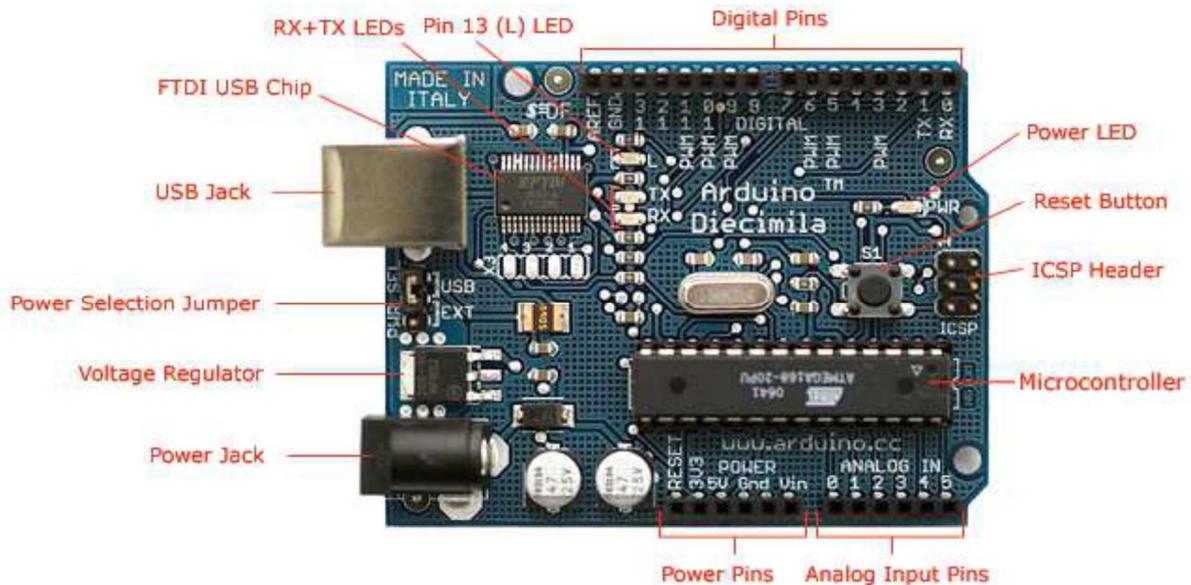


Figure V.6 : la carte ARDOUINO

Un microcontrôleur est l'équivalent d'un petit ordinateur. Il contient un microprocesseur (unité centrale) associé à différentes mémoires et des interfaces lui permettant de communiquer avec l'extérieur, et bien sûr une horloge pour cadencer l'ensemble. L'alimentation électrique peut être fournie par le port USB ou une alimentation externe qui délivre **5V**.

Arduino peut être utilisée pour construire des objets interactifs indépendants (prototypage rapide), ou peut être connecté à un ordinateur pour communiquer et superviser en utilisant des logiciels de programmation (flash, labview, etc).

La carte "ARDUINO uno" que nous avons utilisée (figure : V.7) assure une liaison entre la chaîne d'acquisition et l'ordinateur pour acquérir les données des essais tribologiques. Elle dispose de 14 broches ("pin" en anglais, numérotées de 0 à 13) qui peuvent être configurées en "entrées digitales" ou en "sorties digitales" susceptibles de délivrer une intensité maximale de 40mA sous une tension égale à 0V ou 5V. Elle possède également 6 entrées analogiques (notées A0 à A5) permettant de mesurer des tensions comprises entre 0V et 5V grâce à un convertisseur A/N à 10 bits.



Figure V.7 : représentation de la carte « Arduino uno »

V.6 Le capteur de force:

Un capteur de force (ou d'effort) est un dispositif utilisé pour convertir une force (par exemple un poids) appliquée sur un objet en un signal électrique. Le capteur est généralement construit en utilisant des jauges de déformation connectées en un pont approprié. Un amplificateur est normalement nécessaire pour lire le signal délivré par le transducteur.

-V.6.1 Les jauges de contraintes ;

Les jauges d'extensométrie (ou jauge de contrainte figure : V.8) sont les capteurs résistifs les plus employés lorsqu'il s'agit de déterminer les faibles déformations d'une structure soumise à des contraintes mécaniques. Autrement dit les jauges de contraintes sont des fils électriques dont la résistance varie avec les déformations subies. Une des difficultés de l'utilisation des jauges d'extensométrie réside dans leur sensibilité à la température. En effet, cette grandeur d'influence peut engendrer sur une jauge, des variations de résistance de la jauge du même ordre de grandeur que celles engendrées par les déformations à mesurer. Aussi, la correction des effets de la température est un des points clés de la qualité des mesures par jauges d'extensométrie.

La résistance électrique d'une jauge cylindrique est donnée par :

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi}$$

Avec :

- ρ : résistivité du conducteur
- l : sa longueur
- A : l'aire de sa section
- D : le diamètre de la section.

Donc après déformation de la jauge, on obtient :

$$R_0 + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) \frac{4(l + \Delta l)}{(D - \Delta D)^2 \pi}$$

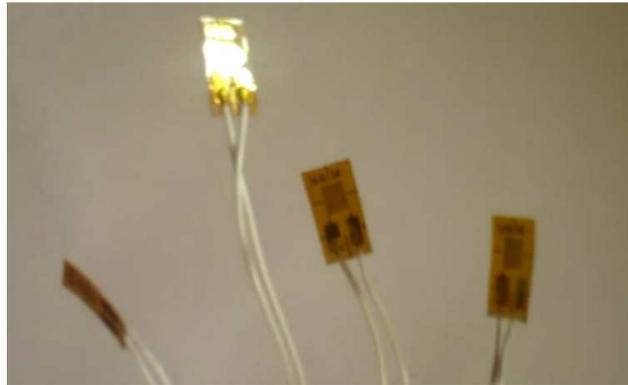


Figure V.8 : les jauges de contraintes

-V.6.2 La mise en place des jauges de contraintes:

Pour le collage des jauges sur le corps d'épreuve (capteur) on a eu besoin de quelques instruments et de beaucoup de minutie pour ne pas rater l'adhésion et détruire les jauges.

Les instruments utilisés :

- Liquide nettoyeur pour nettoyer la piste de collage ;
- Matière gluante (colle) pour faire adhérer la jauge sur corps d'épreuve;
- Ruban adhésif (scotch) pour protection la jauge ;
- Des fiches pour tester le fonctionnement des jauges

-V.6.3 Les capteurs de force basés sur les jauges de contrainte:

Les capteurs de force équipés de jauges de contrainte sont construits sur le principe d'un corps d'épreuve travaillant comme un ressort sur lequel les forces à mesurer sont appliquées.

PARTIE EXPERIMENTALE

L'élément sensible se déforme et la contrainte se produit en surface. La déformation du corps d'épreuve suite à l'application de l'effort normal est captée par les jauges de contrainte. Le signal électrique correspondant à la déformation du corps d'épreuve est recueilli sur la chaîne d'acquisition. De nombreuses propriétés des capteurs de force sont définies par le choix du matériau et de la conception du corps d'épreuve.

L'élément sensible du capteur est la jauge de contrainte (SG), qui se compose d'une grille de mesure disposée sur un support et recouverte d'une couche protectrice. Ces jauges de contrainte sont collées sur le corps d'épreuve aux endroits appropriés. Généralement quatre jauges de contrainte sont utilisées et installées de sorte que deux d'entre elles soient étirées alors que les deux autres comprimées quand la force est appliquée.

Les jauges sont reliées dans un montage dit «pont de Wheatstone». Un pont de Wheatstone doit être alimenté par une tension d'alimentation.

Le capteur qu'on a utilisé est un capteur de forme conique Figure : V.9 sur lequel on a utilisé deux demi-ponts, l'un mesure l'effort normal et l'autre mesure l'effort tangentiel.

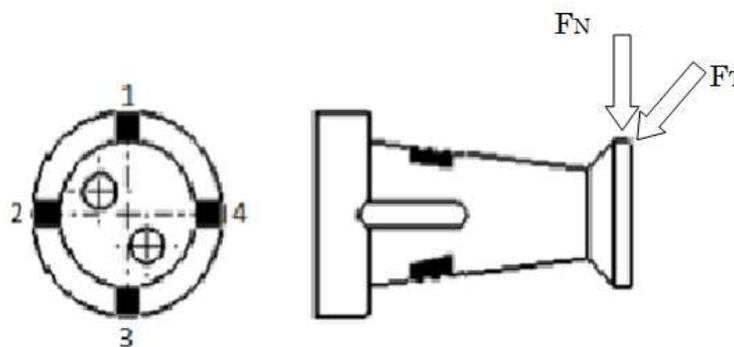


Figure V.9 : Les efforts qui agissent sur le capteur force.

Le branchement effectué est tiré de la notice d'utilisation « SYSTEME 2100 » de la chaîne d'acquisition figure : V.10.

