

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique

Mémoire de Magister

Département de : Génie Mécanique

Spécialité : Construction mécanique et productique

Thème

**ETUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT
TRIBOLOGIQUE DES ACIERS 100Cr6 et 16MnCr5
EN MILIEU SEVERE.**

Présenté par : MEBARKI Nadia

Sous la Direction de : Mr.BELBAH Ahmed

Devant le jury :

Président :	Y.Berriche	Pr.	C.U.Souk Ahras
Rapporteur	A.Belbah	M.C	Université de Guelma
Examineurs	K.Zemmour	M.C	Université Annaba
	M.C. Sahour	M.C	Université de Guelma
	S. Guenfoud	M.C	Université de Guelma

Année : 2008

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé à l'université 8 Mais 1945 Guelma au sein de l'institut de mécanique (laboratoire de génie matériaux).

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

Je remercie également Monsieur le professeur **Y. BERRICHE**, du centre Universitaire de Souk Ahras, pour m'avoir fait l'honneur d'être le président du jury.

Je remercie vivement Monsieur **K. ZEMMOUR**, Monsieur **M.C. SAHOUR**, Monsieur **S. GUENFOUD** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail et pour avoir accepté de l'examiner en tant que rapporteurs.

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 mécaniques.

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

Résumé :

Le choix d'un matériau devant résister à l'usure est actuellement décidé en fonction de ses caractéristiques mécaniques parmi lesquelles, la dureté est considérée comme un paramètre décisif.

Notre travail porte essentiellement sur l'étude comparative du comportement en frottement et à l'usure des aciers 100Cr6 et 16MnCr5 traités en milieu sévère.

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 : le transfert de matière (la formation du 3^{ème} corps), la chaleur dégagée dans la zone de contact, l'état de surface, la puissance consommée, la taille des grains... etc.

Dans notre étude nous avons étudié l'aspect tribologique et morphologique, où nous avons réalisé des tests de frottement plan/plan de différents aciers contre des abrasifs en carbure de silicium (SiC) où nous avons fait varier les différents paramètres de frottement (charge, vitesse, abrasif).

Les résultats obtenus, nous ont conduit à mieux comprendre l'influence des paramètres de frottement c'est à dire comment varie l'usure avec la variation de ces paramètres.

Les traitements thermo-chimiques et les traitements thermiques nous ont conduit aussi à mieux comprendre leur influence sur les aciers et leur efficacité est confirmée par les résultats que nous avons obtenus.

Mots clés : Frottement, Usure, Traitement thermique et Superficiels, troisième Corps, Abrasif et Dureté

Abstract

The choice of a material having to resist wear is currently decided according to its mechanical characteristics. Among which, hardness is regarded as a decisive parameter. Our work primarily concerns the comparative study of the behaviour in friction and with the wear of the steels 100Cr6 and 16MnCr5 treated in severe medium.

The study of the behaviour in friction and the behaviour with wear require in particular a precise knowledge of many technological parameters influencing directly on the phenomenon of wear:

The transfer of matter (formation of the 3rd body), the heat released in the zone of contact, the surface quality, the power consumption, dimension of grains, etc.

In our study, we studied the tribological and morphological aspects, where we carried out plane / plane tests of friction of various steels against silicon carbide (SiC) abrasives where varied the various parameters of friction (load, speed, abrasive).

The results obtained have led us to better understanding the influence of the parameters of friction in other terms how wear with the variation of these parameters varies.

The thermochemical treatments and the heat treatments have led us to also better understanding their influence on steels and their effectiveness is confirmed by the results that we obtained.

Key words: friction, wear, heat and surface treatment, third body, abrasive, hardness.

ملخص

في الوقت الحالي لاختيار معدن مقاوم للتآكل نعتمد أساسا على خصائصه الميكانيكية وخاصة الصلادة يعتبر كمؤشر حاسما.

ويتركز بحثنا على دراسة مقارنة تصرف في الاحتكاك والتآكل لمعدنان معالجان 100Cr6 و 16MnCr5 في وسط قاسي.

دراسة تصرف في الاحتكاك وخاصة في تآكل يقتضي معرفة مفصلة للعديد من المعايير التكنولوجية التي تؤثر على ظاهرة التآكل : تحول المادة (تشكل الجسم الثالث)، انتشار الحراري في منطقة التلامس ، حالة السطح، الطاقة المستهلكة، حجم الحبيبات... الخ.

في دراستنا هذه تطرقنا إلى جانب الاحتكاكي و المورفولوجي، حيث أننا أنجزنا اختبارات احتكاك /سطح لمختلف الفولاذ ضد ساحج مكون من كربيد السيليكون (SiC) مع تغير مختلف عوامل الاحتكاك(الثقل ، السرعة، الساحج).

النتائج المتحصل عليها توجهنا إلى فهم أفضل للعوامل المؤثرة على الاحتكاك وكيفية تغير التآكل مع تغير هذه العوامل.

إن المعالجات السطحية و المعالجات الحرارة تؤدي أيضا إلى فهم أفضل و مدى تأثيرها وفعاليتها على الفولاذ وهذا ما تؤكدته النتائج التي حققناها.

الكلمات المفتاحية

احتكاك. التآكل. المعالجات بالحرارة و سطحية. الجسم الثالثة. ساحج. الصلادة

NOMENCLATURE

F	Force de frottement.
A_R	Aire réelle de contact.
τ	Contrainte en cisaillement.
F_N	Force de chargement normal.
H	Dureté.
F_T	Force de frottement tangentielle.
μ	Coefficient de frottement.
A_s	Aire apparente de contact.
V	Le volume de matière enlevée.
K	Le coefficient d'usure.
L	La distance de glissement.
HRC	La dureté Rockwell.
K_{c_v}	La résilience (entaille en V)
W	Energie absorbée
S'	Section d'entaille
E	Le module d'élasticité (ou MODULE D'YOUNG).
R_e	La limite d'élasticité
R_m	La résistance la rupture.
σ	Contrainte normale.
S	L'aire de la section.
ε	Déformation- longitudinale.
l_0	Correspond à la longueur initiale de l'éprouvette.
l	Correspond à la longueur de l'éprouvette après allongement.
Ra	Rugosité moyenne arithmétique.
R	Rugosité moyenne.
L :	Longueur d'évaluation du profil.
P_m	Pression moyenne.
p_0	Pression maximale.
a	Rayon de la zone de contact circulaire.
δ	Distance de glissement.
L'	Longueur cinématique.
R	Rayon de sphère ou de cylindre.
ν_i	Coefficient de Poisson
$\sigma_{1,2,3}$	Contrainte principale en compression/traction .
d	La distance inter-réticulaire du plan
λ	La longueur d'onde de la radiation
n	Nombre entier « ordre de diffraction »

SOMMAIRE

INTRODUICION	10
CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. LA TRIBOLOGIE	13
I-1. Définition	13
II- FROTTEMENT ET USURE	14
II-1.FROTTEMENT	14
II-1-1. Introduction	14
II-1-2. Mécanisme	15
II-1-3.Les facteurs influençant le frottement.....	17
II-1-3-1. Le coefficient de frottement.....	17
II-1-3-2. La force normale.....	17
II-1-3-3. La grandeur des surfaces de contact.....	18
II-1-4. Lois classiques sur le frottement.....	18
II-1-5. Les variations du coefficient de frottement.....	19
II-1-5-1. Le coefficient de frottement varie avec le temps.....	19
II-1-5-2. Variation du coefficient de frottement avec la vitesse	20
II-1-5-3. Variation du coefficient de frottement avec la charge.....	20
II-1-5- 4. Variation du coefficient de frottement avec la température.....	21
II-1-6. Différents modes de frottement.....	21
II-1-6-1.Frottement de deux corps sans interposition de lubrifiant.....	21
II-1-6-2.Frottement avec lubrification	21
II-1-7. Frottement (aspect métallurgique).....	23
II-1-7- 1.Le frottement sec en régime statique.....	23
II-1-7- 2.Le frottement sec en régime permanent.....	25
II-2.L'USURE	26
II-2-1. Introduction.....	26
II-2-2. Mécanismes de l'usure.....	27
II-2-3. Les principaux modes d'usure.....	27
II-2-3-1. L'usure par abrasion	28
II-2-3- 2. L'usure par adhésion.....	29

II-2-3- 3.L'usure par fatigue.....	30
II-2-3- 4.L'usure par réactions tribochimiques.....	31
II-2-3- 5.L'usure par érosion.....	32
II-2-3- 6.L'usure par fretting.....	32
II-2-4. Evaluation de l'usure	33
II-2-5.Facteurs de l'usure.....	34
II-2-5- 1. Mode de contact	34
II-2-5- 2.Etat de surfaces microgéométrique.....	34
II-2-5- 3.La charge	34
II-2-5- 4.La vitesse.....	35
II-2-5- 5. Ambiance.....	35
II-2-5- 6. Les propriétés mécaniques.....	35
II-2-6. Le concept de troisième corps.....	36
II-2-7. Approche globale du troisième corps.....	37
II-2-7-1. Création et piégeage des débris d'usure.....	38
II-2-7-2-Evolution des débris.....	39
II-2-7-3-Comportement du lit de débris.....	39
II-2-8-Rugosité de surface.....	40
Conclusion.....	40
CHAPITRE II	ETUDE EXPERIMENTALE
I. Introduction.....	43
I-1. Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales utilisées.....	43
I-2. Préparation des échantillons.....	43
I-2-1. Aciers étudiés.....	43
I-2-2. Compositions chimiques.....	44
I-3. Conditions de travail.....	44
I-3-1. Traitements des aciers.....	44
I-3-1-1. Traitement thermique.....	45
a) la trempe.....	45
b) Cycle de revenu.....	47

I-3-1-2. Traitement thermo-chimique	48
a) La cémentation.....	48
b) Cycle de cémentation.....	49
II. Les essais mécaniques.....	49
II-1. Essais de dureté (H).....	51
II-2. Essai de résilience (résistante aux chocs).....	51
II-3. Essai de traction.....	58
II-4. Flexion trois points.....	68
II-5. Test de compression.....	72
II-6. Essai de rugosité.....	77
III. Essai de frottement et l'usure.....	82
III -1. Essais de frottement plan /plan.....	83
III -2. Résultats et discussions.....	84
III -2-1. Couple 16MnCr5 non traité /SiC.....	84
III -2-2. Couple 16MnCr5 cémenté /SiC.....	87
III -2-3 .Couple 100Cr6 non traité /SiC.....	89
III -2-4. Couple 100Cr6 trempé /SiC.....	92
III -2-5. Etude comparative.....	95
IV. Mécanismes d'usure des surfaces.....	101
V. Influence des paramètres tribologiques.....	101
V-1. Influence de la charge appliquée.....	101
V-2. Influence de la vitesse de frottement.....	102
V-3. Influence de la taille de l'abrasif.....	102
VI. Comportement et rôle du troisième corps.....	103
CONCLUSION GENERALE	104
ANNEXE I.....	106
ANNEXE II.....	111
ANNEXE III.....	112
BIBLIOGRAPHIE	120

INTRODUCTION

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 thermo-chimiques 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 des aciers 16MnCr5 et 100Cr6.

Le premier chapitre, bibliographique, s'articule sur un rappel des concepts tribologiques et du comportement en frottement des matériaux en insistant sur les modes de dégradations des surfaces.

Le second chapitre se divise en deux parties distinctes. Une première partie présentant les caractéristiques mécaniques et des différents aciers utilisés dans notre étude. La seconde partie de ce chapitre traite des résultats obtenus sur l'étude tribologique des aciers 16MnCr5 et 100Cr6.

Ces essais cherchent à caractériser l'influence de la dureté initiale de l'acier sur le frottement, du traitement thermique ou thermochimique sur le comportement en frottement et à l'usure. Les observations des dégradations permettront d'identifier les mécanismes intervenants dans la dégradation en frottement des aciers.

Le comportement tribologique est systématiquement analysé, en vue de sélectionner les traitements opposant la meilleure résistance à l'usure.

La présente étude consiste à aborder le mécanisme de frottement des différents aciers, 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.

À partir des résultats expérimentaux obtenus, nous dégageons ainsi des conclusions sur l'étude de frottement est l'usure des différents matériaux et l'influence de tels ou tels paramètres.

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

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-1): 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.

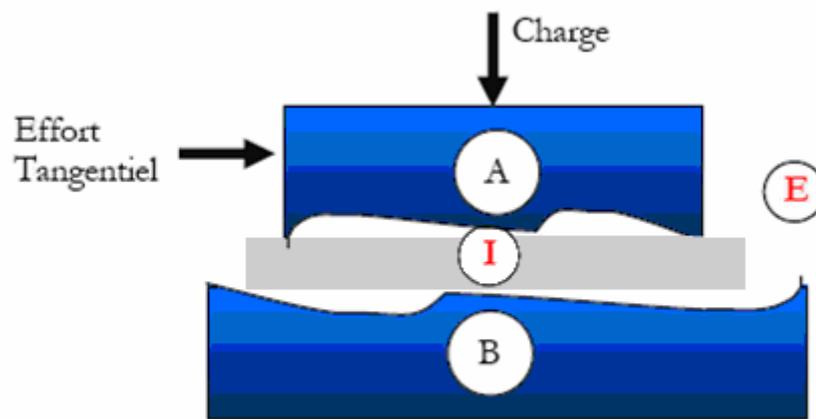


Figure I-1. Schéma d'un tribo-système

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.

Le phénomène de frottement n'est pas un phénomène unique. En effet, il existe plusieurs sortes de frottements :

- ❖ Le frottement sec (Figure: I-2-a), mis en évidence par Coulomb [2] apparaît lorsque deux surfaces physiquement distinctes sont en contact et sont enclines à glisser l'une contre l'autre. Ce frottement est dû à l'encastrement des petites irrégularités positives d'une des surfaces dans les irrégularités négatives de l'autre surface.

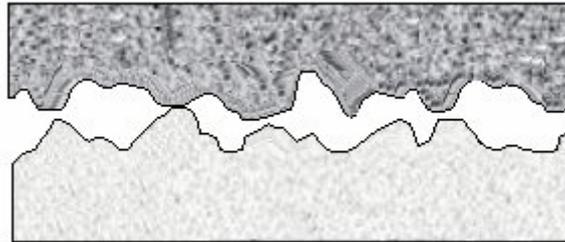


Figure: I-2-a. Frottement sec.

- ❖ Le frottement visqueux apparaît lorsqu'un fluide sépare les surfaces en contact (Figure: I-2-b). Le frottement visqueux est généralement moins important que le frottement sec. Il est dû à la viscosité du fluide.

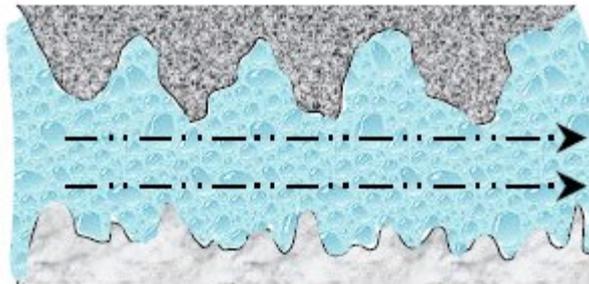


Figure: I-2-b. Frottement visqueux.

II-1-2. Mécanisme

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 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-3).

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.

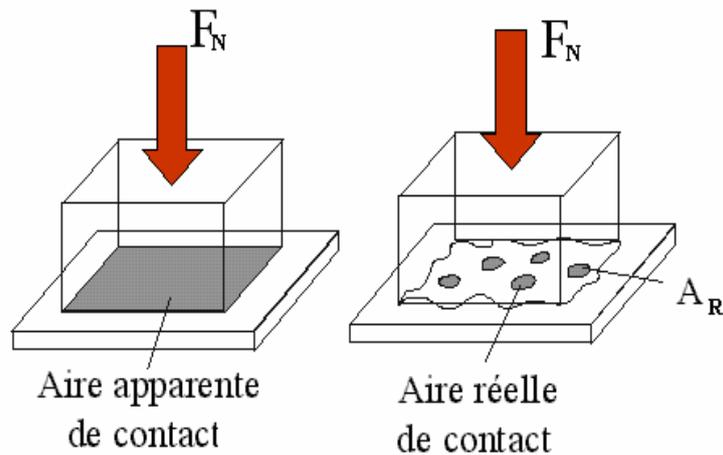


Figure I-3. Surface apparente et surface réelle de contact

D'après Bowden et Tabor, la force de frottement représente la force de cisaillement nécessaire pour rompre les jonctions adhésives formées entre les solides en contact. Si τ est la contrainte de cisaillement des jonctions, la force de frottement devient :

$$F = \tau A_R \quad (\text{I-1})$$

La relation qui permet de retrouver la proportionnalité d'Amontons-Coulomb [4] entre la force de frottement et la charge normale, en considérant des aspérités plastifiées :

$$F = \tau A_R = \tau \frac{F_N}{H} \quad (\text{I-2})$$

On définit l'aire apparente de contact (A_S) et l'aire réelle de contact (A_R), dans la pratique $A_R \ll A_S$.

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 [5].

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.

On peut également modifier l'aspect de la surface pour augmenter ou diminuer le coefficient de frottement entre deux surfaces. Une surface plus rugueuse entraînera une augmentation du coefficient de frottement alors qu'une surface plus lisse en diminuera sa valeur.

La présence matérielle entre les deux surfaces modifie le coefficient de frottement entre ces surfaces. Dans les moteurs automobiles, l'huile sert à diminuer le coefficient de frottement entre les pièces de façon à diminuer l'usure et à éviter une production de chaleur excessive.

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.

Le curling fournit un exemple où l'augmentation de la force normale entre en jeu, le frottement de deux surfaces résulte en une production de chaleur.

Une application de modification de la force normale se situe dans l'industrie automobile. La force de frottement des roues motrices d'une voiture à traction avant sera plus grande que pour une voiture semblable à traction arrière puisqu'un plus grand poids est situé au-dessus des roues avant qu'au-dessus des roues arrières.

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.

Si la surface de contact entre deux solides est diminuée mais que la force normale demeure la même, une plus grande pression est appliquée entre ces surfaces, ce qui a pour effet d'aplatir les rugosités, augmentant effectivement la surface réelle de contact entre les deux solides alors qu'elle apparaît diminuée. Cette surface demeure donc la même et la force de frottement demeure donc identique quelle que soit la grandeur de la base de solide. Ainsi, la largeur des pneus d'une automobile n'augmente pas la force de frottement entre la route et le pneu; une plus grande largeur diminue cependant la pression entre le pneu et la route, ralentissant ainsi le taux d'usure du pneu.

II-1-4. Lois classiques sur le frottement

Lorsque deux corps en contact se déplacent, il existe une force de frottement qui s'oppose au glissement. Le coefficient de frottement peut être statique ou dynamique [6] :

- ❖ statique: correspond à l'effort tangentiel nécessaire à créer la mise en mouvement
- ❖ dynamique: correspond à l'effort tangentiel nécessaire pour entretenir le mouvement

On considère la force et le coefficient de frottement comme des grandeurs qui dépendent de la nature des deux corps en contact:

- déformations plastiques ou abrasion ;
- cisaillement d'un film interfacial ;
- cisaillement des jonctions adhésives ;

Coulomb vérifia expérimentalement que la force de frottement était proportionnelle à la force normale [6] et fait la distinction entre force de frottement statique et dynamique. Oden et Martins [7] rapportent que les lois classiques sur le frottement qui résultent de l'étude du frottement depuis ces débuts sont les suivantes :

1)- La force de frottement est proportionnelle à la force normale du contact :

$$|F_T| \leq \mu F_N \quad (I-3)$$

où μ est le coefficient de frottement.

F_T la force tangentielle

F_N la force normale

Souvent, on définit deux valeurs pour μ : le coefficient de frottement statique μ_s que l'on applique pour détecter le début du glissement, le coefficient de frottement dynamique μ_d que l'on applique pendant le glissement.

2)-Le coefficient de frottement est indépendant de l'aire apparente du contact.

3)-Le coefficient de frottement statique est plus grand que le coefficient de frottement dynamique. La loi (I-3) peut être mise en évidence expérimentalement en utilisant la méthode du plan incliné par exemple pour le calcul des coefficients de frottement μ_s et μ_d

4)- Lorsque le mouvement tangential intervient, la force de frottement est dans la direction de la vitesse relative des deux corps, mais dans un sens opposé [6].

II-1-5. Les variations du coefficient de frottement

II-1-5-1. 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 (Figure I-4) ; 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 [5].

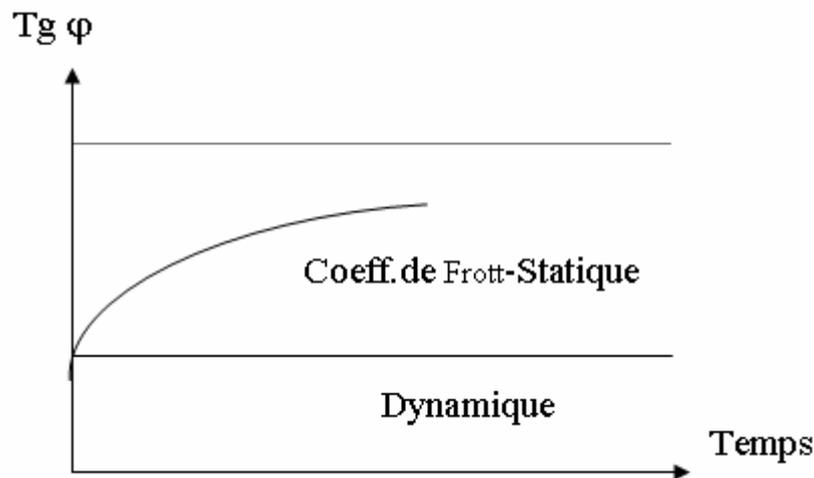


Figure I-4. Le coefficient de frottement statique varie avec le temps de maintien en immobilité

II-1-5-2. Variation du coefficient de frottement avec la vitesse

Si l'on ignore encore bien des choses sur 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 pendant 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 [5]: trempe, diffusion... etc.

II-1-5-3. Variation du coefficient de frottement avec la charge :

Le frottement de deux matériaux en atmosphère ordinaire fait intervenir leurs deux oxydes [5] :

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

II-1-5- 4. Variation du coefficient de frottement avec la température

- 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'oxyde 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 [5].

II-1-6. Différents modes de frottement

II-1-6-1. Frottement de deux corps sans interposition de lubrifiant

Il est bien connu qu'à l'échelle microgéométrique les surfaces même les mieux usinées sont loin d'être parfaitement planes, leurs contacts se fait donc par un nombre limité d'aspérités, les tribologues considèrent qu'il y a des modes d'interaction ente ces aspérités [14]:

- a- Déformation élastique.
- b- Déformation plastique.
- c- coupe ou abrasion.
- d- soudure.

II-1-6-2. Frottement avec lubrification :

Sans lubrification, deux pièces qui frottent l'une contre l'autre s'échauffent. La température atteinte peut devenir si importante qu'elle risque d'entraîner rapidement un grippage de surface de contact et la destruction des deux pièces. Pour éviter ce phénomène il faut intercaler entre les deux corps un film de lubrifiants (Figure I-5).

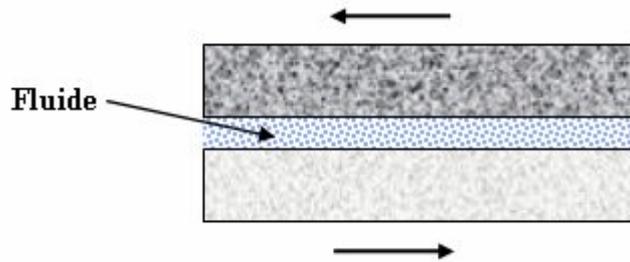


Figure I-5. Frottement entre deux surfaces en contact avec lubrification.

Les lubrifiants peuvent être à l'état gaz, liquide ou solide pour réduire le frottement et l'usure. Le principe de lubrification consiste à interposer entre deux pièces en contact un corps qui pourra transformer un glissement (frottement). Application de substance pour diminuer le frottement entre deux surfaces. Les différents types de lubrifiants sont [8]:

- Les huiles végétales : obtenues à partir du raffinement des végétaux.
- Les huiles minérales : obtenues à partir du raffinement du pétrole.
- Les huiles de synthèse : obtenues par réactions chimiques en laboratoires.
- Les graisses consistantes.
- Le graphite.

Les lubrifiants sont des matières fluides, gazeuses ou solides qui interposées entre deux pièces ont pour rôles de :

- ❖ Réduire la friction entre les pièces en mouvement.
- ❖ Absorber et évacuer la chaleur.
- ❖ Assurer l'étanchéité entre les segments des pistons et les parois des cylindres.
- ❖ Nettoyer, évacuer et filtrer les particules étrangères sur les pièces en mouvement.
- ❖ Protéger contre la corrosion.
- ❖ Permettre la mise en mouvement des pièces (quelle que soit la température).

II-1-7. Frottement (aspect métallurgique)

II-1-7- 1. Le frottement sec en régime statique

La théorie de Hertz élaborée par Hertz (1882) et Boussinesq(1885)[2] 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-6) :

- ❖ 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

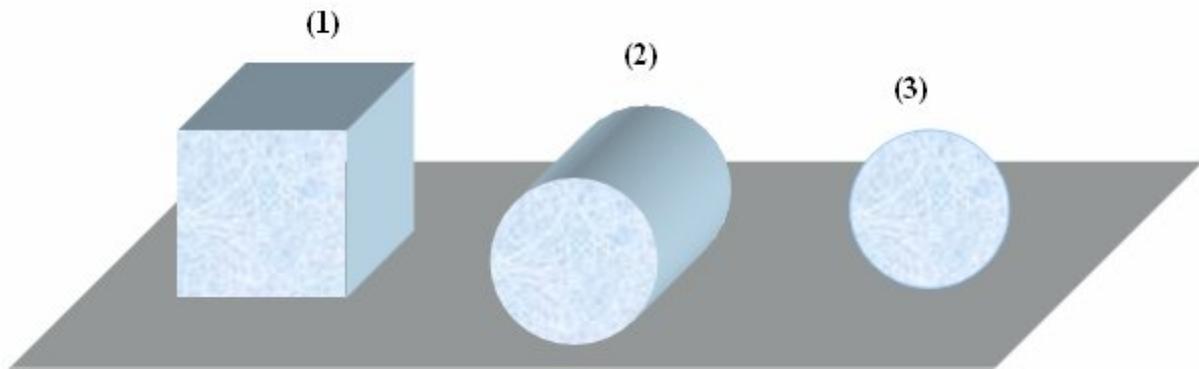


Figure I-6. Types de contacts fondamentaux. (1) contact plan/plan, (2) contact cylindre/plan, (3) contact sphère/plan.

