

7/1531.602
600

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



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Master :

Conception et Production Industrielle

Présenté par :

BOUTOUIL BILEL

Thème



=====

***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 2010/2011

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer à mon rapporteur Monsieur **BELBAH AHMED** mes vifs remerciements et ma profonde gratitude pour son aide précieux , sa patience et ses conseils judicieux qu'il n'a pas cessé de me fournir tout le long de l'élaboration de ce travail. Sans oubliés **Melle** MEBARKI Nadia.

Ce travail doit beaucoup aux personnes de l'équipe technique pour qui j'ai la plus grande estime, notamment **Addallah GUENDOZ** qui m'a été d'une aide précieuse respectivement pour les observations métallographiques et les essais.

Enfin, je ne saurais oublier tous ceux qui, par leur affection et amour, m'ont aidés et encouragé au cours de la réalisation de ce modeste travail.



SOMMAIRE



INTRODUCTION GENERALE.....	5-
CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I- LA TRIBOLOGIE	
I -1. Introduction.....	-7-
II - FROTTEMENT ET USURE.....	8-
II-1.FROTTEMENT	8-
II-1-1. Introduction	-8-
II-1-2 Les facteurs influençant sur le frottement.....	-9-
II-1-2-1. Le coefficient de frottement.....	-9-
II-1-2-2. La force normale.....	-9-
II-1-2-3. La grandeur des surfaces de contact... ..	-9-
II-1-3- 1. Le frottement sec en régime statique	- 10-
II-2. L'USURE.....	-11-
II-2-1. Introduction.....	-11-
II-2-2. Mécanismes de l'usure	-11-
II-2-3 .Les principaux modes d'usure	-12-
1-L'usure adhésive	-12-
2-L'usure abrasive.....	-13-
3- L'usure par fatigue.....	-13-
4-L'usure par érosion	-14-
II-2-4. Le concept de troisième corps	-14-

CHAPITRE II

ETUDE EXPERIMENTALE

I. Introduction	-17-
I-1. Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales utilisées.....	-17-
I-2. Préparation des échantillons.....	-17-
I-2-1. Aciers étudiés.....	-17-
I-2-2. Compositions chimiques.....	-18-
I-3. Conditions de travail.....	-18-
I-3-1. Traitements des aciers.....	-18-
I-3-1-1. Traitement thermique.....	-20-
a) la trempe.....	-20-
a-1) Condition de l'essai de trempe.....	-20-
b) Cycle de revenu.....	-22-
I-3-1-2. Traitement thermo-chimique	-23-
a) La cémentation.....	-23-
b) Cycle de cémentation.....	-24-
II- les essais mécaniques.....	-26-
II-1. Essais de dureté.....	-26-
*essais Rockwell.....	-26-
III. Essai de frottement et l'usure	-28-
III -1. Essais de frottement	-29-
III -2. Résultats et discussions.....	-30-
III -2-1. Couple 16MnCr5 non traité /SiC.....	-30-
III -2-2. Couple 16MnCr5 cémenté /SiC.....	-33-
III -2-3 .Couple 100Cr6 non traité /SiC.....	-36-
III -2-4. Couple 100Cr6 trempé /SiC.....	-39-
III -2-5. Etude comparative.....	-42-
V. Mécanismes d'usure des surfaces	-49-
V-1. Influence des paramètres tribologiques.....	-50-

V-1-1. Influence de la charge appliquée.....	-50-
V-2-2. Influence de la vitesse de frottement.....	-50-
V-3-3. Influence de la taille de l'abrasif.....	-51-
VI. Comportement et rôle du troisième corps.....	-51-
CONCLUSION GENERALE	-53-

Introduction générale

L'usure par abrasion des systèmes mécaniques est un problème industriel bien connu, notamment dans le domaine de contact, où ce phénomène limite considérablement la durée de vie des organes.

En outre l'importance de l'usure de ces derniers est due à leur influence directe sur de nombreux paramètres technologiques à savoir l'état de surface, et la chaleur dégagée dans la zone de contact.

Les techniques actuelles pour lutter contre le frottement et l'usure permettent d'apporter une solution plus ou moins optimale aux problèmes qui se posent ; les moyens de lutte disponibles consistent à la fois à améliorer le rendement des mécanismes en réduisant la perte en frottement ou en optimisant l'adhérence et allonger considérablement la durée de vie des équipements en diminuant l'usure et le grippage des constituons mécaniques.

L'endommagement causé par l'usure peut être atténué, voire évité, par l'amélioration des propriétés donnant des meilleures caractéristiques. Compte tenu de ces impératifs, on est amené à envisager les techniques de traitement de surface, lesquelles offrent une autre voie pour combattre l'usure.

Les traitements thermiques et thermochimiques répondent à des besoins réels d'amélioration des performances des matériaux. Leur fonction étant d'améliorer la tenue du matériau vis-à-vis des sollicitations externes, tout en préservant ses propriétés volumiques

La caractérisation des différents aciers nous permet non seulement d'illustrer les principales caractéristiques de ces matériaux mais aussi d'introduire le problème fondamental du choix et l'influence de leur propriété sur l'usage qu'on en fait.

L'objectif de ce travail est d'identifier les mécanismes d'usure de l'acier 100Cr6.

CHAPITRE I

Etude bibliographique

I. La tribologie

I-1. Définition

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé, l'usure suite à la dégradation des surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de science des matériaux [1].

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

Un contact tribologique ou tribo-système est ainsi composé de trois éléments principaux (Figure -1-): les solides **A** et **B** en contact appelés premiers corps et le milieu inter facial **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.

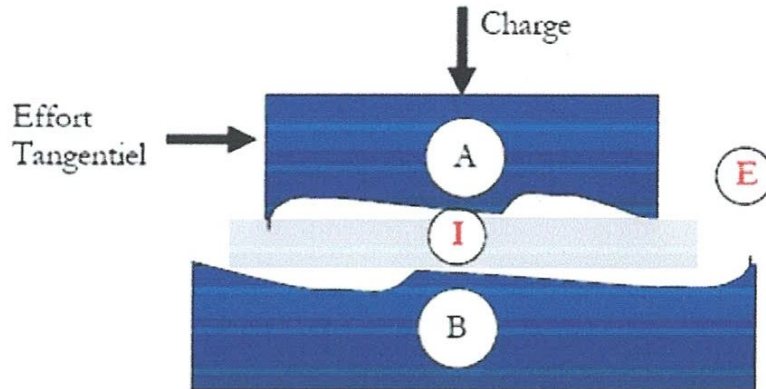


Figure I-1. Schéma d'un tribo-système

II - FROTTEMENT ET USURE

II-1.FROTTEMENT

II-1-1. Introduction

Un « frottement » intervient lorsque deux surfaces en contact sont mises en mouvement l'une par rapport à l'autre, produisant une force qui s'oppose au mouvement. Les sciences du frottement sont donc intimement liées au développement technologique, tournées vers l'application. [2]

Le mécanisme de frottement a été tout d'abord expliqué par BOWDEN et TABOR[3] 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 l'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-2).

La force de frottement est indépendante de la surface de contact apparente. La surface d'un solide possède toujours une certaine rugosité aussi, comme l'indique la (Figure I-3), seules les aspérités vont assurer le contact.

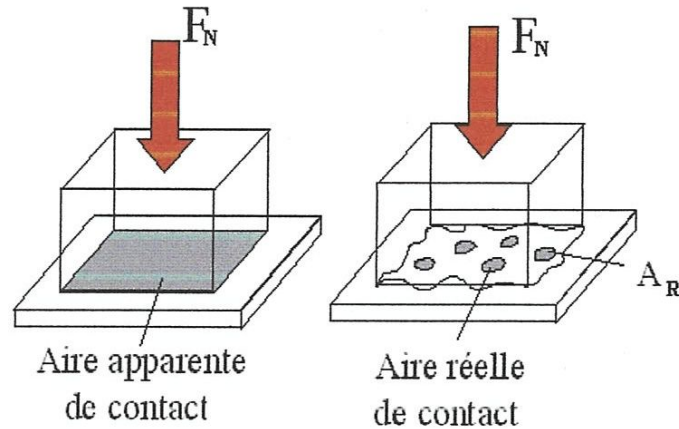


Figure I-2. Surface apparente et surface réelle de

II-1-3. Les facteurs influençant le frottement

Examinons certains facteurs qui influencent ou n'influencent pas le frottement statique et dynamique entre deux surfaces [4].

