

17/531.614

Université du 8 mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin D'études
Pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Conception et Production Industrielle

Présenté par : Foughali Atti Nabil

=====

***Influence des traitements thermique et
thermochimique sur le comportement en
frottement des aciers 100Cr6 et 16MnCr5***

=====

Sous la Direction de :

Dr. A.BELBAH

Année universitaire 2011/2012

SOMMAIRE



INTRODUICION GENE..... page1

CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

FROTTEMENT ET USURE..... page 2

I-FROTTEMEN page 2

I-1.Définition page 2

I-2. Différents modes de frottement page 4

I-2.2. Frottement en présence d'un lubrifiant page 4

I-2.3.Le frottement sec page 4

I-3 les variations du coefficient de frottement page5

I 3 1 Le coefficient de frottement varie avec le temps page 5

I-3.2 Variation du coefficient de frottement avec la vitesse page 6

I-3.3 Variation du coefficient de frottement avec la charge page 6

II – L'usure page 7

II-1. Introduction page 7

II-2. Mécanismes de l'usure page 9

II-3.Facteurs de l'usure page 9

II- 4. Les différents types d'usure page 11

1-usure d'adhésive page 11

2 -Usure abrasive page 11

3 -Usure érosive page 11

4 -Usure corrosive page 11

5-Usure par fatigue page 11

II-5. Paramètres influençant l'usure page 12

II-6. Approche globale du troisième corps page 13

II-6.1. Création et piégeage des débris d'usure page 13

II-6.2. Evolution des débris page 15

II-6.3. comportement du lit de débris page 15

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE

1. Introduction page 16

I-1. Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales utilisées page 16

I-2. Préparation des échantillons page 16

I-2-1. Aciers étudiés page 16

I-2-2. Compositions chimiques.....page17

I-3. Conditions de travailpage18

I-3-1. Traitements des acierspage18

I-3-1-1. Traitement thermiquepage18

 a) la trempe.....page18

 b) Le revenupage20

I-3-1-2. Traitement thermo-chimiquepage22

 a) La cémentation.....page22

 b) Cycle de cémentationpage22

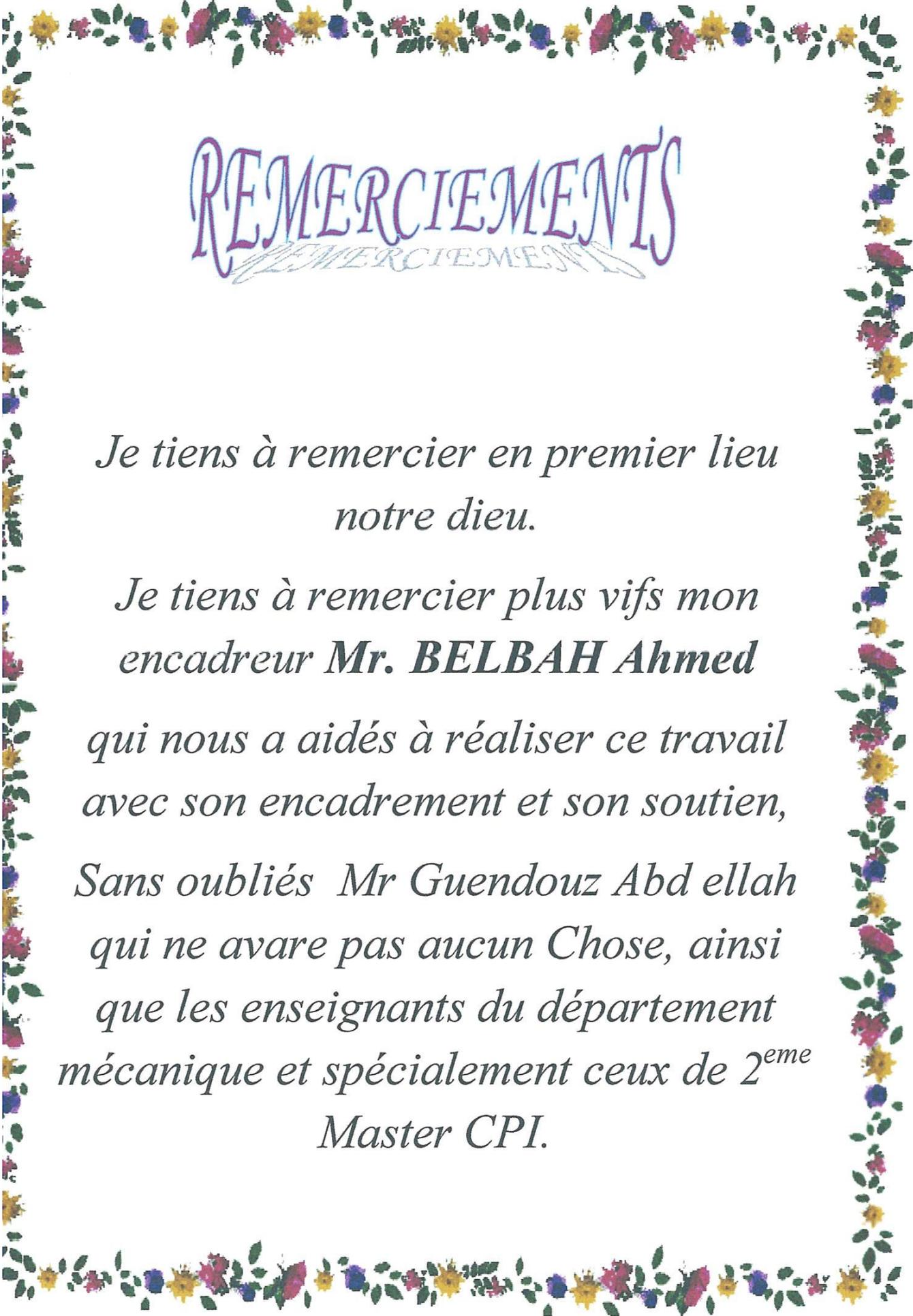
II. Les essais mécaniquespage23

II-1. Essais de dureté (H)page23

III. Essai de frottement et l'usurepage 25

III -1. Essais de frottementpage26

| | |
|--|---------------|
| III -2. Résultats et discussions | page27 |
| III -2-1. Couple 16MnCr5 non traité /SiC | page27 |
| III -2-2. Couple 16MnCr5 cémenté /SiC | page30 |
| III -2-3 .Couple 100Cr6 non traité /SiC | page32 |
| III -2-4. Couple 100Cr6 trempé /SiC | page35 |
| III -2-5. Etude comparative | page37 |
| IV. Mécanismes d'usure des surfaces | page43 |
| V. Influence des paramètres tribologiques | page43 |
| 1. Influence de la charge appliquée | page43 |
| 2. Influence de la vitesse de frottement | page44 |
| 3. Influence de la taille de l'abrasif | page44 |
| VI. Comportement et rôle du troisième corps..... | page44 |
| CONCLUSION GENERALE..... | page 46 |
| BIBLIOGRAPHIE | page 48 |



REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier en premier lieu
notre dieu.*

*Je tiens à remercier plus vifs mon
encadreur **Mr. BELBAH Ahmed**
qui nous a aidés à réaliser ce travail
avec son encadrement et son soutien,
Sans oubliés Mr Guendouz Abd ellah
qui ne avare pas aucun Chose, ainsi
que les enseignants du département
mécanique et spécialement ceux de 2^{eme}
Master CPI.*

INTRODUCTION GENERALE

L'étude du comportement en frottement et la tenue à l'usure nécessite en particulier une connaissance précise de nombreux paramètres technologiques influençant directement sur le phénomène d'usure.

La présente étude consiste à aborder le mécanisme de frottement de différents matériaux, par un travail exploratoire dans une gamme de charge ; de vitesse et de taille d'abrasif à identifier leur mécanisme d'usure et à dégager les propriétés et les caractéristiques gouvernant le phénomène.

Notre travail a pour objectif à moyen terme d'étudier les aspects tribologiques et morphologiques de deux nuances d'aciers 100Cr6 et 16MnCr5 et mettre en évidence la formation et l'élimination du troisième corps.

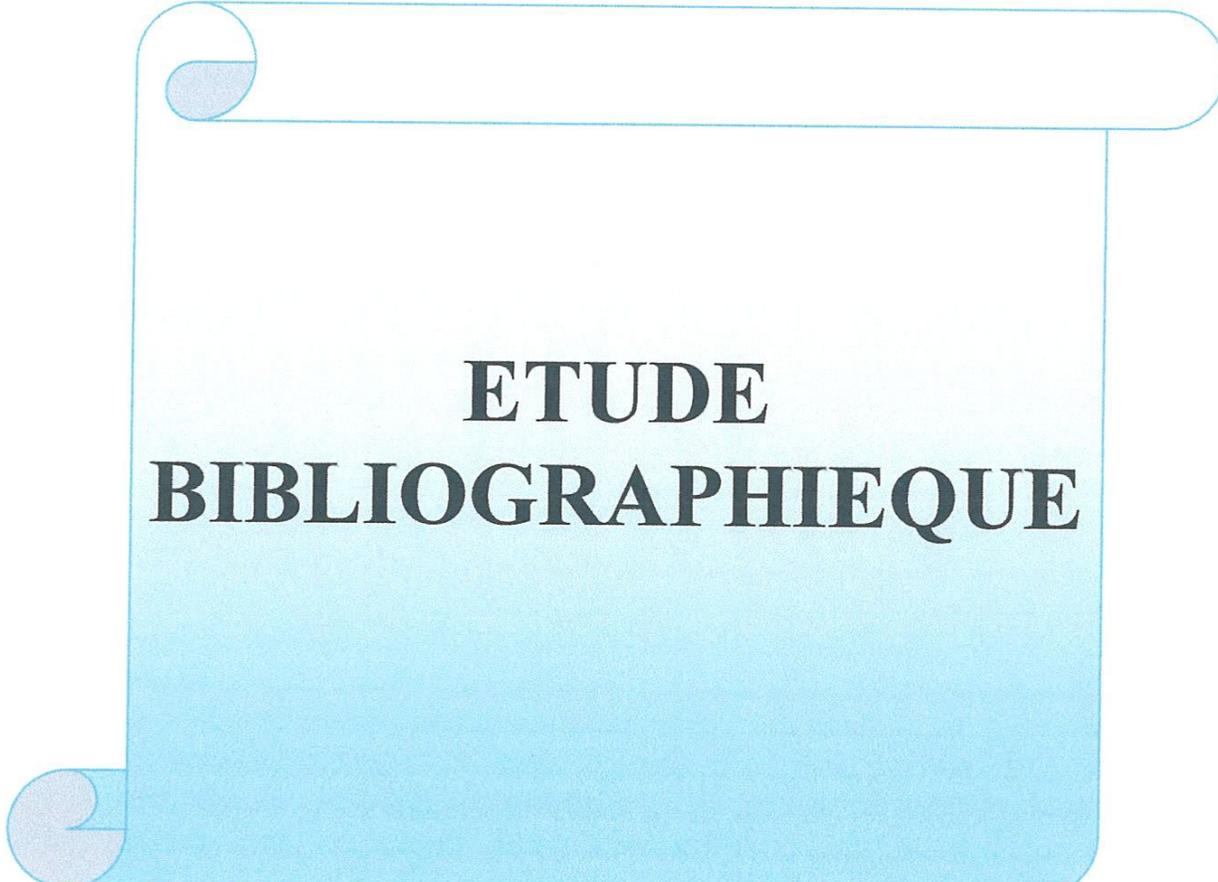
A travers cette discrétion technologique du procédé de frottement des problèmes posés, l'objectif principal de cette recherche est une meilleure compréhension des phénomènes, notamment d'usure abrasive et adhésive intervenant au cours du contact métal / métal. Ce travail comprend deux parties.

La première partie est consacrée à l'étude bibliographique du frottement et de l'usure des matériaux d'une manière plus détaillée complétée par une partie sur le comportement du transfert dans le contact et les paramètres influençant l'usure.

Dans la deuxième partie, nous présentons l'étude expérimentale, la présentation et la caractérisation des matériaux. Cette dernière a pour objectif l'étude et la caractérisation des différents aciers ; cela nous permettra non seulement d'illustrer les principales caractéristiques de ces matériaux par leur utilisation. Mais encore d'introduire le problème fondamental du choix de ces derniers et l'influence de leur propriété sur l'usage qu'on en fait.

Dans cette partie, nous allons nous intéresser plus particulièrement à l'étude de l'influence de quelques paramètres sur le comportement en frottement des matériaux étudiés. Telles que : la vitesse, la charge et la taille d'abrasif.

Enfin, nous essayerons de donner une synthèse des résultats de frottement, dégagant ainsi des conclusions sur l'étude de frottement et l'usure des différents aciers et l'influence de tel ou tels paramètres et tels ou tels traitements.



**ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE**

FROTTEMENT ET USURE

I-FROTTEMENT

I-1.Définition

Tout mouvement entre deux corps en contact est freiné par une résistance, cette résistance qui limite les formes connues de mouvements, donc on peut donner au frottement la définition suivante :

« Force qui agit entre deux corps à leur surface de contact de façon à freiner le déplacement de l'un par rapport à l'autre. »

Le mécanisme de frottement a été tout d'abord expliqué par BOWDEN et TABO [1] qui ont étudié d'une part, la surface de contact réelle entre deux solides chargés, et d'autre part le rôle de cisaillement et du labourage des jonctions de d'interface, quand l'un des solides se déplace par rapport à l'autre, en effet lorsque deux corps sont mis en contact, ils ne reposent en fait ; que sur les crêtes de leur aspérités et la surface réelle de contact sera ; pour des faibles charges, très faibles par rapport à la surface apparente (Figure I-1).

Lorsque la charge s'accroît ; les crêtes des aspérités peuvent subir des déformations élastiques, puis plastiques, qui amène à une augmentation de la surface réelle du contact

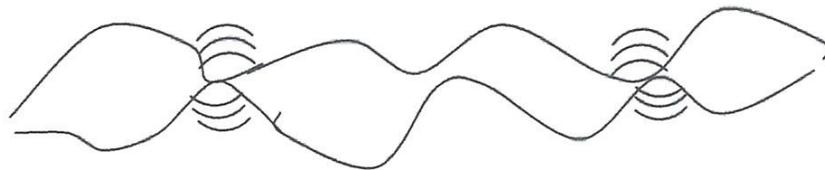


Figure : I-1. Déformation plastique et élastique lors d'un contact.