Ceci a permis à Hertz de traiter les efforts fortement localisés dans le contact séparément de la distribution générale de l'effort dans les corps [9]. Pour que cette simplification soit justifiée, les dimensions de la zone de contact doivent être faibles comparés à celles des corps en contact. Il a également supposé que les contraintes en profondeur, en dessous de la région de contact, sont inférieures à la limite d'élasticité et qu'il n'y a pas de frottement.

Avec ces hypothèses, Hertz a trouvé analytiquement la distribution de pression qui satisfait les conditions limites sur la frontière des massifs à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire de contact.

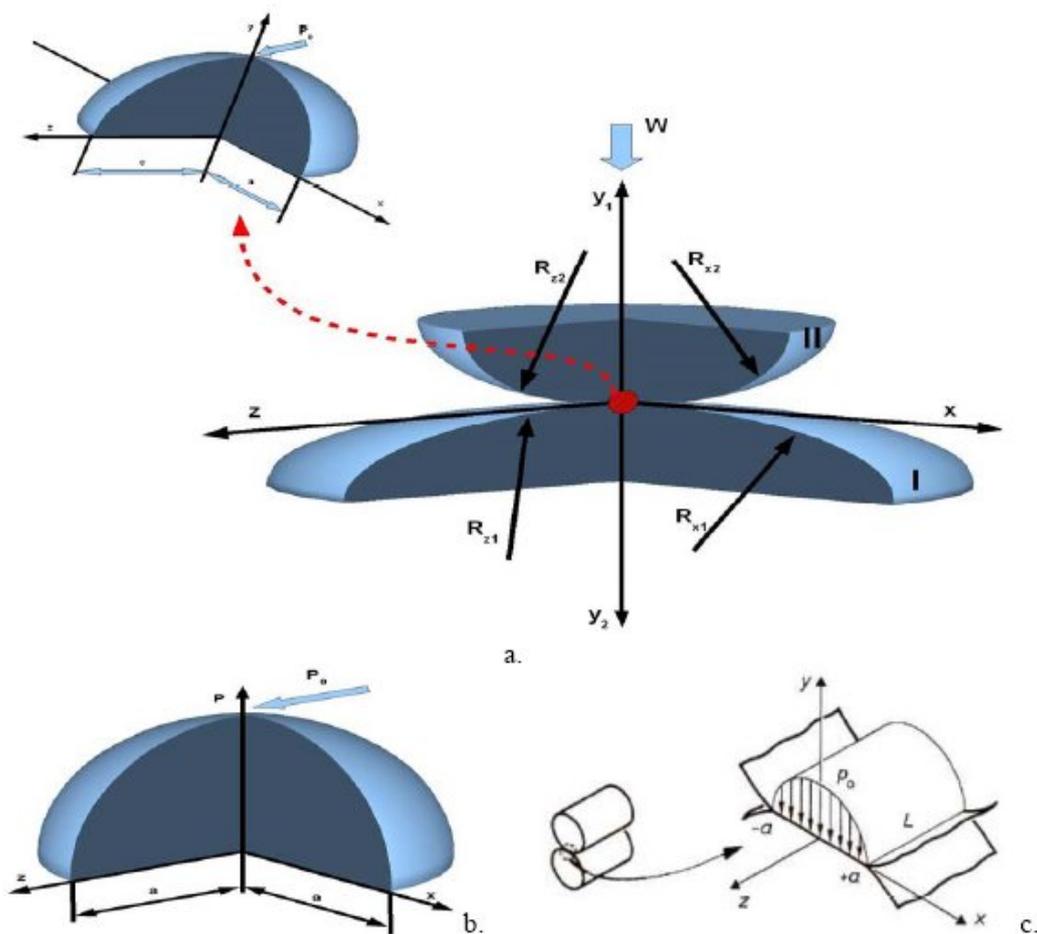


Figure I-7. La distribution de pression pour un contact hertzien
 a) contact elliptique – b) contact circulaire – c) contact linéique.

Dans le cas général de 2 ellipsoïdes en contact, la forme de la surface de contact n'est pas connue à l'avance, mais Hertz a prouvé que l'aire de contact est elliptique et que la distribution de pression est un semi-elliptique (Figure I-7 -a).

Un cas particulier de la théorie de Hertz correspond au cas du contact entre deux sphères, qui conduit à une aire de contact circulaire (Figure I-7 -b). Un autre cas particulier de la théorie de Hertz est le contact entre 2 cylindres à axes parallèles pouvant être considérés infiniment longs.

Un tel contact est bidimensionnel, la largeur de contact et la distribution de pression sont constantes selon l'axe. Ce type de contact est dit contact linéaire (Figure I-7-c). La théorie de Hertz ne tient pas compte de la rugosité des surfaces et suppose que l'on se place à une échelle macroscopique du contact. Ces lois ne sont valables que si les hypothèses suivantes sont vérifiées :

- ❖ les surfaces sont continues et non-conformes
- ❖ les déformations sont faibles
- ❖ chaque solide est considéré comme semi infini
- ❖ il n'y a pas de frottement
- ❖ le contact est de nature élastique, les matériaux sont homogènes et isotropes
- ❖ les surfaces sont sans frottement au niveau de l'interface (Plan de contact)

II-1-7- 2. Le frottement sec en régime permanent

Le frottement est dit en régime permanent lorsque les différentes caractéristiques (μ , taux d'usure, profil de trace,...) ont atteint leurs valeurs finales. Cette évolution dépend des conditions extérieures (taux de chargement, milieu ambiant,...).Le frottement est alors décrit par la loi de Coulomb [2] :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (\text{I- 4})$$

Les lois d'Amontons furent publiées en 1699, et sont comparables `a celles qu'avait décrit Leonard de Vinci deux siècles auparavant. Ces lois se résument en deux postulats (Figure I-8) :

- ⊕ La force de frottement F_T est proportionnelle à la charge F_N

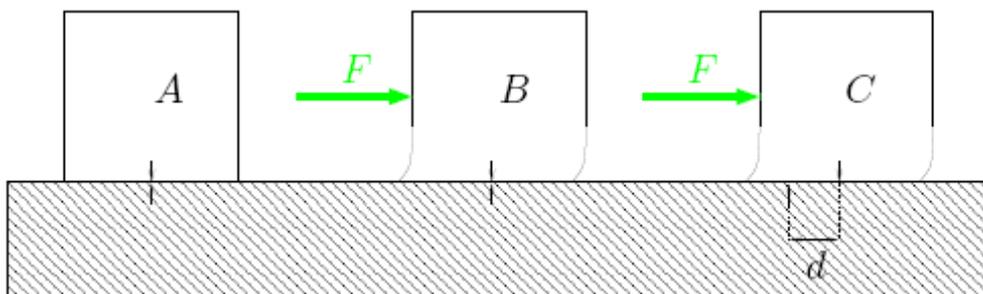


Figure I-8. Effet des élasticités de contact.

Cette figure montre dans le cas A, le solide est en contact avec le socle et ne subit pas d'effort tangentiel. Dans le cas B, bien qu'un effort tangentiel F soit présent et que les solides subissent un déplacement relatif, les points matériels communs aux deux surfaces ne bougent pas. Ce pré déplacement est absorbé par l'accommodation élastique des corps. Cette opération est quasi réversible car elle ne dissipe que peu d'énergie (frottement interne), la majorité étant stockée sous forme élastique. Dans le cas C, le déplacement relatif est suffisamment grand pour cisailer le contact et les surfaces glissent l'une par rapport à l'autre. Cette opération est irréversible.

✚ La force de frottement F_T est indépendante de l'aire apparente de contact A .

La première loi d'Amontons[2] est forte de sens, elle précise que l'effort nécessaire pour entretenir le glissement d'un solide est uniquement lié à l'effort normal F_N et que cette proportionnalité est constante et est appelée coefficient de frottement μ .

$$F_T = \mu \cdot F_N \quad \forall A_S \quad (I- 5)$$

A_s : Aire de contact apparente

F_N : la charge normale

Ce paramètre dépend uniquement du couple de matériaux en contact.

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 [2]. 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-9), on distingue trois phases [10]:

- 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.

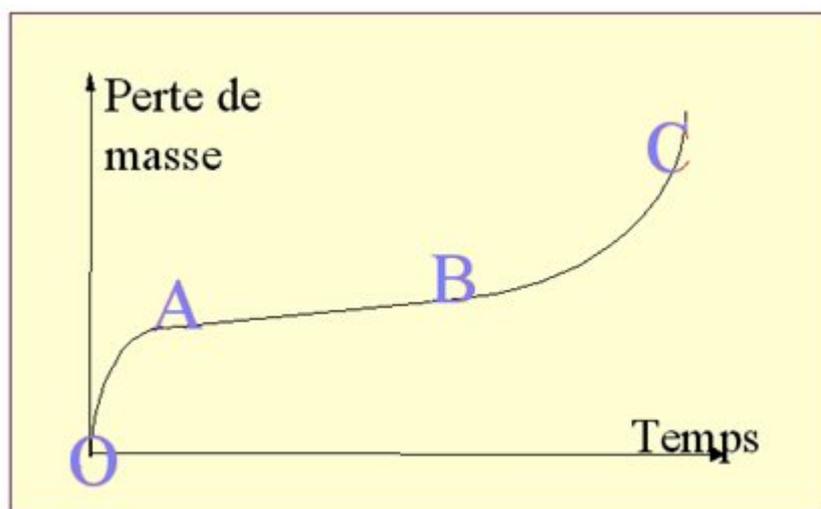


Figure I-9. Test de l'usure

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.
- ❖ l'usure sévère: les surfaces des corps sont modifiées, et la taille des particules dépasse 100 microns.
- ❖ l'usure catastrophique: la durée de vie est énormément réduite

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-10). 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].

Dans le cas où ces particules arrachées restent fixées à l'un des deux matériaux, l'abrasion est dite à deux corps. Dans le cas où des particules circulent à l'intérieur du contact par roulement ou glissement (particules issues du contact ou venues de l'environnement extérieur), l'abrasion est à trois corps (Figure I-11). Les débris émis par les surfaces acquièrent une dureté bien supérieure à celle des matériaux en présence à cause de leur écrouissage, provoquant ainsi une abrasion à trois corps.

L'abrasion écrouit aussi les couches superficielles qui durcissent et résistent alors un peu mieux à l'abrasion elle-même. L'usure est principalement proportionnelle à la

longueur cinématique du contact. Les charges agissent aussi directement ou indirectement, en brisant ou en déformant les grains ou aspérités abrasifs.

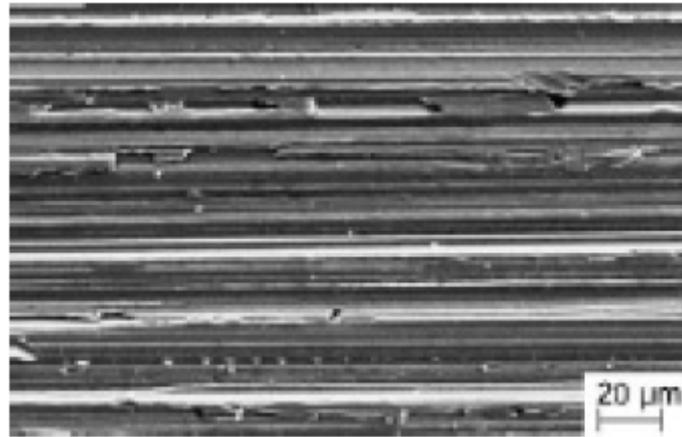


Figure I-10. Effet d'une usure par abrasion. Photographie d'une surface d'acier 100Cr6 après un meulage par disque de diamant [2].



Figure I-11. Usure par abrasion. (a) Abrasion à deux corps
(b) Abrasion à trois corps.

Le plus souvent pour lutter contre l'usure abrasive, on cherche à durcir les matériaux (au moins leur surface).

II-2-3- 2. L'usure par adhésion

L'usure par adhésion (Figure I-15) 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.

Ainsi, plusieurs paramètres influent directement sur l'usure par adhérence. Une dureté élevée (ou limite d'élasticité) permet de minimiser l'interpénétration des aspérités dans le corps le plus mou et de favoriser un cisaillement simple sans arrachement de matière. Bien que la présence inévitable de films d'oxyde puisse affaiblir localement la dureté et celles-ci sont arrachés de la surface, ils contribuent alors à lubrifier le contact en formant un lit ayant une faible résistance au cisaillement ou comme troisième corps [2].

Si le mouvement relatif est court devant le temps d'oxydation de la surface alors il y a entretien de cette couche. De plus, la nature des films d'oxyde en surface et leurs caractéristiques mécaniques propres sont d'autres paramètres importants.

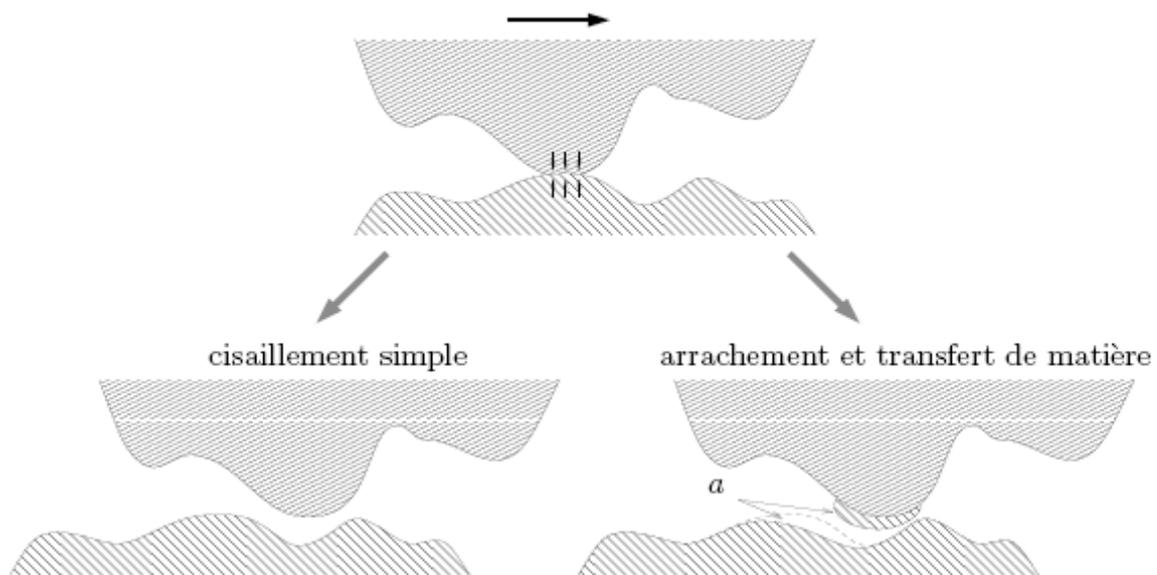


Figure I-15. Usure par adhésion. (a) débris arraché

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-12).

L'usure par fatigue est liée à l'action d'un mouvement cyclique et à la capacité des matériaux à absorber les énergies de déformation et les contraintes thermiques générées par frottement. Elle se manifeste par des fissures, des écailles et des changements de structure métallurgique [2].

Les comportements face à ce mécanisme d'usure dépendent de la nature du matériau. Dans le cas de matériaux ductiles (matériaux métalliques ou polymères), la rupture par fissuration (ou mécanisme de délaminage) a lieu en sous-couche, parallèle à la surface de frottement, dans les zones où les contraintes de cisaillement sont maximales. L'analyse des transferts thermiques sur la microstructure (déplacement des lacunes, des dislocations, des plans de glissement, l'effet des joints de grains...) explique la formation de fissure associée à un écouvissage ou à un adoucissement de la surface.

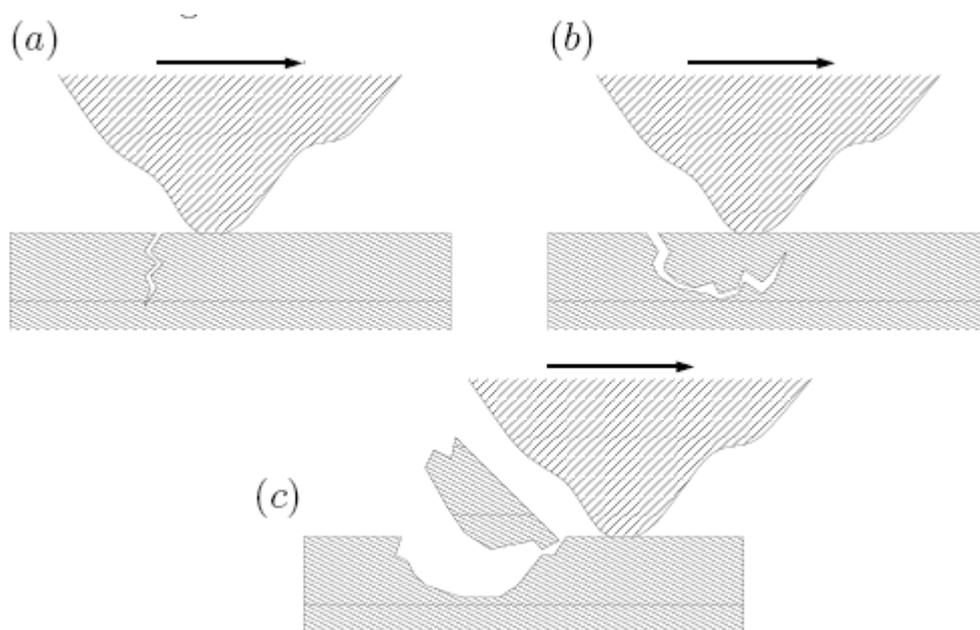


Figure I-12. Usure par fatigue. (a) Amorçage (b) Propagation (pitting) (c) Génération d'un débris (écaillage).

II-2-3- 4. L'usure par réactions tribochimiques

C'est un système à trois composantes, où interviennent la réactivité chimique entre les surfaces, la réactivité chimique avec le milieu environnant et la réactivité physico-chimique avec les débris. Ce type de dégradation résulte d'une seule ou de

plusieurs réactions chimiques sous l'effet d'agent corrosif (environnement, lubrifiant) et des contraintes mécaniques pendant le frottement. Suivant l'état structural superficiel, il se crée des oxydes réactionnels dépendant de l'environnement.

Suite au frottement entre les surfaces, la rupture des aspérités qui s'oxydent, forme des débris en général très stables et très durs. Ces derniers jouent alors un rôle abrasif et viennent dégrader les surfaces antagonistes et donc entretenir l'usure. Par contre, il est possible de rencontrer une configuration moins agressive par la formation de films d'oxydes adhérents à la surface d'un des antagonistes et suffisamment résistants au cisaillement pour jouer un rôle protecteur [10].

L'usure correspondant à l'ensemble des phénomènes conduisant à des pertes de masse ou à des évolutions géométriques significatives du contact pouvant s'accompagner d'effets secondaires liés au jeu dans le mécanisme en mouvement, à la perte de cote, à l'émission de débris, à l'endommagement de surfaces[6].

II-2-3- 5. 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 [2].

- La nature du matériau.
- Le comportement est très différent selon la nature du matériau.

Si ce dernier est ductile, on trouve des rides annulaires très écrouies et cassantes et le taux d'usure passe par un maximum. S'il est très dur et fragile, on ne trouve que des craquelures et l'usure augmente continûment avec l'angle d'incidence.

II-2-3- 6. L'usure par fretting

L'usure par fretting a été souvent appelée à tort corrosion de contact. Il s'agit d'une usure induite par petits débattements de l'ordre du micromètre jusqu'à une centaine de micromètres. L'évolution de l'usure provoquée par fretting a été décrite par les travaux de Fouvry et al [2]. Dans lesquels il démontre qu'il existe un seuil

d'endommagement irréversible (seuil de transition) au-delà duquel la durée de vie des pièces est diminuée.

L'usure augmente linéairement avec le nombre de cycles si l'atmosphère n'est pas oxydante, sinon elle est quasi exponentielle. Peu de processus sont aussi destructeurs. Une fois qu'elle est amorcée, on ne peut que retarder la destruction par des apports massifs de lubrifiants.

Afin de prévenir le fretting, il faut limiter l'adhésion par l'emploi d'un traitement surfacique ou de matériaux peu solubles et par l'emploi d'un troisième corps lubrifiant.

II-2-4. Evaluation de l'usure

De nombreux auteurs [11-12] ont proposé des modèles pour décrire et évaluer l'usure. Les relations empiriques proposées se présentent sous la forme de loi d'usure expérimentale de ARCHARD (1950) :

$$V = K \frac{F_N \cdot L}{H} \quad (\text{I- 6})$$

Où

V : est le volume de matière enlevée,

K : est le coefficient d'usure,

L : est la distance de glissement,

F_N : est la charge normale appliquée

H : la dureté du matériau.

Cependant, on observe quelques écarts par rapport à la relation empirique précédente (I- 6), car le volume **V** n'est en général pas une fonction linéaire de la distance de glissement [13]. D'autre part, dans un couple frottant, la substitution d'un matériau de dureté **H** par un matériau ayant la même dureté ne conduit pas forcément à un volume d'usure identique.

De plus, pour les matériaux fragiles, l'usure est contrôlée essentiellement par les mécanismes de rupture puisque l'enlèvement de matière se produit par l'intersection des fissures latérales ou par leur propagation jusqu'à la surface. Parmi les origines d'usure qui existent on peut citer la plus simple sont :

- ❖ les déformations plastiques ;
 - création, déplacement de dislocations;
 - rayures, impacts ;
- ❖ les fissurations ;
 - brutale, progressive ;
 - initiation, propagation
- ❖ les transformations physico-chimiques des surfaces ;
 - transformations de phase: amorphisations ;
 - réactions chimiques ;
- ❖ adhésion ;
 - transferts à l'échelle atomique ;
 - évolution "boule de neige", micro-grippage, grippage ;

II-2-5. Facteurs de l'usure

II-2-5- 1. Mode de contact

La forme géométrique de la pièce avant utilisation permet de distinguer [14]:

- ❖ les contacts ponctuels
- ❖ les contacts linéaires
- ❖ les contacts surfaciques

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

II-2-5- 2. Etat de surfaces microgéométrique

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 [14].

II-2-5- 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 [14].

Appliquée avant ou après le début du glissement, elle peut, pendant une expérience, garder une valeur constante ou varier de façon progressive ou échelonnée, c'est un facteur important dont dépend le processus d'usure. La charge peut être constante, oscillante ou par chocs. Elle peut être uniforme ou non uniforme.

II-2-5- 4.La vitesse

Il s'agit, suivant le cas des vitesses de glissement, de roulement ou de pivotement, dans le cas du glissement lubrifié, elle est un facteur important d'établissement du régime hydrodynamique [14]. Nul au départ, puis croissant progressivement, elle peut au point d'une surface, garder toujours la même direction ou bien changer périodiquement de sens. Elle peut aussi 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 projectiles se déplaçant sur leurs guides.

II-2-5- 5. Ambiance

Par ce terme, nous entendons la nature du milieu, ainsi que les conditions de pression et de température qui entourent les pièces dans la région du contact y compris la lubrification [14].

II-2-5- 6. Les propriétés mécaniques

Parmi les facteurs les plus importants qui ont une considérable influence 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 ces derniers (la dureté et la ténacité) dépend du type de contraintes appliquées aux surfaces 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. Les paramètres influençant le taux d'usure sont :

- la force de contact.

- la température.
- l'aire de contact.
- l'état physico-chimique des surfaces frottantes (la rugosité, les couches d'oxydes).
- la structure cristallographique et les propriétés mécaniques des matériaux (la dureté).
- l'absence ou la présence d'un lubrifiant.
- la présence d'agents actifs en frottement (additifs anti usure).

II-2-6. 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 (Figure I-13). 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 [10]. 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. Il est artificiel lorsqu'il est apporté dans le contact comme pour la lubrification solide ou fluide. Un 3ème corps naturel implique une période de formation par détachement de particules des 1ers corps.

Les résultats expérimentaux montrent que l'accommodation de vitesse dans le troisième corps s'effectue:

- ❖ Par glissement à la paroi ;
- ❖ Par déformation dans son épaisseur ;
- ❖ Le long de front de rupture ;

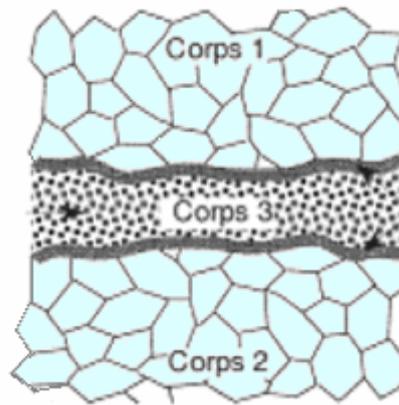


Figure I-13. Le concept de troisième corps

II-2-7. Approche globale du troisième corps

Cette approche constitue un élément important de généralisation dans l'évolution du comportement trilogique d'un couple de matériaux [15]. Elle peut s'appliquer aussi bien dans le cas de métaux, de polymères que pour les céramiques [16]. 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 élimine les écrans statiques et provoque la formation des particules d'usure qui sont piégées 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-2-7-1. Création et piégeage des débris d'usure

La création des débris débute quand 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 matériau étudié (abrasion, adhérence, fatigues...) et au mode de sollicitation imposée. Les premières particules (débris) se détachant, des massifs sont piégés dans le contact. La figure (I-18) montre bien un modèle bidimensionnel où la rigidité de la surface qui est vide au départ par les débris d'usure [17].