II-1-3-1. Le coefficient de frottement

Une augmentation du coefficient de frottement entre deux surfaces aura pour effet d'augmenter la force de frottement. Celui-ci est influencé par plusieurs facteurs dont les types de matériaux qui composent les surfaces ainsi que leur aspect. Le coefficient de frottement entre deux surfaces sera augmenté pour assurer une grande traction, ou diminué pour permettre un meilleur glissement [5].

II-1-3- 2. La force normale

La force normale est composée du poids du corps et de toute autre force verticale appliquée sur ce corps. La force appliquée sur un corps n'est toutefois pas toujours verticale, mais la force normale est perpendiculaire à la surface de contact. Si on augmente la force normale entre deux surfaces, la force de frottement sera également augmentée proportionnellement. [3].

II-1-3-3. La grandeur des surfaces de contact

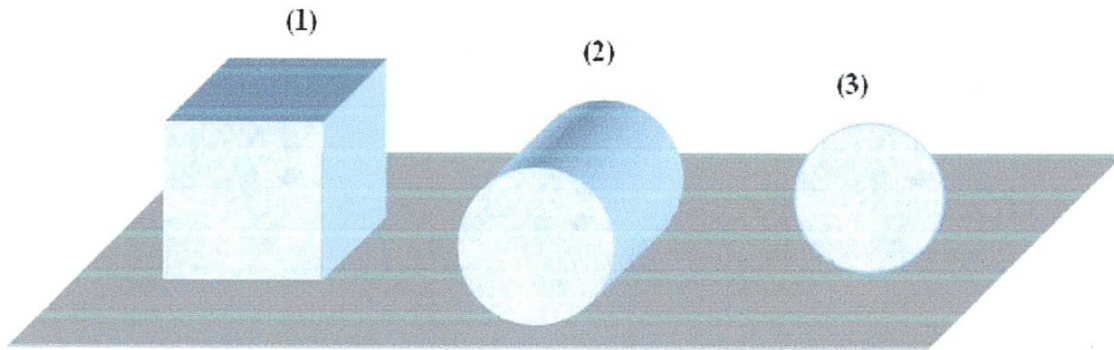
Contrairement à la croyance populaire, la grandeur de la surface de contact n'influence pas le coefficient de frottement. Même si les surfaces apparaissent lisses, elles sont en fait plus ou moins rugueuses lorsqu'elles sont vues sous un microscope [6].

II-1-4- 1. Le frottement sec en régime statique

La théorie de Hertz élaborée par Hertz (1882) et Boussinesq (1885)[5] porte sur l'analyse et le comportement de contacts élastiques soumis à un chargement

normal. Elle définit les dimensions de l'aire de contact entre deux solides, la pression et la distribution des contraintes à l'intérieur des solides. La géométrie des contacts dépend de la forme des solides a priori quelconque, mais ils peuvent se décomposer en trois types (Figure I-3.) :

- ❖ contact bille/plan entre deux sphères ou entre une sphère et un plan
- ❖ contact cylindre/plan entre deux cylindres ou entre un cylindre et un plan



- ❖ contact surfacique entre deux plans

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

II-2. L'USURE

II-2-1. Introduction

L'usure caractérise la dégradation des corps et la perte matérielle à leurs surfaces. Elle peut être provoquée par le frottement de deux solides en contact (usure mécanique à deux ou trois corps), mais aussi par réaction chimique, par rayonnement, Elle est fonction des propriétés du

matériau, des conditions ambiantes et d'opération et de la géométrie [3]. Le processus d'usure est tout comme la force de frottement, un phénomène assez mal décrit théoriquement

II-2-2. Mécanismes de l'usure

On définit l'usure comme une détérioration d'une chose suite à l'usage qu'on en fait, l'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact. L'usure est un ensemble complexe de phénomènes, amenant une émission de débris avec perte de masse, de côtes, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces. Elle ne varie généralement pas de manière progressive en fonction de paramètres comme la vitesse, la température ou le temps.

L'usure est généralement combattue à cause de ses effets négatifs, mais elle présente aussi des aspects favorables. Il arrive que l'on provoque sciemment certaines formes d'usure pour lutter contre d'autres formes qui seraient beaucoup plus dévastatrices. Quand il est bien conduit, le rodage d'un mécanisme, c'est-à-dire la phase de fonctionnement où les pièces provoquent des usures.

Dans les premiers instants du frottement, ce sont les écrans superficiels qui subissent l'ensemble des mécanismes inhérents au frottement (effets thermiques, mécaniques ou chimiques). Ensuite, ces mécanismes se relaient ou s'interpénètrent en fonction des multiples conditions présentes. Selon la quantité de matériau perdue par un élément actif d'un tribosystème (Figure I-4.), on distingue trois phases [7]:

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

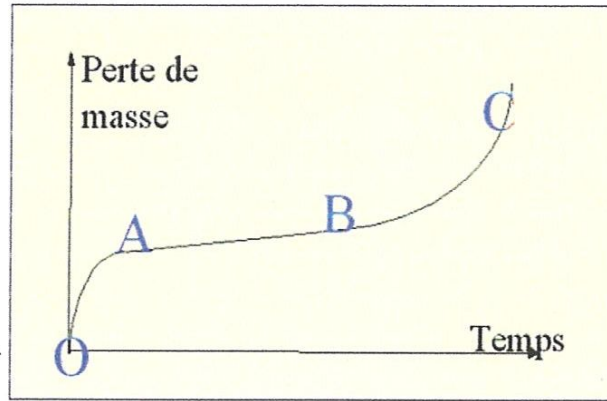


Figure I-4. Test de l'usure

II-2-3. Les principaux modes d'usure

II-2-3-1. L'usure par abrasion

Cette forme d'usure se manifeste par des polissages, des griffures, des micro-labourages, des arrachements de particules. Le micro-labourage (ou micro-usinage) se manifeste par des rayures à la surface du matériau le plus tendre sans arrachement de matière mais provoquant sur les bords du sillon une déformation plastique.)L'usure abrasive correspond au cas où le plus dur des matériaux du contact déforme plastiquement le plus tendre et crée des sillons (Figure I-5.). Le matériau est labouré et la matière repoussée sur le bord du sillon puis désolidarisée du matériau. Ces cicatrices sont constituées de sillons dirigés dans le sens du déplacement, cette abrasion peut entraîner une perte de matière [2].

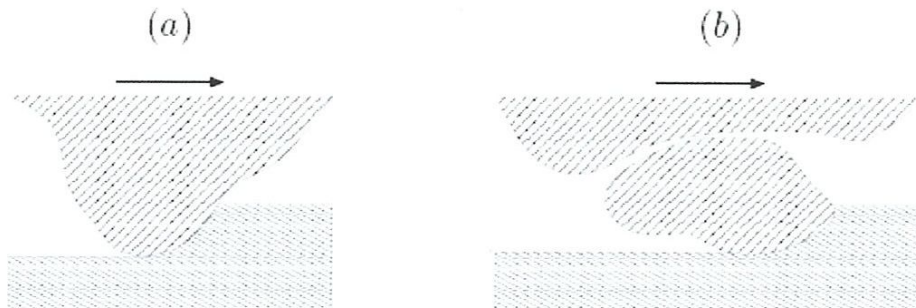


Figure I-5. Usure par abrasion. (a) Abrasion à deux corps (b) Abrasion à trois corps

II-2-3- 2. L'usure par adhésion

L'usure par adhésion (Figure I-6.) se manifeste par le transfert et le dépôt du matériau le plus tendre sur l'autre. Elle se caractérise par un transfert de débris d'un des deux antagonistes vers l'autre soit par un mécanisme d'origine purement mécanique, soit suite à une réaction physico-chimique.