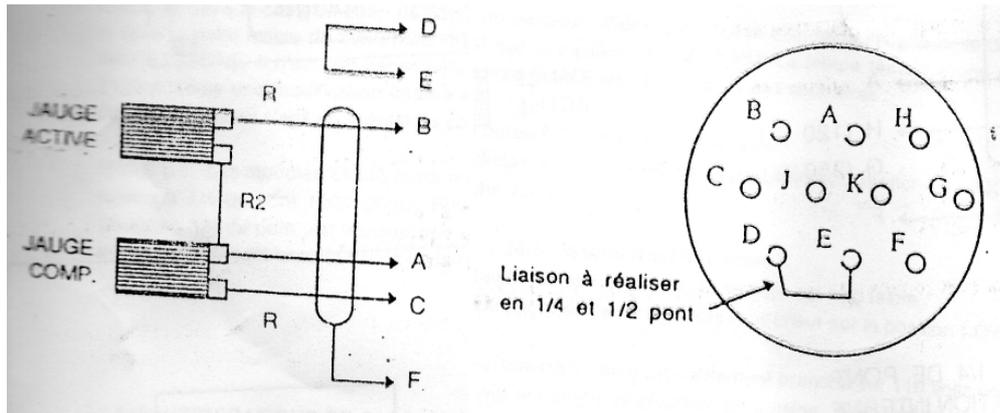


Figure V.10 : Montage du pont de jauge sur la chaîne d'acquisition

Les quatre jauges sont fixées sur le corps du capteur (Figure V.11) d'une façon à ce que l'effort normal n'aura pas d'influence sur la mesure de l'effort tangentiel et vis versa.

Les jauges utilisées pour mesurer l'effort normal sont les jauges 1 et 3. Sous l'effet de l'effort normal F_N , la jauge 3 se dilate, alors que la jauge 1 se comprime.

Les jauges utilisées pour mesurer l'effort tangentiel sont les jauges 2 et 4. Sous l'effet de l'effort tangentiel F_T , la jauge 4 se dilate, alors que la jauge 2 se comprime.



Figure V.11 : le corps d'épreuve (capteur)

-V.6.4 Etalonnage du capteur de force:

Le signal récupéré du capteur de force comme analogique (millivolt) est passé premièrement dans la chaîne d'acquisition où le signal est amplifié jusqu'à 2000X (volt) et filtré pour réduire les bruits parasites.

Par la suite, le signal est reçu par le CAN (convertisseur analogique numérique) Arduino et converti en valeurs numériques.

Une fois que les résultats sont obtenus, on fait l'étalonnage qui consiste à correspondre à chaque chargement effectué une valeur numérique (tableau : V.1 et V.2). Les résultats sont

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

Enfin, le signal de sorti est récupéré par l'ordinateur dans le but d'analyser et traiter les résultats grâce au logiciel Matlab. Le cheminement du signal de sortie depuis sa sortie du capteur jusqu'à l'ordinateur est donné par la figure V.11.

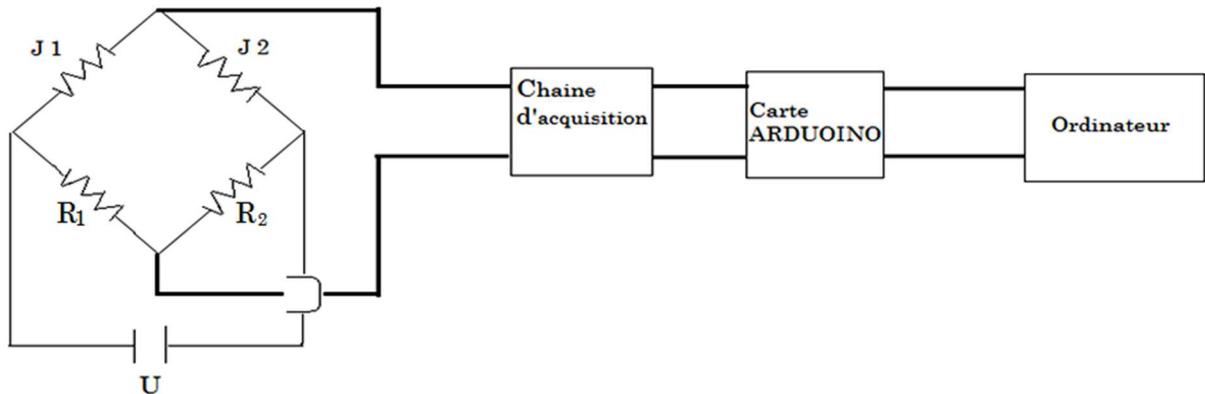


Figure V.12: cheminement du signal de sortie.

L'étalonnage du capteur se fait par l'étalonnage de l'effort normal et celui de l'effort tangentiel.

-V.6.4.1 Etalonnage de la mesure de l'effort normal:

Le capteur est fixé de sorte à pouvoir appliquer des efforts normaux et tangentiels variables.

Les résultats de la mesure des efforts normaux sont donnés dans le tableau suivant :

Charge appliquées	Etalonnage FN
0	0
5	17
10	33
15	50
20	65
25	82
30	98

Tableau V.1 : le signal correspondant à l'effort normal

- Courbe d'étalonnage de l'effort normal F_N :

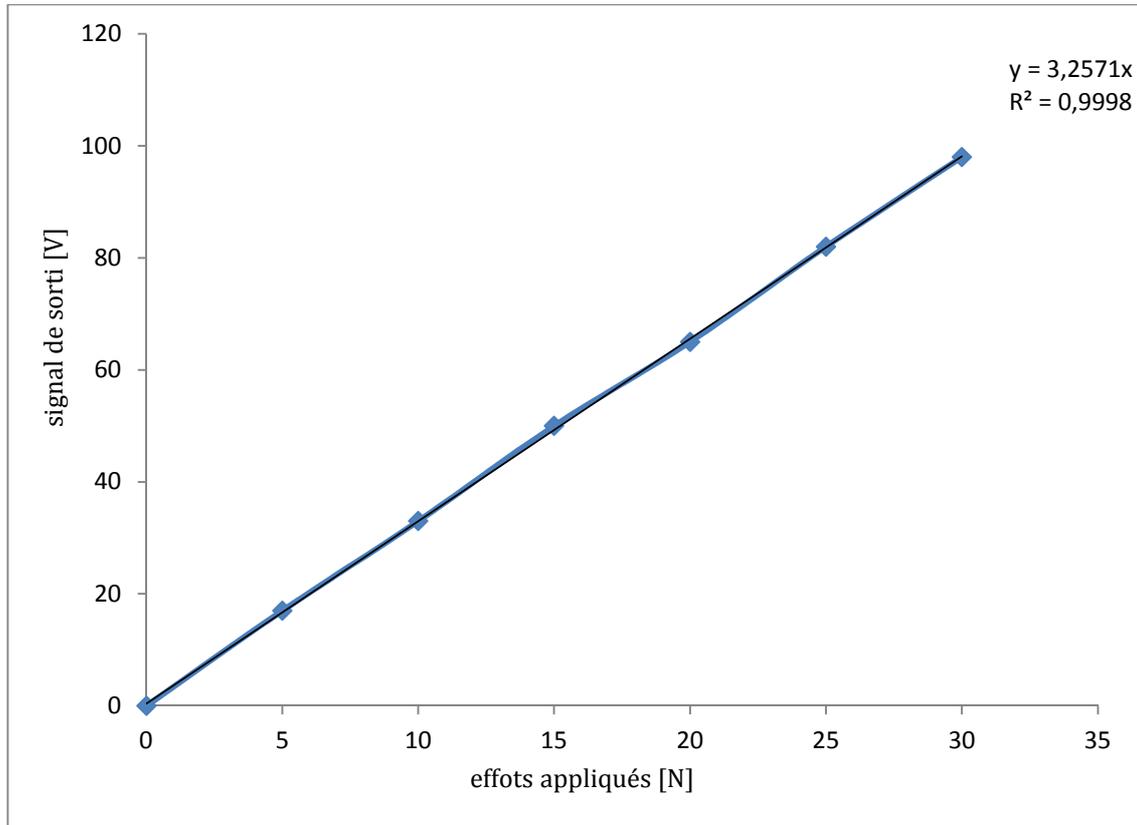


Figure V.13: représentation du signal de sorti en fonction de l'effort normal

La courbe $S=f(N)$ qui représente l'étalonnage de l'effort normal est une droite qui passe par l'origine d'équation caractéristique $S=3,2571 F_N$. Le facteur d'étalonnage est la tangente de cette courbe et est égal à 3,23.