La grandeur de ces surfaces a été mesurée expérimentalement par la méthode de conductibilité électrique.

Le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux [2].

Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animé de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps.

Les conditions tribologiques et les paramètres importants pour le frottement et l'usure d'un matériau qu'il faut considérer sont nombreux (Tableau I-1).

| VARIABLES OPERATOIRES | SYSTEME TRIBOLOGIQUE | CARACTERISTIQUES TRIBOLOGIQUES |
|-----------------------|----------------------|--|
| charge normale | environnement | force de frottement coefficient de frottement |
| vitesse | corps 1 | taux d'usure aspect de surface |
| cinématique | interface | température de contact |
| température | corps 2 | bruits et vibrations |
| durée | | |

Tableau I-1: Structure du système tribologique

Les conditions de frottement et les mécanismes d'endommagement dépendent d'une multitude de facteurs constituant le tribosystème.

Un contact tribologique ou tribo-système est ainsi composé de trois éléments principaux (Figure I-2): les solides **A** et **B** en contact appelés premiers corps et le milieu interfacial **I** défini sous le terme de troisième corps (débris d'usure et/ou lubrifiant).

A ceux-ci s'ajoute l'environnement (physico-mécanique) **E** du contact qui ne peut être ignoré puisqu'il constitue l'ambiance de fonctionnement du contact donc le milieu des échanges du contact avec l'extérieur.

Il est ainsi déterminant dans le comportement physico-chimique des matériaux au cours du frottement y compris le troisième corps. Puis, il joue un rôle à travers d'autres facteurs tels que : température, composition et pollution éventuelle.

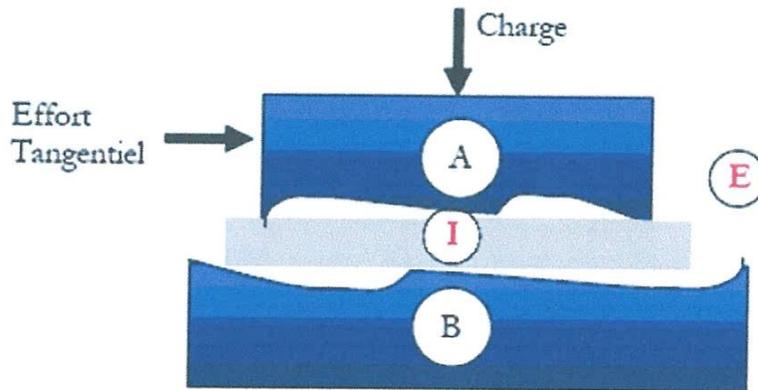


Figure I-2. Schéma d'un tribo-système

I-2. Différents modes de frottements

I-2.1. Frottement en présence d'un lubrifiant

Le lubrifiant a pour rôle de s'interposer entre les surfaces des pièces frottantes (Figure I-3), pour principaux objectifs : la réduction de l'usure ; l'élimination de risque de grippage et l'abaissement du coefficient de frottement. Accessoirement, il pourra servir à éviter la corrosion des différents organes.

S'il est présent en quantité importante et s'il circule, il évacuera une part importante de l'énergie thermique produite.

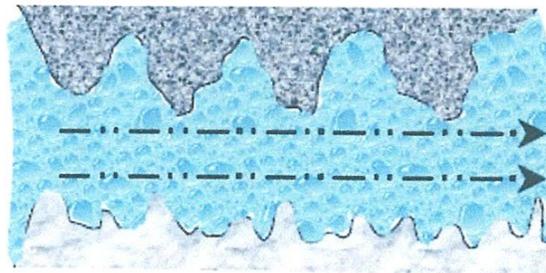


Figure: I-3. Frottement en présence d'un lubrifiant.

I-2.2. Le frottement sec :

Concédons maintenant deux solides en contact soumis en plus de la charge normale (Figure I-4), à une forte tangentielle ce qu'on appelle « les lois du frottement ». Déterminant la

direction et l'amplitude de la force de frottement en fonction de paramètres directement mesurables telles que la charge appliquée et la dimension de l'air de contact.

- La force de frottement « F » agit directement dans la direction contraire à celle de la vitesse des deux surfaces.
- La force de frottement est proportionnelle à la charge normale « P » par la relation suivante :

$$F = \mu \cdot p$$

On définit ainsi un coefficient de frottement (μ) critère représentatif de la résistance au glissement, ce coefficient n'a cependant rien d'une priorité intrinsèque du matériau et peut varier considérablement d'une situation donnée à une autre comme avec l'environnement.

La force de frottement est indépendante de l'aire de contact (apparente) entre les deux solides.

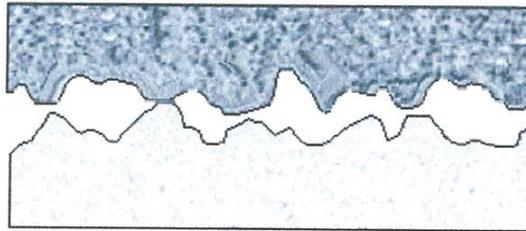


Figure:I-4. Frottement sec.

I-3 les variations du coefficient de frottement :

I-3.1 Le coefficient de frottement varie avec le temps.

Le coefficient de démarrage ou coefficient de frottement statique est plus élevé que le coefficient en marche ou dynamique ; on a une représentation intensive en imaginant qu'il faut dépenser pour amorcer un mouvement une certaine énergie qui servira à écarter les pièces d'une hauteur égale aux réseaux cumule aspérités [3].

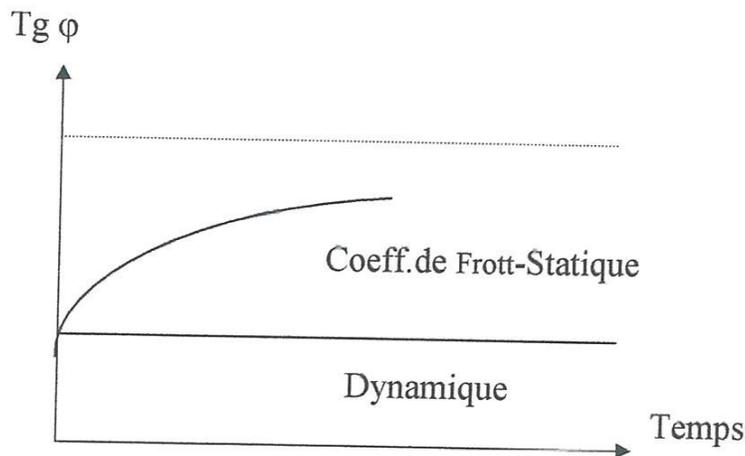


Figure: I-5. Le coefficient de frottement statique varié avec le temps de maintien en immobilité

I-3.2 Variation du coefficient de frottement avec la vitesse

Si l'on ignore encore bien des choses la vitesse de propagation à travers un corps d'une déformation plastique, il est toutefois sage d'admettre quelle ne saurait être infinie.

Dès l'instant où il est prouvé que l'appui et le glissement d'un corps sur un autre se font entre les aspérités dans le domaine plastique, il est clair qu'il faut s'attendre à une influence de la vitesse sur le coefficient de frottement.

Enfin le contact avec la surface, la vitesse règle le cycle des échauffements et refroidissements successifs que provoque la friction entre un point donné ces variables sont décidés à leur tour de l'apparition et de l'ampleur de phénomènes connexes [3] : trempe, diffusion... etc.

I-3.3 Variation du coefficient de frottement avec la charge

Le frottement de deux matériaux en atmosphère ordinaire fait intervenir leurs deux oxydes [3] :

- De nombreux couples classiques dans l'industrie montrent cette variation brusque de la couche donnée.
- Avec le couple (Acier + cuivre), le coefficient de frottement croît brusquement lorsque la couche d'oxyde de cuivre est défoncée.
- Avec le couple (acier + magnésium), il décroît au contraire.

- L'élévation de la température provoque un abaissement du module de Young et change les limites des domaines élastique et plastique du métal.
- Comme corollaire la couche d'oxydes recouvrant la surface et jouant pendant le frottement le rôle de manteau – protecteur se trouve fragilisée par le ramollissement de la sous couche il en résulte une bien plus grande sensibilité au collage épidermique.
- De même que sur des surfaces fraîches des molécules appartenant à l'ambiance viennent se fixer par absorption de même existe t'il lorsque la température s'élève un phénomène inverse de désorption.

Lorsque qu'un couple est lubrifié par un acide gras, il peut y avoir détérioration immédiate des caractéristiques de frottement si la température s'élève jusqu'au point de fusion de l'acier [3].

II – L'usure

II-1. Introduction

L'usure est la perte progressive de la matière de la surface active d'un corps par suite de mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface.

L'étude de l'usure présente un double intérêt économique et scientifique d'une part, l'usure est la principale cause de la mise hors service des objets et des machines.

D'autre part notre civilisation technologique exige de la part des mécanismes des performances de plus en plus poussées par l'augmentation des pressions de contact, des vitesses de glissement et des durées de fonctionnement.

Lorsque l'on met en marche une pièce mécanique subissant des frottements on constate schématiquement trois étapes :

- Dans une première période, que l'on pourrait nommer «rodage » l'usure se fait très rapidement, à des vitesses régulièrement décroissantes, ne comprenant pas toutefois le fonctionnement, mais obligé à prendre précaution :

- Surveiller l'échauffement.
- Charge croissante lentement.
- Mise en vitesse progressive.
- Lubrifiant parfaitement propre et abondamment renouvelé.
- Eventuellement présence d'un dopé.

- Une deuxième période que l'on peut nommer «marche normale » représente en fait la vie de la machine. Pendant celle-ci l'usure est faible où tout au moins constante.

- Une troisième étape dite de «vieillesse et mort » de l'organisme, se caractérise par une reprise de l'usure mais avec cette fois une accélération croissante, et par des incidents de plus en plus graves jusqu'à la fin de la pièce.

Les études sur l'usure font en général intervenir un grand nombre de paramètres, de modes d'observations et de processus physiques, nous présentons ici un classement comportant trois parties.

- 1 - Les facteurs de l'usure.
- 2 - Les effets les plus fréquents observés pendant la détérioration des surfaces.
- 3 - Les mécanismes ou processus élémentaires mis en jeu.

Selon la quantité de matériau perdue par un élément actif d'un tribosystème (Figure I-6), on distingue trois phases [4]:

- 1)-Rodage : usure rapide avec une vitesse d'usure régulièrement décroissante.
- 2)-Marche normale : durée de vie (usure faible et constante).
- 3)-Vieillesse et mort : vitesse d'usure croissante.

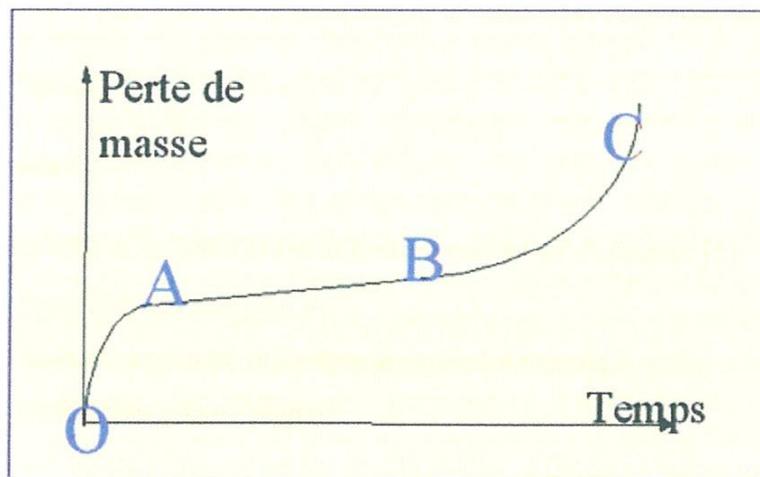


Figure: I-6. Test de l'usure

OA: l'usure est rapide (rodage)

AB : utilisation normale de la machine

BC : la destruction des éléments de la machine

En général, une pièce subit tout au long de sa vie 3 étapes d'usure :

- ❖ L'usure douce ou ultra-douce: le système s'use peu. Les surfaces restent lisses et les particules ont une dimension de l'ordre du micromètre.

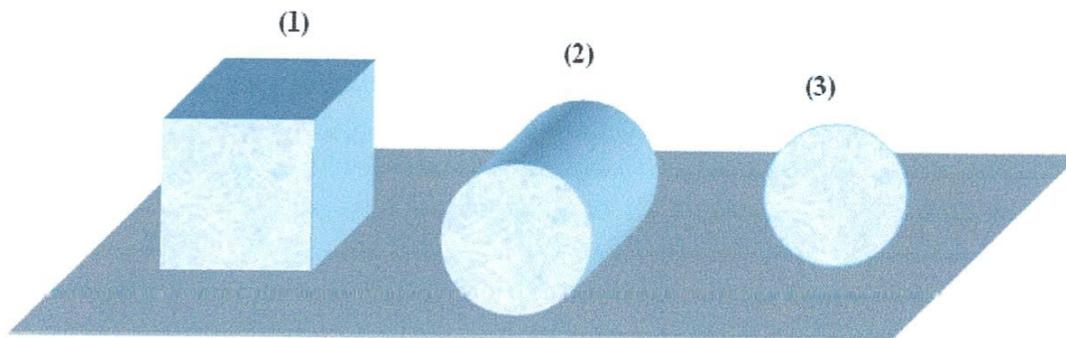


Figure : I-7. Types de contacts fondamentaux. (1) contact plan/plan, (2) contact cylindre/plan, (3) contact sphère/plan.

II-3. 2. Etat de surfaces micro géométrique

Ce facteur a été séparé du précédent (mode de contact) en raison de son importance industrielle et difficultés métrologiques que présente son contrôle. En réalité, les pièces réelles présentes, par rapport à leurs formes idéales, des défauts géométriques [5].

II-3.3. La charge

C'est la résultante des projections sur la normale en chaque point de contact, nous préférons préciser la charge plutôt que la pression qui n'est souvent connue par le calcul qu'avec une grande approximation [5]. appliquée avant ou après le début du glissement elle peut, pendant une expérience garder une valeur constante ou varier de façon progressive et échelonnée.

