



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Productique

Thème :

Etude de l'effet de la charge normale appliquée sur le comportement tribologique des couples métalliques

Proposé et dirigé par :

Mr: Elhadi Abdelmalek

Présenté :

SILEM HAMZA

Année Universitaire : 2015 / 1016

N° d'ordre : GM/...../2016

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail

*A ceux qui m'ont éclairé le chemin de la sagesse et m'ont offert
tout ce qui est cher et comble le cœur dans la vie avec une
immense générosité et une tendre affection. A toi ma très chère
mère et à toi mon père.*

A mes frères, à mes sœurs et à leurs enfants.

A toutes mes amies.





REMERCIEMENTS

Mes vifs remerciements et ma profonde gratitude vont à monsieur Abdelmalek elhadî, enseignant à l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila, pour m'avoir proposé le sujet et encadré tout en m'accordant sa confiance et apporté ses précieux conseils, à l'importance qu'il accorde à mon travail et d'examiner ce travail et je le remercie pour son soutien et sa gentillesse.

Ma reconnaissance à tous les enseignants du département de génie mécanique qui ont contribué à ma formation en m'inculquant leur savoir.

Enfin, je tiens à remercier tous mes collègues, amies et proches à l'université Mohamed BOUDIAF de M'sila, qui m'ont soutenu et aidé de manière directe ou indirecte.



Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I

Généralités sur les matériaux métalliques

I .1 : Introduction	02
I.2. Propriétés des matériaux	02
I.2.1. Propriétés physiques.....	02
I.2.2. Propriétés mécaniques	03
I.2.3. Propriétés technologiques.....	03
I .3 . Métaux ferreux	03
I.3.1. Définition d'un acier	03
I.3.2. Classification des aciers et des fontes	03
I.3.2.2. Aciers.....	03
a) Aciers non alliés d'usage général	03
b) Aciers spéciaux non alliés de type C.....	04
c) Aciers faiblement alliés	04
d) Aciers fortement alliés	05
I.3.3. Éléments d'alliage	06
I.3.4. Fontes	07
I.3.4.1. Types de fontes	07
I.3.4.1.1. Fontes à Graphite Lamellaire	07
I.3.4.1.2. Fontes malléables à Graphite Sphéroïdale	07

Chapitre II
Frottement des couples des matériaux métalliques

II.1. Introduction.....	08
II.2. Système tribologique	08
II.3. Définition	09
II.4.Importance de frottement.....	09
II.5. Force et coefficient de frottement	10
II.6. Comportement du coefficient de frottement	11
II.6.1. Vitesse de glissement	11
II.6.2. Etat de surface	12
II.6.3. Nature des métaux	12
II.6.4. Pression de contact nominale	12
II.6.5. Température ambiante.....	12
II.7. Valeurs pratiques du coefficient de frottement	13
II.8. Types de frottement	14
II.8.1. Frottement de roulement	14
II.8.2. Frottement de pivotement.....	14
II.8.3. Frottement de glissement	14
II.8.4. Frottement sec	15
II.8.5. Frottement hydrodynamique	15
II.9. Matériaux utilisables pour le frottement	15

Chapitre III
Usure

III.1. Introduction.....	17
III. 2.Définition.....	17
III.3. Facteurs d'usure	17
III.3.1. Mode de contact	17
III.3.2. Etat de surface	18

III.3.3. Charge.....	18
III.3.4. Vitesse.....	18
III.3.5. Environnement	18
III.3.6. Nature des matériaux	18
III.4. Conséquences d'usure	18
III.4.1. Vibration	18
III.4.2. Phénomène thermique.....	18
III.4.3. Transformation géométrique.....	18
III.4.4. Variation de masse	18
III.5. Mécanismes de l'usure	19
III.5.1. Usure adhésive	19
III.5.1.1. Facteurs influençant l'usure adhésive	20
III.5.1.2. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers.....	21
III.5.2. Usure abrasive.....	22
III.5.2.1. Abrasion à deux corps.....	23
III.5.2.2. Abrasion à trois corps	23
III. 5.2.3. Facteurs influençant l'usure abrasive.....	24
III.5.3. Usure par oxydation.....	24
III.5.3.1. Introduction	24
III.5.3.2. Mécanismes de l'usure par oxydation.....	24

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

IV.1. Généralités.....	26
IV.2. Dispositif expérimental	26
IV.3. Identification des matériaux utilisés	27
IV.3.1. Matériaux du pion	27
IV.3.1.1. Acier C45	27
IV.3.1.2. Acier 42CrMo4.....	27
IV.3.2. Matériau du disque	28
IV.3.3. Composition chimique.....	28
IV.4. Préparation des échantillons	28
IV.4.1. Usinage des échantillons.....	28
IV.4.2. Traitements thermiques des échantillons	28
IV.4.2.1. Introduction	28

IV.4.2.2. Cycle d'un traitement thermique	28
IV.4.2.3. Traitements thermiques appliqués	29
IV.4.2.3.1. Trempe	29
IV.4.2.3.2. Revenu	30
IV.4.3. Le polissage	30
IV.4.4. Essai de dureté	31
IV.4.5. Enregistrements de la rugosité	32
IV.4.6. Variation de l'usure en fonction du temps	37
Conclusion générale.....	40
Bibliographié	41
Annexe	43

Liste des figures

Liste des figures

figures	Titre	page
II-1	Représentation d'un tribosystème	08
II-2	Force de frottement	10
II-3	Mouvement de glissement	10
II-4	Angle de frottement	11
II-5	Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement	12
II-6	Frottement de roulement	14
II-7	Frottement de glissement	14
II-8	Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure	15
III-1	Perte de masse d'un échantillon, en fonction du temps	19
III-2	Transfert d'une particule	20
III-3	Variation de l'usure en fonction de la charge	21
III-4	Principe de l'usure abrasive	22
III-5	Usure abrasive à deux corps	23
III-6	Usure abrasive à trois corps	23
IV-1	Machine des essais	26
IV-2	Contact pion-disque	27
IV-3	Cycle d'un traitement thermique	29
IV-4	Four électrique "Nabertherm"	30
IV-5	Polisseuse	31
IV-6	D'uromètre	32
IV-7	Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO Surf test - 4".	32
IV-8	Effet de la charge normale sur l'usure du pion	35
IV-9	Variation de l'usure des pions non traités en fonction de la charge normale	36
IV-10	Effet de la dureté sur l'usure des pions	36
IV-11	Variation de l'usure en fonction du temps t (P = 10N)	37
IV-12	Contact des aspérités en frottement	38

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau	Titre	page
I-1	Classification des métaux non ferreux	05
II-1	Valeurs des coefficients de frottement de quelques couples de matériaux	13
IV-1	Compositions chimiques en% des matériaux utilisés	28

A blue scroll graphic with a dark blue border and rounded corners. The top and bottom edges are rolled up, with the top roll on the right and the bottom roll on the left. The text is centered on the scroll.

Introduction
générale

Introduction générale

Le frottement et l'usure jouent un rôle très important dans le comportement tribologique des matériaux de dispositifs industriels, tels que le système de freinage automobile et ferroviaire, des guidages en rotation comme les roulements et paliers lisses, ou en translation (glissière et coulisseau), de la transmission de puissance par obstacle (engrenages) ou par friction (courroies lisses) et beaucoup d'autres systèmes.

Le comportement tribologique des surfaces frottantes qui en résulte durant le fonctionnement se traduit, le plus souvent, par des modifications géométriques, transformations physico-chimiques, des enlèvements de matière ou encore par une élévation de température.

Plusieurs paramètres jouent un rôle primordial dans le comportement tribologique des couples, tels que, la charge normale appliquée, les nuances des aciers utilisés et leurs états métallurgiques. Ces derniers ont une influence remarquable sur la dureté et la microstructure des couples de matériaux. L'augmentation aussi du pourcentage des éléments d'addition justifie la croissance de la dureté et peut influencer aussi sur le taux d'usure des matériaux.

Tous les paramètres cités auparavant ont une influence significative sur l'usure, et par conséquent sur la fiabilité et la durée de vie de fonctionnement du système industriel.

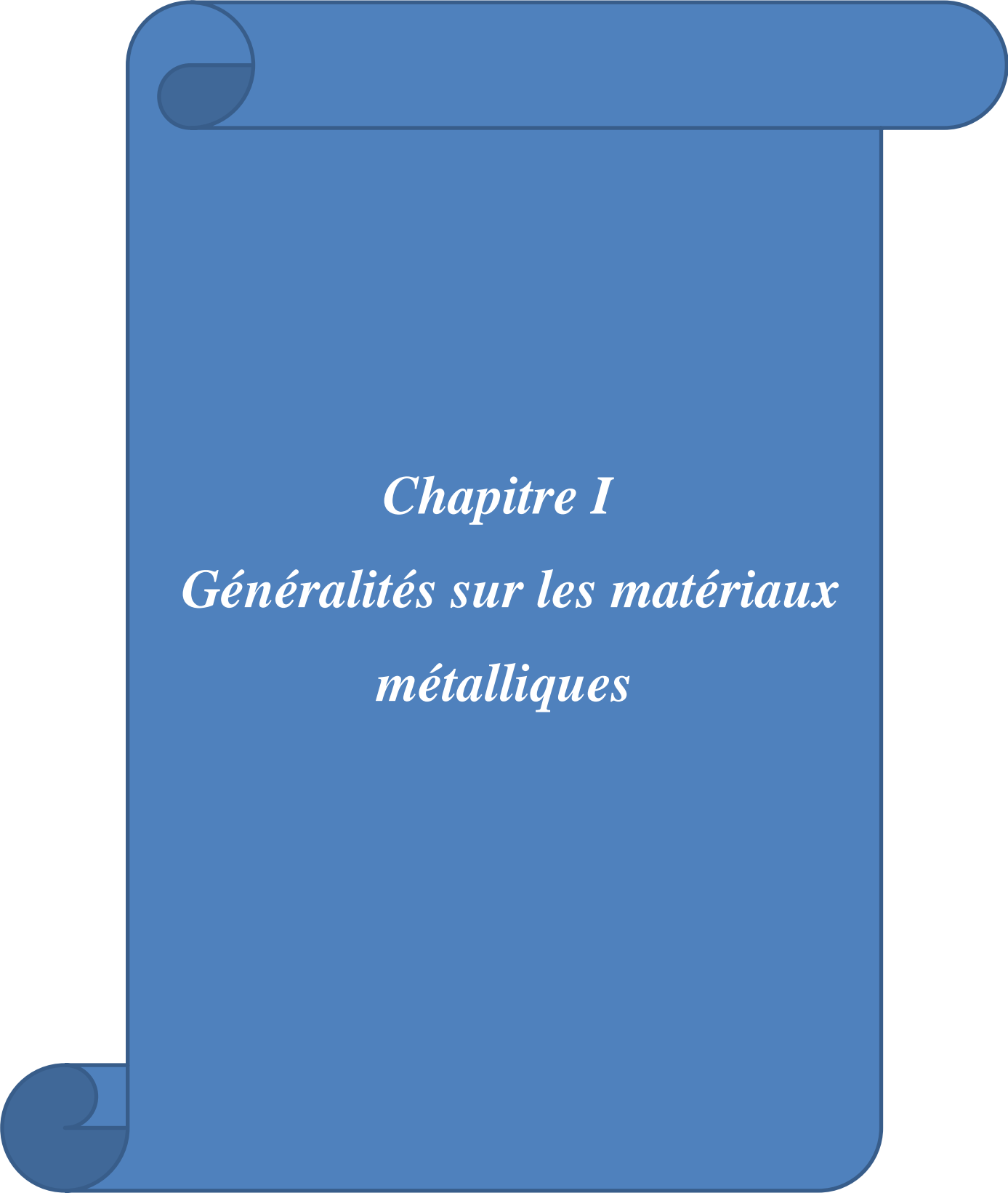
Le plan du mémoire se décompose en quatre chapitres :

Le premier chapitre, traite de brefs rappels bibliographiques concernant les matériaux métalliques et exclusivement les métaux.

Le deuxième chapitre présente une étude sur le processus de frottement ainsi que l'influence des paramètres mécaniques sur le frottement des couples métalliques.

Dans le troisième chapitre, on présente une généralité sur le phénomène d'usure et ses types.

