

M/531.648

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



**Mémoire de fin d'études**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master**  
**Option : Conception et Production Industriel**  
**Présenté par : Daiboun Sahel Amine**

=====

***L'acier 100Cr6 face aux mécanismes de l'usure***  
***Influence des traitements thermiques sur***  
***Le comportement en frottement***

=====

Sous la Direction de :

**Dr. Belbah. A**

**Année universitaire 2012/2013**

# Remerciements

1312907

*Je tiens tout particulièrement à exprimer ma gratitude et mes plus vifs remerciements à Mr BELBAH AHMED , professeur à l'université 8 mai 1945, pour m'avoir encadré dans ce projet de master et permis de bénéficier de son grand savoir en la matière, pour sa pédagogie, ces compétences, sa modestie et son aide précieuse tout au long de ce projet.*

*Ce travail doit beaucoup aux personnes de l'équipe technique pour qui j'ai la plus grande estime, notamment ABDALLAH GUENDOZ qui m'a été d'une aide précieuse.*

*Un grand merci enfin à ma famille et particulièrement à mon père ma mère et ma grand mère, ma sœur et mes frères pour leur soutien inconditionnel.*

*Très aimablement, je remercie toutes mes amis RIDA, REZAK, MOUHAMED, AMARE, ABDE RAHMANE, CHRIF, BOB , HAMTA , CHAOIKI, ISSAME , m'éprouvant incessamment leur amabilité.*

*Je tiens à remercier vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.*

## Sommaire

Introduction générale :	1
Chapitre I : Recherche bibliographique	2
I.1. La tribologie :	2
I.1.1. Introduction :	2
I.1.2. Définition de la tribologie :	2
I.1.3. Le frottement :	3
I.1.4. L'usure :	9
<b>I.1.5. Approche globale du troisième corps :</b>	<b>14</b>
I.2. Les traitements thermiques et thermochimiques :	16
I.2.1. Les traitements thermiques des aciers :	16
I.2.2. Trempe :	18
I.2.3. Revenu :	19
I.2.4. Le recuit :	20
I.2.2. Traitements thermochimiques des aciers :	23
I.3. L'acier 100Cr6 :	27
I.3.1. Introduction :	27
I.3.2. Définition :	28
I.3.3. Composition chimique :	28
I.3.4. Caractéristiques mécaniques :	28
I.3.5. Aptitude à la trempe:	28
I.3.6. Les essais mécaniques :	28
I.3.6.1. Essais de dureté (H) :	28
I.4 Travaux antérieurs :	29
Chapitre II : étude expérimental	34
II.1. Introduction :	34
II.2. Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales utilisées :	34
II.2.1. Préparation des échantillons :	34
II.2.2. Les essais mécaniques.....	39
II.2.2.1. Essais de dureté (H) .....	39
II.2.3. Essai de frottement et l'usure :	40
II.2.4. Résultats et discussions :	42
II.3. Etude comparative :	48
II.4. Mécanismes d'usure des surfaces :	52

II.5. Influence des paramètres tribologiques :.....	52
II.5.1. Influence de la charge appliquée :.....	52
II.5.2. Influence de la vitesse de frottement :.....	53
II.5.3. Influence de la taille de l'abrasif :.....	53
II.6. Comportement et rôle du troisième corps : .....	53
Chapitre III : Modèle mathématique.....	54
III.1. Introduction :.....	55
III.2. Modèles de perte en poids de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif D100 en fonction de (vitesse, charge, temps) : .....	55
III.2.1. Résultats des expériences : .....	55
III.2.2. Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique :.....	55
III.3. Modèles de perte en poids de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif D400 en fonction de (vitesse, charge, temps) : .....	65
III.3.1. Résultats des expériences . .....	65
III.3.2. Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique : .....	65
Conclusion : .....	74
Conclusion générale : .....	75
Références bibliographiques: .....	76

## **Introduction générale :**

L'usure 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 effet L'usure est une conséquence du frottement, ce dernier est un processus complexe, étroitement lié aux facteurs mécaniques, thermiques et physico-chimiques, le frottement dépendra beaucoup plus des propriétés des couches superficielles que des propriétés volumiques du corps considéré.

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.

Notre travail comprend trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique qui s'articule autour de quatre points :

- La connaissance de telles caractéristiques relève du domaine de la tribologie, science qui étudie les phénomènes de frottement et l'usure des matériaux.
- L'exposition de l'ensemble des techniques et modes des traitements thermiques et thermo-chimiques ainsi que les transformations structurales et modification des caractéristiques qui les accompagnent.
- Présentation de l'acier 100Cr6 et ces caractères mécanique, puis on accède aux essais de dureté basant sur l'essai de Rockwell.
- Des travaux antérieurs réalisés dans le cadre de l'influence des divers traitements sur le comportement en frottement.

Dans le deuxième chapitre, une étude comparative du frottement de l'acier 100Cr6 traité et non traité où nous nous intéressons plus particulièrement à l'influence de quelques paramètres sur le comportement en frottement de l'acier étudié telles que : la vitesse, la charge, la taille d'abrasif et les traitements thermiques.

Le troisième chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques des différents paramètres étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre la charge, la vitesse, le temps, et la perte en poids lors de frottement de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif à gros et fin grains.

# Chapitre I

## *Recherche bibliographique*

## I.1. La tribologie :

### I.1.1. Introduction :

La tribologie est une science jeune, parce qu'on a commencé à s'intéresser à la tribologie lorsque les conséquences du frottement devenaient gênantes. Même une usure très faible peut influencer, de façon importante, le fonctionnement des systèmes. Il a été possible de réaliser des études de la tribologie à partir du moment où l'on avait des outils suffisamment performants. Les moyens se sont développés depuis environ 30 ans et continuent à évoluer (moyens d'analyse tribologique) [1].

### I.1.2. Définition de la tribologie :

Le terme tribologie, du grec  $\tau\rho\iota\beta\omicron\sigma \lambda\omicron\gamma\omicron\varsigma$  (tribos logos), signifie science du frottement. De manière plus générale, la tribologie est la science et la technologie qui étudie les cas de frottement, de lubrification et d'usure liés au mouvement relatif de surfaces en contact [2]. Un système tribologique se définit comme un système mécanique, formé de deux matériaux antagonistes en contact, animés de mouvements relatifs. Ces deux solides évoluent dans un milieu ambiant et peuvent être séparés par un film intercalaire appelé troisième corps. Sur le plan tribologique, le troisième corps [3] est un opérateur qui transmet la charge (ou portance) d'un premier corps sur l'autre et accommode en s'écoulant (débit) d'une façon dissipative (frottement) l'essentiel de la différence de vitesse entre deux corps. Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation in situ (particules détachées) [4].

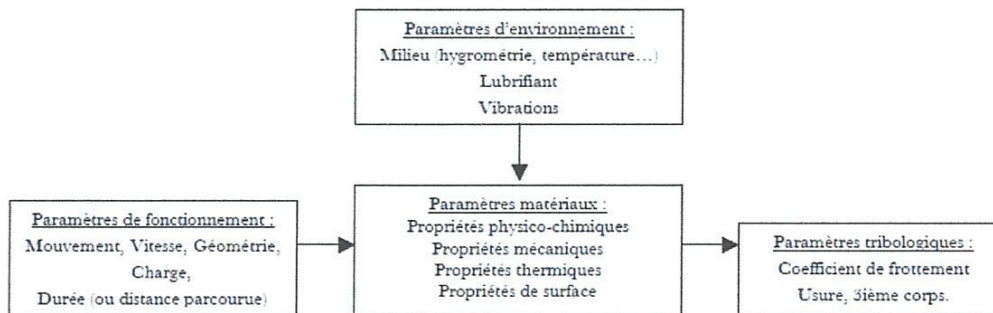


Fig. I.1 : Synoptique général d'un système tribologique.

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.

### I.1.3. Le frottement :

Le frottement est omniprésent dans la vie quotidienne : par exemple lorsqu'on marche, démarre une voiture, qu'on freine. Dès les débuts de l'humanité, on a été préoccupé par le frottement :

- Invention de la roue.
- Tombes égyptiennes : construction des pyramides [1].

#### I.1.3.1. Définition :

Le frottement peut être défini comme la résistance au mouvement qui se manifeste lors du déplacement relatif de deux surfaces en contact [5]. Les normes définissent la force de frottement qui est la force résistante tangentielle à l'interface entre deux corps lorsque, sous l'action d'une force extérieure, un corps se déplace ou tend à se déplacer relativement à un autre [6].

Donc on peut donner au frottement la définition suivante :

« Force qui agit entre deux corps à leur surface de contact de façon à freiner le déplacement de l'un par rapport à l'autre. » [7].



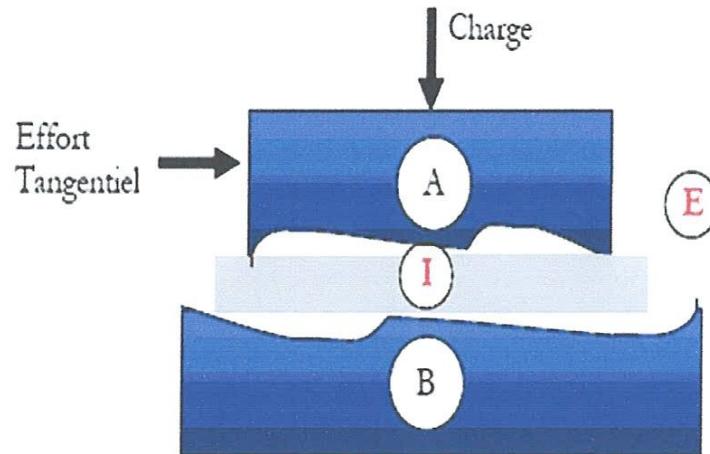


Fig. I.2 : Schéma d'un tribo-système.

### I.1.3.2. Différents types de frottements :

Les tribologies différencient deux types de frottement :

- le frottement lubrifié : un film est introduit entre les surfaces de deux corps massifs en mouvement relatif. Les lubrifiants peuvent être des fluides plus ou moins visqueux (huiles, graisses, émulsions) ou des particules solides (graphite, bisulfure de molybdène...).
- le frottement sec : les solides sont en contact direct ; aucun corps n'est interposé entre les surfaces à l'exception des débris d'usure.

Les lois régissant le frottement lubrifié font appel à la mécanique des fluides tandis que le frottement sec requiert la prise en compte de phénomènes mécaniques et physico-chimiques.

### I.1.3.3. Théories du frottement :

Léonard de Vinci (1452-1519) est à l'origine des premières lois du frottement ; il postula que la force nécessaire au glissement est proportionnelle à la charge et indépendante de la surface de contact. Bien plus tard, ces lois furent redécouvertes par Coulomb.

Elles s'énoncent ainsi :

- la force de frottement  $F_T$  est proportionnelle à la charge normale  $F_N$  permettant de définir un coefficient de frottement  $\mu$  :  $F_T = \mu F_N$
- le frottement est indépendant de la surface de contact.

En 1785, Coulomb introduisit une troisième loi :

- la force de frottement est indépendante de la vitesse de glissement.

Il fut l'instigateur des notions de frottement statique et dynamique en distinguant la force seuil nécessaire pour initier le mouvement ( $F_s$ ) et la force requise pour l'entretenir ( $F_d$ ). Il définit ainsi un coefficient de frottement statique  $\mu_s$  et un coefficient de frottement dynamique  $\mu_d$  :

$$\mu_s = \frac{F_s}{F_N} \quad \text{et} \quad \mu_d = \frac{F_d}{F_N}$$

En général, pour un contact sec, le coefficient de frottement dynamique  $\mu_d$  est indépendant de la vitesse de glissement (troisième loi d'Amontons) et inférieur au coefficient de frottement statique  $\mu_s$ .

La plupart des études de friction s'intéressent au coefficient de frottement dynamique. Il est souvent noté  $\mu$  et dépend de manière complexe de nombreux paramètres ; il n'est en aucun cas une propriété intrinsèque d'un matériau donné mais de l'ensemble du système tribologique. Pour donner une idée des ordres de grandeur, le frottement lubrifié donne des valeurs de  $\mu$  comprises entre 0,001 et 0,1, le frottement sec entre 0,1 et 1 ; il est possible d'obtenir des valeurs supérieures à 1, par exemple avec certains métaux frottés sous vide [8].

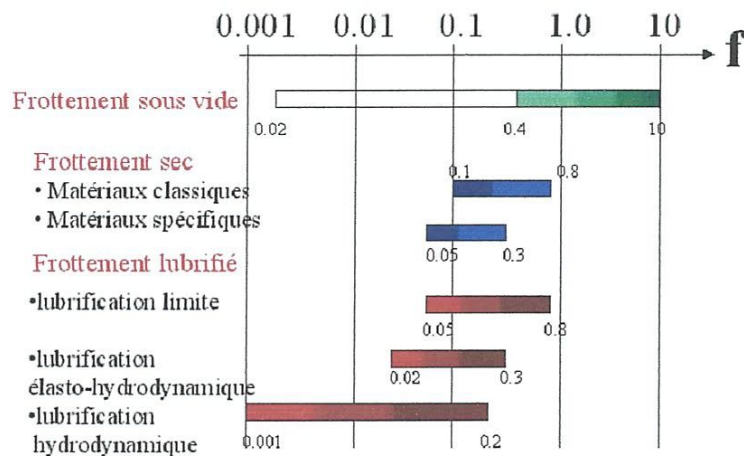


Fig. I.3 : Les valeurs de coefficients de frottement.

Les théories du frottement plus récentes prennent en compte l'aspect microscopique des interactions superficielles. Les surfaces impliquées dans un contact mécanique ne sont jamais parfaitement planes : elles possèdent une certaine rugosité, parfois des ondulations et des défauts. Seules les aspérités supportent directement la charge. L'aire réelle de contact  $A_r$  ne représente qu'une faible fraction de l'aire apparente  $A_a$  ; elle est liée à la charge  $F_N$  par la relation :

$$F_N = A_r P_0$$

où  $p_0$  est la limite élastique (ou contrainte de plastification) du matériau : on admet que la pression exercée localement est telle que la limite d'élasticité du matériau est dépassée et les aspérités déformées plastiquement forment des micro-jonctions adhésives. Les processus susceptibles de contribuer à la force de frottement sont les suivants : le cisaillement des microcontacts adhésifs, le labourage des surfaces par les aspérités, le cisaillement d'un film lubrifiant éventuel. Le modèle de Bowden et Tabor [9], établi pour un contact sec, suppose que la force tangentielle résistante au mouvement  $F_T$  est la somme de deux termes :

$$F_T = F_A + F_D$$

$F_A$  : force de cisaillement des jonctions (adhésion).

$F_D$  : force de déformation des aspérités (labourage).

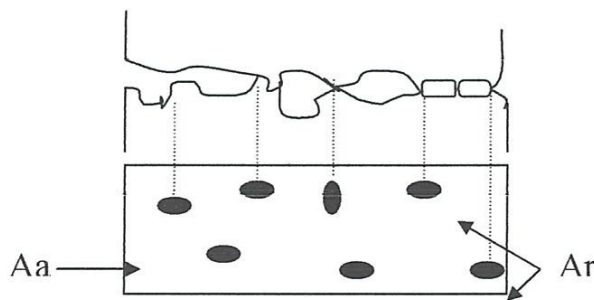
Avec :  $F_A = A_r \tau$  et  $F_D = A_h P_0$

$A_r$  : aire réelle de contact (projetée verticalement).

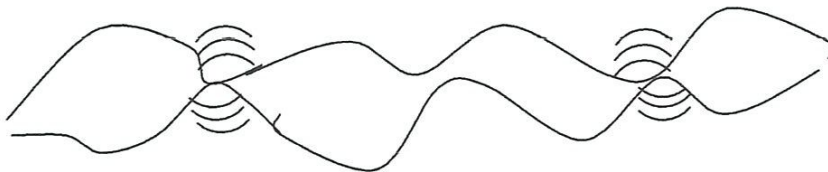
$\tau$  : contrainte de cisaillement limite.

$A_h$  : aire de matériau déplacé par déformation plastique (projetée horizontalement).

$p_0$  : limite élastique du matériau.



**Fig. I.4 :** Aire apparente et réelle de deux corps réels en contact.



**Fig. I.5 :** Déformation plastique et élastique lors d'un contact.

#### I.1.3.4. Les facteurs influençant le frottement :

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

##### ❖ 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 [1].

##### Les variations du coefficient de frottement :

- **Le coefficient de frottement varie avec le temps.**

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

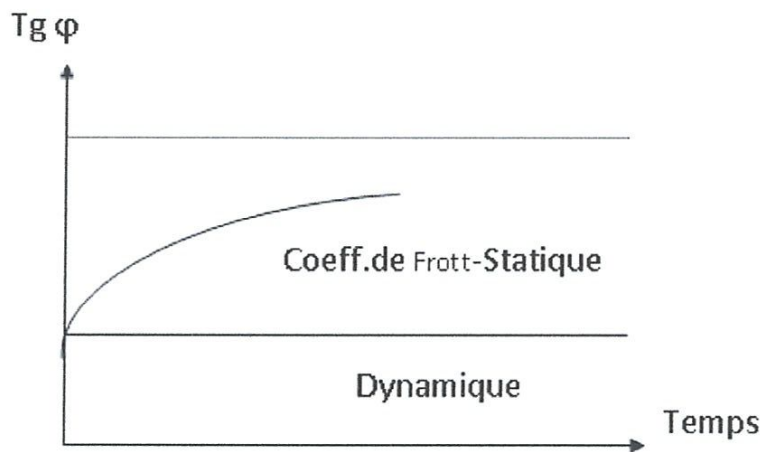


Fig. I.6 : Le coefficient de frottement statique varié avec le temps de maintien en immobilité.

- **Variation du coefficient de frottement avec la vitesse**

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

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

Enfin le contact avec la surface, la vitesse règle le cycle des échauffements et refroidissement successif 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 : trempe, diffusion... etc.

- **Variation du coefficient de frottement avec la charge**

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

- 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.

- **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 médiate des caractéristiques de frottement si la température s'élève jusqu'au point de fusion de l'acier. [7]

- ❖ **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 [1].

❖ **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 lorsque vues sous un microscope. Si la surface de contact entre deux objets 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 objets 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 l'objet [1].

**I.1.4. L'usure :**

L'usure est une conséquence du frottement, et se produit au niveau de la zone de contact [1]. L'étude de l'usure présente un double intérêt économique et scientifique d'une part, l'usure est la principale cause de la mise hors service des objets et des machines.

D'autre part notre civilisation technologique exige de la part des mécanismes des performances de plus en plus poussées par l'augmentation des pressions de contact, des vitesses de glissement et des durées de fonctionnement [7].

**I.1.4.1. Définition :**

L'usure est la perte progressive de la matière de la surface active d'un corps par suite de mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface [7].

Donc on définit l'usure comme une détérioration d'une chose suite à l'usage qu'on en fait [1].

**I.1.4.2. Mécanismes de l'usure:**

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

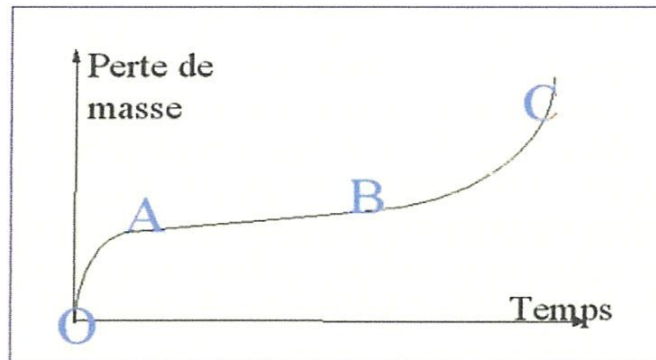
- Dans une première période (L'usure douce ou ultra-douce), que l'on pourrait nommer «rodage» l'usure se fait très rapidement, à des vitesses régulièrement décroissantes. Les surfaces restent lisses et les particules ont une dimension de l'ordre du micromètre.

- Une deuxième période (L'usure sévère), que l'on peut nommer «marche normale» représente en fait la vie de la machine. Pendant celle-ci l'usure est faible où tout au moins constante. Les surfaces des corps sont modifiées, et la taille des particules dépasse 100 microns.
- Une troisième étape (L'usure catastrophique), dite de «vieillessement et mort» de l'organisme, se caractérise par une reprise de l'usure mais avec cette fois une accélération croissante, et par des incidents de plus en plus graves jusqu'à la fin de la pièce [8].

