

## Table des matières

### Introduction générale

#### Chapitre I : Eléments bibliographiques

<b>I. Généralités.....</b>	<b>1</b>
<b>II. Le système tribologique .....</b>	<b>2</b>
<b>III. Mécanismes de dégradation de surface .....</b>	<b>3</b>
<b>III.1. L'usure .....</b>	<b>3</b>
<b>III.2. ETUDE DE L'USURE.....</b>	<b>3</b>
<b>III.2.1. Evolution de l'usure .....</b>	<b>3</b>
<b>III.2.2. Les différents types d'usure.....</b>	<b>5</b>
<b>a.Usure adhésive .....</b>	<b>5</b>
<b>b.Usure abrasive .....</b>	<b>6</b>
<b>c.Usure par érosion.....</b>	<b>6</b>
<b>d.Usure par cavitation.....</b>	<b>7</b>
<b>e.Usure par fatigue et délamination.....</b>	<b>7</b>
<b>f.Usure corrosive et oxydative .....</b>	<b>7</b>
<b>III.3. Quantification de l'usure.....</b>	<b>8</b>
<b>III.3.1. Loi d'Archard .....</b>	<b>9</b>
<b>III.3.2. Limitation de la loi d'Archard .....</b>	<b>10</b>

#### Chapitre II: L'approche énergétique.

<b>I. Introduction.....</b>	<b>12</b>
<b>II. Différent types d'énergies .....</b>	<b>12</b>
<b>II.1. L'énergie cinétique .....</b>	<b>12</b>
<b>II.2. L'énergie potentielle .....</b>	<b>12</b>
<b>II.3.L'énergie potentiel élastique.....</b>	<b>13</b>

II.4. L'énergie thermique .....	13
II.5. L'énergie chimique .....	13
II.6. L'énergie nucléaire .....	13
II.7. L'énergie électrique .....	14
II.8. L'énergie de surface .....	14
III. Les principaux modes de dissipations d'énergie .....	14
IV. Quantification de l'énergie dissipée par frottement .....	16

### Chapitre III: Application de l'approche énergétique

I. Introduction .....	19
II. Calcul de l'énergie dissipée .....	20
III. Effet de la pression sur l'évolution de l'énergie .....	21
IV. Effet de la vitesse sur l'évolution de l'énergie .....	23
V. Relations entre le volume d'usure et l'énergie dissipée .....	25
VI. Conclusion .....	30
Conclusion général .....	31
Bibliographies .....	32

## Table des figures

<b>Figure I.1:</b> Synoptique général d'un système tribologique.....	01
<b>Figure I.2:</b> Système tribologique.....	02
<b>Figure I.3 :</b> Evolution de l'usure .....	03
<b>Figure I.4 :</b> Mécanisme de l'usure adhésive. (a) usure sévère,(b) usure douce .....	05
<b>Figure I.5 :</b> Mécanisme d'usure abrasive.....	05
<b>Figure I.6 :</b> Photos réels de quelques types d'usure.....	07
<b>Figure II.1 :</b> Modes de dissipation locale d'énergie dans un contact frottant.....	14
<b>Figure III.1 :</b> Schéma du calcul de l'énergie dissipée accumulée .....	21
<b>Figure III.2 :</b> Coefficient de frottement en fonction de la durée du frottement à différentes charges normales.....	21
<b>Figure III.3 :</b> Evolution de l'énergie dissipée en fonction du temps à différentes charges normales.....	22
<b>Figure III.4 :</b> Coefficient de frottement en fonction de la durée du frottement à différentes vitesses de glissement.....	23
<b>Figure III.5 :</b> Evolution de l'énergie dissipée en fonction du temps à différentes vitesses de glissement.....	23
<b>Figure III.6 :</b> Variations du coefficient de frottement (a) et du coefficient de volume d'usure (b) avec la distance de glissement des composites PTFE-PPS renforcés de nano- $Al_2O_3$ .....	24
<b>Figure III.7 :</b> Evolution de l'énergie dissipée en fonction de la distance de glissement ...	25
<b>Figure III.8 :</b> Variation du volume d'usure en fonction de l'énergie dissipée pour les composites PTFE-PPS renforcés nano- $Al_2O_3$ .....	27

## **Introduction générale**

Le frottement et L'usure sont des phénomènes très complexes qui impliquent des interactions mécaniques et chimiques qui dépendent de plusieurs facteurs, tels que la vitesse de glissement et la charge, le type de matériau utilisé, la température ambiante, la rugosité de la surface...

L'étude prédictive de l'usure, était le souci de plusieurs chercheurs pendant plusieurs décennies, du fait qu'elle dépend à son tour du type d'usure et fait intervenir des paramètres propres aux matériaux (ductilité, limite élastique, dureté, ...) et des paramètres de fonctionnement (vitesse, géométrie, charge,...). La problématique c'est que ces paramètres peuvent évoluer durant le processus d'usure ce qui rend encore plus difficile sa quantification.

Afin de pouvoir quantifier ce phénomène, l'usure a été largement étudiée durant plusieurs années et plusieurs modèles ont été développés. La loi d'Archard est l'une des premières équations utilisées pour relier le volume d'usure et les différents paramètres tribologiques. Vu que le modèle d'Archard présente certaines limites, puisqu'il n'intègre pas tous les paramètres intervenant dans le processus de contact, de nombreux auteurs ont proposé une approche énergétique basée sur l'énergie dissipée par frottement pour mieux élaborer le mécanisme d'usure.

Dans notre travail on a appliqué l'approche énergétique sur des tribosystème différents, où les résultats expérimentaux ont été relevés de la bibliographie.

Ce mémoire se compose de 3 chapitres principaux :

Le premier chapitre donne un aperçu des concepts tribologiques, des propriétés de surface, de l'usure et des différents types d'usure, ainsi que les différentes lois de quantification de l'usure.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de l'énergie et de ses différentes formes et types, ainsi qu'au concept d'énergie dissipée et à sa relation avec le frottement.

Et le dernier chapitre présente l'application de l'approche énergétique pour différents tribosystème. On a traité l'influence des paramètres opérationnels, pression et vitesse de glissement, ainsi que la composition du matériau sur l'énergie dissipée par frottement.

Une conclusion générale clôt ce mémoire en faisant ressortir les principaux résultats obtenus.

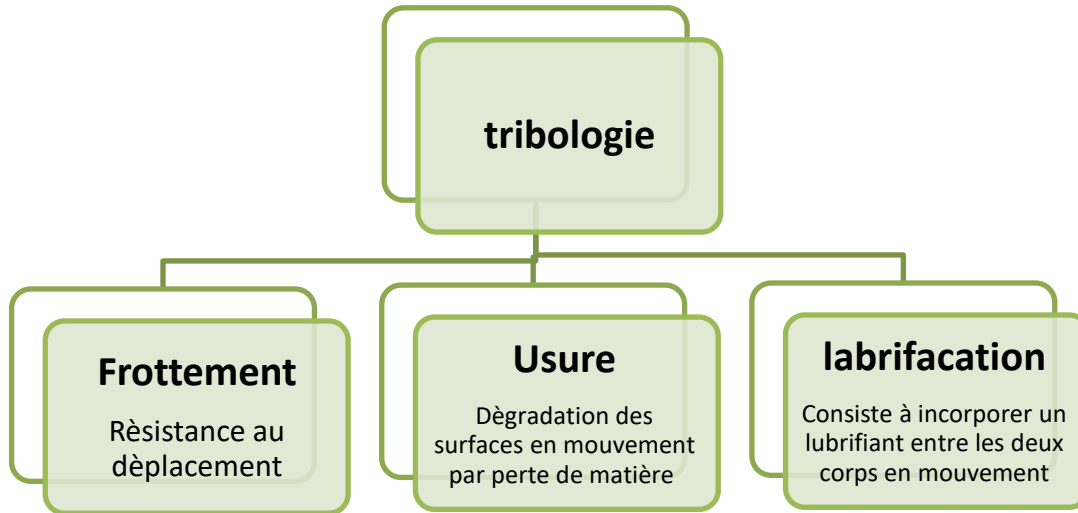
# Chapitre I :

# Eléments bibliographiques

## **I. Généralités :**

La tribologie fait partie intégrante du domaine de la construction des machines, c'est la science qui étudie les interactions de deux surfaces en mouvement l'une par rapport à l'autre. Elle englobe la technique associée et l'ensemble des secteurs de la friction, de l'usure et de la lubrification. Elle s'appuie à la fois sur les bases fondamentales de la mécanique, sur les acquis récents de la science des matériaux et sur la physico-chimie des surfaces.[1]

On retrouve la tribologie dans les applications industrielles les plus pointues (adhérence du contact roue / rail, impact de tubes dans les centrales nucléaires) comme dans la vie de tous les jours (l'essuie-glace qui laisse une pellicule d'eau non homogène sur le pare-brise d'une voiture, la craie qui crisse sur un tableau, etc.) ce qui explique combien l'histoire de l'humanité et celle de la tribologie sont liées. Durant ces dernières décennies, les recherches dans le domaine de la tribologie sont intéressées principalement au volume des matériaux en contact [2][3], par la détermination des lois de comportement de frottement et d'usure (approche mécanique). Puis, la tribologie des surfaces a fait son apparition associée à la physico-chimie des surfaces (approche matériaux). L'étude des surfaces n'ayant pas permis d'expliquer tous les phénomènes dus au frottement, la tribologie s'est étendue à l'étude des interfaces (approche complémentaire mécanique/matériaux) [4]. Cette dernière notion a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et de l'usure.