Le quatrième chapitre, représente la partie essentielle de ce travail. Il regroupe les résultats obtenus des tests tribologiques (usure) et la discussion de ces résultats.



Chapitre I
Généralités sur les matériaux
métalliques

Chapitre I**Généralités sur les matériaux métalliques****I.1 : Introduction**

Les matériaux solides sont définis comme des solides utilisés à grande échelle industrielle pour la conception d'objets caractérisés par leurs fonctions et leurs propriétés physiques. Le choix d'un matériau pour une large utilisation industrielle dépend de plusieurs caractéristiques telles que :

- Caractéristiques mécaniques : limite élastique, dureté, résilience ...
- Caractéristiques physico-chimiques : comportement à la corrosion, vieillissement
- Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilité, soudabilité, trempabilité ...
- Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle ...

Il ne faut pas confondre le matériel qui est un objet façonné ou fabriqué par l'homme et les matériaux (matériau) qui servent à fabriquer cet objet.

Les matériaux métalliques sont des matériaux présentant à la fois une bonne résistance mécanique et une facilité de mise en forme. Ils sont de fait très utilisés à grande échelle industrielle. Cependant, les métaux purs sont des matériaux présentant à la fois des caractéristiques mécaniques relativement faibles et plus ou moins de facilité de mise en forme à chaud ou à froid, d'où la nécessité d'ajouter d'autres éléments leur permettant d'améliorer leurs caractéristiques. L'addition volontaire à un métal pur de base d'un ou plusieurs éléments d'alliages peut modifier profondément les propriétés des métaux de base [4]

I.2. Propriétés des matériaux

Les propriétés suivantes font une partie de toutes les propriétés des matériaux [1].

I.2.1. Propriétés physiques

La couleur, la masse volumique, le point de fusion, la conductibilité et le coefficient thermique de dilatation.

La densité de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m^3 , celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m^3 .

Il est important de connaître le point de fusion des métaux pour pouvoir les traiter à chaud afin d'obtenir des éléments coulés [1].

La dilatation produite par l'échauffement est caractérisé par le coefficient de dilatation linéaire ou volumique. Ces coefficients sont pris en compte lors de toute étude de construction métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température [1].

I.2.2. Propriétés mécaniques

Parmi les résistances mécaniques, on peut citer : la résistance, la dureté, la résilience, la fatigue et le fluage.

La résistance mécanique est la capacité d'un métal de résister aux efforts extérieurs. Suivant la nature de ces efforts on distingue : la résistance à la traction, à la compression, à la flexion, et à la torsion qui sont caractérisées par les charges limites par lesquelles le métal se rompt.

La dureté d'un métal détermine son pouvoir de résister à l'enfoncement d'une bille en acier ou d'un cône.

La résilience est caractérisée par la quantité de travail nécessaire à la rupture d'une éprouvette subissant des chocs.

La fatigue est la propriété de soumettre un métal aux effets alternés, répétés et conjugués d'efforts externes (statique ou dynamique).

Le fluage caractérise la capacité d'un métal à se déformer à la suite d'une charge constante. Il peut donc conduire à l'accroissement des flèches des éléments des constructions et à la perte de stabilité [1].

I.2.3. Propriétés technologiques

sont caractérisées par la possibilité d'usinage des métaux, ce qui est conditionnée par leur plasticité [1].

I .3 . Métaux ferreux

I.3.1. Définition d'un acier

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone) [2].

C'est un matériau usuel, présentant la plus grande résistance pour la faible section [3].

I.3.2. Classification des aciers et des fontes

I.3.2.2. Aciers

Parmi les aciers utilisés au niveau de l'industrie, on peut citer les suivants :

a) Aciers non alliés d'usage général (70% des aciers)

Ils forment presque 70% des aciers dans l'industrie, sont caractérisés par une faible teneur en carbone. Désignés par une lettre (S, E) représentant la classe (S : acier d'usage général de base (construction de bâtiment) ; E : utilisé dans la construction mécanique.), suivie de la limite élastique à la traction en MPa ou N/mm² et d'indications complémentaires (S : soudable ; M : moulable, s'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G [4].

Exemple de désignation

S355 Classe S: acier de construction, résistance élastique de 355 MPa

E320 (acier de construction mécanique, de limite élastique 320MPa)

b) Aciers spéciaux non alliés de type C

Destinés aux traitements thermiques ((trempé et revenu, trempé superficielle, cémentation ...). Le traitement thermique donne à ces aciers des propriétés d'emploi très performantes. La majorité est disponible sous forme de laminés marchands (profilés, poutrelles, barres, ...) aux dimensions normalisées.

Désignation: Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus des indications complémentaires [4].

Exemple de désignation : GC 35

Classe C: aciers spéciaux pour traitement thermique

G : Acier moulé 0.35% de carbone

Application: pièces moulées, forgées, engrenages, ressorts, lames, forets...

c) Aciers faiblement alliés

Pour ces aciers, aucun élément d'addition ne dépasse 5%. Ils sont choisis chaque fois qu'une haute résistance est exigée. Ils sont utilisés en état de livraison ou avec traitement.

Désignation: Pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Les pourcentages de ces éléments multipliés par 4, 10, 100 ou 1000, tableau I.1 [4].

Tableau I.1: Classification des métaux non ferreux [4]

élément	Symbole chimique	Symbole métallurgique	Facteur Multiplicateur
Aluminium	Al	A	10
Azote	N	N	100
Bore	B	B	1000
Chrome	Cr	C	4
Cobalt	Co	K	4
Cuivre	Cu	U	10
Magnésium	Mg	G	10
Manganèse	Mn	M	4
Molybdène	Mo	D	10
Nickel	Ni	N	4
Phosphore	P	P	100
Plomb	Pb	Pb	10
Silicium	Si	S	4
Soufre	S	F	100
Titane	Ti	T	10
Tungstène	W	W	4
Vanadium	V	V	10

Exemple de désignation : G 35 Ni Cr Mo 16-8

G:Acier moulé

35: 0.35% de carbone

4% de nickel, 2% de chrome et des traces de molybdène

d) Aciers fortement alliés

Ils sont destinés à des usages particuliers (inoxydable, réfractaire...). Pour ces aciers, au moins un élément d'addition dépasse la teneur de 5%.

Désignation: Lettre X, symbolisant la famille, suivie des mêmes indications que pour les aciers faiblement alliés.

La seule différence avec les aciers fortement alliés est pas de coefficient multiplicateur pour le pourcentage des éléments d'addition. Ces aciers sont réservés à des usages particuliers, par exemple, dans un milieu humide, on utilisera un acier inoxydable qui est un acier fortement allié avec du chrome (% chrome > 11%).

Exemple de désignation : G X 6 Cr Ni Ti 18-11

G: acier moulé X: catégorie des aciers fortement alliés 0,06% de carbone
18% de chrome, 11% de nickel et des traces de titane (moins de 1%) [4].

I.3.3. Éléments d'alliage

Le carbone a une importance primordiale car c'est lui qui, associé au fer, confère à l'alliage le nom d'acier. Son influence sur les propriétés mécaniques de l'acier est prépondérante. Par exemple, en ce qui concerne l'amélioration de la propriété de dureté, l'addition de carbone est trente fois plus efficace que l'addition de manganèse.

L'aluminium : excellent désoxydant. Associé à l'oxygène, réduit la croissance du grain en phase austénitique. Peut rendre l'acier inapte à la galvanisation à chaud.

Le chrome : c'est l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation (aciers réfractaires). Il joue aussi un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion lorsqu'il est présent à une teneur de plus de 12 à 13 % (selon la teneur en carbone). Additionné de 0,5 % à 9 % il augmente la trempabilité et la conservation des propriétés mécaniques aux températures supérieures à l'ambiante (famille des aciers alliés au chrome).

Le cobalt : utilisé dans de nombreux alliages magnétiques. Provoque une résistance à l'adoucissement lors du revenu.

Le manganèse : forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Augmente modérément la trempabilité.

Le molybdène : augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Augmente la trempabilité.

Le nickel : rend austénitiques les aciers à forte teneur en chrome. Sert à produire des aciers de trempabilité modérée ou élevée (selon les autres éléments présents), à basse température d'austénitisation et à ténacité élevée après traitement de revenu. C'est l'élément d'alliage par excellence pour l'élaboration des aciers ductiles à basses températures.

Le niobium : même avantage que le titane mais beaucoup moins volatil. Dans le domaine du soudage il le remplace donc dans les métaux d'apport.

Le phosphore : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion.

Le silicium : Améliore la résistance à l'oxydation de certains aciers, utilisés comme élément désoxydant.

Le titane : réduit la dureté de la martensite. Capture le carbone en solution à haute température et, de ce fait, réduit le risque de corrosion intergranulaire des aciers inoxydables.

Le tungstène : améliore la dureté à haute température des aciers trempés revenus.

Le vanadium : augmente la trempabilité. Élève la température de surchauffe. Provoque une résistance à l'adoucissement par revenu.

I.3.4. Fontes

Les alliages de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2% s'appellent fontes. Outre ces deux éléments, elles contiennent essentiellement du Si, Mn, P, S, dans le cas des fontes non alliées et de plus du chrome, du molybdène, de l'aluminium, etc., dans le cas des fontes alliées. Elles ont une excellente coulabilité. Elles permettent donc d'obtenir des pièces de fonderie (pièces moulées) aux formes complexes. Elles sont assez fragiles (cassantes), difficilement soudables et ont une bonne usinabilité [4].

I.3.4.1. Types de fontes

D'après la forme du graphite et les conditions de sa formation, les fontes sont classées de la façon suivante :

I.3.4.1.1. Fontes à Graphite Lamellaire

Les fontes à graphite lamellaire, appelées « fontes grises » sont très utilisées car elles sont économiques, amortissent bien les vibrations, ont une bonne coulabilité et usinabilité, sont peu oxydables, ont une bonne résistance à l'usure par frottement et résistent bien aux sollicitations de compression. Elles sont utilisées pour la fabrication des carters, bâtis, blocs moteur et pièces aux formes complexes....

Désignation : après le préfixe « EN », les fontes sont désignées par le symbole « GJL » suivi de la valeur en MPa (méga Pascals) de la résistance minimale à la rupture par extension [4].

Exemple : EN-GJL-300 (fonte à graphite lamellaire de résistance $R_{e\ mini} = 300\text{MPa}$).

I.3.4.1.2. Fontes malléables à Graphite Sphéroïdale

Les fontes à graphite sphéroïdale sont obtenues par adjonction d'une faible quantité de magnésium avant moulage. Elles sont plus légères et ont une meilleure résistance mécanique que les fontes grises.

Elles sont utilisées pour étriers de freins, vilebrequins, tuyauteries soumises à hautes pressions.

Désignation : après le préfixe EN, les fontes sont désignées par le symbole (GJMW, GJMB, GJS) suivi de la valeur en méga Pascals de la résistance minimale à la rupture par extension et du pourcentage de l'allongement après rupture [4].

Exemple :

EN-GJS-400-18 (fonte à graphite sphéroïdale, $R_{e\ mini} = 400\text{MPa}$ et d'allongement $A\% = 18$).

A blue graphic resembling a scroll, with a dark blue border and rounded corners. The top and bottom edges are rolled up, creating a 3D effect. The text is centered within the scroll.

Chapitre II
Frottement des couples des
matériaux métalliques

Chapitre II

Frottement des couples des matériaux métalliques

II.1. Introduction

Le mot tribologie, construit à partir des racines grecques *tribein* (frotter) et *logos* (parole, étude ou science), a été proposé en 1968 par G. Salomon pour désigner la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque deux corps en contact sont animés de mouvements relatifs. La tribologie est ainsi une branche de la mécanique qui concerne le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides [5].

II.2. Système tribologique

La tribologie des interfaces concerne le milieu interfacial entre les deux corps en Contact. On définit ainsi un contact tribologique ou tribosystème comme étant composé de trois éléments principaux (Figure.II.1): deux solides A et B en contact (premiers corps) et le milieu interfacial I désigné sous le terme de troisième corps. Ce troisième corps sépare partiellement ou totalement les deux matériaux en contact et possède des propriétés différentes de celles des premiers corps. L'origine de ce milieu interfacial peut être externe (lubrifiant solide ou liquide) ou interne par formation in situ (détachement de particules des premiers corps). Ce tribosystème se trouve dans un environnement E qui constitue l'ambiance de fonctionnement du contact. Des interactions entre cet environnement et le contact peuvent ainsi avoir lieu en fonction de sa composition, sa température, sa pollution éventuelle, ... [6].