**OA:** l'usure est rapide (rodage).

**AB :** utilisation normale de la machine.

**BC :** la destruction des éléments de la machine.



**Fig. I.7 :** Test de l'usure.

En ce qui concerne la quantification de l'usure, la loi d'Archard [10] constitue le modèle de base de la plupart des études ; initialement appliquée au cas de l'usure par adhésion à sec, elle s'exprime de la manière suivante :

$$\Delta V = K \frac{F_N}{H} L$$

$\Delta V$  : volume usé ( $m^3$ )

$K$  : coefficient d'usure

$F_N$  : charge appliquée (N)

$H$  : dureté du matériau le plus tendre ( $Nm^{-2}$ )

$L$  : distance de glissement (m)

Le taux d'usure est exprimé en perte de volume par unité de distance parcourue ; il varie de manière linéaire avec la charge appliquée et il est inversement proportionnel à la dureté du matériau. Le coefficient d'usure  $K$ , dont les valeurs sont comprises entre  $10^{-4}$  et  $10^{-9}$ , reflète l'amplitude du phénomène (usure sévère - usure modérée).

Cette loi a été reprise par de nombreux auteurs et adaptée à d'autres processus, notamment l'abrasion. Elle doit cependant être utilisée avec précaution car elle ne tient pas compte de tous les paramètres qui peuvent gouverner l'usure (notamment l'environnement) [8].

En réalité il n'existe pas de modèles d'usage général et chaque mécanisme nécessite une étude spécifique.

## METAUX

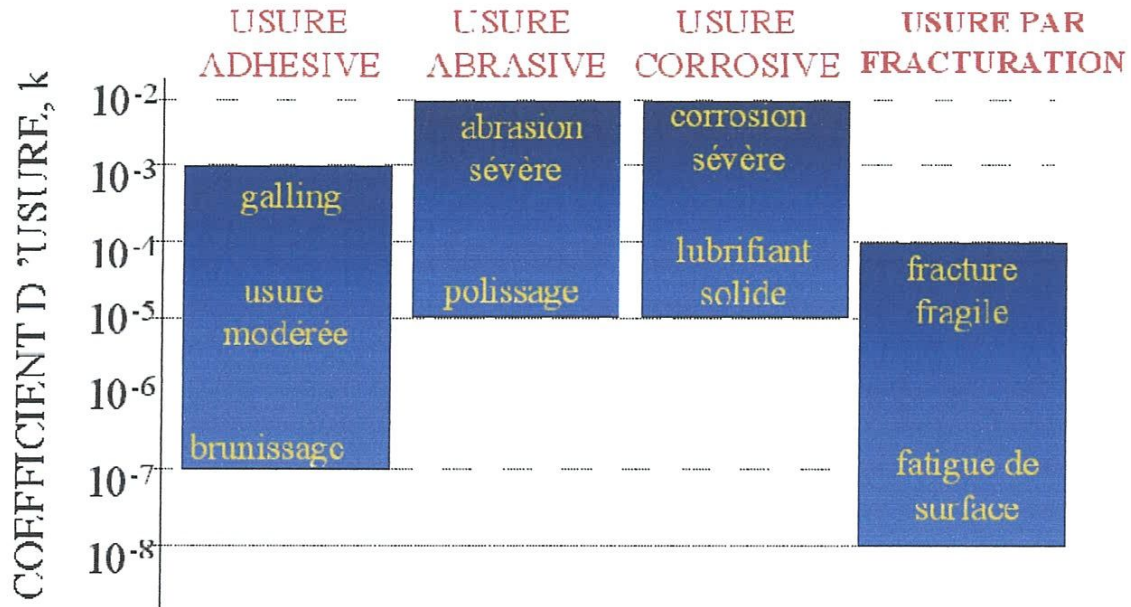


Fig. I.8 : Valeurs des coefficients d'usure pour des métaux et des non métaux.

### I.1.4.3. Les Facteurs de l'usure :

❖ Mode de contact :

\*Les contacts surfaciques «plan / plan ».

\*Les contacts linéaires «cylindre mâle dans un cylindre femelle ».

\*Les contacts ponctuels «sphère/plan ».

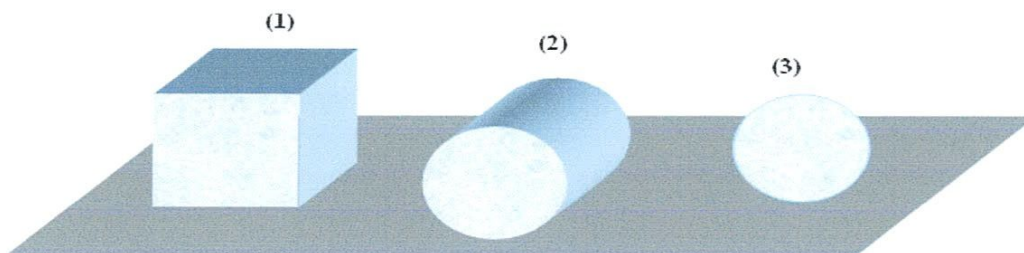


Fig. I.9 : Types de contacts fondamentaux.



**❖ 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 appliquée avant ou après le début du glissement elle peut, pendant une expérience garder une valeur constante ou varier de façon progressive et échelonnée.

**❖ La vitesse :**

Il s'agit, suivant le cas des vitesses de glissement, de roulement en de pivotement. Dans le cas du glissement à sec elle influe surtout sur la température superficielle des pièces en contact et dans le cas du glissement lubrifié, elle est un facteur important d'établissement du régime hydrodynamique, nulle au départ puis croissant progressivement, elle peut en un point d'une surface garder toujours la même direction ou bien changer périodiquement de sens. elle peut varier de quelques micromètres par seconde lorsque les supports des machines se déplacent sous l'effet des dilatations thermiques ou bien atteindre plusieurs centaines de mètres par seconde dans le cas de projection sur leur guide. [7]

**I.1.4.4. Les différents types d'usure sont :****❖ Usure d'adhésive :**

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

**❖ Usure abrasive :**

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

**❖ Usure érosive :**

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

**❖ Usure corrosive :**

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

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

**❖ Usure par fatigue :**

L'usure par fatigue s'observe lorsqu'une surface subit des contraintes cycliques.

On peut observer des déformations plastiques sur les métaux fragiles, des cycles de chargement déchargement en roulement ou en glissement favorise la formation des microfissures en surfaces comme en sous couches [7].

**I.1.4.5. Les Paramètres influençant l'usure :**

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

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

**❖ Influence de la charge :**

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

Pour les fortes charges, ces observations ne sont plus valables car les particules abrasives s'enfonçant trop profondément et sont déchaussées sous l'effet du déplacement ce qui entraîne la dérivation de la tôle abrasive et la diminution de l'usure concernant, l'influence de la charge. AYEL a remarqué, en faisant frotter l'Inconel sur l'alumine que l'usure dépend de la vitesse de glissement.

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

❖ **Influence de la vitesse :**

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

❖ **Influence de l'ambiance :**

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

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

❖ **Influence des propriétés mécaniques :**

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

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

Dans le cas d'usure abrasive et d'usure adhésive où la contrainte de cisaillement est prédominante, la dureté est généralement le facteur le plus important. Par contre, dans le cas où la pression normale est plus élevée (érosion à grande vitesse) l'effet de la ténacité est plus important [7].

### I.1.5. Approche globale du troisième corps :

Cette approche constitue un élément important de généralisation dans l'évolution du comportement trilogique d'un couple de matériaux.

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.

#### ❖ Création et piégeage des débris d'usure :

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 détachent, des massifs sont piégés dans le contact. La figure montre bien un modèle bidimensionnel où la rigidité de la surface qui sont vides au départ par les débris d'usure [7].

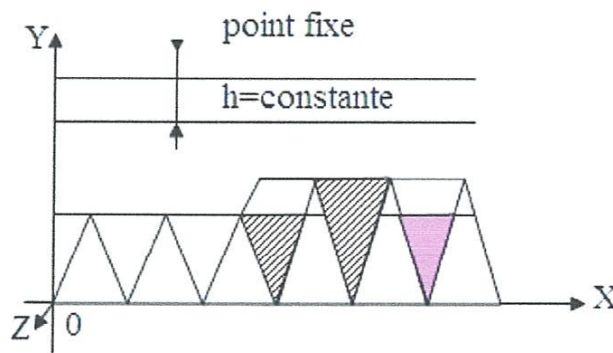


Fig. I.10 : Formation des troisièmes corps.

## I.2. Les traitements thermiques et thermochimiques :

### II.2.1. Les traitements thermiques des aciers :

Les traitements thermiques [11] sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- 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.
    - De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
    - De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- La trempe.
- Le revenu.
- Le recuit.

Avant de présenter les modes principaux de traitement thermique [12] il faut mentionner en mémoire le diagramme fer – carbone.

Le diagramme fer - carbone se présente comme le montre la fig. Les lettres repères sont conventionnelles.

Le liquidus est toujours représenté par la ligne A C D, le solidus par la ligne A E C F D, l'eutectique par le point C. Les autres points seront explicités plus loin.

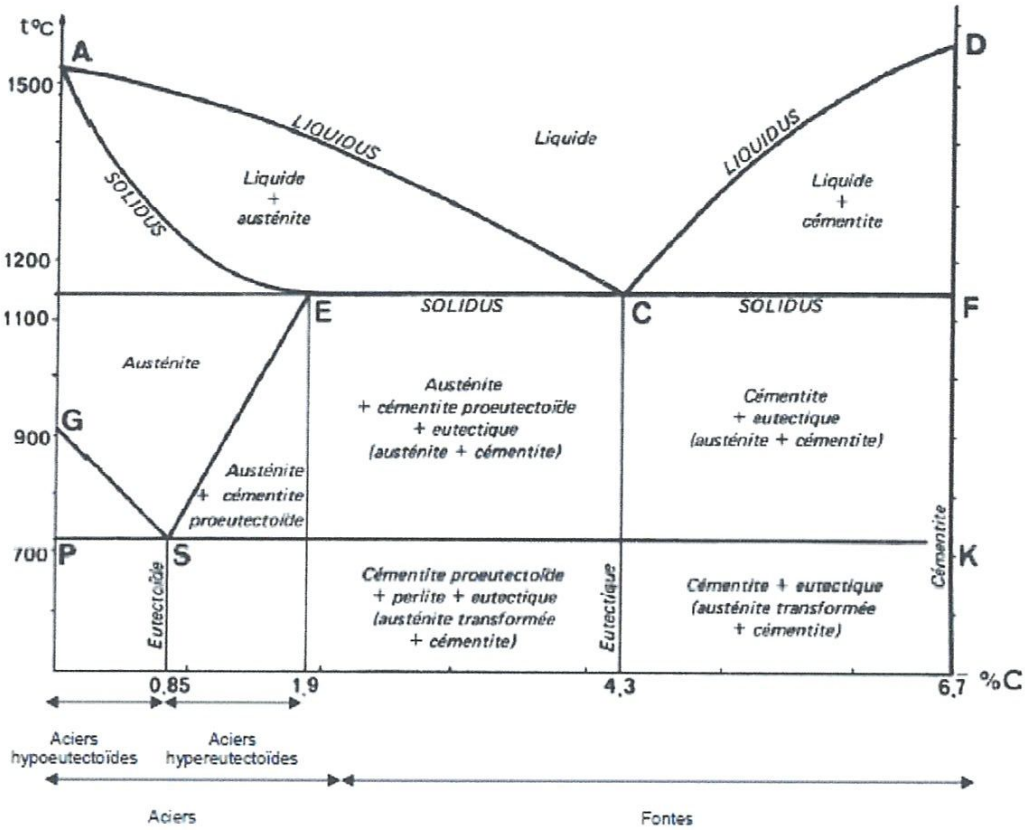


Fig. I.11 : Le diagramme fer – carbone.

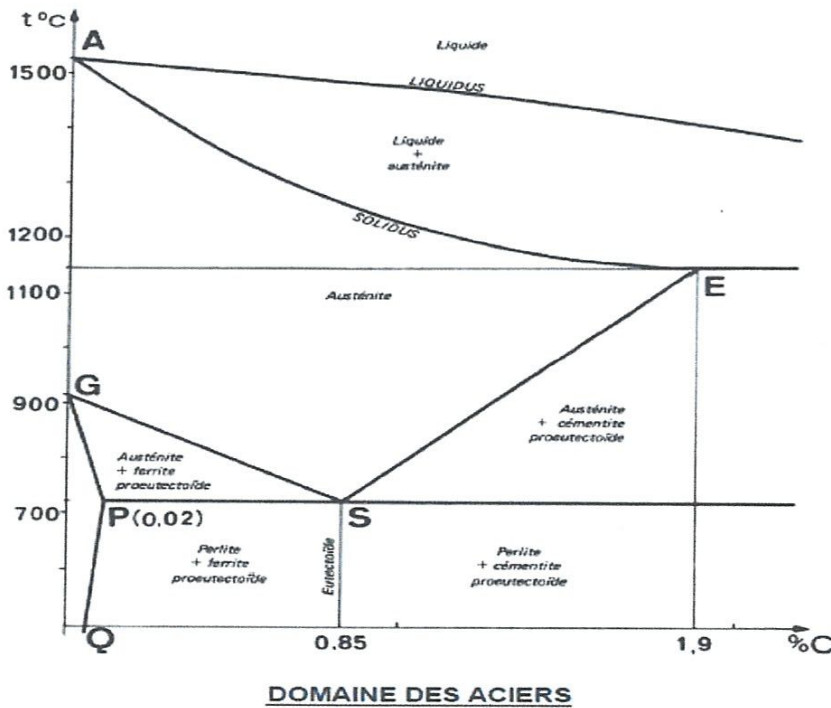


Fig. I.12 : La partie du diagramme correspondant au domaine des aciers.

**I.2.2. Trempe :**

C'est un traitement thermique de durcissement consistant à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer  $\alpha \rightarrow$  fer  $\gamma$  (austénisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale.

**❖ Trempe martensitique :**

Elle provoque l'apparition d'une structure martensitique ayant une dureté très élevée. Les lois de refroidissement peuvent être continues ou discontinues.

**❖ Trempe bainitique :**

C'est une austénisation suivie d'un refroidissement rapide jusqu'à  $\theta_b$  (température de trempe bainitique), maintenue pendant le temps nécessaire à la transformation complète de l'austénite. On refroidit ensuite jusqu'à température ambiante.

**I.2.2.1. Cycle 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  $\alpha$ . Le cycle de trempe comprend 2 étapes : l'austénisation puis le refroidissement.

**➤ Austénisation :**

Chauffage jusqu'à une température élevée permettant la formation de l'austénite. Il est nécessaire d'avoir :

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

La température d'austénisation dépend de la teneur en carbone et des éléments d'addition. La durée de maintien est variable, elle dépend beaucoup de la géométrie de la pièce. Elle se situe en général entre 15 et 30 minutes.

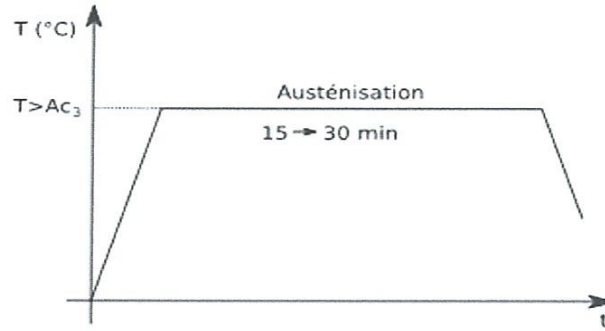


Fig. I.13 : Cycle de trempe.

➤ **Refroidissement :**

But : transformer l'austénite en martensite ou bainite, plus durs. La méthode de refroidissement dépend du constituant et de la structure souhaitée.

**I.2.3. Revenu :**

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

Règles à respecter :

- les pièces doivent être complètement refroidies avant le début pour être sur que la transformation martensitique est terminée.
- le revenu suit immédiatement la trempe pour éviter la rupture des pièces qui peut se produire plusieurs heures, voire plusieurs jours après la trempe.

**I.2.3.1. Cycle de revenu :**

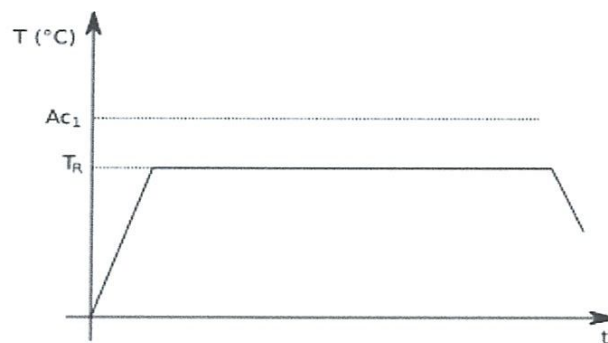


Fig. I.14 : Cycle de revenu.



- Chauffage jusqu'à  $TR < AC1$  pour l'acier considéré.
- maintien à la température  $TR$ .
- refroidissement.

La température de revenu se situe entre 200 et 500 °C, elle dépend des caractéristiques finales que l'on veut obtenir.

Pendant le revenu :

- la martensite se transforme en ferrite et en carbures.
- l'austénite résiduelle se transforme en martensite et en bainite.

On obtient un changement de propriétés par changement de structures.

#### **I.2.3.2. Types de revenus :**

- Revenu de durcissement (ou durcissement structural) : provoque la précipitation des éléments carburigènes pendant le maintien en température [13].
- Revenu de détente : favorise la relaxation des contraintes dues à la sursaturation en carbone du fer  $\alpha$ . Température : entre 100 et 200 °C.

#### **I.2.4. Le recuit :**

Les aciers possèdent un caractère apte d'acquies grâce à des traitements thermiques variés, toute une gamme de propriétés très différentes. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs.

Le recuit [11] correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). Le recuit a pour but de :

- Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- Homogénéiser les textures hétérogènes.
- Réduire les contraintes internes.

### I.2.4.1. Cycle de recuit :

Le cycle thermique d'un recuit comprend [11] :

- Un chauffage jusqu'à une température dite de recuit qui dépend du type de recuit à réaliser.
- Un maintien isotherme à la température de recuit ou des oscillations autour de cette température.
- Un refroidissement très lent généralement à l'air calme. La vitesse de refroidissement doit être inférieure à la vitesse critique de recuit.

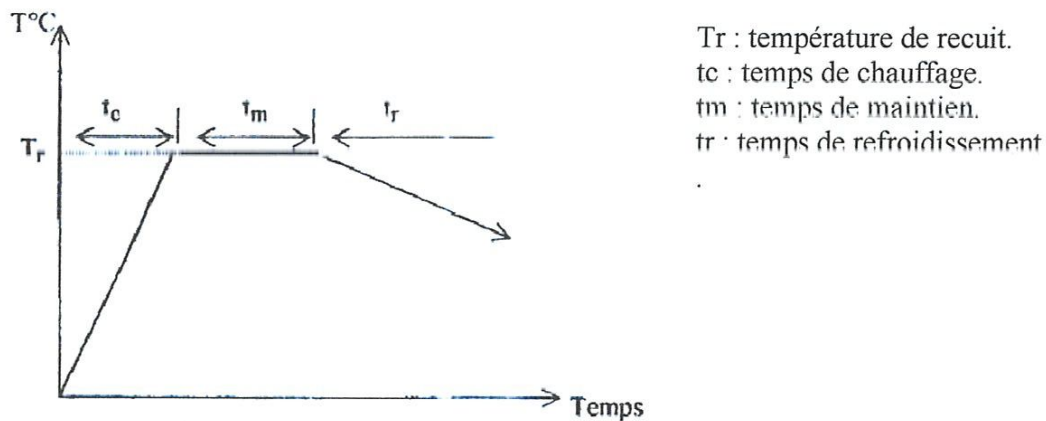


Fig. I.15 : Cycle de recuit.