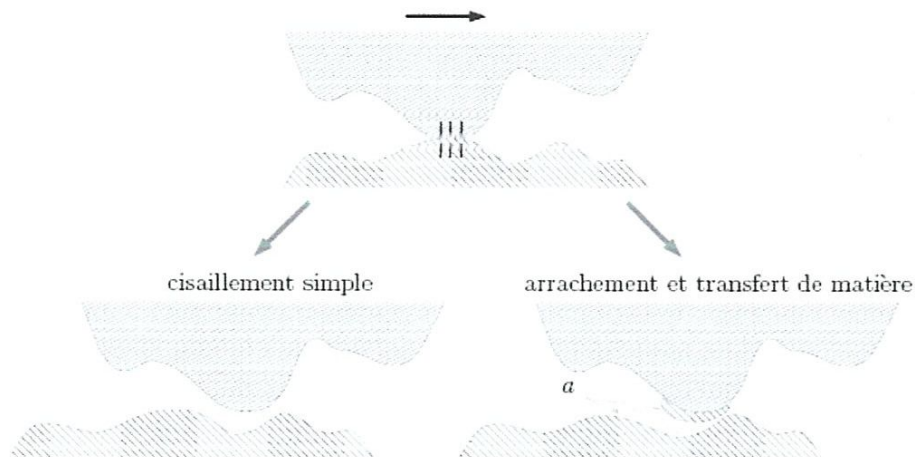


Figure I-6. Usure par adhésion. (a) débris arraché

II-2-3- 3. L'usure par fatigue

La fatigue est le phénomène de formation et de propagation de fissures sous l'action répétée d'efforts alternés "pitting". Le mécanisme de fatigue commence par la formation d'une fissure en surface qui plonge dans la matière. Puis sous l'action répétée du corps frottant, cette fissure se propage en profondeur et parallèlement à la surface pour ensuite remonter (Figure I-7.).

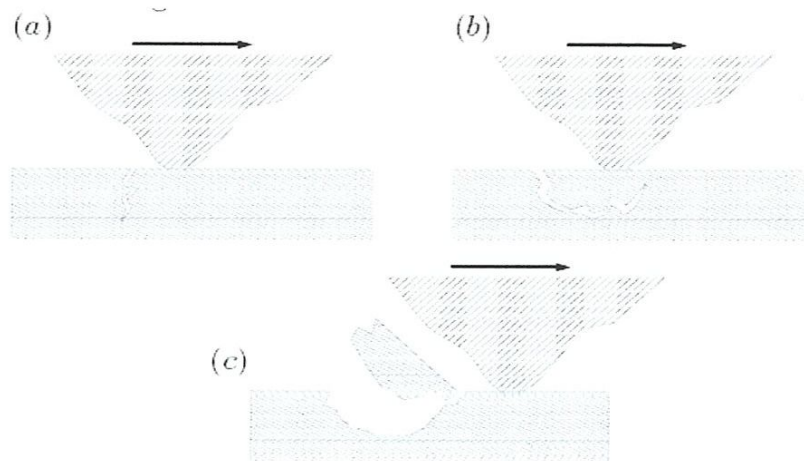


Figure I-7. Usure par fatigue. (a) Amorçage (b) Propagation (pitting) (c) Génération d'un débris (écaillage).

II-2-3- 4. L'usure par érosion

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux. Lors de l'impact, la particule animée d'une grande vitesse percute et agresse le matériau en surface. L'érosion est principalement sensible à deux paramètres [3].

* La nature du matériau.

* Le comportement est très différent selon la nature du matériau

II-2-4. Le concept de troisième corps

Rappelons que le mouvement peut détruire les surfaces et que les débris commencent leur vie dans le contact. Si les débris sont piégés dans le contact, le contact à deux corps devient un contact à trois corps [8]. Pour rester fidèle à la maison fondatrice du troisième corps, nous donnerons les définitions des premiers corps, troisième corps et des débits de troisième corps issus des travaux de Descartes et Berthier [9].

Il s'agit du volume de matière présent entre les 1ers corps. C'est un «opérateur » qui sépare les 1^{ers} corps, transmet la charge (portance) entre les 1ers corps tout en accommodant la majeure partie de leur différence de vitesse.

Le 3ème corps est dit naturel lorsqu'il est issu de l'un ou des deux 1ers corps ou lorsqu'il se forme sur l'un ou les deux 1ers corps.

CHAPITRE II

Etude expérimentale

I.INTRODUCTION

Dans ce chapitre, l'étude est consacrée au frottement des matériaux où nous avons étudié différentes nuances d'aciers actuellement utilisées dans les domaines industriels, à titre explorateur et comparatif. 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 élaboré 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.

La réalisation de différents tests d'usure a pour objectif de faire une corrélation entre le comportement en frottement les structures des échantillons et les propriétés mécaniques de ces matériaux.

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 se caractérisent par une dureté à température ambiante relativement élevée, et par une bonne dureté à chaud. Leur propriété essentielle est de posséder un bon niveau de résistance à l'adoucissement qui permet pour certains d'entre eux d'être utilisés à une température de travail d'environ 600-650 °C.

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) :

COMPOSITION CHIMIQUE: (analyse suivant la norme ISO 683-17)

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 %)

COMPOSITION CHIMIQUE: (analyse de coulée suivant la norme EN 10084)

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 %)

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.

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).

Il existe deux types de traitements thermiques

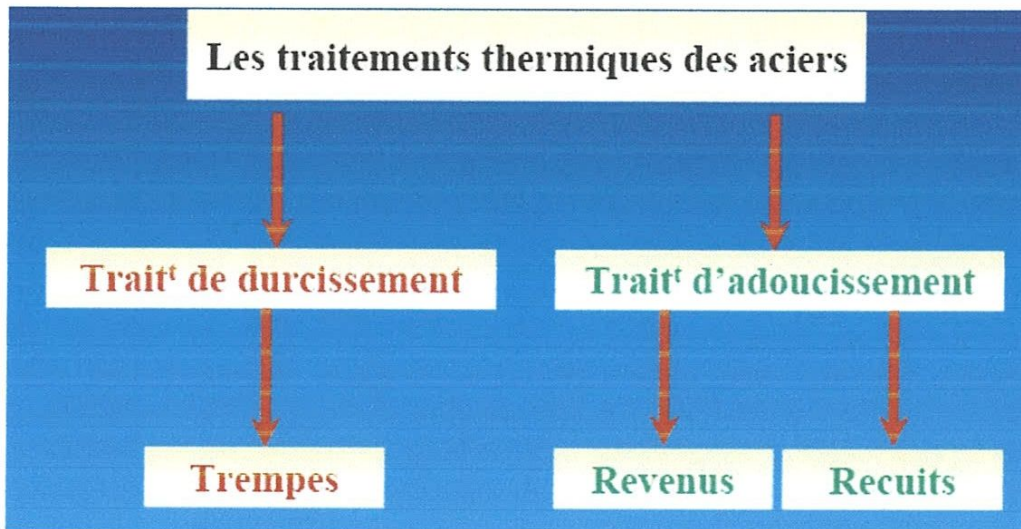


Figure II-3. Schéma présentant les traitements thermiques

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 - double Trempe - Revenu.

I-3-1-1. Traitement thermique

a) la trempe

Celle-ci consiste à chauffer l'acier à une température de 850 °C avec un temps de maintien 35 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.