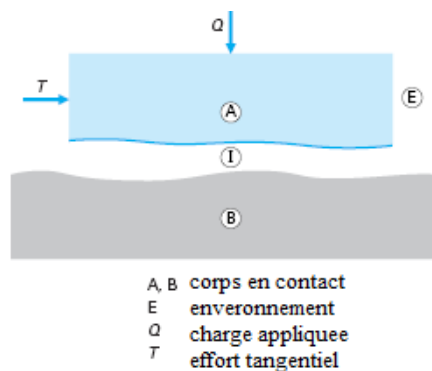


Figure II.1: Représentation d'un tribosystème [7].

Le frottement désigne un ensemble de phénomènes et de mécanismes qui intervient au niveau de l'interface de deux corps en contact. Le contact unilatéral avec frottement est un des problèmes les plus compliqués de la mécanique des solides, car de nombreuses difficultés découlent de la nature souvent très complexe des surfaces réelles mais aussi du régime sévère

de déformation qui se produit même, à de faibles niveaux de chargement. En outre, des phénomènes thermiques et physico-chimiques tels que des fusions ou des oxydations s'activent dès la mise en contact des solides et dans certains cas divers contaminants surfaciques peuvent être présents [8].

II.3. Définition

Le frottement est la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide se déplace tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement [9].

II.4. Importance de frottement

Le frottement est l'expression directe de l'énergie dépensée qui se dissipe sous forme de chaleur. Cette énergie est proportionnelle aux trois facteurs P , V et μ correspondant qui sont respectivement la charge, la vitesse et le coefficient de frottement. Le réseau de contraintes mécaniques superficielles évolue dangereusement avec l'accroissement de frottement, sauf, cas particuliers de l'utilisation positive, par exemple pour accroître les caractéristiques d'adhérence entre deux corps (mécanismes d'entraînement, assemblages frittés...) ou pour absorber de l'énergie (freinage).

Le frottement a une importance pratique évidente, il est à l'origine des phénomènes d'usure décrit par la suite. Il transmet une force tangentielle à la surface de contact entre deux solides serrés l'un contre l'autre dans un premier temps, les solides restent en immobilité relative, au-delà d'une certaine intensité de la force, ils glissent. Le glissement dissipe de l'énergie et use les surfaces. Par ailleurs parce qu'il entrave le libre mouvement aux interfaces, le frottement peut significativement affecter le fluage et la déformation du matériau dans de nombreux procédés du travail des métaux.

Cependant, le frottement ne devrait pas être toujours comme indésirable la présence du frottement nécessaire pour le succès ou l'optimisation de nombreuses opérations.

Selon les applications, on cherche à obtenir :

- Usure et frottement minimaux dans les paliers, engrenages, cames ;
- Usure minimale et frottement maximal dans les freins, embrayage, roux ;
- Usure maximale par les meules et les limes.

Il est utile de connaître les mécanismes du frottement pour comprendre les processus de l'usure et savoir ses influences, mais on veut surtout calculer la valeur des forces de frottement qui interviennent dans le fonctionnement des machines [10].

II.5. Force et coefficient de frottement

Soit deux corps en contact et F_n la force normale entre eux (figure II.2). L'expérience montre qu'on peut appliquer à la pièce (2) une force T parallèle à la surface de contact sans qu'elle se mette en mouvement. Il existe donc une force F appliquée par le corps (1) à la pièce (2) capable de s'opposer à T et d'empêcher le mouvement [10].

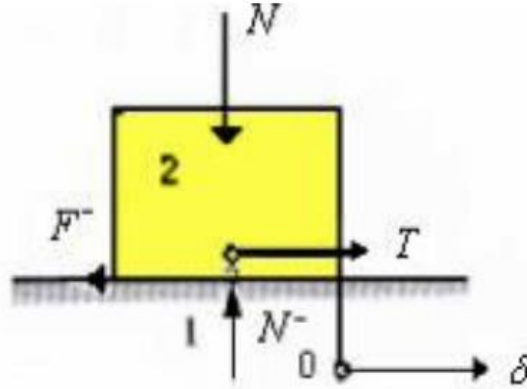


Figure II.2 : Force de frottement [10].

En observant le déplacement δ du solide (2) à partir de sa position où $T = 0$, on observe d'abord un très petit mouvement qu'on appelle micro glissement lorsque T croît (figure II.3). Pour une certaine valeur $T_0 = F_0$, la pièce se met en mouvement, en supprimant la force tangentielle T , la pièce ralentit, puis s'arrête [11].

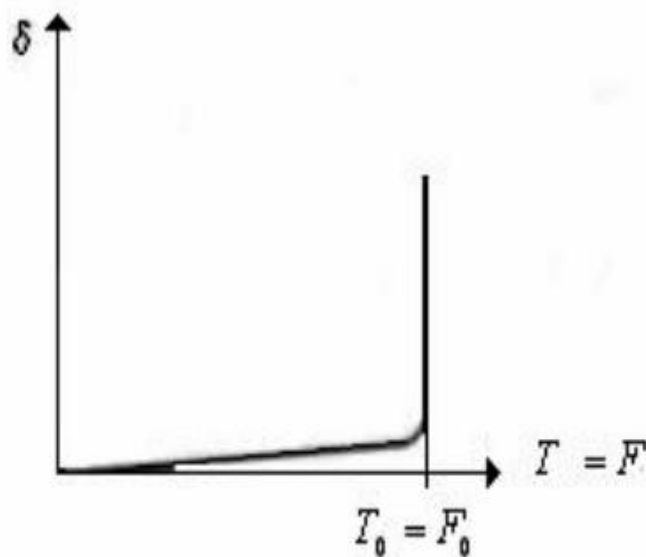


Figure II.3: Mouvement de glissement [10].

Ces observations montrent qu'il existe un phénomène dans la surface de contact des pièces qui s'oppose à leur glissement relatif, c'est le frottement. On peut en donner la définition suivante : le frottement est un phénomène à la surface d'un corps qui empêche son glissement sur un autre corps (frottement statique) ou qui dissipe de l'énergie mécanique en cas de glissement

(frottement dynamique). Par définition, le coefficient de frottement μ est le rapport de la force tangentielle de frottement, lorsque les pièces glissent, à la force normale appliquée au point de contact entre les deux corps.

Il est donné par la relation suivante : $\mu = F_t / F_n$

La figure II.3 représente la pièce (2) isolée. A l'équilibre statique :

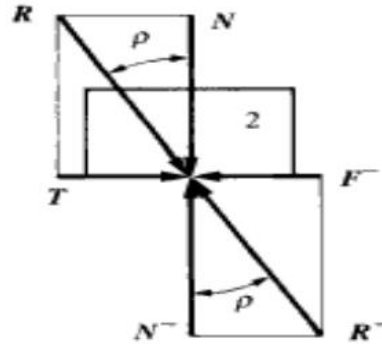


Figure II.4 : Angle de frottement [10].

La réaction normale de la pièce (1) est égale et opposée à l'action de (2), $N^- = -N$;

□ La force de frottement est égale et opposée à la force tangentielle exercée sur (2), $F^- = -T$;

□ La réaction résultante de la pièce (1) est égale et opposée à la réaction de (2), $R^- = -R$.

L'angle de frottement indique l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à la surface (figure. II.4), il vaut

II.6. Comportement du coefficient de frottement

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

II.6.1. Vitesse de glissement

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

□ Le coefficient de frottement statique (à l'arrêt) μ_0 .

□ Le coefficient de frottement dynamique (avec glissement) μ .

Dans le cas de métaux secs, le coefficient de frottement dynamique est généralement plus petit qu'à l'arrêt (figure II.5, 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, parce que le métal fond dans les zones de contact et forme un film lubrifiant. Certains matériaux non métalliques présentent au contraire une augmentation du frottement avec la vitesse, courbe (2) de la figure II.5

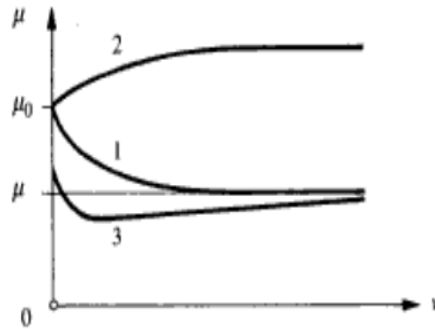


Figure II.5 : Influence de la vitesse sur le coefficient de frottement [10].

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

II.6.2. Etat de surface

La valeur du coefficient de frottement est relativement grand lorsque les surfaces sont très rugueuses [10].

II.6.3. Nature des métaux

Le frottement diminue lorsque l'un des matériaux du couple tribologique est tendre, car l'effort de labourage est faible. C'est pourquoi on revête, les surfaces d'une fine couche d'un matériau tendre ou d'un film d'oxyde [10].

II.6.4. Pression de contact nominale

On admet dans la pratique industrielle que le coefficient de frottement est indépendant de la charge appliquée, par conséquent, aussi indépendant de la pression de contact nominale, sauf en cas de lubrification solide et avec certains polymères [10].

II.6.5. Température ambiante

Le coefficient de frottement des métaux diminue souvent légèrement lorsque la température des pièces s'élève; puis, au-delà de 500°C à 800 °C, il augmente fortement. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que la dureté du métal tombe rapidement, les points de contact tendent vers une plastification étendue. Le coefficient de frottement des céramiques croît fortement à des températures de 400 à 600 °C, puis diminue au-delà de ces valeurs [10].

II.7. 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 [10].

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 $F < 10^{-2}$ (N). Pour une charge $F > 10^{-1}$ (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. La valeur de μ s'abaisse pour une charge $F > 10^{-2}$ N ($\mu \approx 0,5$). 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 au plomb glissant sur un acier normal donnent des valeurs faibles du coefficient de frottement ($\mu = 0,2 - 0,4$) [12].

Le tableau II.1 donne des valeurs du coefficient de frottement statique et dynamique de quelques couples de matériaux [13].

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients de frottement de quelques couples de matériaux. [13]

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

II.8. Types de frottement

Il existe plusieurs types tels que :

II.8.1. Frottement de roulement

Le frottement de roulement se produit lorsqu'un cylindre ou sphère roule sur une surface plane ou moins courbée. On note que ce type de frottement peut être rencontré dans les roulements à billes ou à rouleaux [14].

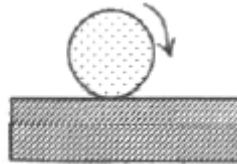


Figure II.6: Frottement de roulement

On constate que pour vaincre le frottement de roulement, il est nécessaire de développer moins de force que vaincre le frottement de glissement. Pour faire rouler une sphère, il est nécessaire d'appliquer au centre de cette dernière qui supporte une charge N , une force F parallèle au plan sur laquelle repose. La charge N et la force F dépendent l'un de l'autre.

II.8.2. Frottement de pivotement

Lorsqu'une surface oscille, tourne en reposant par le même point sur une autre surface, le résultat est un frottement de pivotement. Prenons comme exemple le cas de mouvement d'une toupie. Théoriquement, dans le cas d'un frottement de pivotement, le contact entre les deux surfaces devrait être ponctuel, et en fait constitué par une certaine surface plus au moins importantes selon la charge et l'élasticité des matériaux en présence [14].

II.8.3. Frottement de glissement

Lorsqu'on déplace un corps solide sur un autre corps solide sans le faire rouler (figure II.7), le frottement résultant est celui de glissement, ce dernier type est le plus fréquent. Comme exemple de contacts produisant un frottement de glissement, on peut citer les cas suivants : un piston glissant dans un cylindre, et un arbre tournant à sec dans un palier. Dans le glissement, il y a une nette différence entre les vitesses des surfaces en contact. Cette distinction est d'autant plus importante selon qu'on a un frottement sec.

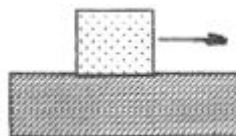


Figure II.7 : Frottement de glissement [14].