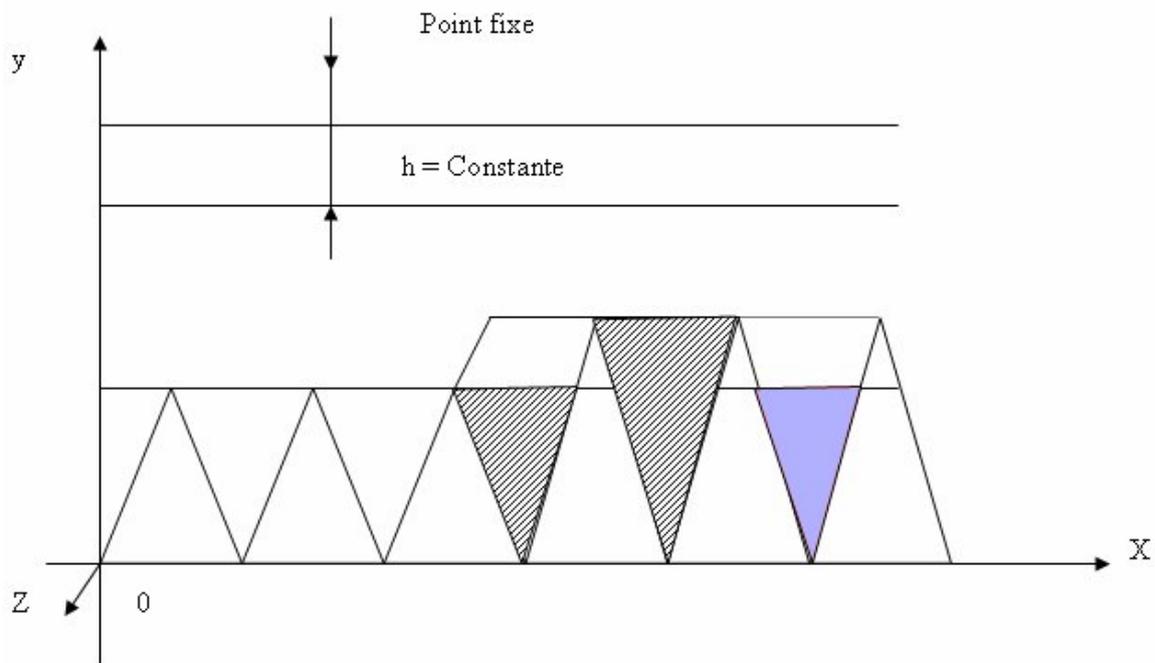


Figure I-18. Formation des troisièmes corps.

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 inférieure à $100 \mu\text{m}$ (Figure I-19).

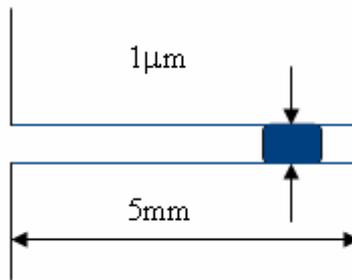


Figure I-19. Echelle de contact (taille relative des particules d'usure)[17].

II-2-7-2- Evolution des débris

Les particules détachées, d'abord de nature que le matériau dont elles sont à l'origine, vont alors se varier en taille et en composition, une fois libérés, les débris d'usure sont broyés dans le contact, d'intenses déformations plastiques accompagnant leur fragmentation.

Dans le cas d'un contact fermé, le suivi de la formation du lit montre que les particules s'oxydent rapidement [18]. Lorsque les troisièmes corps s'interposent entre les corps en contact, non seulement ils peuvent supporter les charges normales appliquées mais surtout ils forment un écran qui sépare au moins partiellement les deux premiers corps, et présentent par conséquent un phénomène de portance équivalent à un film liquide.

II-2-7-3- comportement du lit de débris

Le comportement du troisième corps au cours du frottement dépend de plusieurs paramètres. Essentiellement, il dépend de sa dureté, de son maintien à la surface (adhérence) et de son comportement rhéologique. Le maintien des débris dans le contact ou leur élimination est gouverné principalement par : la géométrie du contact, sa dimension autrement dit sa capacité à retenir les débris. Une empreinte de faible taille dans un système (sphère-plan «contact ouvert») éliminé plus facilement ses débris que dans une configuration (plan-plan «contact fermé»).

Le comportement dépend aussi de la rhéologie du troisième corps qui est liée plus particulièrement à l'aptitude des débris à s'agglomérer entre eux, à former des couches interfaciales continues suffisamment résistantes pour créer une barrière efficace entre les surfaces : des débris qui restent pulvérulents. Notons enfin,

l'environnement mécanique du système étudié, en particulier les vibrations qui accélèrent l'évacuation des débris [19].

II-2-8-Rugosité de surface

La rugosité C'est l'ensemble des irrégularités d'une surface à caractère micrographique et macrographique. Les surfaces usinées ne sont pas parfaites, elles présentent des irrégularités dues aux procédés d'usinage, aux outils, à la matière, etc.

En dépit des apparences macroscopiques et quel que soit le degré de finition ou le mode de fabrication, toutes les surfaces sont rugueuses. Imperceptible à échelle macroscopique, la rugosité d'une surface est significative à l'échelle microscopique, provoquant la fragmentation de l'aire apparente de contact de deux solides en une multitude de zones individuelles de contact [2]. La rugosité joue donc un rôle essentiel dans la détermination de l'aire réelle de contact entre surfaces (Figure I-20).

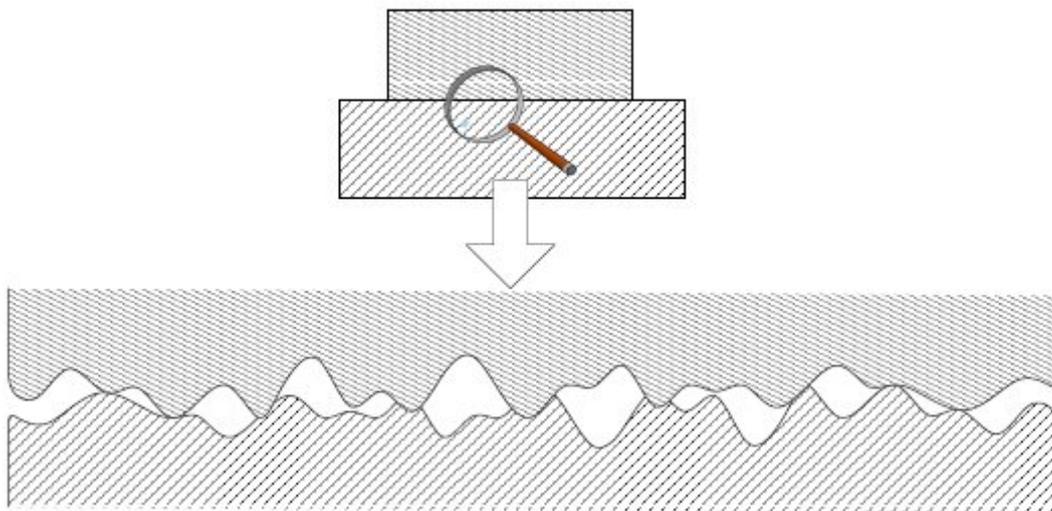


Figure I-20 -Rugosité de surface.

Conclusion

La tribologie est ainsi une science par essence pluridisciplinaire. Le phénomène de frottement résulte non pas d'un mécanisme unique, mais d'une multitude de phénomènes complexe et souvent couplés, qui aboutissent in fine aux lois pourtant simples d'Amontons-Coulomb.

De tous temps, les pièces mécaniques (organes mécaniques) se sont usées par frottement. Plus particulièrement, la présence d'inclusions dans cette étude l'usure par abrasion est un problème déterminant dans la durée de vie des pièces. Son influence a été étudiée en détail et les phénomènes de dégradation mis en jeu sont bien connus.

Aujourd'hui, l'amélioration de la qualité des aciers et la sévèrisation des conditions de fonctionnement, ne sont pas bien situées. En effet, autour des inclusions au cœur de la structure, mais dans une zone proche de la surface. Les paramètres déterminants vis à vis de cette nouvelle zone critique sont connus, mais leur influence sur la durée de vie des pièces l'est beaucoup moins.

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 ;
- ❖ Rugosimétrie ;
- ❖ Dureté ;
- ❖ Essais mécaniques ;

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 notamment en frottement et le comportement mécanique (traction, compression flexion et choc). Les aciers présentent un ensemble de caractéristiques qui permettent d'une part leur mise en oeuvre (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) :

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 %)

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:

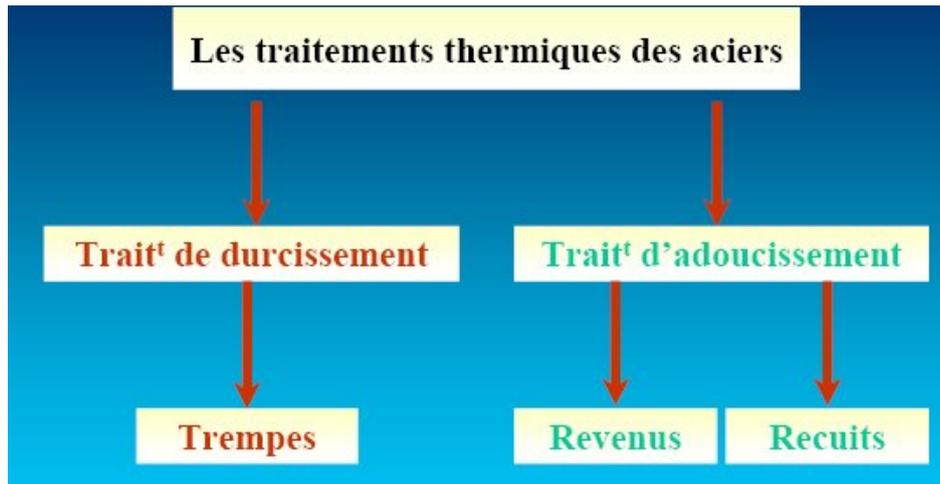


Figure II-1. Schéma présentant les traitements thermiques

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.

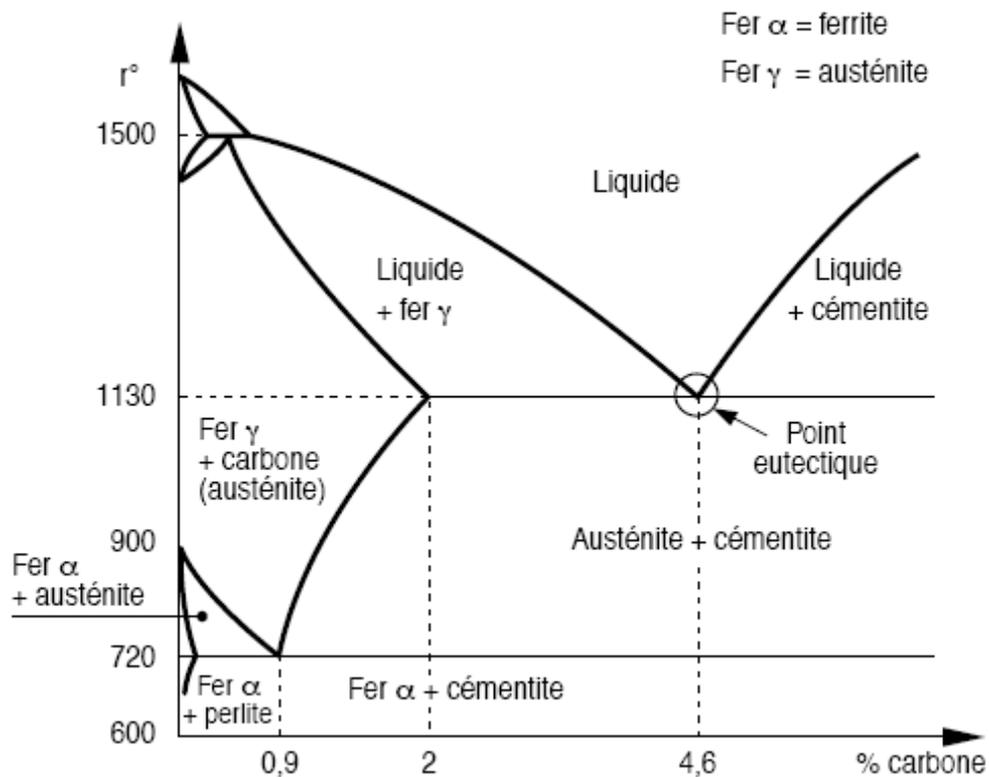


Figure II-2. Diagramme fer – carbone

- **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.

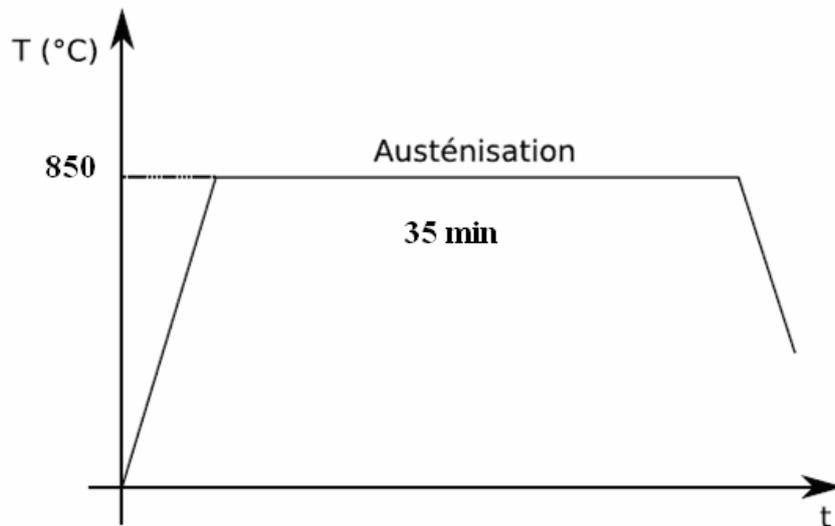


Figure II-3. Cycle de trempe à l'huile de l'acier 100Cr6

- ❖ 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

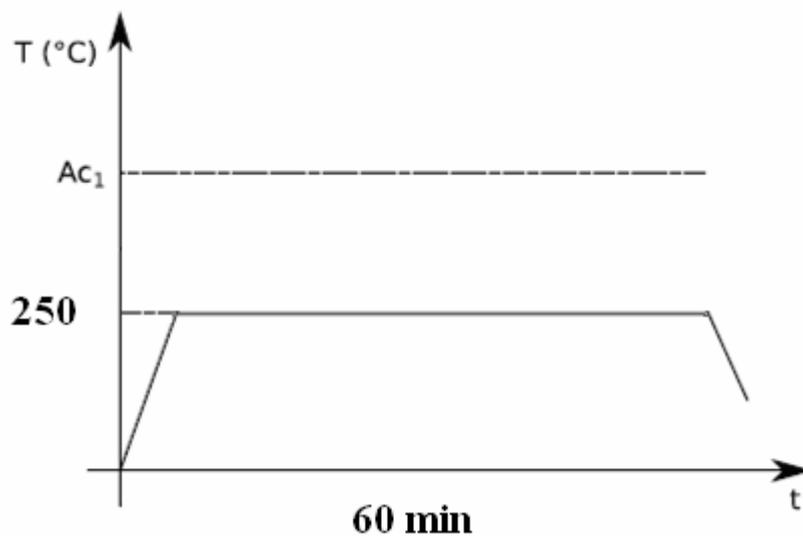


Figure II-4. Cycle de revenu de l'acier 100Cr6

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.

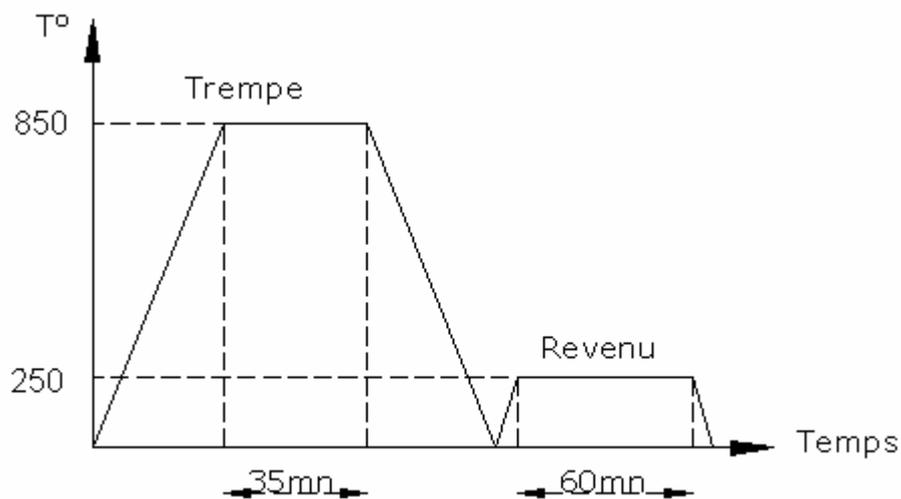


Figure II-5 .Cycle thermique de Trempe à L'huile de l'acier 100Cr6

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 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 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 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 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.

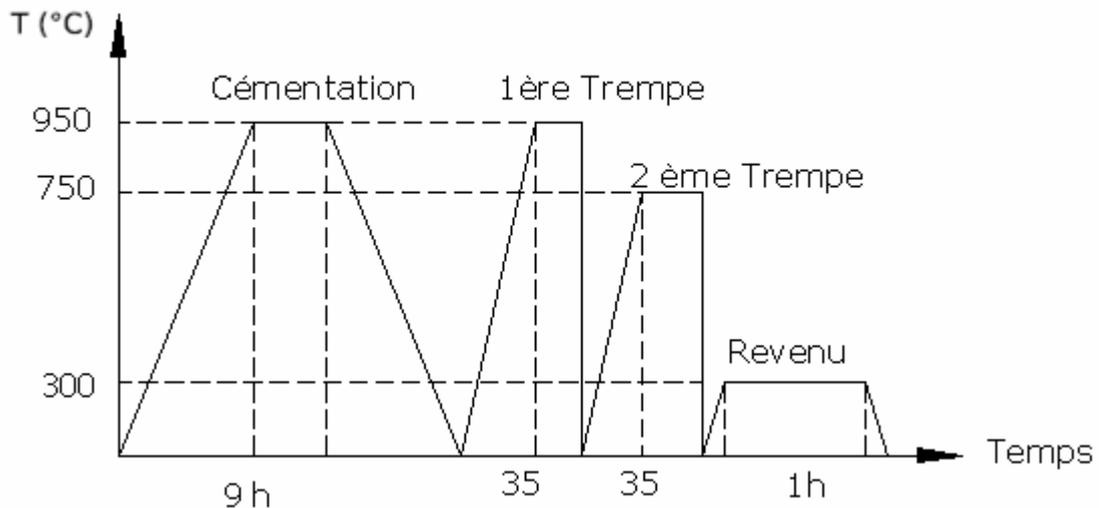
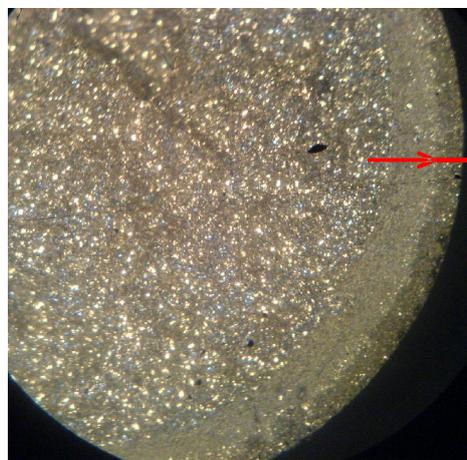


Figure II-6. Cycle thermique de cémentation de l'acier 16MnCr5



La couche cémentée

Figure II-7. 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.



Figure II-8 : appareil de dureté (WOLPERT)

- **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. Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge (Figure II-9).

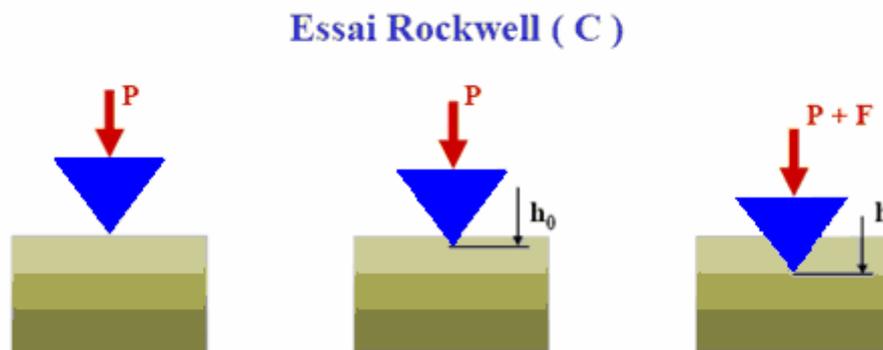


Figure II-9. Essai Rockwell (c)

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-3. Dureté des matériaux étudiés

Les empreintes de la dureté Rockwell (cône) pour les deux matériaux avant et après le traitement sont représentées sur les figures (II-10, II-11, II-12, II-13).



Figure II-10. Empreintes (cône) HRC pour 16MnCr5 non traité (X40)



Figure II -11. Empreintes (cône) HRC pour 16MnCr5 cémenté (X40)

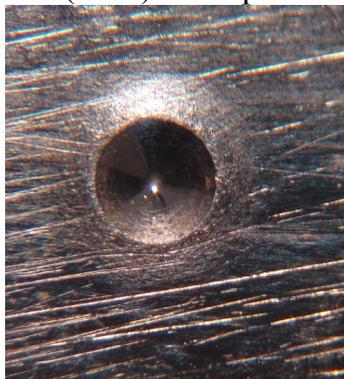


Figure -12. Empreintes (cône) HRC pour 100Cr6 non traité (X40)

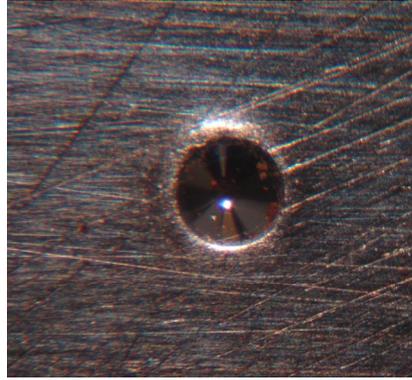


Figure II-13. Empreintes (cône) HRC pour 100Cr6 trempé (X40)

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 thermiques et thermo-chimiques augmentent la dureté et améliore les propriétés mécaniques des aciers.

II-2. Essai de résilience (résistante aux chocs)

Cet essai est destiné à caractériser la fragilisation du métal sous l'action d'un choc et la détermination de la résistance au choc des pièces, qui est une caractéristique primordiale pour le choix des matériaux dans la construction. Les essais de résilience ont été effectués sur un Mouton pendule CEAST, modèle 6548, Société ADAMEL LHOMARGY, 94203 (Figure II-14).



Figure II-14. Machine d'essai de choc Charpy

L'éprouvette est constituée d'un barreau entaillé (pour localiser la rupture) par usinage en son milieu. La forme d'entaille la plus fréquente est la forme en V (selon normes ISO 179, ASTM E23, EN 10045) d'une profondeur de 2 mm, et le rayon à fond d'entaille 0,25mm (Figure II-15).

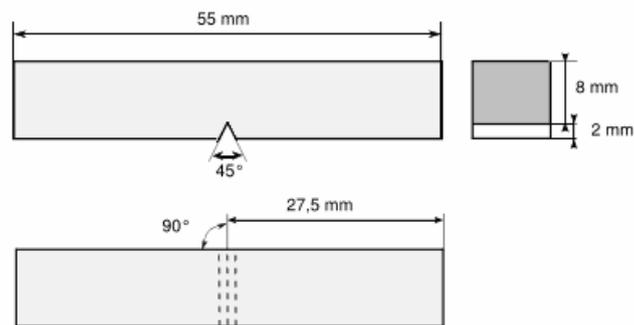


Figure II-15. Dimensions et forme de l'éprouvette Charpy en V.

Le principe de l'essai consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. On utilise un mouton-pendule (Figure II-16) muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc.

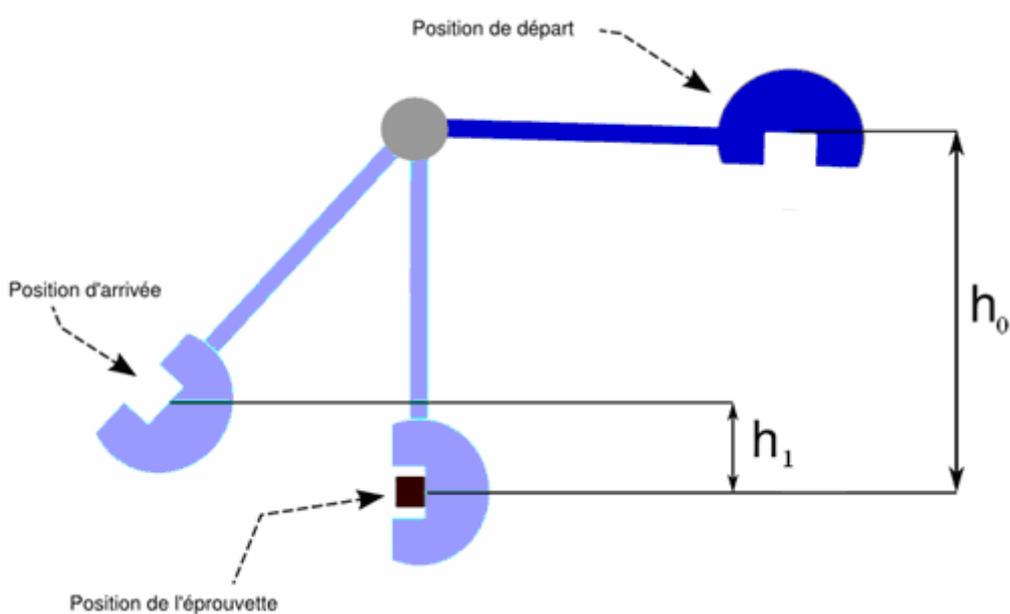


Figure II-16. Représentation du mouton-pendule

L'éprouvette d'essai est placée horizontalement devant ses appuis (Figure II-17), est cassée par percussion unique d'un pendule. On détermine ensuite l'énergie **W** absorbée dont on déduit la résilience.