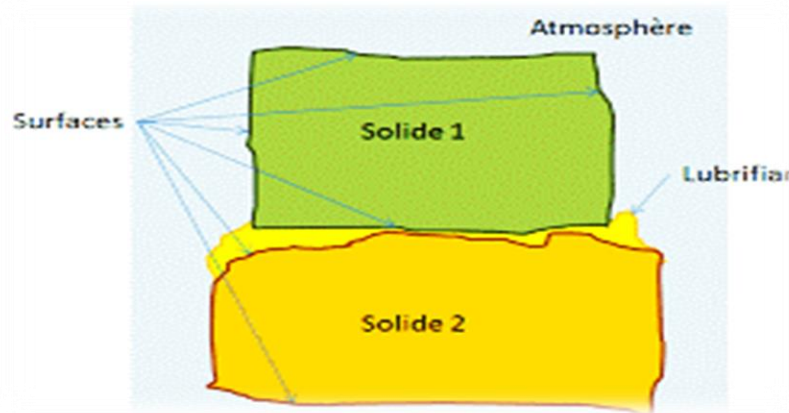


**Figure I.1:** Synoptique général d'un système tribologique [1]

## II. Le système tribologique

La tribologie des interfaces concerne le milieu interfacial entre les deux corps en contact. On définit ainsi un système tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (Figure I.2): les deux solides en contact (premiers corps 1 et 2) et le milieu interfacial désigné sous le terme de troisième corps. Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu interfacial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par détachement de particules des premiers corps. Ce tribosystème se trouve dans un environnement E qui constitue l'atmosphère de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température et sa pollution [4].





**Figure I.2:** Système tribologique

### **III. Mécanismes de dégradation de surface :**

#### **III.1. L'usure**

L'usure correspond à l'endommagement des surfaces en contact, c'est un ensemble complexe de phénomènes amenant une émission de débris avec perte de masse, de cotes, de forme, et s'accompagnant généralement de transformations physiques et chimiques des surfaces.

#### **III.2. Etude de l'usure**

Les principaux facteurs de l'usure correspondent à la nature des matériaux en contact et les conditions de fonctionnement telle que la pression, la température, la lubrification, le milieu ambiant... Le frottement est la cause principale de l'usure qui entraîne les effets de détérioration dimensionnelle des pièces, de l'augmentation des jeux de fonctionnement et la dégradation des caractéristiques superficielles.

##### **III.2.1. Evolution de l'usure**

L'usure est une conséquence du frottement qui conduit à une dégradation progressive dans le temps, interprétée par l'estimation de la perte de masse au cours du temps. L'évolution de l'usure présente généralement trois phases distinctes (figure I.3).

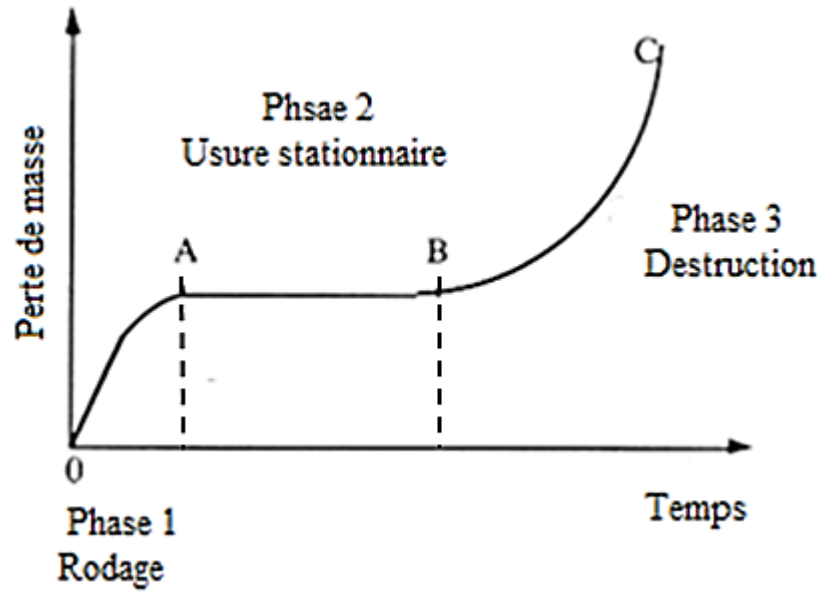


Figure I.3 : Evolution de l'usure

- **La phase 1 :** correspond à l'adaptation des surfaces en contact souvent appelée phase de rodage. Elle est caractérisée par une diminution de la vitesse avec une augmentation de la quantité d'usure. Les couches superficielles des pièces en contact peuvent subir non seulement des pertes de poids mais aussi des déformations plastiques.
- **La phase 2 :** appelée régime d'usure stationnaire, correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. Cette phase est caractérisée par une perte de masse faible, régulière et elle est sensiblement linéaire en fonction du temps.
- **La phase 3 :** dite phase d'usure catastrophique ou usure grippant. Elle traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée, dont la vitesse augmente exponentiellement et tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement. L'augmentation des jeux et des efforts peut conduire à la disparition des films lubrifiants, et par la suite à la détérioration des surfaces qui deviennent fragiles et rugueuses.

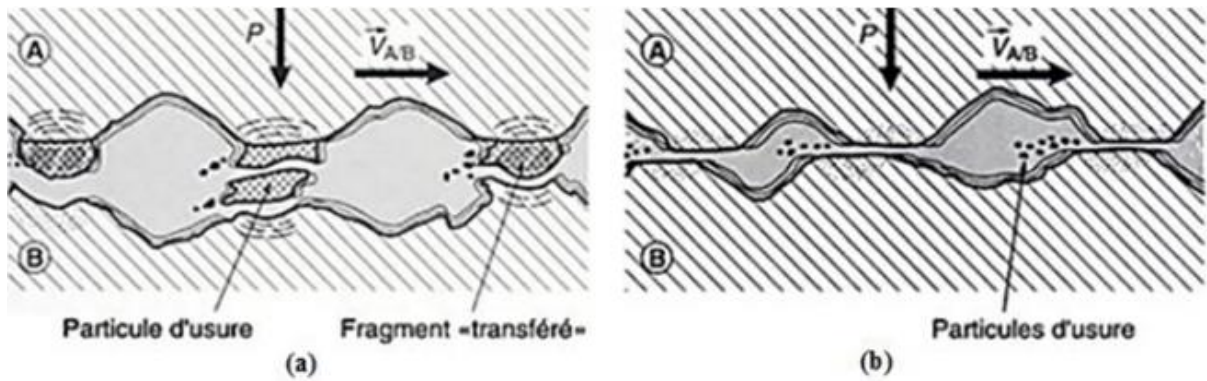
La quantification de l'usure fait appel à des lois empiriques dont quelques exemples seront présentés par la suite.[5].

### **III.2.2. Les différents types d'usure**

En 1957, Burwell a classifié les principaux types d'usure comme étant l'usure adhésive, abrasive, par fatigue et corrosive (ou tribochimique). Les trois premiers types sont des processus mécaniques alors que le dernier est un processus chimique. A cela s'ajoutent des formes secondaires d'usure : corrosion de contact, usure par cavitation, usure d'origine électrique, etc. Ces phénomènes, repérés dans différents cas de contacts, peuvent se produire simultanément, et certains d'entre eux peuvent être prépondérants par rapport aux autres selon les conditions opératoires. D'autre part, ces phénomènes dépendent non seulement des conditions d'utilisation mais aussi d'autres facteurs, comme la nature des matériaux en contacts, les conditions d'utilisation ainsi que les états de surface.

#### **a. Usure adhésive**

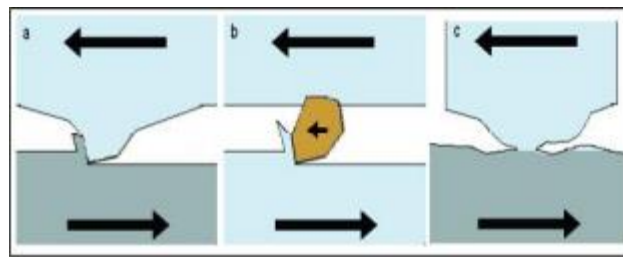
L'usure adhésive est le type d'usure le plus fondamental, elle est due principalement au cisaillement par frottement des microsoudures ou jonctions qui se forment entre deux aspérités en contact direct. Elle se manifeste par un transfert de matière d'une des deux surfaces en contact sur la surface antagoniste (de la face la plus tendre sur la plus dure), elle est à la fois d'origine mécanique et physicochimique. L'intensité de l'usure adhésive dépend principalement du type de liaison d'adhésion. En effet, dans le cas d'une liaison peu résistante le transfert de matière est limité, avec à un échauffement léger. Les particules détachées du contact, quant à elles, sont de très petites dimensions de l'ordre de  $100\text{Å}$ , on parle alors d'une usure douce. Par contre, l'usure sévère apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces, dont les débris sont des fragments métalliques de dimensions relativement importantes, ce processus produit un échauffement important du contact. Cependant, la forme extrême de l'usure adhésive est caractérisée par des températures très élevées dans tout le volume, et un transfert intense de matière conduisant à la détérioration des matériaux en contact, ce processus est connu sous le nom de grippage.