II.8.4. Frottement sec

Le frottement sec désigne l'ensemble des phénomènes qui naissent dans la zone de contact entre deux corps, en l'absence de lubrification, et qui s'opposent au glissement de ces corps. S'il y a glissement relatif entre les deux corps en contact, on parle du frottement dynamique, sinon le frottement est dit statique.

Le modèle de Bowden et Tabor [BOWD50] suppose que le frottement sec entre deux surfaces rugueuses est dû essentiellement à deux processus physiques fondamentaux:

le cisaillement des microjonctions adhésives formées au niveau des points de contact et le labourage des surfaces par les aspérités (figure II.8). La force du frottement sec est ainsi la somme d'une force de cisaillement due à l'adhésion et d'une force de déformation due au labourage [15].

$$F_t = F_{ad} + F_{def}$$

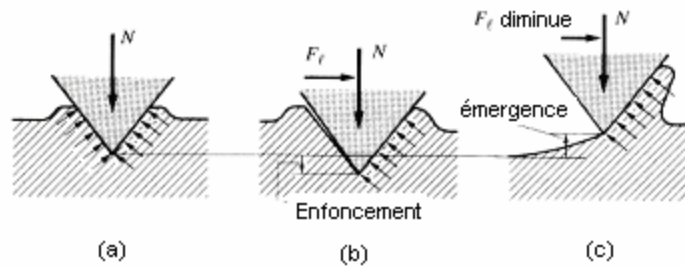


Figure II.8 : Début de labourage d'une surface tendre par une aspérité dure : (a) enfoncement statique ; (b) premier mouvement par une force tangentielle ; (c) émergence au début de glissement [12].

II.8.5. Frottement hydrodynamique

Les surfaces en mouvement relatif ne sont pas en contact par leurs aspérités parce qu'elles sont séparées par un épais film de lubrifiant. Le coefficient de frottement est faible et ce type de frottement est indiqué pour l'utilisation à haute vitesse ou lorsque la force normale est élevée [16].

II.9. Matériaux utilisables pour le frottement

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

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

propriétés physicochimiques: 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, la cavitation et à la corrosion par les lubrifiants.

propriétés techniques : facilité de mise œuvre, conformabilité, absorption de particules abrasives, autoréparation par comblement des rayures, dureté minimale de l'antagoniste, comportement en cas de lubrification déficiente ou d'incident :

comportement face à l'augmentation du jeu, facilité de réparation ou d'échange, aptitude au soudage sur un support,

propriétés d'environnement : caractéristiques du milieu, moyens et possibilités lubrification, problèmes de pollution ou contamination

A blue scroll graphic with rounded corners and a dark blue outline. The top and bottom edges are rolled up, and the left edge is also rolled up. The text is centered on the scroll.

Chapitre III

Usure

Chapitre III

Usure

III.1. Introduction

L'usure est une perte de masse générée par plusieurs mécanismes physiques, électriques, chimiques ou mécaniques indépendants ou non. En fait, l'usure est considérée comme un phénomène global très difficile à décrire du point de vue quantitatif. Elle ne varie généralement pas de manière progressive en fonction des paramètres comme la vitesse, la température ou le temps [17]. Si certaines formes d'usure sont relativement régulières, d'autres au contraire connaissent des sauts très brutaux, lorsque certaines valeurs critiques sont franchies [18].

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

L'évolution de la perte de matière d'un organe mécanique en fonction du temps présente généralement trois phases distinctes [17] :

- Rodage : est une phase d'adaptation des surfaces souvent caractérisée par une usure rapide ;
- Marche normale : correspond à l'utilisation normale de l'organe mécanique. La perte de matière est faible, régulière et fonction sensiblement linéaire du temps ;
- Vieillesse : traduit la mise hors service du composant due à une usure exagérée qui tend à modifier les conditions nominales de fonctionnement (jeux exagérés, lubrification inefficace, et endommagement des surfaces).

III. 2.Définition

D'une manière générale, on appelle usure la détérioration d'une surface solide, généralement par enlèvement progressif de matière, provoqué par son mouvement relatif contre une autre matière [12].

III.3. Facteurs d'usure

III.3.1. Mode de contact

Le mode de contact géométrique influe sur le rôle que les différentes pièces jouent tout au long de la durée d'utilisation du mécanisme.

On distingue trois principaux modes de contact [12] :

- Contact ponctuel (par exemple : sphère sur plan)
- Contact linéaire (par exemple : cylindre sur un plan)
- Contact surfacique (par exemple : plan sur plan)

III.3.2. Etat de surface

Les pièces usinées présentent par rapport à leur forme idéale, des défauts géométriques. L'une des conséquences de l'existence de ces défauts géométriques est que l'aire réelle de contact n'est souvent qu'une faible fraction de l'aire apparente de contact [12].

III.3.3. Charge

L'application d'une charge normale sur un solide en mouvement avec un autre conduit à une perte de masse.

III.3.4. Vitesse

Il s'agit, suivant le cas des vitesses de glissement, de roulement ou de pivotement. On prend par exemple le cas du glissement à sec elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact [12].

III.3.5. Environnement

Par ce terme nous entendons la nature du milieu, ainsi que les conditions de pression et de température qui entourent les pièces dans la région du contact, y compris la lubrification [12].

III.3.6. Nature des matériaux

Il s'agit de la composition chimique, de structure métallurgique et des propriétés mécaniques des métaux et alliages et des couches superficielles.

III.4. Conséquences d'usure

Les conséquences les plus fréquemment observées pendant l'usure sont les vibrations, le phénomène thermique, la transformation géométrique et la variation de masse [12].

III.4.1. Vibration

Au cours du contact dynamique, la variation de la force de frottement qui est due par l'enchevêtrement des aspérités des surfaces antagonistes provoque des vibrations.

III.4.2. Phénomène thermique

Le frottement des surfaces de contact des solides produit une chaleur.

III.4.3. Transformation géométrique

Les surfaces de contact en frottement subissent un endommagement qui, peut être défini comme une modification de la géométrie ou de la microstructure des couches superficielles. Il y a apparition de rayures, de fissures de différents plans de glissement [12].

III.4.4. Variation de masse

Pendant le contact dynamique, il y'aura une perte de masse L'allure de cette variation est généralement, l'existence d'un régime transitoire suivi d'un régime stabilisé (figure III-1) [12].

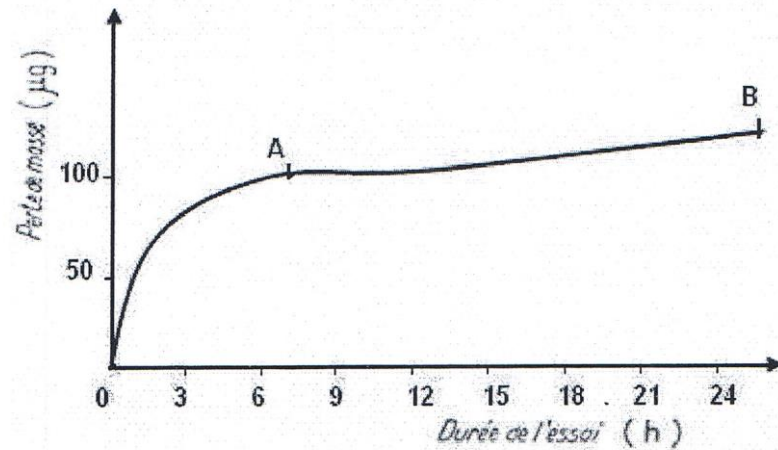


Figure III-1 : Perte de masse d'un échantillon, en fonction du temps [12].

Le régime transitoire OA est caractérisé par une croissance de la perte de masse et le régime stationnaire AB par une croissance plus lente et plus régulière, pratiquement linéaire en fonction du temps.

III.5. Mécanismes de l'usure

Les types d'usure suivants sont classés selon les principaux mécanismes que les génèrent.

III.5.1. Usure adhésive

L'usure adhésive est le modèle le plus fondamental. On rencontre ce type d'usure lors de l'approche des surfaces de deux solides, les forces d'attraction intermoléculaires deviennent non négligeables. Ce phénomène est appelé phénomène d'adhésion et l'état qui en résulte est l'état d'adhérence [12].

La jonction est plus faible que l'un et l'autre des corps métalliques, la rupture se produit le long de la surface définissant la jonction l'usure des deux surfaces est très faible ou nulle, donc il y a pas de pas de matière arrachée voir (figure III-2.a)

La jonction est plus résistante que les matériaux qui lui ont donné naissance, la rupture aura lieu dans la dureté du métal le plus faible : il y a transfert du matériau le plus tendre sur les matériaux le plus dur (figure III-2.b)

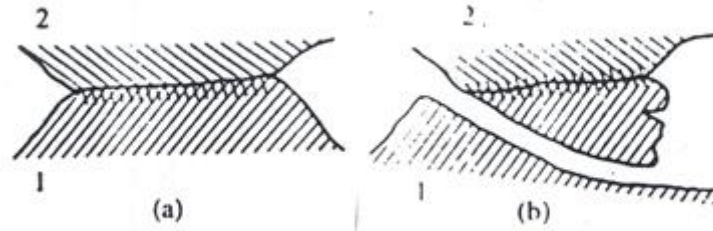


Figure III-2 (a et b) : Transfert d'une particule : (a) soudure d'aspérité ;
(b) arrachage d'une particule [19].

III.5.1.1. Facteurs influençant l'usure adhésive

Par les principaux paramètres pouvant influencer l'usure adhésive on peut citer la vitesse frottement, la charge, matériau antagoniste et la température,...etc. [12].

- Vitesse de glissement

Le principal effet de la vitesse est d'agir sur la température superficielle.

- Charge

La charge est l'essentielle dans l'usure, l'équation classique (la loi d'Archard) montre que l'usure est proportionnelle avec la charge appliquée.

$$V = \frac{k P d}{H} \text{ [mm}^3\text{]}$$

Ou:

V : représente le volume du matériau enlevé par usure ;

k : coefficient d'usure ;

P : charge normal ;

d : trajet parcouru ou distance de glissement ;

H : dureté du corps le plus mou.

En faisant croître la charge à partir de valeur faible, on observe généralement des variations très rapides du taux d'usure.

La figure (III-3) montre l'évolution du volume d'usure et du taux d'usure en fonction d'une charge normale [12].

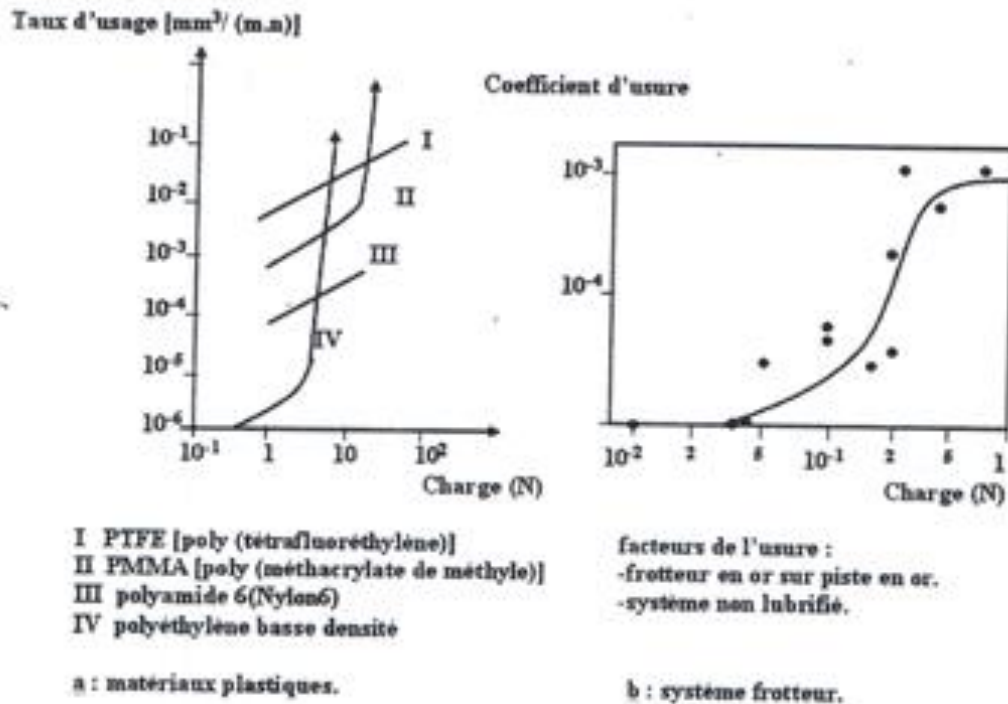


Figure III-3 : Variation de l'usure en fonction de la charge [12]

- Matériau antagoniste

Les matériaux utilisés doivent avoir un ensemble de caractéristique qui conduit à une usure minimale en fonction des conditions opératoires.