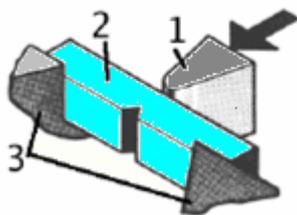


Figure II-17. Schéma de fonctionnement : 1) couteaux 2) éprouvette KV 3) appuis

La machine de l'essai de la résilience donne directement la valeur de l'énergie absorbée en joule.

Résilience= Energie absorbée par la rupture W (Joules)/Section au droit de l'entaille (cm^2)

$$K_{cv} = \frac{W(J)}{S'(cm^2)} \quad (II-1)$$

K_{cv}: La résilience (**J/cm²**)

S': section (cm^2)

W: Energie absorbée (J)

Nous avons réalisé l'essai de résilience sur les deux aciers (16MnCr5, 100Cr6) avant et après traitement thermique et thermochimique, Les résultats sont résumés dans le tableau suivant:

Nature Acier	Résilience Kcv (J/cm^2)
16MnCr5 non traité	28.75
16MnCr5 cémenté	13.85
100Cr6 non traité	15
100Cr6 trempé	6.87

Tableau II-4. Résilience des matériaux étudiés

La résistance au choc donne une mesure de la capacité du matériau de résister à la rupture pour cela nous avons caractérisée, ces données par le histogramme (figure II-18) de la résilience et la dureté :

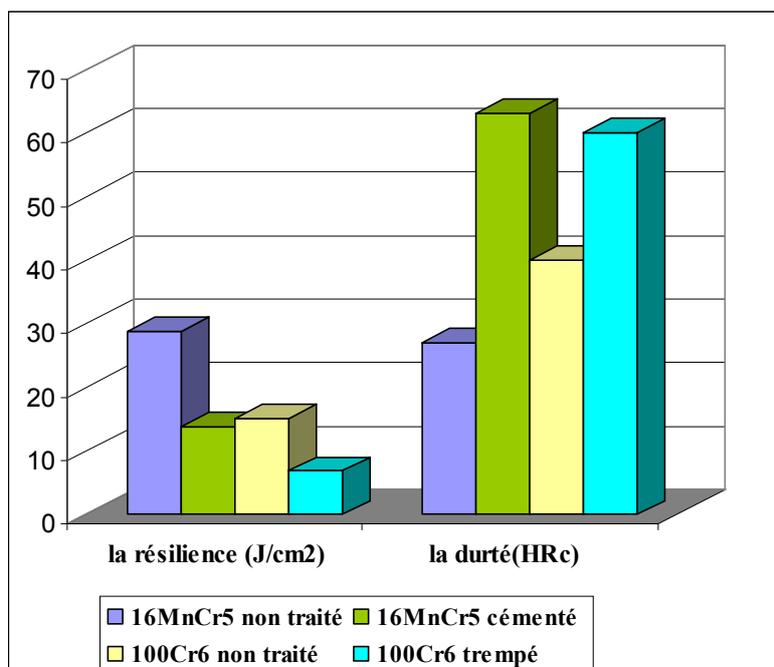


Figure II-18. Les valeurs de la résilience et la dureté pour les deux aciers

Comme l'essai de résilience sert à classer les matériaux entre eux on peut dire que l'évolution de la probabilité de rupture en fonction de l'énergie absorbée pour l'éprouvette est différente pour les deux aciers étudiés (16MnCr5 et 100Cr6), ce qui a été prouvé par l'essai pratique élaboré sur ces aciers , on note que d'après les valeurs requises l'acier 16MnCr5 non traité montre une très grande résistance au choc suivi de l'acier 100Cr6 non traité , suivi de 16MnCr5 cémenté et enfin vient l'acier 100Cr6 trempé. Ceci explique que les traitements thermiques et thermochimiques exercés sur les deux aciers ont apporté les changements des propriétés mécaniques .on retient que la résilience est inversement proportionnelle a la dureté.

II-3. Essai de traction

La traction consiste à "tirer" sur une éprouvette de longueur et de diamètre normalisé, fabriquée dans le matériau à tester, jusqu'à sa rupture. L'essai de traction est donc un essai destructif. Les essais de traction permettent de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile, rigide ou souple. Ils permettent aussi de connaître les caractéristiques mécaniques (Elasticité R_p , Résistance R_m , Allongement $A\%$, Module de Young E).

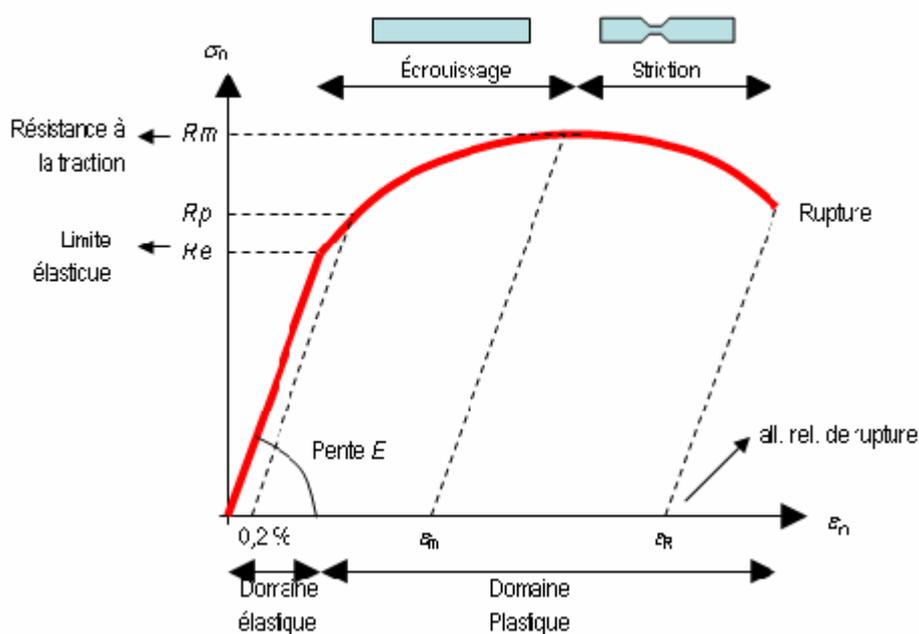


Figure II-19: Courbe $\sigma = f(\epsilon)$.

- le module d'élasticité **E** (ou module Young) est donné par la pente de la partie élastique de la courbe $\sigma = f(\epsilon)$ (voir figure II-19).
- la limite d'élasticité (**R_e**) qui correspond à la contrainte nominale à partir de laquelle se produit la déformation plastique.
- la résistance à la rupture **R_m** qui correspond à la contrainte nominale maximale supportée par l'éprouvette.
- la déformation à la rupture (**ε_R**) qui correspond à la déformation plastique nominale à la rupture en traction de l'éprouvette.

Déterminations des valeurs vraies et apparentes des caractéristiques mécaniques :

$$\sigma = F/S \quad (\text{II-2})$$

σ: Contrainte normal en (**Mpa**)

F: la force (**N**)

S: L'aire de la section (**mm²**)

-On définit la déformation longitudinal comme suit:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{II-3})$$

ε: déformation- longitudinalale (sans unité)

l₀: correspond à la longueur initiale de l'éprouvette. (mm)

l: correspond à la longueur de l'éprouvette après allongement. (mm)

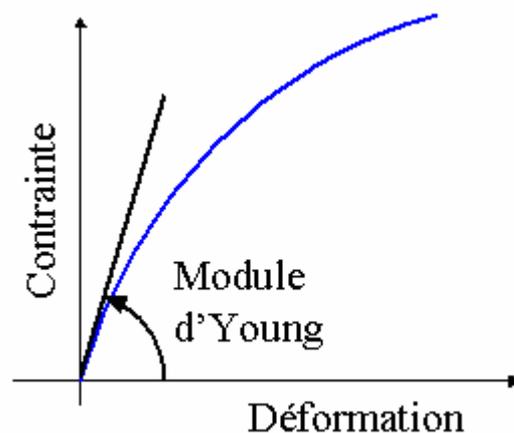


Figure II-20. L'essai de traction

- Relation contrainte- déformation:

Loi de Hooke :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{II-4})$$

E: module Young du matériau en (Mpa) est donné par la pente de la partie élastique de la courbe $\sigma = f(\varepsilon)$ (voir Figure II-20).

▪ Test de traction

La caractérisation mécanique des matériaux a pour objectif la détermination des propriétés mécaniques (limite élastique, module d'Young, dureté, allongement à la rupture, l'évolution de l'écroutissage...) à l'aide des essais mécaniques.

Les propriétés de traction à température ambiante fournissent plus d'informations quant au rôle des différents constituants sur le comportement des aciers.

En effet, des essais effectués à température ambiante donnent des résultats différents de ceux effectués à haute température. De même, la vitesse de déformation est un autre paramètre qui influe sur les propriétés mécaniques de ces matériaux.

Dans ce paragraphe, on présente une synthèse des travaux de caractérisations mécaniques des aciers (16MnCr5 ,100Cr6).

Pour notre étude nous avons réalisé un nombre important d'expériences sur des éprouvettes préparées à l'atelier. Les essais ont été réalisés à une vitesse 3 mm/min et une température de 20° C, au moment de la manipulation

Les caractéristiques sont déterminées au cours d'un essai de traction dont les modalités sont définies par la norme NF EN 10002-1. Lors d'études expérimentales permettant de déterminer les propriétés en traction des aciers, on trace les courbes décrivant l'évolution de la déformation en fonction de la contrainte appliquée. Ces courbes permettent en outre de caractériser le matériau en identifiant la limite élastique, le module élastique, la résistance ultime, la ductilité, la fragilité, la zone de striction, l'allongement à la rupture.

Les essais sont réalisés sur une machine de traction Zwick(Figure II-21) dans le laboratoire d'essais mécaniques URASM ANNABA .Les paramètres de réglage ne servent en fait qu'à caractériser un essai par des détails plus ou moins importants (par exemple les dimensions de l'éprouvette). Le pilotage se fait en automatique par le PC à l'aide du programme (Zwick –Z1011) sous Windows. Le programme permet de choisir le type d'essai et les valeurs des paramètres associés (paramètres automatiquement enregistrés dans le fichier de données créé), émet des messages indiquant l'ordre des opérations à effectuer.



Figure II-21. Machine«147670 » d'essai de traction
D'après la norme EN.10002-1

On place l'éprouvette entre deux mors puis on la soumet à un effort croissant régulièrement et lentement (Figure II-22). De cette manière, une partie de ce matériau sera soumise à une traction.

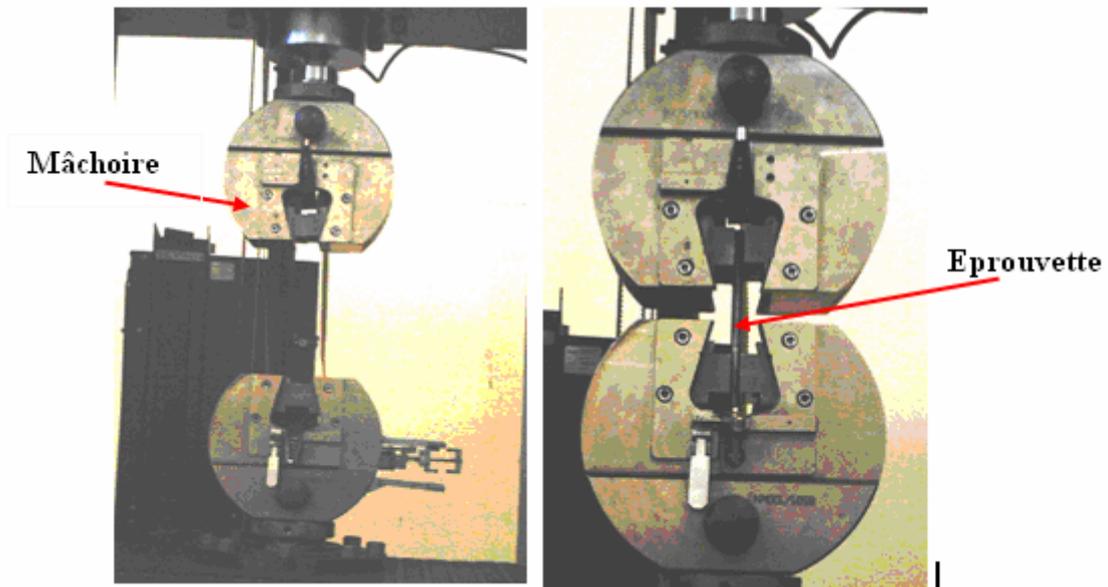


Figure II-22. Insertion de l'éprouvette dans les mâchoires de la machine de traction

On admettra que la force extérieure exercée sur le domaine défini se répartit uniformément sur cette section. Durant cet essai, on enregistre l'évolution donnant, la contrainte en fonction de l'allongement de l'éprouvette, l'intensité avec laquelle on "tire", avec une vitesse de déplacement constante et la température ambiante.

- **Résultats des essais**

En réalisant des essais de traction sur les aciers 16MnCr5 et 100Cr6 traités et non traités (Figures II-23, II-25, II-26, II-27), on constate les comportements suivants :

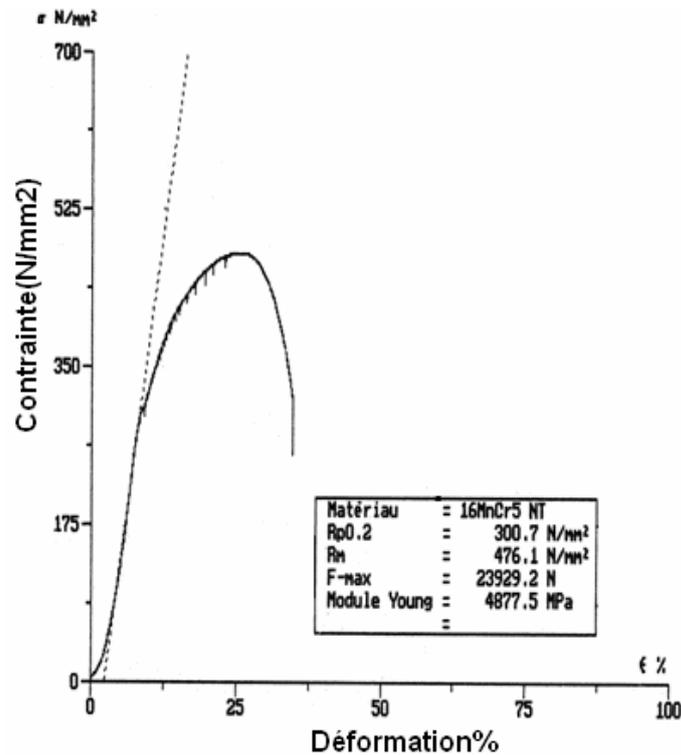


Figure II-23. Courbe de traction pour l'acier 16MnCr5 non traité.

Pour l'acier 16MnCr5 doux (0,19%C) figure (II-23), on remarque en premier temps, que la courbe est une pente linéaire. Cette dernière donne le module de Young $E=4877.5\text{MPa}$ et on obtient une déformation élastique à partir d'un certain allongement, la courbe s'infléchit : c'est le début de la déformation plastique. La transition peut être franche (rupture de pente), ce qui permet de déterminer facilement la limite élastique R_e , on prend alors la contrainte donnant 0,2 % de déformation, $R_{e0.2}=300.7\text{N/mm}^2$.

Ensuite la courbe présente un maximum d'allongement qui détermine la contrainte à la rupture R_m , à partir de ce point, la déformation est concentrée dans une zone, appelée la striction « étranglement » ; la rupture a ensuite lieu dans cette zone (figure II.-24) .

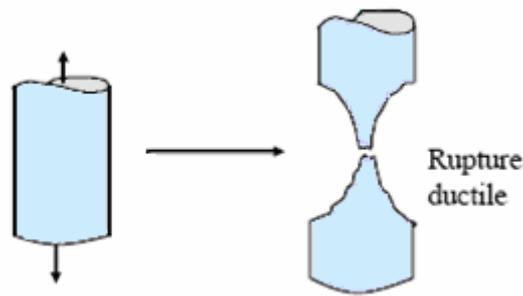


Figure II-24. La rupture d'un acier ductile (étranglement)

L'évolution de la courbe de traction de l'acier 16MnCr5 cémenté (la contrainte en fonction de la déformation) est reportée sur la figure (II-25).

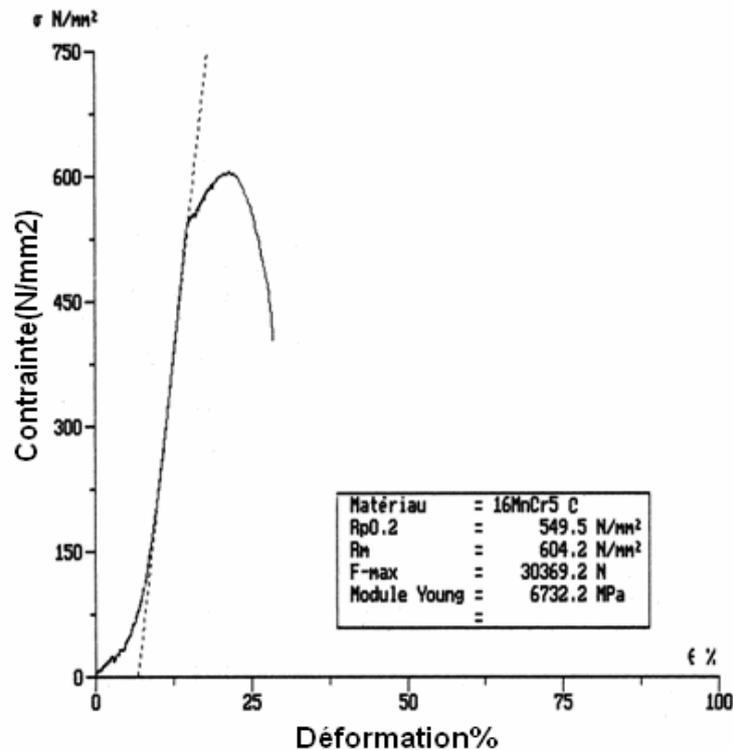


Figure II-25. Courbe de traction pour l'acier 16MnCr5 cémenté.

Cet acier montre comme beaucoup d'aciers ferritiques, la particularité de la présence d'un crochet .ce dernier marque une étape de la limite de l'élasticité qui nous permet de déterminer le module de Young $E=6732.5\text{Mpa}$, la résistance à la traction $R_m=604.2\text{N/mm}^2$ et la localisation de la déformation.

La présence de la couche de cémentation rend l'acier faiblement ductile et accroît la vitesse de propagation des fissures.

Le comportement en traction de l'acier dur 100Cr6 (1%C) non traité, fait étaler les étapes suivantes (figure II-26) :

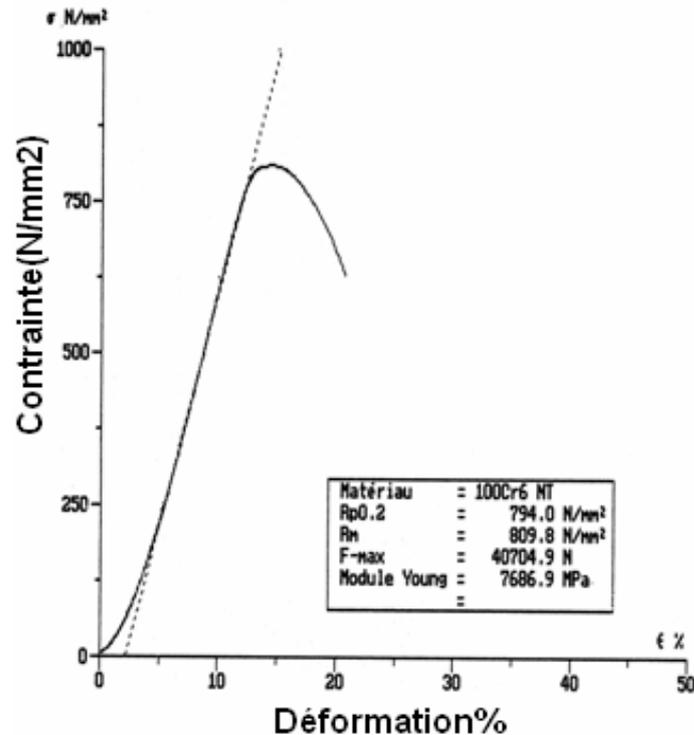


Figure II-26. Courbe de traction pour l'acier 100Cr6 non traité.

Au cours de cet essai, la courbe de l'acier 100Cr6 présente une pente initiale qui indique un module de Young est élevé $E=7686.9\text{Mpa}$, et on enregistre la valeur de la résistance à la traction $R_m=809.8\text{ N/mm}^2$, tandis que l'allongement est de 10 % . , Sous l'action de cette résistance à la traction, l'acier va se déformer de manière élastique.

Cette déformation élastique, va se poursuivre jusqu'à la rupture de l'éprouvette, laquelle survient brusquement. Un tel comportement est dit fragile par opposition au comportement ductile des aciers.

La courbe montre que la déformation élastique de cet acier est courte par rapport au matériau ductile, jusqu'à la rupture, qui est une cassure fragile.

Le comportement pour l'acier 100Cr6 trempé, est présenté sur la figure (II-27).

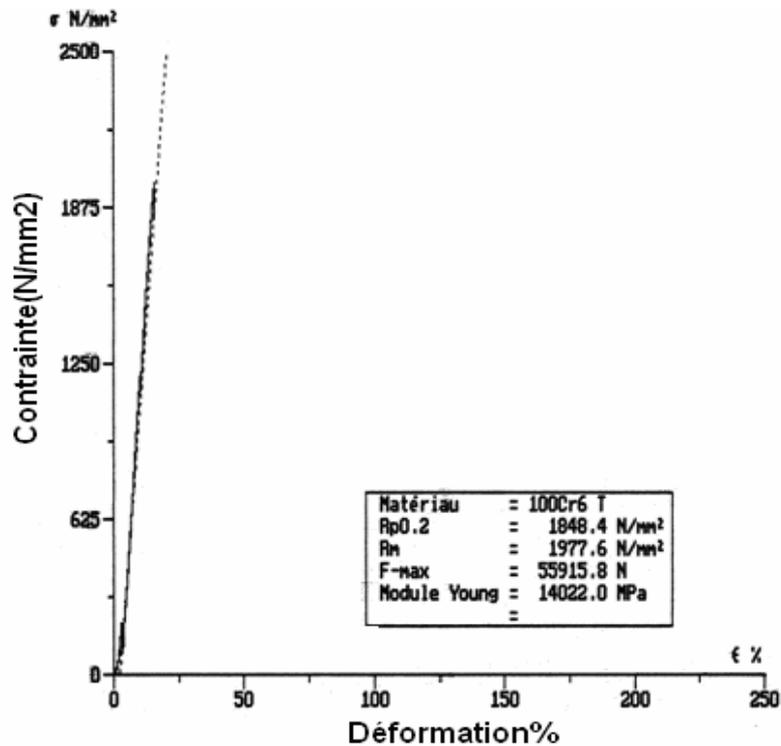


Figure II-27. Courbe de traction pour l'acier 100Cr6 trempé.

On obtient ainsi la courbe de la contrainte en fonction de la déformation qui représente directement l'endommagement de l'acier.

L'allure de la courbe présente un comportement fragile, l'acier se rompt sans être sorti du domaine élastique. La contrainte à la rupture ou la résistance à la traction, est $R_m = 1977.6 \text{ MPa}$; un module de Young très élevé $E = 14022.0 \text{ MPa}$ et un allongement de 3%. Cet acier fragile se casse dans le domaine de la déformation linéaire et sans déformation plastique comme il est indiqué dans la figure (II-28). La trempe du 100cr6 fait augmenter la fragilité et élimine la déformation élastique. [20].

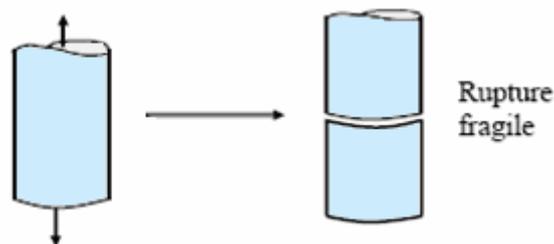


Figure II-28. La rupture d'un acier fragile

A partir des essais expérimentaux, nous avons dressé un tableau indiquant les caractéristiques mécaniques pour chaque éprouvette testée:

Eprouvettes	Elasticité Rp _{0.2} en Mpa	Résistance Rm en Mpa	Module Young Mpa	Allongement A en %
16MnCr5 Non Traité	300.7	476.1	4877.5	27
16MnCr5 Cémenté	549.5	604.2	6732.2	17
100Cr6 Non Traité	794.0	809.8	7686.9	10
100Cr6 Trempé	1848.4	1977.6	14022.0	3

Tableau II-5. Les caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés

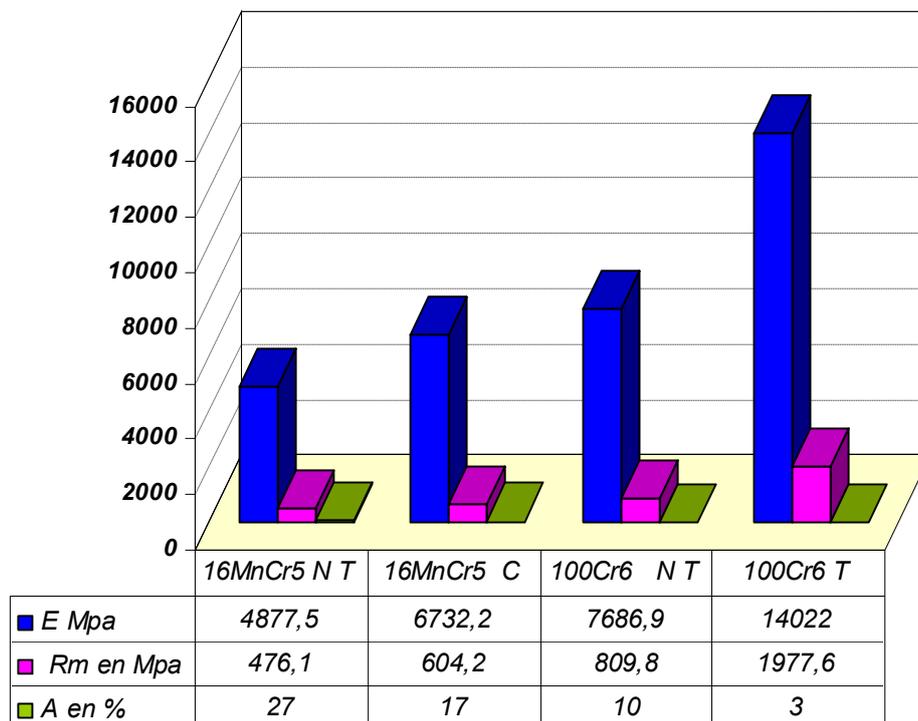


Figure II-29. Graphe comparative les valeurs de l'essai de traction entre les deux aciers avant et après traitement

A partir des bilans du tableau et du histogramme (figure II-29), l'observation de ces deux aciers avant et après traitement, on déduit que : Les essais de traction effectués sur les deux aciers ont montré que l'allongement à la rupture du 16MnCr5 est beaucoup supérieur à celui du 100Cr6 pour les mêmes conditions et par contre la résistance à la rupture enregistrée pour le 100Cr6 est plus importante que celle du 16MnCr5 on note que l'influence du traitement thermique est remarquable.