**Figure I.4 :** Mécanisme de l'usure adhésive. (a) usure sévère, (b) usure douce

### b. Usure abrasive

L'usure abrasive est due au contact entre une rugosité et la surface d'un solide. La rugosité responsable de l'usure peut être un pic de la surface antagoniste, mais également un débris d'une surface ou plus généralement un troisième corps introduit dans le contact. L'endommagement subi par la surface se présente sous la forme de stries parallèles à la direction de glissement. En fonction de la sévérité du contact, plusieurs transformations de la surface abrasée se produisent. Elles dépendent des propriétés mécaniques et de la géométrie des matériaux en contact.



**Figure I.5 :** Mécanisme d'usure abrasive

### c. Usure par érosion

L'usure par érosion est causée par des impacts de particules solides ou liquides contre la surface d'un solide. Ce mécanisme d'usure dépend des propriétés des matériaux en présence, de l'angle d'impact, de la vitesse d'impact et de la taille de la particule.

**d. Usure par cavitation**

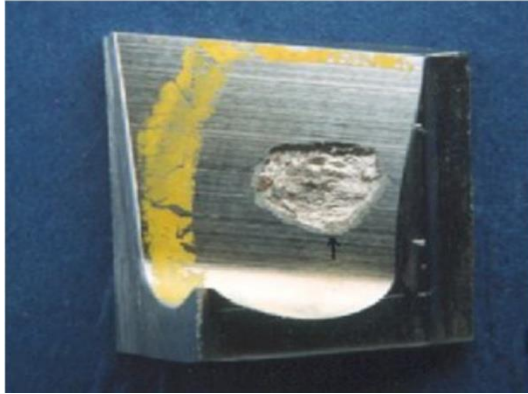
La cavitation apparaît lorsque le liquide atteint, au voisinage d'une surface, sa pression de vapeur saturante, il se crée alors une cavité ne pouvant rester stable dans le milieu. Elle implose donc et produit une onde de choc créant sur la surface des contraintes très élevées qui se traduisent souvent par l'apparition de faciès en forme de cratère.

**e. Usure par fatigue et délamination**

Le passage répété d'un solide sur des surfaces lisses ou rugueuses provoque la propagation de fissures par fatigue, les fissures s'initient au niveau de défauts dans le matériau puis se propagent dans un premier temps en sous – couche pour remonter ultérieurement à la surface et provoquer l'enlèvement d'un débris d'usure.

**f. Usure corrosive et oxydative**

Elle consiste dans l'apparition d'un processus chimique lorsque le frottement a lieu dans un environnement réactif. Deux cas peuvent se présenter : la formation du film réactionnel et sa destruction par frottement, formant ainsi des débris de caractère stables et durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. D'un autre côté, on peut rencontrer une configuration moins agressive suite à l'oxydation de ces débris. Celle-ci peut conduire à la formation d'un film d'oxydes, de faible épaisseur, adhérent à la surface de l'un des antagonistes et qui joue un rôle protecteur contre l'usure adhésive. La cinétique de ce phénomène est gouvernée par la compétition entre la formation du film réactionnel et sa destruction par frottement.



**Fatigue**



**Adhésion**



**Corrosion**



**Abrasion**

**Figure I.6 :** Photos réels de quelques types d'usure[6]

### **III.3. Quantification de l'usure**

L'étude des différents types d'usure montre que leurs mécanismes associés peuvent être très variés par leurs conditions d'apparition et par leurs effets. L'étude prédictive de l'usure, quant à elle, dépend à son tour du type d'usure et fait intervenir des paramètres propres aux matériaux (ductilité, limite élastique, dureté, ...) et des paramètres de fonctionnement (vitesse, géométrie, charge,...). Ces paramètres peuvent évoluer durant le processus d'usure ce qui rend encore plus difficile sa quantification. Afin de pouvoir quantifier ce phénomène, l'usure a été largement étudiée durant ces dernières décennies et plusieurs modèles ont été développés. Cependant, aucune de ces lois n'est générale et la plupart d'entre elles ont été développées pour des conditions bien spécifiques.

Plus que 300 lois relatives au frottement et à l'usure ont été recensées dans la littérature [7], ces lois ont été classifiées par la suite en trois catégories :

- Les lois à caractère empirique, qui ont vu le jour entre les années 1950 et 1970, elles prennent en compte principalement des paramètres relatifs aux conditions de tests. Ces lois sont bien précises mais ne sont valables que pour les tests où elles ont été établies.
- Entre les années 1970 et 1980 sont apparues les lois basées sur la mécanique du contact. Certaines d'entre elles tiennent compte des propriétés des matériaux en contact, comme leur module de Young ou bien leur dureté, qui ont un impact sur la cinétique d'usure.
- Enfin, depuis les années 1980 les lois basées sur les mécanismes d'endommagement se sont développées. Elles incluent les mécanismes de dislocations, les propriétés en fatigue et la rupture en cisaillement.

Les paramètres de l'usure, ou variables opératoires, sont nombreux et il apparaît nécessaire de bien les connaître pour une analyse précise d'un problème tribologique. Les principaux paramètres sont :

- Les caractéristiques du mouvement relatif entre les corps composant le mécanisme : cinématique, vitesse, amplitude
- La charge normale appliquée
- Le mode de contact (surfacique ou ponctuel)
- L'environnement (atmosphère, température...)

À la vue de toutes ces difficultés, on conçoit que les approches quantitatives sont pour l'instant très globales ou macroscopiques à l'image du modèle d'Archard et de ses dérivés que nous détaillerons par la suite.

### **III.3.1. Loi d'Archard**

La forme la plus courante de la loi d'Archard est exprimée en fonction d'un coefficient d'usure  $k$  sans dimension, de la force normale appliquée  $F_N$ , de la distance de glissement  $L$  et de la dureté du matériau le plus mou  $H$ . Ce modèle de base a été appliqué initialement dans le cas de l'usure adhésive à sec, et s'exprime comme suit :

$$V = kF_N \cdot L/H$$

I.1



Il a été montré que la loi d'Archard peut être étendue à d'autres mécanismes, notamment celui de l'abrasion. Moyennant une redéfinition de certains paramètres, l'équation précédente peut s'écrire :

$$V = KF_N L \quad \text{I.2}$$

Où  $K$  est un coefficient d'usure souvent exprimé en  $\text{mm}^3 \text{N}^{-1} \text{m}^{-1}$

Ce coefficient, dont la valeur ne dépasse pas l'unité, nous donne une indication sur l'amplitude du phénomène (usure sévère - usure modérée) et il n'est obtenu que par le biais de l'expérience. [8]

Une autre forme dérivée de la première loi d'Archard fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact par le biais du produit  $PV$  tel que  $P$  est la pression et  $V$  la vitesse de glissement, ce produit est proportionnelle à la vitesse d'usure  $dh/dt$ .

$$dh/dt = a.P.V \quad \text{I.3}$$

$h$  étant la profondeur de la piste d'usure.

En 1984, Frick a donné une forme plus simplifiée de la loi d'Archard, en introduisant le concept du travail d'usure, soit  $W = F_T$ , ce qui conduit à la relation suivante :

$$V = K.W \quad \text{I.4}$$

### **III.3.2. Limitation de la loi d'Archard**

La loi d'Archard reste la plus utilisée pour décrire et prédire le comportement de l'usure en raison de sa simplicité, et est continuellement étendue pour obtenir une meilleure quantification de l'usure. Cependant, cette loi présente certaines limites puisqu'elle ne prend pas en compte tous les paramètres qui interviennent dans le contact, voire leur variabilité au cours du processus d'usure. Par conséquent, de nombreux auteurs ont proposé une approche alternative basée sur l'énergie dissipée par frottement des surfaces en contact. Cette partie sera développée en détail dans le chapitre suivant.[9]



# Chapitre II

## L'approche énergétique

## **I. Introduction**

L'usure fait l'objet de recherches intenses depuis plusieurs années, les mécanismes d'usure sont soumis à la température de contact, aux transformations microstructurales, à la formation de films tribo-chimiques, aux microsoudures des surfaces de contact, ou encore aux ruptures liées aux contraintes thermiques et mécaniques. La model d'Archard, utilise généralement les variables d'entrée du tribosystème (la charge normale, l'amplitude du déplacement, le coefficient de frottement, etc.) pour la quantification de l'usure. Par conséquent, le coefficient d'Archard devient dépendant des conditions initiales du problème, cette caractéristique limite le champ d'applications de la méthode d'Archard. D'autre part les méthodes basées sur l'énergie ont montré de meilleurs résultats, du fait que ces méthodes utilisent les mesures obtenues à partir du contact, en particulier, la force de frottement et la distance de glissement.