### I.2.4.2. Les différents types de recuit :

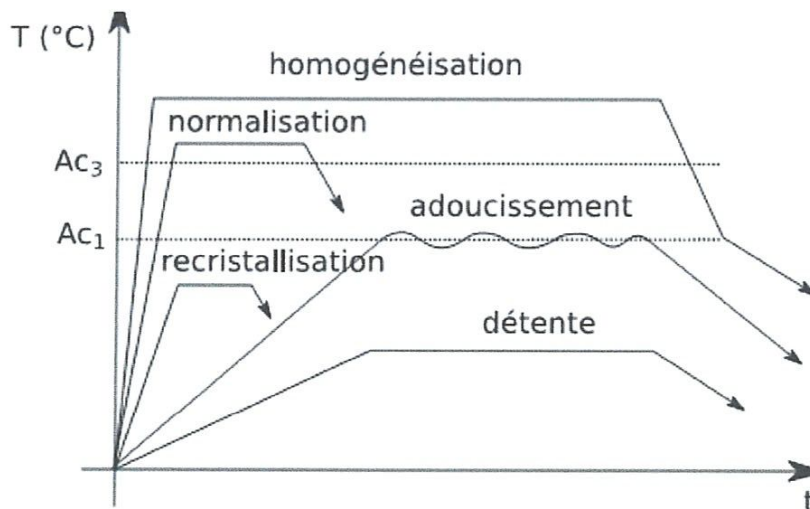


Fig. I.16: différents types de recuit.

Température :  $> AC_3$  : homogénéisation, normalisation.

$< AC_3$  : adoucissement, recristallisation, détente.

**❖ Recuit d'homogénéisation :**

Il se pratique après moulage ou corroyage, à haute température (950 → 1200 °C). La vitesse de refroidissement ne doit pas être trop élevée : de 20 à 60 °C par heure.

**❖ Recuit de normalisation :**

On l'applique après un maintien à haute température (moulage, forgeage, homogénéisation) pour augmenter la grosseur du grain. Normalisation : affinage du grain pour obtenir un état structural de référence (avant la trempe par exemple).

La finesse du grain est proportionnelle à la vitesse de chauffe. La température de traitement est d'environ  $AC3+50^{\circ}C$ .

Le refroidissement  $AC3 \rightarrow AC1$  est rapide (pas trop sinon c'est trop dur), puis le refroidissement s'effectue à l'air.

**❖ Recuit d'adoucissement ou de globalisation :**

Permet d'obtenir une structure correspondant à la dureté minimale de l'acier pour faciliter la mise en forme à froid ou l'usinage par outils coupants.

Après traitement, on obtient une structure de perlite globulaire dans une matrice ferritique.

Pour affiner le grain,

**❖ Recuit de détente (ou stabilisation ou relaxation) :**

Il vise à éliminer les contraintes internes produites par la mise en forme, la solidification, le soudage ou l'usinage.

On chauffe la pièce jusqu'à une température comprise entre 600 et 650°C, puis on refroidit lentement.

**❖ Recuit de recristallisation :**

Il s'effectue après une déformation à froid (emboutissage, extrusion, étirage à froid, ...) qui provoque toujours un écrouissage et l'augmentation de certaines caractéristiques mécaniques ( $\sigma_e$ , dureté, ...). Ce traitement permet une restructuration des caractéristiques initiales du matériau. Température de recristallisation : elle dépend du taux d'écrouissage de la pièce. Par exemple : 75% → 300°C, 5% → 700°C pour des aciers non alliés [13].

## I.2.2 .Traitements thermochimiques des aciers :

Le nom de traitement thermochimique [11] est donné à la saturation superficielle de l'acier en tel ou tel élément (par exemple : carbone, azote, aluminium, chrome etc.), par sa diffusion à l'état atomique à partir d'un milieu extérieur porté à une température élevée, c'est à dire, dans le cas où l'on aura besoin d'une dureté superficielle encore plus élevée et une ductilité au cœur encore plus grande, on utilise les traitements thermochimiques. Tous les traitements thermiques à envisager se déroulent sans changement de composition chimique. Tandis que les traitements thermochimiques s'effectuent avec changement de la composition chimique d'une certaine épaisseur de la couche superficielle.

### I.2.2.1. La cémentation :

#### I.2.2.1.1. Principe et buts :

La cémentation est un traitement thermochimique de diffusion ayant pour but l'enrichissement en carbone d'une couche superficielle de la pièce à traiter. Cet enrichissement se fait par mise en contact avec un milieu carburant pulvérulent, pâteux, liquide ou gazeux. L'opération de diffusion est toujours suivie d'une opération de trempe afin d'obtenir le durcissement de la couche enrichie par formation de martensite.

#### I.2.2.1.2. L'étape d'enrichissement en carbone :

C'est l'étape thermochimique du traitement. Par mise en contact avec un milieu cémentant, on forme à la surface de l'acier (teneur initiale en carbone 0,1 à 0,2%C) une couche superficielle plus ou moins enrichie en carbone. Deux phénomènes interviennent simultanément :

- Une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface du métal.
- Un processus de diffusion de l'élément carbone dans la zone superficielle, de la surface vers l'intérieur de la pièce.

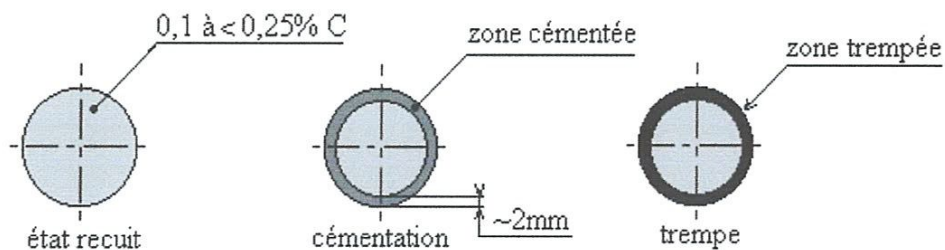


Fig. I.17 : d'enrichissement en carbone et trempe.

**I.2.2.1.3. Différents procédés de cémentation :**

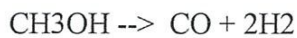
On utilise trois types de ciments : ciment pulvérulent ou pâteux, ciment liquide et ciment gazeux. Nous ne donnerons quelques détails qu'à propos de la cémentation gazeuse dont le mécanisme est le mieux connu car il est parfaitement adapté aux productions industrielles en série.

**❖ Cémentation gazeuse :**

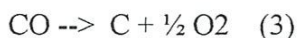
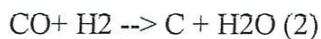
Le gaz porteur est produit le plus souvent par un générateur endothermique, par exemple, avec 1 volume de méthane et 2,4 volumes d'air on obtient un gaz constitué de 20%CO, 40%N<sub>2</sub>, 40%H<sub>2</sub> et des quantités minimales de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O.

Ou bien on introduit directement le méthanol (CH<sub>3</sub>OH) dans l'enceinte même du four.

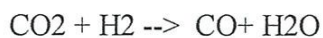
Le méthanol liquide est craqué sur une assiette de craquage à partir de 750°C pour donner un mélange gazeux composé de 33%de Co et de 66% d H<sub>2</sub> (suivant la réaction ci-dessous).



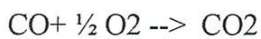
Schématiquement, l'enrichissement se fait à travers le CO par 3 réactions d'équilibres suivantes :



Par contre, les 3 équilibres sont dépendants, puisqu'elles sont liées les unes des autres d'une part par la réaction du gaz à l'eau :



Et d'autre part par la réaction d'oxydation du CO:



Une atmosphère de cémentation gazeuse est caractérisée par son potentiel carbone.

Le potentiel carbone est la teneur en carbone d'un échantillon de l'acier en équilibre à l'état austénitique avec l'atmosphère cémentant à la température et à la pression d'utilisation.

$$K = \frac{P_{\text{CO}_2} \times A_{\text{C}}(\gamma)}{(P_{\text{CO}})^2}$$

$A_C(\%) = \% C \times f$  (avec  $f$  : coefficient d'activité du carbone).

$$\%C = \frac{(P_{CO})^2 \times K}{f \times P_{CO_2}}$$

$K, f$  : lus dans des tables.

L'atmosphère sera carburante ou décarburante selon que son potentiel carbone sera supérieur ou inférieur à la teneur en C de l'acier.

Le potentiel carbone peut être contrôlé par une sonde à oxygène, un feuillard ou un analyseur Co/Co<sub>2</sub>.

**Diffusion du C** : Le processus de diffusion peut être décrit par la 2<sup>ème</sup> loi de Fick :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$C$  : taux de C.

$C = f(x, t)$  avec  $x$  : distance à la surface.

$C(x, 0) = C_0$  (concentration initiale dans l'acier).

$C(0, t) = C_s$  (à la surface).

$C_s$  est en fait l'apport de C par le milieu cémentant.

$D$  : constante de diffusion.

$$\frac{C_s - C}{C_s - C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

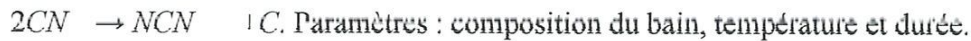
$$\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-u^2) \cdot du$$

L'épaisseur de cémentation est conventionnellement fixée à l'épaisseur de la zone qui, après trempe, a une dureté supérieure à 550HV, les duretés en surface pouvant atteindre 700 à 900HV. Ces épaisseurs sont en générale comprises entre 0,2 et 2mm environ.

Le durcissement de la couche cémentée s'obtient par trempe (huile, sels, gaz). Après trempe, les pièces peuvent subir un revenu de détente vers 150 à 190°C conduisant à une augmentation de la ténacité de la couche par relaxation partielle des contraintes [14].

#### ❖ Cimentation liquide :

Le bain de cémentation est composé d'un mélange de cyanure de sodium, de chlorures alcalinoterreux (baryum. . .), de chlorures alcalins (sodium, potassium) et de graphite pour isoler la surface du bain. La réaction de cémentation prépondérante est :



#### ❖ Cimentation solide :

On utilise comme ciments du carbone amorphe (charbon de bois) qui brûle et dégage du  $CO_2$ . Le problème est que les couches obtenues sont irrégulières. On mélange donc avec la poudre de charbon de bois entre 25 et 40 % de carbonate de baryum [13].

### I.2.2.2. Traitements thermiques associés :

#### ❖ Recuit avant cémentation :

Cela donne une bonne stabilité dimensionnelle, avec une régénération du grain avant cémentation.

#### ❖ Trempe des pièces cémentées :

- **Double trempe :** (1ere trempe) Elle permet de régénérer le grain de la pièce et (2eme trempe) de durcir la couche de la pièce. Elle est effectuée après une cémentation solide [14].

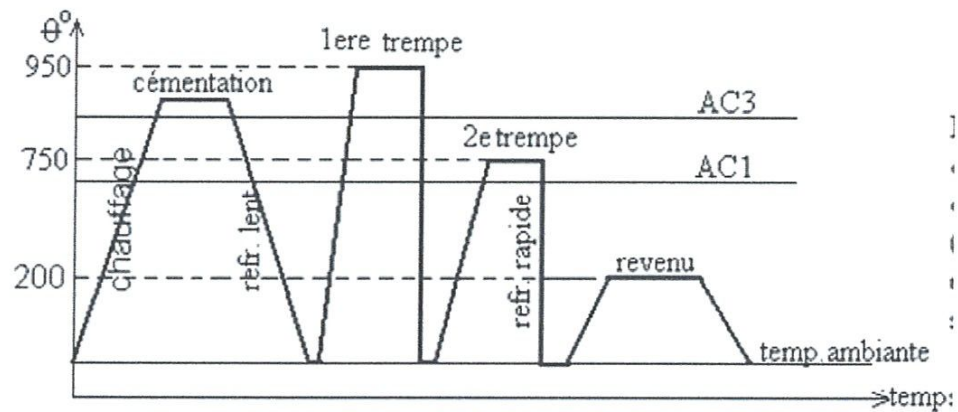


Fig. I.18 : Double trempe après une cémentation.

- **Remarque :** Après cémentation suivie de trempe, on obtient une dureté superficielle comprise entre 700 et 800 HV.

❖ **Revenu après trempe des pièces cémentées :** revenu à basse température (160 à 180°C) pour réduire les tensions internes sans faire chuter la dureté.

### I.2.2.3. Réserves de cémentation :

Dans le cas de cémentation partielle de la pièce, les zones superficielles à ne pas cémenter seront protégées soit :

- ❖ **Par une surépaisseur :** cette dernière doit être supérieure à la profondeur de la couche cémentée et sera enlevé par usinage entre la cémentation et la trempe.
- ❖ **Par protection :** on utilise dans ce cas de la résine, de la peinture, ...



### I.3. L'acier 100Cr6 :

#### I.3.1 .Introduction :

L'acier est un alliage de fer et de carbone comportant de 0,1 % à 2 % de carbone. De couleur gris foncé, l'acier est généralement obtenu par affinage de la fonte (la teneur en carbone est abaissée) suivant divers procédés. Plus ou moins dur suivant le pourcentage de carbone (on parle par exemple d'acier doux pour des aciers possédant de 0,2 % à 0,3 % de carbone), l'acier peut être allié à de nombreux matériaux modifiant ainsi sensiblement ses propriétés (les aciers alliés à du chrome sont par exemple inoxydables).

De plus les aciers sont susceptibles de recevoir des traitements thermiques (trempe, revenu, etc.) ou thermochimiques (cémentation, nitruration, etc.) qui modifieront ses propriétés mécaniques. De part son coût de revient faible, les diversités de ses nuances et ses propriétés mécaniques, l'acier est le métal le plus utilisé en construction mécanique. Ses applications trop nombreuses pour être citées sont présentes dans quasiment tous les secteurs de l'industrie.

#### I.3.2 .Définition :

L'acier 100Cr6 faiblement allié, le premier chiffre donne la teneur en C multipliée par 100. La lettre suivante donne le symbole chimique de Chrome. Le chiffre 6 donne la teneur de Chrome multipliée par 4. C'est l'acier typique utilisé dans les roulements à billes.

#### I.3.3. Composition chimique :

	C %	Si %	Mn %	P %	<sup>32</sup> S %	Cr %	Mo %
DE	0,93	0,15	0,25	-	-	1,35	-
A	1,05	0,35	0,45	0,025	0,015	1,60	0,10

#### I.3.4. Caractéristiques mécaniques :

Coefficient de dilatation :  $C1=12 \times 10^{-6}$  mm/mm/°C

Module d'élasticité :  $E = 205\ 000$  N/mm<sup>2</sup>

Coefficient de Poisson :  $\eta = 0,3$

Cette nuance est destinée généralement aux applications qui exigent une haute résistance aux déformations et à l'usure sous charges alternées élevées. Donc ces principaux composants doivent avoir une haute dureté, limite d'élasticité et résistance à la fatigue.

**I.3.5. Aptitude à la trempe:**

Bonne aptitude à la trempe; la trempe doit permettre le refroidissement en huile pour réduire au minimum le risque de ruptures ou distorsions dues à la trempe et pour minimiser les opérations de rectification successives.

**I.3.6. Les essais mécaniques :****I.3.6.1. Essais de dureté (H) :**

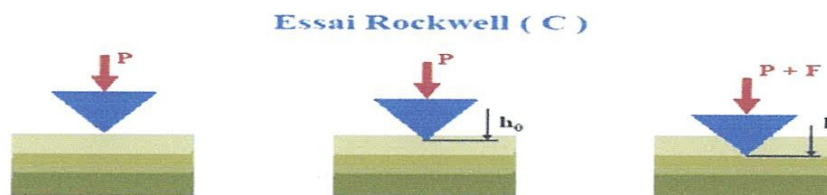
Les essais de dureté sont d'une grande utilité pour le métallurgiste à cause de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Mais il faut bien noter que la dureté n'est pas une propriété simple des matériaux métalliques.

La dureté 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.

**I.3.6.2. Essai Rockwell (HRC) :**

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 [15].



**Fig. I.19 : 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.

#### I.4 Travaux antérieurs :

**I. Yakimets et al** [16] ont fait une étude du comportement tribologique de l'acier de roulement 100Cr6 traité par choc laser, ils ont étudié l'influence du traitement de choc laser sur les propriétés de surface d'un acier. Des observations et des essais comparatifs ont été menés entre l'acier de roulement 100Cr6 non-traité et traité par un et deux passages de choc laser. Trois paramètres principaux ont été analysés: 1) la microstructure; 2) la morphologie de surface; 3) l'état mécanique: contraintes résiduelles et dureté. Ces analyses ont montré que ce type de traitement provoque la création d'une couche durcie. Dans une deuxième partie, ils ont aussi étudié l'influence du traitement de choc laser sur le comportement tribologique de l'acier 100Cr6. Lors d'un contact linéique de type roulement-glisement entre l'acier 100Cr6 et un galet en acier 40CrMoV13, différents types d'étude de frottement ont été menés. Les essais montrent qu'il existe une pression de contact critique qui limite l'efficacité protectrice du traitement.

**A. Faussemagne et al** [17] ont procédé à des caractérisations physicochimiques, menées sur des échantillons en acier 100Cr6 implantés à la fois en bore et en azote, ont mis en évidence la formation de nitrure de bore et des nouvelles phases,  $Fe_{1-x}(B, N)$ ,  $Fe_{2-x}(B, N)$  et  $Fe_{3-x}(B, N)$ , inconnues dans la littérature. Par ailleurs, des tests tribologiques réalisés à sec sur ces échantillons ont montré que les implantations d'azote et de bore dans l'acier ne conduisent pas à une amélioration significative du coefficient de frottement et de l'usure contrairement à ce qui a été avancé par certains auteurs. Cependant, sur une série d'échantillons accidentellement pollués en carbone pendant les implantations, ils ont remarqué une diminution importante de ces deux paramètres tribologiques. Des investigations plus poussées ont indiqué que le carbone de surface quelle que soit son origine (par contamination, implantation ionique ou dépôt suivi de mélange ionique) pourvu qu'il soit en quantité suffisante ( $\geq 2 \times 10^{17} \text{ C.cm}^{-2}$ ), améliore d'un facteur 5 le coefficient de frottement et diminue d'une manière drastique l'usure. Cette analyse a ainsi montré que pour améliorer le frottement et l'usure de l'acier 100Cr6, il suffit de recouvrir ce dernier d'une couche de carbone bien adhérente et ayant une épaisseur supérieure aux hauteurs des aspérités des deux corps en présence. Cette étude finalement permis de mettre au point un procédé simple et peu onéreux d'amélioration des propriétés tribologiques de l'acier 100Cr6.

**N. Mebarki** [18] a fait une étude concerne principalement l'effet de la microstructure d'un acier à roulement et les caractéristiques d'intégrité de surface. Cet acier (100Cr6) a été étudié avec différents états métallurgiques, un thermo tribomètre a été utilisé pour décrire l'influence de la microstructure et la dureté sur la tribologie du couple 100Cr6. Les mécanismes d'endommagement et d'usure ont d'abord été analysés par le biais d'une expertise de matrices usées en production. Elle révèle différents types de dégradations, activés selon la localisation et l'exposition des surfaces de l'empreinte aux sollicitations cycliques induites lors du matriçage. Elle a permis d'établir un scénario d'usure par abrasion à trois corps entretenu par le cyclage de mise en forme.

**M. Habbak** [19] a fait une étude sur l'effet de la microstructure d'un acier à roulement sur l'usinabilité et les caractéristiques d'intégrité de surface. Cet acier (100Cr6) a été étudié avec différents états métallurgiques caractérisés par la présence ou non de carbures dans une matrice bainitique ou martensitique. Les deux états métallurgiques ont été étudiés pour des duretés identiques comprises entre 45 HRC et 59 HRC. Plusieurs techniques d'analyses mécaniques et thermiques ont permis de mieux comprendre les mécanismes moteurs lors de la formation des copeaux en usinage dur. En particulier, un thermotribomètre a été utilisé pour décrire l'influence de la microstructure et la dureté sur la tribologie du couple 100Cr6-CBN. En effet, il est montré que le coefficient de frottement augmente avec la présence de carbures.

**S. Debaud** [20] a fait une étude sur la compréhension des mécanismes et l'identification des paramètres importants et surtout leurs interactions, qui influencent le comportement tribologique d'un contact sollicité en frottement lubrifié avec du MoS<sub>2</sub>. Pour se faire, on utilisera une approche dite << système >>, où l'on considère que notre contact et son environnement ne font qu'un. Ils ont concentré dans ce travail sur l'effet combiné que peuvent avoir la composition de l'atmosphère de test, la nature chimique de la contre pièce utilisée, sa rugosité, la fréquence de sollicitation du contact et la force normale appliquée sur le contact sur le comportement tribologique de notre contact. Dans un premier temps, on a mis en évidence que pour avoir une action lubrifiante du MoS<sub>2</sub>, la formation d'un film de transfert à la surface de la contre pièce est indispensable. Le transfert de matière de la pièce revêtue vers l'antagoniste est observable uniquement si la déviation standard normalisée de la force normale appliquée à l'échantillon est située en dessous d'un seuil critique. Dans ce cas, le film de transfert se forme dès les premiers cycles de frottement. De plus, on a montré que la déviation standard normalisée de la force normale appliquée est liée à la rugosité de surface de la contre pièce. Au court du frottement, la nature chimique du film de transfert évolue.