II-3-4. La vitesse

Il s'agit, suivant le cas des vitesses de glissement, de roulement en de pivotement. Dans le cas du glissement à sec elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact et dans le cas du glissement lubrifié, elle est un facteur important d'établissement du régime hydrodynamique[5], nulle au départ puis croissant progressivement, elle peut en un point d'une surface garder toujours la même direction ou bien changer périodiquement de sens. elle peut varier de quelques micromètres par seconde lorsque les supports des machines se déplacent sous l'effet des dilatations thermiques ou bien atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde dans le cas de projection sur leur guide.

II- 4. Les différents types d'usure sont :

1- Usure d'adhésive :

Ce type d'usure se produit lorsque des liaisons fortes s'établissent aux jonctions comme le prévoit la théorie de l'adhérence. Elle se manifeste par le transfert de matière sur la surface du corps antagoniste au cours du glissement se succèdent la formation et la rupture des jonctions. Habituellement la jonction est plus faible que le matériau lui-même et elle se rompt à l'interface.

2- Usure abrasive :

Ce mode d'usure est un phénomène de nature essentiellement mécanique, il est défini comme étant l'usure par déplacement de matière, produit par des particules dures ou des protubérances dures, les particules dures peuvent se trouver entre les deux surfaces en mouvement relatif être encastrées dans l'une des deux.

3- Usure érosive :

L'usure érosive est la perte de matière d'une surface solide due au contact avec un fluide en mouvement relatif contenant des particules solides l'usure érosive se manifeste sur les matériaux fragiles par des éclats et des fissures et sur les matériaux ductiles par des piqûres, des polissages, des rayures et des copeaux.

4- Usure corrosive :

Elle se définit comme un processus d'usure dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant. Cette forme d'usure qui a été peu étudiée, est en général modérée.

Elle peut cependant devenir très prononcée surtout aux températures élevées ou dans des atmosphères humides, dans certains cas, il y a d'abord une réaction chimique suivie d'un enlèvement des produits de corrosion par une action mécanique.

5- Usure par fatigue.

L'usure par fatigue s'observe lorsqu'une surface subit des contraintes cycliques. On peut observer des déformations plastiques sur les métaux fragiles, des cycles de chargement déchargement en roulement ou en glissement favorise la formation des micro-fissures en surfaces comme en sous couches.

II-5. Paramètres influençant l'usure :

Plusieurs paramètres influençant l'usure : paramètres mécaniques, cinétiques, géométriques et physico-chimiques...etc.

Nous citons les effets de la charge, la vitesse, les propriétés mécaniques et la microstructure.

❖ Influence de la charge :

Dans un grand nombre de matériaux, la perte de masse est une fonction linéaire croissante avec la charge.

Pour les fortes charges, ces observations ne sont plus valables car les particules abrasives s'enfonçant trop profondément et sont déchaussées sous l'effet du déplacement ce qui entraîne la dérivation de la tôle abrasive et la diminution de l'usure concernant , l'influence de la charge.

AYEL [6] a remarqué, en faisant frotter l'Inconel sur l'alumine que l'usure dépend de la vitesse de glissement.

AYEL conclu que l'usure croit avec la charge pour les faibles vitesses et qu'aux vitesses plus élevées, l'usure croit d'abord en passant par un extremum pour décroître ensuite ceci s'explique par la formation d'un film adhérent d'oxydes.

❖ Influence de la vitesse :

La perte de masse par abrasion augmente lorsque la vitesse d'abrasion croit. Cet accroissement est attribué à une baisse des caractéristiques mécaniques sous l'effet de l'échauffement provenant de l'accroissement de la vitesse, dans ce cas le principal effet de la vitesse est d'agir sur la température superficielle. Cette dernière atteint sa valeur maximale qui est celle du métal qui a le plus bas point de fusion.

❖ Influence de l'ambiance :

Un liquide a pour effet de chasser les débris d'usure ce qui favorise la conservation de l'efficacité des particules abrasives, la vapeur d'eau aurait le même effet ce qui explique que la perte de masse par abrasion croit quant la pression partielle ambiante augmente.

En particulier, l'usure par abrasion est forte (10à20%) en été qu'en hiver.

❖ Influence des propriétés mécaniques :

Parmi les facteurs les plus importants qui ont une influence considérable sur l'usure, on trouve la dureté et la ténacité. jusqu'à présent il n'existe pas une relation simple qui est capable de lier l'usure et les paramètres mécaniques des matériaux.

L'influence de la dureté et de la ténacité dépend du type de contraintes appliquées à la surface du matériau.

Dans le cas d'usure abrasive et d'usure adhésive où la contrainte de cisaillement est prédominante, la dureté est généralement le facteur le plus important. Par contre, dans le cas où la pression normale est plus élevée (érosion à grande vitesse) l'effet de la ténacité est plus important.

II-6. Approche globale du troisième corps :

Cette approche constitue un élément important de généralisation dans l'évolution du comportement trilogique d'un couple de matériaux [7], elle peut s'appliquer aussi bien dans le cas de métaux, de polymères que pour les céramiques [8].

La démarche suivie repose sur la notion d'écran dynamique jouée par l'ensemble des débris d'usure (troisième corps), entre les deux solides existants La surface (film d'oxydes, film adsorbé,...) dont l'origine provient des interactions entre le solide et son environnement (atmosphère). la destruction de la surface par le frottement éliminé les écrans statiques et provoque la formation des particules d'usure qui sont piégés dans l'espace confiné par le contact.

L'accumulation des débris dans l'interface forme un lit de phénomènes de portance tels qu'il en existe en lubrification. la notion de la portance est tout à fait originale en frottement sec et mérite d'être analysée de plus près.

Le mécanisme d'usure mis en jeu peut se décomposer en trois stades :

- Création et piégeage des débris d'usure.
- Evolution de ces débris
- Comportement du lit des débris.

Chaque stade possède sa propre cinétique et peut interagir fortement avec les autres.

II-6.1.Création et piégeage des débris d'usure :

La création des débris débute quant le matériau. n'accomode plus les déformations, cette aptitude peut être fortement modifiée au cours du temps pour les matériaux métalliques « écrouissage cyclique par fatigue des couches superficielles, fragilisation par des phénomènes physico-chimiques » phénomènes beaucoup moins sensibles dans le cas des céramiques.

La création des débris proprement dit, met en jeu divers mécanismes d'usure spécifiques au matériaux étudié (abrasion , adhérence ,fatigues...) et au mode de sollicitation imposée.

Les premières particules (débris) se détachent, des massifs sont piégés dans le contact.la(figure I-8) montre bien un modèle bidimensionnel ou la rigidité de la surface qui sont vides au départ par les débris d'usure [9].

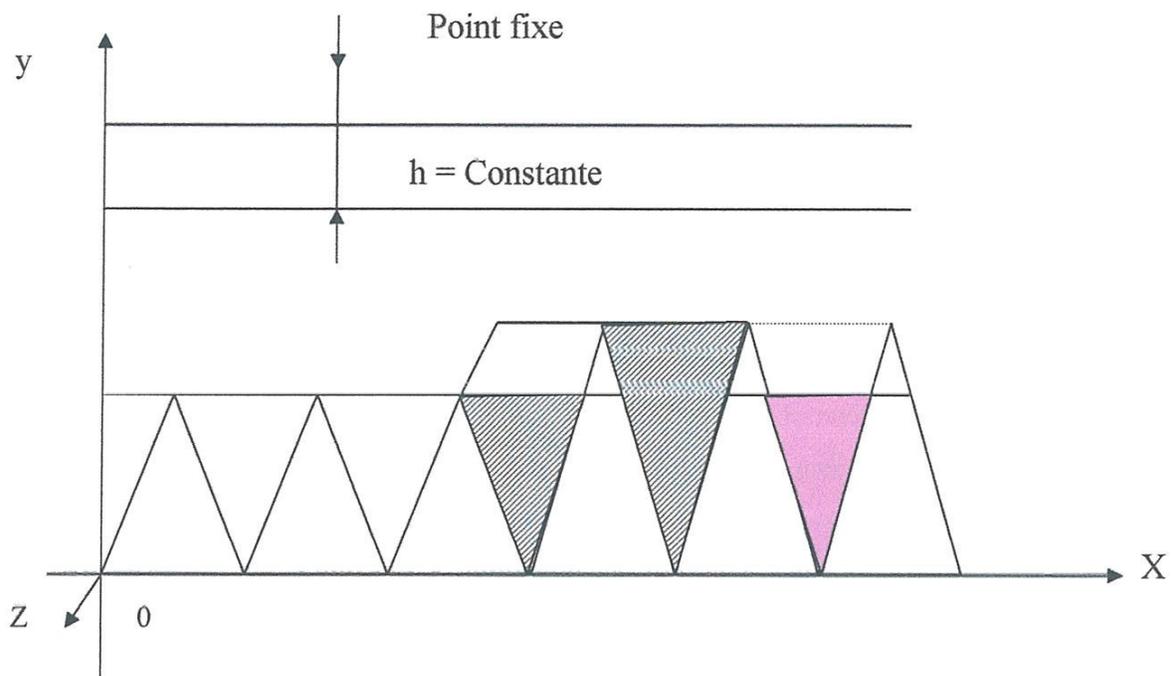


Figure : I-8. Formation des troisièmes corps.

La notion de piégeage est claire dans la mesure où on tient compte de l'échelle de contact, en effet une particule d'usure, au moment de sa formation mesurée nettement moins que le micron, par la dimension minimale d'un contact et rarement inférieur à $100 \mu\text{m}$ (figure I-9).

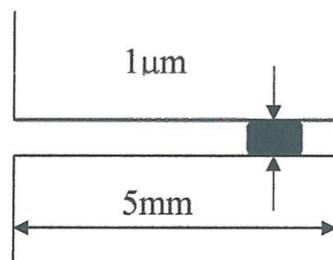


Figure : I-9. Echelle de contact (taille relative des particules d'usure) [9].



**ETUDE
EXPERIMENTALE**

I. INTRODUCTION

Notre objectif est de caractériser le comportement tribologique des aciers 100Cr6 et 16MnCr5 avant et après traitement.

L'acier 16MnCr5 est dédié au marché de l'automobile et plus précisément à la réalisation de pignons alors que l'acier 100Cr6 est destiné pour la fabrication des roulements.

On s'intéresse à comprendre le comportement tribologique de ces aciers face au carbure silicium SiC.

Dans ce chapitre, l'étude est consacrée au frottement de deux nuances d'aciers actuellement utilisées dans les domaines industriels où nous nous sommes intéressés au frottement à des vitesses et des charges variées dont le but d'expliquer la performance de ces aciers du point de vue tribologique et d'apporter des résultats quantitatifs sur les paramètres de frottement.

Les essais d'usure sont toujours utilisés pour tester la performance de ces aciers. Ils se limitent à l'étude de la durée de vie, modes d'usure et leurs effets induits à la surface usinée.

L'emploi de différentes techniques d'analyse est nécessaire pour mettre en évidence la morphologie, la structure et les propriétés mécaniques des composés formés au niveau du contact. Les techniques expérimentales utilisées pour cette étude sont :

- ❖ Microscopie optique ;
- ❖ Dureté ;

En ce qui concerne le frottement des échantillons, ce celui-ci est effectué à l'aide d'une polisseuse au niveau du laboratoire des sciences des matériaux. Après frottement, les surfaces des échantillons sont examinées par les méthodes de caractérisation énoncées ci-dessus.

I-1. Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales utilisées

I-2. Préparation des échantillons

I-2-1. Aciers étudiés

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les aciers sélectionnés pour notre étude sur le phénomène de l'usure. Nous insisterons particulièrement sur le comportement en frottement. Les aciers présentent un ensemble de caractéristiques qui permettent d'une part leur mise en œuvre (réalisation, traitement thermique et de surface) et d'autres part leur tenue en service.

Les aciers 16MnCr5 et 100Cr6 se classent dans les aciers résistants aux chocs thermiques du fait de la présence du chrome et du molybdène. Cet aspect est particulièrement important dans le cadre du frottement.

Pour améliorer la durée de vie, les aciers 16MnCr5 et 100Cr6 sont soumis simultanément à la cémentation solide et la trempe afin de limiter l'endommagement par abrasion. Les traitements apportent une augmentation de la dureté en surface et limite l'usure par abrasion.

I-2-2. Compositions chimiques

Les compositions chimiques des aciers 100Cr6 et 16MnCr5 sont présentées dans les tableaux (II-1, II-2) :

| Désignation | C(%) | Si(%) | Mn(%) | P(%) | S(%) | Cr(%) | Ni(%) | Mo(%) |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 100Cr6 | 1.00 | 0.16 | 0.40 | 0.030 | 0.025 | 1.50 | 0.26 | 0.21 |

Tableau II-1. Composition chimique (poids %)

| Désignation | C(%) | Cr(%) | Si(%) | Mn(%) | S(%) | P(%) |
|-------------|-------------|------------|-------------|----------|-------|-------|
| 16MnCr5 | 0.14 à 0.19 | 0.8 à 1.10 | 0.15 à 0.40 | 1 à 1.30 | 0.035 | 0.035 |

Tableau II-2. Composition chimique (poids %)

Dans un premier temps nous allons réaliser une comparaison d'essais entre le frottement des aciers non traités et des aciers traités pour 2 niveaux de vitesse et 2 niveaux de charge.

Le choix d'un acier de cémentation ou de trempe est essentiellement déterminé par la trempabilité permettant d'obtenir la résistance en sous-couche et à cœur et dans une moindre mesure la capacité de durcissement de la couche enrichie en carbone.

L'acier 100Cr6 se classe dans les aciers résistant au frottement du fait de la présence du chrome, du molybdène et du vanadium.

Pour améliorer la durée de vie, les aciers 16MnCr5 sont cémentés afin de limiter l'endommagement par abrasion. La cémentation apporte une augmentation de la dureté en surface et limite les mécanismes d'abrasion. Le choix d'une trempe huile est compatible avec les aciers alliés La cémentation se pratique sur des aciers dont la teneur en carbone ne dépasse pas généralement 0,25%.