## **II. Différent types d'énergies**

L'énergie se manifeste dans un mouvement, une réaction chimique, un rayonnement, Un dégagement de chaleur, un système électrique ou la fission d'un atome. Donc on peut citer diverses formes d'énergie.

### **II.1. L'énergie cinétique**

C'est l'énergie qui est liée au mouvement d'un objet, elle correspond à l'énergie qui sera transférée de cet objet à un autre lors d'une collision. Cette énergie est liée à la vitesse et à la masse du corps en mouvement.

### **II.2. L'énergie potentielle**

C'est le potentiel du transfert d'énergie d'un objet avant d'effectuer un mouvement. C'est aussi la force qu'exerce la gravité sur un corps en relation à sa position verticale par

rapport à un point de référence avant même d'être en mouvement. De plus c'est la même énergie qui a été exercée sur le corps pour lui donner une hauteur.

### **II.3. L'énergie potentiel élastique**

Il s'agit encore d'une énergie potentielle, associée cette fois aux déformations des objets élastiques, par exemple à la tension d'un ressort ou à la compression d'un gaz.

### **II.4. L'énergie thermique**

L'énergie thermique est une forme courante d'énergie transmise par conduction, rayonnement ou convection. Où la chaleur est toujours transférée du corps chaud vers le froid. Le transfert de chaleur d'un objet à un autre provoque une élévation de sa température. L'énergie thermique peut être convertie en tout autre type d'énergie telle que l'énergie mécanique comme dans une voiture, ou l'énergie électrique comme dans une centrale électrique, ou l'énergie rayonnante comme dans le feu et autres. L'énergie thermique est une énergie cinétique et ce mouvement apparaît comme un mouvement aléatoire des particules de matière dans les gaz et les liquides, et un mouvement vibratoire du réseau cristallin du matériau solide et est transmis par ce qu'on appelle le photon.

### **II.5. L'énergie chimique**

L'énergie chimique est associée à la liaison des atomes dans les molécules. Elle est plus élevée lorsque ces atomes sont séparés que lorsqu'ils sont liés en molécules, et cet écart est d'autant plus grand que la liaison est plus forte. Puisqu'elle modifie l'énergie chimique des corps, une réaction chimique s'accompagne d'une transformation de cette énergie en une autre forme d'énergie, le plus souvent en chaleur.

### **II.6. L'énergie nucléaire**

L'énergie nucléaire est localisée dans les noyaux des atomes. Ces noyaux, sont 100000 fois plus petits que les atomes eux-mêmes, sont constitués de particules plus élémentaires telles que les protons et les neutrons qui sont très fortement liés entre eux. De même que la liaison des atomes en molécules est la source de l'énergie chimique, la liaison des protons et neutrons en noyaux par des forces nucléaires est la source de l'énergie nucléaire.

### **II.7. L'énergie électrique**

Les particules chargées exercent les unes sur les autres des forces électriques. De même qu'une énergie potentielle de gravitation était associée aux forces de gravitation ou de pesanteur, une énergie potentielle électrique est associée aux forces électriques entre charges. Le déplacement de celles-ci dans un circuit s'accompagne de transferts plus ou moins rapides d'énergie, mesurés par la puissance électrique. Une énergie électrique peut se transformer en chaleur dans une résistance (radiateur, réchaud), en travail dans un moteur.

### **II.8. L'énergie de surface**

L'énergie de surface est l'excès d'énergie à la surface d'un matériau par rapport à la masse, ou c'est le travail nécessaire pour construire une zone d'une surface donnée. Une autre façon d'afficher l'énergie de surface consiste à la relier au travail nécessaire pour couper un grand échantillon, créant ainsi deux surfaces. Il y a "excès d'énergie" en raison de la liaison incomplète et non réalisée des deux surfaces.

## **III. Les principaux modes de dissipations d'énergie**

Le transfert énergétique dans un contact glissant peut se faire généralement sous deux formes principales :

- Un transfert d'énergie mécanique résultant du chargement du tribosystème et bien entendu du glissement relatif entre les deux pièces,
- Un transfert d'énergie thermique, si les antagonistes sont soumis à un flux de chaleur.

Suite au transfert d'énergie cette dernière peut se dissiper sous forme mécanique, calorifique ou physicochimique.

La dissipation d'énergie mécanique peut être produite par les différents mécanismes générés au niveau des couches superficielles des pièces antagonistes tels que la plastification, le fluage...et de rupture comme la fissuration des massifs, le cisaillement des jonctions adhésives, émission de débris ...

Concernant la dissipation d'énergie thermique, elle est générée suite au frottement des aspérités des deux surfaces en contact.

La troisième forme de dissipation d'énergie est physico-chimique qui est liée aux mécanismes d'adhésion des surfaces en contact, de diffusion en volume et de changements de phase. Cette forme d'énergie est la cause de la formation d'oxyde et aussi l'origine des phénomènes acoustiques (vibrations, bruits), électricité statique, étincelles...

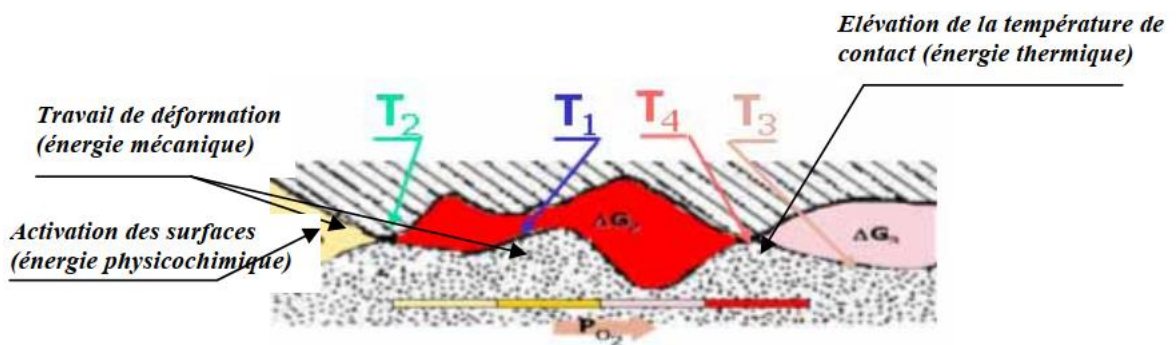


Figure II.1 : Modes de dissipation locale d'énergie dans un contact frottant

Les différents phénomènes dissipatifs d'énergie sont regroupés dans le tableau II.1

Energie dissipée	Mode de dissipation
Energie de déformation	Déformations élastiques et plastiques
Energie de rupture	Fissuration, formation de débris, arrachements, écaillages
Energie thermique	Échauffements, écoulement de chaleur, transferts par conduction
Energie chimique	Adhésion, oxydation
Energie acoustique	Vibrations, bruits
Energie électrique	Électrisation, accumulation de charges, potentiels électrochimiques
Energie lumineuse	Étincelles, rayonnement, photoémission

Tableau II.1 : Différents modes de dissipation d'énergie en frottement

La quantification de ces énergies est d'un intérêt capital car elles conditionnent les échauffements à l'interface, elles modifient la micro et la macro géométrie du contact (dégradations par usure conduisant à la détérioration du système). Elles influencent également les écoulements à l'interface outil/matière dans les procédés de mise en forme (laminage, forgeage,...).

#### **IV. Quantification de l'énergie dissipée par frottement**

Les auteurs [barreau] considèrent que l'usure des matériaux en contact non lubrifié résulte de la dissipation de l'énergie due au frottement. Ceci est appuyé par le fait que l'énergie dissipée par frottement peut conduire à une usure. L'augmentation locale de la température et la perte de matière dans la piste de frottement résulteraient de l'énergie de frottement dissipée dans l'aire de contact.

Le concept de puissance de frottement dissipée par unité de surface,  $Q_f$ , permet de mesurer le niveau de chauffage par frottement (dépense énergétique) ayant lieu dans la zone de contact de deux surfaces frottantes. La température atteinte dans le contact est directement reliée à la puissance de frottement et à la géométrie du contact tout autant que la conductivité thermique des corps en contact.  $Q_f$  s'exprime par :

$$Q_f = \mu P v / A_r \quad (\text{II.1})$$

Avec  $\mu$  le coefficient de frottement de type Coulomb

$P$  La charge normale (N)

$v$  La vitesse de glissement relative (m/s)

Et  $A_r$  l'aire réelle de contact (mm<sup>2</sup>).