Celle-ci dépend notamment de la composition de l'atmosphère de test, mais également de la nature chimique de la contre pièce utilisée. En effet, lorsque l'atmosphère de test contient de l'oxygène, on observe une dégradation des performances tribologiques, notamment au niveau de la durée de vie. Plusieurs mécanismes sont impliqués, soit une dégradation chimique du film de transfert avec la formation d'oxyde mixte dans le cas d'un antagoniste en acier 100Cr6, soit un mauvais recouvrement de la surface de contact pour les contre pièces 100Cr6 revêtues d'un dépôt d'or ou de titane. De plus, il a été montré que la quantité de matière transférée est dépendante de la rugosité de l'antagoniste. Le frottement, quel que soient les conditions d'essai utilisées, induit une usure mécanique du dépôt MoS<sub>2</sub>. Le taux d'usure du dépôt est fonction de la rugosité de la contre pièce. De ce fait, la durée de vie observée est influencée par la rugosité de notre contre pièce. Cette étude nous a permis d'apporter de nouvelles informations quant à la compréhension du comportement tribologique des systèmes lubrifiés au MoS<sub>2</sub>.

**F. Zemzemi** [21] présente les résultats des essais de frottement sur deux types de matériaux. L'acier 27MnCr5 (180 HB) à l'état recuit, qui s'intéresse à comprendre le comportement tribologique de ce matériau face au carbure de tungstène revêtu TiN (PVD). L'acier 42CrMo4 (290 HB) a été adoptée dans cette étude car le comportement mécanique et les propriétés physico-chimiques de cette nuance sont disponibles dans la littérature ce qui facilite, par la suite, le dépouillement numérique. Les Conditions d'essais de frottement sur 27MnCr5 (180 HB) ont été déterminées à partir des essais de coupe réalisés avec des outils en carbure revêtus TiN. Les résultats présentent le coefficient de frottement apparent à une relation proportionnel avec la vitesse de frottement, le coefficient de frottement apparent diminue avec l'effort normal, la présence du revêtement de TiN conduit à une réduction du coefficient de frottement macroscopique par rapport au cas du carbure non revêtu, en raison de la diminution du frottement interfacial. L'essai de frottement sur l'acier 42CrMo4 (290HB) présente les résultats suivants : l'augmentation de la vitesse de frottement provoque une chute du coefficient de frottement apparent, la pression de contact n'a pas d'influence significative sur le coefficient de frottement apparent, les revêtements TiN permis une réduction du coefficient de frottement de 20% par rapport à celui obtenu par des pions non revêtus.

**N. K-Benghalem et al** [22] ont fait des travaux sur l'étude du frottement et l'usure des aciers X12NiCrMoSi25-20 et 25CrMo4 lors du glissement lubrifié sur un disque en WC-Co. Une première série d'essai sur les deux aciers avec lubrifiant dilué montre que l'usinage des éprouvettes introduit une couche superficielle écrouie qui diminue fortement la vitesse d'usure

et augmente le frottement. L'augmentation de température atténue ce phénomène et provoque une augmentation du frottement et de la vitesse d'usure, la lubrification s'avérant très difficile au-dessus de 20 °C pour X12NiCrMoSi25-20. Une seconde série d'essais a été effectuée sur le 25CrMo4 avec le lubrifiant non dilué pour deux forces normales. Ces essais montrent qu'après rodage de la contre-pièce, la vitesse d'usure est indépendante de la force normale, augmente entre 20 °C et 100 °C et décroît entre 100 et 150 °C. Les éprouvettes subissent un écoulement plastique sur une profondeur de l'ordre de 40-70 µm et le métal est extrudé à la limite du contact sous formes de feuillets. L'évolution de la vitesse d'usure avec la température pourrait être causée par l'effet de la température sur la contrainte d'écoulement plastique de l'acier.

**O. Barrau** [4] dans ses travaux a étudié les dégradations en frottement à chaud de l'acier à outils X38CrMoV5 utilisé en forgeage à chaud. L'étude s'est focalisée sur les aspects de la dégradation du pion de notre tribo-système. Une première campagne d'essais a permis de tester différents types de pions en termes de géométrie (plan et hémisphérique) mais aussi d'états de surface (nitruration, faïençage thermique). Leur influence sur le frottement a été mise en évidence c'est-à-dire que les mécanismes d'usure changent en fonction de la géométrie du pion indépendamment du coefficient de frottement et que l'usure des pions est pilotée par leur déformation plastique. Des essais complémentaires ont permis de valider les hypothèses du cycle d'endommagement (homogénéité des couches déformées, épaisseur affectée indépendante de la distance de glissement, influence de la charge et de la température sur la déformation plastique, en régime dit stabiliser, taux d'allongement des lattes constant). L'usure modérée des pions nitrurés est associée à la formation de couches de transfert et la production de débris d'oxydes très fins [23]. À l'opposé, l'usure sévère des pions vierges se caractérise par la déformation plastique de la surface en contact et la production de débris métalliques. Les aciers nitrurés sont surtout sensibles à l'adhésion et à la fissuration de la couche de combinaison ; pour arriver à déformer la couche nitrurée il faudrait appliquer des charges plus élevées [24]. Cependant, sur les pions plans du CEMEF, seul le mécanisme d'usure abrasive est observé. Blau [25] avait déjà remarqué l'influence de la géométrie de la surface en contact sur le mode d'endommagement par frottement.

# Chapitre II

## *Etude expérimentale*

**II.1. Introduction :**

Notre objectif est de caractériser le comportement tribologique de l'acier 100Cr6 avant et après traitement.

On s'intéresse à comprendre le comportement tribologique d'acier 100Cr6 face au carbure silicium (SiC).

Dans ce chapitre, l'étude est consacrée au frottement d'acier avant et après traitement, à titre explorateur et comparatif. L'emploi de différentes techniques d'analyse est nécessaire pour mettre en évidence la morphologie, la structure et les propriétés mécaniques des composés formés au niveau du contact.

Les techniques expérimentales utilisées pour cette étude sont :

- ❖ Microscopie optique ;
- ❖ Dureté ;

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.

Pour effectuer les essais de frottement des échantillons, une polisseuse au niveau du laboratoire des sciences des matériaux a été adaptée comme un tribomètre. Après frottement, les surfaces des échantillons sont examinées par les méthodes de caractérisation énoncées ci-dessus.

**II.2. Caractérisations des matériaux et méthodes expérimentales utilisées :****II.2.1. Préparation des échantillons :****II.2.1.1. Aciers étudiés :**

Dans ce paragraphe, nous allons présenter l'acier sélectionné pour notre étude sur le phénomène de l'usure. Les aciers présentent un ensemble de caractéristiques qui permettent d'une part leur mise en œuvre (réalisation, traitement thermique et de surface) et d'autre 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.



L'acier 100Cr6 se classe 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, l'acier 100Cr6 est soumis à la trempe afin de limiter l'endommagement par abrasion. Le traitement apporte une augmentation de la dureté en surface et limite l'usure par abrasion.

### II.2.1.2. Composition chimique :

La composition chimique de l'acier 100Cr6 est présentée dans le tableau (II.1) :

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

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

**Tableau II.1 :** Composition chimique (poids %).

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

Le choix d'une trempe huile est compatible avec les aciers alliés.

### II.2.1.3. Propriétés de l'acier 100Cr6:

Résistance à la déformation et à l'usure:

Cette nuance est destinée généralement aux applications qui exigent une haute résistance aux déformations et à l'usure sous charges alternées élevées. Donc ces principaux composants doivent avoir une haute dureté, limite d'élasticité et résistance à la fatigue.

Bonne aptitude à la trempe; la trempe doit permettre le refroidissement en huile pour réduire au minimum le risque de ruptures ou distorsions dues à la trempe et pour minimiser les opérations de rectification successives.

#### II.2.1.4. Traitements des aciers :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement.

Il existe deux types de traitements thermiques :

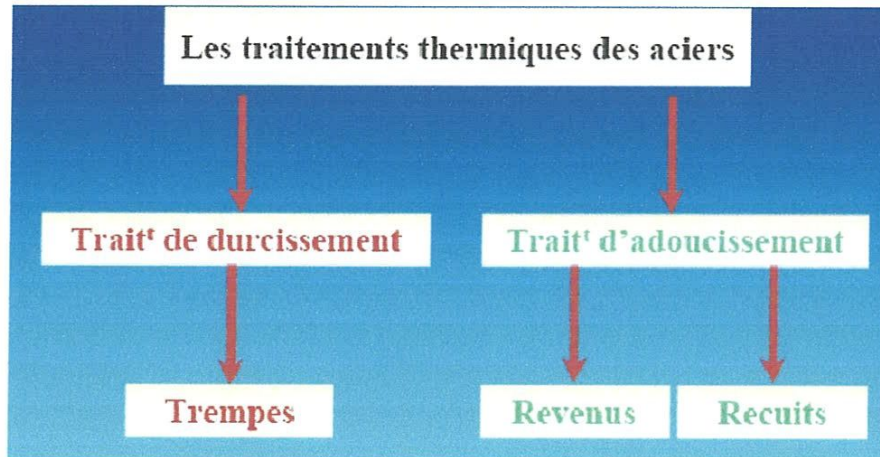


Fig. II.1 : Schéma présentant les traitements thermiques.

Ce sont les traitements thermiques qui fixent la microstructure de l'acier et par conséquent les propriétés mécaniques du matériau. L'acier sélectionné pour notre étude a été soumis à une trempe à l'huile, suivie d'un revenu dans le but d'améliorer leur propriété.

#### ❖ Traitement thermique :

##### a) la trempe :

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

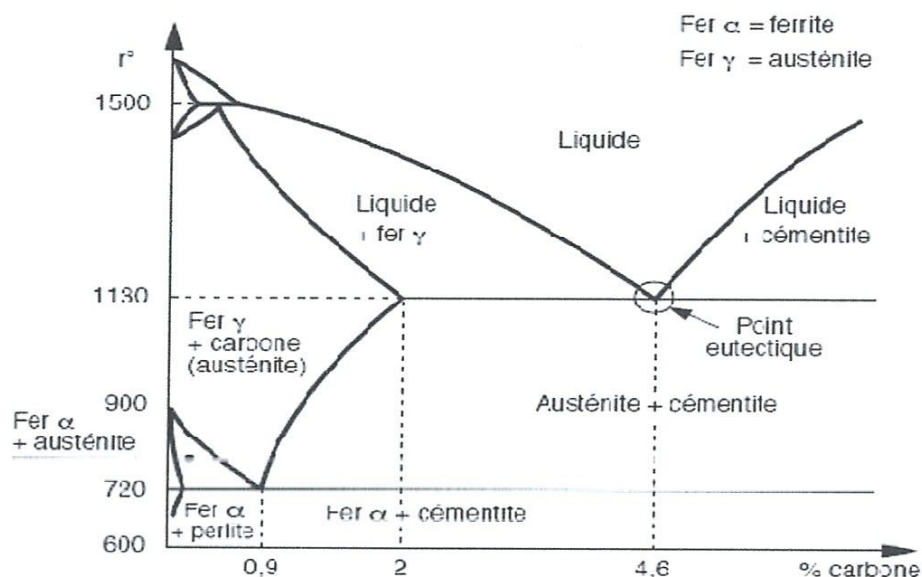


Fig. II.2 : Diagramme fer-carbone.

- **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  $\alpha$ . 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 3 étapes :

- ❖ Chauffage à 850°C
- ❖ Un maintien en température assez long pour permettre une homogénéisation complète de l'austénite (austénisation). une température uniforme dans toute la pièce
- ❖ puis le refroidissement rapide (par huile).

**b) Le revenu :**

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.

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.

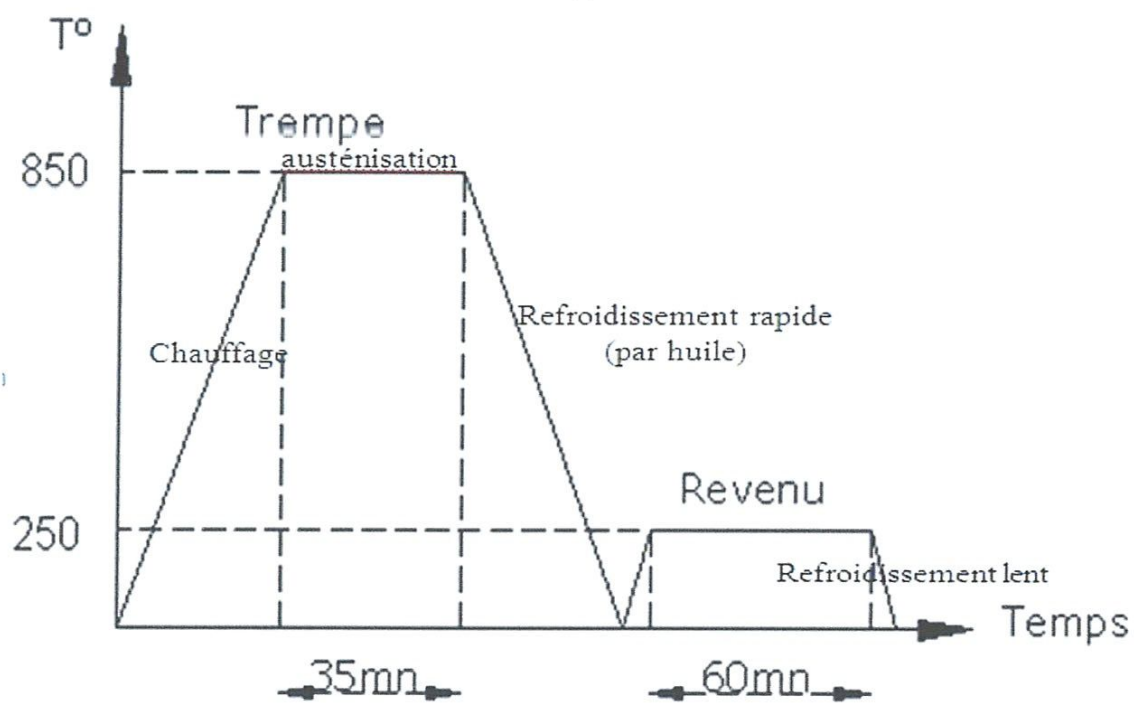


Fig. II.3 : Cycle thermique de Trempe à L'huile de l'acier 100Cr6.

## II.2.2. Les essais mécaniques

Après avoir apporté des modifications sur les propriétés d'acier étudié nous avons procédé à des caractérisations mécaniques pour mesurer les modifications pour l'acier 100Cr6.

### II.2.2.1. Essais de dureté (H)

Les essais de dureté Rockwell sont effectués sur des échantillons non traités et traités pour de 100Cr6, à l'aide d'un appareil de dureté (WOLPERT), voir Figure (II.4).



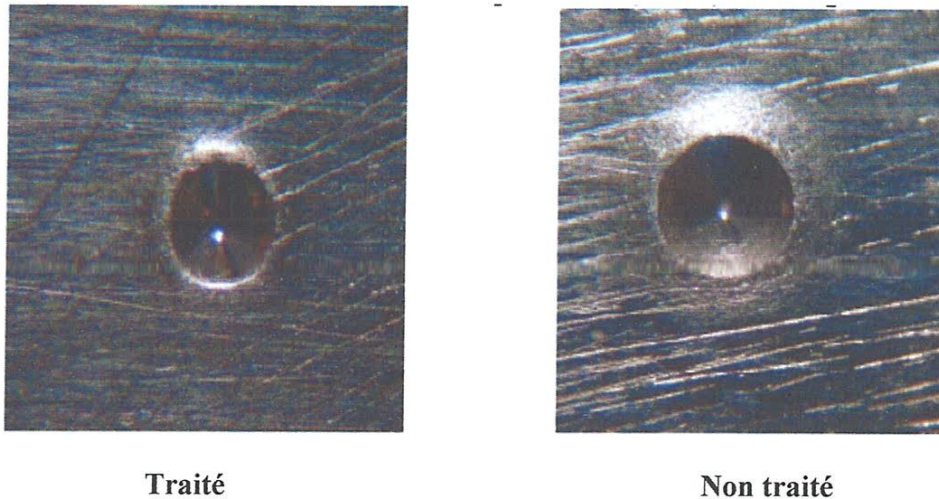
Fig. II.4 : Appareil de dureté (WOLPERT).

Les valeurs mesurées de la dureté dans le tableau suivant :

Les aciers	Dureté (HRC)
100Cr6(Non traité )	40
100Cr6(Trempé )	60

Tableau II.2 : Dureté des matériaux étudiés.

D'après le tableau (II.2) la dureté de l'acier 100Cr6 trempé augmente par rapport à celle de l'acier 100Cr6 non traité, on peut dire alors que les aciers traités présentent une dureté 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).



**Fig. II.5 :** Empreintes (cône) HRC pour 100Cr6 traité et non traité (X40).

### II.2.3. Essai de frottement et l'usure :

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

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

Par ailleurs, les géométries de contact, donc les conditions aux limites, évoluent pendant le processus d'usure ce qui constitue une difficulté supplémentaire pour l'usure. Le frottement est lui-même très mal connu localement et microscopiquement car il évolue également

pendant le processus d'usure, notamment à cause de la géométrie du contact, mais également en raison des débris formés.

Les essais de frottement et l'usure ont été réalisés sur l'acier 100Cr6.

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

Lors du frottement de l'acier, 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 l'acier 100Cr6 avant et après traitement, ce qui nous a permis de tracer les courbes de pertes en poids en fonction du temps.

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

### **II.2.3.1. Essais de frottement :**

- **Conditions de travail :**

Les tests de frottement plan/plan (Figure II.6), ont été réalisés sur une polisseuse tournant à deux vitesses ( $V_1 = 150 \text{ tr/min}$ ,  $V_2 = 300 \text{ tr/min}$ ), contre un abrasif à gros et fin grains en carbures de silicium (SiC) dans un milieu lubrifié à l'eau pendant huit heures de temps discontinues où, nous avons fait varier la charge ( $P_1 = 10\text{N}$ ,  $P_2 = 15\text{N}$ ) et la vitesse de frottement, nous signalons que la perte en poids est mesurée à des intervalles réguliers de temps de une heure.

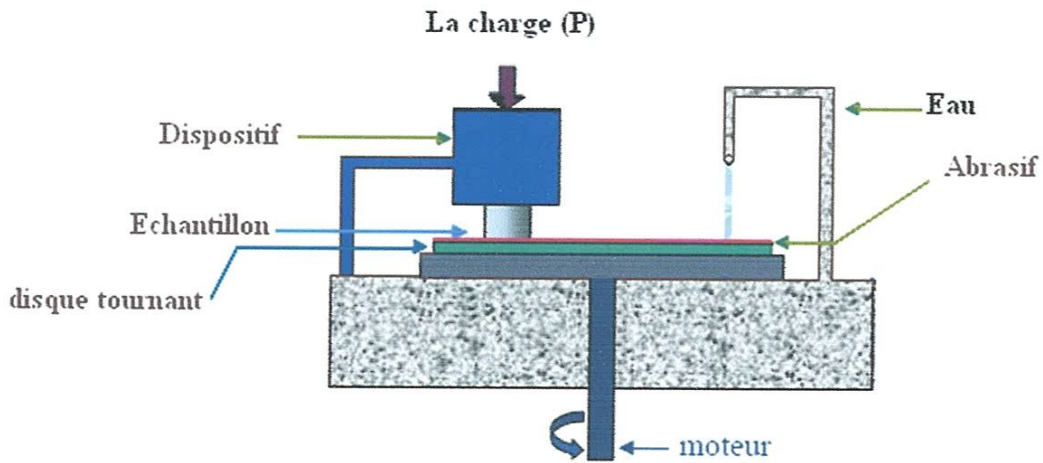


Fig. II.6 : Dispositif de frottement des surfaces planes.



Fig. II.7 : Polisseuse tournante.

