

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Option: Comportement et mise en forme des matériaux

***Détermination du taux de la martensite engendrée lors
des essais d'usure dans un acier inoxydable 304L***

Proposé et dirigé par

M. ALMANSBA Madjid

Réalisé par

M^{elle} OUCHENE Katia

Promotion 2013\2014

Remerciements

*J'adresse mes plus profonds remerciements à mon encadreur Monsieur **ALMANSBA**, qui a assuré la continuité de l'encadrement de cette étude jusqu'au bout.*

*Je remercie particulièrement Monsieur **FERHOUM** pour tous ses conseils précieux dont il a su me faire profiter.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements et ma reconnaissance, à Monsieur **AZEM** et Monsieur **NECHICHE** à l'aide compétente qu'ils m'ont apportée et pour leur encouragement.*

*J'adresse mes remerciements chaleureux à Madame **ADJEMOUT** de m'avoir initié au traitement d'image. Sans elle, cette méthode n'aurait pas abouti aux résultats présentés dans ce travail.*

*J'exprime également ma reconnaissance et estime au personnel du hall de technologie de Oued Aissi. Spécialement Monsieur **MEGHLAT**.*

J'exprime aussi mes remerciements à tout le personnel des laboratoires de génie mécanique

Mes remerciements les plus sincères à tous les membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin au bon accomplissement de ce modeste travail.

Dédicaces

À ma mère,

À mon père,

À toute ma famille,

À tous mes ami(e)s,

...et à tous ceux qui me sont chers.

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I Généralités sur les aciers inoxydables

1. Les aciers inoxydables	3
1.1. Introduction	3
1.2. Définition	3
1.3. Les éléments d'alliage	3
1.3.1. Les éléments alphagènes	3
1.3.2. Les éléments gammagènes	3
1.4. Evaluation de la quantité alphagène et gammagène.....	3
1.5. Les principaux éléments d'addition et leur Rôle.....	4
1.6. Etude des aciers inoxydables.....	5
1.6.1. Diagramme Fe-C.....	5
1.6.2. Diagramme Fe-Cr	6
1.6.3. Diagramme Fe-Ni	6
1.6.4. Système Fe-Cr-Ni	7
1.7. Classification des aciers inoxydables	8
1.7.1. Les aciers inoxydables ferritiques	9
1.7.2. Aciers inoxydables martensitiques	9
1.7.3. Aciers inoxydables austénitiques.....	9
1.7.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques appelés aussi aciers duplex.....	9
1.8. Caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables.....	10
2. Transformation martensitique.....	10
2.1. La phase martensitique	10
2.2. Structure cristallographique	11
2.2.1. De l'austénite	11
2.2.2. De la martensite	11
2.3. La morphologie de la martensite.....	12
2.3.1. Martensite en plaquettes	13
2.3.2. Martensite en lattes	13
3. Les aciers TRIP.....	14
3.1. Instabilité de l'austénite dans les aciers TRIP.....	14
3.2. Mécanisme de formation de la martensite dans les aciers TRIP.....	14
3.2.1. Transformations au cours de refroidissement	14
3.2.2. Transformation martensitique par déformation plastique	15
4. Etude de la plasticité de transformation (TRIP).....	15
4.1. Etude microscopique de l'effet TRIP.....	16
4.2. Etude macroscopique de l'effet TRIP.....	16
1.4.2.1. Mécanisme de Magee	16
1.4.2.2. Mécanisme de Greenwood-Johnson	17
5. Caractéristique des aciers TRIP.....	18