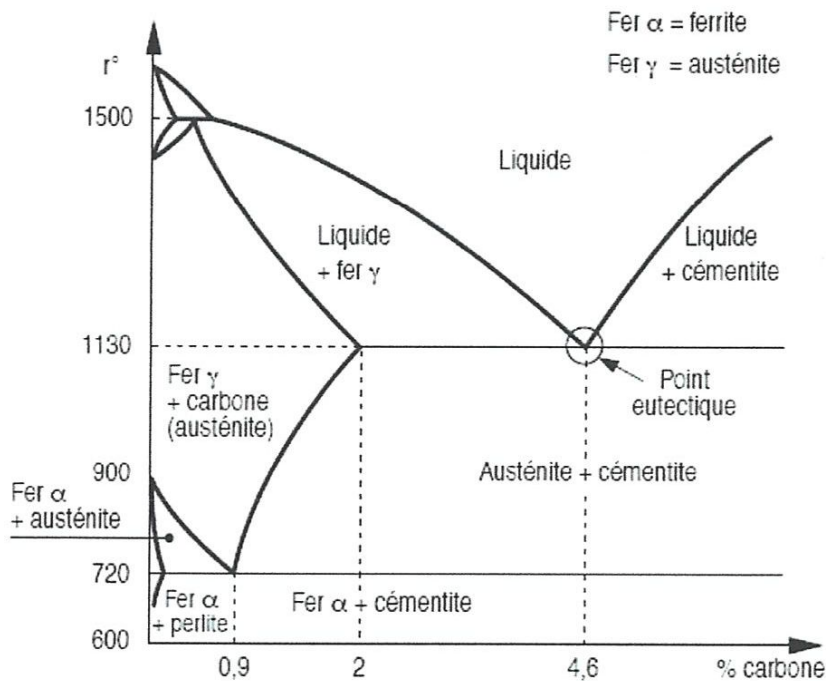


Figure II-4. Diagramme fer-carbone

a-1-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.

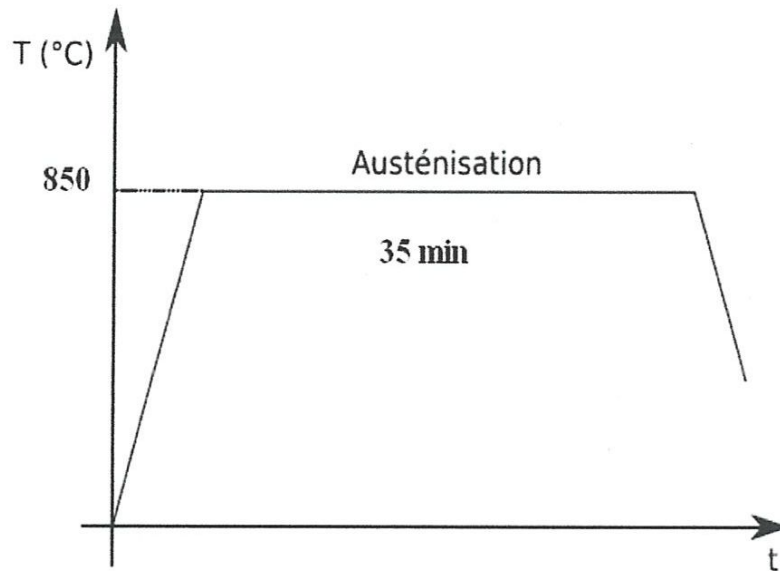


Figure II-5. Cycle de trempe à L'huile de l'acier 100Cr6

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

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) Cycle de revenu

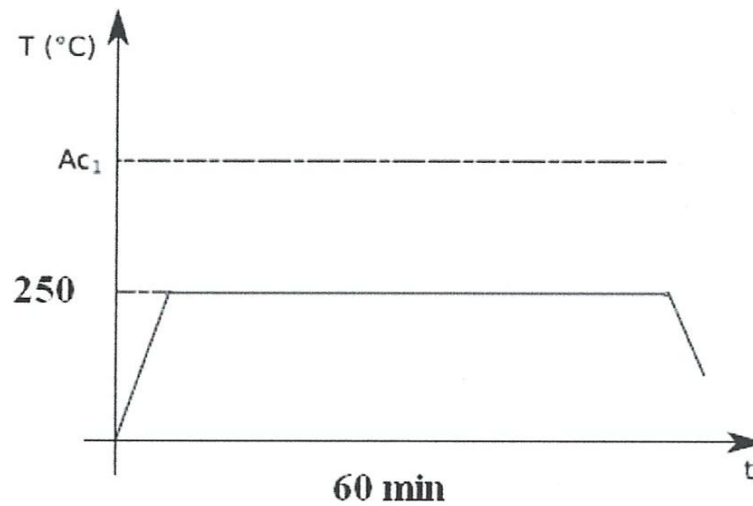


Figure II-6. Cycle de revenu de l'acier 100Cr6

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.

Un refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes.

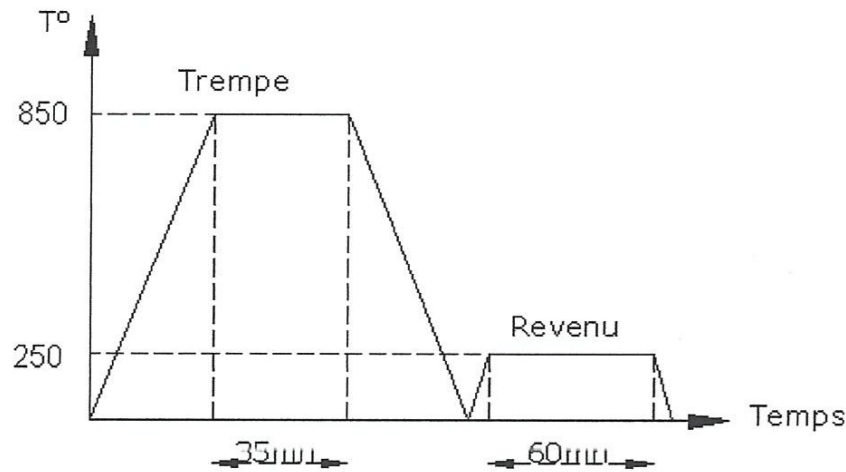


Figure II-7.Cycle thermique de Trempe à L'huile de l'acier 100Cr6

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 coeur 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 traitement 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 coeur est très tenace (résistant aux chocs), la surface a une dureté élevée (résistance à l'usure). Le procédé consiste à un enrichissement de la couche superficielle de la pièce par le carbone. 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 CO_2 . 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 1ère 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 affine le grain de la couche cémenté 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.

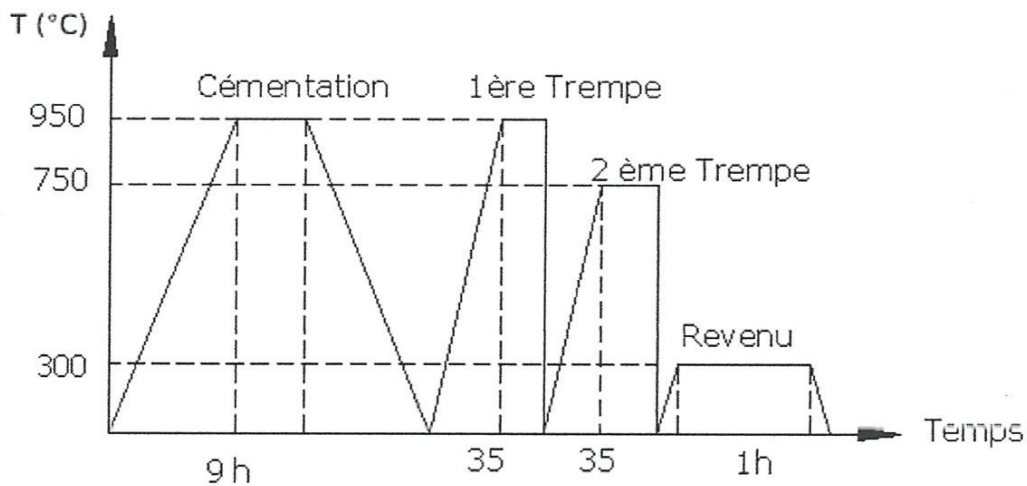
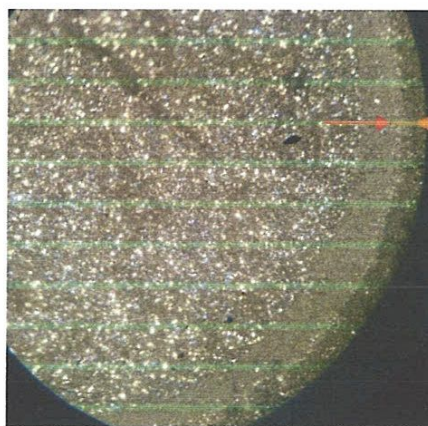


Figure II-8. Cycle thermique de cémentation de l'acier 16MnCr5



La couche cémentée

Figure II-9. Epaisseur se la couche cémentée

La cémentation effectuée sur l'acier 16MnCr5 a donné à ce dernier une dureté superficielle très élevée due à la couche de carbone déposée sur la surface de cet acier.