La dureté joue un rôle très important. En effet, l'expérience montre que souvent l'usure est inversement proportionnelle à la dureté.

- Température

Les élévations de température sont souvent l'origine d'une diminution de la résistance et de la dureté. Elles peuvent également provoquer l'évaporation du film de lubrification dans l'interface d'étanchéité. Des essais de fonctionnement à sec réalisés montrent que l'usure des divers matériaux céramiques au carbone atteint rapidement des valeurs élevées avec l'élévation de la température.

III.5.1.2. Aspects métallurgiques de l'usure adhésive des aciers

Les aciers au carbone, à l'état recuit, sont moins sujets à l'usure adhésive que les aciers austénitiques ou la ferrite, en effet, la structure perlitique des aciers limite l'adhésion, la soudure aura lieu seulement dans la phase ferrite ou dans la phase austénite.

C'est pour cela, l'augmentation de la teneur en carbone qui a pour effet de réduire la ferrite et d'augmenter la dureté est utile.

Généralement, les structures : perlitique, martensitique et bainitique des aciers, très fines et pluri phases se comporte mieux que les structures ferritique et austénitique monophasées et constituées de gros grains.

Une forte dureté et la présence de carbures métalliques dans l'acier augmentent la résistance à l'usure. Pour les aciers à outils, la résistance à l'usure dépend plus de la qualité des carbures précipités durant la trempe.

Les éléments d'additions tels que le Chrome, le Vanadium, le tungstène, le molybdène ...etc., Contribuent à améliorer la résistance à l'usure des aciers par leurs effets sur l'affinage du grain et sur le durcissement structural de la matrice.

L'austénite résiduelle, produite par des fortes températures de trempe, a un effet néfaste [20].

III.5.2. Usure abrasive

Dans le glossaire de l'organisation de coopération et de développement économique l'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures [21]. Donc l'usure abrasive est le résultat du frottement de glissement par labourage ou par déformation plastique. L'usure peut se faire à deux corps, directement à partir des solides en contact ou bien à trois corps comme l'indique le schéma (figure III-4).

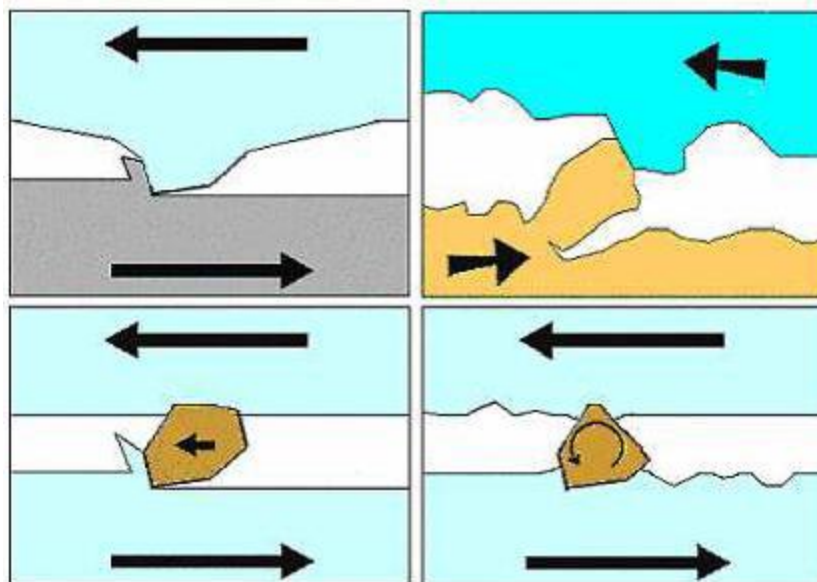


Figure III-4 : Principe de l'usure abrasive.

Il faut noter que l'usure abrasive existe toujours quel que soit le système mécanique. En effet, les débris d'usure générés par les autres modes (adhésions ou fatigue) sont généralement plus durs que les surfaces en contact et par suite participent à l'abrasion, ainsi que les grains

abrasifs constitués de poussières ou de sable de fonderie. Il existe deux types d'usures abrasives :

III.5.2.1. Abrasion à deux corps

Se fait par les aspérités ou protubérances dures d'une deux surfaces sur l'autre plus tendre, appelée « abrasion à deux corps » (figure III.5). Les sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement des aspérités abrasives.

En général, un matériau mou et malléable conduit à une usure uniforme tandis que pour un matériau plus dur, l'usure est plus localisée dans la région inter lamellaire ou les couches d'oxydes forment des points faibles et entraînent le décollement des lamelles.

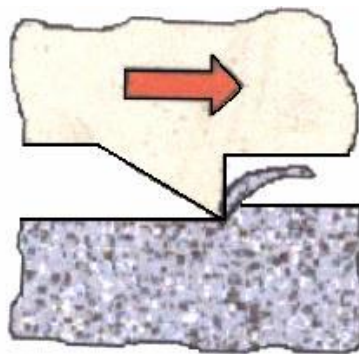


Figure III.5 : Usure abrasive à deux corps.

III.5.2.2. Abrasion à trois corps

L'usure abrasive à trois corps est provoquée par des particules dures (figure III.6), soit véhiculées entre les deux surfaces en contact, ou enchâssées dans l'une d'elle, généralement la plus tendre. L'accumulation de débris d'usure entre les corps finit par constituer une couche intermédiaire, le troisième corps. Selon Johnson [22], le cisaillement de la couche intermédiaire est la principale source de frottement. Le rodage, le polissage à la pâte ou à la poudre sont des genres d'usure abrasive à trois corps.

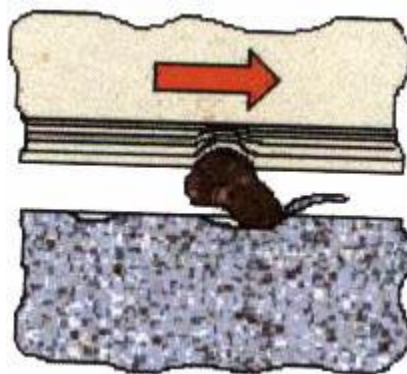


Figure III.6 : Usure abrasive à trois corps.

III. 5.2.3. Facteurs influençant l'usure abrasive

Les principaux paramètres influençant sur l'usure abrasive sont :

- La dureté

Les particules abrasives doivent être plus dures que la surface abrasée, d'après TABOR, la dureté des particules est en moyenne de 20% supérieure à celle de la surface initiale [20]. L'usure abrasive se produit facilement si la dureté Vickers des particules est une fois et demie celle de la surface usée ;

- La forme de particule

La particule doit avoir des coins ou des angles convenablement orientés.

-La taille

La perte de masse augmente rapidement quand la taille moyenne des particules croit de 35 à 70 μm , l'efficacité des particules abrasives diminue si elles deviennent plus petites.

- La charge

Pour un grand nombre de matériaux, la perte de masse est une fonction linéaire croissante avec la charge. Pour les fortes charges, cette observation n'est plus valable car les particules abrasives s'enfoncent trop profondément dans le frotteur et sont déclassées sous l'effet du déplacement du frotteur [12].

La vitesse

La perte de masse par abrasion augmente légèrement avec la vitesse d'abrasion. Cet accroissement est attribué à une baisse des caractéristiques sous l'effet de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse [12].

III.5.3. Usure par oxydation

III.5.3.1. Introduction

La majorité des surfaces des métaux réagissent avec l'oxygène de l'atmosphère pour former des oxydes [23]. Les oxydes de fer qui peuvent se former sont la wustite FeO , l'hématite Fe_2O_3 et la magnétite Fe_3O_4 .

Dans un contact métallique en frottement, la puissance mécanique dissipée à l'interface entraîne un échauffement qui favorise l'oxydation.

III.5.3.2. Mécanismes de l'usure par oxydation

L'usure par oxydation est un mécanisme d'usure douce, elle résulte de l'adsorption de l'oxygène sur les surfaces métalliques mises à nu lors du frottement et des réactions chimiques de cet oxygène avec le métal [24]. Le taux d'oxydation est contrôlé par la diffusion

de l'oxygène dans les couches superficielles, les films d'oxyde se développent sur le plateau de contact à la température θ_0 , l'usure se produit par écaillage de l'oxyde et émission de débris.

A blue scroll graphic with a white background, featuring a dark blue border and a lighter blue inner section. The scroll is unrolled at the top and bottom, with the top edge curving to the right and the bottom edge curving to the left. The text is centered in the white area.

CHAPITRE IV
RESULTATS EXPERIMENTAUX
ET DISCUSSION

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

IV.1. Généralités

L'objet principal de notre étude est d'analyser le comportement tribologique de deux aciers sur une machine polisseuse considérée comme un tribomètre pion-disque. Le premier couple est en acier C45 avec papier abrasif et le deuxième couple est en acier 42CrMo4 avec aussi papier abrasif. Le pion est représenté par les deux matériaux précédents à deux états (traité et non traité) et le disque est représenté par des papiers abrasifs de différentes tailles de grains.

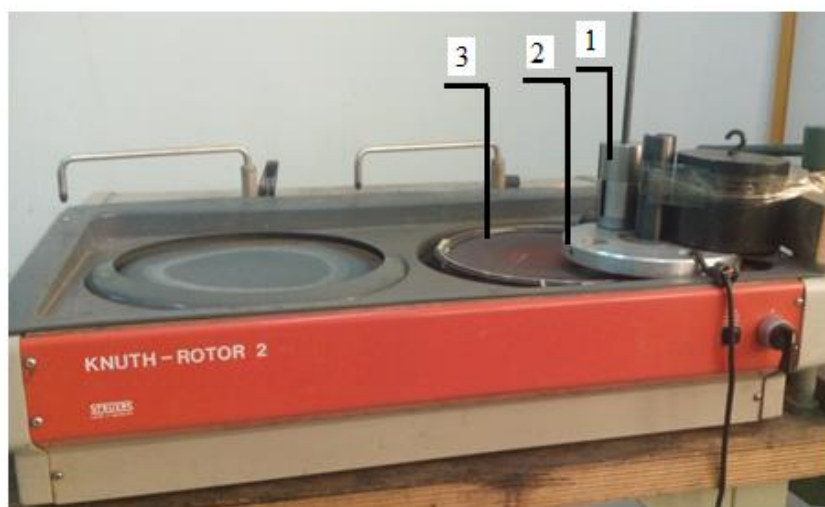
Les expériences ont été conduites à l'ambiance atmosphérique du laboratoire, en tenant compte de différents paramètres mécaniques qui peuvent modifier les caractéristiques des matériaux et jouer des rôles très importants dans l'usure.

IV.2. Dispositif expérimental

Le principe de base de la machine d'usure par glissement consiste à créer un certain frottement entre deux pièces, l'une d'entre elles étant en général immobile.

L'usure est alors caractérisée par la quantité de matériau perdue lors de ce frottement. La méthode la plus souvent utilisée est celle d'une tige qui s'appelle pion frottant sur un disque (pin-on-disk). Une force déterminée est appliquée sur le pion qui génère ainsi une piste circulaire à la surface du disque.

La machine que nous avons utilisée comme tribomètre est une polisseuse. Elle se base sur le même principe, existant au niveau du Laboratoire de Mécanique de l'Université de M'sila, constitué d'un ensemble d'organes comme l'indique la figure(IV.1)



1 : Masses ; 2 : Porte pion ; 3 : Disque (papier abrasif)

Fig.IV.1 : Machine des essais.

Le pion utilisé est de forme cylindrique de diamètre 22 mm et de longueur 20mm, contient un méplat, qui permet de le fixer dans un trou d'un disque en aluminium à l'aide d'une vis de blocage. Il est chargé contre un disque par des masses du poids variable. Le pion est aisément échangé par un autre échantillon, ou peut être enlevé pour permettre la mesure de la perte de masse ou du changement dimensionnel du à l'usure.