-V.6.4.2 Etalonnage de la mesure de l'effort tangentiel:

Les résultats de la mesure des efforts tangentiels sont donnés dans le tableau suivant :

Effort appliqué	Signal de sorti
0	0
5	15
10	35
15	55
20	75
25	95
30	112

Tableau V.2: le signal correspondant à l'effort tangentiel

- Courbe d'étalonnage de l'effort tangentiel F_T

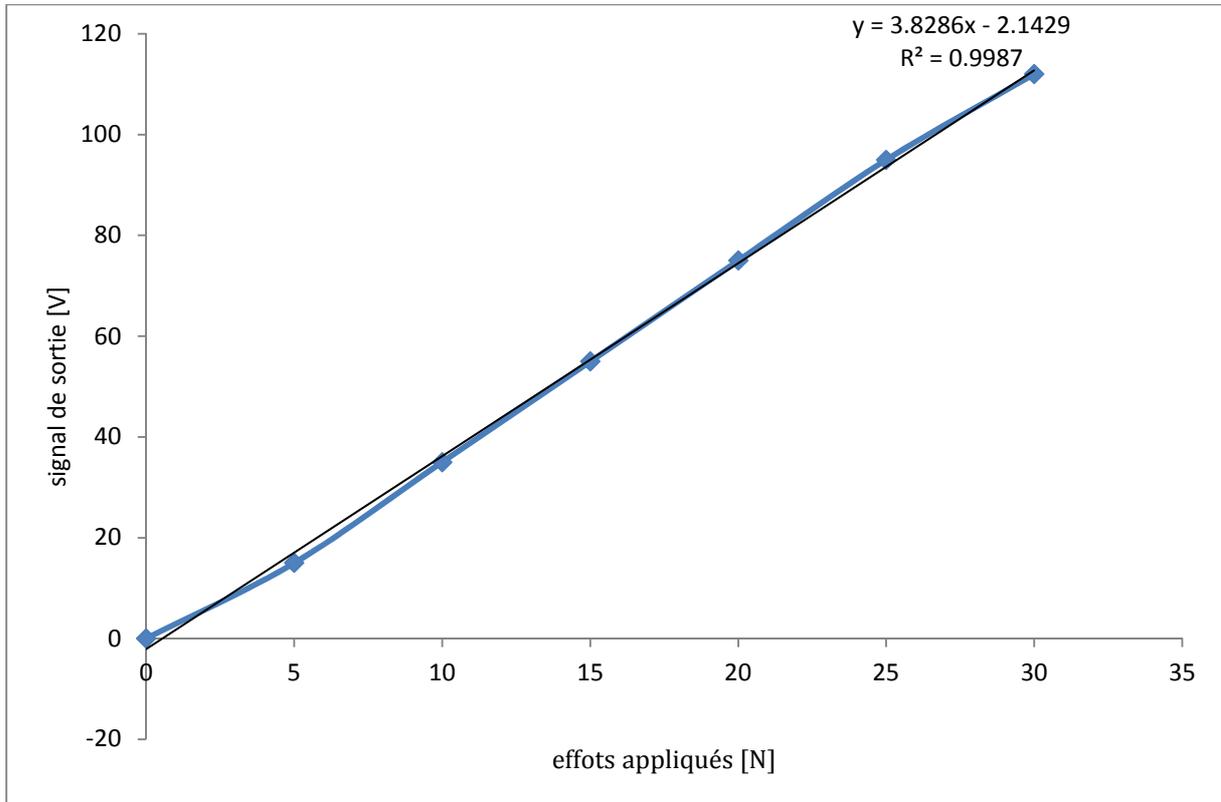


Figure V.14 : représentation du signal de sorti en fonction de l'effort tangentiel

La courbe $S=f(N)$ qui représente l'étalonnage de l'effort tangentiel, est une droite qui passe par l'origine d'équation caractéristique $S=3,8286F_T$. Le facteur d'étalonnage est la tangente de cette courbe et est égal à 3,8286.

En ce qui concerne les deux courbes d'étalonnage (normale et tangentielle) on peut considérer que le capteur agit de manière linéaire.

V.7 Essais de validation du tribomètre:

La validation correspond à la mise à l'essai du tribomètre sur quelques couples de matériaux.

Les essais consistent en la mesure du coefficient de frottement et de la perte de masse des couples Bronze/Acier et PTFE/Acier.

-V.7.1 Conditions expérimentales:

-V.7.1.a Matériaux et géométrie des éprouvettes :

- **Disque :** le disque est un plateau de forme cylindrique de diamètre 80 mm et d'une épaisseur de 6mm, il possède un trou de diamètre 10 mm au centre. Le disque est en acier mi-dur (A60) avec une limite élastique $Re=335\text{MPa}$ et une résistance à la traction $Rm=600\text{MPa}$. Il est réalisé en tournage (figure 15).
- **Pion :** l'échantillon pion a été réalisé en fraisage. Nous avons utilisé deux échantillons pion pour nos essais tribologiques (figure 16).

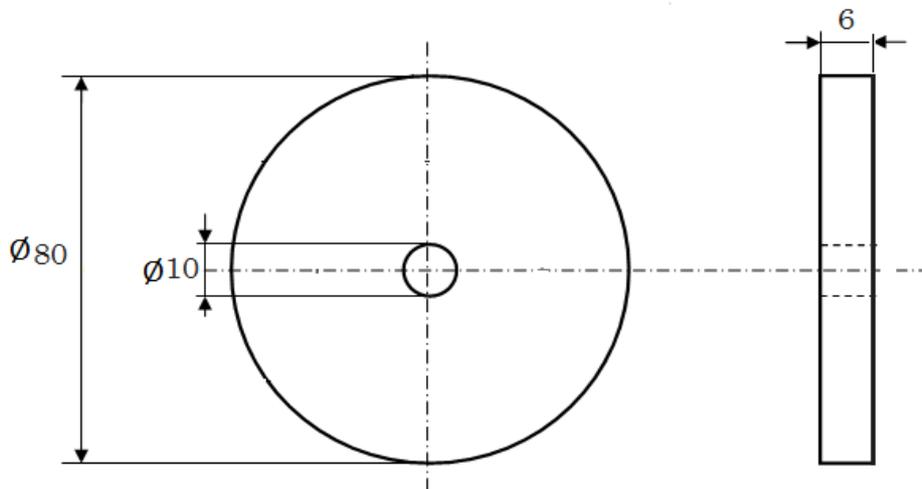


Figure V.15: dimensions des disques

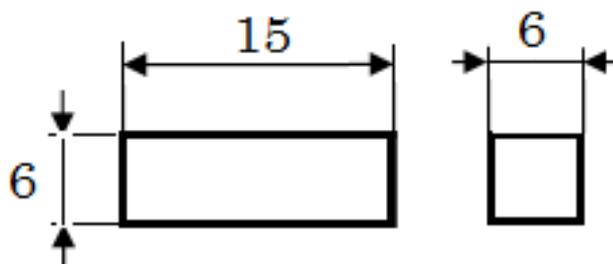


Figure V.16: dimensions des pions

-V.7.1.b Rugosité des surfaces de frottement des disques :

Le rugosimètre 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 control rapide des surfaces. Il entre en contact avec la surface en quelques secondes et mesure directement Ra ou Rz. Notre rugosimètre à palpeur est de marque MITITOYO SJ.201 (figure V.17).



Figure V.17 : rugosimètre à palpeur

Avant de réaliser nos essais, les paramètres de rugosités des disques ont été mesurés à l'aide de cet appareil.

Les valeurs obtenues pour nos échantillons sont représentées sur le tableau suivant :

	R _a	R _y	R _z	R _q
Disque1 (acier1)	0,16	2,695	2,11	0,295
Disque2 (acier 2)	0,52	5,46	3,67	0,77

Tableau V.3 : paramètres de rugosités des deux éprouvettes utilisées.

-V.7.1.c Conditions des essais :

Pour la validation du tribomètre nous avons effectué deux essais sur deux couples de matériaux, bronze sur acier et PTFE sur acier sous les conditions de travail suivantes :

- Température : ambiante (environ 30⁰ C)
- Pression : atmosphérique
- Matériau des disques : A60 (acier mi-dur)
- Matériau du pion : bronze, PTFE
- Chargement : 25 N
- Vitesse : 2.78m/s pour bronze/acier et 4.83 m/s pour PTFE/acier.

Ces couples de matériaux sont choisis car ils ont été caractérisés antérieurement. Ceci représente une référence pour la comparaison des résultats que nous avons obtenus.

A partir des mesures enregistrées lors des essais, nous avons tracé trois courbes : celle de l'effort Normal « F_N », de l'effort tangentiel « F_T » et du coefficient de frottement.

-V.7.2 Résultats des essais :

Les essais consistent à mesurer l'effort normal F_N et l'effort tangentiel F_T . Le coefficient de frottement est obtenu en effectuant le rapport F_T/F_N .