La puissance de frottement exprime la quantité d'énergie dissipée par frottement dans la zone de contact, mais elle ne prend pas en compte le temps à partir duquel l'énergie est libérée aux matériaux en contact. Pour cela, d'autres auteurs ont remplacé la puissance de frottement par le concept d'énergie cumulée dissipée,  $E_d$ , calculée à partir de la force tangentielle et la distance de déplacement :

$$E_d = \sum F_t \cdot d \quad (\text{II.2})$$

Avec  $F_t$  la force tangentielle

$d$  Le déplacement linéaire

Cette approche a été utilisée pour exprimer le taux d'usure sous forme de volume de matière perdue par unité d'énergie dissipée à partir de la courbe maîtresse du volume usé en fonction de l'énergie dissipée. Cette courbe est intéressante d'un point de vue pratique car elle permet la quantification et la comparaison de la résistance à l'usure de différents matériaux dans le cas d'un frottement unidirectionnel. Dans ces conditions de frottement unidirectionnel, ils trouvent :

$$E_d = \mu \cdot P \cdot v \cdot t \quad (\text{II.3})$$

Avec  $t$  la durée de l'essai.

Cette linéarité est atteinte dans plusieurs cas de frottement, Mohrbacher [10] montre dans ses travaux qu'il existe une relation linéaire entre l'énergie dissipée et le volume usé. D'un autre côté, Olofsson [11] a également étudié l'énergie dissipée pendant des essais de micro glissement oscillatoires. Comme précédemment, il trouve une relation linéaire entre l'énergie dissipée par cycle de micro glissement et l'amplitude de déplacements.

Rymuza [12] considère le frottement comme un processus qui transforme l'énergie mécanique externe en énergie de processus internes. Il propose que les "lois" traditionnelles du frottement soient incapables de refléter la nature énergétique et suggère un nouveau paramètre appelé "coefficient of friction losses" (CFL), afin de refléter à la fois la nature dissipative du processus de frottement et de fournir simultanément une formulation utile pour l'application. La nature dissipative du processus de frottement et de fournir simultanément une formulation utile pour une application dans la pratique de l'ingénierie. Le CFL est exprimé comme suit :

$$\text{CFL} = \frac{\text{énergiedespertesdemasseparfrottement}}{\text{énergiederéférenced'entréereprésentéeparlacharge*lavitessedeglissement}}$$

Par rapport au coefficient de frottement traditionnel, le CFL dépend non seulement des propriétés des corps en contact, mais aussi de la charge, de la vitesse de glissement, des conditions environnementales, etc.

En d'autres termes, le CFL est utile pour estimer les pertes énergétiques " moyennes " dans le tribosystème analysé.

Par la suite les auteurs [13] ont étendu le modèle dynamique à micro-échelle de la simulation de l'usure, proposé initialement par Li et al [14], suivi par Elalam et al [15], et Chen et Li [16]. Ils étudient les aspects thermiques des processus de frottement, en mettant l'accent sur l'échauffement par frottement et sa relation avec la déformation plastique.

Ces études expérimentales montrent que le volume d'usure varie linéairement avec l'énergie dissipée et la pente de cette courbe linéaire est utilisée non seulement pour comparer la résistance à l'usure de différents matériaux, mais aussi pour comparer la résistance à l'usure dans différents environnements.



# Application de l'approche énergétique

## I. Introduction

L'étude de la mécanique du frottement et de la relation entre le frottement et l'usure remonte au XVI<sup>e</sup> siècle, presque immédiatement après la découverte de la loi du mouvement de Newton. Plusieurs études montrent que la variation du frottement dépend des conditions inter faciales telles que la charge normale, la géométrie, la vitesse de glissement, l'usure, la rugosité des surfaces, le type de matériau, etc. Parmi ces facteurs, la charge normale et la vitesse de glissement sont les deux principaux facteurs qui jouent un rôle important dans la variation du frottement.

Le volume de matière arrachée, suite au glissement de deux surfaces chargées l'une sur l'autre, est quantifiée généralement par la loi d'Archard, qui est l'une des plus anciennes utilisée pour relier le volume d'usure et les paramètres tribologiques. Cette loi est définie comme suit:

$$V = \frac{KFL}{H} \quad (\text{III.1})$$

L : la distance de glissement

F : la force normale appliquée

H : la dureté du matériau

K : le coefficient d'usure

Cette loi d'Archard a été appliquée à de nombreux domaines et à divers composants. Il existe d'autres modèles d'usure, qui peuvent être considérés comme étant soit indépendants ou complémentaires de l'approche de l'usure d'Archard. Le modèle utilisé dans notre étude est le modèle énergétique qui est basé sur l'énergie dissipée par frottement des surfaces en contact. Ce modèle est appliqué dans deux cas d'études issus de la littérature.

## II. Calcul de l'énergie dissipée :

L'énergie dissipée par frottement d'un tribosystème peut être obtenue à partir de la courbe de la variation de la force tangentielle en fonction de la distance parcourue. Cette énergie est représentée par l'aire délimitée par cette courbe. Ainsi, l'énergie dissipée par frottement est exprimée par :

$$E_d = \int_0^l F \cdot dl = \int_0^l \mu \cdot F_N \cdot dl \quad (\text{III.2})$$

La force tangentielle étant définie par :

$$F = \mu \cdot F_N \quad (\text{III.3})$$

Avec  $\mu$  est le coefficient de frottement,

$F_N$  : la force normale appliquée.

la distance de glissement élémentaire  $dl$  est égal à :

$$dl = V \cdot dt \quad (\text{III.4})$$

Et sachant que la force normale exercée est constante, l'énergie dissipée par frottement devient, (Figure III.1) :

$$E_d = F_N \cdot V \int_0^t \mu \cdot dt \quad (\text{III.5})$$

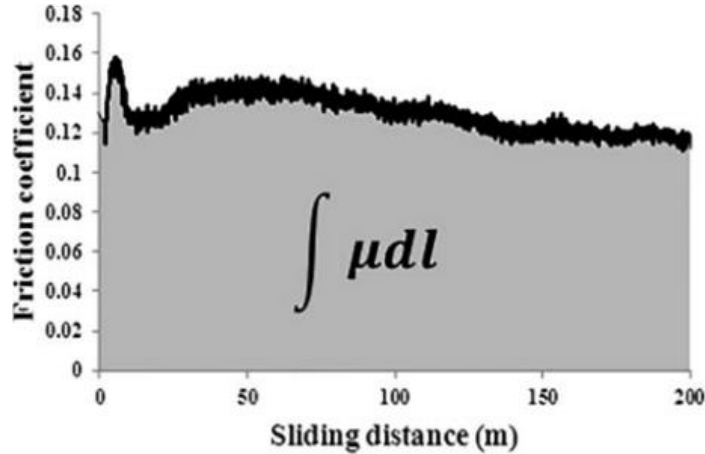


Figure III.1 : Schéma du calcul de l'énergie dissipée accumulée

Le calcul de cette intégral peut être obtenue par les méthodes numériques classiques, telles que celles du trapèze, Newton, ...

**III. Effet de la pression sur l'évolution de l'énergie :**

Cette approche est appliquée dans un premier temps dans le cas de l'usure du couple tribologique cuivre /acier lisse pour un contact non lubrifié à une vitesse de 1m/s. [17]

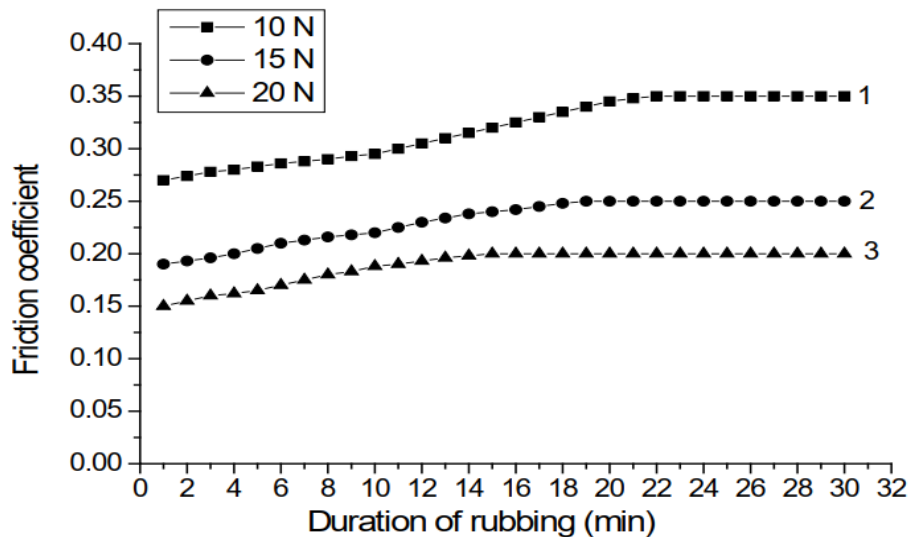
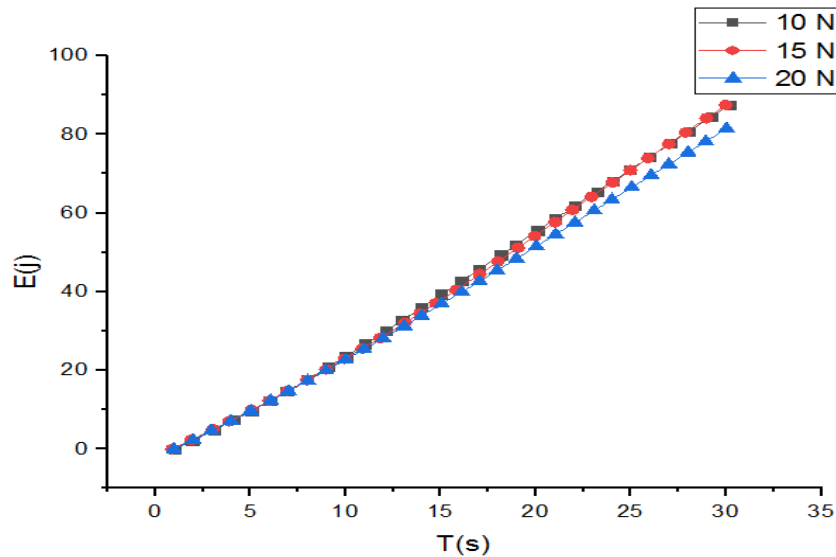