Le disque est un papier abrasif fixé sur un plateau circulaire qui tourne à une vitesse de rotation 200 tr/mn. La transmission de la puissance du moteur électrique au disque se fait par le moteur de la polisseuse.

La figure IV.2 montre le contact entre le pion et le disque et la piste d'usure résultante.

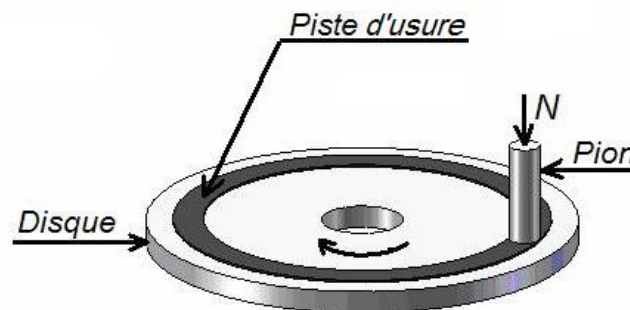


Fig. IV.2 Contact pion-disque.

IV.3. Identification des matériaux utilisés

IV.3.1. Matériaux du pion

Les deux matériaux utilisés sont de fabrication locale, utilisés pour la fabrication des galets, des roues de chemins de fer, des ponts roulants, des roue dentées pour bote de vitesses des moteurs ...etc. Ces deux matériaux sont :

IV.3.1.1. Acier C45

C'est un acier de construction mécanique non allié pour traitement thermique défini essentiellement par sa composition chimique (0.45 à 0.51% de carbone). Il est employé lorsque les caractéristiques mécaniques demandées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitements thermiques [25].

IV.3.1.2. Acier 42CrMo4

Acier de construction faiblement allié au chrome molybdène pour trempe et revenu.

Il a une bonne résistance aux surcharges à l'état traité. C'est un acier de traitement pour multiples applications avec une grande résistance mécanique et une haute ténacité, souvent utilisé pour les composants automobiles fortement sollicités.

IV.3.2. Matériau du disque

Le matériau du disque est un papier abrasif de différentes tailles de grains.

IV.3.3. Composition chimique

Le tableau suivant donne les compositions chimiques en% des matériaux utilisés selon la norme EN 10277-2 pour C45 et la norme NF EN 10027-1 pour 42CrMo4

Tableau IV.1 : Compositions chimiques en% des matériaux utilisés

Acier	C	Cr	Mo	S	Mn	P	Si
C45	0,42-0,50	≤ 0.40	≤ 0,10	≤ 0.040	0.50-0.80	≤0,045	0.40 Maxi
42CrMo4	0,38-0,45	0,90- 1,20	0,15- ,30	≤ 0,035	0,60 - 0,90	≤0,035	0.40 Maxi

IV.4. Préparation des échantillons

IV.4.1. Usinage des échantillons

Les échantillons (pions) ont été réalisés à partir des barres laminées. La barre de chaque type d'acier d'échantillon est découpée sous la forme et les dimensions voulues à l'aide d'une scie mécanique, puis elles ont été passés par les poste d'usinage (tournage et fraisage).

IV.4.2. Traitements thermiques des échantillons

IV.4.2.1. Introduction

Un traitement thermique est défini par la variation de la température du métal en fonction du temps.

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

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

IV.4.2.2. Cycle d'un traitement thermique

Généralement, un traitement thermique comprend trois étapes (figure IV.3)

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

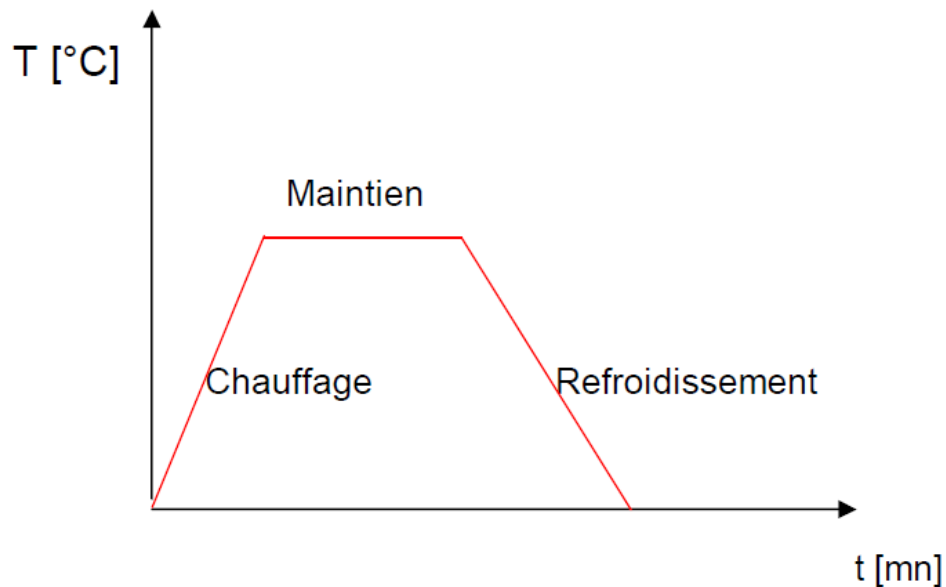


Figure IV.3 : Cycle d'un traitement thermique

IV.4.2.3. Traitements thermiques appliqués

Les traitements thermiques réalisés dans notre étude ont pour but de voir l'influence des caractéristiques mécaniques sur l'usure et surtout la dureté.

IV.4.2.3.1. Trempe

La trempe est utilisée pour augmenter la dureté, la résistance à la rupture mais diminue la résilience et l'allongement [26]

On a mis les échantillons dans un four électrique de type "Nabertherm" dont la température maximale est 1300 °C (figure IV.4). Le mécanisme de la trempe est comme suit :

- Chauffage lent (≈ 400 °C), puis rapide à une température supérieure de 50 °C à celle d'austénitisation. On a choisit les températures de trempe des échantillons à partir du diagramme Fe-C illustré dans la figure III.8 qui précise la température d'austénitisation en fonction du pourcentage de carbone. On a chauffé chaque type d'échantillon à une température AC3 +50 °C (ligne Tr), c'est-à-dire la température de trempe est 840 °C.

- Maintien en température pour permettre une austénisation complète, la durée de maintien dépend du volume de la pièce (trente minutes).
- Refroidissement brusque, en trempant les pièces dans un fluide réfrigérant eau.



Figure IV.4 : Four électrique "Nabertherm".

IV.4.2.3.2. Revenu

Le revenu est pratiqué après trempe pour supprimer les tensions internes qui ont pris naissance au moment de refroidissement brutal et diminuer la fragilité du métal (augmentation de la résilience K). Il a l'inconvénient d'atténuer R_m et H .

Le processus opératoire du revenu est le suivant :

- . Chauffage entre 300 °C et 600 °C selon les résultats souhaités et le pourcentage de carbone.
- . Maintien en température (la durée est aussi en fonction du volume de la pièce à traiter).
- . Refroidissement lent (à l'air) [27].

IV.4.3. Le polissage

Le polissage dans notre cas est obtenu manuellement, vise à rendre les surfaces

uniformes. Il consiste à abraser la surface sous une charge constante, à l'aide de papiers revêtus de carbure de silicium (SiC) à indice de granulation progressif jusqu'à 1000 pour connaître la dureté des matériaux avant et après le traitement thermique et jusqu'à 400 pour les pions avant les tests tribologiques. Des tourets de polissage dont la vitesse est de 300 tr/min, équipés d'un système d'arrosage à l'eau courante pour éviter l'échauffement des échantillons (fig.IV.5)..

La diminution de la taille des grains d'abrasif d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne compte tenu de la différence de dureté existant entre le carbure et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines.



Fig IV.5 : Polisseuse

IV.4.4. Essai de dureté

La pratique de dureté nécessite une préparation des échantillons sur la face qui fait l'objet de l'essai. Cette préparation s'agit tout d'abord de faire un polissage.

Les mesures de la dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide d'un d'uromètre de type : LECO M-400-H1. Elles ont été réalisées avec un identeur de type Vickers.



Fig.IV.6 : D'uromètre

IV.4.5. Enregistrements de la rugosité

Le pion a été poli au papier émeri, la taille de grains est 400 avant chaque essai. A l'aide d'un rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO Surfrest - 4" (figure IV.7). L'afficheur a donné une rugosité moyenne $Ra = 0,4 \mu\text{m}$.



Fig.IV.7 : Rugosimètre à stylet de type "MITUTOYO Surfrest - 4".

Conditions des tests

- Déroulement des essais

Chaque essai dure quinze minutes, dans une atmosphère ambiante.

- La charge normale

Une charge normale N est appliquée à l'aide des masses directement sur la surface du pion. Elle varie entre 2,5 N et 12,5N.

- La vitesse linéaire de glissement V

Calculée par les formules suivantes :

$$V = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot N = \frac{\pi}{30} r \cdot N \quad [\text{m/s}]$$

$$V = 3,14 \times 0,065 \times 200 / 30 = 1,36 \text{ m/s}$$

ω : la vitesse angulaire (rd)

r : rayon de la piste d'usure (m)

N : vitesse de rotation (tr/mn)

Etat de surface de couple

Tous les pions ont une rugosité $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ avant les essais, par contre, les disques ont des états de surfaces différentes selon le papier abrasif utilisé.

- Mesure de la perte de masse (usure) du pion

L'usure est déterminée par la mesure de la perte en masse. Avant chaque essai, le pion est bien nettoyé puis pesé à l'aide d'une microbalance sensible de précision 10^{-2} mg. Après l'expérience, il est nettoyé à nouveau est pesé. L'usure du pion est :

$$U = \Delta m = m_i - m_f \text{ [g]}$$

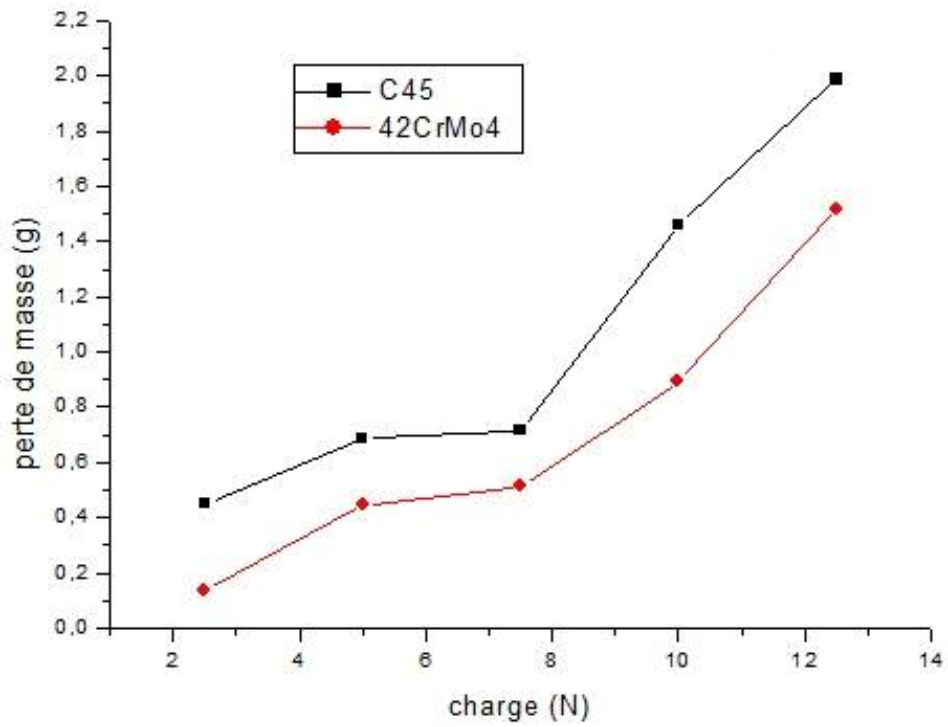
m_i masse initiale du pion. m_f masse finale du pion.