II-4. Flexion trois points

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps (comme le choc, la dureté...). Les essais de flexion sont souvent utilisés pour mesurer des caractéristiques telles que la résistance mécanique en flexion et la flèche maximale. Ces essais ont été choisis car ils sont faciles à mettre en oeuvre, la réalisation des éprouvettes est notamment très simple suivant la norme NF EN ISO 178.

Les essais de flexion sont réalisés sur une machine « **Hoyton-S-L** » à vitesse de déplacement imposée, c'est à dire qu'au plus simple on peut se contenter de ne demander à la traverse mobile que de monter ou descendre à vitesse que l'on veut. Le pilotage se fait en automatique par le PC à l'aide du programme sous Windows. Le programme permet de choisir le type d'essai et les valeurs des paramètres associés. (Voir la figure II-30).



Figure II-30. Machine « Hoyton-S-L » d'essai Universel de traction

Ces essais ont été réalisés à une température 20°C avec une vitesse constante $3\text{mm}/\text{min}$. Une éprouvette de la forme prismatique est soumise à une flexion au milieu de la portée, à une vitesse constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou jusqu'à ce que la déformation ait atteint une valeur prédéterminée (figure II-31).

Durant cet essai, la charge supportée par l'éprouvette est mesurée.

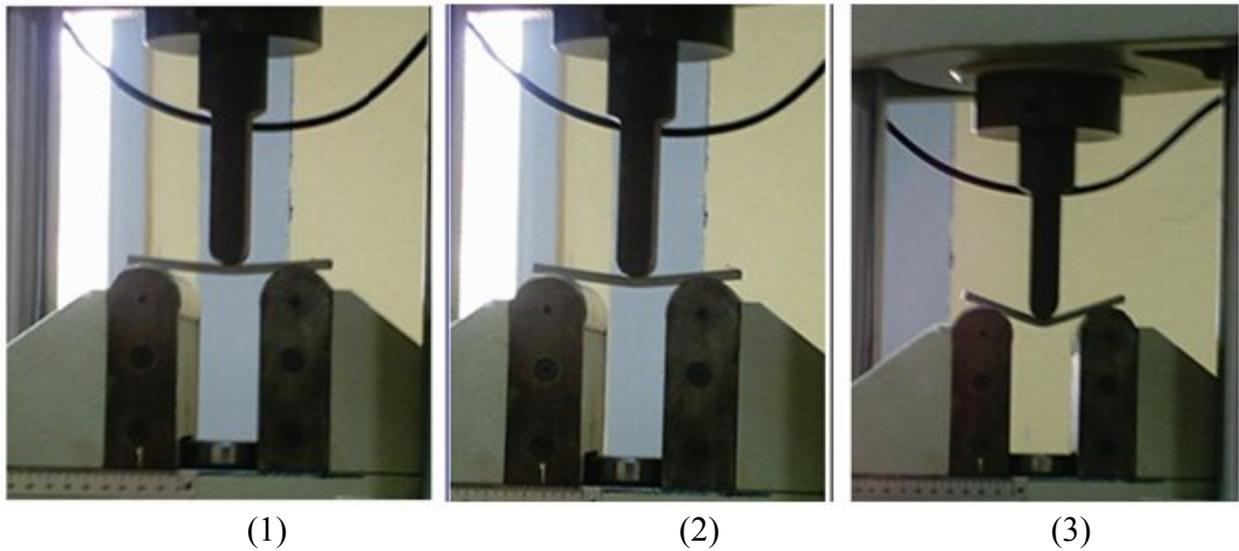


Figure II-31. L'essai de flexion

▪ **Résultats des essais**

Les figures (II-32, II-33) représentent le comportement en flexion de l'acier 16MnCr5 non traité et cémenté.

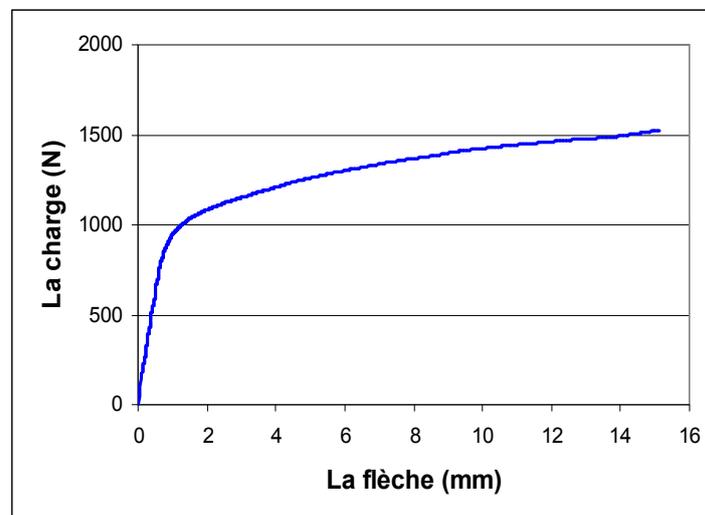


Figure II-32. Courbe de flexion 16 MnCr5 non traité

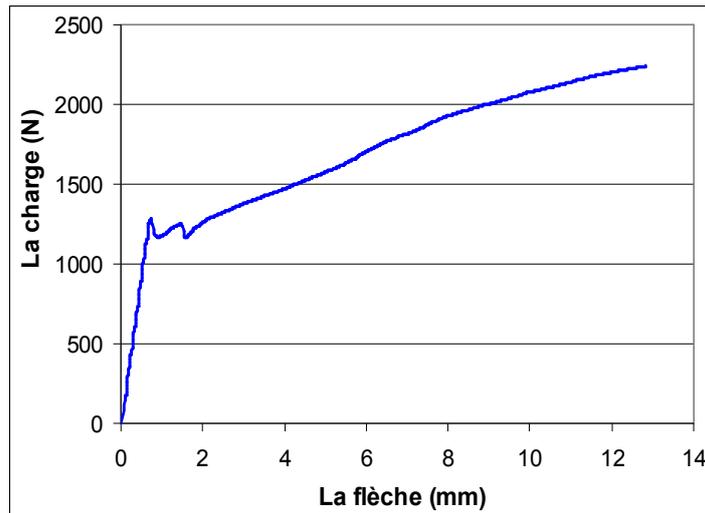


Figure II-33. Courbe de flexion 16 MnCr5 cémenté

L'allure des deux courbes montrent au début une similarité nette au cours de laquelle la déformation reste élastique c'est le domaine élastique, à la fin de cette partie, la courbe de l'acier 16MnCr5 non traité (figure II-32) continue avec un arrondi et l'éprouvette continue sa déformation sans se rompre jusqu'à la fin de l'essai, donc l'acier 16MnCr5 non traité est un acier ductile.

Pour 16MnCr5 cémenté, à la fin de la partie élastique (Figure II-33), un crochet se produit dans la courbe. Ce dernier est interprété par la fissuration brusque de la couche cémentée qui enveloppe l'éprouvette. Ceci montre que la transition du domaine élastique vers le domaine plastique pour 16MnCr5 cémenté se fait brutalement. Avec l'augmentation progressive de la charge, la déformation devient visible et nette et continue jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe.

Cela signifie que le traitement thermochimique (Cémentation) donne à l'acier un aspect dur de l'extérieur mais l'intérieur reste moins dur.

Des essais de flexion ont été réalisés cette fois-ci sur l'acier 100Cr6 non traité et trempé à la même température ambiante et la même vitesse de déplacement. On observe globalement une évolution similaire, les courbes (Figure II-34, Figure II-35) qui montrent que l'allure de la pente est montante, cette dernière présente la partie élastique.

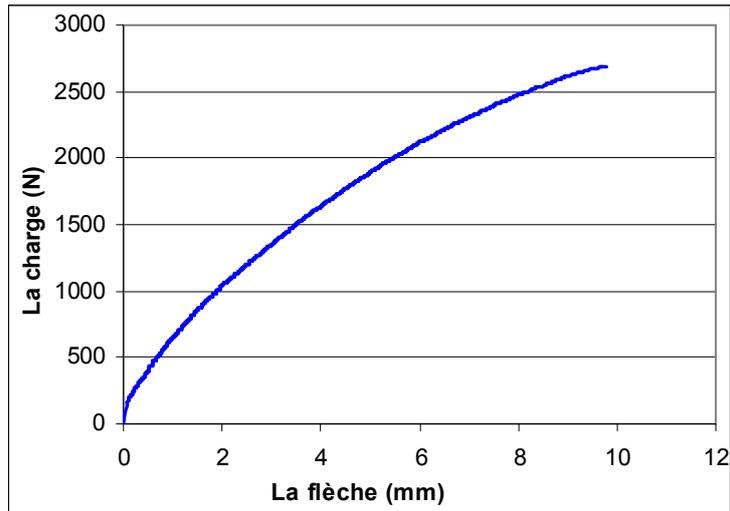


Figure II-34. Courbe de flexion 100Cr6 non traité

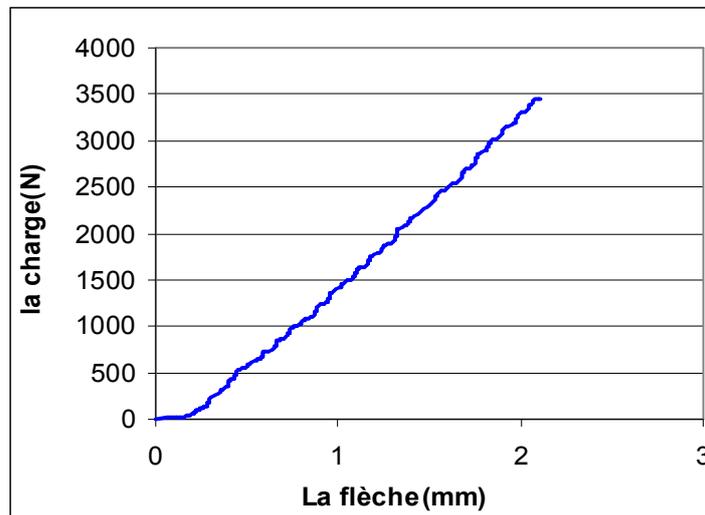


Figure II-35. Courbe de flexion 100Cr6 trempé

La déformation élastique se transforme progressivement en déformation plastique, avec l'augmentation de la charge, l'éprouvette de l'acier 100Cr6 trempé se brise brusquement en premier lieu suivi par celle de 100Cr6 non traité ce qui prouve que le comportement de 100Cr6 est principalement fragile.

On remarque que le traitement thermique (Trempe) rend l'acier 100Cr6 plus dur et augmente sa fragilité.

Afin de comparer les variations des propriétés en flexion (Figure II-36), la résistance à la flexion n'est donc pas une caractéristique intrinsèque d'un acier puisqu'elle dépend des résistances à la traction, à la compression et même au cisaillement.

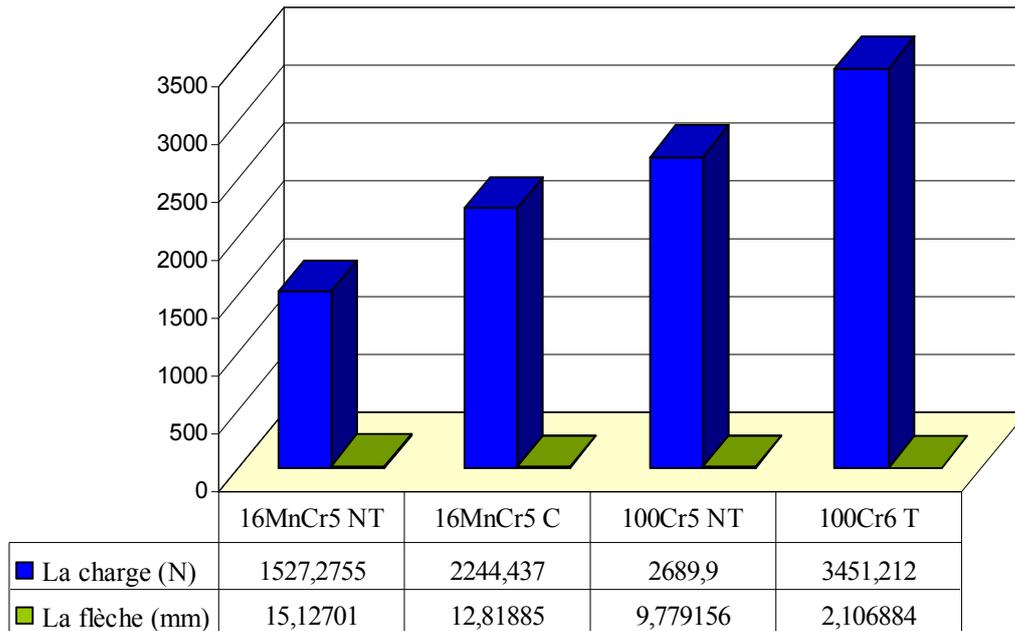
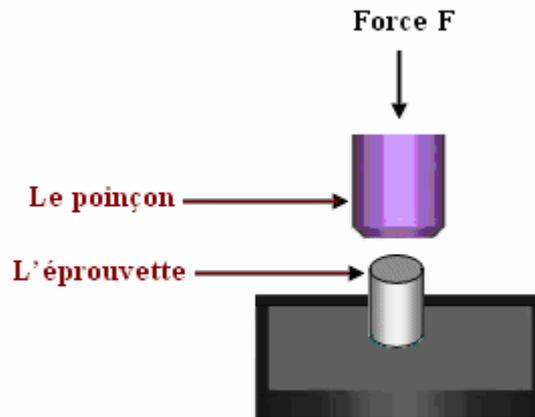


Figure II-36 .Graphe comparatif des valeurs de l'essai de flexion entre les aciers avant et après traitement

De plus, la forme de l'éprouvette et celle du poinçon interviennent également. En effet la résistance en flexion est plus sensible aux traitements des aciers. La résistance est élevée pour l'acier 100Cr6 trempé et diminue pour l'acier 100Cr6 non traité, les valeurs de résistance mesurées sont plus faibles pour l'acier 16MnCr5 pour la même température de traitement et la même vitesse de déplacement.

II-5. Test de compression

L'essai de compression est réalisé de façon similaire à l'essai de traction, mais la force comprime l'éprouvette, qui se contracte dans le sens de la contrainte. Il consiste à soumettre une éprouvette de la forme cylindrique d'après la norme NF EN ISO 604 entre deux forces axiales le plateau et le poinçon Voir figure (II-37).



FigureII-37. Schéma de l'essai de compression

Nous avons effectué les essais de compression sur la machine (Hoyton-S-L) qui a été déjà utilisé pour les essais de flexion avec une vitesse de 3 mm/min et la température ambiante (20C°).

L'objectif de ces essais est d'étudier le comportement des aciers 16MnCr5 et 100Cr6 avant et après traitement et voir l'influence des traitements thermiques et thermochimiques sur les caractéristiques mécaniques de ces aciers.

▪ **Résultats des essais**

Les résultats obtenus sont illustrés sur les figures (II-38; I-39 ; II- 40 ; II-41). On remarque que pendant l'essai de compression de l'acier 16MnCr5 non traité montre une bonne résistance à la compression celle-ci se traduit par une première partie de la courbe (figure II-38) qui prend la forme d'une pente, dans cette partie l'échantillon ne subit aucune déformation visible .Après cette période l'augmentation de la résistance a la compression provoque l'écrasement de l'éprouvette et l'essai s'arrête.

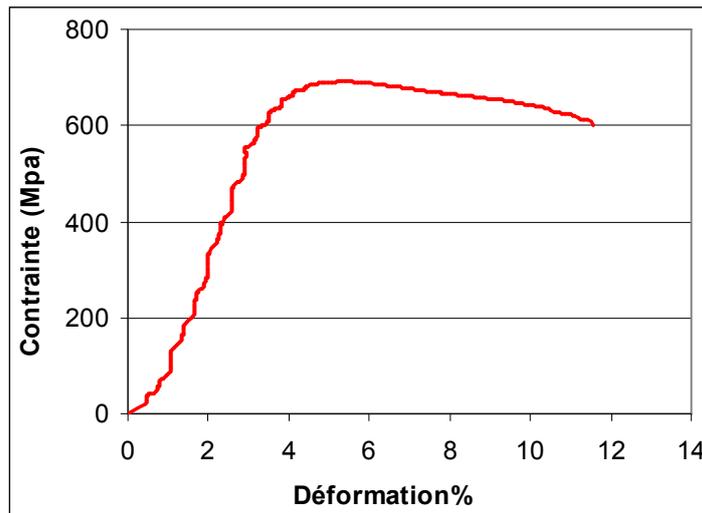


Figure II-38. Courbe de compression 16 MnCr5 non traité

Dans les mêmes conditions de l'essai de compression précédent mais cette fois ci pour l'acier 16MnCr5 cémenté (fig. II-39).

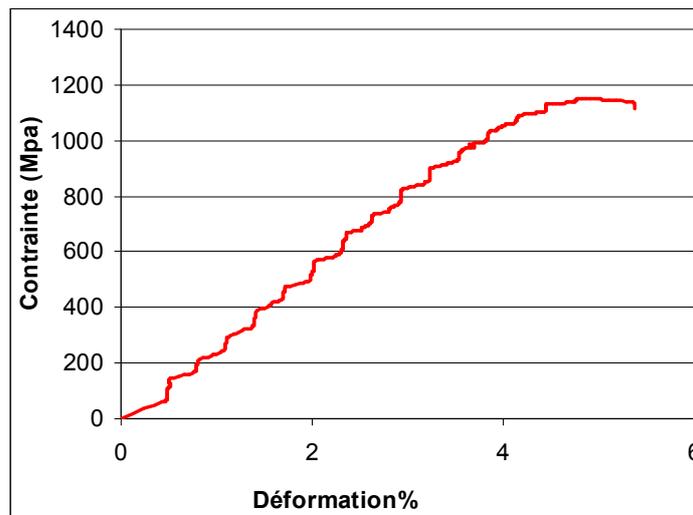


Figure II-39. Courbe de compression 16 MnCr5 cémenté

La courbe donne une allure globalement similaire à celle de 16MnCr5 non traité avec une augmentation très importante de la résistance de la compression provoquée par le traitement thermo-chimique qui a apporté une grande amélioration du comportement de l'acier, L'essai continu avec une augmentation considérable de la résistance de compression jusqu'à l'écrasement de l'éprouvette.

L'évolution de la courbe (figure II-40) pour l'acier 100Cr6 non traité montre que la compression de l'éprouvette se fait progressivement avec l'augmentation de la résistance à la compression. On remarque qu'en premier lieu l'éprouvette garde son aspect physique c'est la période de la déformation élastique, ensuite l'éprouvette se comprime progressivement avec une augmentation plus grande de la résistance à la compression.

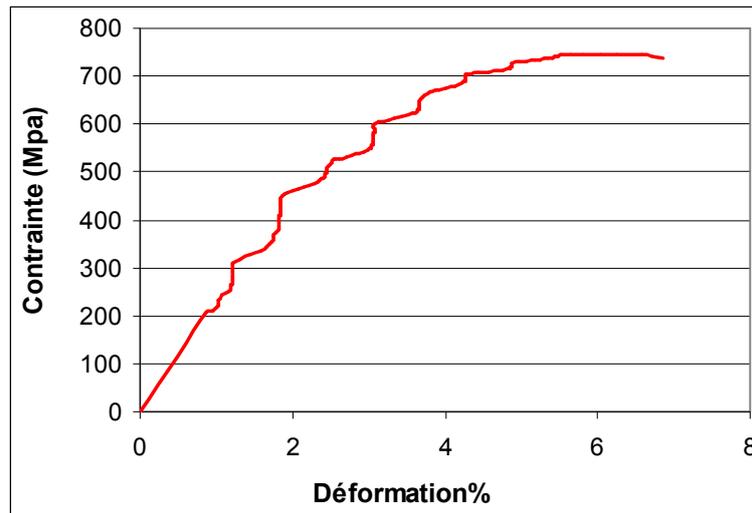


Figure II-40. Courbe de compression 100Cr6 non traité

La figure (II-41) représente une courbe typique contrainte /déformation normalisée pour l'essai de compression à la température ambiante pour les éprouvettes 100Cr6 trempé. On remarque que le comportement est similaire à celui observé sur l'échantillon 100Cr6 non traité mais plus marqué par l'augmentation continue de la résistance à la compression qui provoque par la suite un écrasement moins important de l'éprouvette ce qui nous a obligé à mettre fin à l'expérience.

L'acier 100Cr6 est sans doute plus sensible aux traitements thermiques (Trempe) qui lui a donné une très grande résistance à la compression.

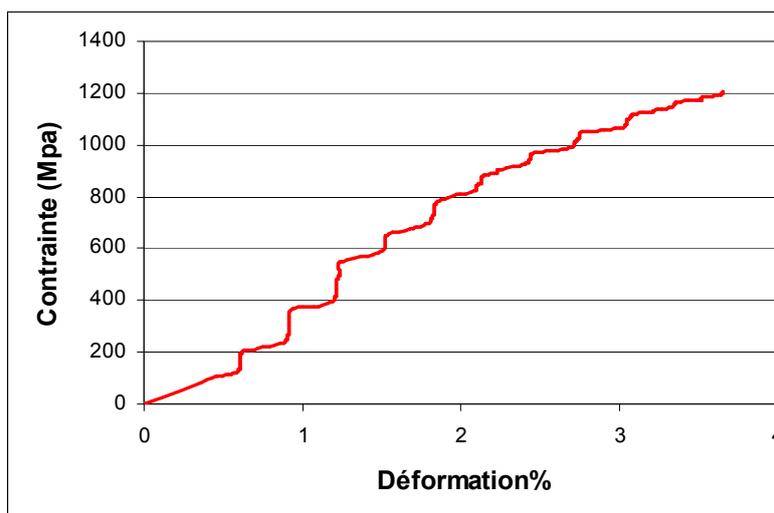


Figure II-41. Courbe de compression 100Cr6 trempé

Les valeurs utilisées dans le graphe figure (II-42), sont très explicites. Elles montrent que l'acier 100Cr6 trempé montre une résistance à la compression très élevée par rapport aux autres ceci est dû au traitement appliqué à ce dernier.

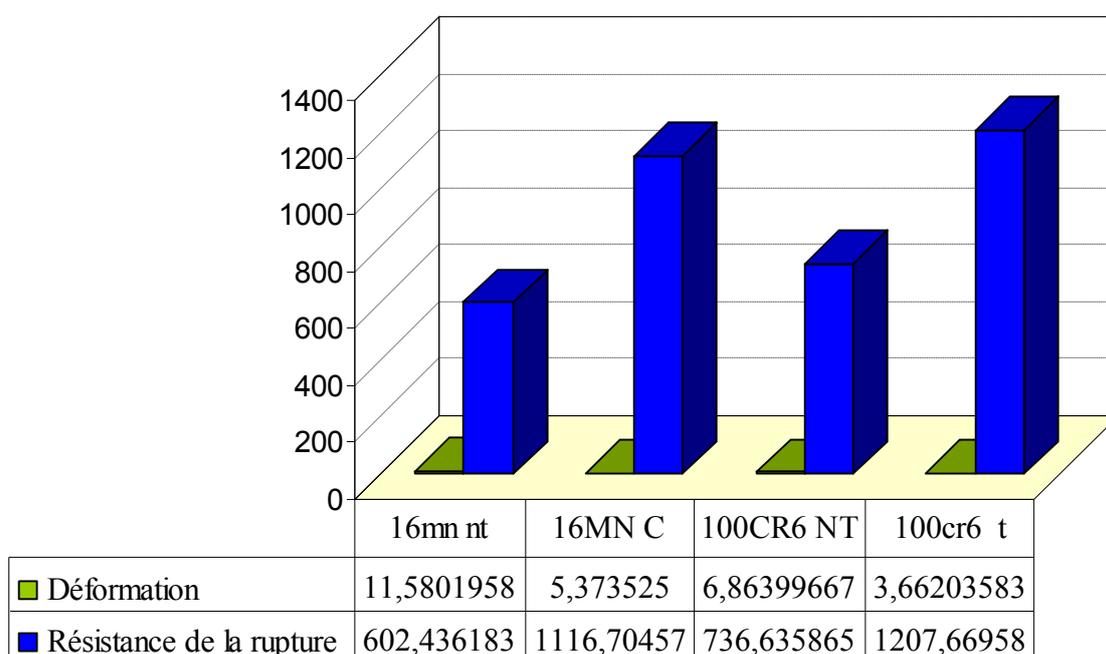


Figure II-42. Graphe comparatif des valeurs de l'essai de compression entre les aciers avant et après traitement

En conclusion, pour les matériaux dits « ductiles », lorsque l'on augmente la sollicitation, on déforme de manière définitive l'éprouvette ; lorsque l'on arrête la sollicitation, l'éprouvette reste déformée. Ceci se produit par un glissement des plans

atomiques les uns sur les autres, à la manière des cartes à jouer d'un paquet. Ce glissement de plans atomiques se fait grâce au déplacement de défauts linéaires appelés « dislocations ». [20].