I-3. Conditions de travail

I-3-1. Traitements des aciers

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

a)- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- ❖ Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- ❖ Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

b)- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

c)- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux ayant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Ce sont les traitements thermiques qui fixent la microstructure de l'acier et par conséquent les propriétés mécaniques du matériau. Les aciers sélectionnés pour notre étude ont été soumis à différents traitements dans le but d'améliorer leur propriété. Pour l'acier 100Cr6 une trempe à l'huile, suivie d'un revenu et pour l'acier 16MnCr5 une cémentation solide, une double trempe et un revenu.

I-3-1-1. Traitement thermique

a) la trempe

Celle-ci consiste à chauffer l'acier à une température de $950\text{ }^\circ\text{C}$ avec un temps de maintien de 45 minutes suivi d'un refroidissement rapide par immersion dans un bain d'huile. La trempe permet d'augmenter la dureté et la résistance de l'acier.

Ce traitement ne peut se maîtriser que si l'on a bien en mémoire le diagramme fer-cémentite.

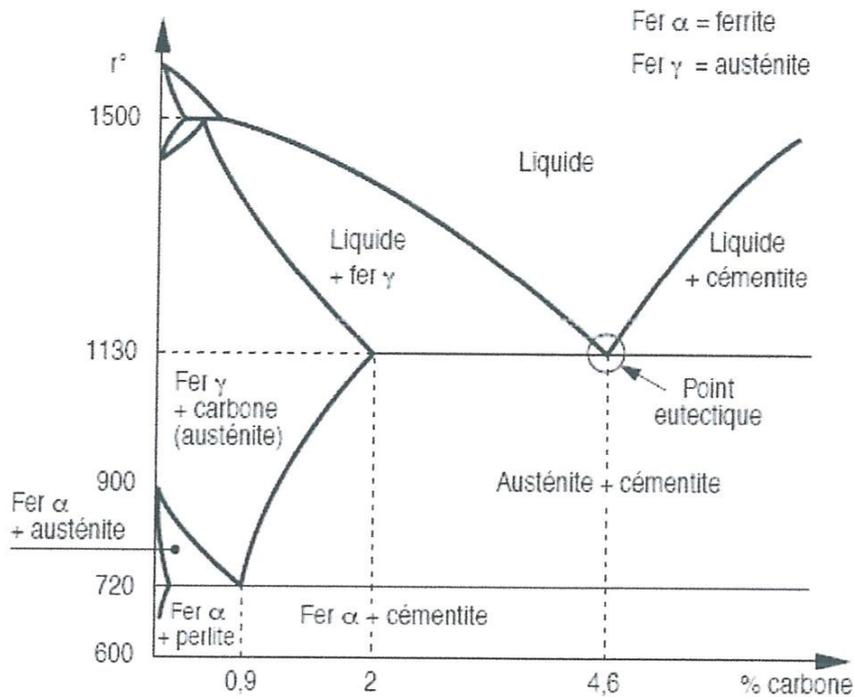


Figure II-1. Diagramme fer-carbone

- **Condition de l'essai de trempe**

On cherche à obtenir la transformation de l'austénite (stable à température élevée) en constituants métastables (pas stables mais la très faible vitesse de réaction donne une apparence de stabilité) : solution sursaturée de carbone dans le fer α . Notre but est de transformer l'austénite en martensite ou bainite, plus dur. La méthode de refroidissement dépend du constituant et de la structure souhaitée. Le cycle de trempe comprend 2 étapes : l'austénisation puis le refroidissement.

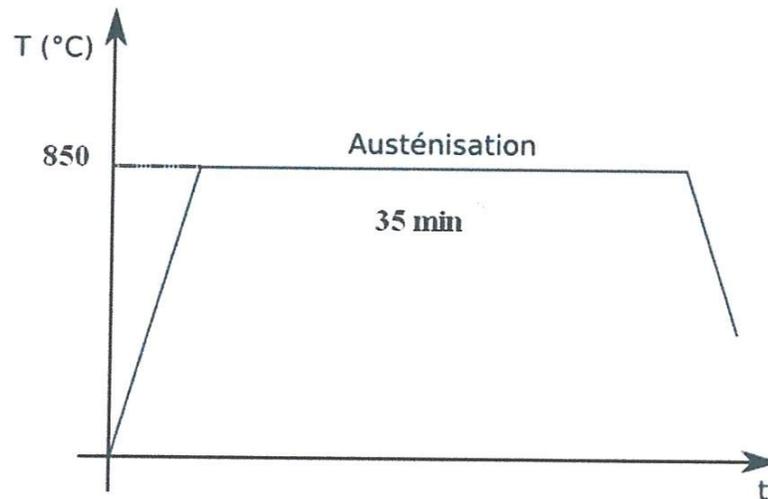


Figure II-2. Cycle de trempe à l'huile de l'acier 100Cr6

- ❖ une température uniforme dans toute la pièce.
- ❖ un maintien en température assez long pour permettre une homogénéisation complète de l'austénite.
- ❖ un refroidissement rapide.

La trempe crée une structure martensitique très dure, donc très fragile. Le revenu a été effectué systématiquement après la trempe pour obtenir un bon compromis dureté/fragilité. Le revenu diminue aussi les contraintes résiduelles de la trempe.

b) Le revenu :

Le revenu est effectué systématiquement après la trempe. La trempe crée une structure martensitique très dure, donc très fragile. Le but du revenu est de modifier la structure pour obtenir un bon compromis dureté/fragilité. Le revenu diminue aussi les contraintes résiduelles de trempe.

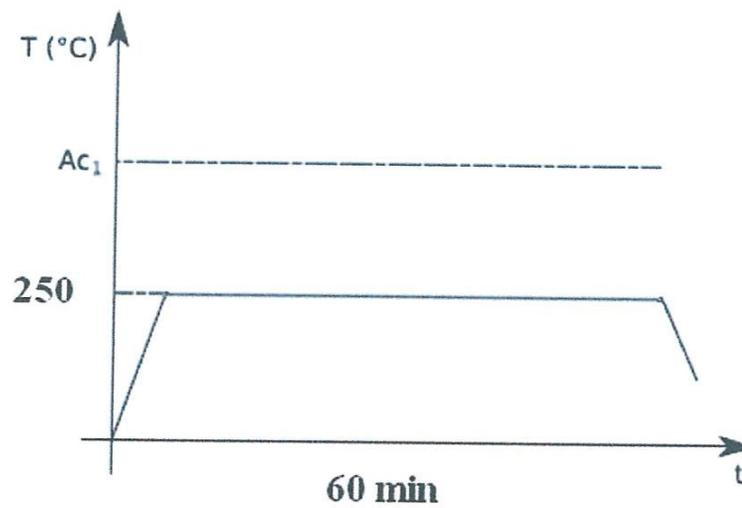


Figure II-3. Cycle de revenu de l'acier 100Cr6

Le cycle de revenu comprend trois phases qui sont nécessaires pour corriger les défauts de trempe

- 1) Un chauffage à 250° pour éliminer les tensions internes dues au refroidissement brutal de la périphérie de la pièce sur le cœur dilaté. La contraction brutale de la périphérie, lors de la trempe, engendre des tensions entre le cœur et la périphérie.
- 2) Un maintien à température pendant une heure pour permettre l'élimination des tensions dans toute la masse.
- 3) Un refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes.

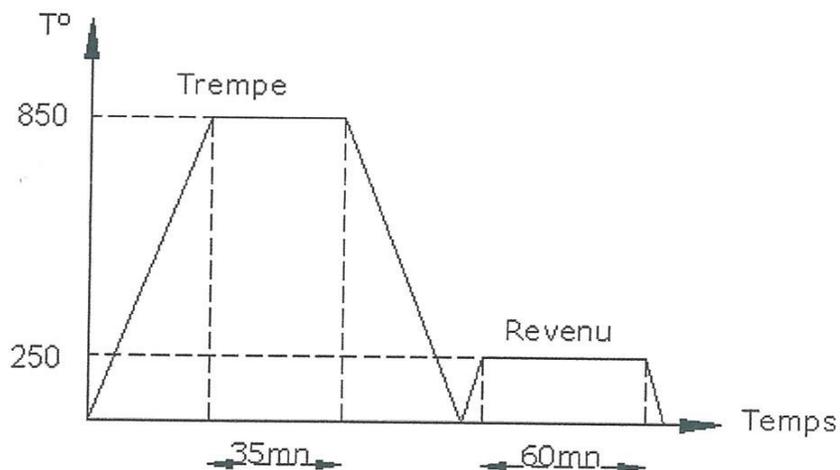


Figure II-4. Cycle thermique de Trempe à L'huile de l'acier 100Cr6

I-3-1-2. Traitement thermo-chimique

Afin d'augmenter la durée de vie des pièces travaillant en frottement, on fait appel de plus en plus souvent à l'utilisation de traitement de surface comme la cémentation. Le terme cémentation regroupe différents traitements thermo-chimiques faisant diffuser du carbone. La concentration en carbone diminue de la surface traitée vers le cœur où la concentration est nulle. La température de traitement est comprise entre 900 °C et 950 °C en fonction de la nuance de l'acier et des procédés utilisés.

a) La cémentation

Le deuxième type d'acier 16MnCr5 a été soumis à son tour à un traitement superficiel appelé cémentation solide. Ce procédé consiste à un enrichissement de la couche superficielle de la pièce par le carbone. Il a pour but d'améliorer la résistance au frottement (grippage, fatigue, corrosion) et la résistance à la fatigue donc la modification des couches superficielles de la pièce pour lui donner des propriétés particulières. Dans tous les cas, le cœur est très tenace (résistant aux chocs), la surface a une dureté élevée (résistance à l'usure). La cémentation dépend des paramètres suivants:

- ❖ temps de traitement
- ❖ température
- ❖ composition de l'acier de base

La cémentation se fait en trois phases :

- réaction chimique à haute température avec fixation du carbone sur l'acier.
- diffusion du carbone dans les couches superficielles.
- traitement thermique de l'acier lorsque l'épaisseur enrichie est suffisante pour durcir la couche cémentée.

On utilise comme ciments de carbone (charbon de bois) qui brûle et dégage du CO₂. On mélange donc avec la poudre de charbon de bois entre 25 et 40 % de carbonate de baryum.

b) Cycle de cémentation

La procédure consiste à porter les échantillons dans un four électrique à une température de 950°C pendant 9 heures, puis les refroidir dans la caisse à l'air. A la cémentation on associe une trempe double pour éviter le risque de grossissement du grain austénitique qui peut rendre l'acier plus fragile.

- La 1^{ère} trempe à une température de 950 °C et un refroidissement à l'huile. Un temps de maintien de 35 minutes qui a pour but de régénérer les matériaux (rendre le grain plus fin, mais laisse grossir le grain de la couche cémenté).
- La 2^{ème} trempe à 750°C, avec un temps de maintien de 35 minutes et toujours le refroidissement dans l'huile qui ui affine le grain de la couche cémentée et laisse fixe le grain à cœur.
- A la fin un revenu à 300 °C, avec un temps de maintien d'une heure, le refroidissement se fait à l'air pour diminuer la fragilité de la couche cémentée.

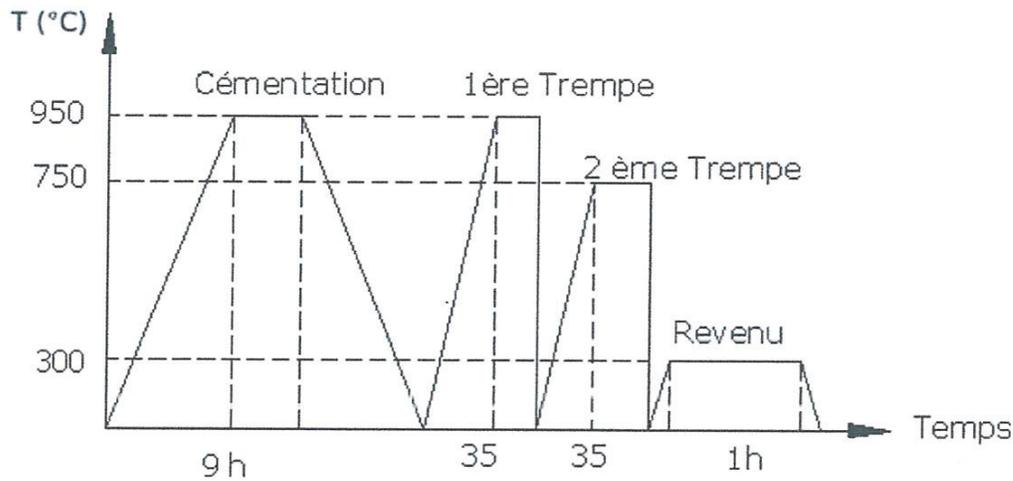


Figure II-5. Cycle thermique de cémentation de l'acier 16MnCr5

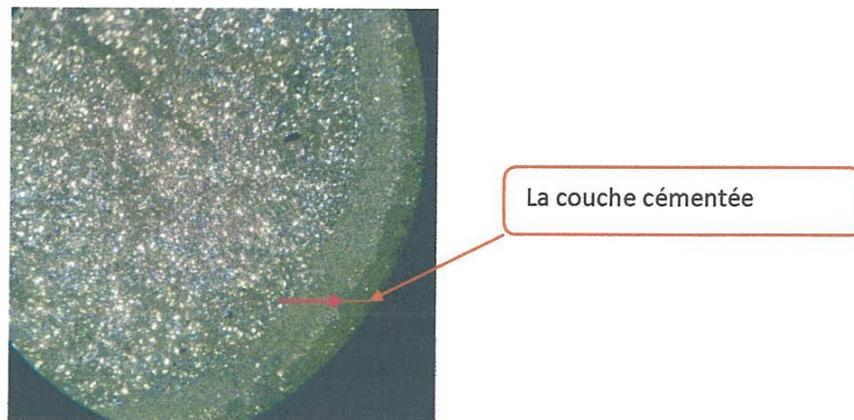


Figure II-6. Epaisseur se la couche cémentée

La couche de carbone a été observée et mesurée après avoir coupé la pièce en deux parties à l'aide d'un microscope optique, l'épaisseur observée est d'environ 0.8 mm.

II. Les essais mécaniques

Après avoir apporté des modifications sur les propriétés des aciers étudiés nous avons procédé à des caractérisations mécaniques pour mesurer les modifications pour les deux aciers 16MnCr5 et 100Cr6.