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 de 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 certains 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-10).

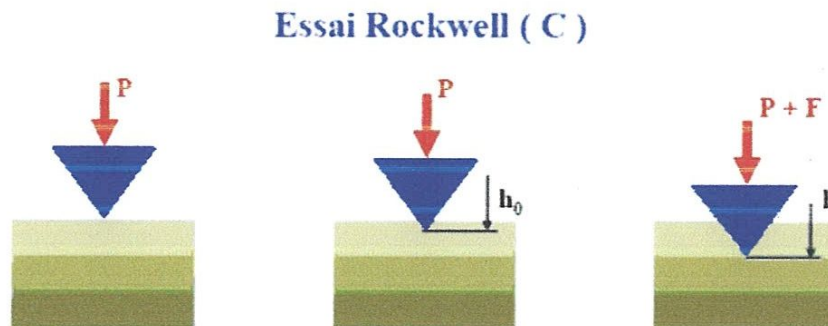


Figure II-10. Essai Rockwell (c)

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), voir Figure (II-8).

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-11. 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. 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 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.

III -1. Essais de frottement

▪ Conditions de travail

Les tests de frottement plan/plan (Figure II-16), ont été réalisés sur une polisseuse tournant à deux vitesses ($V_1= 1,1$ 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 pendant huit heures de temps discontinues où, nous avons fait varier la charge et la vitesse de frottement, nous signalons que la perte en poids est mesurée à des intervalles réguliers de temps de deux heures.

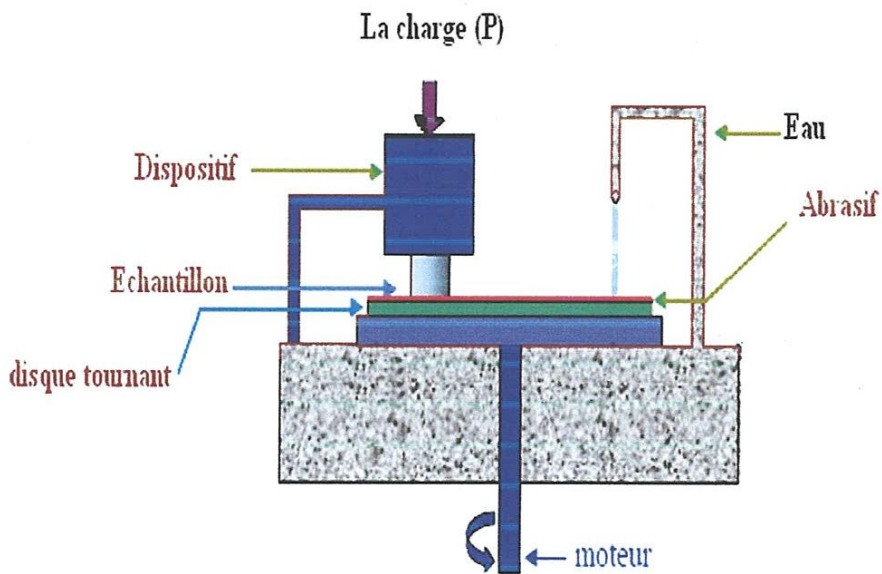


Figure II-16. Dispositif de frottement des surfaces planes.

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 contre un abrasif à gros grains ($\phi 100$) où nous avons fait varier la charge et la vitesse.

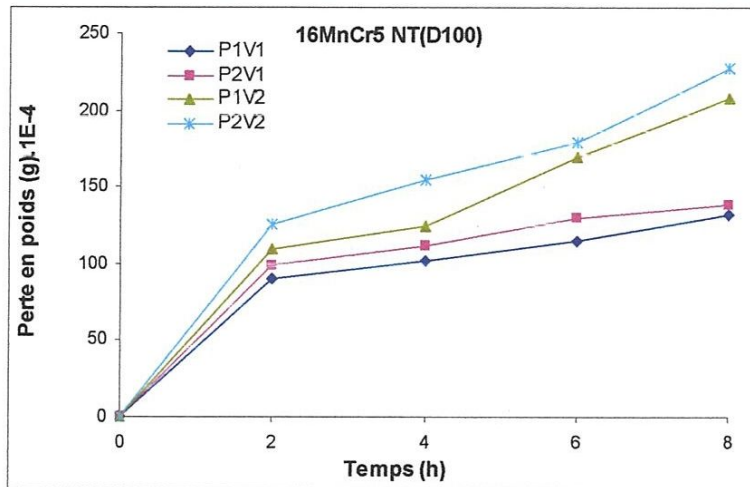


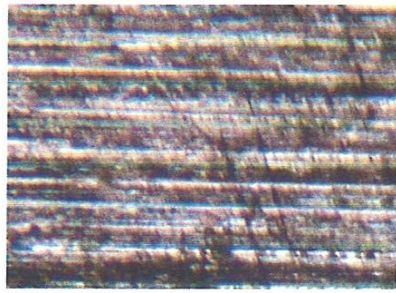
Figure II-17. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 non traité (contre abrasif $\phi 100$)

Les résultats obtenus sur l'acier 16MnCr5 sont représentés sur la figure (II-17), où l'on peut observer l'évolution de la perte en poids en fonction du temps.

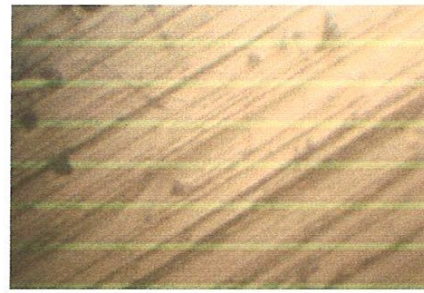
Sur cette figure, on constate une période transitoire au début de l'essai appelée période de rodage. Durant cette période, l'usure augmente considérablement, on peut considérer cette dernière comme une période de mise en conditions du système.

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-18).

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.



(X40)



(X200)

Figure II-18 .Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 non traité dans les conditions sévères.

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-19).

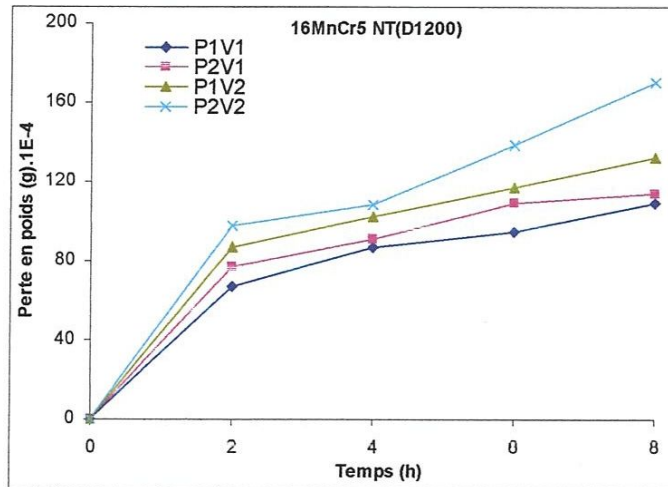
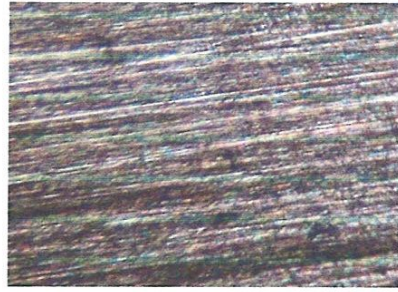


Figure II-19. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 non traité
(contre abrasif $\phi 1200$)

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-19) 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-20) 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-20. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 non traité dans les conditions faible.