Résultats expérimentaux

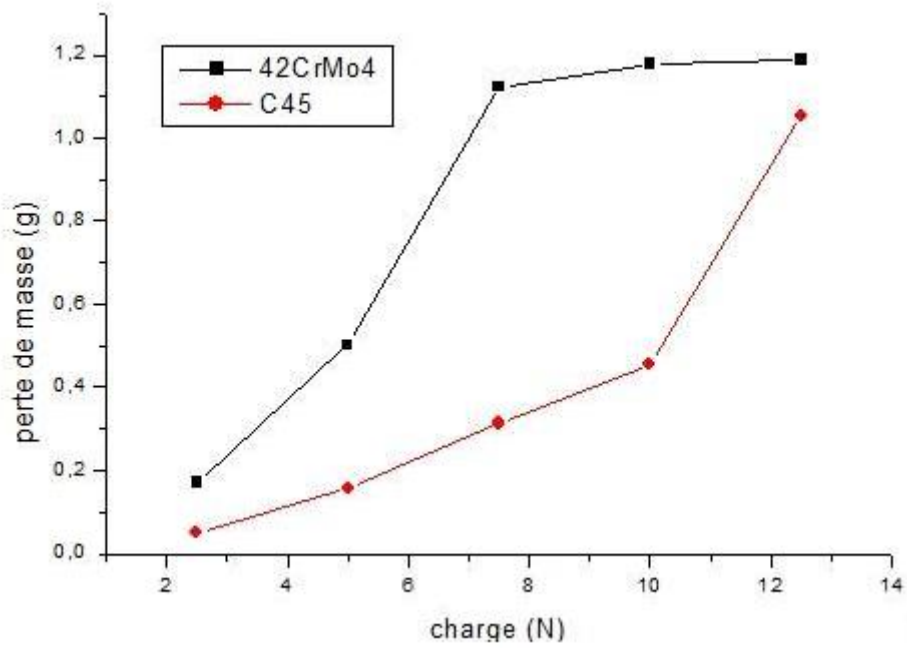
Variation de l'usure

Variation de l'usure en fonction de la charge normale

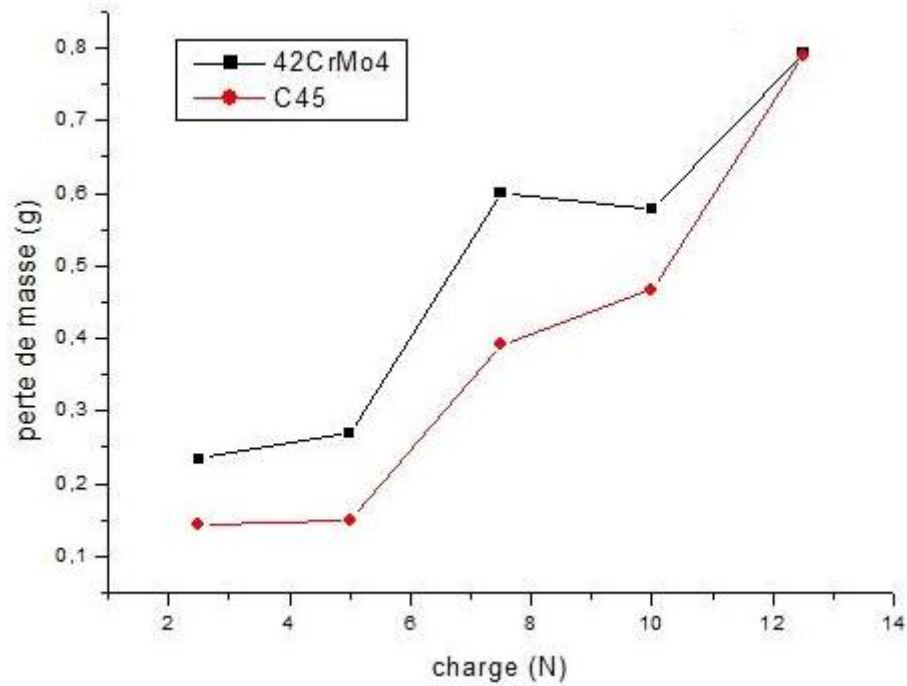
La figure IV.8 montre l'influence de la charge normale appliquée sur l'usure. On remarque que la variation de l'usure est une fonction linéaire avec la charge appliquée.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.8: Effet de la charge normale sur l'usure du pion : (a) Taille de grains 120 ; (b) Taille de grains 180 ; (c) Taille de grains 220.

La figure IV.9 regroupe les six pions non traités, avec différentes tailles de grains de papiers abrasifs, elle révèle que les deux pions C45 avec papier 220 et C45 avec papier 180 ont subi la plus petite perte en masse. Le pion en 42CrMo4 a suivi la même allure que les deux courbes précédentes et s'est confondue avec la courbe de C45 avec papier 220 à la force 12,5N.

Les deux pions C45 et 42CrMo4 avec papier 120 montre généralement une perte de masse élevée surtout à la charge 12,5 N, comparée avec tous les pions.

La plus grande perte de masse est avec le pion C45 non traité.

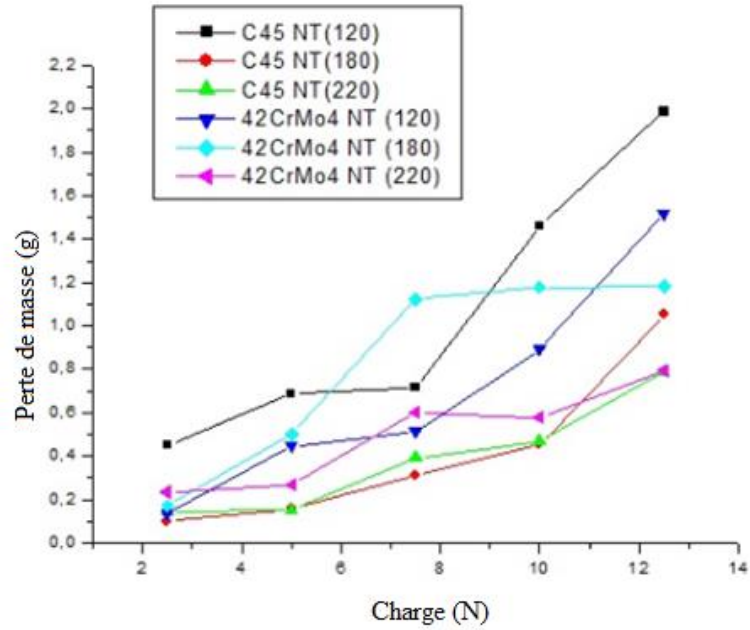


Figure IV.9 : Variation de l'usure des pions non traités en fonction de la charge normale.

Variation de l'usure en fonction de la dureté des pions

La figure IV.10 indique que la variation de l'usure est inversement proportionnelle à la dureté des aciers utilisés.

On remarque que le pion en acier C45 présente une résistance à l'usure plus élevée que la résistance du pion en acier 42CrMo4.

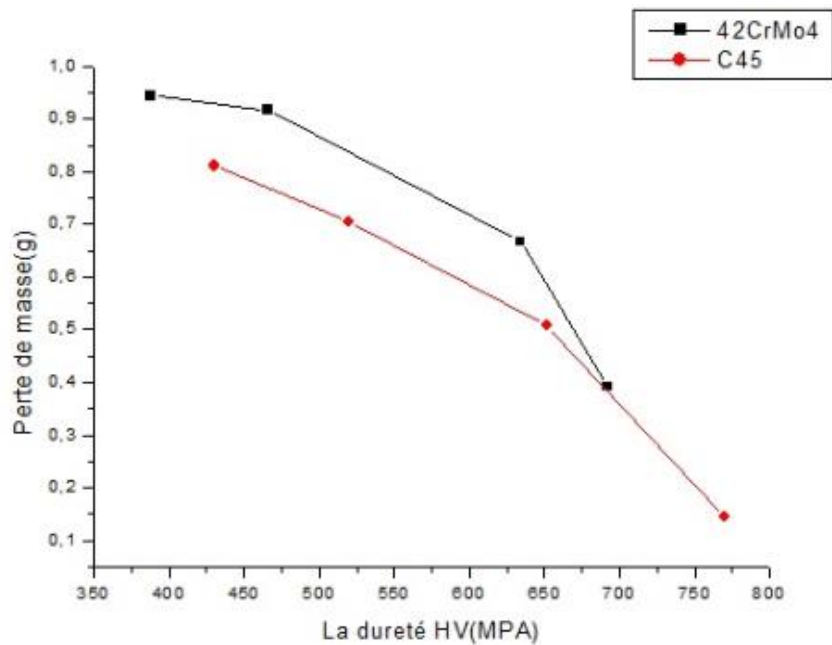


Figure IV.10 : Effet de la dureté sur l'usure des pions, N = 10N et papier abrasifs de taille de grains 180.

IV.4.6. Variation de l'usure en fonction du temps

La figure IV.11 donne la variation de l'usure avec le paramètre temps. On constate que deux courbes ont des allures identiques, elles sont sensiblement des droites caractérisées de pente légère pour l'acier C45 traité et une pente importante pour le même acier en état non traité.

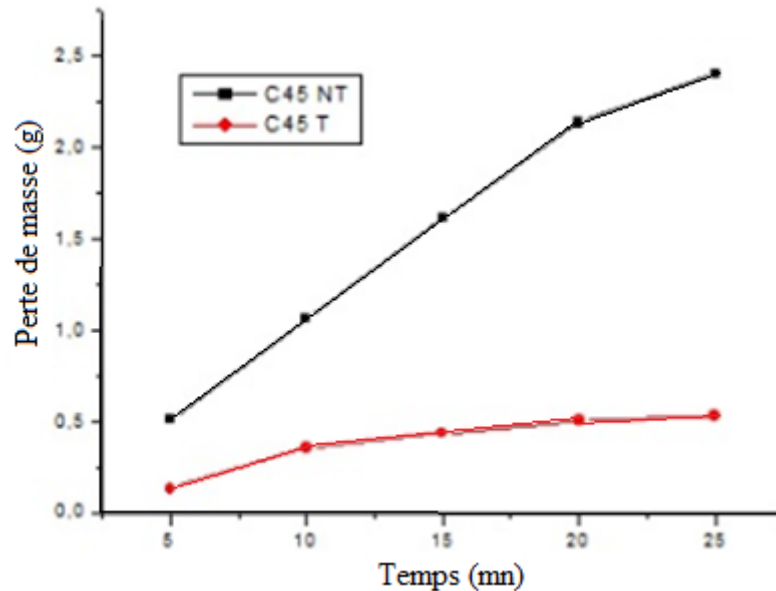


Figure IV.11: Variation de l'usure en fonction du temps t (P = 10N)

Discussion des résultats

Influence de la charge normale sur l'usure

Sous faibles charges (figure IV.12), l'usure du pion est faible à cause du nombre limité des points de contact entre les surfaces ainsi que le rôle important que joue la couche adsorbée comme un élément de lubrification. Lorsqu'on augmente la charge, ceci se traduit par un accroissement de la surface réelle de contact et de la température à l'interface, ce qui entraîne différentes conséquences et en particulier facilite la formation de l'oxyde. L'oxyde produit et les pressions de contact atteintes sont alors suffisamment élevés pour créer une déformation plastique conduit à la rupture des jonctions et par conséquent à la croissance de l'usure.

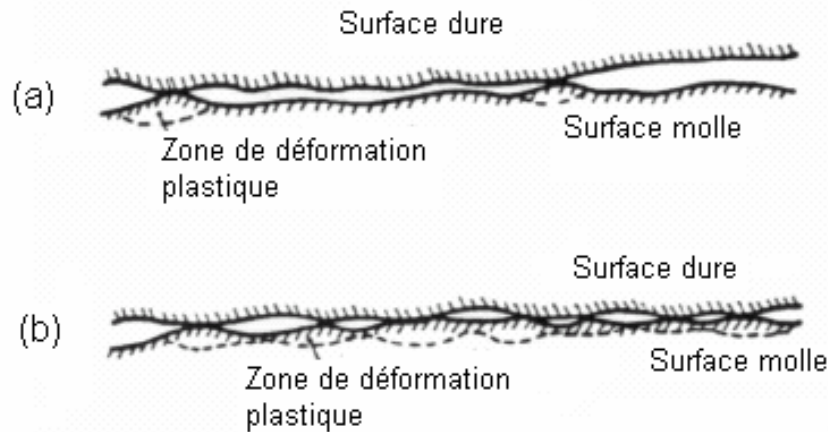


Figure V.12 : Contact des aspérités en frottement (a) sous faible charge ;
(b) sous forte charge [28].