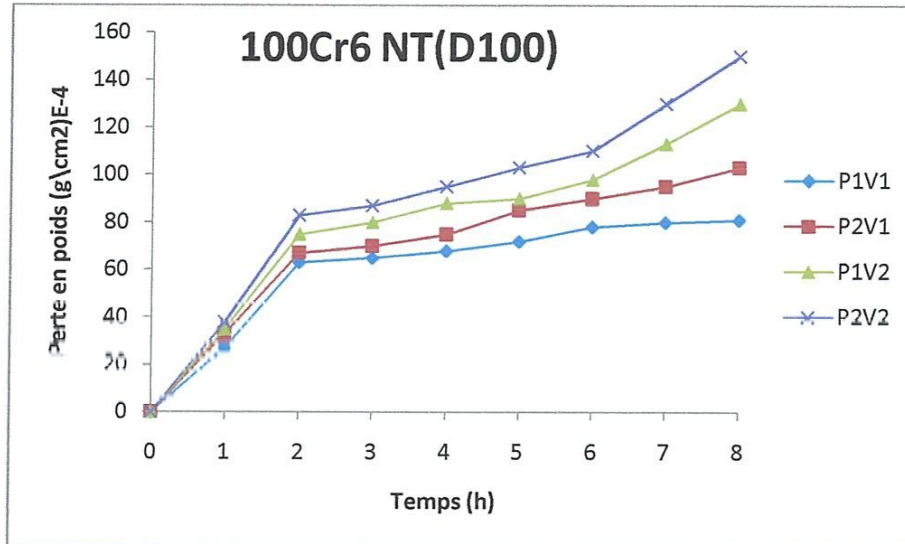
## II.2.4. Résultats et discussions :

### II.2.4.1. Couple 100Cr6 non traité /SiC :

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 avons frotté des échantillons de 100Cr6 non traité dans un milieu lubrifié contre un abrasif à gros grains ( $\phi 100$ ) où nous avons fait varier la charge et la vitesse.

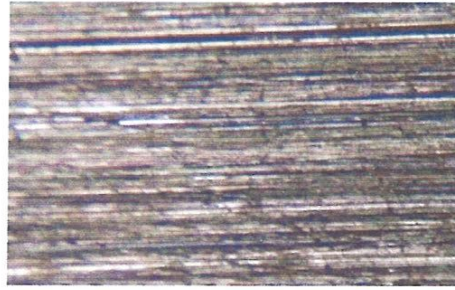


**Fig. II.8 :** Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité (contre abrasif  $\phi 100$ ).

Les courbes ci-dessus montrent que la perte en poids mesurée au début des essais se traduit par une augmentation de la surface de contact (Figure II.8), 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 quelles que soient la charge et la vitesse imposée, les conditions sévères conduisent à une usure plus élevée.

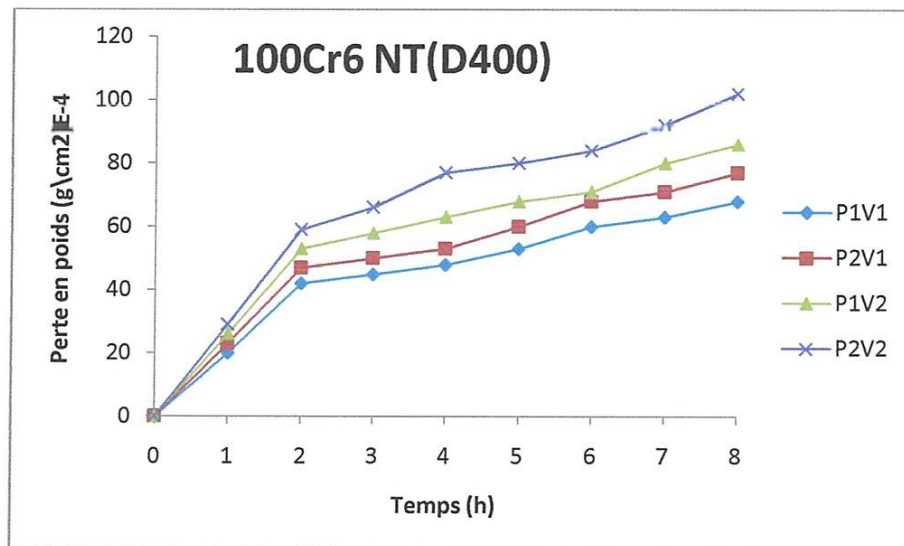
L'examen des surfaces par microscopie optique montre un recouvrement progressif de l'entrée du contact par des couches de débris et d'oxydes, où les débris s'accumulent, vers la sortie du contact (figure II.9). Ces derniers n'arrivent pas à former un transfert stable car ils sont chassés à l'extérieur 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 signalée sur la photo par des rayures de frottement comparable à un labourage.



(X40)

**Fig. II.9 :** Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans des conditions sévères.

Toujours dans un milieu lubrifié dans les mêmes conditions mais contre un abrasif à fin grain ( $\phi 400$ ) les résultats obtenus sont illustrés sur la figure (II.10).

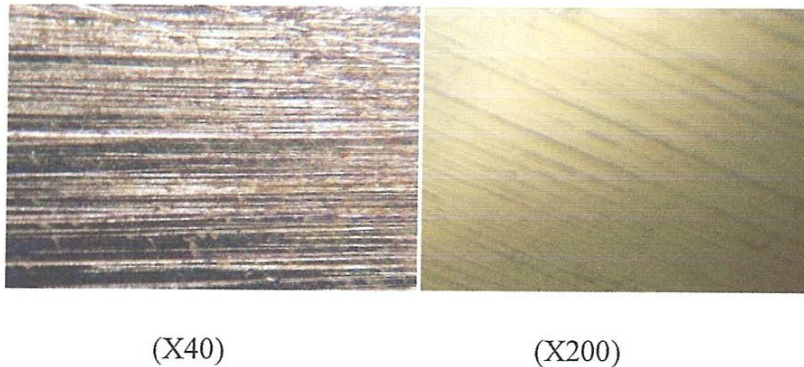


**Fig. II.10 :** Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 non traité (contre abrasif  $\phi 400$ ).

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

Pour les faibles conditions d'essais (Figure II.11) de l'acier 100Cr6 non traité, on remarque que dans la zone de contact, des petites rayures apparaissent en surface et une accumulation des petites particules et débris qui viennent s'installer dans les rayures et sur les hauteurs

des aspérités formant ainsi une couche protectrice qui peut être considéré comme un troisième corps.



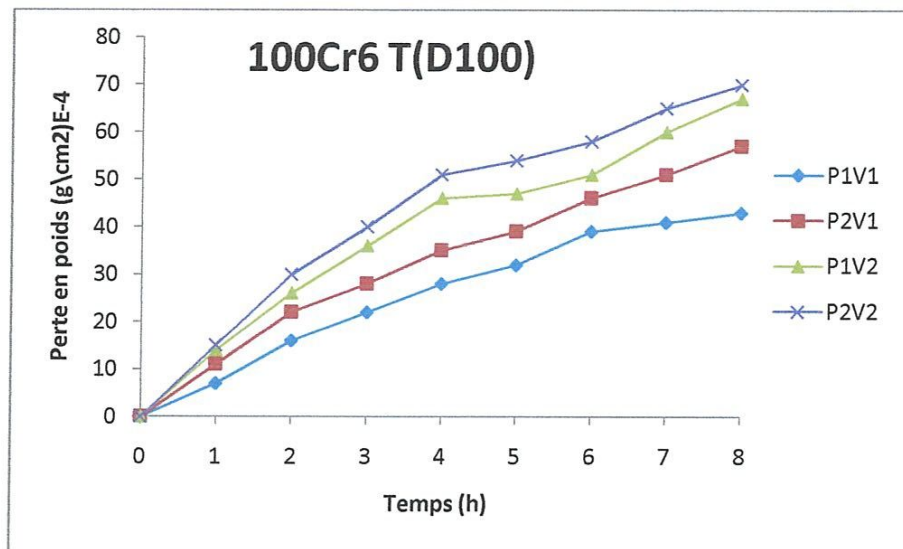
**Fig. II.11 :** Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 non traité dans des faibles conditions.

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

#### **II.2.4.2. Couple 100Cr6 trempé /SiC :**

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

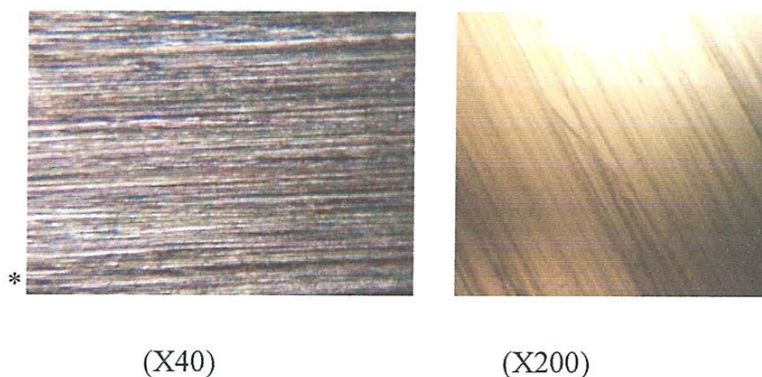
Les tests de frottement réalisés sur le 100Cr6 trempé contre un abrasif à gros grains ( $\phi 100$ ) (Figure II.12), ont montré que le classement est conservé mais avec une nette différence pour les échantillons traités avec une diminution de la perte en poids.



**Fig. II.12** : Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé (contre abrasif $\phi$ 100).

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

Le microscope optique montre dans les conditions sévères pour 100Cr6 trempé (Figure II.13) de petites traces d'usure sur la surface de l'échantillon qui deviennent importantes avec le temps, et la présence des particules et débris qui n'arrivent pas à se stabiliser dans le contact, donc ces derniers n'arrivent pas à établir une barrière efficace entre les deux surfaces frottantes.



**Fig. II.13** : Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 trempé dans des conditions sévères.

Quand l'antagoniste est un abrasif plus fin ( $\phi 400$ ), les courbes d'usure ont une allure identique, autrement dit un régime long durant les premières heures de l'essai suivi d'une légère augmentation du taux d'usure ce qui correspond à un régime de frottement moins sévère (Figure II.14).

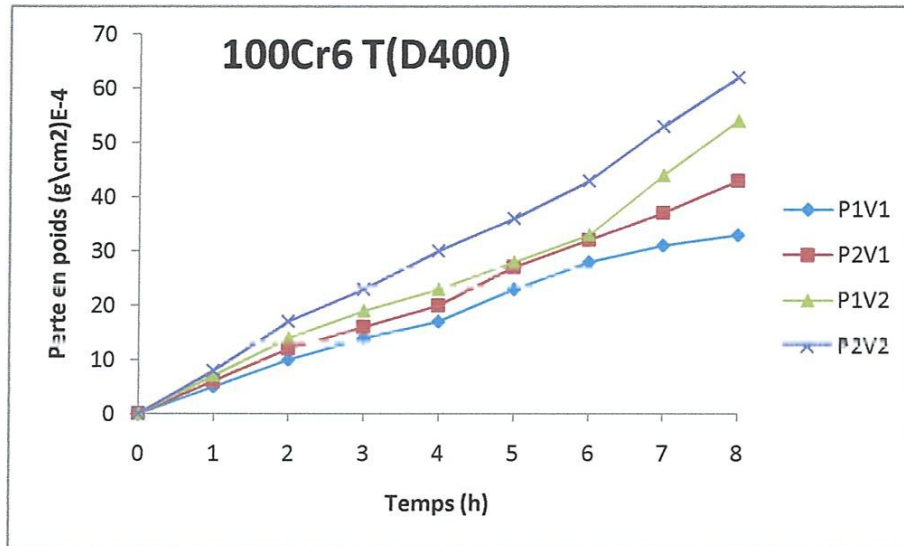


Fig. II.14 : Perte en poids en fonction du temps de 100Cr6 trempé (contre abrasif  $\phi 400$ ).

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. On remarque que le taux d'usure de 100Cr6 non traité à fins grains représente une perte en poids plus élevée que 100Cr6 trempé dans les mêmes conditions, ceci prouve que la trempe a apportée une amélioration très nette dans les caractéristiques mécaniques de l'acier étudié et son comportement tribologique.

La caractérisation par microscope optique de l'acier 100Cr6 trempé dans les faibles conditions (Figure II.15) 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.



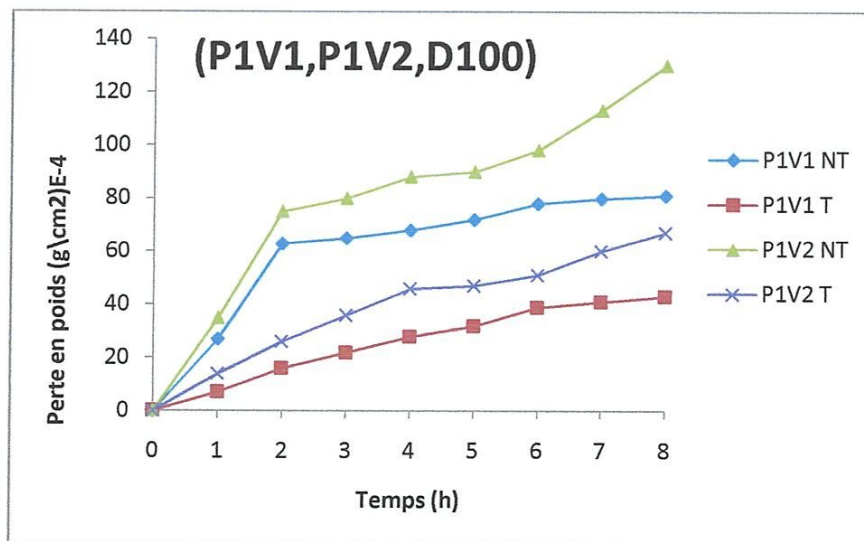
**Fig. II.15 :** Observation au Microscope Optique de la surface usée pour 100Cr6 trempé dans des faibles conditions.

### II.3. Etude comparative :

Cette comparaison a été faite à partir des résultats obtenus pour des tests de frottement réalisés sur des aciers traité et non traité.

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

Les tests de frottement réalisés contre des abrasifs à gros grains sont représentés sur la figure (II.16) avec abrasif  $\phi 100$ , la charge  $p_1$  et la vitesse ( $v_1$ ,  $v_2$ ).



**Fig. II.16 :** Perte en poids en fonction du temps (P1, V1, V2, contre abrasif  $\phi 100$ ).

Cette figure représente la perte en poids des aciers non traité et traité sous les faibles charges. On remarque un bon comportement en frottement de l'acier trempé avec une charge P1 et la vitesse V1, suivi de l'acier trempé avec une charge P1 et la vitesse V2 et 100Cr6 non traité avec une charge P1 et la vitesse V1 et en dernier lieu l'acier non traité avec une charge P1 et la vitesse V2 avec un taux d'usure très élevé.

Les courbes donnant la perte en poids en fonction du temps des aciers traité et non traité pour les grandes charges sont illustrées sur la figure (II.17).

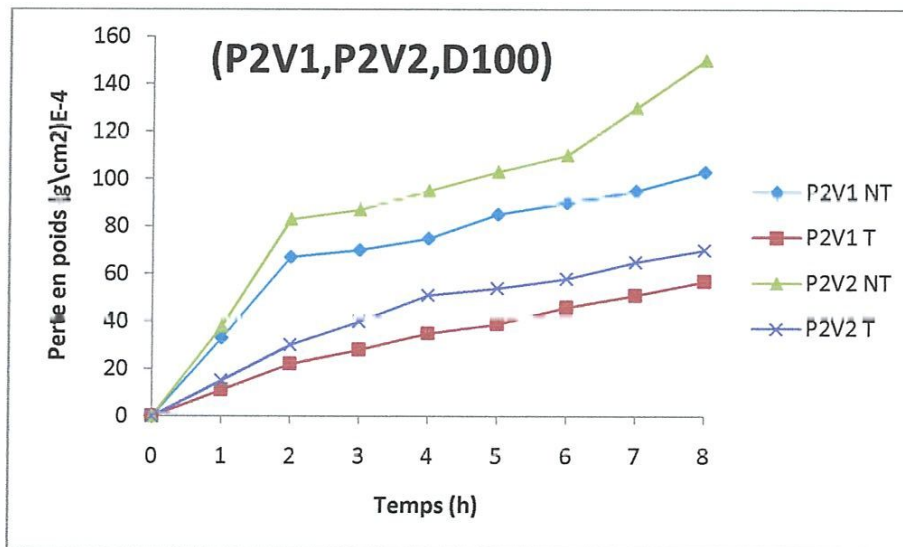


Fig. II.17 : Perte en poids en fonction du temps (P2, V1, V2, contre abrasif  $\phi 100$ ).

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

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

Les tests de frottement réalisés contre des abrasifs à gros grains sont représentés sur la figure (II.18) avec abrasif  $\phi 100$ , la vitesse V1 et la charge (P1, P2).

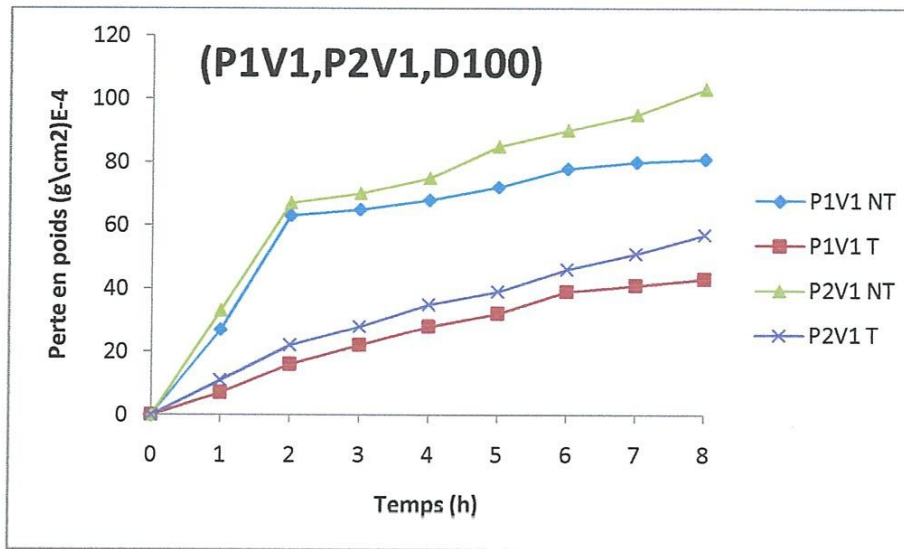


Fig. II.18 : Perte en poids en fonction du temps (P1, P2, V1, contre abrasif  $\phi 100$ ).

Dans les deux cas les aciers non traités (P1V1, P2V1) sont caractérisés par une perte en poids considérable par contre les aciers traités (P1V1, P2V1) présentent un faible taux d'usure.

Toujours dans un milieu lubrifié, mais contre un abrasif à gros grains ( $\phi 100$ ), nous avons fait varier cette fois-ci la vitesse.

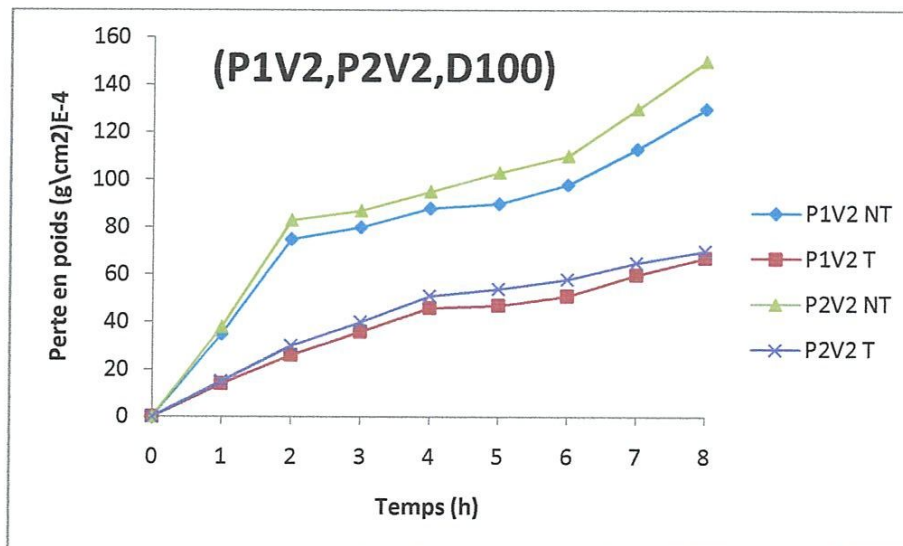


Fig. II.19 : Perte en poids en fonction du temps (P1, P2, V2,  $\phi 100$ ).