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 thermo-chimique utilisé sur le comportement tribologique de cet acier .

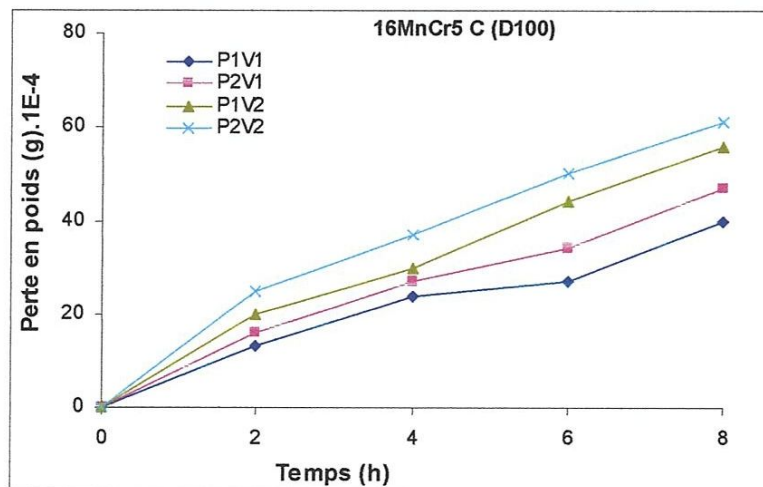


Figure II-21. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 cémenté (contre abrasif $\phi 100$)

Les résultats obtenus (Figure II-21) 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 amélioration de la résistance aux endommagements tribologiques, nous nous sommes placés dans les conditions les plus dégradantes pour l'acier 16MnCr5 cimenté 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-22) 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 prés localisés n'arrivent pas à former un transfert stable ce qui laisse la surface sans protection.

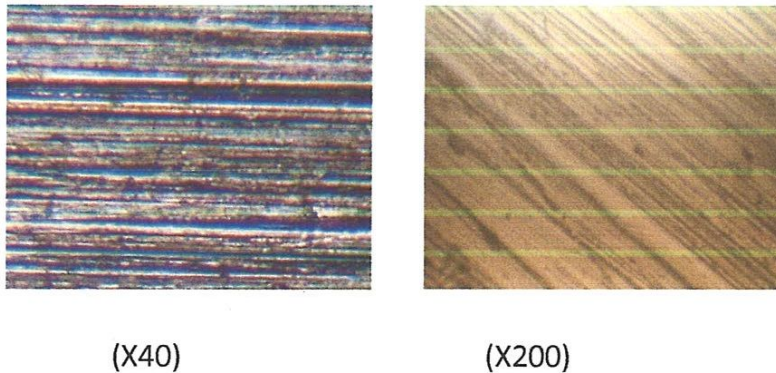


Figure II-22. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 cimenté dans les conditions sévères.

Pour les tribologiques effectués sur l'acier 16MnCr5 cimenté (Figure II-22), avec une variation de la taille de l'abrasif ($\phi 1200$) et dans les mêmes conditions, on constate que l'évolution de la perte en poids est similaire par rapport à la figure (II-21), mais avec un taux d'usure moins important ; ceci est dû à l'influence de la taille du grain de l'abrasif et la sensibilité de l'acier au traitement thermo-chimique qui a augmenté sa dureté superficielle.

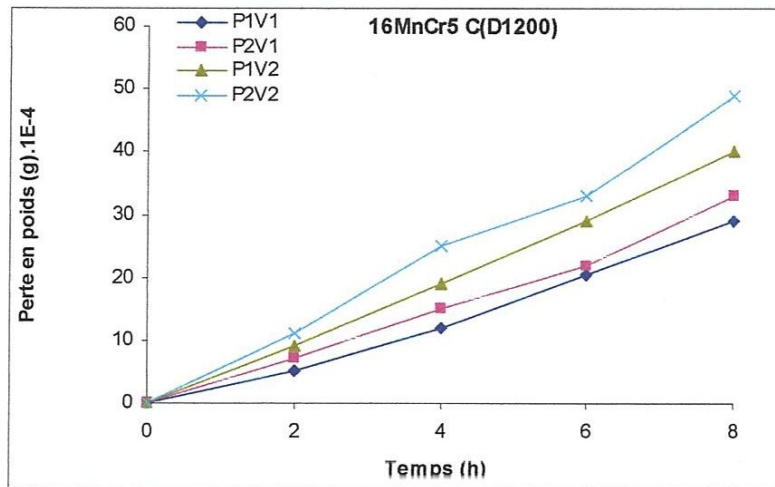
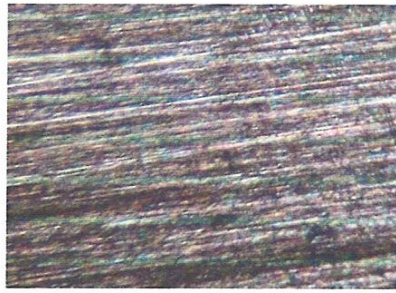


Figure III-23. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 cémenté
(contre abrasif $\phi 1200$)

D'un point de vue quantitatif, la résistance à l'usure a été évaluée en suivant l'évolution de la perte en poids en fonction du temps de frottement dans le contact plan/plan. Il est clair que dans chaque cas, le volume d'usure augmente linéairement avec la charge et la vitesse et la taille de grain de l'abrasif.

Les observations révèlent que dans les conditions faibles (Figure II-24), l'acier 16MnCr5 cémenté a subi une déformation limitée de l'état de surface caractérisée par l'arrachement des faibles quantités de particules. Ce régime de travail fait apparaître de petits sillons serrés les un 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.



(X40)



(X200)

Figure II-24. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 cémenté dans les faibles conditions.

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

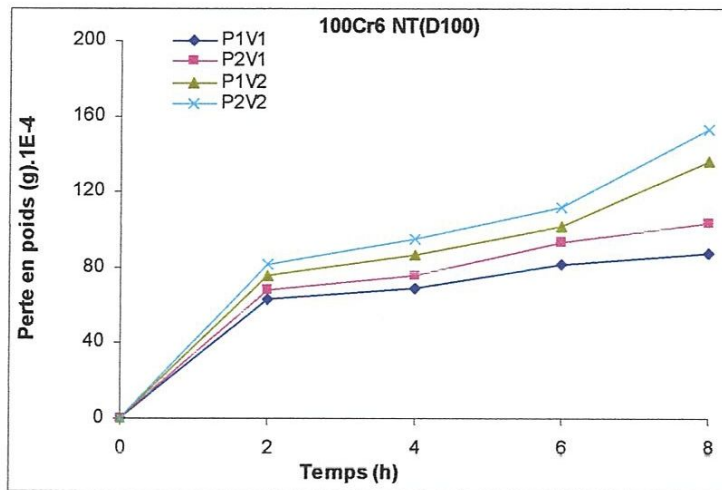
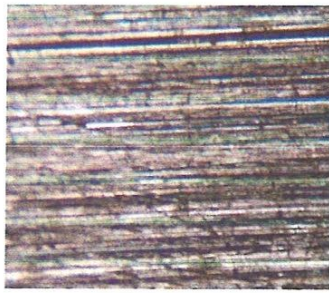


Figure II-25. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité (contre abrasif $\phi 100$)

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-25), 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 -17).

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-26). 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-26. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans des conditions sévères.

Toujours dans un milieu lubrifié dans les mêmes conditions mais contre un abrasif à fin grain ($\phi 1200$) les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (II-27).