Sommaire

6. Conclusion.....	18
--------------------	----

Chapitre II Tribologie et usure

1. Tribologie.....	19
1.1. Introduction	19
1.2. Contact tribologique	19
1.3. Définition de la tribologie.....	20
1.4. Les éléments influant sur le contact tribologique.....	21
1.4.1. <i>L'énergie superficielle d'un solide</i>	21
1.4.2. <i>L'état physico-chimique</i>	21
1.4.3. <i>Topographie</i>	21
1.5. Sollicitation du contact tribologique.....	22
2. Les frottements.....	23
2.1. Définition.....	23
2.2. Formulation du coefficient de frottement	24
3. L'usure	25
3.1. Définition	25
3.2. Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces.....	25
3.2.1. <i>Déformations plastiques</i>	25
3.2.2. <i>Fissurations</i>	25
3.2.3. <i>Transformations physicochimiques de surface</i>	25
3.2.4. <i>Adhésion entre les corps frottant</i>	25
4. Classement des détériorations et étude des usures	26
4.1. Importance des détériorations sur la durée d'utilisation de l'organe.....	26
4.2. Types des détériorations	27
4.3. Organes détériorés	27
5. Variables significatives qui gouvernent l'usure	27
6. Principaux types d'usure	28
6.1. L'usure abrasive.....	28
6.1.1. <i>Nature du phénomène</i>	28
6.1.2. <i>Prévention</i>	29
6.2. L'usure par pitting.....	29
6.2.1. <i>Nature du phénomène</i>	29
6.2.2. <i>Prévention</i>	29
6.3. L'usure par corrosion de contact	30
6.3.1. <i>Nature du phénomène</i>	30
6.3.2. <i>Prévention</i>	30
6.4. L'usure par fluage	31
6.4.1. <i>Nature du phénomène</i>	31
6.4.2. <i>Prévention</i>	31
6.5. L'usure par cavitation.....	31
6.5.1. <i>Nature du phénomène</i>	31

Sommaire

6.5.2. Prévention	32
6.6. L'usure par corrosion	32
6.6.1. Nature du phénomène	32
6.6.2. Prévention	32
7. Conclusion	33

Chapitre III Discussion des résultats

1. Introduction	34
2. Présentation du matériau utilisé	35
2.1. Matériau des disques	35
2.2. Matériau des pions	35
3. Description des dispositifs utilisés	36
3.1. Tribomètre	36
4. L'examen micrographique	38
4.1. Enrobage des échantillons	38
4.2. Préparation des surfaces	38
4.3. Attaque électrolytique	39
4.4. Microscope optique	40
4.5. Microscopie électronique à balayage	41
5. Microdureté	42
6. Résultats et discussion.....	43
6.1. Caractérisation métallographique.....	43
6.1.1. Observation de la microstructure avant les essais d'usure	43
6.1.2. Observation de la microstructure après les essais d'usure.....	45
6.1.3. Observation de la microstructure après usure de la face de profil du pion usé.....	47
6.1.4. Observation de la microstructure après usure au MEB.....	48
6.2. Microdureté.....	50
6.3. Perte de masse.....	52
6.4. Taux la phase martensitique α' formée.....	52
6.4.1. Technique de traitement d'image sous Matlab.....	52
6.4.2. Définition du traitement d'image.....	53
6.4.3. Représentation des images numériques.....	53
6.4.4. Mesure du taux de la phase α'	54

Sommaire

6.4.5. <i>Etapas pour l'obtention d'une image binaire</i>	54
6.5 Organigramme du programme de traitement d'image	57
7. Conclusion	60
Conclusion et perspectives.....	61

Liste des figures

Chapitre I Généralités sur les aciers inoxydables.