Figure III.2 : Coefficient de frottement en fonction de la durée du frottement à différentes charges normales. [17]

Le calcul de l'énergie dissipée par frottement pour les différents chargements est représenté dans la figure suivante :

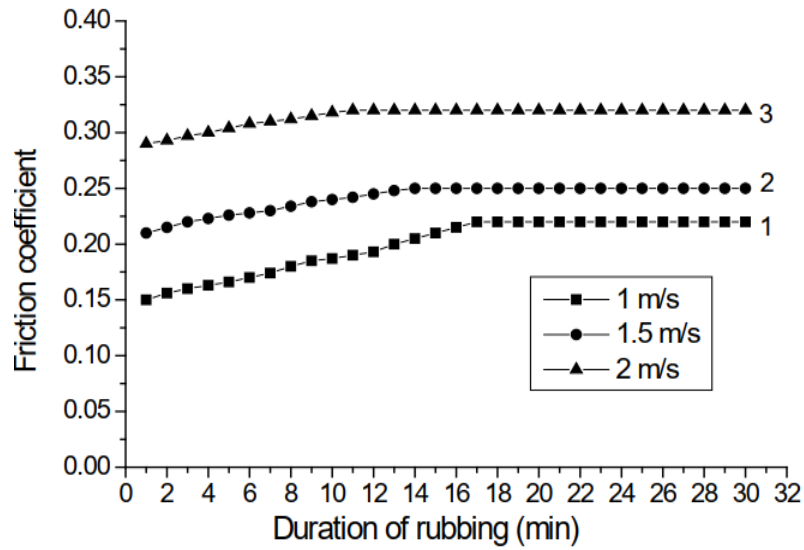


**Figure III.3 :** Evolution de l'énergie dissipée en fonction du temps à différentes charges normales.

La figure montre que l'évolution de l'énergie dissipée en fonction du temps est relativement linéaire avec des valeurs de l'énergie qui sont très proches, mis à part le cas du chargement de 20N, où on constate une légère réduction de l'énergie de frottement fournie au système tribologique. D'autre part, il semblerait que la variation de cette énergie de frottement ne dépend pas fortement de la valeur du coefficient de frottement enregistré.

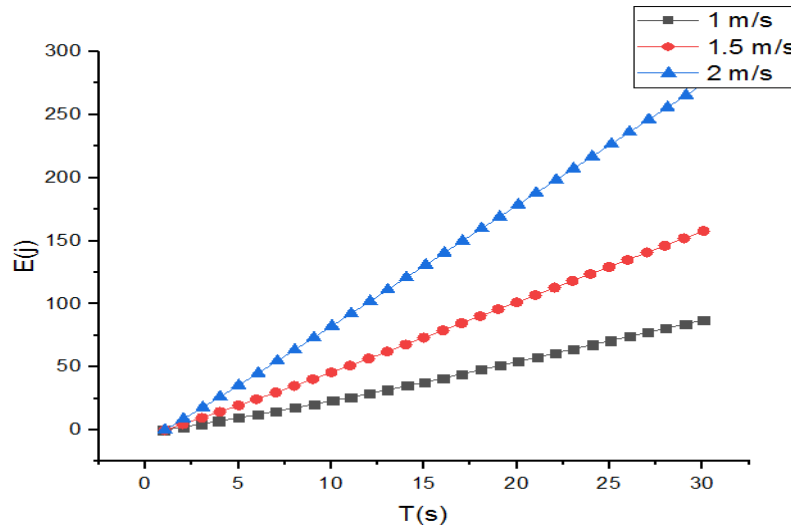
#### IV. Effet de la vitesse sur l'évolution de l'énergie :

La variation du coefficient de frottement du couple tribologique cuivre /acier lisse pour un contact non lubrifié, à un chargement constant de 15N et à différentes vitesses de glissement est représentée dans la figure III.4 :



**Figure III.4 :** Coefficient de frottement en fonction de la durée du frottement à différentes vitesses de glissement [17]

Le calcul de l'énergie de frottement obtenu à partir de ces courbes nous a permis de représenter la courbe de la figure III.5 :



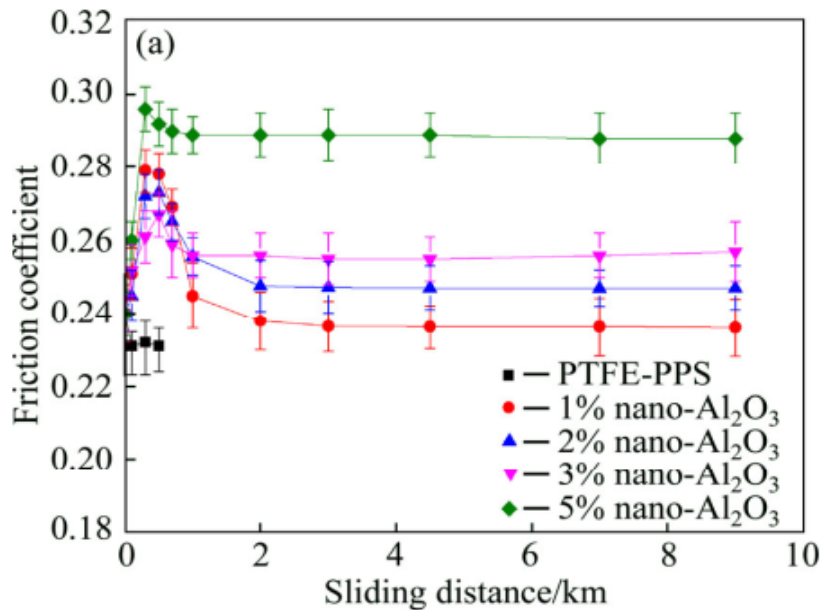
**Figure III.5 :** Evolution de l'énergie dissipée en fonction du temps à différentes vitesses de glissement.

On remarque que la variation de l'énergie de frottement en fonction du temps de glissement est pratiquement linéaire pour les trois vitesses de l'étude. Néanmoins, la pente

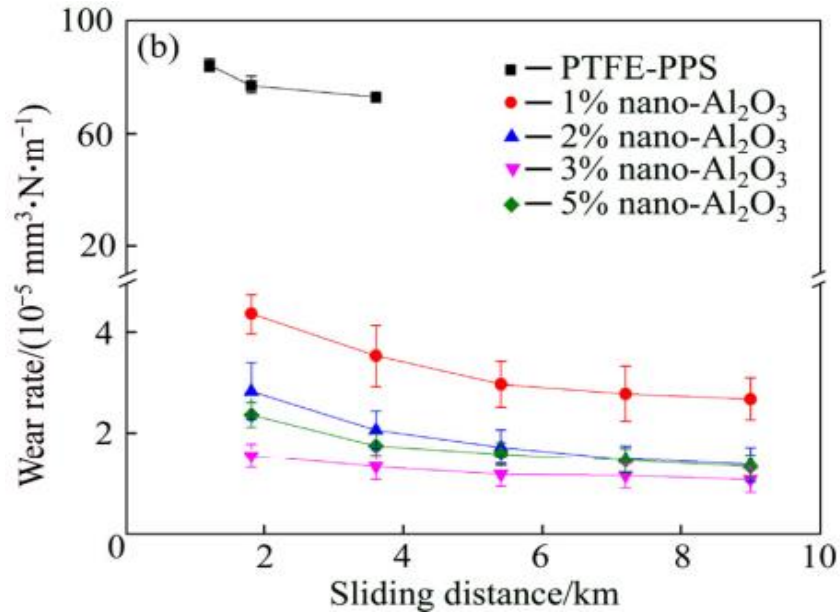
des courbes obtenues semble être proportionnelle à la vitesse de glissement. Ce qui montre que l'énergie dissipée par frottement dépend fortement de la vitesse de glissement.