Les tests tribologiques effectués sur ces aciers avec la vitesse V2, montrent bien que le comportement est quasiment le même. Le bon comportement est enregistré pour l'acier trempé P1V2 suivi de l'acier trempé P2V2.



La figure (II.19) montre bien que le taux d'usure augmente avec l'augmentation de la vitesse. En conclusion, la vitesse joue un rôle important dans le comportement tribologique d'aciers étudié.

Nous constatons que les propriétés tribologiques de 100Cr6 traité sont bien supérieures à celles de 100Cr6 non traité, les traitements thermiques ont apportés une amélioration significative de la résistance à l'usure et le rend plus résistant en surface et au test tribologique, et que les conditions sévères font augmenter l'usure : plus la charge et la vitesse augmentent plus le taux d'usure augmente.

Les tests de frottement réalisés contre des abrasifs à fin grains sont représentés sur la figure (II.20) avec abrasif  $\phi 400$ , la charge (p1, p2) et la vitesse (v1, v2).

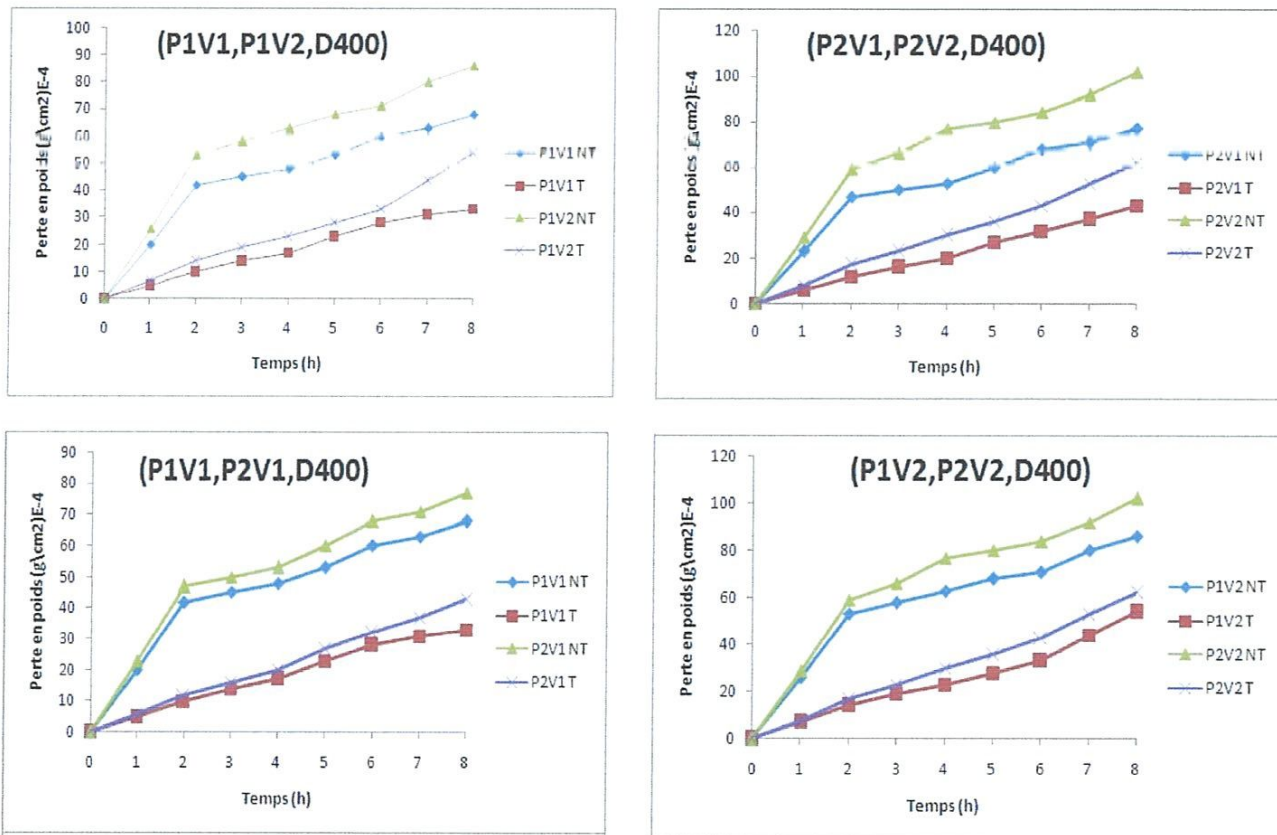


Fig. II.20 : Perte en poids en fonction du temps (P1, P2, V1, V2,  $\phi 400$ ).

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

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

#### **II.4. Mécanismes d'usure des surfaces :**

La dégradation d'acier 100Cr6 résulte de trois altérations :

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

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

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

#### **II.5. Influence des paramètres tribologiques :**

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

##### **II.5.1. Influence de la charge appliquée :**

L'influence des charges normales appliquées (P1 et P2) sur l'acier étudié, nous 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 le matériau que nous avons testé. L'augmentation de la charge engendre une usure importante.

### **II.5.2. Influence de la vitesse de frottement :**

Afin de mettre en évidence l'influence de la vitesse de frottement sur la dégradation d'acier étudié, 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.

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

### **II.5.3. Influence de la taille de l'abrasif :**

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

### **II.6. 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.

# Chapitre III

## *Modèles mathématiques*

**III.1. Introduction :**

Ce chapitre est consacré à la détermination des modèles mathématiques des différents paramètres étudiés. Ces modèles permettent d'exprimer la relation entre la charge, la vitesse, le temps, et la perte en poids lors du frottement de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif SiC à gros et fin grains.

Pour faire une analyse de variance (ANOVA) et pour déterminer les constantes des différents modèles mathématiques ainsi que la présentation en 3D sous forme d'une surface de réponse (RMS), nous avons utilisé un logiciel de statistique appelé « MINITAB16 ». L'objectif de cette analyse est de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur les paramètres étudiés, et aussi la contribution de chaque paramètre de frottement sur la perte en poids.

**III.2. Modèles de perte en poids de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif D100 en fonction de (vitesse, charge, temps) :****III.2.1. Résultats des expériences :**

Dans le tableau (III.1) sont présentées les valeurs expérimentales de perte en poids de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif D100. Ces valeurs sont obtenues selon un plan d'expérience de 12 essais avec 3 facteurs et 4 niveaux.

N°d'essais	P (Néotène)	V (tr/min)	Temps (h)	Perte en poids NT (g/cm <sup>2</sup> )	Perte en poids T (g/cm <sup>2</sup> )
1	10	150	1	0,0027	0,0007
2	10	150	4	0,0068	0,0028
3	10	150	8	0,0081	0,0043
4	10	300	1	0,0035	0,0014
5	10	300	4	0,0088	0,0046
6	10	300	8	0,0130	0,0067
7	15	150	1	0,0033	0,0011
8	15	150	4	0,0075	0,0035
9	15	150	8	0,0103	0,0057
10	15	300	1	0,0038	0,0015
11	15	300	4	0,0095	0,0051
12	15	300	8	0,0150	0,0070

**Tableau III.1:** Résultats de perte en poids suivant le L12 (plan de 12 essais).

### III.2.2 Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique :

Les résultats présentés dans les tableaux (III.2) sont analysés par le logiciel MINITAB16. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA). Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la perte en poids. Pour cela on doit choisir un niveau de signification  $\alpha$  à ne pas dépasser, et un intervalle de confiance de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

#### III.2.2.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'acier100Cr6 non traité :

Coefficients de régression estimés pour la perte en poids		Analyse des variances pour la perte en poids						
Terme	Coeff	Source	DL	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Constante	0,0007439	Régression	7	0,0001705	0,0000244	358,712	0,000020	
P	0,0000570	P	1	0,0000035	0,0000000	0,292	0,617416	2,04918033
vc	0,0000020	vc	1	0,0000185	0,0000000	0,146	0,721734	10,8313817
t	0,0006384	t	1	0,0001339	0,0000007	10,438	0,031950	78,3957845
p*vc	-0,0000002	p*vc	1	0,0000000	0,0000000	0,307	0,609184	0
p*t	0,0000484	p*t	1	0,0000014	0,0000014	21,251	0,009957	0,81967213
vc*t	0,0000040	vc*t	1	0,0000088	0,0000088	130,160	0,000337	5,15222482
t*t	-0,0001065	t*t	1	0,0000043	0,0000043	63,753	0,001334	2,5175644
Coefficient de détermination $R^2=99,84\%$		Erreur	4	0,0000003	0,0000001			
		Total	11	0,0001708				

**Tableau III.2 :** Résultats de l'analyse de variance pour l'acier100Cr6 non traité.

D'après le tableau (III.2) on peut déterminer les coefficients de régression estimés pour le critère de perte en poids d'une manière générale, et aussi on peut voir que le facteur temps (P-value=0,031950) a une grande influence sur la perte en poids avec une contribution de 78,3957845%. Ensuite vient en deuxième lieu la vitesse avec une contribution de 10,8313817%.

Les interactions p\*t, vc\*t, t\*t et le facteur de la charge p ont successivement une contribution de 0,81967213%, 5,15222482%, 2,5175644%, et 2,04918033%, et en dernier lieu l'interaction p\*vc avec une contribution inexistante de 0%.

**III.2.2.1.1. Analyse de Régression :**

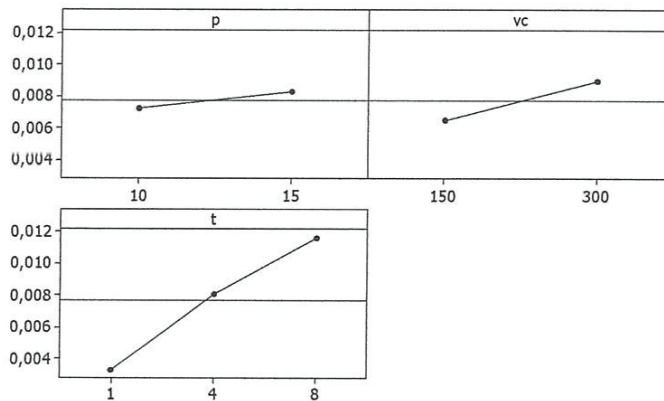
L'équation (\*1) exprime le modèle de perte en poids avec tous les facteurs principaux et leur interactions.

$$\begin{aligned} \text{Perte en poids (non traité D100)} = & 0,000743855 + 5,7027e-005 p + 2,03904e-006 vc + \\ & 0,000638369 t - 2,22222e-007 p*vc + 4,83784e-005 p*t + 3,99099e-006 vc*t - \\ & 0,000106548 t*t \dots\dots\dots (*1) \end{aligned}$$

Ou  $R^2=99,84 \%$

**III.2.2.1.2. Graphique des effets principaux:**

La figure (III.1) montre les effets principaux de la vitesse, de la charge et de temps sur la perte en poids.



**Fig.III.1 :** Graphique des effets principaux pour perte en poids.

Cette figure montre que le temps a un effet significatif sur la perte en poids. En effet, on remarque que la pente du paramètre de temps est plus grande par rapport à la pente de la vitesse et celle de la charge, il est donc le facteur le plus influent sur la perte en poids suivi par la vitesse.

**III.2.2.1.3. Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour :**

La présentation en 3D figure (III.2) montre que la pente de temps (t) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la perte en poids suivi par la vitesse (Vc) et en dernier lieu par la charge (p). D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les



valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas la perte en poids) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

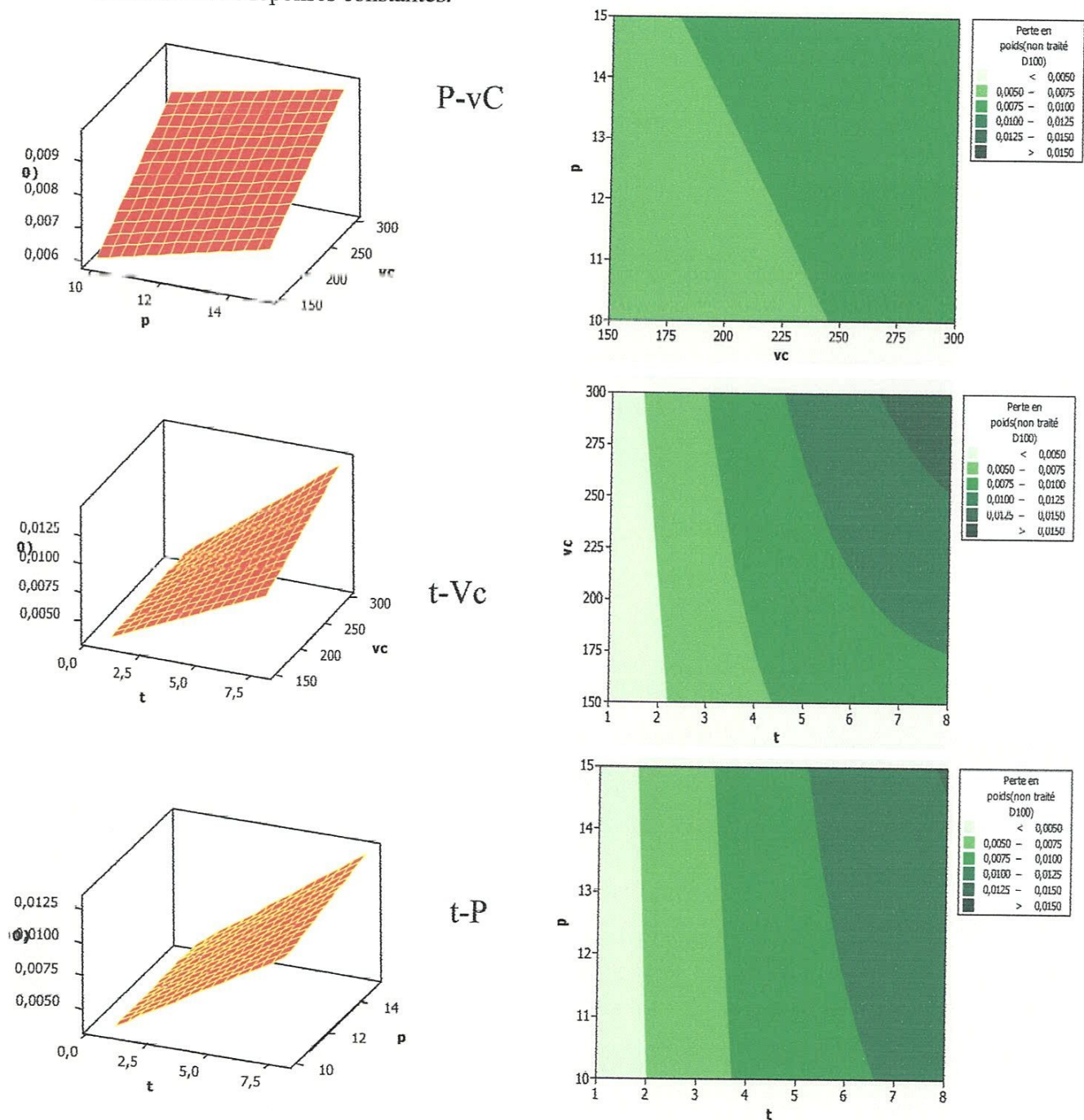
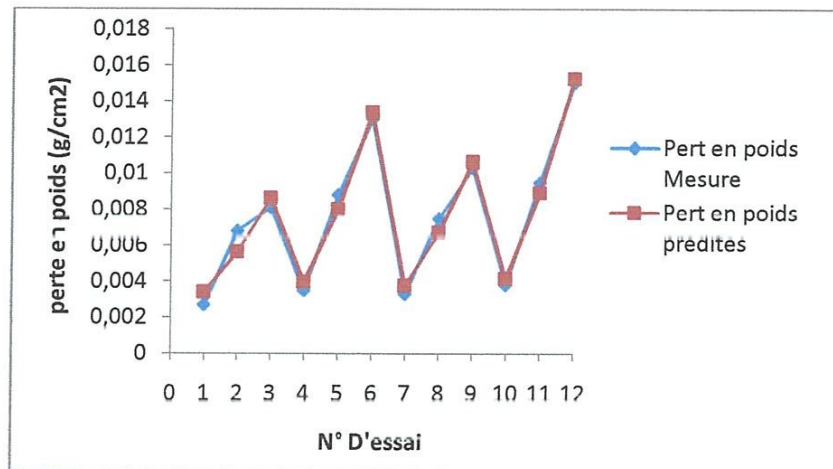


Fig.III.2 : Diagrammes de surfaces pour la perte en poids de en fonction de la charge, la vitesse et le temps et les Graphes de Contour.

### III.2.2.1.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites :

La Figure (III.3) montre une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites de la perte en poids pour les 12 essais réalisés. Ces droites permettent de comparer les valeurs prédites aux valeurs expérimentales dans le but d'évaluer l'ajustement du modèle. Les valeurs x représentent les numéros des essais (12 essais), tandis que les valeurs y correspondent les valeurs prédites et expérimentales.

L'analyse de la figure (III.3) montre la bonne corrélation entre les deux valeurs.



**Fig.III.3 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de l'acier100Cr6 non traité.

La formule pour déterminer le pourcentage d'erreur est :

$$| \text{Valeur Théorique} - \text{Valeur Expérimentale} | \times 100 / \text{Valeur Expérimentale}$$

Le tableau(III.3) montre le pourcentage d'erreur pour chaque essai (valeurs mesurées et prédites).

N° essai	Pert en poids Mesure	Pert en poids prédites	Erreur %
1	0,0027	0,00338468	25,358692
2	0,0068	0,00561847	17,3754637
3	0,0081	0,00859685	6,13391169
4	0,0035	0,00395586	13,024453
5	0,0088	0,00798559	9,25470925
6	0,013	0,01335856	2,75814276
7	0,0033	0,00374505	13,4862135
8	0,0075	0,0067045	10,6066066
9	0,0103	0,01065045	3,40243156
10	0,0038	0,00414955	9,19867236
11	0,0095	0,00890495	6,26363205
12	0,015	0,0152455	1,63663664

**Tableau III.3:** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de l'acier100Cr6 non traité.

L'analyse du tableau (III.3), montre que le % d'erreur minimale est obtenu avec le régime 12 suivi par le régime 6et9, et le % d'erreur maximale est obtenu avec le régime 1.

### III.2.2.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'acier 100Cr6 traité :

Coefficients de régression estimés pour la perte en poids		Analyse des variances pour la perte en poids						
Terme	Coeff	Source	DL	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Constante	-0,0034264	Régression	7	0,0000534	0,0000076	84,7352	0,000349	
p	0,0002001	p	1	0,0000010	0,0000002	2,7164	0,174666	1,85873606
vc	0,0000129	vc	1	0,0000056	0,0000004	4,3883	0,104260	10,4089219
t	0,0007928	t	1	0,0000440	0,0000011	12,1465	0,025233	<b>81,7843866</b>
p <sup>vc</sup>	-0,0000007	p <sup>vc</sup>	1	0,0000002	0,0000002	2,3696	0,198552	0,37174721
p <sup>t</sup>	0,0000169	p <sup>t</sup>	1	0,0000002	0,0000002	1,9545	0,234648	0,37174721
vc <sup>t</sup>	0,0000012	vc <sup>t</sup>	1	0,0000008	0,0000008	8,6521	0,042328	1,48698885
t <sup>t</sup>	-0,0000658	t <sup>t</sup>	1	0,0000017	0,0000017	18,3280	0,012836	3,1598513
Coefficient de détermination R <sup>2</sup> =99,33%		Erreur	4	0,0000004	0,0000001			
		Total	11	0,0000538				

**Tableau III.4** : Résultats de l'analyse de variance pour l'acier 100Cr6 traité.

Les résultats présentés dans le tableau (III.4) sont analysés par le logiciel MINITAB16. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA), nous considérons un intervalle de confiance de 95% ( $\alpha=0.05$ ), on constate que le facteur de temps (t) et le facteur le plus significatif car sa contribution est de 81,7843866% suivi par la vitesse (Vc) avec une contribution 10,4089219% et en dernier lieu la charge (p) avec une contribution 1,85873606% suivi par les interactions (p<sup>vc</sup>), (p<sup>t</sup>), (vc<sup>t</sup>), et (t<sup>t</sup>) une contribution de 0,37174721 %, 0,37174721%, 1,48698885%, 3,1598513%.