II-1. Essais de dureté (H)

Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Mais il faut bien noter que la dureté n'est pas une propriété simple des matériaux métalliques. La dureté caractérise la résistance à la déformation et les valeurs obtenues montrent

certaines classements, cependant le processus opératoire doit être très précis pour assurer la reproductibilité et la fidélité des résultats, c'est qui explique le grand nombre de normes dans ce domaine, pour les essais proprement dits. Les machines d'essais et les étalons.

La dureté est la résistance qu'un matériau oppose à la pénétration d'un corps dur le principe d'un essai de dureté est expliquée comme suit :

- une charge est appliquée sur un pénétrateur (de forme variable suivant la méthode d'essai) qui détermine une empreinte dans la pièce. Suivant l'importance de cette empreinte, on en déduit la dureté.

❖ Essai Rockwell:

L'essai consiste à imprimer en deux temps dans la couche superficielle de la pièce à essayer, un pénétrateur de type normalisé (cône ou bille) et à mesurer l'accroissement ramenant de la profondeur de pénétration (Figure II-7).

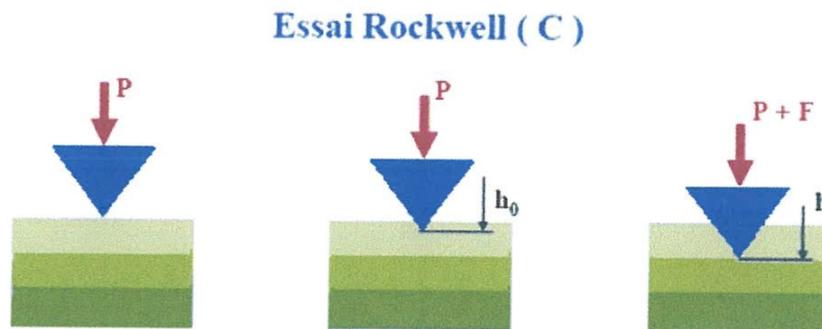


Figure II-7. Essai Rockwell (c)

L'essai se déroule en trois phases :

- Le pénétrateur est soit un cône en diamant (méthode Rockwell C)
- La force mise en jeu se décompose en une précharge P et une charge F;
- On mesure la profondeur d'empreinte rémanente lorsque la charge F est retirée (mais en maintenant la précharge P), la zéro profondeur étant prise en fin de précharge.

Les essais de dureté Rockwell sont effectués sur des échantillons non traités et traités pour les deux aciers 16MnCr5 et 100Cr6, à l'aide d'un appareil de dureté (WOLPERT), Les valeurs mesurées de la dureté sont rassemblées dans le tableau suivant :

| Les aciers | Dureté (HRC) |
|--------------------|--------------|
| 100Cr6 Non traité | 40 |
| 100Cr6 Trempé | 60 |
| 16MnCr5 Non traité | 27 |
| 16MnCr5 Cémenté | 63 |

Tableau II-3. Dureté des matériaux étudiés

D'après le tableau (II-3) la dureté de 16 MnCr5 cémenté augmente par rapport à celle de l'acier 100Cr6 trempé, on peut dire alors que les aciers traités superficiellement (cémentation) présentent une dureté superficielle élevée due à la formation de la martensite engendrent ainsi des contraintes de compression dans la zone superficielle de la pièce ce qui provoque un durcissement et l'acier devient plus résistant aux contraintes extérieure (frottement et l'usure).

Les traitements thermique et thermo-chimique augmentent la dureté et améliorent les propriétés mécaniques des aciers.

III. Essai de frottement et l'usure

L'optimisation des propriétés tribologiques des aciers étudiés est une voie de recherche importante, compte tenu de leur application potentielle dans le domaine de l'usinage ou de l'emboutissage. La dureté et ténacité semblent être a priori les caractéristiques principales des dépôts qu'il faut optimiser pour espérer améliorer leur tenue à l'usure.

Comme on l'a vu précédemment, il existe de nombreux types d'usure. Chacun de ces mécanismes se différencie par ses conditions d'apparition et par ses effets. Tous ont cependant en commun d'être difficiles à étudier de façon quantitative, car il faut pouvoir pour cela, distinguer ce qui est propre aux matériaux des corps en contact, de ce qui est propre aux aspects structures (exemples : leurs propriétés élastiques, plastiques, de fatigue, leur dureté).

Par ailleurs, les géométries de contact, donc les conditions aux limites, évoluent pendant le processus d'usure ce qui constitue une difficulté supplémentaire pour l'usure. Le frottement est lui-même très mal connu localement et microscopiquement car il évolue également pendant le processus d'usure, notamment à cause de la géométrie du contact, mais également en raison des débris formés.

Les essais de frottement et l'usure ont été réalisés sur deux nuances 16MnCr5 et 100Cr6, dont la dureté initiale est différente. Il nous semble intéressant d'identifier les différences

tribologiques qu'il peut exister entre deux nuances dont les seules différences résident dans la microstructure (taille et nombre des carbures, densité de dislocations).

La configuration type plan/plan a été utilisée, l'antagoniste étant un abrasif en carbure de Silicium SiC et le plan un échantillon en acier 100Cr6 ou 16MnCr5. Cette configuration a été utilisée pour obtenir une usure de toute la surface étudiée.

Lors du frottement de ces aciers, plusieurs phénomènes sont à prendre en considération, dont notamment la charge, la vitesse et l'antagoniste. Les essais de frottement plan/plan de deux antagonistes (échantillon, abrasif), ont été réalisés avec la variation de la charge, la vitesse et le diamètre de grain de l'abrasif dans un milieu lubrifié pour les aciers 16MnCr5 et 100Cr6 avant et après traitement, ce qui nous a permis de tracer les courbes de pertes en poids en fonction du temps.

Le but de notre travail est de faire une étude comparative du comportement en frottement et l'usure des aciers 100Cr6 et 16MnCr5 avant et après traitement.

Dans la suite, nous présentons les résultats de frottement sur chaque nuance en mettant en évidence l'influence de la vitesse de frottement, de la charge appliquée et les traitements.

III -1. Essais de frottement

▪ Conditions de travail

Les tests de frottement plan/plan (Figure II-8), ont été réalisés sur une polisseuse tournant à deux vitesses Soit ($V_1= 1,1$ m/s, $V_2= 2,2$ m/s), contre un abrasif à gros et fin grains en carbures de silicium (SiC) dans un milieu lubrifié à l'eau en circuit ouvert pendant huit heures de temps discontinues où, nous avons fait varier la charge ($P_1= 15$ N et $P_2= 17$ N) et la vitesse de frottement, nous signalons que la perte en poids est mesurée à des intervalles réguliers de deux heures.

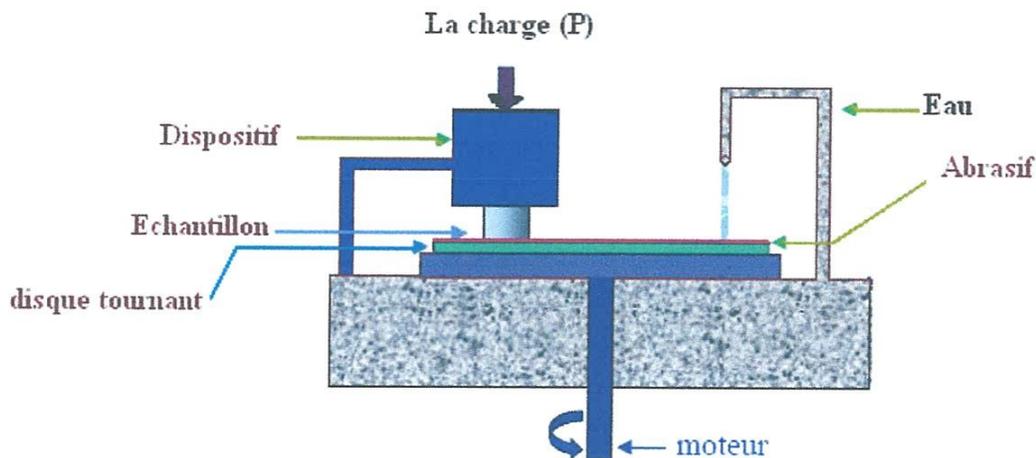


Figure II-8. Dispositif de frottement des surfaces planes.

III -2. Résultats et discussions

III -2-1. Couple 16MnCr5 non traité /SiC

Nous avons frotté des échantillons de 16MnCr5 non traité dans un milieu lubrifié à l'eau contre un abrasif à gros grains ($\phi 400$) où nous avons fait varier la charge et la vitesse.

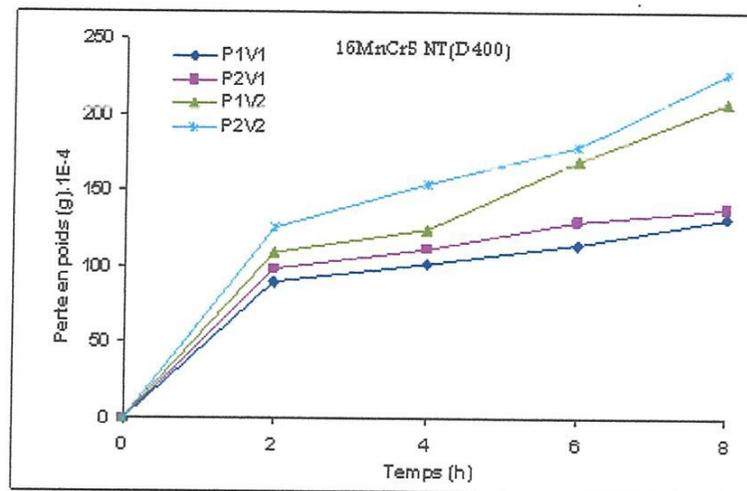


Figure II-9. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 non traité contre un abrasif $\phi 400$

Les résultats obtenus sur l'acier 16MnCr5 sont représentés sur la figure (II-9), où l'on peut observer l'évolution de la perte en poids en fonction du temps.

Sur cette figure, on constate une période transitoire au début de l'essai appelée période de rodage. Durant cette période, l'usure augmente considérablement, on peut considérer cette dernière comme une période de mise en conditions du système.

Sur la surface des échantillons, on constate que l'usure est croissante. Cette augmentation s'explique par l'accommodement des surfaces. L'évolution de la surface de contact se traduit par une usure importante dans les premiers instants associés à des allures de courbes différentes (Figure II-10).

Le taux d'usure est quasi constant entre les essais. On retrouve donc l'aspect transitoire du frottement. Ainsi, on note qu'en régime stabilisé, la cinétique d'usure est constante. Cela se traduit par une linéarité entre la durée de l'essai et l'endommagement par perte en poids.

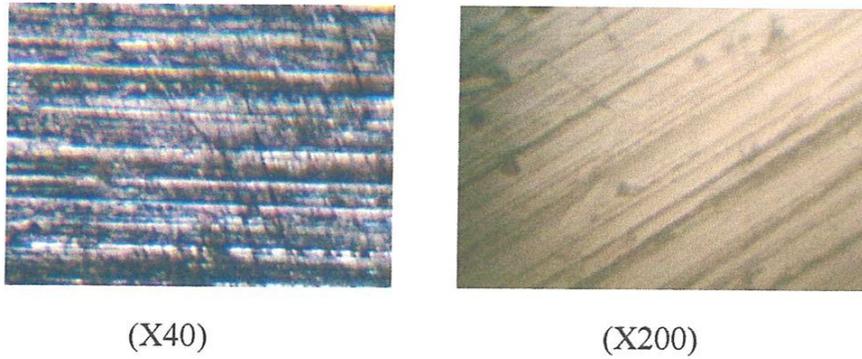


Figure II-10 .Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 non traité contre un abrasif $\phi 400$

L'observation par le microscope optique a permis de montrer que les triboparticules sont maintenues vraisemblablement sur la piste, en tant que particules adhérentes. Ce phénomène conduit au développement de couches compactes et consolidées, partiellement oxydées et ayant pour effet de réduire l'usure par enlèvement de matière (rôle protecteur). Quelques particules adhèrent sur le faciès de la surface de l'abrasif, mais la majorité des débris triboparticules adhèrent sur la piste de frottement de l'acier.

Pour pouvoir analyser ces débris la diffraction X permet de mettre en évidence la nature des oxydes formés à l'interface.

Dans d'autres conditions que le test précédent, l'évolution de la perte en poids en fonction du temps est représentée graphiquement (Figure II-11).

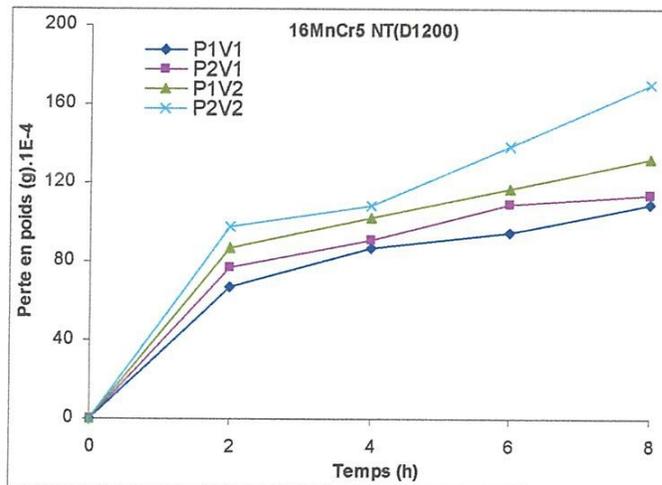
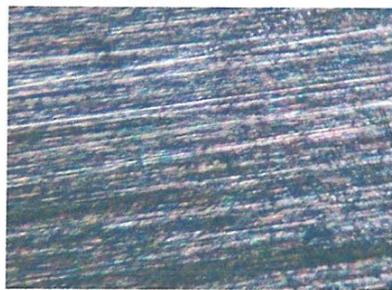


Figure II-11. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 non traité contre un abrasif $\phi 1200$

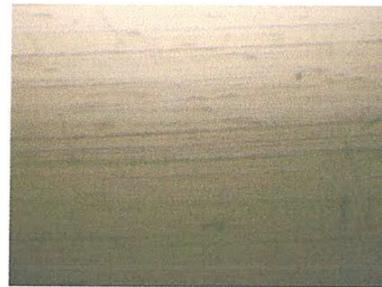
Dans le cas de l'acier 16MnCr5 non traité, frotté contre un abrasif ($\phi 1200$) nous constatons que le classement est conservé mais avec un taux d'usure moins élevé comparé à celui des gros grains et, que la perte en poids pour les conditions sévères est relativement importante par rapport aux autres essais.