L'évolution des courbes de l'effort normal, tangentiel et du coefficient de frottement sont visualisées simultanément grâce au programme effectué sur MATLAB (figure V.18).

```
1 - clear all;close all
2
3 - clc;
4 - delete(instrfind({'Port'},{'COM4'}))
5 - a = arduino('COM4');
6 - a.pinMode(2,'output');
7 - a.pinMode(3,'output');
8 - a.digitalWrite(2,0);
9 - a.digitalWrite(3,1);
10 - numpts=1000;
11 - x=0;
12 - %xydata=0.1;
13
14 - for i=1:numpts
15 -     xydata(i,1)= ((a.analogRead(0))/3.83); %effort tangentiel
16 -     xydata(i,2)= ((a.analogRead(3))/3.25); %effort normal
17 -     figure(1)
18 -     subplot(3,1,1) % (2,5,1:2)
19 -     plot(xydata(:,1))
20 -     axis([0,numpts,-100,100]);
21 -     grid
22 -     xlabel('T')
23 -     ylabel('FT')
24
25 -     subplot(3,1,2) % (2,5,4:5)
26 -     plot(xydata(:,2))
27 -     axis([0,numpts,-100,100]);
28 -     grid
29 -     xlabel('T')
30 -     ylabel('FN')
31
32 -     subplot(3,1,3) % (2,5,7:9)
33 -     b=(xydata(i,1))/(xydata(i,2));
34 -     x=[x,b];
35 -     plot(x);
36 -     axis([0,1000,0,1]);
37 -     pause(0.05);
38
39 - end
```

Figure V.18 : programme MATLAB

- V.7.2.a. Couple bronze/acier1 :

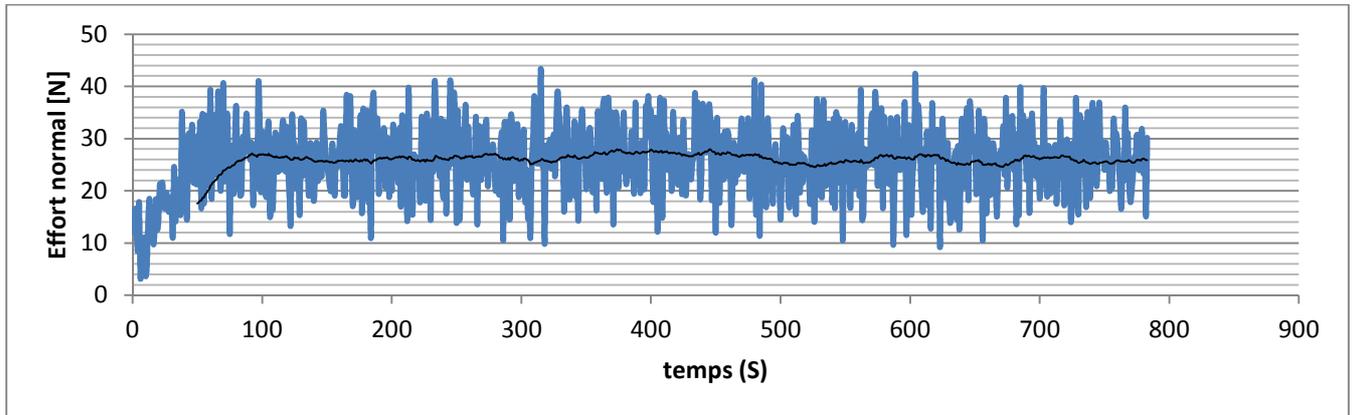


Figure V.19 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

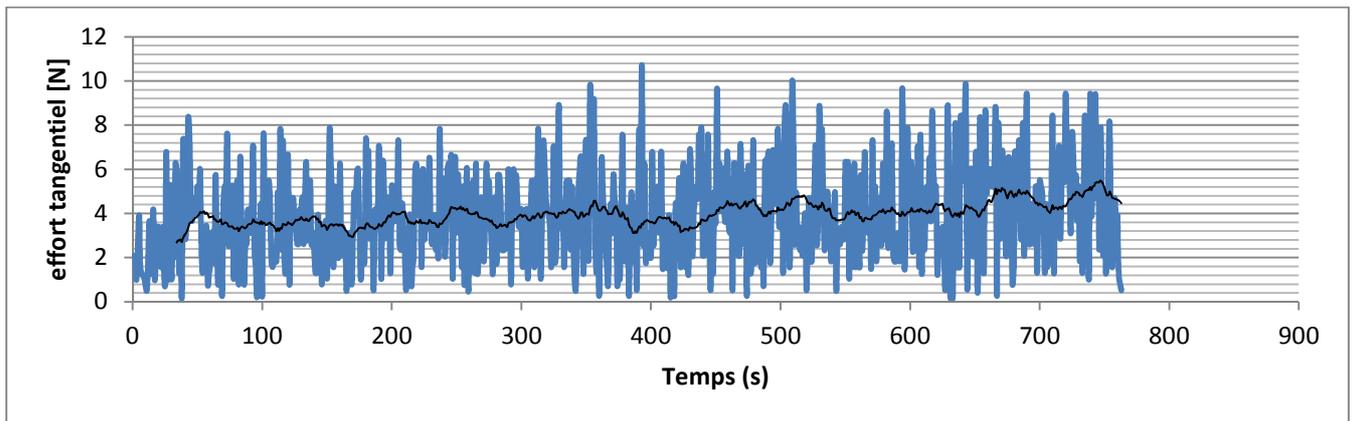


Figure V.20 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

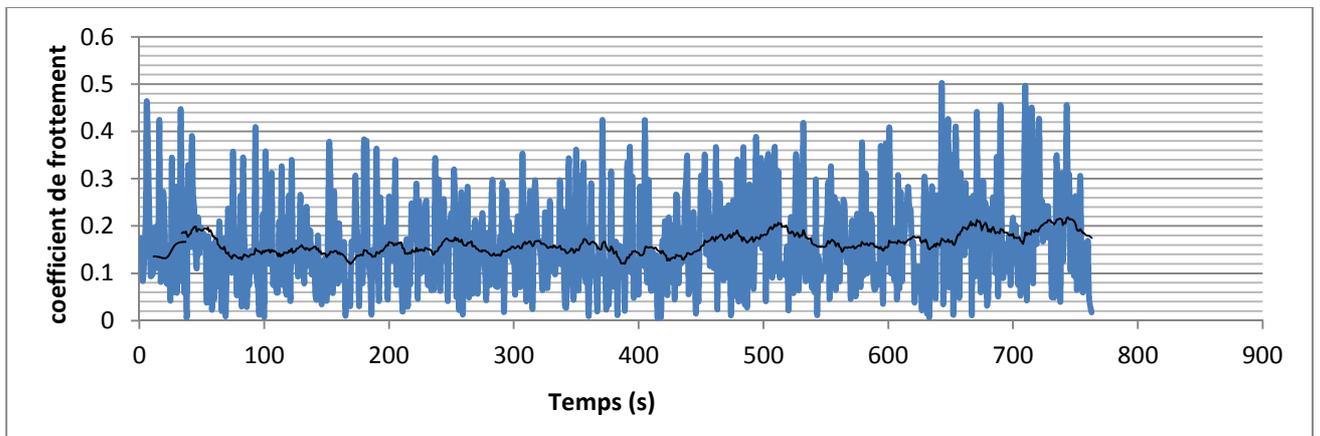


Figure V.21 : évolution du coefficient de frottement en fonction du temps

-V.7.2.b. Couple PTFE/acier 2 :