Selon le type de sollicitation, le comportement macroscopique et les mécanismes de déformation associés sont plus au moins identifiés. Ainsi, et comme nous avons pu le constater, les essais de traction, de flexion et de compression sont les plus abondants dans la littérature, ce qui a contribué à l'identification des mécanismes de déformation régissant le comportement mécanique de ces aciers et les paramètres influents, la compréhension des mécanismes de déformation reste alors limitée.

II-6. Essai de rugosité

▪ Préparation des échantillons :

La rugosité se caractérise à travers plusieurs critères définis à partir d'une ligne moyenne, telle que sur le profil de rugosité, l'aire supérieure constituée par les pics est égale à l'aire inférieure constituée par les creux.

Nous avons mesuré la rugosité à l'état brut de tronçonnage pour les échantillons en acier, grâce à un rugosimètre (2D) **Surftest 301**, dont le palpeur se déplace à vitesse constante sur la surface à contrôler, selon une trajectoire horizontale et une imprimante de profil de rugosité figure (II-43).



Figure II-43. Rugosimètre Surfets 301.

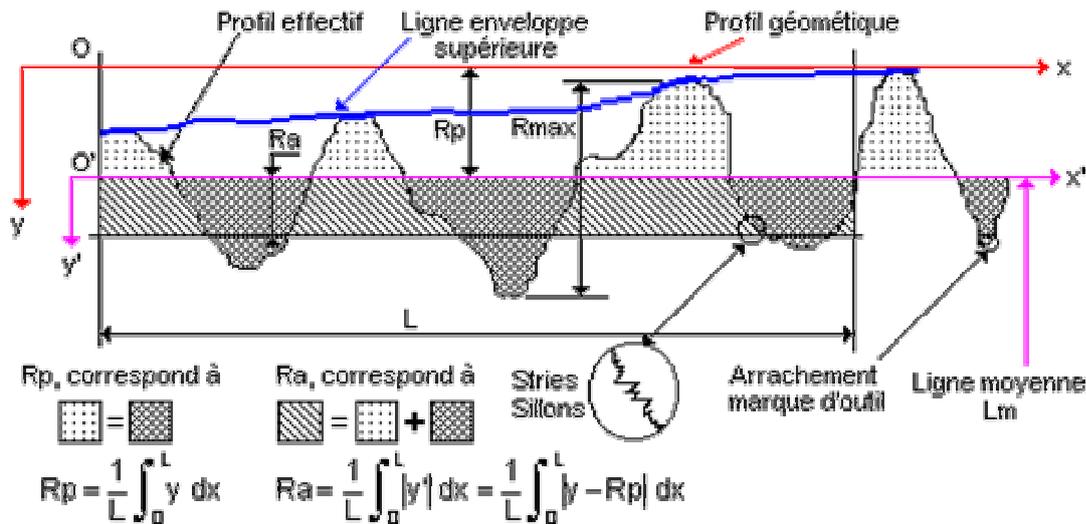


Figure II-44. Profil total de rugosité

La rugosité moyenne R_a est la moyenne arithmétique de tous les écarts du profil de rugosité par rapport à la ligne moyenne (figure II-40).

Ra : rugosité moyenne arithmétique : (μm)

Rugosité moyenne :

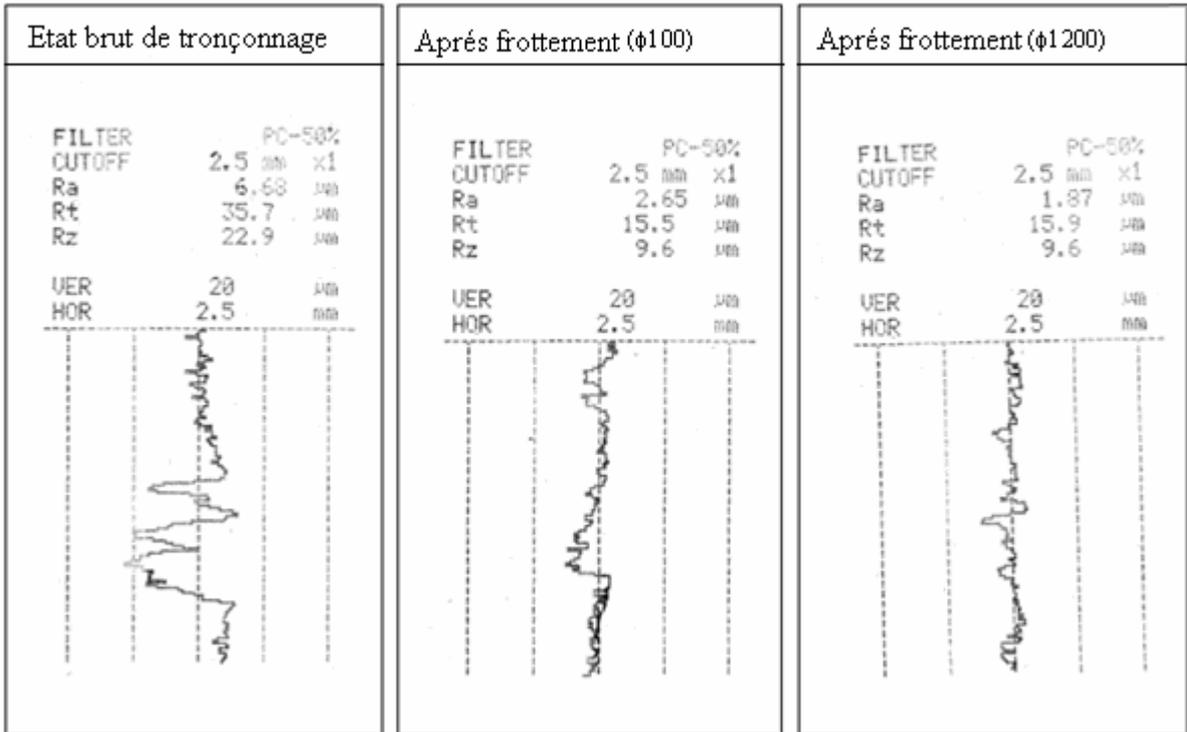
$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} R_i \quad (\text{II-5})$$

L : longueur d'évaluation du profil

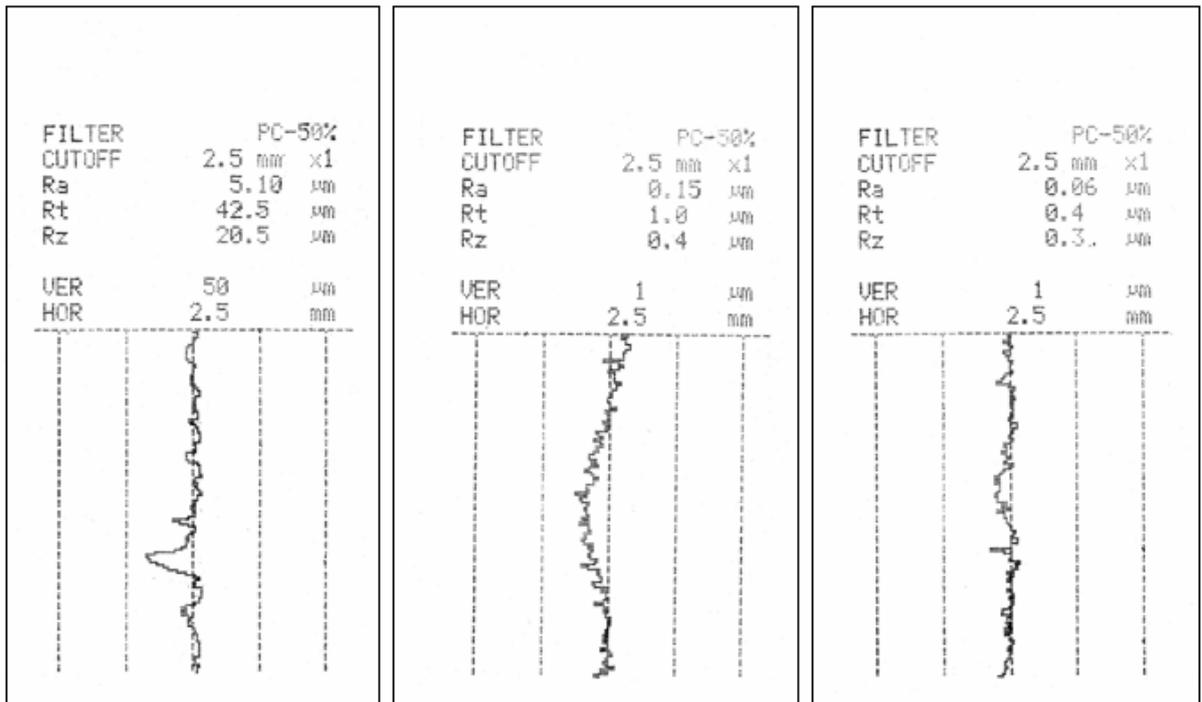
Pour les mesures de la rugosité après frottement (figure II-45), nous nous sommes fixés des conditions de polissage permettant d'obtenir des états de surfaces voisins pour tout l'ensemble des échantillons, et d'avoir une bonne planéité de surfaces de l'échantillon. Le tableau représente la rugosité moyenne pour les aciers 100Cr6 et 16MnCr5 à l'état brut de tronçonnage et après frottement. On constate que la rugosité moyenne après tronçonnage dépend du mode d'élaboration.

Echantillons	Ra (μm) avant frottement	Ra (μm) après frottement ($\phi 100$)	Ra (μm) après frottement ($\phi 1200$)
16MnCr5 non traité	6.68	2.65	1.87
16MnCr5 cémenté	5.10	0.15	0.06
100Cr6 non traité	4.65	2.09	0.39
100Cr6 trempé	3.63	0.79	0.08

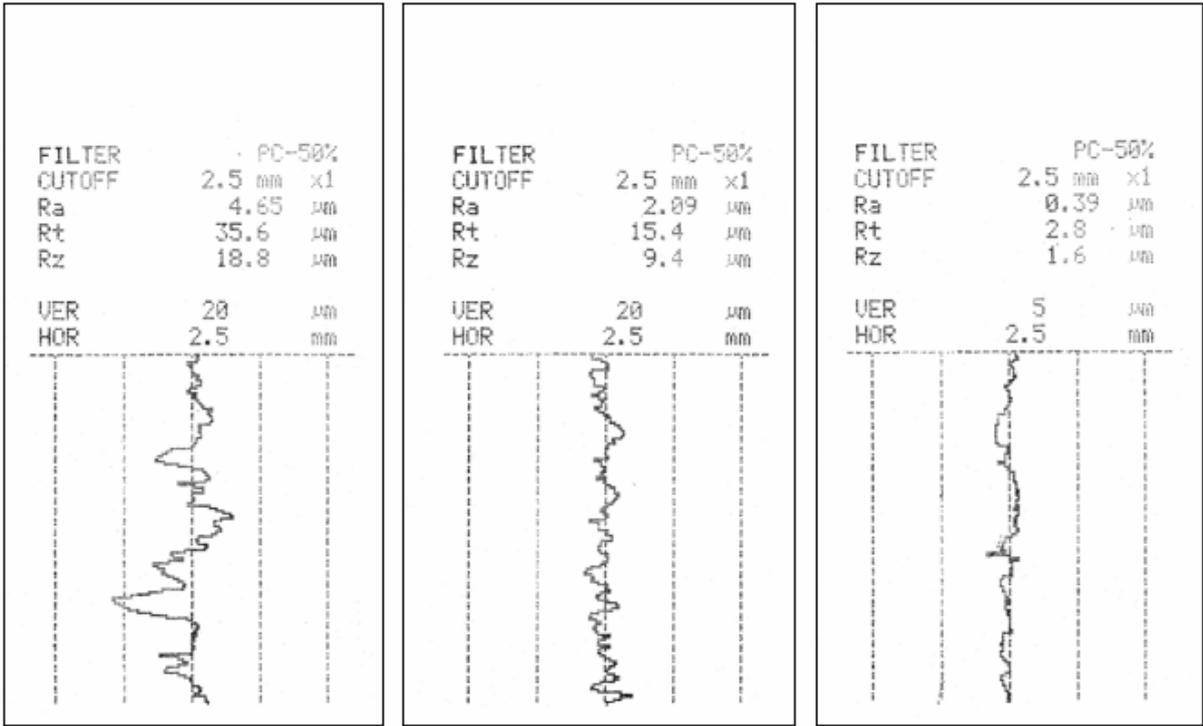
Tableau II-6. La rugosité des surfaces avant et après frottement



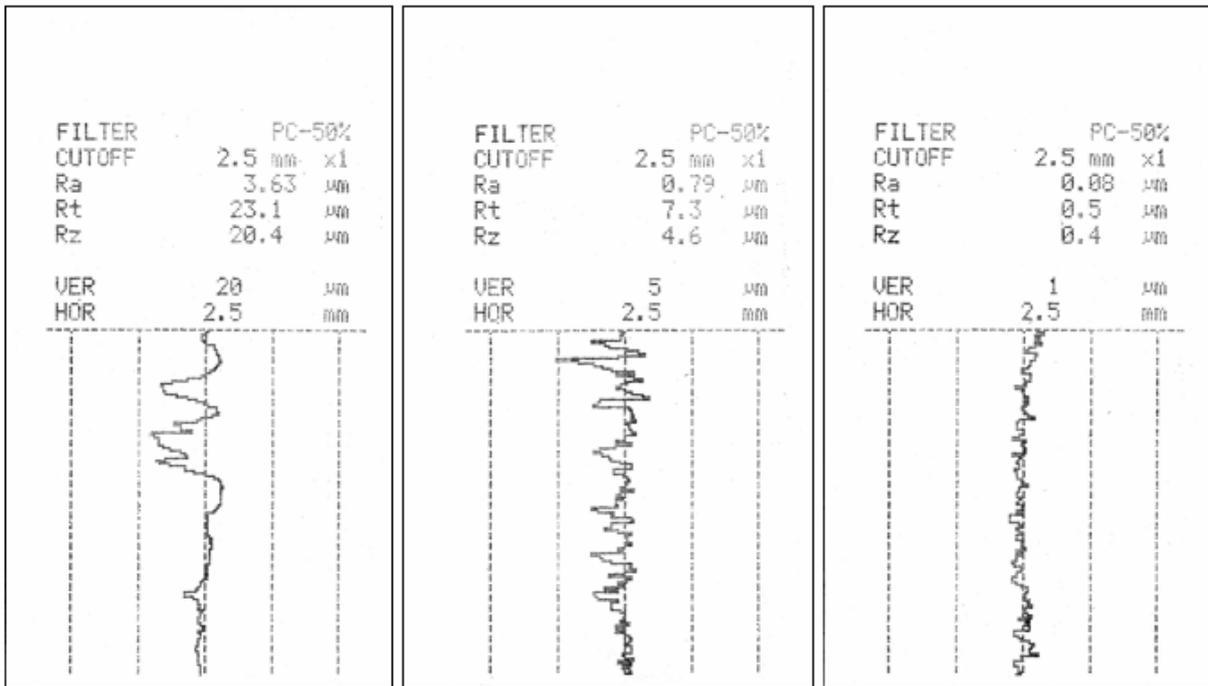
Acier non traité (16 MnCr5)



Acier cémenté (16 MnCr5)



Acier non traité (100Cr6)



Acier trempé (100Cr6)

Figure II-45. Profil de rugosité des matériaux étudiés.

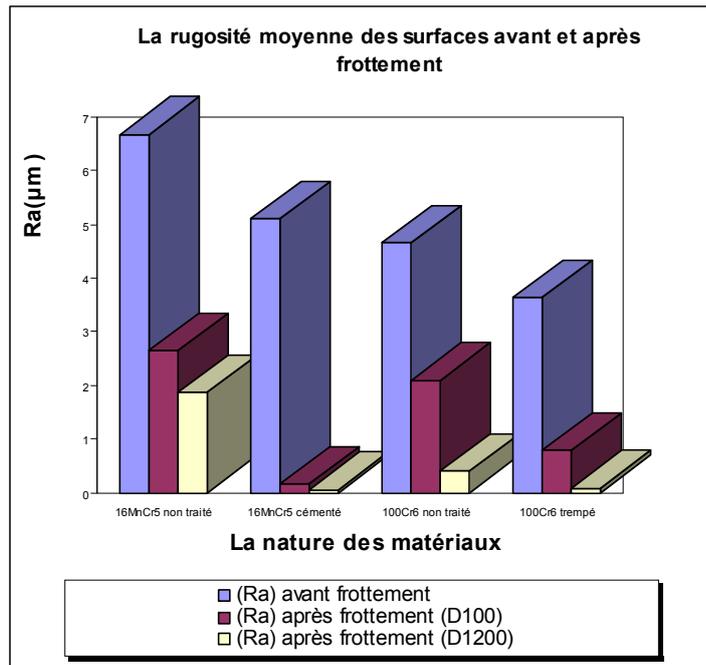


Figure II-46. L'évolution de la rugosité moyenne

La figure II-46 montre l'évolution de la rugosité moyenne pour les aciers étudiés (16MnCr5, 100Cr6) avant et après traitement. En premier lieu on remarque que l'état de surface pour l'acier 16MnCr5 frotté contre un abrasif 100 (gros grain) montre une rugosité moyenne plus grande que celui frotté contre un abrasif 1200(fin grain), ceci peut être expliqué par la taille du grain d'abrasif plus la taille du grain est grande plus les sillons creusés sont plus grands, donc cela donne une grande rugosité et l'inverse est vrai. Le même phénomène a été constaté pour l'acier 100Cr6 frotté contre les deux types d'abrasif (100,1200).

Pour l'acier 16MnCr5 soumis à un traitement thermochimique et 100Cr6 soumis aussi à un traitement thermique est gardé le même classement avec la diminution de la rugosité moyenne. D'après les résultats obtenus on peut dire que la taille de grain d'abrasif et le traitement thermique et thermochimique influent directement sur la rugosité et la qualité de surface.

III. Essai de frottement et l'usure

L'optimisation des propriétés mécaniques et tribologiques des aciers étudiés sont 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. Dans ce chapitre, nous nous proposons de corréler les propriétés mécaniques des deux aciers et leur résistance à l'usure étudiée expérimentalement.

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).

Les propriétés des matériaux évoluent avec le chargement. Par exemple, l'écroutissage modifie la ductilité et la limite élastique. 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).

Un tribomètre type plan/plan a été utilisé, 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 des aciers 100Cr6 et 16MnCr5 avant et après traitement.

III -1. Essais de frottement plan /plan

▪ Conditions de travail

Les tests de frottement plan/plan (Figure II-47), 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 de charge est mesurée à des intervalles réguliers de temps.

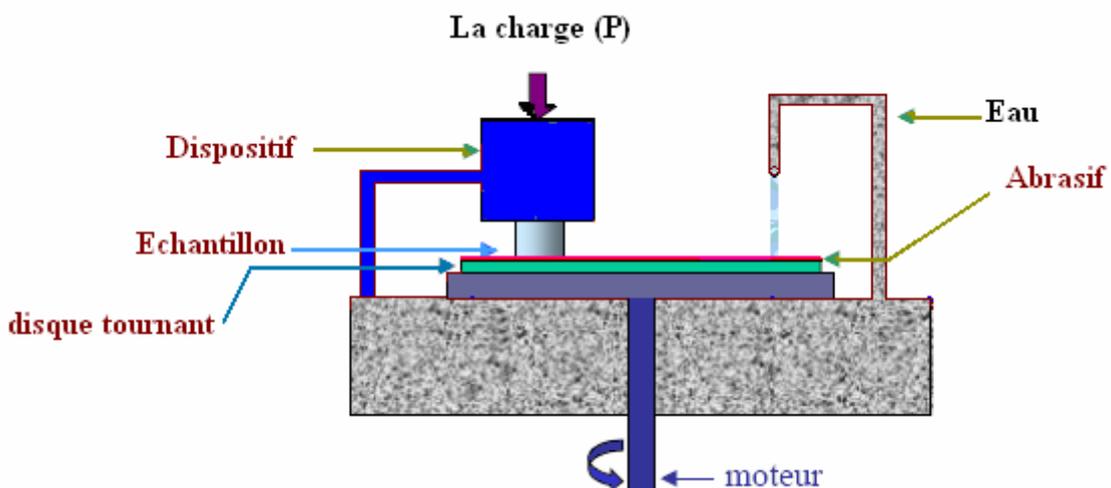


Figure II-47. Dispositif de frottement des surfaces planes.

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 ($\phi 100$) ou nous avons fait varier la charge et la vitesse.

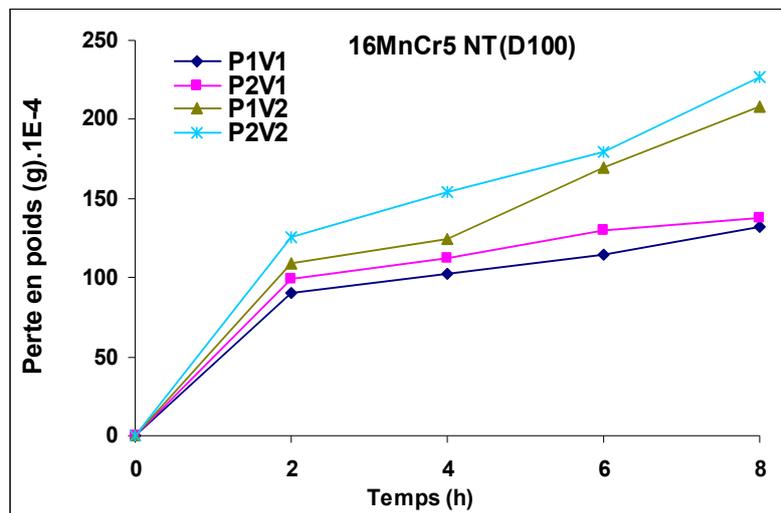


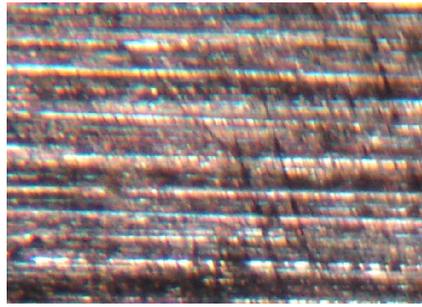
Figure II-48. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 non traité (contre abrasif $\phi 100$)

Les résultats obtenus sur l'acier 16MnCr5 sont représentés sur la figure (II-48), où l'on peut observer l'évolution de la perte en poids en fonction du temps.

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

Sur les échantillons, on constate que l'usure est croissante. Cette augmentation de la hauteur usée s'explique par l'accommodement des surfaces et la géométrie du contact. 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-49).

Sur les échantillons, on remarque que l'usure est quasi constante entre les essais, toutefois légèrement croissante. On retrouve donc l'aspect transitoire du frottement. Ainsi, on note qu'en régime stabilisé, la cinétique d'usure est constante. Cela traduit une linéarité entre la durée de l'essai et l'endommagement par perte en poids.



(X40)



(X200)

Figure II-49 .Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 non traité dans les conditions sévères.

L'observation par le microscope optique 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.

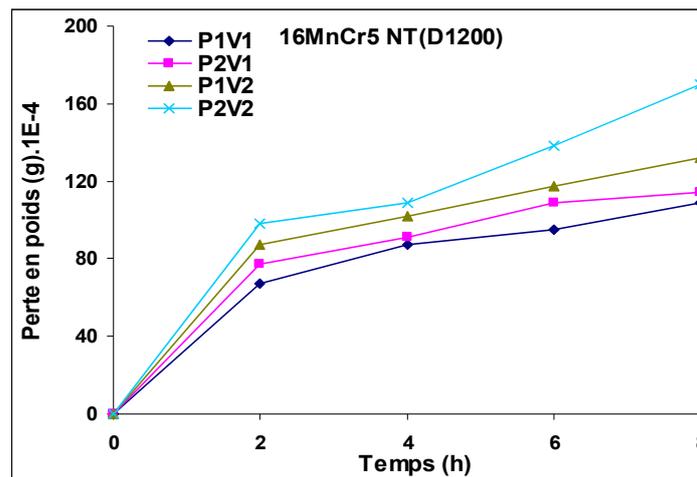


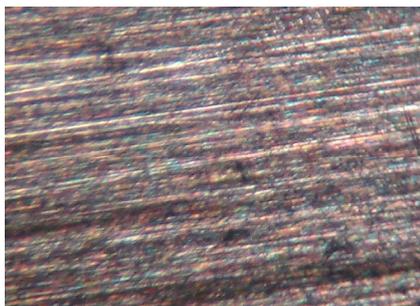
Figure II-50. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 non traité (contre abrasif ϕ 1200)

Dans les mêmes conditions que le test précédent, l'évolution de la perte en poids en fonction du temps est représentée graphiquement (Figure II-50).

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-50) 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-51) 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-51. 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 sur l'acier 16MnCr5 cémenté, pour pouvoir déterminer l'influence du traitement thermochimique utilisé sur le comportement tribologique de cet acier pendant les essais.