Après avoir effectué des essais de frottement sous différentes charges, le comportement tribologique montre que dans la première partie (Figure II-11) sous faible charge, le volume usé est sensiblement proportionnel à la charge, l'accroissement de charge se traduit par un surcroît d'usure et probablement par un accroissement du nombre de points de contact.

L'observation des surface de l'acier pour 16MnCr5 non traité (figure II-12) frotté sous les faibles conditions montre une faible dégradation de l'état de surface et l'apparition de petites rayures comparable à un labourage. Ceci est expliqué par l'oxydation des particules métalliques, arrachées dans la surface de contact, qui s'agglomèrent sous forme de couches compactes et protectrices sur l'acier 16MnCr5 non traité, contribuant à une importante réduction de l'usure.



(X40)



(X200)

Figure II-12. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 non traité contre un abrasif $\phi 1200$

Les essais de frottement sous différentes charges et différentes vitesses ont permis de caractériser l'usure et la perte en poids. Deux régimes d'usure distincts successifs semblent exister. Le premier est caractérisé par une faible augmentation de l'usure, ce régime est observé dans les faibles conditions. Le second régime est caractérisé par une perte en poids plus importante lorsque la charge et la vitesse augmentent, on remarque que le taux d'usure augmente d'une façon considérable.

III -2-2. Couple 16MnCr5 cémenté /SiC

Ces essais ont été réalisés dans les mêmes conditions précédentes mais cette fois-ci sur l'acier 16MnCr5 cémenté pour pouvoir déterminer l'influence du traitement thermochimique sur le comportement tribologique de cet acier.

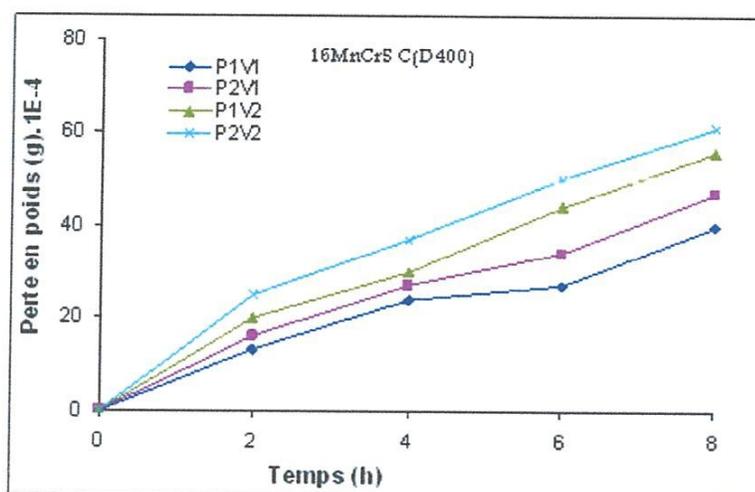


Figure II-13. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 cémenté contre un abrasif $\phi 400$

Les résultats obtenus (Figure II-13) montrent que le classement est toujours conservé et les conditions sévères semblent augmenter l'usure. Mais l'usure relevée sur les échantillons cimentés est très faible par rapport aux échantillons non traités.

L'effet de la cémentation a apporté une nette amélioration de la résistance à l'usure, nous nous sommes placés dans les conditions les plus dégradantes pour l'acier 16MnCr5 cémenté afin d'avoir une base comparative. Ces essais sur des échantillons cimentés ne produisant pas de dégradations suffisantes de l'échantillon.

L'observation au microscope optique, dans les conditions sévères (Figure II-14) montre que la zone usée est moins importante sur les échantillons cimentés que sur les échantillons non traités. Durant cet essai les particules arrachées et les débris près localisés n'arrivent pas à former un transfert stable ce qui laisse la surface sans protection.

faibles quantités de particules. Ce régime de travail fait apparaître de petits sillons serrés les uns aux autres et les débris arrachés se matent et restent piégés entre les surfaces en contact et offre une protection à l'échantillon.

La grande dureté superficielle engendrée par le traitement thermo-chimique de l'acier explique bien ce comportement.

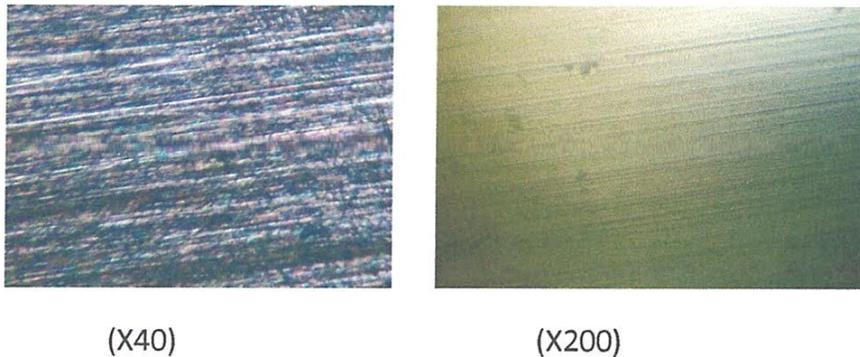


Figure II-16. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 cémenté contre un abrasif $\phi 1200$

L'effet de la cémentation apporte une nette amélioration de la résistance à l'usure, c'est la couche cémentée durcie qui résiste à l'usure ; de ce fait, il est nécessaire que l'épaisseur de traitement soit supérieure à l'épaisseur d'usure. En ce qui concerne la constitution de la couche cémentée, on notera que la décarburation et l'oxydation interne ont une action défavorable sur la résistance à l'usure.

III -2-3 .Couple 100Cr6 non traité /SiC

Afin de compléter les banques de données sur le frottement, il nous semble intéressant d'identifier les différences tribologiques qui peuvent exister entre deux nuances dont les seules différences résident dans la microstructure. Ce paragraphe est consacré à la présentation des résultats obtenus lors des essais du 100Cr6. Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à caractériser le comportement en frottement du 100Cr6 en fonction du temps d'essai. Par la suite, nous avons étudié les effets d'un traitement thermique sur le frottement et l'usure d'acier 100Cr6.

Nous rappelons que les essais de frottements de l'acier 100Cr6 non traité ont été réalisés dans les mêmes conditions que l'acier 16MnCr5.

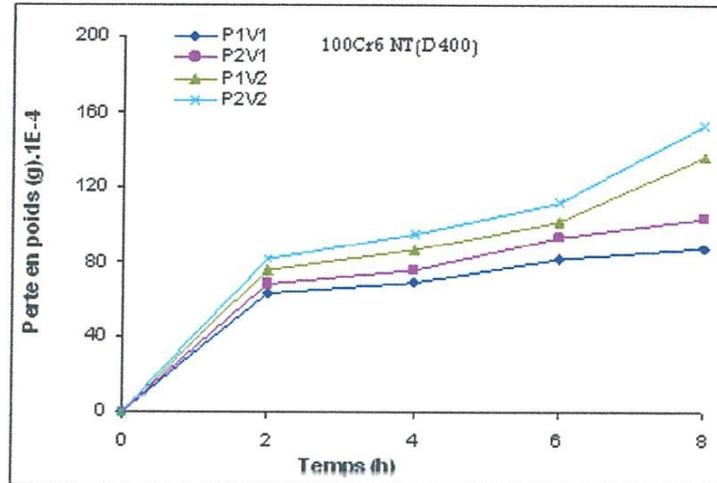
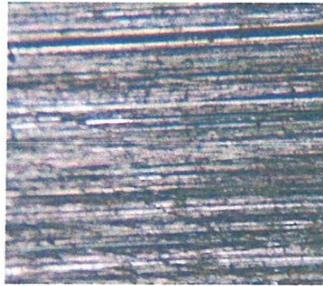


Figure II-17. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité contre un abrasif $\phi 400$

Les courbes ci-dessus montrent que la perte en poids mesurée au début des essais se traduit par une augmentation de la surface de contact (Figure II-17), cette période appelée période de rodage. Au-delà, l'usure commence progressivement pour arriver à une dégradation de plus en plus sévère dépendant des conditions de frottement.

On remarque que le classement est conservé quelle que soit la charge et la vitesse imposées est que les conditions sévères conduisent à une usure plus élevée, on observe que la perte en poids de 100Cr6 non traité est faible à celle obtenue à 16MnCr5 non traité (figure II -9).

L'examen des surfaces par microscopie optique montre un recouvrement progressif de l'entrée du contact par des couches de débris et d'oxydes, où les débris s'accumulent, vers la sortie du contact (figure II-18). Ces derniers n'arrivent pas à former un transfert stable car ils sont chassés à l'extérieur de la surface de contact, donc il n'y a pas de film protecteur, d'où une augmentation progressive de l'usure avec l'augmentation de la charge et la vitesse est enregistrée.



(X40)

Figure II-18. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans contre un abrasif $\phi 400$

Toujours dans un milieu lubrifié dans les mêmes conditions mais contre un abrasif à fins grains ($\phi 1200$) les résultats de frottement de l'acier 100Cr6 obtenus sont illustrés sur la figure (II-19).

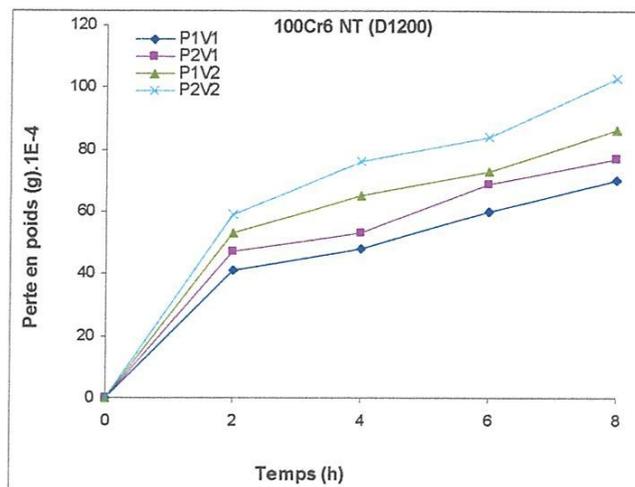


Figure II-19. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité contre un abrasif $\phi 1200$

Nous constatons que l'évolution des courbes est semblable à celle des essais effectués auparavant mais avec une perte en poids moins importante.

Pour des faibles conditions d'essais (Figure II-20) pour l'acier 100Cr6 non traité, on remarque que dans la zone de contact, des petites rayures apparaissent en surface et une accumulation des petites particules et débris qui viennent s'installer dans les rayures et sur les hauteurs des aspérités formant ainsi une couche protectrice qui peut être considéré comme un troisième corps.

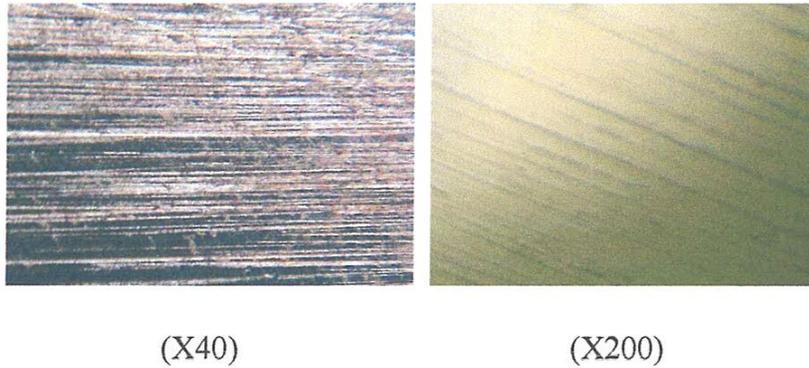


Figure II-20. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans contre un abrasif $\phi 1200$

Le comportement tribologique de l'acier 100Cr6 non traité dans les mêmes conditions mais avec un grain abrasif plus fin montre que la perte en poids est moins importante que celle dans le gros grain, ceci prouve que la taille de grain d'abrasif influe considérablement sur le taux de l'usure.

III -2-4. Couple 100Cr6 trempé /SiC

Cette fois-ci les échantillons en acier 100Cr6, ont été trempés à l'huile et frotté dans les mêmes conditions que celles de l'acier non traité contre des abrasifs à gros et fins grains ($\phi 400$ et $\phi 1200$). Ces essais ont été réalisés pour pouvoir déterminer l'influence du traitement thermique.

Les tests de frottement réalisés sur le 100Cr6 trempé contre un abrasif à gros grains ($\phi 400$) (Figure II-21), ont montré que le classement est conservé mais avec une nette différence par rapport à l'acier non traité.

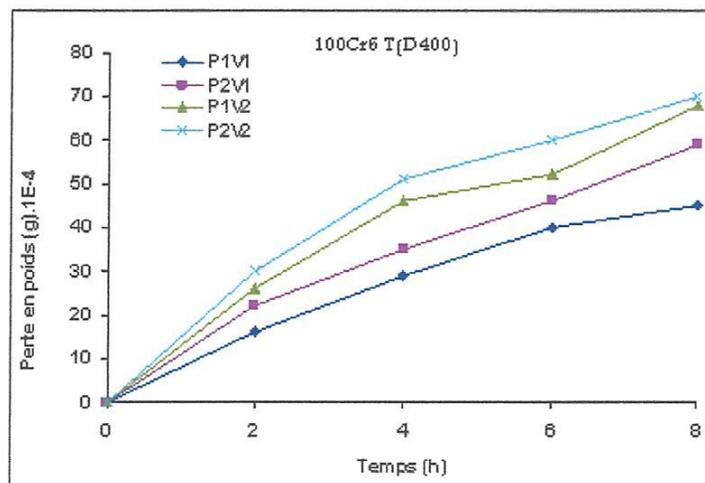
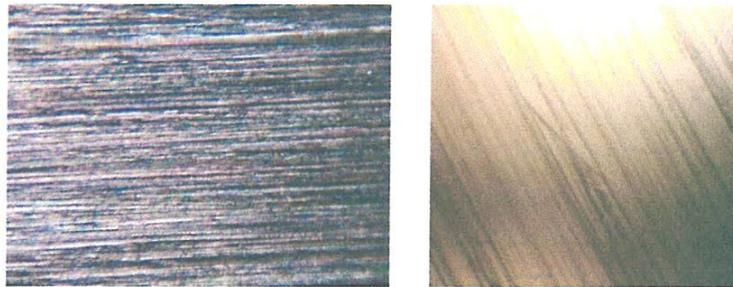


Figure II-21. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé contre un abrasif $\phi 400$

Le comportement tribologique de l'acier trempé est nettement différent car on remarque une dégradation moins accélérée par rapport à l'acier non traité, ceci est dû à l'influence du traitement thermique qui a engendré une dureté plus grande.