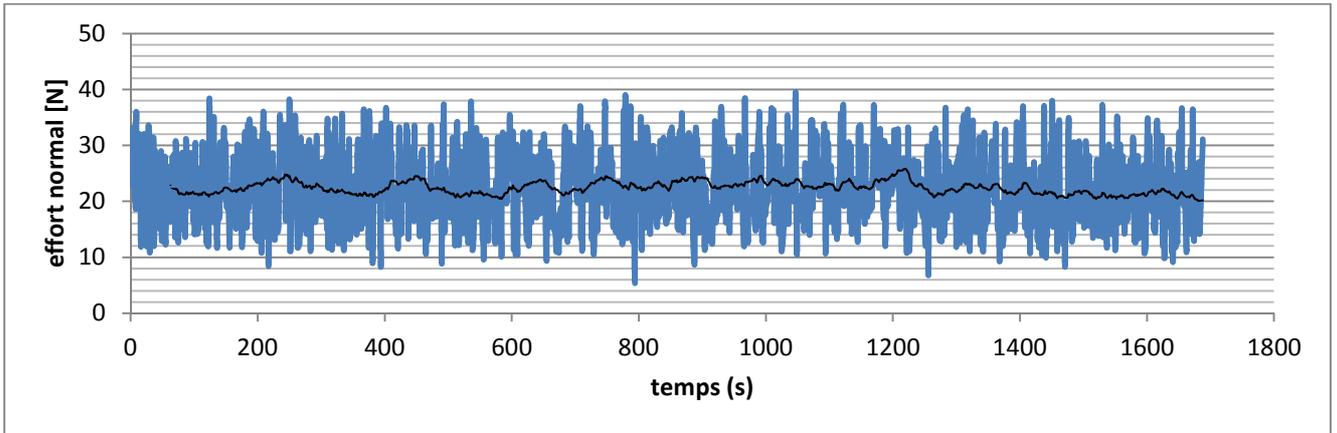


Figure V.22 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

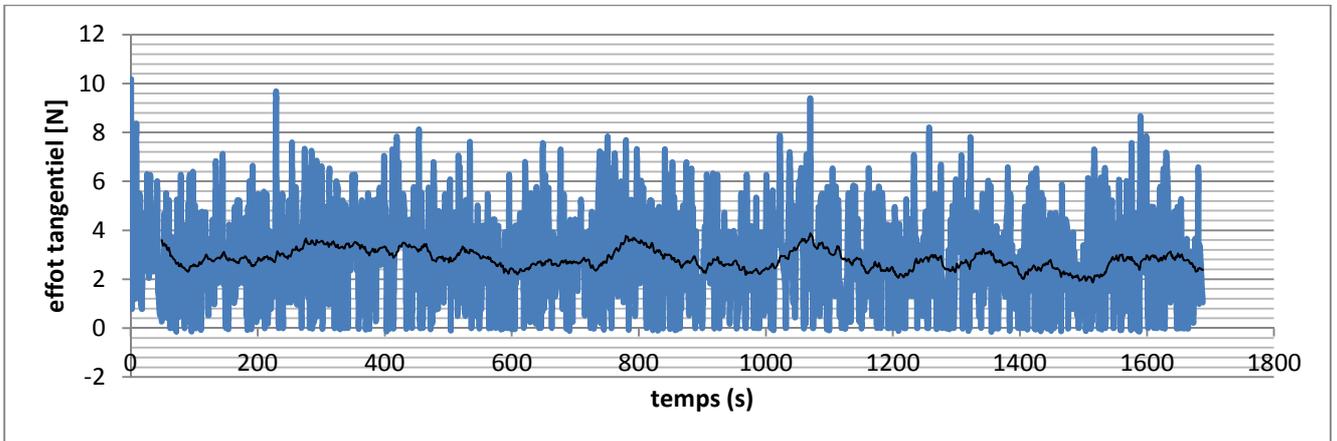


Figure V.23 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

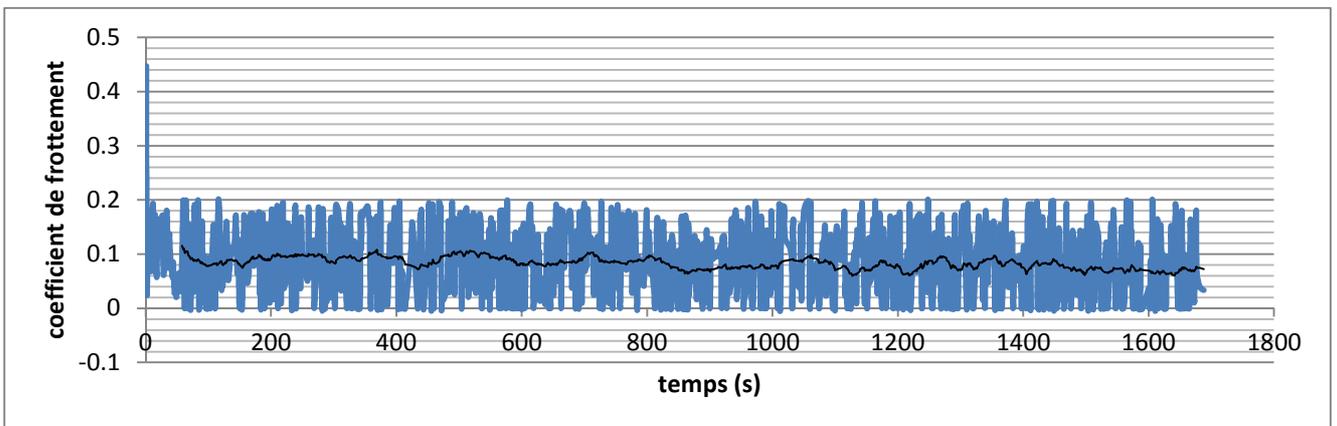


Figure V.24 : évolution du coefficient de frottement en fonction du temps

-V.7.3 Interprétation des résultats:

On observe sur la courbe du bronze/acier une stabilisation de l'effort normal au cours de l'essai. On note cependant une zone perturbée au début de l'essai à environ 40s. L'effort tangentiel augmente à partir de 2N jusqu'à se stabiliser à environ 6N, pour le couple bronze/acier.

Pour le couple PTFE sur acier on remarque une constance de la courbe de l'effort normal au cours de l'essai avec de très légères fluctuations.

Nous observons une augmentation brusque de l'effort tangentiel au début de l'essai (PTFE/acier). Mais une fois cette étape franchie, la courbe de l'effort tangentiel diminue pour atteindre 2,5N à $t=1700s$.

Les fluctuations que présentent les courbes de l'effort normal et de l'effort tangentiel sont inévitables.

Sur la courbe de la figure V.21 nous observons pour le couple bronze/acier une augmentation du coefficient de frottement de 0,14 jusqu'à 0,21, valeur à laquelle il a tendance à se stabiliser. Par contre, pour le couple PTFE/acier, le coefficient de frottement diminue de 0.11 à 0.075.

-V.7.4 Discussions des résultats obtenus:

Dans le couple PTFE sur acier la courbe de l'effort normal est constante au cours de l'essai, ce qui dénote un bon fonctionnement du système de chargement.

La zone perturbée qu'on observe jusqu'aux environs de 40s sur la figure V.19 est seulement due à l'application des charges après le lancement de l'essai. La charge n'est pas placée entièrement avant de lancer l'essai.

Les fluctuations sur la courbe de l'effort tangentiel sont causées par la rugosité des surfaces en contact pour le couple bronze sur acier.

L'augmentation de l'effort tangentiel sur la courbe du couple PTFE/acier au début de l'essai est due aux chocs des aspérités lors du contact entre la surface du PTFE et celle de l'acier.

Au début de l'essai nous avons constaté une augmentation brusque du coefficient de frottement, qui correspond à une phase d'accommodation des surfaces ou à une période de rodage du pion et du disque, suivie d'une période de stabilité qui correspond au coefficient de frottement de notre système

PARTIE EXPERIMENTALE

tribologique. Cette valeur est égale à 0,21 pour le couple bronze/acier. Cette phase est la période du fonctionnement normal.

Pou le couple PTFE/acier, la variation du coefficient de frottement au cours de l'essai est due logiquement aux vibrations du système. L'augmentation brusque du coefficient de frottement juste au début de l'essai est causée par le contact brusque des deux matériaux, présentant des aspérités sur leurs surfaces. La période de rodage des surfaces en contact est caractérisée par l'arasement, déformation plastique jusqu'à la répartition correcte de la charge. C'est la période la plus difficile du rodage.

La diminution du coefficient de frottement sur la courbe PTFE/acier de 0.11 à 0.075 nous démontre que les débris d'usure entre le contact sont évacués, on observe ici le phénomène du polissage des surfaces en contact.

Les courbes présentent aussi de légères fluctuations dues soit :

- Aux vibrations du système ;
- Au frottement au niveau du guidage du porte capteur ;
- A un problème de planéité de la surface du porte éprouvette qui est de 0,15 mm environ;
- A un désaxement entre l'arbre du moteur et la broche porte éprouvette.

Au cours de l'essai on a remarqué un détachement de matière de couleur dorée, qui s'est échappé du contact, dans le couple de matériaux bronze/acier. Après la fin de l'essai, on a constaté des marques d'usure sur le disque, exactement sur la piste de glissement du pion, où des particules de bronze sont incrustées sur la surface du disque, ce qui signifie une usure par adhésion

Les essais ont été réalisés sans lubrification, dans des conditions de température ambiante et de pression atmosphérique. L'échantillon (pion) a été pesé avant et après chaque essai grâce à une balance électronique dotée d'une précision de 10^{-4} g (figure V.25) pour déterminer la quantité de matière perdue.

Poids pion (g)	Avant	Après	Différence
Bronze	5,21477	5,21073	0,00404
PTFE	1,82425	1,79259	0,03166

Tableau V.4 : masse du pion avant et après l'expérience.

Les résultats trouvés après la pesée des pions ont révélé les phénomènes d'usure observés sur les surfaces des disques.



Figure V.25 : balance électrique

V.8 Perte de masse :

Pour les deux matériaux, la perte de masse est étudiée pour un chargement imposé de 25 N. On a effectué cinq essais pour chaque échantillon, (bronze et PTFE) pour l'essai de perte de masse. La perte de masse est mesurée après chaque fin d'essai.

Les figures V.26 et V.27 montrent l'évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue, pour une vitesse de 2,65 m/s pour l'essai du bronze et de 4,83 m/s pour celui du PTFE.