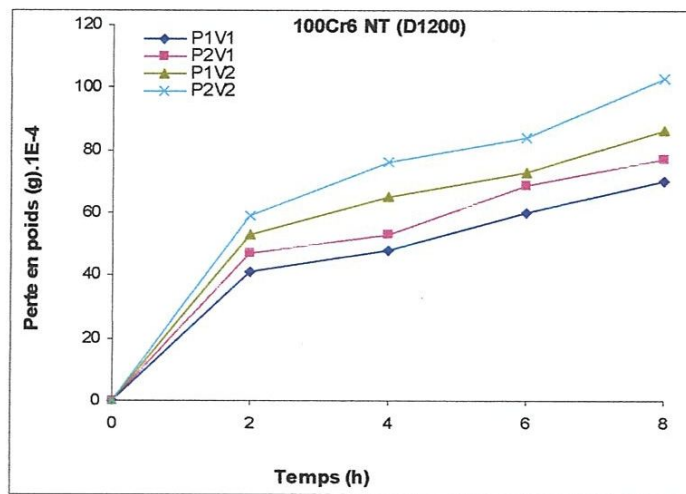


Figure II-27. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité
(contre abrasif $\phi 1200$)

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-28) 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.

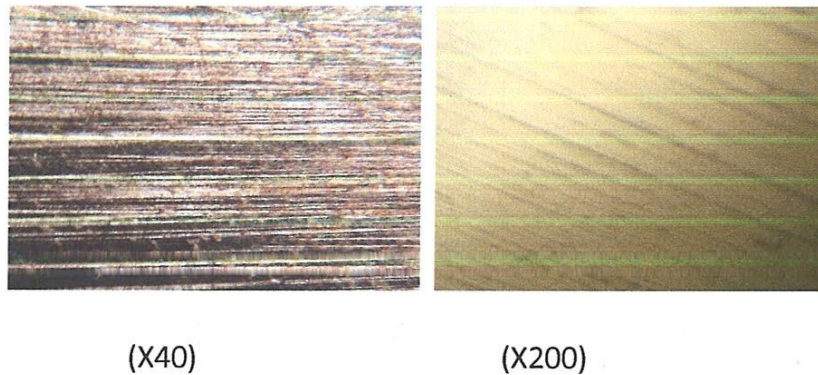


Figure II-28. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans des faibles conditions.

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 des 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 ($\phi 100$ 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 ($\phi 100$) (Figure II-29), ont montré que le classement est conservé mais avec une nette différence par rapport à l'acier non traité.

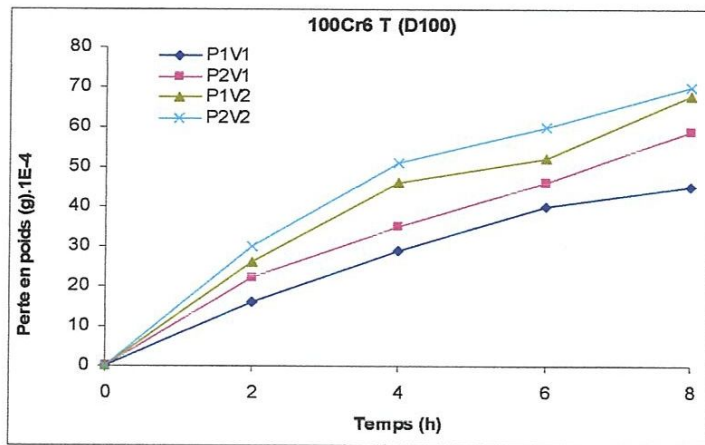
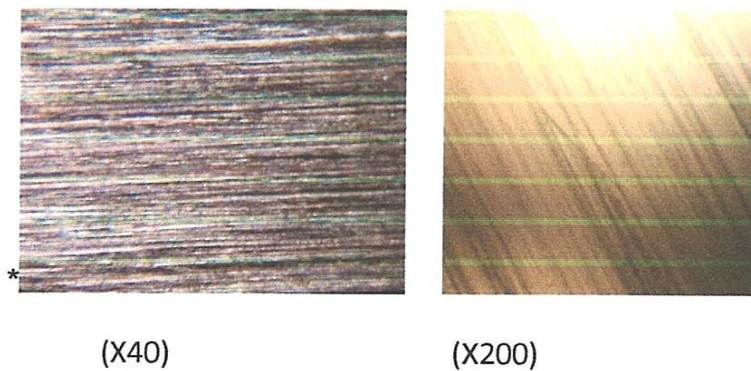


Figure II-29. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé (contre abrasif $\phi 100$)

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 (FigureII-30) 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.



FigureII-30. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 trempé dans des conditions sévères.

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-31).

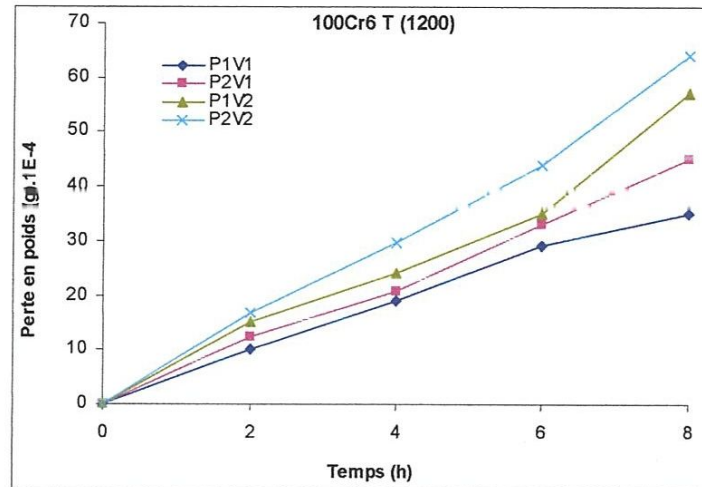
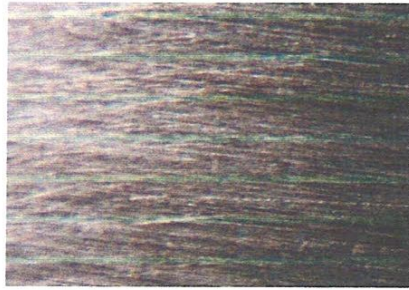


Figure II-31. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé
(contre abrasif $\phi 1200$)

Pour les faibles conditions (P1et 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 (FigureII-32) 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-32. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 trempé dans des faibles conditions.

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 (Fig II-33) avec abrasif $\phi 100$, la charge p_1 et la vitesse v_1 .

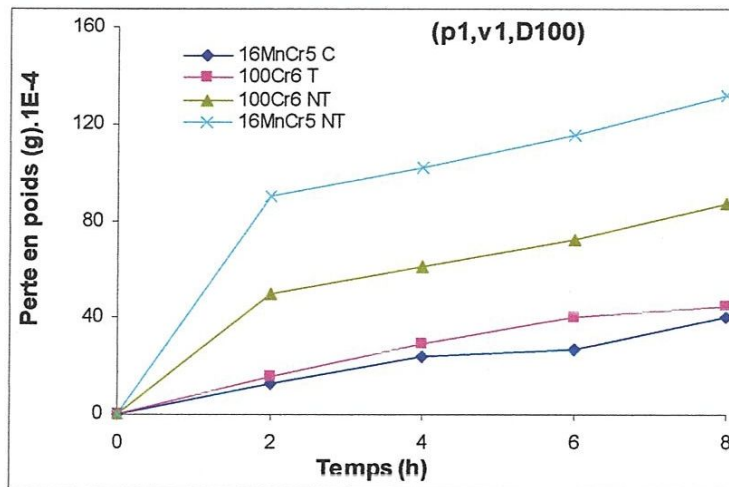


Figure II-33. Perte en poids en fonction du temps (P1, V1, contre abrasif $\phi 100$)

Cette figure représente la perte en poids des aciers non traité et traité 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 apportés 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-34).

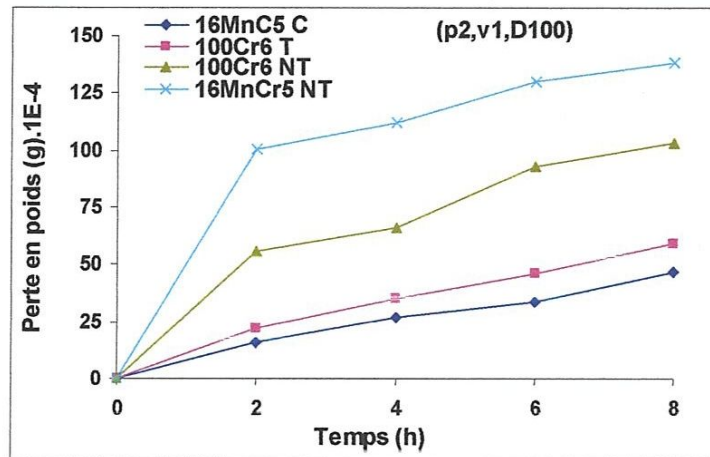


Figure II-34. Perte en poids en fonction du temps (P2, V1, contre abrasif $\phi 100$)

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.