#### V. Relations entre le volume d'usure et l'énergie dissipée :

L'étude de la relation entre le volume d'usure et l'énergie dissipée par frottement a été établi pour différents matériaux tels que les matériaux métallique, polymère et composite, et à différentes conditions tribologiques comme la variation de la vitesse et pression présentée précédemment, et la variation de la composition du matériau tel que présenté dans la figure III.6. [17]



**Figure III.6 .a:** Variations du coefficient de frottement la distance de glissement des composites PTFE-PPS renforcés de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [17]

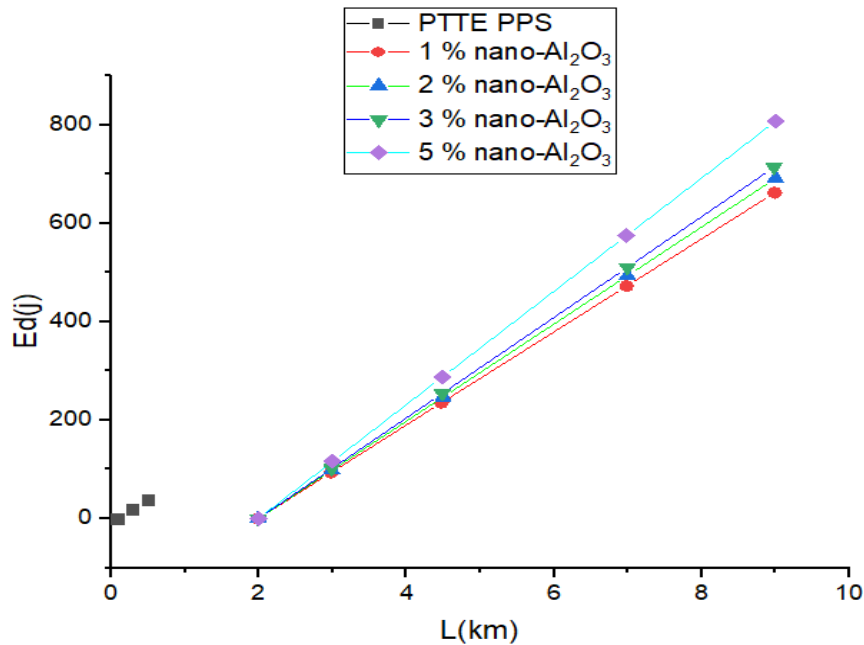


**Figure III.6.b:** Variations du coefficient de volume d'usure avec la distance de glissement des composites PTFE-PPS renforcés de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. [17]

La figure (III.6) présente la variation du coefficient de frottement et du volume d'usure en fonction de la distance de glissement d'un matériau composite (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced PTFE-PPS composites) sous un chargement de 200N et une vitesse de glissement de 2m/s. On remarque que la variation de l'élément de renfort (nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dans la matrice du PTFE-PPS influence fortement sur le comportement tribologique du matériau composite. En outre, les ajouts du nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modifient sensiblement le coefficient du frottement et le coefficient d'usure.



Le calcul de l'énergie dissipée par frottement obtenu à partir des courbes de la figure (III.6-a) nous a permis de représenter la courbe de la figure III.7 :



**Figure III.7 :** Evolution de l'énergie dissipée en fonction de la distance de glissement.

De même que les résultats précédents on remarque que la variation de l'énergie dissipée par frottement en fonction de la distance de glissement est linéaire. En plus, l'ajout de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dans la matrice du PTFE-PPS, a une forte influence sur les valeurs de l'énergie de frottement par rapport au matériau pur.

Afin de présenter la courbe de la variation du volume d'usure en fonction de l'énergie dissipée par frottement, on a calculé le volume d'usure à partir de la figure (III.6-b) en utilisant la loi d'Archard :

$$\Delta V = K \cdot F_N \cdot L \quad (III.6)$$

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

<b>PTEF-PPS</b>	<b>Distance de glissement <math>L(x10^3m)</math></b>	<b><math>\approx 1</math></b>	<b><math>\approx 2</math></b>	<b><math>\approx 3</math></b>		
	<b>Coefficient d'usure <math>k</math> (<math>10^{-5}mm^3/N.m</math>)</b>	90.85239	87.31809	85.23909		
	<b>Volume d'usure <math>\Delta V</math> (<math>mm^3</math>)</b>	216.3909	314.96619	613.34396		
<b>1% <math>Al_2O_3</math></b>	<b>Distance de glissement <math>L(x10^3m)</math></b>	<b><math>\approx 2</math></b>	<b><math>\approx 4</math></b>	<b><math>\approx 6</math></b>	<b><math>\approx 8</math></b>	<b><math>\approx 10</math></b>
	<b>Coefficient d'usure <math>k</math> (<math>10^{-5}mm^3/N.m</math>)</b>	4.30063	3.44468	2.881	2.69311	2.6096
	<b>Volume d'usure <math>\Delta V</math> (<math>mm^3</math>)</b>	15.72513	24.76067	31.13476	38.85013	46.97539
<b>2% <math>Al_2O_3</math></b>	<b>Distance de glissement <math>L(x10^3m)</math></b>	<b><math>\approx 2</math></b>	<b><math>\approx 4</math></b>	<b><math>\approx 6</math></b>	<b><math>\approx 8</math></b>	<b><math>\approx 10</math></b>
	<b>Coefficient d'usure <math>k</math> (<math>10^{-5}mm^3/N.m</math>)</b>	2.77662	2.02505	1.67015	1.37787	1.31524
	<b>Volume d'usure <math>\Delta V</math> (<math>mm^3</math>)</b>	10.0921	14.60042	18.08555	19.87681	23.73294
<b>3% <math>Al_2O_3</math></b>	<b>Distance de glissement <math>L(x10^3m)</math></b>	<b><math>\approx 2</math></b>	<b><math>\approx 4</math></b>	<b><math>\approx 6</math></b>	<b><math>\approx 8</math></b>	<b><math>\approx 10</math></b>
	<b>Coefficient d'usure <math>k</math> (<math>10^{-5}mm^3/N.m</math>)</b>	1.50313	1.29436	1.12735	1.06472	1.02296
	<b>Volume d'usure <math>\Delta V</math> (<math>mm^3</math>)</b>	5.49616	9.33223	12.20774	15.33614	18.43665
<b>5% <math>Al_2O_3</math></b>	<b>Distance de glissement <math>L(x10^3m)</math></b>	<b><math>\approx 2</math></b>	<b><math>\approx 4</math></b>	<b><math>\approx 6</math></b>	<b><math>\approx 8</math></b>	<b><math>\approx 10</math></b>
	<b>Coefficient d'usure <math>k</math> (<math>10^{-5}mm^3/N.m</math>)</b>	2.29645	1.7119	1.52401	1.39875	1.29436
	<b>Volume d'usure <math>\Delta V</math> (<math>mm^3</math>)</b>	8.29679	12.37994	16.46984	20.14748	23.35623

**Tableau III.1** : Valeurs des coefficients d'usure et du volume d'usure en fonction de la distance de glissement d'un matériau composite.