- Pour le couple bronze sur acier :

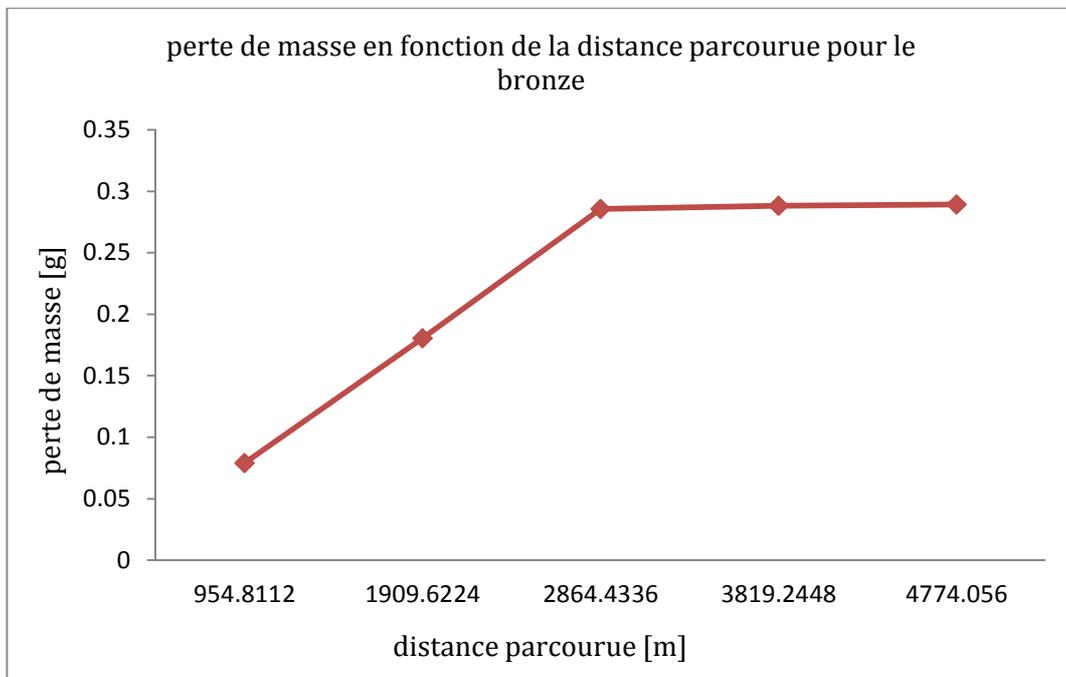


Figure V.26 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue pour une vitesse= 2,65 m/s.

- Pour le couple PTFE sur acier :

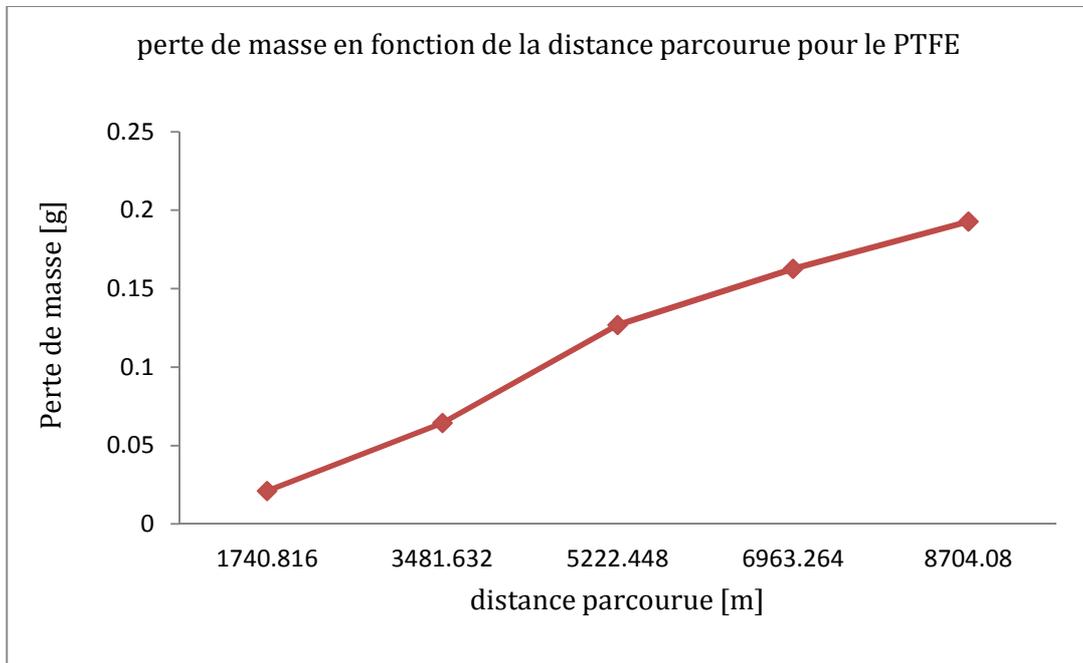


Figure V.27 : évolution de la perte de masse en fonction de la distance parcourue
Pour une vitesse= 4,83 m/s

Les résultats des figures nous montrent que dans le cas du bronze la courbe prend une allure linéaire pour les trois premiers essais. La perte de masse augmente en fonction de la distance parcourue probablement à cause de la dégradation des surfaces. Au-delà de ce point la perte de masse diminue jusqu'à prendre une allure quasi constante. Nous concluons que pour l'essai du bronze, une fois que la période de rodage des surfaces est finie, la perte de masse ralentit.

En ce qui concerne l'essai du PTFE, la perte de masse augmente avec la distance parcourue pour les cinq essais effectués et prend une allure linéaire jusqu'au dernier essai, nous concluons que pour l'essai du PTFE l'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse de glissement.

L'usure causée par le bronze lors de l'essai de perte de masse est illustrée sur la figure V.28.



Figure V.28 : Marques d'usure lors de l'essai de perte de masse bronze/acier.

V.9 Comparaison des résultats :

La comparaison des résultats donnés par le tribomètre vertical avec ceux du tribomètre horizontal a porté sur l'allure de la courbe de l'effort normal et la valeur du coefficient de frottement. En comparant les résultats trouvés antérieurement [16] (figure : 30) avec ceux qu'on a trouvés (figure : 29), on peut voir la différence entre la courbe de l'effort normal obtenue avec le tribomètre vertical et celle donnée par le tribomètre horizontal pour le couple bronze/acier. En ce qui concerne le coefficient de frottement le tableau V.6 nous renseigne sur les différents résultats trouvés avec le tribomètre vertical et horizontal pour le couple PTFE/acier.

On peut conclure que le passage du tribomètre horizontal à un tribomètre vertical a apporté une grande amélioration au niveau des problèmes soulevés sur le tribomètre horizontal (figures V.29 et V.30). Il en est de même pour les valeurs du coefficient de frottement du couple PTFE/acier.

- Exemple pour l'essai du bronze/acier :

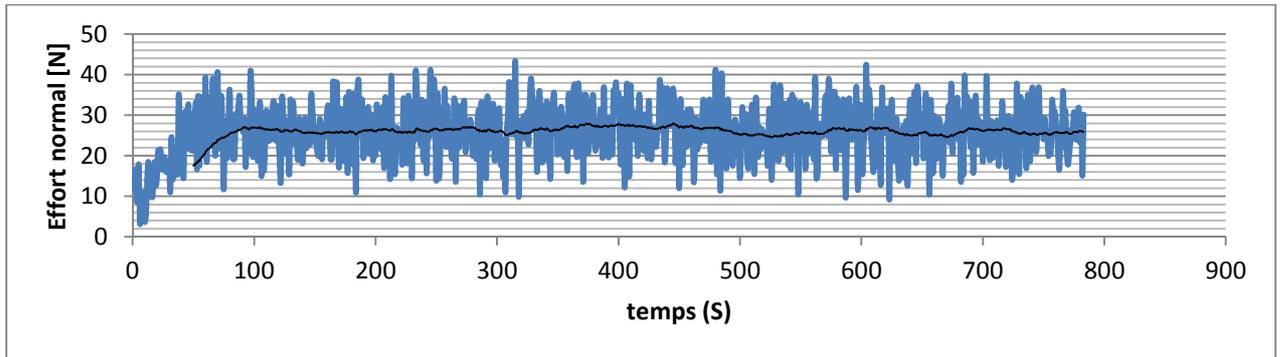


Figure V.29 : l'évolution de l'effort normal trouvé avec le tribomètre vertical

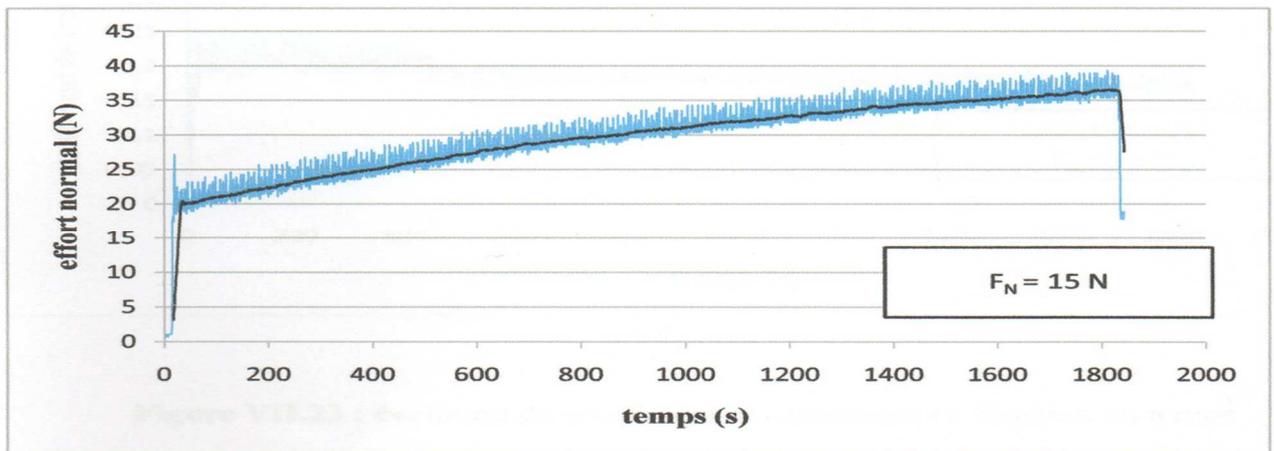


Figure V.30 : l'évolution de l'effort normal trouvé avec le tribomètre horizontal

La courbe qui représente la variation de l'effort normal trouvé avec le tribomètre vertical est constante au cours de l'essai. Celle trouvée avec le tribomètre horizontal augmente au cours du temps ce qui n'aurait pas dû se produire puisque l'effort normal est un paramètre fixe. Les résultats obtenus avec le tribomètre vertical sont meilleurs que ceux donnés par le tribomètre horizontal.