#### III.2.2.2.1. Analyse de Régression :

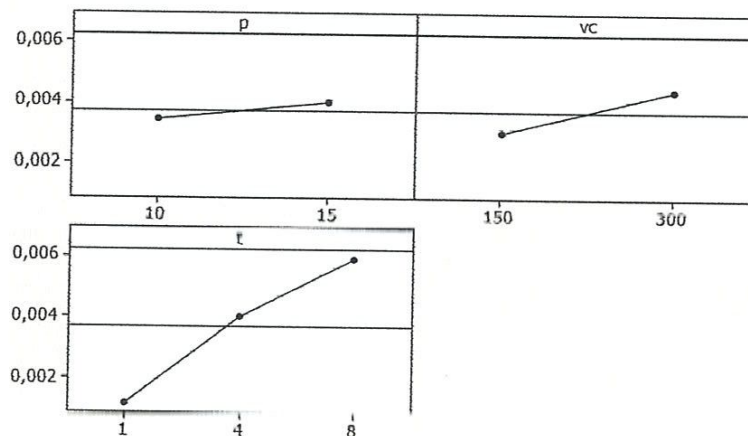
L'équation (\*2) exprime le modèle de perte en poids avec tous les facteurs principaux et leur interactions.

$$\text{Perte en poids (traité D100)} = -0,00342638 + 0,000200135 p + 1,28664e-005 vc + 0,000792833 t - 7,11111e-007 p*vc + 1,68919e-005 p*t + 1,18468e-006 vc*t - 6,57738e-005 t*t \dots\dots\dots (*2)$$

Ou  $R^2=99,33\%$

**III.2.2.2.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :**

La figure (III.4) montre les effets principaux de la vitesse, de la charge et de temps sur la perte en poids.

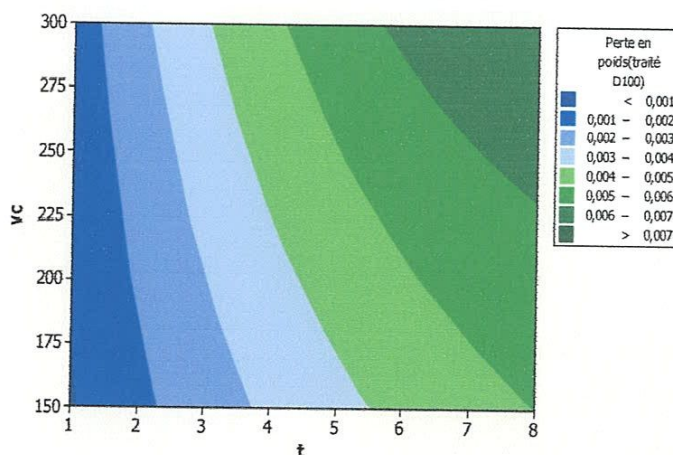
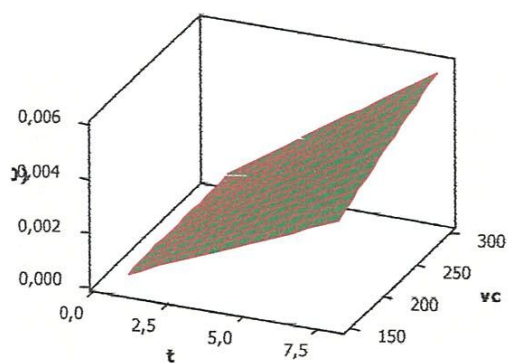


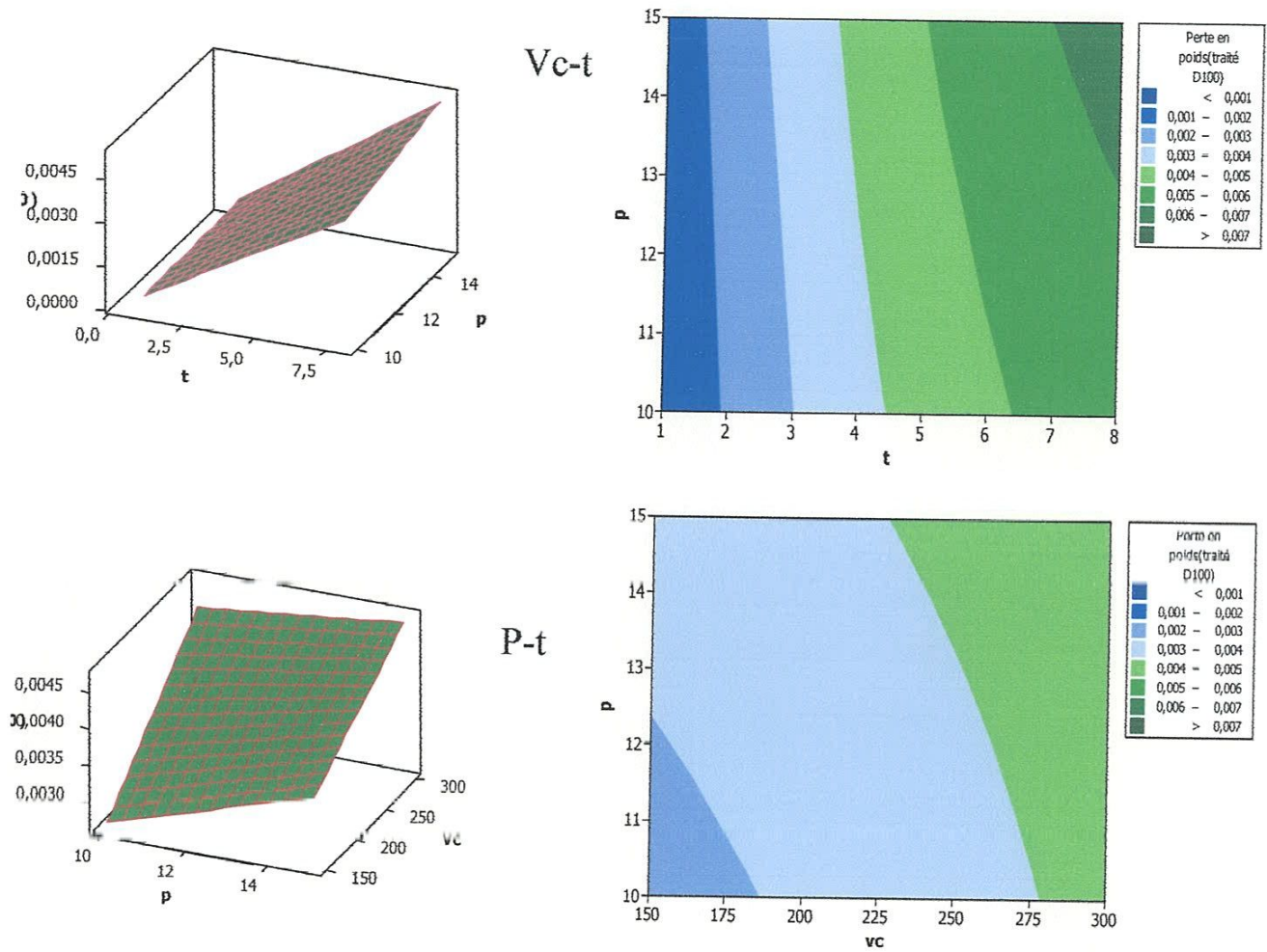
**Fig.III.4 :** Graphique des effets principaux pour perte en poids.

En effet, on remarque que la pente du paramètre de temps est plus grande par rapport à la pente de la vitesse et celle de la charge, il est donc le facteur le plus influent sur la perte en poids suivie de la vitesse.

**III.2.2.2.3. Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour :**

P-Vc

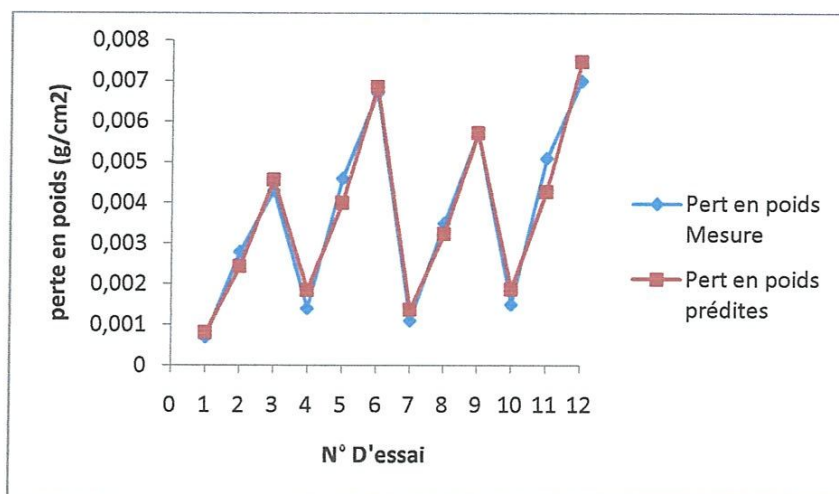




**Fig.III.5 :** Diagrammes de surfaces pour la perte en poids de en fonction de la charge, la vitesse et le temps et les Graphes de Contour.

L'analyse des Diagrammes de surfaces et les Graphes de Contour montrent que la perte en poids est très influencée par le temps suivie de la vitesse et en dernier lieu de la charge.

## III.2.2.2.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites :



**Fig.III.6 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de l'acier 100Cr6 traité.

L'analyse de la figure (III.6) montre la bonne corrélation entre les deux valeurs.

N° essai	Pert en poids Mesure	Pert en poids prédites	Erreur %
1	0,0007	0,00081059	15,7979408
2	0,0028	0,00242106	13,5336229
3	0,0043	0,00456836	6,24083386
4	0,0014	0,00185158	32,2554698
5	0,0046	0,00399516	13,1487466
6	0,0067	0,00685327	2,28754874
7	0,0011	0,00136239	23,8533989
8	0,0035	0,00322624	7,82175032
9	0,0057	0,00571137	0,19954165
10	0,0015	0,00187005	24,6696697
11	0,0051	0,004267	16,333245
12	0,007	0,00746295	6,61357786

**Tableau III.5:** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de l'acier 100Cr6 traité.

L'analyse du tableau (III.5), montre que le % d'erreur minimale est obtenue avec le régime 9, et le % d'erreur maximale est obtenue avec le régime 4.

### III.3. Modèles de perte en poids de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif D400 en fonction de (vitesse, charge, temps) :

#### III.3.1. Résultats des expériences :

Dans le tableau (III.6) sont présentées les valeurs expérimentales de perte en poids de l'acier 100Cr6 traité et non traité contre un abrasif D400. Ces valeurs sont obtenues selon un plan d'expérience de 12 essais avec 3 facteurs et 4 niveaux.

N°d'essais	P (Néotène)	V (tr/min)	Temps (h)	Perte en poids NT (g/cm <sup>2</sup> )	Perte en poids T (g/cm <sup>2</sup> )
1	10	150	1	0,0020	0,0005
2	10	150	4	0,0048	0,0017
3	10	150	8	0,0068	0,0033
4	10	300	1	0,0026	0,0007
5	10	300	4	0,0063	0,0023
6	10	300	8	0,0086	0,0054
7	15	150	1	0,0023	0,0006
8	15	150	4	0,0053	0,0020
9	15	150	8	0,0077	0,0043
10	15	300	1	0,0029	0,0008
11	15	300	4	0,0077	0,0030
12	15	300	8	0,0102	0,0062

**Tableau III.6 :** Résultats de perte en poids suivant le L12 (plan de 12 essais).

#### III.3.2. Analyse de la variance (ANOVA) et détermination des modèles mathématique :

Les résultats présentés dans les tableaux (III.6) sont analysés par le logiciel MINITAB16. En appliquant l'analyse de la variance (ANOVA). Cette méthode a pour objectifs de déterminer les facteurs et les interactions qui ont un effet statistiquement significatif sur la perte en poids. Pour cela on doit choisir un niveau de signification  $\alpha$  à ne pas dépasser, et un intervalle de confiance de 95% ( $\alpha = 0,05$ ).

III.3.2.1. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'acier100Cr6 non traité :

Coefficients de régression estimés pour la perte en poids		Analyse des variances pour la perte en poids						
Terme	Coeff	Source	DL	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Constante	0,0012864	Régression	7	0,0000813	0,0000116	100,563	0,000249	
p	-0,0001081	p	1	0,0000021	0,0000001	0,618	0,475839	2,56723716
vc	-0,0000046	vc	1	0,0000074	0,0000000	0,432	0,546843	9,04645477
t	0,0009828	t	1	0,0000672	0,0000017	14,547	0,018875	82,1515892
p*vc	0,0000007	p*vc	1	0,0000002	0,0000002	1,847	0,245738	0,24449878
p*t	0,0000265	p*t	1	0,0000004	0,0000004	3,745	0,125066	0,48899756
vc*t	0,0000014	vc*t	1	0,0000011	0,0000011	9,612	0,036212	1,34474328
t*t	-0,0000881	t*t	1	0,0000030	0,0000030	25,624	0,007171	3,66748166
Coefficient de détermination R <sup>2</sup> =99,43%		Erreur	4	0,0000005	0,0000001			
		Total	11	0,0000818				

Tableau III.7 : Résultats de l'analyse de variance pour l'acier100Cr6 non traité.

D'après le tableau (III.7) on peut voir que le facteur de temps (P-value=0,018875) a une grande influence sur la perte en poids avec une contribution de 82,1515892%. Ensuite vient en deuxième lieu la vitesse avec une contribution de 9,04645477%.

Les interactions vc\*t, t\*t et le facteur de la charge p ont successivement une contribution de 1,34474328%, 3,66748166, et 2,56723716%, et en dernier lieu l interactions p\*t, p\*vc avec une contribution de 0,48899756%, 0,24449878%.

III.3.2.1.1. Analyse de Régression :

L'équation (\* 2) exprime le modèle de perte en poids avec tous les facteurs principaux et leur interactions.

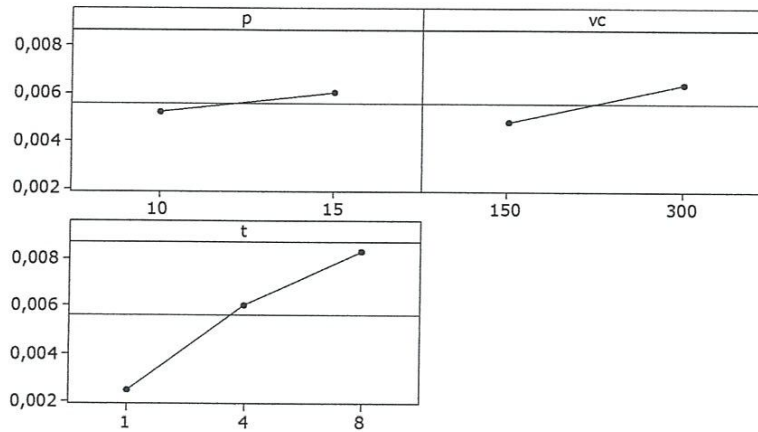
$$\begin{aligned}
 \text{Perte en poids(non traité D400)} = & 0,00128636 - 0,000108108 p - 4,57357e-006vc + \\
 & 0,000982819 t + 7,11111e-007 p*vc + 2,64865e-005 p*t + 1,41441e-006 vc*t - \\
 & 8,80952e-005 t*t \dots\dots\dots (*2)
 \end{aligned}$$

Ou R<sup>2</sup>=99,43%



### III.3.2.1.2. Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :

La figure (III.7) montre les effets principaux de la vitesse, de la charge et de temps sur la perte en poids.



**Fig.III.7 :** Graphique des effets principaux pour perte en poids.

Cette figure montre que le temps a un effet significatif sur la perte en poids. En effet, on remarque que la pente du paramètre de temps est plus grande par rapport à la pente de la vitesse et celle de la charge, il est donc le facteur le plus influent sur la perte en poids suivie par la vitesse.

### III.3.2.1.3. Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour :

La présentation en 3D figure (III.8) montre que la pente de temps (t) est supérieure par rapport aux autres facteurs ce qui implique que ce facteur a une influence très importante sur la perte en poids suivi par la vitesse (Vc) et en dernier lieu par la charge (p). D'autre part les graphes de contour permettent de visualiser la surface de réponse. Ils permettent aussi d'établir les valeurs de réponse et les conditions d'exploitation souhaitables. Le diagramme montre la relation entre une valeur de réponse (dans notre cas la perte en poids) et trois facteurs à partir d'un modèle d'équation. Les points ayant la même réponse sont joints pour générer les lignes de contours des réponses constantes.

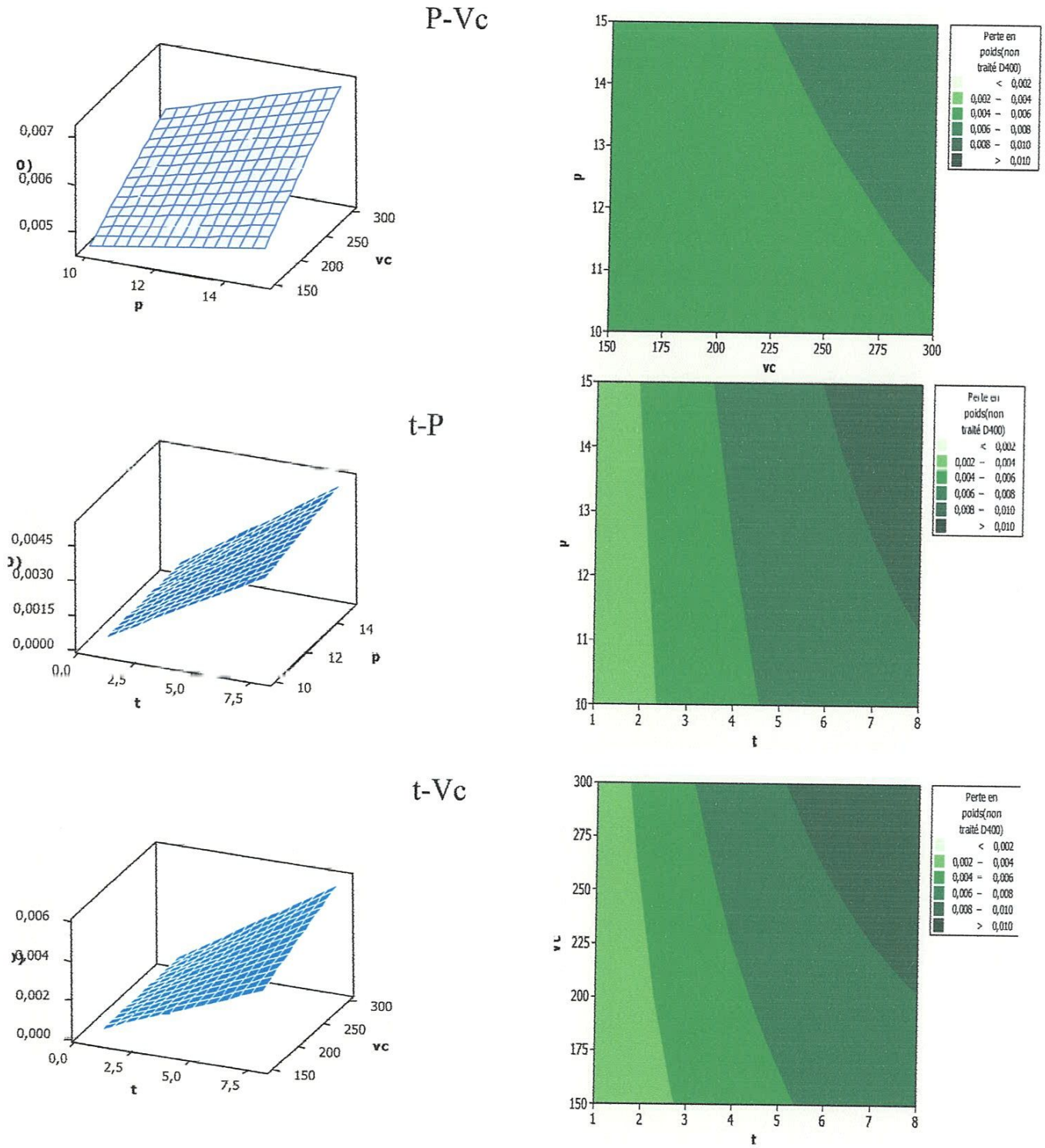
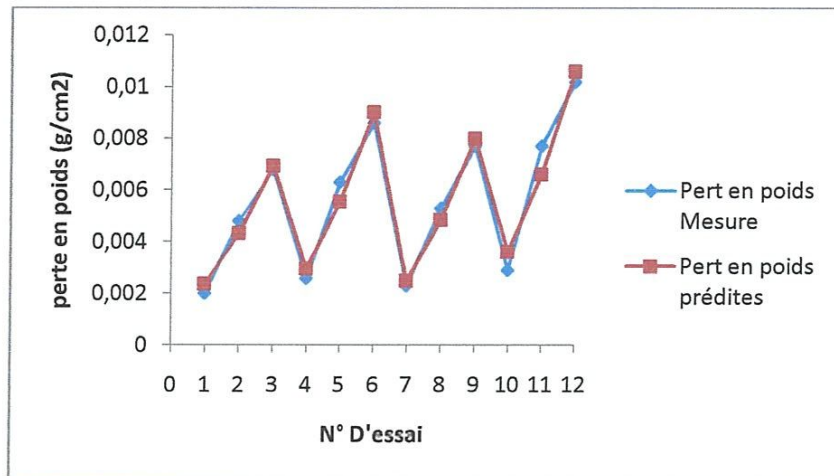


Fig.III.8 : Diagrammes de surfaces pour la perte en poids de en fonction de la charge, la vitesse et le temps et les Graphes de Contour.