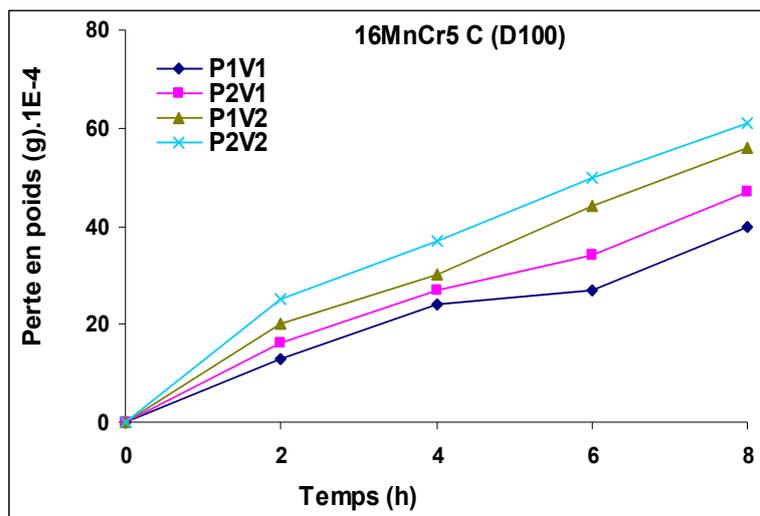
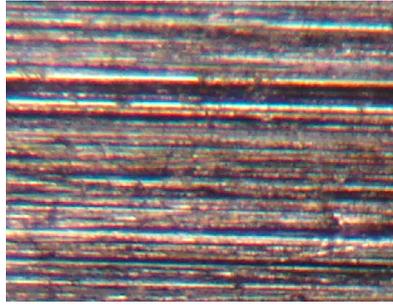


Figure II-52. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 cémenté (contre abrasif $\phi 100$)

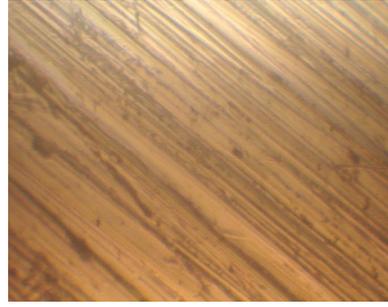
Les résultats obtenus (Figure II-52) montrent que le classement est toujours conservé et les conditions sévères semblent augmenter l'usure. De plus, l'usure relevée sur les échantillons cémentés est très faible par rapport aux échantillons non traités

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 cémenté afin d'avoir une base comparative. Ces essais sur des échantillons cémentés ne produisant pas de dégradations suffisantes de l'échantillon.

L'observation au microscope optique, dans les conditions sévères (Figure II-53) montre que la zone usée est moins importante sur les échantillons cémentés 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.



(X40)



(X200)

Figure II-53. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 16MnCr5 cémenté dans les conditions sévères.

Les mêmes tests tribologiques effectués sur l'acier 16MnCr5 cémenté (Figure II-54), mais cette fois ci avec la variation de la taille de l'abrasif ($\phi 1200$) et dans les mêmes conditions. On observe que l'évolution de la perte en poids est similaire par rapport à la figure (II-52), 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 thermochimique qui a augmenté sa dureté superficielle.

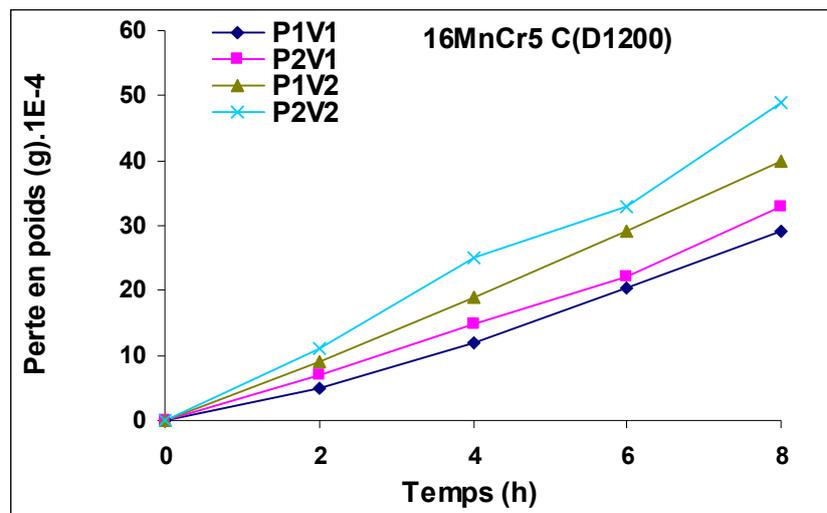
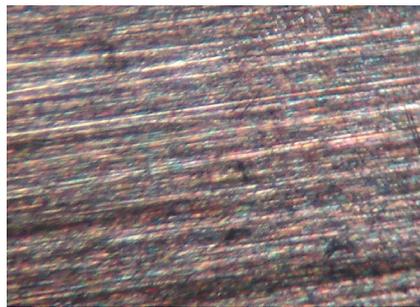


Figure III-54. Perte en poids en fonction du temps de 16MnCr5 cémenté (contre abrasif $\phi 1200$)

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-55), 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-55. 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.

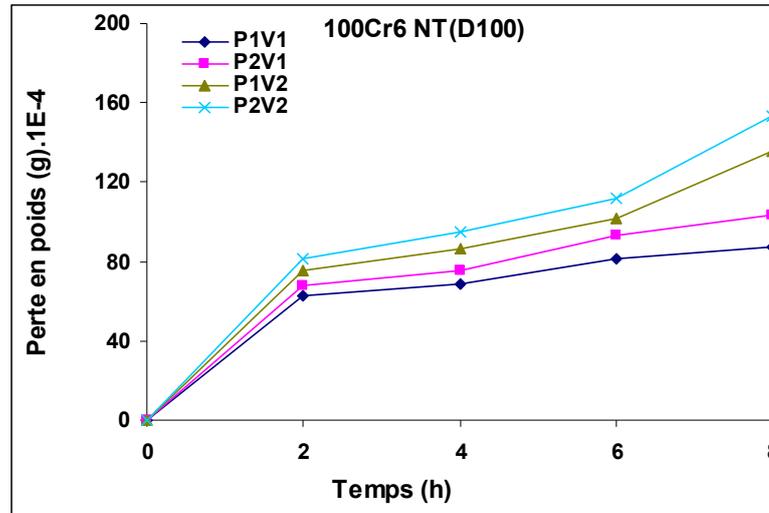
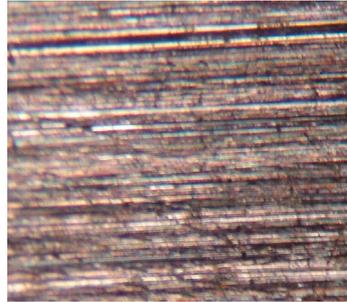


Figure II-56. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité (contre abrasif $\phi 100$)

L'augmentation de la perte en poids mesurée au début de tous les essais se traduit par une augmentation de la surface de contact (Figure II-56), 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 -48).

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-57). 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-57. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans des conditions sévères.

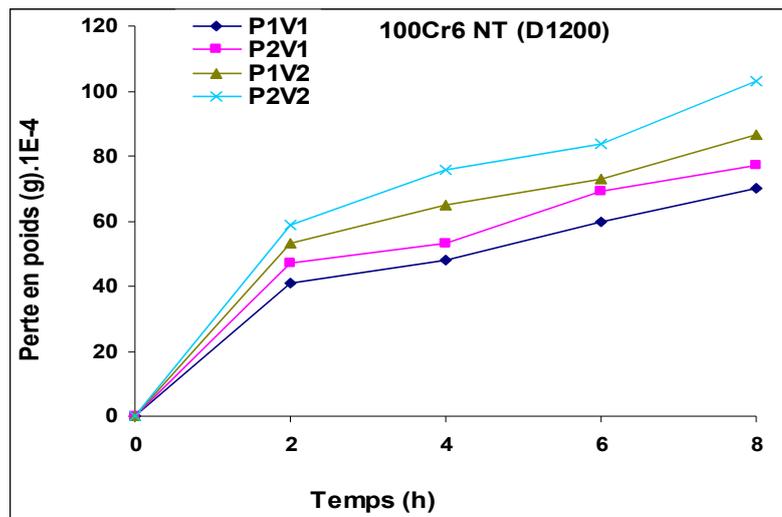


Figure II-58. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité (contre abrasif $\phi 1200$)

Toujours dans un milieu lubrifié et contre un abrasif à fin grain ($\phi 1200$), et dans les mêmes conditions que le test précédent les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (II-58). Nous constatons que l'évolution des courbes est semblable à celle des essais effectués auparavant mais avec une perte en poids moins importante.

Dans les faibles conditions (Figure II-59) pour l'acier 100Cr6 non traité, on remarque dans la zone de contact que des faibles rayures apparaissent 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 le troisième corps.

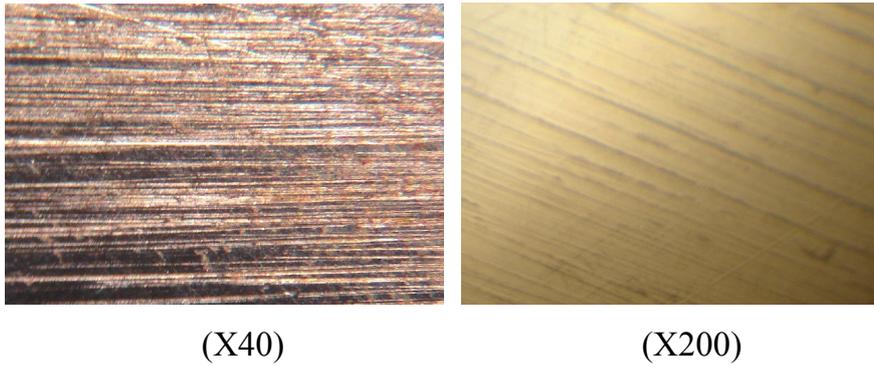


Figure II-59. Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans des faibles conditions.

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

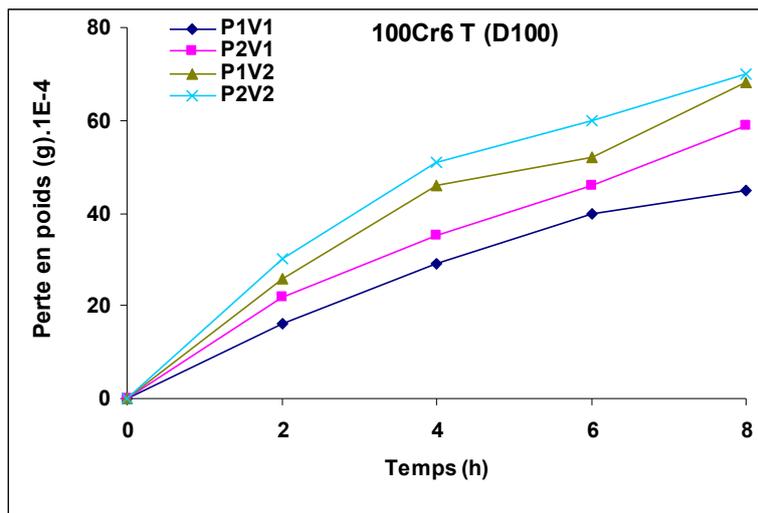
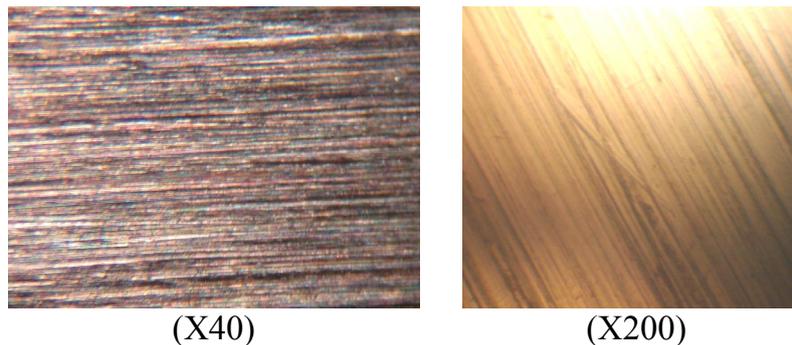


Figure II-60. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé (contre abrasif $\phi 100$)

Les tests de frottement réalisés sur le 100Cr6 trempé contre un abrasif à gros grains ($\phi 100$) (Figure II-60), ont montré que le classement est conservé dans les mêmes conditions. Le comportement tribologique de l'acier trempé est 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-61) 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 les débris n'arrive pas à établir une barrière efficace entre les deux surfaces frottantes.



FigureII-61. 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, 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-62).

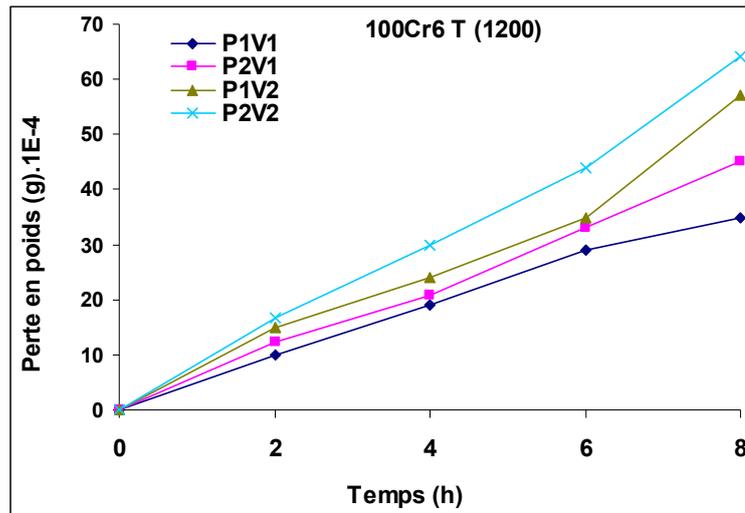


Figure II-62. Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé (contre abrasif $\phi 1200$)

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 dans l'acier non traité que l'acier traité. On remarque que le taux d'usure de 100Cr6 non traité à fin grain représente une perte en poids plus élevée que 100Cr6 trempé dans les mêmes conditions ,ceci nous 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-63) 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)

FigureII-63. 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.

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

Les tests de frottement réalisés contre des abrasifs à gros grains sont représentés sur la figure (II-64) avec abrasif $\phi 100$,la charge p_1 et la vitesse v_1 .

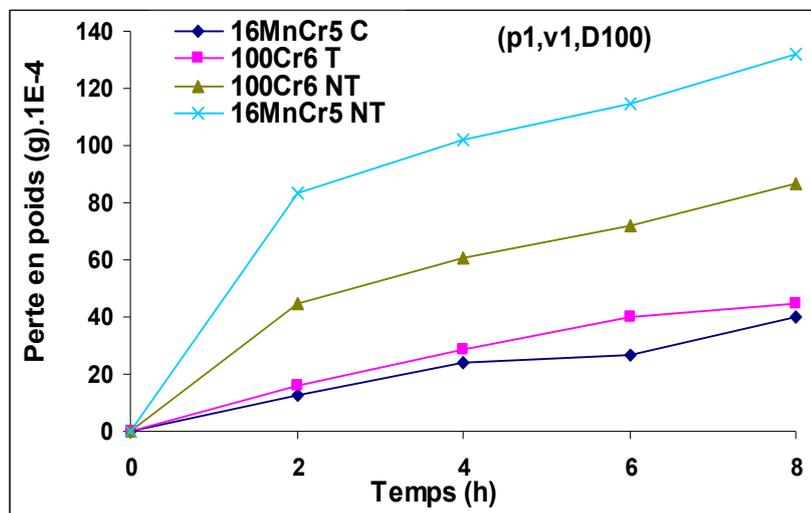


Figure II-64. Perte en poids en fonction du temps (P1, V1, contre abrasif $\phi 100$)

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 au test tribologique.

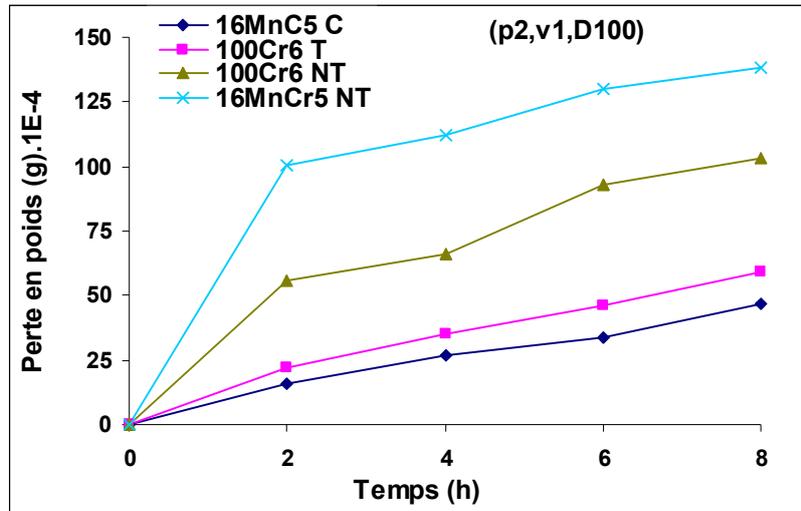


Figure II-65. Perte en poids en fonction du temps (P2, V1, contre abrasif $\phi 100$)

Les courbes donnant la perte en poids en fonction du temps des aciers pour les grandes charges sont illustrées sur la figure (II-65).

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. On constate une bonne résistance à l'usure de l'acier cémenté et l'acier trempé.

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.

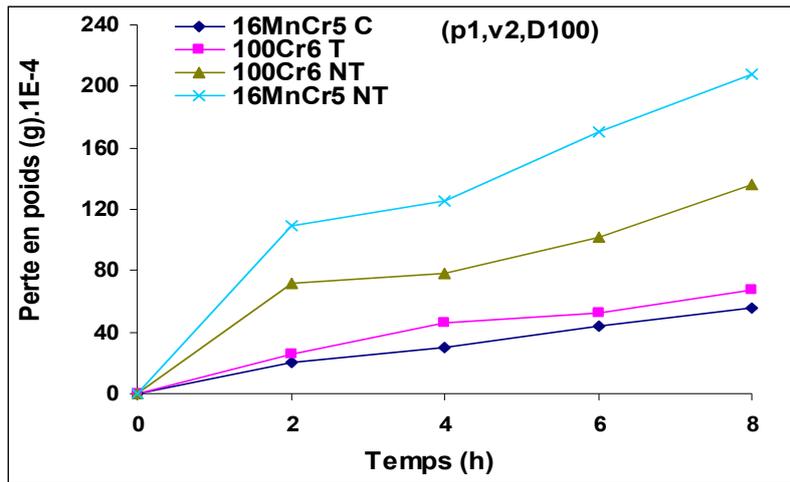


Figure II-66. Perte en poids en fonction du temps (P1, V2, contre abrasif $\phi 100$)

Par l'augmentation de la vitesse de frottement (Figure II-66). Les résultats obtenus montrent que le classement est toujours conservé. 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-66) (p1, v2) montre bien que le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse par rapport à la figure (II-64) (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.

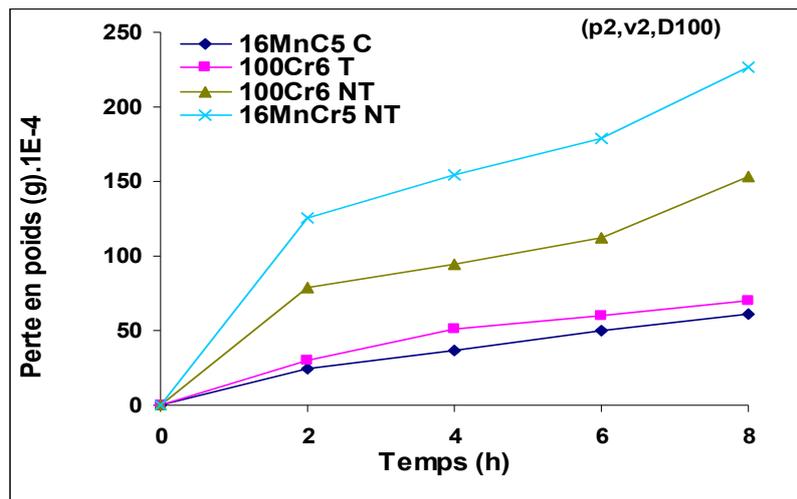


Figure II-67. Perte en poids en fonction du temps (P2, V2, $\phi 100$)

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-67). Les tests

tribologiques effectués sur ces aciers 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 ($\phi 1200$).

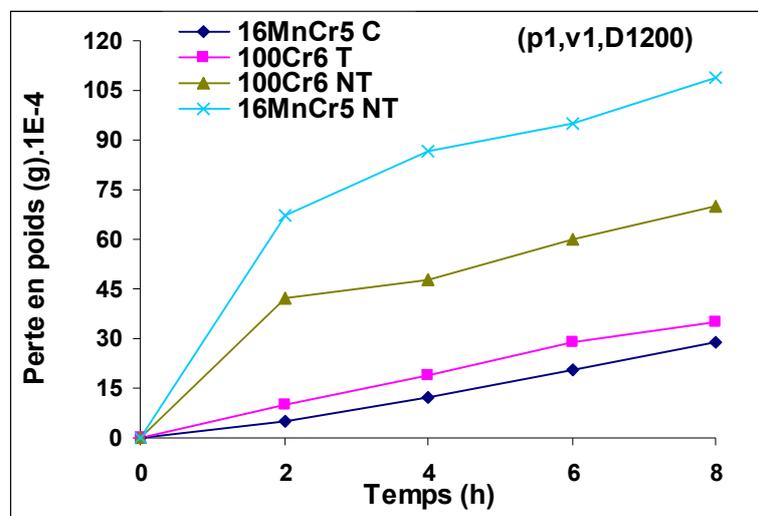


Figure II-68. Perte en poids en fonction du temps (P1, V1, contre abrasif $\phi 1200$)

Sur la figure (II-68), on a enregistré les mêmes allures des courbes : le bon comportement est signalé pour l'acier cémenté suivi de l'acier trempé avec une légère dégradation. Les traitements thermiques et thermo-chimiques, engendrent une amélioration du comportement tribologique. Les deux aciers non traités montrent bien l'effet apporté par les traitements.

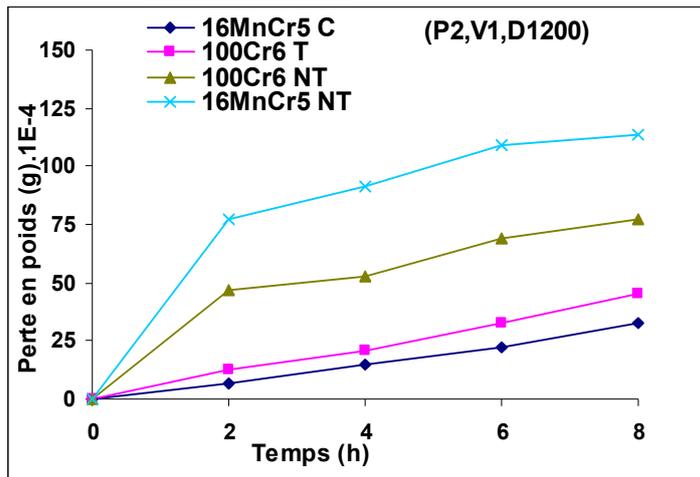


Figure II-69. Perte en poids en fonction du temps (P2, V1, contre abrasif $\phi 1200$)

En augmentant cette fois-ci la charge (Figure II-69), le classement est conservé avec une dégradation plus élevée, le taux d'usure s'accroît avec l'augmentation de la charge et que les deux aciers non traités se comportent de plus en plus mal.

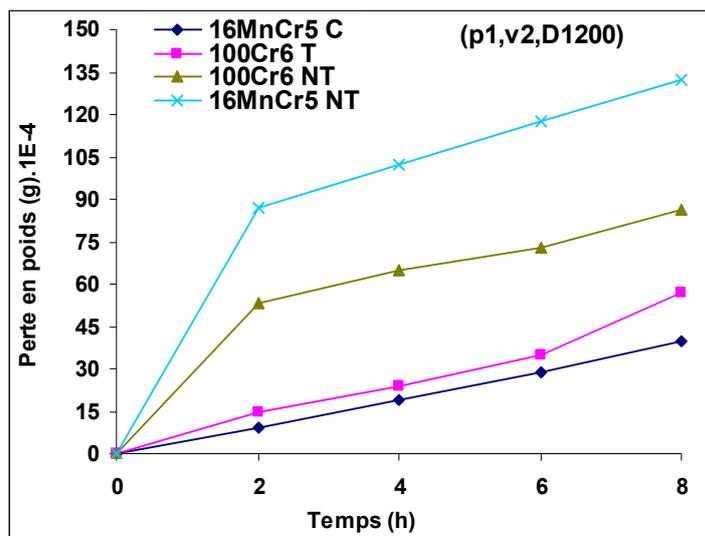


Figure II-70. Perte en poids en fonction du temps (P1, V2, contre abrasif $\phi 1200$)

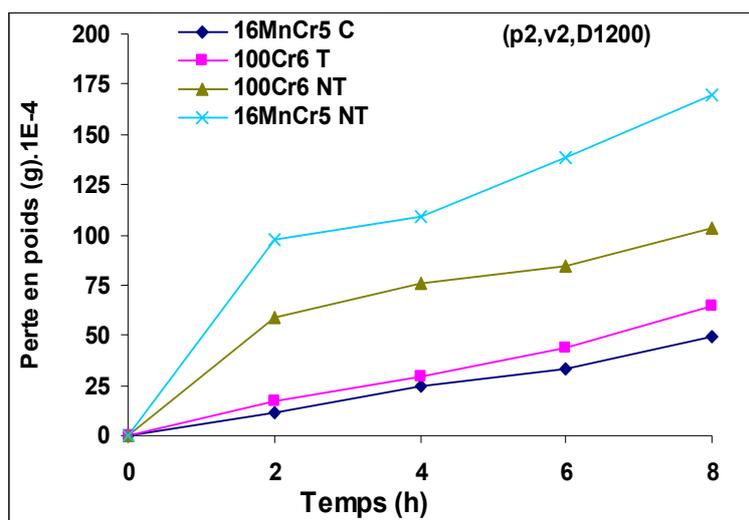


Figure II-71. Perte en poids en fonction du temps (P2, V2, contre abrasif $\phi 1200$)

La comparaison des figures (III-70, III-71) montre bien la conservation du classement des courbes d'usure pour des conditions sévères (p2 ; v2) 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, suivie 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 étudiés résulte de trois altérations : 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.

Le second se manifeste par un enlèvement important de matière où la surface d'usure présente un aspect lisse avec une faible rugosité.

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 à conduit à mieux comprendre le comportement en frottement et à l'usure de différents matériaux, ainsi que l'influence de différents paramètres.

V-1. Influence de la charge appliquée

L'influence des charges normales appliquées (PI 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.

V-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 à une valeur variable.

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

V-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 fin 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 est avant tout un problème d'interface, car mis à part quelques cas spéciaux, le frottement dépendra beaucoup plus des propriétés des couches superficielles que des propriétés volumiques du corps considéré.