- Exemple pour le couple PTFE/acier :

En comparant les résultats des coefficients de frottement du couple PTFE/acier nous remarquons une amélioration dans les valeurs de μ tableau V.6.

PARTIE EXPERIMENTALE

Vitesses m/s	V= 0,09 m/s	V= 4,83 m/s	
Tribomètres Couples	Horizontal	Vertical	Valeur de la Littérature
PTFE/acier	0,15 – 0,17	0,075	0,05 – 0,15

Tableau V.5 : comparaison des résultats du coefficient de frottement des deux tribomètres
Pour le couple PTFE/acier.

- Les résultats obtenus avec le tribomètre vertical sont plus proche de ceux rencontrés dans la littérature que ceux donnés par le tribomètre horizontal bien qu'on ait utilisé des vitesses plus importantes (4,83 m/s).
- Le tribomètre vertical permet des essais à grandes vitesses en n'influant pas sur les valeurs du coefficient de frottement.

V.10 Conclusion:

Au terme de ce chapitre nous pouvons conclure avec les résultats observés au cours des essais :

- Un détachement de matière au niveau de la surface du pion et l'incrustation des particules sur sa piste de glissement.
- Augmentation de la surface du pion suite à sa déformation plastique.
- Le phénomène d'usure est de plus en plus important avec l'augmentation de la vitesse linéaire de glissement.
- Le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation, de la charge appliquée et de la vitesse de glissement.

- Lorsque tous les débris d'usure sont évacués on observe une diminution du coefficient de frottement ce qui engendre le phénomène de polissage des surfaces en contact.
- L'étude comparative révèle l'amélioration des résultats obtenus avec l'utilisation du tribomètre vertical. Les problèmes rencontrés avec le tribomètre horizontal sont corrigés par ce nouveau tribomètre.

CONCLUSION GENERALE

Les objectifs assignés à cette étude, à savoir la validation expérimentale du tribomètre vertical, sont atteints. Diverses opérations de mise au point du dispositif sont menées avant le lancement des essais. Ceci a conduit à apporter certains correctifs au prototype objet de l'étude.

L'étude critique conduite sur le tribomètre horizontal et qui a conduit à la fabrication du tribomètre vertical a ressorti, pour rappel, que l'effort normal variait au cours de l'essai alors qu'il devait rester constant.

La comparaison des résultats présentés à la fin du chapitre V a bien montré une nette amélioration dans les résultats pour les deux essais effectués (bronze/acier et PTFE/acier). La courbe de l'effort normal pour le couple bronze/acier présente une allure constante en fonction du temps contrairement à la courbe de l'effort normal obtenue avec le tribomètre horizontal qui présente une variation de la valeur de l'effort normal aux cours des essais. En ce qui concerne les valeurs du coefficient de frottement du couple PTFE/acier, celles données par le tribomètre vertical sont plus proches de celles rencontrées dans la littérature spécialisée.

Ce travail nous a permis de manipuler différents appareils tels que : une chaîne d'acquisition, un convertisseur analogique numérique (CAN), différents constituants d'un tribomètre, capteur de forces, jauges de contraintes...etc. D'autre part il nous a permis de découvrir l'immense univers de la tribologie et tous les paramètres qui interagissent dans un contact entre deux corps en mouvement relatif. Concernant ce dernier point nous avons relevé quelques remarques relatives au comportement tribologique d'un couple de matériaux, au coefficient de frottement et au phénomène d'usure. Il a été constaté que le coefficient de frottement et le phénomène d'usure augmentent avec l'augmentation de la vitesse de glissement et la perte de masse augmente avec la distance parcourue. Pour le contact bronze/acier l'augmentation de la perte de masse est ralentie au bout d'un certain temps ce qui correspond à l'apparition du phénomène de polissage des surfaces frottantes.

Ce dispositif peut être perfectionné en l'équipant d'amortisseurs. Ces derniers vont atténuer les vibrations, sources des signaux parasites perturbant les valeurs de l'effort tangentiel, particulièrement au démarrage des essais.

C'est ainsi que nous avons mis fin à notre travail de recherche qui n'a abouti qu'à une seule résolution parmi d'autres, et non à notre curiosité exploratrice qui ne cesse d'augmenter puisque le travail d'un chercheur demeure une quête continue et un fil inachevé.

Bibliographie

- [1] 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.
- [2] Frottement et usure, technique de l'ingénieur référence internet 42464 2nd édition.
- [3] Dorinson, A., Ludema, K.C., Mechanic and chemistry in lubrication, tribology series 9, Elsevier, Amsterdam.
- [4] thèse, pour obtenir le titre Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Spécialité Sciences et Génie des Matériaux, par Olivier BARRAU.
- [5] livre de norme : édition 2004
- [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] Tribologie et couplages multiphysiques, actes des journées internationales francophones de tribologie (JIFT 2006).
- [8] A. ELHADI. Influence des paramètres mécaniques lors de L'endommagement par les Phénomènes Tribologiques des couples des matériaux XC48/XC55 et A60/XC55.
- [9] M.CARTIER P.KAPSA, Usure des contacts mécaniques. Problématique et définitions. Techniques de l'ingénieur.
- [10] Ressource Internet. WWW.Tribologie /applications pratiques, un livre de Wikibooks.WWW. wikibooks.org/tribologie/applications pratiques.
- [11] J. DHERS. Usure, avaries, corrosion : facteurs de destruction des matériels industriels. Edition technique et vulgarisation. Paris 1978.
- [12]. 25^{èmes} Journées Internationales Francophones de Tribologie 29 31 mai 2013 Ecole Centrale de Lyon.
- [13] Laurent BOISSONNET, Benjamin DUFFAU, Pierre MONTMITONNET MINES ParisTech - CEMEF - BP 207 06904 Sophia Antipolis cedex – France 2 Renault Technocentre – 78280 Guyencourt – France
- [14] M. WOYDOT. Application des données tribologiques des matériaux. Techniques de l'ingénieur. BM 7 006.
- [15] Gérald Zambelli, Léo Vincent, Matériaux et contacts (Une approche tribologique).
- [16] Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en génie mécanique, construction mécanique, mise au point et validation d'un tribomètre pion sur disque, page 99.

ANNEXE

V.7.2.a. Couple bronze/acier1 :