## III.3.2.1.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites :



**Fig.III.9 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de L'acier100Cr6 non traité.

L'analyse de la figure (III.9) montre la bonne corrélation entre les deux valeurs.

N° essai	Pert en poids Mesure	Pert en poids prédites	Erreur %
1	0,002	0,00235766	17,8828829
2	0,0048	0,00431577	10,0882132
3	0,0068	0,00692658	1,86142024
4	0,0026	0,00295045	13,4788635
5	0,0063	0,00554505	11,983412
6	0,0086	0,0090045	4,70354075
7	0,0023	0,00248288	7,95142969
8	0,0053	0,00483829	8,71154173
9	0,0077	0,00797883	3,62115362
10	0,0029	0,00360901	24,4485865
11	0,0077	0,0066009	14,2740143
12	0,0102	0,01059009	3,82441265

**Tableau III.8:** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de l'acier100Cr6 non traité.

L'analyse du tableau (III.8), montre que le % d'erreur minimale est obtenu avec le régime 3 suivi par le régime 9 et 12, et le % d'erreur maximale est obtenue avec le régime 10.

III.3.2.2. Analyse de la variance (ANOVA) pour l'acier100Cr6 traité :

Coefficients de régression estimés pour la perte en poids		Analyse des variances pour la perte en poids						
Terme	Coeff	Source	DL	SC	CM	F-value	P-value	PC%
Constante	0,0005924	Régression	7	0,0000408	0,0000058	341,229	0,000022	
P	-0,0000184	P	1	0,0000007	0,0000000	0,121	0,745689	1,71568627
vc	-0,0000019	vc	1	0,0000030	0,0000000	0,526	0,508417	7,35294118
t	-0,0002140	t	1	0,0000350	0,0000001	4,669	0,096814	85,7843137
p*vc	0,0000001	p*vc	1	0,0000000	0,0000000	0,195	0,681420	0
p*t	0,0000227	p*t	1	0,0000003	0,0000003	18,617	0,012499	0,73529412
vc*t	0,0000017	vc*t	1	0,0000017	0,0000017	97,266	0,000593	4,16666667
t*t	0,0000149	t*t	1	0,0000001	0,0000001	4,947	0,090186	0,24509804
Coefficient de détermination R <sup>2</sup> =99,83%		Erreur	4	0,0000001	0,0000000			
		Total	11	0,0000408				

Tableau III.9 : Résultats de l'analyse de variance pour l'acier100Cr6 traité.

D'après le tableau (III.9) on peut déterminer les coefficients de régression estimés pour le critère de perte en poids d'une manière générale, et aussi on peut voir que le facteur de temps (P-value=0,096814) a une grande influence sur la perte en poids avec une contribution de 85,7843137%. Ensuite viens en deuxième lieu la vitesse avec une contribution de 7,35294118%.

Les interactions p\*t, vc\*t, t\*t et le facteur de la charge p ont successivement une contribution de 0,73529412%, 4,16666667%, 0,24509804%, et 1,71568627%, et en dernier lieu l'interaction p\*vc avec une contribution inexistante de 0%.

III.3.2.2.1 Analyse de Régression :

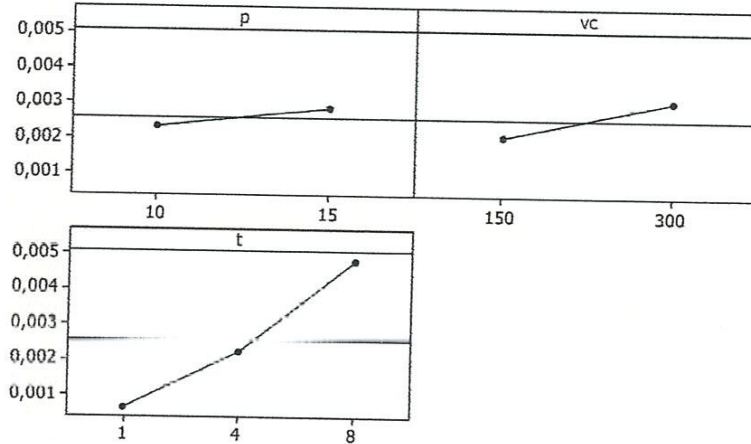
L'équation (\*4) exprime le modèle de perte en poids avec tous les facteurs principaux et leur interactions.

$$\begin{aligned} \text{Perte en poids (traité D400)} = & 0,000592407 - 1,83784e-005 p - 1,93994e-006 vc - \\ & 0,000214044 t + 8,88889e-008 p*vc + 2,27027e-005 p*t + 1,72973e-006 vc*t + \\ & 1,4881e-005 t*t \dots\dots\dots (*4) \end{aligned}$$

Ou R<sup>2</sup>=99,83%

**III.3.2.2.2 Graphique des effets principaux et Diagramme d'interaction :**

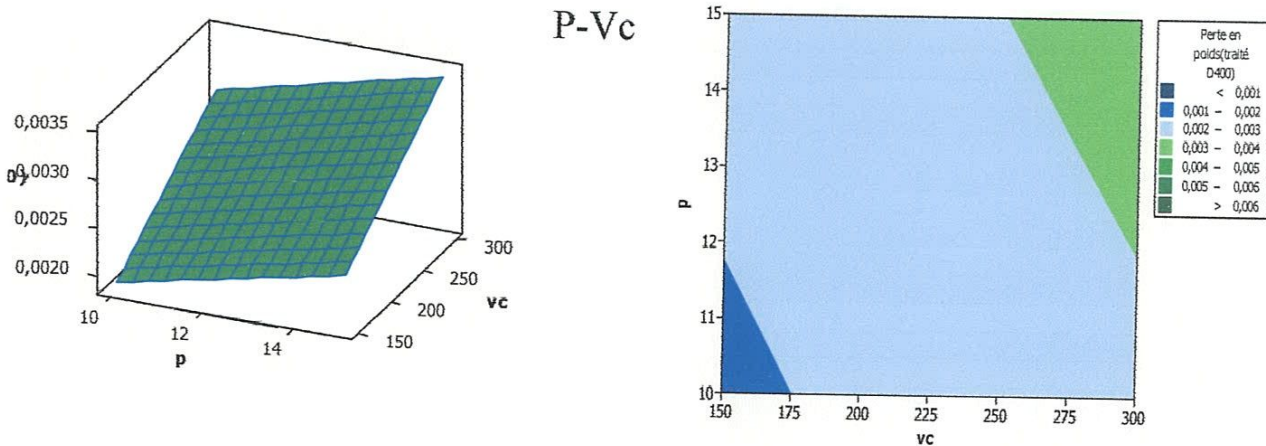
La figure (III.10) montre les effets principaux de la vitesse, de la charge et de temps sur la perte en poids.



**Fig.III.10 :** Graphique des effets principaux pour perte en poids.

D'après la figure (III.10), on remarque que la pente du paramètre de temps est plus grande par rapport à la pente de la vitesse et celle de la charge, il est donc le facteur le plus influent sur la perte en poids suivi par la vitesse.

**III.3.2.2.3. Diagrammes de surfaces 3 D et Graphique de Contour :**



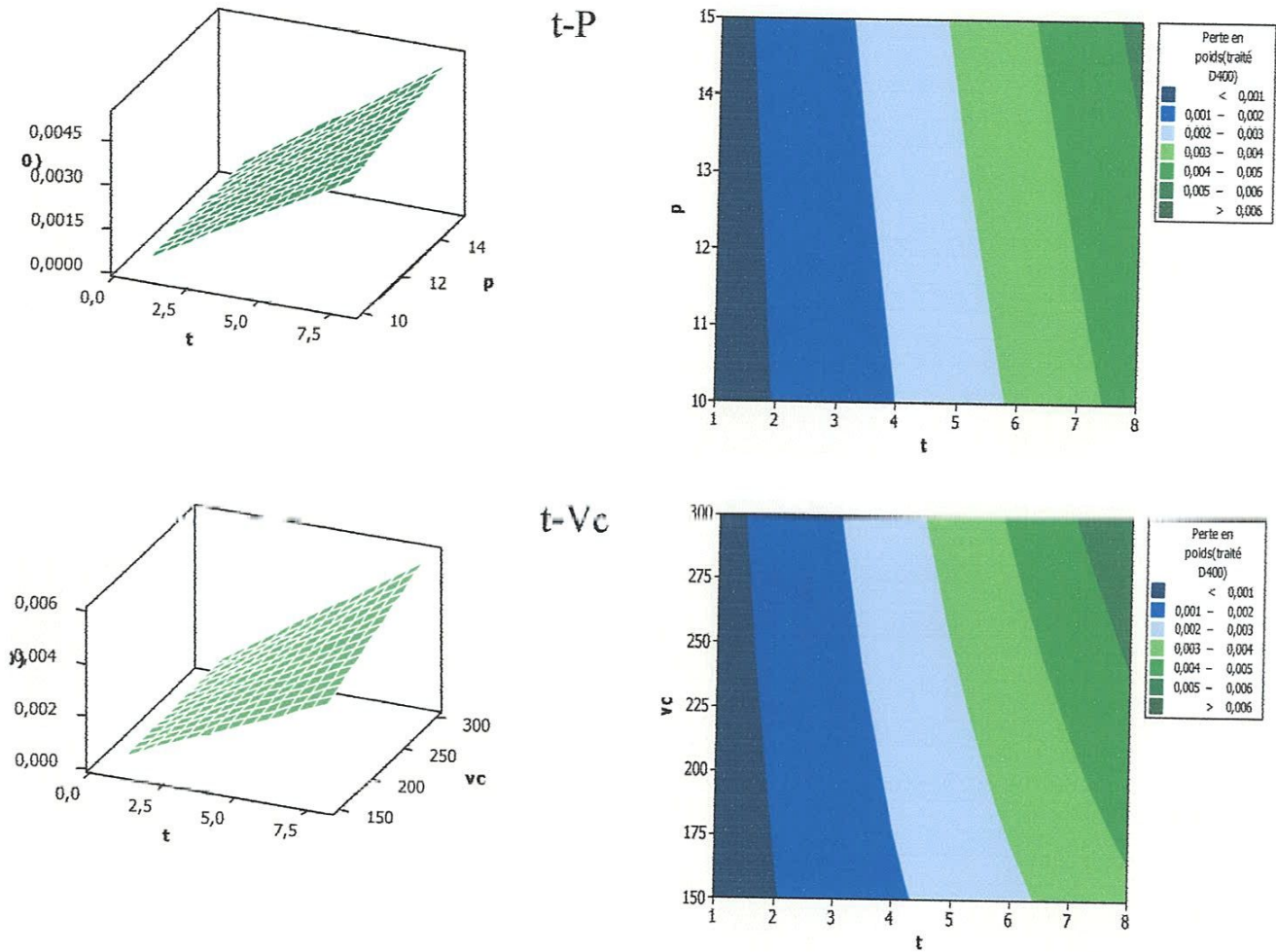
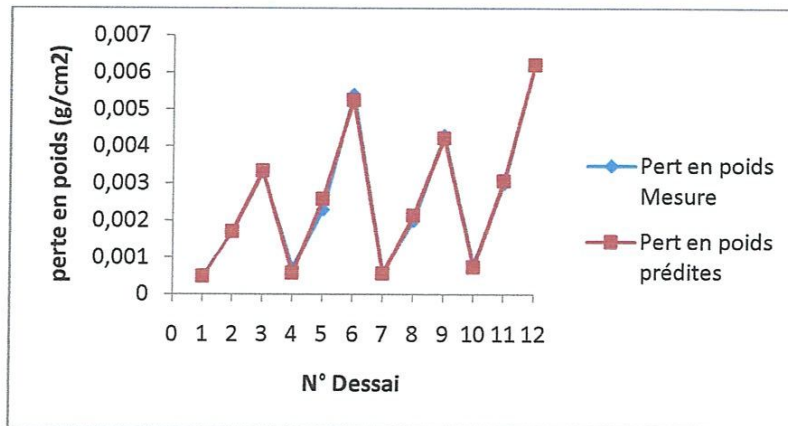


Fig.III.11 : Diagrammes de surfaces pour la perte en poids de en fonction de la charge, la vitesse et le temps et les Graphes de Contour.

L'analyse des Diagrammes de surfaces et les Graphes de Contour montrent que la perte en poids est très influencée par le temps suivie de la vitesse et en dernier lieu de la charge.

## III.3.2.2.4. Comparaison entre les valeurs expérimentales et prédites :



**Fig.III.12 :** Comparaison entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de L'acier100Cr6 non traité.

L'analyse de la figure (III.12) montre la bonne corrélation entre les deux valeurs.

N° essai	Pert en poids Mesure	Pert en poids prédites	Erreur %
1	0,0005	0,00047072	5,85585586
2	0,0017	0,00169707	0,17223105
3	0,0033	0,00333221	0,97597598
4	0,0007	0,00057252	18,2110682
5	0,0023	0,00257725	12,0544458
6	0,0054	0,00525023	2,77360694
7	0,0006	0,00055901	6,83183183
8	0,002	0,0021259	6,29504505
9	0,0043	0,00421509	1,97464907
10	0,0008	0,00072748	9,06531532
11	0,003	0,00307275	2,42492492
12	0,0062	0,00619977	0,00363266

**Tableau III.10:** Résultats des erreurs entre les valeurs mesurées et prédites de la perte en poids de l'acier100Cr6 traité.

L'analyse du tableau (III.10), montre que le % d'erreur minimale est obtenue avec le régime 12 suivi par le régime 1et2, et le % d'erreur maximale est obtenue avec le régime4.

**Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de déterminer les coefficients de détermination et les modèles mathématiques qui nous permettent de mieux voir le degré d'influence des différents paramètres (la charge, la vitesse, le temps, l'abrasif et le traitement thermique) sur la perte en poids de l'acier 100Cr6 en frottement.

A partir de ces résultats, nous avons tiré les conclusions suivantes :

- Le temps a un impact considérable sur la perte en poids, suivi en deuxième lieu par la vitesse.
- Le traitement thermique a une grande influence sur la perte en poids.
- La taille de l'abrasif (l'antagoniste) influe considérablement. Plus le grain est gros plus la perte est élevée .



## **Conclusion générale :**

Le frottement d'un matériau est un processus complexe, étroitement lié aux facteurs mécaniques, thermiques et physico-chimiques.

L'usure est un phénomène évolutif et irréversible.

Les résultats obtenus nous ont conduits aux conclusions suivantes :

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

L'usure augmente au fur et à mesure que le temps augmente. L'augmentation de la charge et de la vitesse provoque une usure considérable. L'usure augmente avec la grosseur du grain de l'abrasif. Le comportement tribologique d'un matériau dépend du film intercalaire engendré pendant le frottement (3<sup>ème</sup> corps) et que la dégradation des surfaces dépend du comportement purement mécanique des couches superficielles.

Les traitements thermiques augmentent la résistance à l'usure. 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 trempe.

## Références bibliographiques:

- [1]: [http:// ec-lyon.fr/Tribologie](http://ec-lyon.fr/Tribologie).
- [2]: **OECD**, 1969, Glossary of terms and definitions in the field of friction, Cooperation and Development.
- [3]: **G. Zambelli, L. Vincent**, Matériaux et Contacts, une approche tribologique, (1998), Presses polytechniques et Universitaires Romandes.
- [4] : **O. Barrau**, étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud, (2004), thèse docteur, l'Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [5]: **E. Rabinowicz**, Friction and wear of materials (1965), Ed. J. Wiley & Sons, New York.
- [6]: **ASTM**, 1990, Norme G40-90A.
- [7]: **J. Jcaubet**, «Théorie et pratique industrielle du frottement » .Mécanique des surfaces, collection dirigée par R. coutel. Technip /DUNOD, paris 1964.
- [8] :**S. Fouquet**, Comportement tribologique de matériaux composites à fibres de carbone et matrice céramique dans le système SI-C, (2003), thèse docteur, L'université Bordeaux 1.
- [9]: **F.P. Bowden, D. Tabor**, Friction and lubrication of solids, Clarendon Press, Oxford, (1956).
- [10]: **Archard J.F.**, 1953, Contact and rubbing of flat surfaces, Journ. of Appl. Phys., 24, pp. 981-988.
- [11]: **S. Bensaada**, Traitements thermiques, Classification et désignation des aciers et fontes.
- [12]: **A. Campa**, Technologie professionnelle générale pour mécaniciens.
- [13]: [http://ptetoile.free.fr/ Traitements thermiques des aciers](http://ptetoile.free.fr/Traitements%20thermiques%20des%20aciers)
- [14]: **J. Barralis**, Elaboration, structures-propriétés et normalisation, Métallurgie.
- [15]: **Baehrel**, "Essai mécanique" [http://fr.wikipedia.org/wiki/Résilience- \(physique\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9silience-(physique)).

- [16]: **I. Yakimets, C. Richard, G. Beranger, P. Peyre**, Caractérisation physique et contribution à l'étude du comportement tribologique de l'acier de roulement 100Cr6 traité par choc laser, (2002), *Matériaux et techniques*, vol. 90, n°3-4, pp. 3-10.
- [17] : **A. Faussemagne, G. Marest**, Evolution des propriétés de surface de l'acier 100Cr6 par implantation et mélange ioniques, (1996), thèse docteur, Université de Lyon 1.
- [18] : **N. M ebarki**, Mémoire magister, Guelma, (2008).
- [19] : **M. Habak**. Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage dur de l'acier a roulement 100cr6. PhD thesis, ENSAM Anger, 2006.
- [20] : **S. Debaud**, Comportement tribologique du MoS<sub>2</sub> . Rôle du film de transfert, (2000), thèse docteur, École polytechnique fédérale de Lausanne.
- [21] : **F. Zemzemi**, Caractérisation de modèles de frottement aux interfaces pièce-outil-copeau en usinage : application au cas de l'usinage des aciers et de l'inconel 718, (2007), thèse docteur, l'École Centrale de Lyon.
- [22]: **N. Khanafi-Benghalem, K. Loucif, E. Felder, F. Delamare**, Influence de la température sur les mécanismes de frottement et d'usure des aciers X12NiCrMoSi25-20 et 25CrMo4 glissant sur du carbure de tungstène, (2005), *Matériaux et techniques*, vol. 93, pp. 347-362.
- [23]: **H. Kato, T. S. Eyre, B. Ralph**, Wear mechanism map of nitrided steel (1993), *Acta Metall. Mater.*, Vol.42, N°5, pp. 1703-1713.
- [24] : **P. Psyllaki, G. Kefaloikas, G. Patazopoulos, S. Antoniou, J. Sideris**, Microstrucutre and tribological behaviour of liquid nitrocarburised tool steels (2002), *Surface & Coatings technology*, Vol. 162, pp. 67-78.
- [25]: **P.J. Blau**, the significance and use of the friction coefficient (2001), *Tribology International*, Vol. 34, pp. 585-591.