Figure I.1. Diagramme de Schaeffler.....	4
Figure I.2. Diagramme binaire fer-carbone.....	5
Figure I.3. Diagramme binaire Fe-Cr.....	6
Figure I.4. Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel. (Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ).....	7
Figure I.5. Sections des diagrammes ternaires Fe-Cr-Ni à 650°C.....	8
Figure I.6. Microstructures des aciers inoxydables ferritique (a), martensitique (b), austénitique (c), et austéno-ferritique (d).....	8
Figure I.7. Représentation schématique simplifiée du mécanisme de la transformation martensitique du fer.....	11
Figure I.8. Structures de l'austénite et de la martensite α' dans les aciers.....	11
Figure I.9. Mécanisme de déformation d'un acier austénitique à basse énergie d'empilement.....	12
Figure I.10. Morphologie de la martensite en fonction de la teneur en carbone de l'acier.....	12
Figure I.11. Des lignes de macles qui constituent les plaquettes de martensite observées par la microscopie électronique.....	13
Figure I.12. Morphologie de la martensite en lattes a) observation optique – b) observation MET.....	13
Figure I.13. Formation de la martensite α' a partir de structure cubique face centrée (a) présentation schématique du mécanisme et (b) carte EBSD représentant la nucléation de la martensite α' dans la phase mère γ	14
Figure I.14. Représentation schématique de la plasticité de transformation due au mécanisme de Magee.....	17
Figure I.15. Représentation schématique de la plasticité de transformation due au mécanisme de Greenwood et Johnson.....	17

Chapitre II Tribologie et usure

Figure II.1. Principaux éléments du contact tribologique.....	20
Figure II.2. Synoptique général d'un système tribologique.....	21
Figure II.3. Structure microscopique de la surface d'un métal usiné.....	22

Liste des figures

Figure II.4. Représentation schématique de l'influence de la charge.....	23
Figure II.5. Détermination du coefficient de frottement.....	24
Figure II.6. Endommagement d'un corps frottant.....	26
Figure II.7. Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive à deux et trois corps.....	28
Figure II.8. Aspect des dégâts des pièces endommagées par corrosion de contact.....	30
Figure II.9. Pièces usées par cavitation.....	31

Chapitre III Discussion des résultats

Figure III.1: Dimensionnement des disques.....	35
Figure III.2: Dimensionnement des pions.....	36
Figure III.3. Vue du tribomètre (Pion/Disque).....	37
Figure III.4. Polisseuse à deux disques.....	39
Figure III.5. Schéma de principe du microscope optique.....	41
Figure III.6. Microscope électronique à balayage.....	42
Figure III.7. Machine de mesure de la micro-dureté.....	43
Figure III.8. Le côté profil du pion utilisé.....	44
Figure III.9. Microstructure de référence de l'acier inoxydable 304L avant usure. (A)Observation au MEB. (B)Observation au microscope optique.....	45
Figure III.10. Microstructure d'un échantillon utilisé sous une charge de 45.16 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s. (grossissement x400).....	45
Figure III.11. Microstructure d'un échantillon utilisé sous une charge de 67.74 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s. (grossissement x400).....	46
Figure III.12. Microstructure d'un échantillon utilisé sous une charge de 90.32 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s. (grossissement x400).....	48
Figure III.13. Observation au MEB d'un échantillon utilisé sous une charge de 45.16 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.....	49
Figure III.14. Observation au MEB d'un échantillon utilisé sous une charge de 67.74 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.....	49
Figure III.15. Observation au MEB d'un échantillon utilisé sous une charge de 90.32 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.....	50
Figure III.16. Evolution de la microdureté en fonction de la charge appliquée pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.....	51

Liste des figures

Figure III.17. Evolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.....	52
Figure III.18. Schéma représentatif d'une matrice de pixels.....	54
Figure III.19. Micrographie de l'échantillon utilisé sous une charge de 45.16 N, a) image initiale non traitée, b) image transformée en nuances de gris, c) image finale binaire.....	55
Figure III.20. Micrographie de l'échantillon utilisé sous une charge de 67.74N, a) image initiale non traitée, b) image transformée en nuances de gris, c) image finale binaire.....	56
Figure III.21. Micrographie de l'échantillon utilisé sous une charge de 90.32N, a) image initiale non traitée, b) image transformée en nuances de gris, c) image finale binaire.....	57
Figure III.22. Organigramme du programme de traitement d'image.....	58
Figure III.23. Taux de la phase α' en fonction de la charge appliquée lors des essais d'usure.....	59