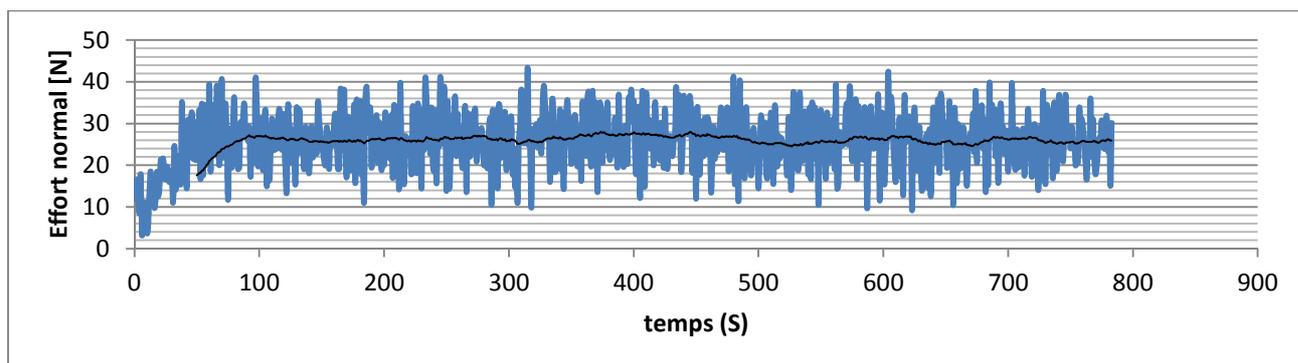


Figure V.19 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

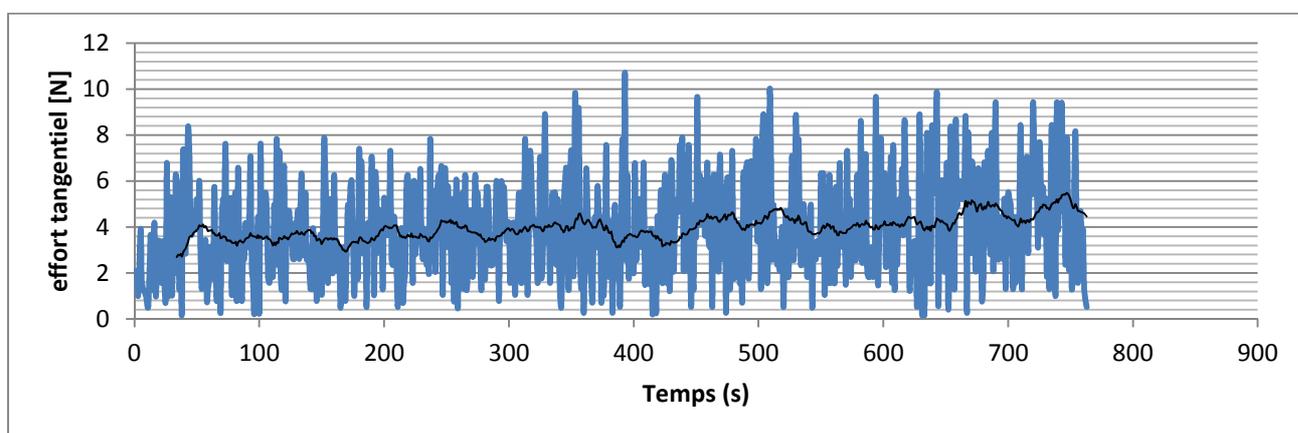


Figure V.20 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

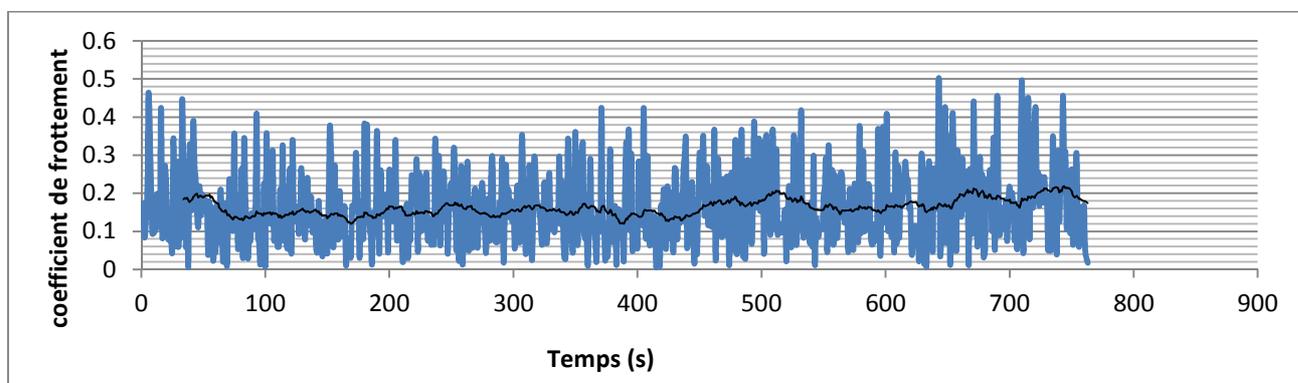


Figure V.21 : évolution du coefficient de frottement en fonction du temps

ANNEXE

V.7.2.b. Couple PTFE/acier 2 :

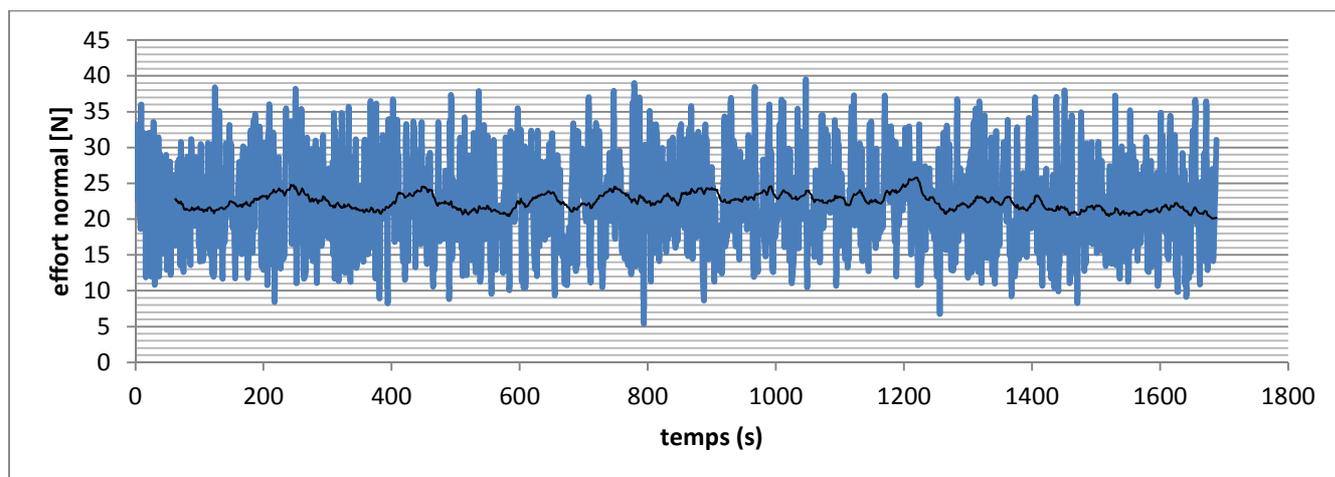


Figure V.22 : évolution de l'effort normal en fonction du temps

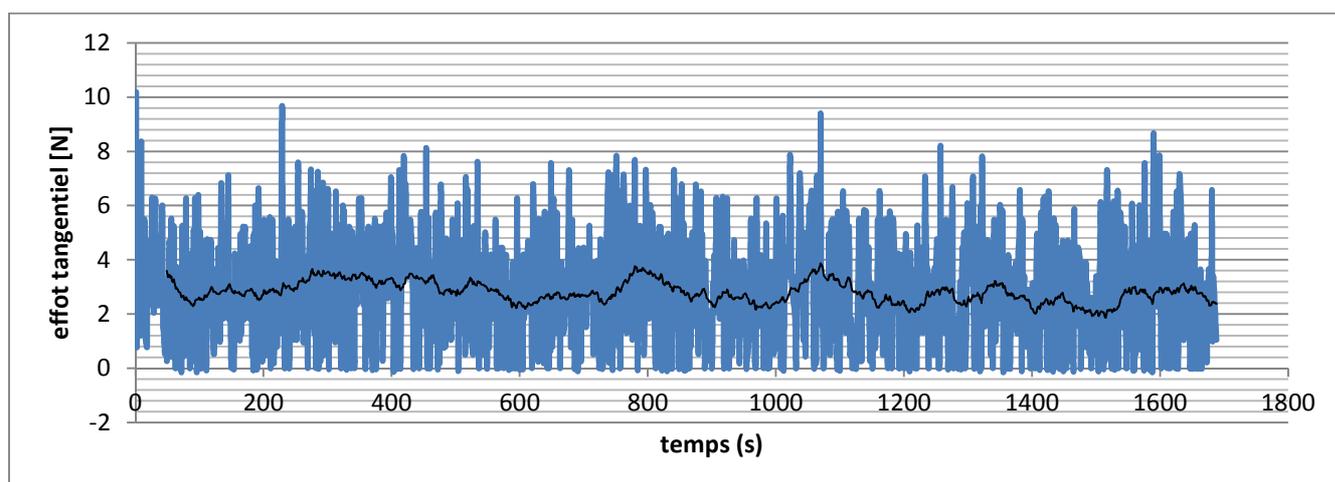


Figure V.23 : évolution de l'effort tangentiel en fonction du temps

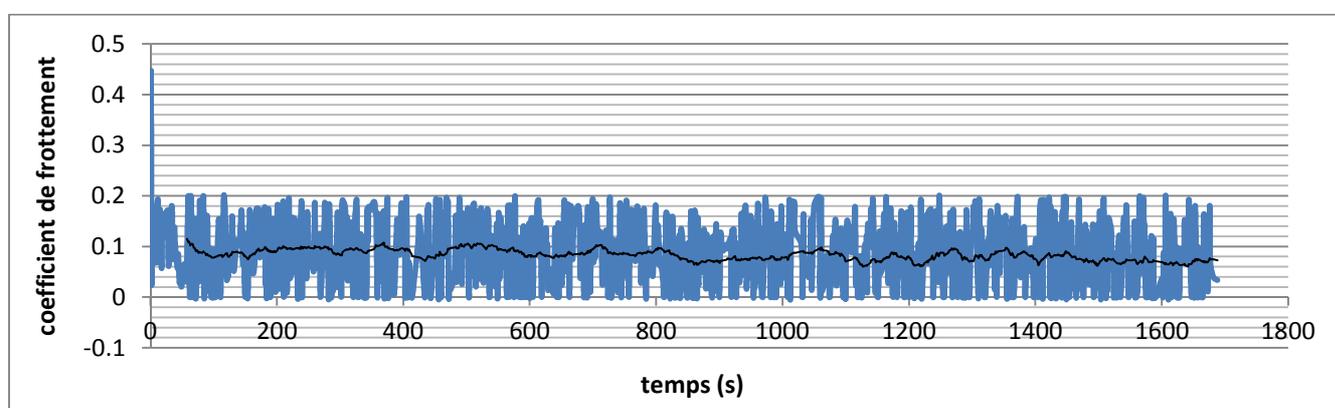


Figure V.24 : évolution du coefficient de frottement en fonction du temps