Par une augmentation de la vitesse de frottement (Figure II-35), les résultats obtenus montrent que le classement est toujours conservé.

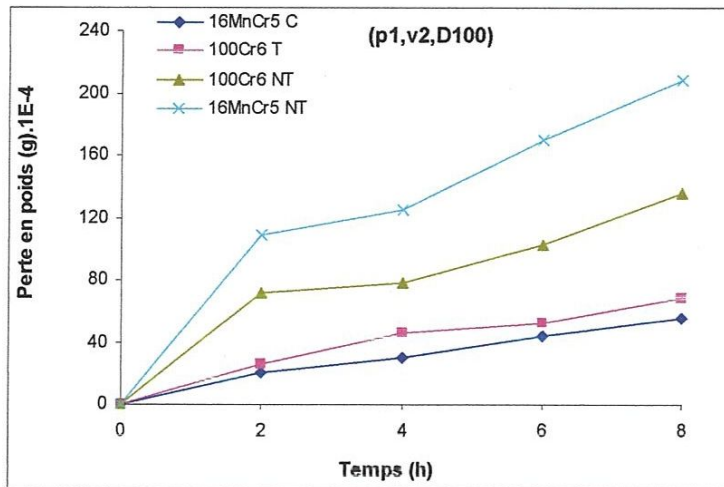


Figure II-35. Perte en poids en fonction du temps (P1, V2, contre abrasif $\phi 100$)

Dans les deux cas les aciers non traités sont caractérisés par une perte en poids considérable par contre les aciers traités (cémenté, trempé) présentent une faible dégradation du taux d'usure.

La figure (II-35) (p1, v2) montre bien que le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse par rapport à la figure (II-33) (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 ($\phi 100$), nous avons fait varier cette fois-ci la vitesse et la charge (Figure II-36).

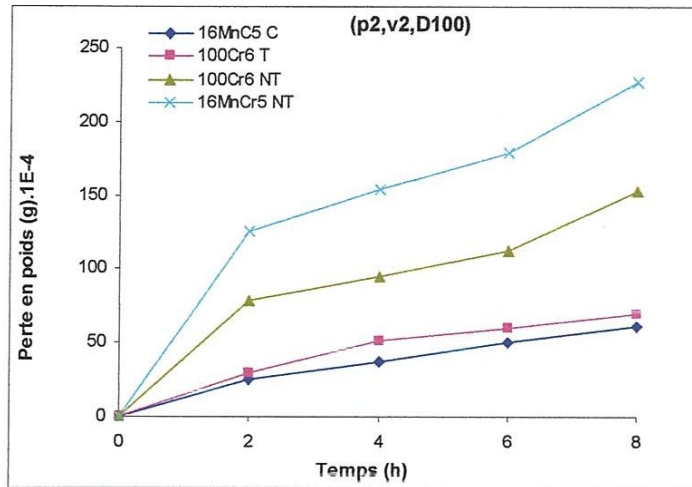


Figure II-36. Perte en poids en fonction du temps (P2, V2, ϕ 100)

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 frottants cette fois ci contre un abrasif plus fin (ϕ 1200).

Sur la figure (II-37), il a été enregistré les mêmes l'allures des courbes : le bon comportement est signalé pour l'acier cémenté suivi de l'acier trempé avec une légère dégradation.

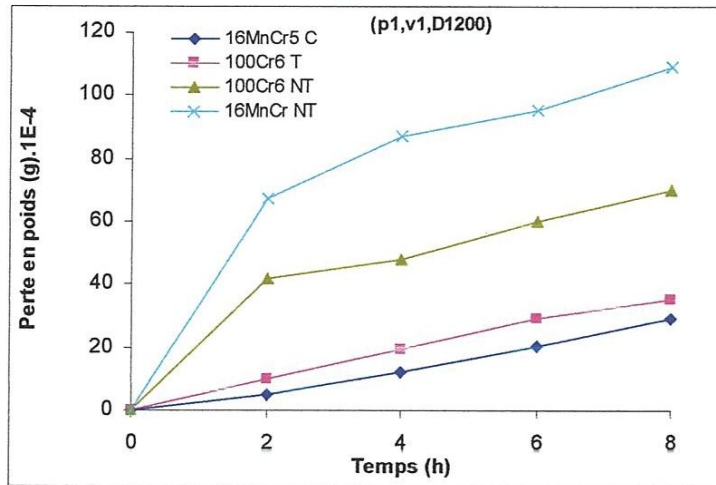


Figure II-37. Perte en poids en fonction du temps (P1, V1, contre abrasif ϕ 1200)

Les traitements thermiques et thermochimiques, engendrent une amélioration du comportement tribologique. Les deux aciers non traités montrent bien l'effet apporté par les traitements.

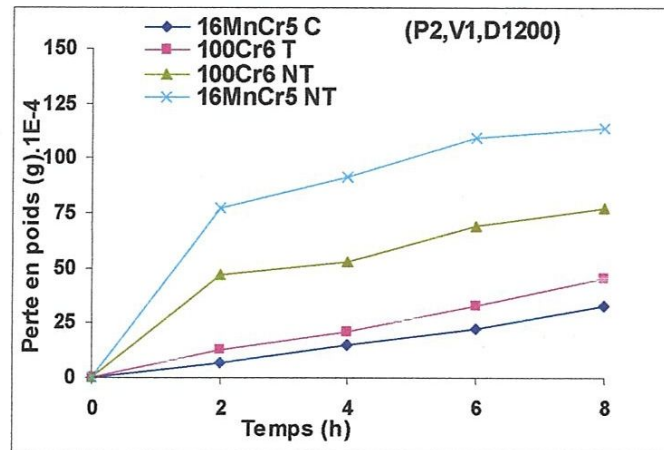


Figure II-38. Perte en poids en fonction du temps (P2, V1, contre abrasif ϕ 1200)

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 a une réorganisation complète de classement des matériaux étudié 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.

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.

Les essais interrompus nous laissent supposer que ce sont les mêmes mécanismes d'endommagement qui interviennent quelle que soit la durée des essais.

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] **CHEVERRY Bernard**. «Adhérence, mécanique et tribologie des revêtements composites NiP – Talc multifonctionnels à empreinte écologique réduite.».Thèse docteur, INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE. Soutenue. (2006)
- [2].**F.P.BOWDEN , D.TABOR**,«Friction and Lubrification of solids» Clarendon press, Oxfort, (1956).
- [3]. **Lauric GARBUIO** «Etude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionneurs piézoélectriques» thèse docteur, Génie 'Electrique. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE (2006)
- [4]. **J.J GAUBET** «I heorie et pratique industrielle du frottement » .Mécanique des surfaces, collection dirigée par R . coutcl . Technip /DUNOD,paris 1964.
- [5].**Eduard ANTALUCA**«Contribution à l'étude des contacts élasto-plastiques effet d'un chargement normal et tangentiel» Thèse docteur. Lyon (2005
- [6]. **Samuel NACIVET**«modélisation du frottement en pied d'aube par une approche fréquentielle» thèse docteur de l'ecole centrale de lyon spécialité mécanique, (2002).
- [7].**Olivier BARRAU**«étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud» thèse docteur. toulouse. genie des matériaux. (2000).
- [8]. **M .GODET**«The third body approach: a mechanical view of wear». Wear100, (1984), 432-452.
- [9].**Y. BERTIER**, «Effet du comportement du troisième corps sur l'usure des paliers en mouvements alternatifs ».Thèse DOCTEUR Ingénieur, INSA-Lyon. (1982).