Liste des tableaux

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier inoxydable austénitique 304L en pourcentage massique.....	36
Tableau III.2. Les paramètres utilisés pendant l'attaque électrolytique.....	40

Nomenclature

❖ Symboles

δ : Ferrite

γ : Austénite

α' : Martensite

ε : Martensite

E : Module de Young

ν : Coefficient de poisson

R_e : Limite d'élasticité

R_m : Limite à la rupture

A% : Allongement

CFC : Cubique à Faces centrés.

CC : Cubique Centré

TC : Tétraogonale centré

HC : Hexagonale compacte

M_s : Martensit Start

M_{d30} : Température pour laquelle une déformation vraie de 30% provoque la formation de 50% de martensite en volume

ε^{pt} : Déformation plastique

σ : Contrainte appliquée

T : La force tangentielle parallèle au plan tangent commun à A et B.

f : Le coefficient de frottement de glissement.

Q : La force appliquée.

H : Longueur

R : Rayon de courbure.

α : L'angle de contact

λ : L'acuité de l'abrasif (ou du corps antagoniste)

T_t : La température de contact.

R_o : La constante universelle des gaz parfaits,

Q^* : L'énergie d'activation du processus tribochimique.

F_t : La force tangentielle

F_n : L'effort normal

Nomenclature

Hv : Dureté Vickers

RGB : Rouge, Green, Blue

RVB : Rouge Vert-Bleu

❖ *Désignations*

Fe : Fer

Cr : Chrome

Ni : Nickel

Cr éq : Chrome équivalent

Ni éq : Nickel équivalent

Si : Silicium

Mo : Molybdène

Al : Aluminium

Nb : Niobium

Ti : Titan

W : Tungstène

Cu : Cuivre

C : Carbone

Mn : Manganèse

Co : Cobalt

H : Hydrogène

O : Oxygène

❖ *Abréviations*

TRIP : Transformation Induced Plasticity

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Les aciers inoxydables austénitiques instables sont de bons candidats pour la réalisation de pièces de structure dans l'automobile. On considère en général, qu'une réduction de 10% de la masse du véhicule entraîne une réduction de 5% de la consommation, Dans ce cas les aciers inoxydables austénitiques instables, par leur effet TRIP, sont les plus favorables grâce à leurs caractéristiques importantes.

Ils sont très bien adaptés à ce genre d'utilisation, notamment par leur bonne absorption d'énergie lors d'un choc, leur résistance à la corrosion et leur ductilité.

Aussi, il est très connu que les aciers inoxydables sont des matériaux de choix pour diverses applications, par exemple dans les domaines alimentaires, ménagers et d'autres domaines industriels.

Ces matériaux ont une microstructure essentiellement austénitique, donc métastable. Deux paramètres associés peuvent la déstabiliser : la température et la déformation plastique. Le frottement réel entre deux corps est généralement mal défini et provoque de l'usure et une déformation plastique, Leur étude reste complexe étant donnée l'interactivité des différents paramètres.

L'usure des matériaux en général est un processus compliqué, étroitement lié aux facteurs mécaniques, thermiques et physico-chimiques. Au cours de la mise en service des pièces soumises aux frottements il est avant tout un problème d'interface, car mis à part quelques cas spéciaux, le frottement dépendra beaucoup plus des propriétés des couches superficielles forme, sans oublier que les frottements engendrent des évolutions de la microstructure (dislocations, grossissement des carbures, transformations microstructurales...) et sous des sollicitations, la surface et la sous surface de contact des pièces s'endommagent. C'est pourquoi la maîtrise du frottement est souvent la clé de la rentabilité d'un procédé de mise en forme.