Le microscope optique montre dans les conditions sévères pour 100Cr6 trempé (Figure II-22) de petites traces d'usure sur la surface de l'échantillon qui deviennent importantes avec le temps, et la présence des particules et débris qui n'arrivent pas à se stabiliser dans le contact, donc ces derniers n'arrivent pas à établir une barrière efficace entre les deux surfaces frottantes.



(X40)

(X200)

Figure II-22. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 trempé dans des contre un abrasif $\phi 400$

Quand l'antagoniste est un abrasif plus fin ($\phi 1200$), les courbes d'usure ont une allure identique, autrement dit un régime long durant les premières heures de l'essai suivi d'une légère augmentation du taux d'usure ce qui correspond à un régime de frottement moins sévère (Figure II-23).

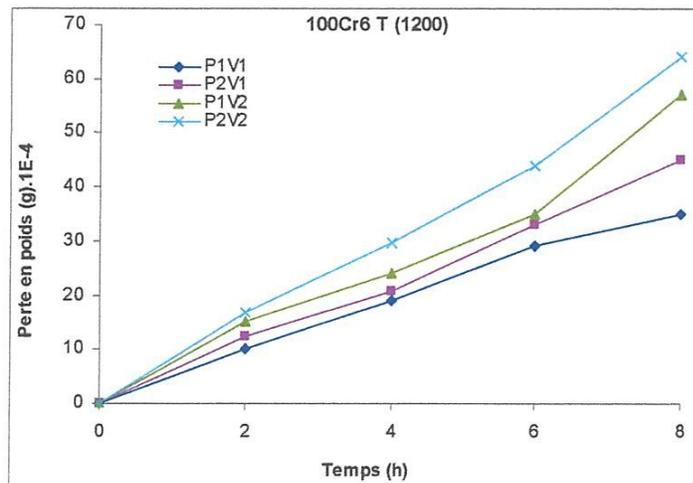


Figure II-23. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé contre un abrasif $\phi 1200$

Pour les faibles conditions (P1 et V1), la courbe s'infléchit vers un volume d'usure faible mais la perte en poids reste toujours plus élevée que dans l'acier non traité que l'acier traité. On remarque que le taux d'usure de 100Cr6 non traité à fins grains représente une perte en poids plus élevée que 100Cr6 trempé dans les mêmes conditions, ceci prouve que la trempe a apportée une amélioration très nette dans les caractéristique mécanique de l'acier étudié et son comportement tribologique.

La caractérisation par microscope optique de l'acier 100Cr6 trempé dans les faibles conditions (Figure II-24) montre une usure moins sévère caractérisée par des petites rayures orientées suivant le sens de mouvement gouvernées par la présence des particules compactées et piégées dans le contact. Ces derniers peuvent être un écran de protection.



(X40)



(X200)

Figure II-24. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 trempé dans contre un abrasif $\phi 1200$

L'observation microscopique des échantillons montre que l'écoulement de la matière change en augmentant l'effort normal. A 17 N, le l'acier comprime la matière et l'oblige à s'écouler vers les cotés ce qui facilite son déplacement. Au contraire pour un faible effort normal, la matière passe d'avantage au-dessous de l'échantillon. Ce phénomène peut être expliqué aussi par l'effet de l'écrouissage de la pièce qui empêche le phénomène d'adhésion pour les hautes valeurs d'efforts.

III -2-5. Etude comparative

Il est évident de faire une étude comparative pour chaque matériau étudié, afin de faire le bon choix du matériau qui résiste convenablement à l'usure et qui se comporte bien en frottement. Cette comparaison a été faite à partir des résultats obtenus pour des tests de frottement réalisés afin de faire un classement des aciers selon leur utilisation dans tel ou tel domaine.

Afin de mieux comprendre l'influence des paramètres la charge, la vitesse et la taille du grain de l'abrasif, nous présentons des commentaires sur l'ensemble des tests effectués.

Les tests de frottement réalisés contre des abrasifs à gros grains sont représentés sur la figure (II-25) avec abrasif $\phi 400$, la charge P1 et la vitesse V1 .

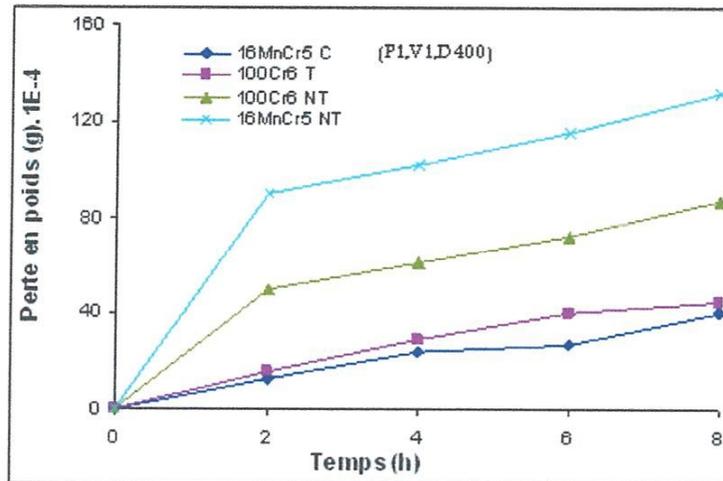


Figure II-25. Perte en poids en fonction du temps

(P1, V1, contre un abrasif $\phi 400$)

Cette figure représente la perte en poids des aciers non traités et traités dans les faibles conditions. On remarque un bon comportement en frottement de l'acier 16MnCr5 cémenté avec une dégradation proportionnelle à la taille des grains, suivi de l'acier 100Cr6 trempé et 100Cr6 non traité et en dernier lieu l'acier 16MnCr5 non traité avec un taux d'usure très élevé.

Nous constatons que les propriétés tribologiques de 100Cr6 non traité sont bien supérieures à celles de 16MnCr5 non traité, les traitements thermiques et thermochimiques ont apporté une amélioration significative de la résistance à l'usure mais la cémentation l'emporte par rapport à la trempe ceci est due à succession de couches de carbone qui donne une grande dureté superficielle à l'acier cémenté et le rend plus résistant en surface et au test tribologique.

Les courbes donnant la perte en poids en fonction du temps des aciers pour les grandes charges sont illustrées sur la figure (II-26).

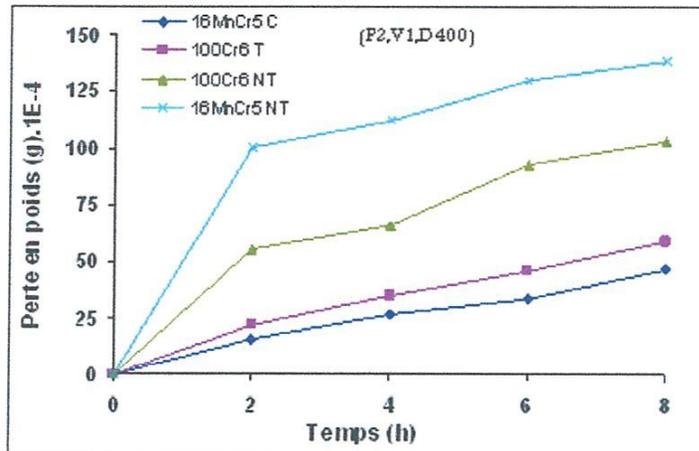


Figure II-26. Perte en poids en fonction du temps
(P2, V1, contre un abrasif $\phi 400$)

L'évolution des courbes enregistrées au cours d'essais montre bien que le comportement est identique et que le classement est toujours conservé, mais avec une augmentation significative de la perte en poids due à l'augmentation de la charge appliquée. La bonne résistance à l'usure de l'acier cémenté et l'acier trempé est nettement enregistrée.

Cette étude comparative montre l'influence de la variation de la charge sur le comportement tribologique des aciers testés. L'augmentation de la charge engendre une augmentation de la perte en poids

Pour une augmentation de la vitesse de frottement (Figure II-27), les résultats obtenus montrent que le classement est toujours conservé.

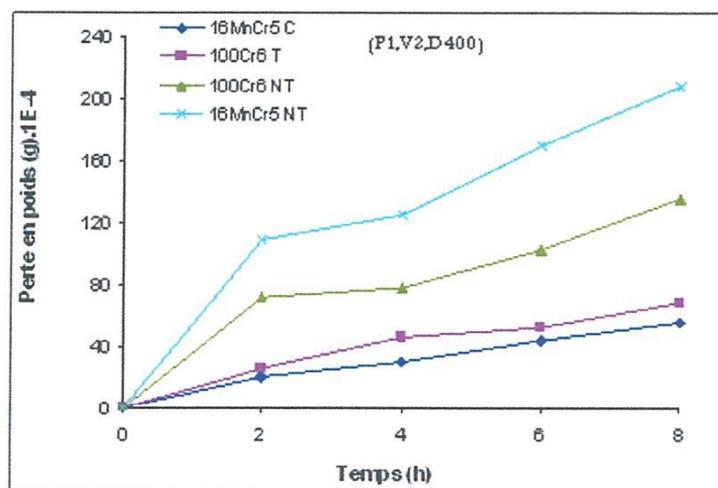


Figure II-27. Perte en poids en fonction du temps
(P1, V2, contre un abrasif $\phi 400$)

Dans les deux cas les aciers non traités sont caractérisés par une perte en poids considérable par contre les aciers traités (cémenté, trempe) présentent une faible dégradation du taux d'usure. La figure (II-27) (P1, V2) montre bien que le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse par rapport à la figure (II-25) (p1, v1) mais avec un taux d'usure variable pour chaque type acier.

On dit alors que la vitesse joue un rôle important dans le comportement tribologique des aciers étudiés.

Toujours dans un milieu lubrifié, mais contre un abrasif à gros grains ($\phi 400$), nous avons fait varier cette fois-ci la vitesse et la charge (Figure II-28).

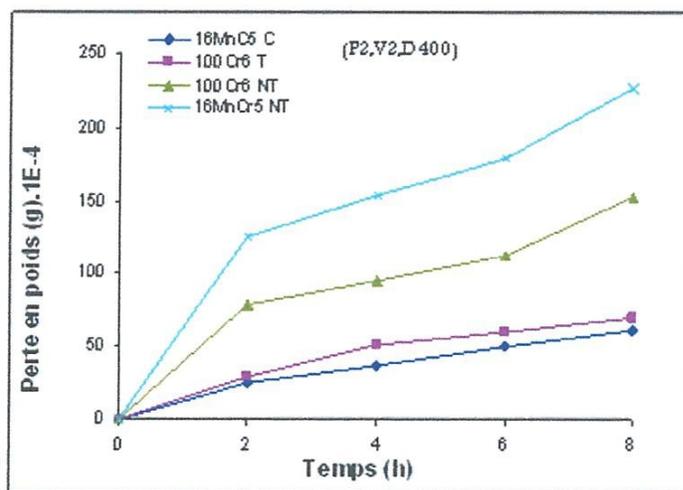


Figure II-28. Perte en poids en fonction du temps (P2, V2, contre un abrasif $\phi 400$)

Les tests tribologiques effectués sur ces aciers avec des charges P2 et des vitesses V2, montrent bien que le comportement est quasiment le même. Le bon comportement est enregistré pour l'acier cémenté suivi de l'acier trempé avec un faible écart et, en dernier lieu les deux aciers non traités par une perte en poids très raide jusqu'à la fin de l'essai.

En conclusion, les conditions sévères font augmenter l'usure : plus la charge et la vitesse augmentent plus le taux d'usure augmente.

Dans ce qui suit, nous allons représenter les courbes donnant la perte en poids en fonction du temps des aciers frottant cette fois-ci contre un abrasif plus fin ($\phi 1200$).

Sur la figure (II-29), il a été enregistré les mêmes l'allure des courbes : le bon comportement est signalé pour l'acier cémenté suivi de l'acier trempé avec une légère dégradation.

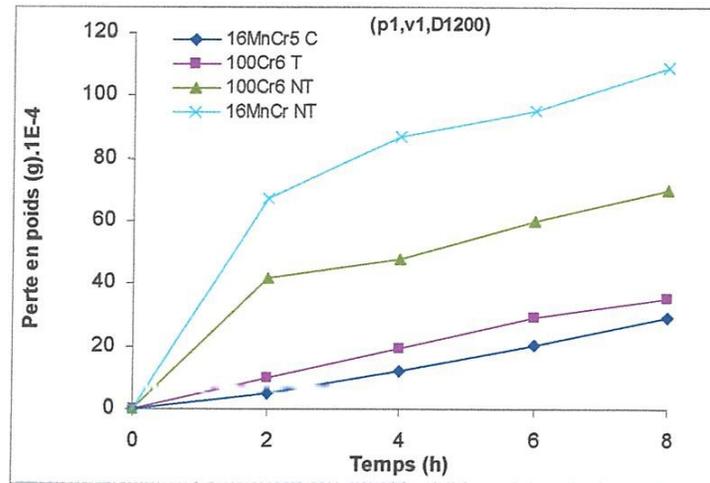


Figure II-29 Perte en poids en fonction du temps (P1, V1, contre un abrasif $\phi 1200$)

Sur la figure (II-29), il a été enregistré les mêmes l'allure des courbes : le bon comportement est signalé pour l'acier cémenté suivi de l'acier trempé avec une légère dégradation. Les traitements thermiques et thermochimiques, engendrent une amélioration du comportement tribologique. Les deux aciers non traités montrent bien l'effet apporté par les traitements.