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible ; chaque état d'un système détruit définitivement l'état précédent, de sorte qu'il est très difficile, voire impossible, de reconstituer le passé à partir du constat d'une dégradation.

Les résultats obtenus nous ont conduit aux conclusions suivantes :

La détermination du comportement mécanique (en traction, en compression, en flexion, choc...) du matériau est nécessaire pour pouvoir modéliser de façon correcte la réponse à une sollicitation mécanique quelconque.

Nous avons montré que la valeur de contrainte à la rupture dépendait fortement de la nature et la dureté des aciers.

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'analyse des mécanismes de dégradation des aciers a permis de mettre en relation les endommagements dus au frottement : principalement l'usure abrasive et la déformation plastique des couches superficielles.

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 est encore mal connue 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.

Les essais tribologiques complémentaires pourraient permettre d'estimer l'incrément de déformation en fonction de la charge appliquée et de la vitesse de glissement qui doit être les deux paramètres les plus influents sur ces paramètres.

ANNEXE I

THEORIE DE HERTAZ

Contacts de Hertz

Cette annexe rappelle les relations de hertz pour les trois contacts de base (Figure I-1)[21-22].

- contact ponctuel entre deux sphères ou entre une sphère et un plan
- contact linéaire entre deux cylindres ou entre un cylindre et un plan
- contact surfacique entre deux plans

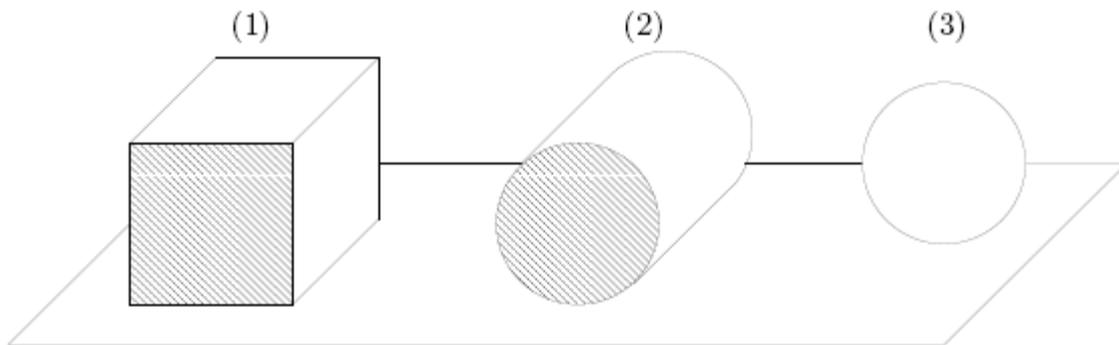


Figure I-1. Types de contacts fondamentaux. (1) contact plan/plan, (2) contact cylindre/plan, (3) contact sphère/plan

I-1. Contact ponctuel : sphère sur plan

I-1-1. Comportement élastique

Dans le cas d'une sphère de rayon R en contact avec un plan, la zone de contact est circulaire de rayon a .

$$a = \sqrt[3]{\frac{3F_N R}{4E^*}} \quad (\text{A.I-1})$$

La répartition de pression à l'intérieur de la zone de contact p est :

$$P(r) = p_0 \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}} \quad (\text{A.I-2})$$

Avec r la variable d'espace en coordonnées cylindrique.

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{A.I-3})$$

La pression maximale p_0 est située au centre du contact est vaut :

$$p_0 = \frac{3F_N}{2\pi a^2} = \sqrt[3]{\frac{6F_N E^*{}^2}{\pi^3 R^2}} \quad (\text{A.I-4})$$

La pression moyenne du contact p_m vaut :

$$P_m = \frac{4}{\pi} p_0 = \sqrt{\frac{F_N E^*}{\pi R}} \quad (\text{A.I-5})$$

La déformation au centre du contact (profondeur de pénétration) δ est :

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \sqrt[3]{\frac{9F_N^2}{16RE^*{}^2}} \quad (\text{A.I-6})$$

Selon Hamilton [21-22], les contraintes σ_{ii} dans le demi-espace indenté s'expriment analytiquement dans le plan $(0,x,z)$:

Avec :

$$\sigma_{11} = \frac{p_0}{a} \left[(1+\nu)z\phi + \frac{1}{x^2} (Mzav + \frac{1-2\nu}{3} (NS + 2AN + a^3) - (1-\nu)Nz^2) - N - \frac{Mza}{S} \right] \quad (\text{A.I-7})$$

$$\sigma_{22} = \frac{p_0}{a} \left[(1+\nu)z\phi + \frac{1}{x^2} (Mzav + \frac{1-2\nu}{3} (NS + 2AN + a^3) - (1-\nu)Nz^2) - 2N\nu \right] \quad (\text{A.I-8})$$

$$\sigma_{33} = \frac{p_0}{a} \left[\frac{azM}{S} - N \right] \quad (\text{A.I-9})$$

$$\sigma_{13} = \frac{p_0}{a} \left[-z \left(\frac{xN}{S} - \frac{xzH}{G^2 + H^2} \right) \right] \quad (\text{A.I-10})$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{23} = 0 \quad (\text{A.I-11})$$

$$A = x^2 + z^2 - a^2 \quad (\text{A.I-12})$$

$$S = A^2 + 4a^2 z^2 \quad (\text{A.I-13})$$

$$M = \left(\frac{S + A}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.I-14})$$

$$N = \left(\frac{S-A}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.I-15})$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a}{M}\right) \quad (\text{A.I-16})$$

$$G = M^2 - N^2 + zM - aN \quad (\text{A.I-17})$$

$$H = 2MN + aM + zN \quad (\text{A.I-18})$$

Pour le cas particulier où $x = 0$ le long de l'axe \vec{z} , ces relations deviennent :

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \frac{p_0}{a} \left[(1+\nu) \left(z \tan^{-1}\left(\frac{a}{z}\right) - a \right) + \frac{a^3}{2a^2 + 2z^2} \right] \quad (\text{A.I-19})$$

$$\sigma_{33} = -\frac{p_0}{a} \left(\frac{a^3}{a^2 + z^2} \right) \quad (\text{A.I-20})$$

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0 \quad (\text{A.I-21})$$

Sur les bords du contact $\sigma^a = \sigma_{(x=a)}$ et au centre du contact $\sigma^0 = \sigma_{(x=0)}$, les contraintes sont :

$$\sigma^a_{11} = -\sigma^a_{22} = -\frac{1-2\nu}{3} p_0 \quad (\text{A.I-22})$$

$$\sigma^0_{11} = \sigma^0_{22} = -\frac{1+2\nu}{2} p_0 \quad (\text{A.I-23})$$

$$\sigma^0_{33} = -p_0 \quad (\text{A.I-24})$$

I-1-2. Comportement plastique

Le comportement plastique d'un contact cylindre sur plan débute lorsque la force normale atteint la valeur :

$$F_N = \frac{21.R^2.Y^3}{E*^2} \quad (\text{A.I-25})$$

Si Y est le seuil de plasticité, la pression moyenne reste alors égale à $1.6Y$. Notons que la plastification apparaît en premier en profondeur et non à la surface. Ce point de première plastification a pour coordonnées

$[x = 0 ; y = 0 ; z = 0.48a]$.

I-2 contact linéaire : cylindre sur plan

I-2-1 Comportements élastique

La pression dans le contact est :

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (\text{A.I-26})$$

Avec p_0 la pression maximum au centre du contact et p_m la pression moyenne.

$$p_0 = p(x=0) = \frac{2F_N}{\pi a L} \quad (\text{A.I-27})$$

$$p_m = \frac{4}{\pi} p_0 = \sqrt{\frac{F_N E^*}{\pi R}} \quad (\text{A.I-28})$$

La demi-largeur de contact a s'écrit :

$$a = \sqrt{\frac{4F_N R}{\pi E^* L'}} \quad (\text{A.I-29})$$

L'indentation maximale au centre du contact est :

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \frac{4F_N}{\pi E^* L'} \quad (\text{A.I-30})$$

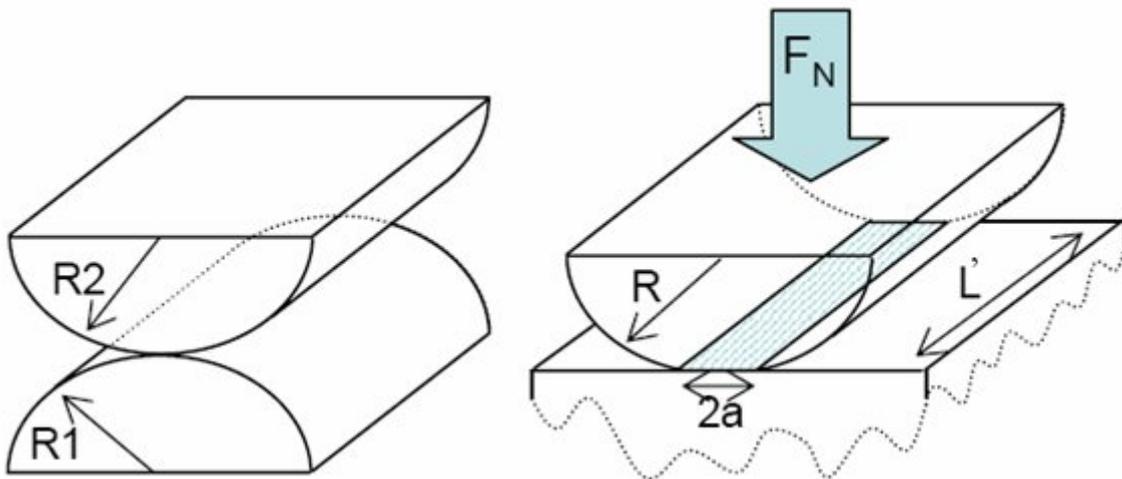


Figure I-2. Glissement d'un solide selon les lois d'Amonton

II-2-2. Comportement plastique

Le comportement plastique d'un contact cylindre sur plan débute lorsque la force normale atteint la valeur :

$$F_N = L' \cdot \frac{8.8RY^2}{E^*} \quad (\text{A.I-31})$$

Si Y est le seuil de plasticité, la pression moyenne reste alors égale à 1.67Y. Notons que la plastification apparaît en premier en profondeur et non à la surface.

I-3. Contact surfacique : plan sur plan

Soit un poinçon cylindrique de rayon a et de base plane qui indente un massif semi-infini. L'indentation e et la répartition de pression dans le contact s'écrivent :

$$e = \frac{F_N}{2aE^*} \quad (\text{A.I-32})$$

$$p(r) = -\frac{F_N}{\pi a^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}} \quad (\text{A.I-33})$$

Avec E*le module élastique réduit équivalent.

ANNEXE II

Forme d'usure	Manifestation	Circonstances d'apparition
Usure par adhésion	Des particules sont transférées d'un corps sur l'autre ;si les matériaux sont de natures différentes ,le transfert s'effectue préférentiellement du corps le plus tendre ,ou le moins tenace ,sur le corps le plus dur .	Frottement donnant à des liaisons (jusqu'à la soudure) Dont la résistance mécanique est supérieure à celle de l'un au moins des matériaux
Usure par surcontraintes : -déformation plastiques -fracture, égrènement	-Modifications géométriques et dimensionnelles (en général sans perte de poids) -fissuration, décohésion – écaillage superficiel, émission de particules.	-Pression moyennes élevées ou suppressions locales, entraînant dépassement de la limite d'élasticité -Contraintes anormalement élevée par rapport aux caractérisations mécaniques des matériaux.
Usure par fatigue des surfaces	Piqûres, cavités, pouvant intéresser des profondeurs de plusieurs dixièmes de millimètres.	Contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de chocs, ou de glissement en régime lubrifié.
Usure par abrasion –érosion	-Pertes de poids et/ou de cote -Rayures, sillons cavités...dus à des effets de coupe ou de déformation.	-Abrasion à deux corps : les rugosités, défauts de surface, labourent ou abrasent l'antagoniste ; -Abrasion à trois corps : des particules dures et pulvérulente sont présentes à l'interfaces ; ces particules sont libres de se mouvoir entre les surfaces ou sont enchâssées dans l'une d'entre elles.
Usure par fretting corrosion	-Coloration des surfaces -Usure par abrasion avec perte de cote.	-Ensembles mécaniques soumis à vibrations ; -pièces soumises à des mouvements relatifs alternés de faible amplitude.

Tableau II-1. Différentes formes d'usure [9].

ANNEXE III

LE MICROSCOPE OPTIQUE

III .Le microscope optique

Est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en biologie, pour observer les cellules, les tissus, en pétrographie pour reconnaître les roches, en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage[23].

Il ne faut pas le confondre avec la loupe binoculaire qui n'exige pas des échantillons plats de faible épaisseur, ou réfléchissants, et permet d'observer des pièces naturelles sans préparation en grossissant l'image d'un facteur peu élevé, mais en gardant une vision stéréoscopique propice à l'examen macroscopique révélateur de grains, de criques, de fissures, etc.



III -1. Principe du microscope optique de base

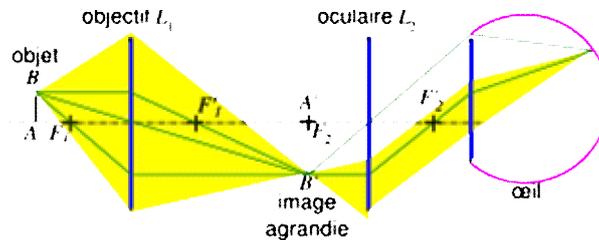


Figure III-1. Principe d'un microscope simplifié

Le microscope optique se base sur les lentilles pour obtenir une image agrandie de l'échantillon à observer.

On peut faire un microscope simplifié avec deux lentilles convergentes. L'objet à observer est placé devant la première lentille appelée « objectif ». Si l'objet est au-delà de la distance focale, cela forme une image réelle inversée et de taille différente ; l'image est plus grande que l'objet si celui-ci est situé à une distance inférieure au double de la distance focale de l'objectif.

La deuxième lentille est l'oculaire : elle est positionnée de sorte que l'image soit dans son plan focal. Ainsi, l'œil observe une image « à l'infini », donc en relâchant les muscles chargés de l'accommodation, ce qui représente un meilleur confort visuel.

Il s'agit d'un système centré dioptrique, composé en partie de doublets pour en corriger certaines des aberrations optiques.

A contrario d'autres systèmes optiques qui sont définis par leur grossissement optique (téléscope) ou leur grandissement (appareil photographique), le terme approprié, pour le microscope, est sa puissance, rapport de l'angle, sous lequel est vu l'objet à travers l'instrument, à la longueur de cet objet.

La technique d'illumination la plus utilisée en microscopie à champ large classique est l'illumination de Köhler, qui garantit une qualité d'image optimale.

III -2. Constitution du microscope

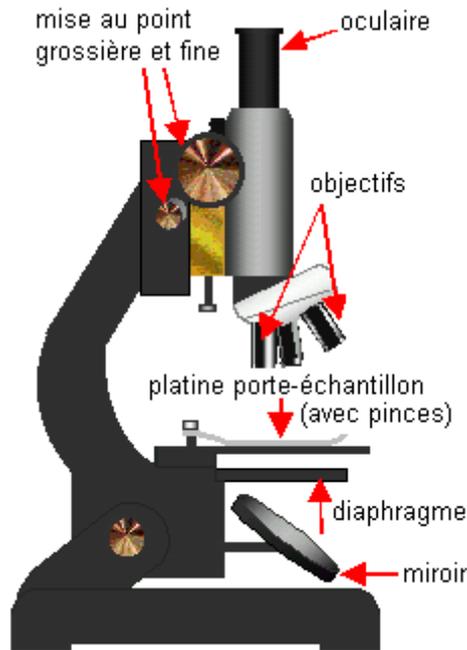


Figure III-2. Microscope optique

De bas en haut :

- ❖ **miroir** : sert à réfléchir la lumière ambiante pour éclairer l'échantillon par en dessous, dans le cas d'un échantillon transparent (par exemple une lame mince en biologie ou en géologie, ou un liquide) ;
- ❖ **source de lumière** artificielle de meilleure température de couleur et de stabilité et par l'usage d'un condenseur qui permet à cette lumière de remplir d'une façon homogène et régulière le champ observé, et surtout de ne pas faire voir, par son réglage adéquat, les détails mécaniques de la source de lumière (spires du filament de l'ampoule). La source d'éclairage peut être plus élaborée et comporter un boîtier indépendant, éventuellement en lumière polarisée ou ultraviolet, pour faire ressortir certaines propriétés chimiques de la matière, ou éclairer l'échantillon par-dessus (notamment en métallurgie)

- ❖ **diaphragme** : ouverture de diamètre variable permettant de restreindre la quantité de lumière qui éclaire l'échantillon ;
- ❖ **platine porte-échantillon** : où l'on pose l'échantillon ; les pinces servent à tenir l'échantillon lorsque celui-ci est mince (par exemple une lame de verre). La platine peut être mobile (gauche-droite et avant-arrière), ce qui permet de balayer l'échantillon et de sélectionner la partie observée ;
- ❖ **objectifs** : lentille ou ensemble de lentilles réalisant le grossissement. Il y a en général plusieurs objectifs, correspondant à plusieurs grossissements, montés sur un barillet. Certains objectifs sont dits à immersion car leur puissance ne peut être atteinte qu'en éliminant la lame d'air entre l'échantillon couvert par la lamelle et la frontale de l'objectif. On utilise pour cela de l'huile de cèdre ou des huiles de synthèse dont l'indice de réfraction est proche de celui du verre.
- ❖ mise au point grossier et fin ; pour que l'image soit nette, il faut que l'objet soit dans le plan focal de l'objectif ; ces molettes font monter et descendre l'ensemble objectif-oculaire avec un système de crémaillère, afin d'amener le plan focal sur la zone de l'échantillon à observer ;
- ❖ **oculaire** : lentille ou ensemble de lentilles formant l'image d'une manière reposante pour l'œil ; les rayons arrivent parallèles, comme s'ils venaient de très loin, ce qui permet un relâchement des muscles contrôlant le cristallin ; deux oculaires placés sur une tête dite binoculaire rend plus confortable l'observation (même si elle n'apporte pas de vision stéréoscopique).

L'oculaire peut être remplacé par un appareil photographique, par une caméra vidéo ou une caméra CCD pour faire une acquisition numérique. Ceci permet de faire l'observation sur un moniteur (écran de type télévision) et de faciliter l'utilisation et le traitement des images (impression, traitement informatique).

III -3. Limites du microscope optique

La résolution d'un microscope désigne sa capacité à séparer des détails très voisins. Indépendamment du capteur utilisé et des aberrations ou imperfections des lentilles, la résolution du microscope optique est fondamentalement limitée par la diffraction de la lumière. En effet, du fait de la diffraction, l'image d'un point n'est pas un point, mais une tache (la tache d'Airy). Ainsi, deux points distincts mais voisins auront pour images deux taches dont le recouvrement peut empêcher de distinguer les deux points images : les détails ne sont alors plus résolus.

Selon la théorie d'Abbe, la limite de résolution (transverse) d d'un microscope, c'est-à-dire la plus petite distance en dessous de laquelle deux points voisins ne seront plus distingués, peut être exprimée simplement à l'aide de la longueur d'onde d'illumination λ , de l'indice de réfraction n en sortie d'objectif, et du demi angle du cône de lumière maximum accessible α .

$$d = \frac{\lambda}{2n\sin\alpha} = \frac{\lambda}{2NA} \quad (\text{III -1})$$

Où NA désigne le produit $n\sin\alpha$ ou *ouverture numérique* de l'objectif. On peut donc augmenter la résolution de deux manières :

- En augmentant l'indice de réfraction. Ceci peut être réalisé en utilisant un objectif à immersion : on immerge la frontale de l'objectif dans un liquide dont l'indice de réfraction est proche du maximum de 1,5 - celui du verre.
- En diminuant la longueur d'onde. Toutefois, si on reste dans la lumière visible, il n'est pas possible de descendre en-dessous de 400 nm.

La limite de résolution d'un microscope photonique classique est d'environ 0,2 μm . Le microscope électronique en transmission atteindra, lui, une limite 100 fois plus petite.

Des techniques de microscopie photonique permettent de dépasser la limite d'Abbe. Elles sont parfois dites "super résolution". Citons entre autres :

- les techniques d'illumination structurée et les techniques tomographiques qui cherchent à récupérer les hautes fréquences spatiales coupées dans un microscope classique.
- les techniques utilisant les ondes évanescentes (SNOM).
- la microscopie confocale qui réduit la réponse impulsionnelle.

III -4. Préparation des échantillons

L'échantillon observé doit remplir certaines conditions :

- ❖ de planéité, pour que l'objectif en donne une image entière nette, faute de quoi on ne peut en observer qu'une portion restreinte
- ❖ en transmission, il doit être de faible épaisseur pour que la lumière le traverse et ne rende visible que quelques éléments (cellules) dans le cas de la biologie ;
- ❖ en réflexion, la surface doit être en général polie afin que les rayures ne masquent pas ce que l'on veut observer ;
- ❖ les parties à observer doivent pouvoir se différencier :
 - différenciation de couleurs par la coloration chimique de solutions standardisées, pour la biologie ;
 - attaques chimiques par des acides pour révéler des défauts en métallurgie ;
 - d'autres différenciations par l'éclairage en lumière polarisée, en ultra-violet (fluorescence), ou par principe interférentiel, révélant d'autres aspect, invisibles à l'œil nu.

En biologie, il est nécessaire, préalablement, de placer, la coupe de tissu ou le liquide contenant des organismes vivants, entre une lame et une lamelle de verre

L'objectif doit s'approcher de la lame pour la mise au point sans, par maladresse, détruire la préparation devenue très fragile.

Du fait de la préparation, la microscopie optique nécessite une importante quantité d'appareils complémentaires pour la seule destination de l'observation microscopique.

Prenons le cas de la biopsie en médecine et biologie (anatomopathologie) : le diagnostic par microscopie, de pièces biologiques prélevées par biopsie pendant une opération, impose des délais courts. Pour préparer la lame, on utilise un appareil appelé cryotome, une sorte de « trancheuse à jambon », placée dans un cryostat (congélateur), qui permet de découper des tranches très fines du corps qui sera à observer en le refroidissant rapidement, puis en le découpant à l'aide de la lame d'un rasoir spécial, affûté sur une autre machine à plaque de verre à l'aide de pâtes diamantées. Si l'on veut travailler à température ambiante, les délais sont plus longs et imposent des déshydratations et remplacement des eaux supprimées par de la paraffine (24 heures) pour que l'échantillon garde sa rigidité ; ensuite, il est coloré par plusieurs substances d'actions alternées de durée très longues, elles aussi.

BIBLIOGRAPHIE



- [1]. **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)
- [2]. **Lauric GARBUIO** «Etude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionneurs piézoélectriques» thèse docteur, Génie Électrique. INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE (2006)
- [3]. **F.P.BOWDEN , D.TABOR**,«Friction and Lubrification of solids» Clarendon press, Oxford, (1956).
- [4]. **Adrian PANAIT**«Etude expérimentale et numérique des problèmes de contact unilatéral et de frottement sec dans les assemblages verriers» Thèse docteur de l'Université de Marne-la-Vallée. (2004).
- [5]. **J.J GAUBET** «Théorie et pratique industrielle du frottement » . Mécanique des surfaces, collection dirigée par R .coutel. Technip/ DUNOD, paris 1964.
- [6]. **Samuel NACIVET**«MODELISATION DU FROTTEMENT EN PIED D'AUBE PAR UNE APPROCHE FREQUENTIELLE» thèse docteur DE L'ECOLE CENTRALE DE LYON SPECIALITE MECANIQUE, (2002).
- [7]. **Salman NOUROUZI**«CONTRIBUTION A L'ETUDE DU PROCEDE ARC-FIL POUR LA REALISATION DE DEPÔTS METALLIQUES» Thèse docteur: Matériaux Céramiques et Traitements de surface. (2004).
- [8]. Graissage – Lubrification Moteur La lubrification : les huiles
loic@lololemecano.info
- [9]. **Eduard ANTALUCA**«Contribution à l'étude des contacts élasto-plastiques effet d'un chargement normal et tangentiel» Thèse docteur. Lyon (2005).
- [10]. **Olivier BARRAU**«ÉTUDE DU FROTTEMENT ET DE L'USURE D'ACIER À OUTILS DE TRAVAIL À CHAUD» Thèse docteur. Toulouse. Génie des Matériaux. (2000).

- [11]. **J.F.ARCHARD**, Contact and rubbing of flat surfaces, Journal of Applied Physics, volume 24, Issue 8, (1953), pp.981-988.
- [12]. **M.CARTIE**, Guide d'emploi des traitements de surface appliqués aux problèmes de frottement, Edition Tec&Doc, (2000).
- [13].**H.HOUMID BENNANI**, Contribution à l'étude de l'adhérence et des caractéristiques mécaniques et tribologiques de quelques couches minces dures, U.F.R. des Sciences et Technologies de l'université de Franche Comté, (1998).
- [14].**AOUICI SAMIA** (comportement en frottement et a l'usure des aciers traites superficiellement et des céramiques techniques) thèse de magister en construction mécanique. (1999).
- [15]. **M .GODET**«The third body approach: a mechanical view of wear». Wear100, (1984), 432-452.
- [16]. **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).
- [17].**D.PLAY**. «Portance et transport de troisièmes corps en frottement sec ». Thèse de docteur és-sciences INSA-LYON. (1979)
- [18].**Y. BERTIER**, «Effet du comportement du troisième corps sur l'usure des paliers en mouvements alternatifs ».Thèse DOCTEUR Ingénieur, INSA-Lyon. (1982).
- [19]. **J.DENAPE**,«Comportement Mécanique en frottement et Usure à température ambiante de Céramique à usage thermomécanique». Thèse de docteur d'Etat, ENSM Paris (1986).
- [20].**Dominique FRANÇOIS**, « Détermination des lois de comportement » Essais mécaniques des métaux. (1984).
- [21].**K. Johnson**, Contact Mechanics, Cambridge University Press.(1985).
- [22]**J.-M. Georges**, Frottement Usure et Lubrification, Editions Eyrolles. (2000).
- [23]. http://fr.wikipedia.org/wiki/Microscope_optique