La perte en masse des pions 42CrMo4 est supérieure à celle des pions C45 à cause de:

Le pourcentage massique de l'élément de carbone est plus grand que le pourcentage de 42CrMo4. Le carbone et le molybdène jouent un rôle primordial dans les caractéristiques mécaniques notamment l'augmentation de la résistance à l'usure et au fluage.

On sait bien qu'après trempe et revenu des aciers, la microstructure devient stable c'est-à-dire ferrite α + Fe₃C qui influe sur la dureté de l'acier et le rend résiste à l'usure.

Plus que la taille de grain est grande, plus que l'enchevêtrement des aspérités du papier dans la surface du pion est profond et un cisaillement des aspérités de la surface en contact des pions due avec le glissement.


Variation de l'usure en fonction de la dureté des pions

L'augmentation de la résistance à l'usure avec l'accroissement de la dureté est basée sur la microstructure des aciers et le pourcentage de cémentite. Les structures martensitiques obtenues après traitement thermique (trempe et revenu) des aciers montrent que, plus les grains de l'acier sont fins plus la dureté augmente et par conséquent l'acier résiste beaucoup plus à l'usure.

Influence du temps sur l'usure

Pour les pions en C45 non traités, l'usure augmente légèrement et devient presque stable après la dixième minute de la durée de l'essai. Par contre, on remarque une perte de masse assez importante de l'acier C45 non traité jusqu'à la vingtième minute, où la courbe connaît un abaissement.

Au début de glissement, les états de surface du couple se modifient rapidement. Les aspérités les plus hautes d'une surface rugueuse en état de déformation plastique sont écrasées et en partie arrachées. Cette période s'appelle le rodage. Après le rodage, les surfaces deviennent presque polies et présentent des petites ondulations ce qui justifie la croissance lente et stationnaire de l'usure.



Conclusion
générale

Conclusion générale

Le travail exécuté dans ce mémoire est purement de nature expérimentale, consiste à étudier le comportement en usure de deux aciers l'un non allié spécial et l'autre faiblement allié. Le contact dynamique des couples est sec et de type de glissement.

D'après les résultats obtenus, on peut tirer les points suivants :

- La perte de masse (l'usure) croît proportionnellement avec la charge normale appliquée.
- La taille des grains abrasifs labourent les surfaces et augmentent considérablement l'usure du pion, autrement dit, la valeur de la rugosité moyenne de la surface antagoniste (état de surface du papier abrasif) a une influence significative sur l'usure du pion.
- La teneur en carbone et les éléments d'addition influent sur la dureté des matériaux.
- L'usure est inversement proportionnelle à la dureté des matériaux.
- L'application de la trempe et le revenu sur les pions améliore les propriétés mécaniques, telles que la dureté qui augmente la résistance à l'usure.



Bibliographié

Bibliographie

- [1] « SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION » GHOMARI Fouad
UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID. Tlemcen
- [2]: Hazard et coll., Mémotech — Structures métalliques (Casteilla, 2000), p. 14
- [3] R. BUTIN, M. PINOT "Fabrications mécaniques". Technologie, tome 2, 1981.
- [4] « MATÉRIAUX MÉTALLIQUES » Michel Colombie
- [5] J. FRENE, La tribologie de l'antiquité à nos jours, Mécanique et Industrie, Vol. 2, p.263-282, 2001
- [6] 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
- [7] M. CARTIER, P. KAPSA, Usure des contacts mécaniques – Eléments de tribologie, techniques de l'Ingénieur BM5066, p. 1-13, 2001
- [8] J.R. Barber, Bounds on the electrical resistance between contacting elastic rough bodies, Proc. R. Soc. Lond. A pp.459, 53-66. 2003.
- [9] RABINOWICZ.E, friction and wear of materials, (John Wiley and sons Inc.,) New York - London – Sydney (1965)
- [10] G. SPINNLER, Conception des machines, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997, Lausanne, vol. 1, 566 p.
- [11] J. -L. LIGIER, Lubrification des paliers moteurs, 1997, Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs, 575 p.
- [12] G. ZAMBELLI & L. VINCENT, Matériaux et contacts, 1998, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 337 p.
- [13] Site Internet, Elément de tribologie (<http://www.cours.polymtl.ca>).
- [14] M. REDHA, Contribution à l'étude des contacts mécaniques du couple cuivre acier traversé par le courant électrique, 2007, mémoire de magister, université de Skikda

Bibliographie

- [15]. [BOWD50] F. P. BOWDEN, D. TABOR, The Friction and Lubrication of Solids I, et Universitaires Romandes, 1998
- [16] N. KHANAFI-BENGHALEM, Étude des mécanismes d'usure et de frottement de deux aciers X12NiCrMoSi25-20 et le 25CrMo4 (Etude comparative), thèse de doctorat, université de SETIF, 2007
- [17] B. Bhushan et B.K. gupta, Mcgraw-Hill, Handbook of Tribology, INC. 1991.
- [18] Y. Berthier. Background on friction and wear, Lemetre Handbook of materials behavior models, San Diego (USA), Academic Press., pp. 679-699, 2001.
- [19] J. DHERS, « usure, avaries, corrosion », Lyon France, 1978.
- [20] J. AYEL
"Les lubrifiants, moteur et pertes par frottement et usure" .Institut Français du Pétrole, 1979.
- [21] JEAN BLOUET "Usure et frottement" T. ing. A 3139
- [22] JOHNSON, K.L "The Mechanics of Adhesion, Deformation and Contamination in Friction, Dissipative Processes in Tribology". Elsevier Science B.V, Amsterdam, 1994.
- [23] A. BOUCHOUCHA "Contribution à l'étude du comportement en frottement et usure du cuivre dans un contact dynamique cuivre-acier traversé par un courant électrique". Thèse de Docteur Ingénieur, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1988.
- [24]. S. FAYEULLE, D. TREHEUX et N. MONCOFFRE "Microstructure et frottement d'un acier à roulement implanté d'ions d'azote". Journal de chimie physique, 84, n° 2, 1987.
- [25] CETIM / CERMO "Catalogue tribologique de matériaux pour glissière" .Première édition, Nov. 1985.
- [26] C. CHAUSSIN, G. HILLY "Métallurgie". Alliages métalliques, tome 1,1976.
- [27] C. CHAUSSIN "Manuel pratique des aciers et de leurs traitements thermiques". Manuel's pratiques Dunod, 1981
- [28] E. RABINOWICS " Friction andWear of Materials". Willy, NY, 1966.



Annexes

Annexe

Annexe

Acier : 42CrMo4 Non traité Dureté : Hv = 309

N= 200 tr/min Vg =1.36 m/s t = 900s (15min)

R_a pièce avant essai=0.4

1) Papier 120

R_a papier avant essai = 16.1

Pièce	Charge [N]	Δm[g]	Ra pièce après essai	Ra papier après essai	Obs
1	2.5	0.13704	0.8	16.7	
2	5	0.44579	0.6	18.7	
3	7.5	0.51376	0.6	19.3	
4	10	0.89444	0.4	19.2	
5	12.5	1.51835	0.5	22.7	

2) Papier 180

R_a papier avant essai = 15.5

Pièce	Charge [N]	Δm[g]	Ra pièce après essai	Ra papier après essai	Obs
1	2.5	0.17087	0.4	17.5	
2	5	0.50220	0.8	16.7	
3	7.5	1.12309	0.3	14.7	
4	10	1.17839	0.8	17.6	
5	12.5	1.18315	0.3	18.8	

3) Papier 220

R_a papier avant essai = 14.6

Pièce	Charge [N]	Δm [g]	R_a pièce après essai	R_a papier après essai	Obs
1	2.5	0.23412	0.5	17.9	
2	5	0.26927	0.5	16.4	
3	7.5	0.60014	0.8	13.5	
4	10	0.57744	0.8	15.9	
5	12.5	0.79373	0.3	14.5	

Acier : C45 Non traité Dureté : $H_v = 266$

$N = 200$ tr/min $V_g = 1.36$ m/s $t = 900$ s (15min)

R_a pièce avant essai = 0.5

1) Papier 120

R_a papier avant essai = 16.1

Pièce	Charge [N]	Δm [g]	R_a pièce après essai	R_a papier après essai	Obs
1	2.5	0.45101	0.6	20.4	
2	5	0.68540	1	26.8	
3	7.5	0.71440	1.2	28.3	
4	10	1.46076	0.8	20.9	
5	12.5	1.98678	0.9	20.8	

2) Papier 180

R_a papier avant essai = 15.5

Pièce	Charge [N]	Δm[g]	Ra pièce après essai	Ra papier après essai	Obs
1	2.5	0.10024	0.4	20.1	
2	5	0.15603	0.3	19.4	
3	7.5	0.31256	0.5	17.2	
4	10	0.45530	0.3	15.3	
5	12.5	1.05211	0.3	16.3	

3) Papier 220

R_a papier avant essai = 14.6

Pièce	Charge [N]	Δm[g]	Ra pièce après essai	Ra papier après essai	Obs
1	2.5	0.14332	0.8	15.2	
2	5	0.15027	0.6	15.2	
3	7.5	0.39122	0.3	16.6	
4	10	0.46743	0.7	14.9	
5	12.5	0.78828	0.3	15.2	

Le traitement thermique

Acier : C45 traité

La trempe

Dureté : Hv = 794

Le revenu

1) Papier 180

R_a papier avant essai = 15.5

Température c	La dureté Hv	Charge [N]	Δm[g]	Ra pièce après essai	Ra papier après essai
300	770	10	0.14429	0.7	17.9
400	652	10	0.50722	0.4	15.6
500	520	10	0.70554	0.5	17.9
600	430	10	0.81105	0.3	14.9

Acier : 42CrMo4 traité

La trempe

Dureté : Hv = 747

Le revenu

1) Papier 180

R_a papier avant essai = 15.5

Température c	La dureté Hv	Charge [N]	Δm[g]	Ra pièce après essai	Ra papier après essai
300	692	10	0.39202	0.5	13.7
400	634	10	0.66792	0.3	17.4
500	466	10	0.91726	0.5	15.3
600	388	10	0.94422	0.4	13.8

Le temps

Acier : C45 Non traité

Le temps (min)	Δm [g]
5	0.51827
10	0.54959
15	0.55478
20	0.51367
25	0.26816

Acier : C45 traité

Le temps (min)	Δm [g]
5	0.13806
10	0.22155
15	0.08119
20	0.07043
25	0.02063

Résumé

Le travail entrepris dans ce mémoire consiste à étudier principalement le comportement tribologique à sec, exclusivement la perte de masse (l'usure) de deux aciers, l'un acier non allié spécial de classe C et l'autre faiblement allié. Ces deux aciers sont fréquemment utilisés dans le secteur industriel.

Tous les essais ont été réalisés en utilisant une machine (polisseuse classique) comme tribomètre de type pion-disque, disponible au sein du Laboratoire de Génie Mécanique à l'Université Mohamed Boudiaf (M'sila).

L'usure est étudiée en fonction des paramètres mécaniques : charge, état de surface du disque, dureté et temps. Les résultats obtenus montrent que les paramètres ont une influence remarquable sur l'usure des aciers étudiés.

L'analyse et la discussion des résultats sont basées sur la variation de l'usure en fonction des paramètres cités auparavant.

Mots clés

Charge normale, rugosité, traitement thermique, dureté, usure.

ملخص

إن العمل المنجز في هذه المذكرة يتعلق بدراسة للسلوك الخاص بالاحتكاك و التآكل الجاف و خاصة الضياع في المادة لنوعين من الفولاذ الأول غير ممزوج صنف و الأخر ضعيف المزج. هذان النوعان يستعملان بكثرة في المجال الصناعي. كل التجارب أجريت باستعمال آلة الصقل و التي كيفة كآلة تستعمل في إجراء عمليات التآكل و هي متوفرة على مستوى مخبر الهندسة الميكانيكية بجامعة محمد بوضياف بالمسيلة .
تم دراسة التآكل بدلالة القوة حالة السطح للقرص الصلابة و الزمن .
إن النتائج المتحصل عليها تبين تأثير العوامل على الفولاذين المدروسين .
مناقشة النتائج و تحليلها اعتمدت على تغير التآكل بدلالة العوامل المذكورة سابقا.

الكلمات المفتاحية

قوة عمودية - الخشونة - معالجة حرارية - صلابة - تآكل.