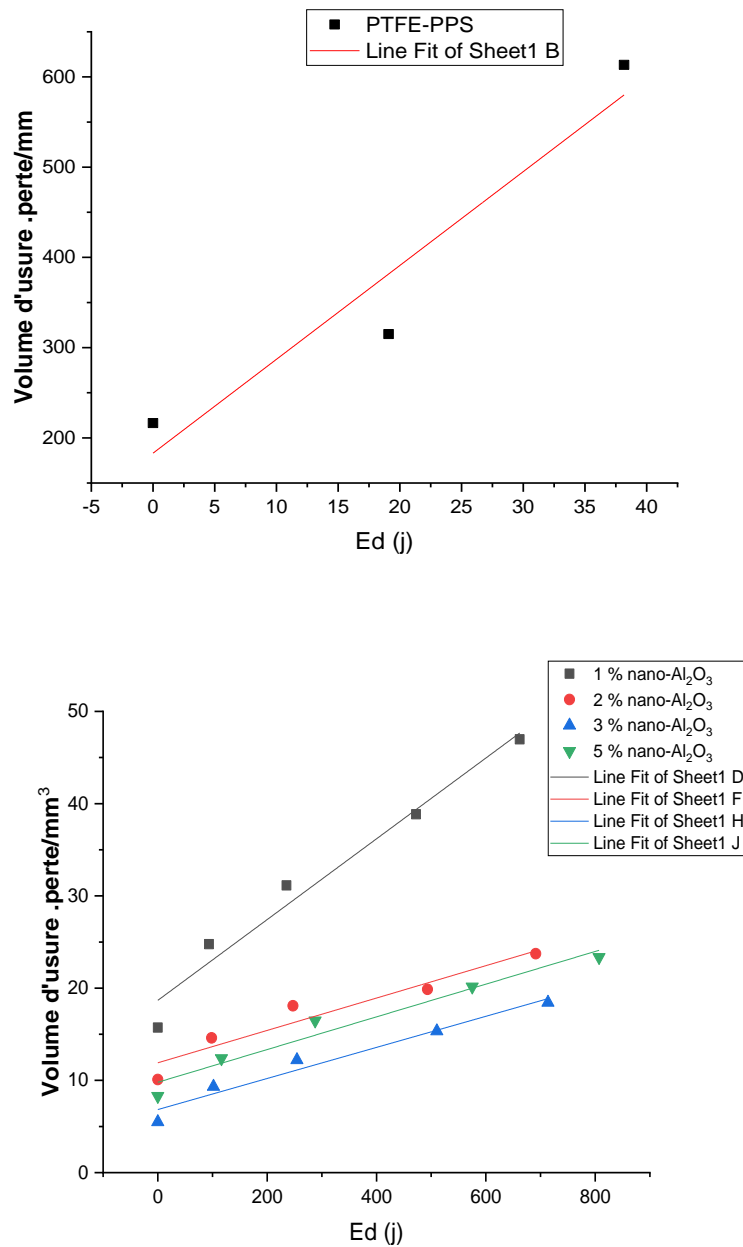


Figure III.8 : Variation du volume d'usure en fonction de l'énergie dissipée des composites PTFE-PPS renforcés de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La figure III.8 montre une évolution linéaire du volume usé en fonction de l'énergie dissipée durant le glissement. On remarque que les courbes sont des droites qui ne passent pas par l'origine et représentés par une équation de forme :

$$\Delta V = \alpha_1 * E_d + \alpha_2 \quad (\text{III.7})$$

La pente de la courbe  $\alpha_1$  est appelée coefficient d'usure énergétique qui permet la quantification du coefficient d'usure  $K$  à partir de l'équation suivante :

$$\alpha_1 = \frac{\Delta V}{\Delta E} \quad (\text{III.8})$$

En remplaçant le volume d'usure par l'équation d'Archard  $\Delta V = K.F_N.L$

La force normale  $F_N$  par :

$$F_N = \frac{F}{\mu} \quad (\text{III.9})$$

Et l'énergie par :

$$\Delta E = F.L \quad (\text{III.10})$$

On obtient la relation entre le coefficient d'usure énergétique et le coefficient d'usure d'Archard :

$$\alpha_1 = \frac{\Delta V}{\Delta E} = \frac{K}{f} \quad (\text{III.11})$$

Le deuxième coefficient de l'équation nous permet de calculer l'énergie seuil  $E_{dth}$  qui est représentée sur la courbe de la figure III.7 Par l'intersection de la courbe linéaire avec l'axe des abscisses ( $\Delta E$ ). La présence de ce paramètre peut nous informer sur le mode d'usure qui peut être présent dans le tribosystème.

Les valeurs des coefficients d'usure énergétique  $\alpha_1$  et l'énergie seuil  $E_{dth}$  obtenus à partir des courbes de la figure III-8 sont présentés dans le tableau III.2 :

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$E_{dth}$
<b>PTFE-PPS</b>	10.39978	183.07996	17.6042
<b>1% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.04379	18.67437	426.4844
<b>2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.01755	11.90559	678.3154
<b>3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.01685	6.83469	405.5241
<b>5% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.01773	9.79674	552.6683

**Tableau III.2 :** Valeurs des coefficients d'usure  $\alpha_1$  et de l'énergie seuil  $E_{dth}$  pour différentes teneurs d'élément d'ajout **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**

D'après les valeurs enregistrées dans le tableau III.2 on remarque que la variation de la concentration de l'élément d'ajout du **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** dans la matrice du matériau **PTFE-PPS** a une très grande influence sur les valeurs du coefficient d'usure énergétique ainsi que les valeurs de l'énergie seuil. On peut dire qu'on ajoutant le nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> à différentes concentrations, une amélioration en terme d'usure est apportée par rapport au matériau pure.

## VI. Conclusion :

Le travail présenté dans ce mémoire porte essentiellement sur l'application de l'approche énergétique à différents systèmes tribologiques pour différentes conditions de glissement. Les résultats obtenus montrent que l'énergie dissipée par frottement est fortement affectée par les conditions opérationnelles appliquées (pression et vitesse) et la composition du matériau.

La représentation du volume d'usure en fonction de l'énergie dissipée par frottement a montré la présence de deux coefficients. Le premier appelé coefficient d'usure énergétique calculé à partir de la pente qui permet de quantifier le coefficient d'usure  $K$  de l'équation d'Archard. Le deuxième coefficient appelé seuil d'énergie indique la présence de deux mode d'usure. En dernier on peut conclure que ce type d'approche semble être le meilleur moyen de comparer les différents tribosystème.

# conclusion générale

## **Conclusion générale**

L'étude de l'usure constitue toujours une menace pour les matériaux malgré les grands progrès réalisés par la science pour y faire face. C'est pourquoi, dans ce mémoire, nous avons présenté une synthèse du comportement de frottement et de l'usure de certains matériaux et les facteurs les plus importants affectant l'usure et la dissipation d'énergie par frottement.

Cette étude nous a permis, tout d'abord, d'acquérir les connaissances nécessaires à l'étude tribologique du système de glissement par l'approche énergétique en définissant le système tribologique et en évoquant les types d'usure, ainsi que les différentes lois qui permettent de décrire et prédire le comportement de l'usure. On a présenté aussi un aperçu sur l'approche énergétique sur laquelle on s'est basé dans cette étude.

Au cours de ce travail on a présenté les différents paramètres qui affecte l'énergie dissipée par frottement, qui sont les conditions opératoires appliquées (pression et vitesse) et la composition du matériau.

A partir de cette étude on peut conclure que l'approche énergétique est un moyen fiable pour comparer les différents tribosystèmes.

## **Références Bibliographies**

- [1] Dr BENDAOUD, Nadia. Polycopie de cours Tribologie Energétique installation et turbomachine .Université des Sciences et Techniques d'Oran Mohamed Boudiaf 2021 , 6 p
- [2] NICCOLINI E. Adhérence du contact roue / rail en traction. Réalité tribologique en condition de démarrage. Thèse de Mécanique, Villeurbanne : INSA de Lyon, 2001, 244 p.
- [3] CLAIR D., BAILLET L., BERTHIER Y., ZBINDEN M. Impact wear modeling of power plant components coupling models and experiments. **In:** Japanese Society of Tribologists. Proc. of 5th International Tribology Conference, 29 October – 2 November 2000, Nagasaki, Japan. Tokyo : Japonaise Society of Tribologists, 2001, vol. 3, pp. 2075-2079.
- [4] M. GOUIDER, Tribologie des composites Carbone/Carbone : Echelles et contributions de la mécanique et de la physico-chimie, Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.
- [5] R. Dragomir Fatu, “Etude et modélisation de la lubrification mixte et des modes d'avaries associés dans les paliers moteur”, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2009.
- [6] Noël Brunetière. Introduction à la TRIBOLOGIE. Institut Prime - Futuroscope 2016 ,54p
- [7] MENG H.C., LUDEMA K.C. Wear models and predictive equations: their form and content. Wear, 1995, vol. 181-183, pp. 443-457.
- [8] N. FILLOT. ETUDE MÉCANIQUE DE L'USURE- Modélisation par Eléments Discrets des débits de troisième corps solide. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon .2004,18p, 19p
- [9]H. MOHRBACHER, J.P. CELIS, J.R. ROOS, Essais en laboratoire du frottement induit par le déplacement et la charge (1995),
- [10]U. OLOFSSON, Micro-glissement cyclique en conditions non lubrifiées (1995)
- [11]. Rymuza, C. Concept énergétique du coefficient de frottement.



- [12]. Chen, Q. ; Li, D.Y. Une étude informatique de l'échauffement par friction et de la conversion d'énergie pendant les processus de glissement.
- [13]. Li, D.Y. ; Elalem, K.; Anderson, M.J. ; Chiovelli, S. Un modèle dynamique à micro-échelle pour la simulation d'usure,
- [14]. Elalem, K. ; Li, D.Y. ; Anderson M.J. ; Chiovelli, S. Modélisation de l'usure abrasive de matériaux homogènes et hétérogènes.
- [15]. Chen, Q. ; Li, D.Y. Simulation informatique d'un matériau composite par érosion par particules solides.
- [16] Dr. Mohammad Asaduzzaman Chowdhury ;Dr. Dewan Muhammad Nuruzzaman; Biplov Kumar Roy; Rajib Nandee . Friction Coefficient of Copper Mating with Smooth and Rough Mild Steel Counterfaces.University of Engineering and Technology Gazipur,Gazipur-1700, Bangladesh. 2013 . 683p.
- [17] CAO Wen-han; GONG Jun; YANG Dong-ya; GAO Gui . Tribological behavior and energy dissipation characteristics of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced PTFE-PPS composites in sliding system. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China.2017,