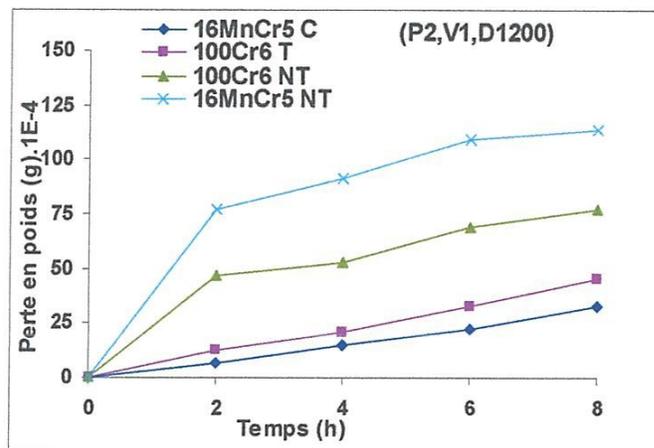


Figure II-30. Perte en poids en fonction du temps (P2, V1, contre un abrasif $\phi 1200$)

En augmentant cette fois-ci la charge (Figure II-30), le classement est conservé avec une dégradation plus élevée, le taux d'usure s'accroît avec l'augmentation de la charge et les deux aciers non traités se comportent de plus en plus mal.

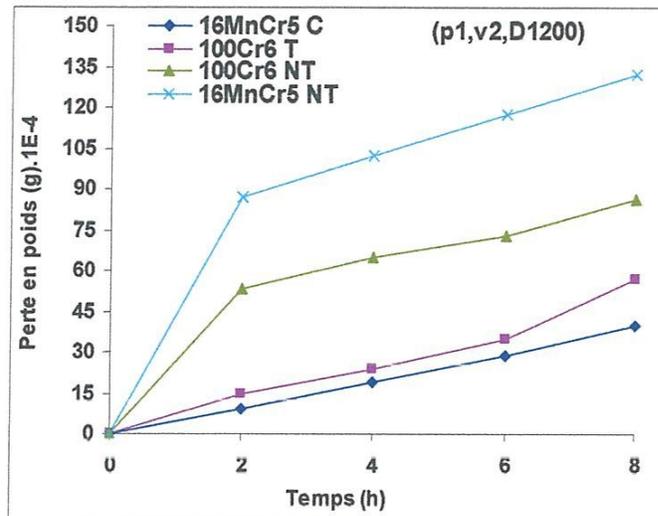


Figure II-31. Perte en poids en fonction du temps (P1, V2, contre un abrasif $\phi 1200$)

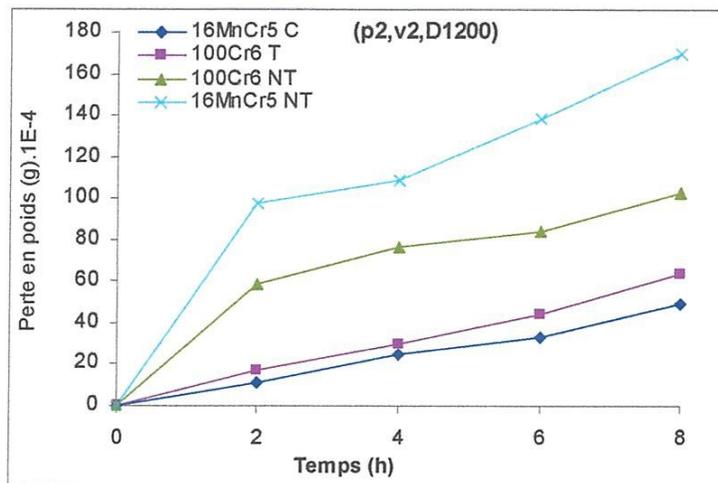


Figure II-32. Perte en poids en fonction du temps (P2, V2, contre un abrasif $\phi 1200$)

La comparaison des figures (II-31, II-32) montre bien la conservation du classement des courbes d'usure pour des conditions sévères (p_2 ; v_2) l'usure est considérable, ceci nous conduit à dire que dans les conditions les plus sévères et quelle que soit la taille de grain de l'abrasif, la perte en poids augmente avec l'augmentation de la charge et la vitesse.

L'acier 16MnCr5 cémenté, conserve toujours son classement comme l'acier le plus résistant à l'usure cela dans toutes les conditions et jusqu'à la fin de l'essai, suivi de l'acier 100Cr6 trempé avec un faible écart, vient ensuite l'acier 100Cr6 non traité et l'acier 16MnCr5 non traité, ce dernier marque un grand écart par rapport aux autres.

A la fin nous avons conclu que l'usure augmente avec l'augmentation de la taille de l'abrasif.

IV. Mécanismes d'usure des surfaces

La dégradation des aciers 16MnCr5 et 100Cr6 résulte de trois altérations :

1. Un mécanisme de polissage, un deuxième d'abrasion et un troisième d'arrachement des grains, dont ce dernier est prépondérant. Le premier mécanisme est caractérisé par la présence de particules abrasives de faibles dimensions. Ce mécanisme est le moins dégradant et le moins important.
2. Le second se manifeste par un enlèvement important de matière où la surface d'usure présente un aspect lisse.
3. Le troisième mécanisme c'est Le mécanisme d'arrachement des grains qui correspond au détachement des débris d'usure de grandes dimensions sous l'effet des contraintes de cisaillement comme le suggèrent les taux élevés d'usure.

Ce phénomène affaiblit localement la structure du matériau, les grains commencent à se séparer et par conséquent à être arrachés.

Donc, nous avons vu que ces mécanismes ne sont pas spécifiques à chaque matériau, mais qu'ils surviennent en fonction du niveau de sollicitation des surfaces.

V. Influence des paramètres tribologiques

L'étude que nous avons entreprise sur le frottement des deux aciers, nous a conduit à mieux comprendre le comportement en frottement et à l'usure de différents matériaux, ainsi que l'influence de différents paramètres.

1. Influence de la charge appliquée

L'influence des charges normales appliquées (P1 et P2) sur les différents matériaux étudiés, nous a conduit à la conclusion suivante :

A partir des courbes de frottement, on note que la dégradation est moindre pour les faibles charges. Ce régime est caractérisé par la présence de traces d'usure sur la zone de frottement avec quelques débris d'usure dans le contact.

Pour les charges élevées, on remarque l'existence d'un régime d'usure accéléré avec un arrachement important de particules qui n'arrivent pas à former un écran stable pour séparer et protéger les surfaces en frottement. Ces particules sont éliminées rapidement du contact et sont éjectées à l'extérieur, ce qui entraîne une usure encore plus sévère, ceci est confirmé par les

courbes d'usure sur les deux matériaux que nous avons testé. L'augmentation de la charge engendre une usure importante.

2. Influence de la vitesse de frottement

Afin de mettre en évidence l'influence de la vitesse de frottement sur la dégradation des aciers étudiés, nous avons montré que nous sommes en présence de deux régimes caractérisés par :

- Une dégradation plus faible (usure douce). Ceci est exprimé par la présence des débris d'usure dans le contact puisque les transferts ne sont pas évacués à l'extérieur, ce qui entraîne d'une part une séparation partielle ou totale des surfaces frottantes.

D'autre part, il s'établit une portance dominant l'interaction entre les deux corps et par conséquent diminuer l'usure. A partir des observations visuelles, on note que l'usure est gouvernée par la formation et le maintien du troisième corps.

- Pour le deuxième régime, où les vitesses, sont élevées, on constate une usure considérable presque pour tous les matériaux, mais des valeurs variables.

En revanche, l'effet de la vitesse diminue pour les hautes pressions. De plus, nous pouvons conclure d'après ces résultats qu'il y a une valeur de pression au-delà de laquelle la pression n'aura pas d'influence sur le frottement. Ce phénomène pourra être expliqué par l'augmentation de la température de contact qui permet en premier temps l'adoucissement thermique de la pièce, à partir d'un certain seuil, causant ainsi la diminution de l'effet de la déformation plastique de la pièce.

L'étude des paramètres influençant l'usure a permis de montrer que la charge appliquée et la vitesse de frottement ont un effet prédominant.

3. Influence de la taille de l'abrasif

Au cours de cette étude, les essais de frottement ont été menés sous deux tailles différentes d'abrasifs (gros et fins grains). Il nous est cependant apparu qu'en ce qui concerne la taille des grains d'abrasif, l'usure est d'autant faible que ces derniers sont plus fins, c'est-à-dire que la grosseur des grains a une influence significative sur la dégradation des surfaces frottantes.

VI. Comportement et rôle du troisième corps

Nous avons vu que la destruction de l'écran entraîne la formation des débris d'usure qui se déposent nécessairement dans l'espace confiné qui définit le contact.

Sous l'effet des sollicitations, une partie des débris d'usure est éjectée hors du contact, ce qui empêche la séparation des surfaces frottantes et par conséquent une importante dégradation de

ces dernières. A terme ce n'est pas une seule particule qui est formée dans le contact, mais plusieurs qui peuvent aller jusqu'à la constitution d'un lit de débris qui forme encore un écran dynamique et entraîne la séparation des surfaces.

Ce pendant, les particules piégées à l'intérieur subissent des variations de taille et de composition à cause des transformations mécaniques et physico-chimiques. A cet effet, ces débris possèdent des propriétés différentes de celles des antagonistes sous l'effet combiné du milieu ambiant et de l'énergie dissipée. Une partie des particules piégées s'oxyde en formant un film intercalaire appelé troisième corps ; qui sépare les surfaces frottantes, et par conséquent assure leur protection en diminuant les interactions.

Le troisième corps peut jouer le rôle protecteur ou destructeur, lorsqu'il est protecteur, il se traduit sur les courbes de frottement par un ralentissement du taux d'usure caractérisé par des allures moins ascendantes (pendant la deuxième période de frottement).

Il est destructeur, lorsque les courbes se manifestent par des allures plus ascendantes avec des pentes plus raides : Comme, nos essais de frottement ont été effectués sous une lubrification continue, une rapide élimination des débris formés au niveau du contact ainsi on supprime leur rôle protecteur, ce qui conduit à une dégradation très importante des surfaces. La présence donc, d'un film protecteur de lubrifiant et l'élimination des débris ont abouti à une réorganisation complète de classement des matériaux étudiés vis-à-vis leur résistance à l'usure

CONCLUSION GENERALE

Le frottement d'un matériau est un processus complexe, étroitement lié aux facteurs mécaniques, thermiques et physico-chimiques. Le frottement dépend beaucoup plus des propriétés des couches superficielles que des propriétés volumiques du corps considéré. L'usure est un phénomène évolutif et irréversible.

Les résultats obtenus nous ont conduit aux conclusions suivantes :

Le comportement tribologique n'est qu'une propriété du matériau, mais une réponse du système (charge, géométrie de contact, vitesse, lubrifiant, température... etc)

L'usure augmente au fur et à mesure que le temps augmente. L'augmentation de la charge et de la vitesse provoque une usure considérable. L'usure augmente avec la grosseur du grain de l'abrasif.

Le comportement tribologique d'un matériau dépend du film intercalaire engendré pendant le frottement (3^{ème} corps) et que la dégradation des surfaces dépend du comportement purement mécanique des couches superficielles.

Les traitements superficiels augmentent la résistance à l'usure c'est à dire l'amélioration des propriétés intrinsèques.

L'étude comparative des comportements tribologiques de divers aciers aboutit aux conclusions suivantes :

- le frottement du 16MnCr5 cémenté, est réduit de manière appréciable, et la résistance à l'usure est considérablement renforcée,
- le renforcement de la résistance à l'usure est attribuable à la présence de phases très dures, qui sont les carbures métalliques, apportés par la cémentation.

Les résultats obtenus lors du frottement des aciers ont montré que la diminution de l'usure est gouvernée essentiellement par l'augmentation de la vitesse de frottement.

L'analyse des mécanismes de dégradation des aciers testés a permis de mettre en relation les endommagements causés par le frottement : principalement l'usure abrasive et la déformation plastique des couches superficielles.

Les caractéristiques des endommagements observées sur la piste de frottement des aciers et sur leur faciès de frottement suggèrent que, dans la majorité des cas, l'usure s'effectue simultanément par adhésion et abrasion.

Cette étude a mis en évidence l'influence de la vitesse de frottement, de la charge de contact, du type de traitement et la taille de l'abrasif.

CONCLUSION GENERALE

En revanche, il est difficile de tirer des conclusions sur des phénomènes locaux qui représentent l'interaction tribologique entre l'abrasif et la pièce à partir d'une simple analyse macroscopique

La microstructure et la rhéologie des transformations tribologiques de surface sont encore mal connues aujourd'hui. Il serait intéressant de mener des analyses microstructurales au microscope électronique à balayage et en transmission dans les zones déformées afin de déterminer l'évolution de la densité de dislocations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1].**F.P.BOWDEN , D.TABOR**,«Friction and Lubrification of solids» Clarendon press, Oxfort, (1956).
- [2] **ETCHEVERRY Bernard**. «Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites NiP – Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite.».Thèse docteur, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE. Soutenue. (2006)
- [3]. **J.J GAUBET** «Théorie et pratique industrielle du frottement » .Mécanique des surfaces, collection dirigée par R . coutel . Technip /DUNOD,paris 1964.
- [4].**Olivier BARRAU**«étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud» thèse docteur. Toulouse. Genie des matériaux. (2000).
- [5] **AOUICI SAMIA**. (comportement en frottement et a l'usure des aciers traites superficiellement et des céramiques technique) thèse de magister en cnstruction mécanique . (1999).
- [6] **J AYEL**, Revue de l'institut français du pétrole. Frottement et usure des matériaux et composes réfractaires 1413 – 1446,1968.
- [7]. **M .GODET**«The third body approach: a mechanical view of wear». Wear100, (1984), 432-452.
- [8].**J.A.PETIT, E.PAPA et D.PLAY**, «formation des troisièmes corps à haute température : identification et comportement ». Eurotrib 85, éd « Soc .fr .de Tribologie » . Elsevier, SEC 5.1.9,(tome II), (1985).
- [9].**D. PLAY**. «Portance et transport de troisièmes corps en frottement sec Thèse de docteur és-sciences INSA-LYON. (1979)

-[10].**Y. BERTIER**, «Effet du comportement du troisième corps sur l'usure des paliers en mouvements alternatifs ».Thèse DOCTEUR Ingénieur, INSA-Lyon. (1982).

-[11].**J.DENAPE**, «Comportement Mécanique en frottement et Usure à température ambiante de Céramique à usage thermomécanique».

Thèse de docteur d'Etat, ENSM paris (1986).

BIBLIOGRAPHIE