La compréhension de l'évolution du comportement des surfaces et des sous surfaces est donc importante pour la prédiction de la durée de vie des outillages et pour assurer la géométrie et les côtes de la pièce tout au long de la production. On vise ainsi à améliorer la résistance à l'usure des zones les plus sollicitées de la pièce tout en conservant une bonne résistance aux chocs et à la fatigue.

L'objectif de ce travail est de déterminer le taux de martensite engendré par l'usure, Ce mémoire est organisé en trois chapitres

Le premier chapitre est une analyse bibliographique, il est consacré à l'étude des généralités sur des aciers inoxydable. Il rappelle les différents points sur les aciers inoxydables.

Introduction générale

Le second chapitre s'articule autour de la tribologie du frottement. Il présente de multiples aspects du frottement et de l'usure, aussi les différents aspects et mécanismes d'usure.

Le troisième chapitre sera développé à partir des résultats expérimentaux obtenus. Dans un premier temps, ce chapitre est consacré à dévoiler les moyens expérimentaux utilisés, puis il présente et discute les différents résultats obtenus après l'usure. Principalement, nos travaux se sont orientés vers la quantification de la martensite formée des transformations de phases après les essais. Cette quantification sera réalisée par un programme de traitement d'image développé sous Matlab.

Une conclusion générale clôt ce mémoire en faisant ressortir les principaux résultats de l'étude.

CHAPITRE I
Généralités sur les
aciers inoxydables

I. Les aciers inoxydables

1.1. Introduction

Dans ce chapitre bibliographique, nous rappelons des généralités sur les aciers inoxydables, et le comportement de ces derniers entièrement ou partiellement austénitiques instables, comme nous évoquons aussi les principales propriétés de ces aciers. Par la suite, nous présentons les mécanismes généraux établis selon lesquels la transformation martensitique peut être effectuée, ainsi que les conséquences de cette transformation.

1.2. Définition

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer, ils contiennent des éléments d'addition comme le carbone, le nickel, le molybdène, etc. Pour éviter la précipitation des carbures de chrome ils ont une faible teneur en carbone ($\%C < 1,2 \%$), et une teneur en chrome suffisante ($\%Cr > 10,5 \%$) pour passiver la surface de la pièce par formation d'une couche de Cr_2O_3 , cette couche protectrice d'oxyde de chrome procure une excellente résistance à la corrosion. A cette propriété fondamentale, s'ajoutent des propriétés mécaniques très intéressantes comme la ténacité et la ductilité [1].

1.3. Les éléments d'alliage

En plus des éléments principaux que contiennent les aciers inoxydables, à savoir le Fer, le Chrome et le Nickel d'autres éléments y sont ajoutés comme éléments d'addition, ces derniers ont une grande influence sur leur structure cristallographique, ils sont classés en deux grandes familles:

1.3.1. Les éléments alphas

Tel que le chrome, le molybdène, le titane, le silicium, et le niobium favorisent la formation et la stabilité d'une structure cristallographique cubique centrée comme la ferrite δ [2].

1.3.2. Les éléments gamma

Tel que le nickel, le manganèse, le carbone et l'azote favorisent la formation d'une structure cristallographique cubique à faces centrées comme l'austénite γ au détriment de la ferrite. [2]

1.4. Evaluation de la quantité alpha et gamma

Il existe des phases qui dépendent des pourcentages relatifs en éléments alphas ou gamma et des conditions de refroidissement, Des relations pour le calcul du pourcentage du chrome ($\%Cr \text{ \acute{e}q}$) et du nickel ($\%Ni \text{ \acute{e}q}$) en fonction d'autres éléments d'addition permettent de déterminer à température ambiante la

structure cristallographique d'un acier inoxydable à l'aide du diagramme de la figure (I.1) qui présente les domaines de l'austénite, de la ferrite ou de la martensite d'un alliage Fe-Cr-Ni.

Ces équivalents sont donnés par les formules suivantes :

$$[\text{Cr } \text{éq}] = [\% \text{Cr}] + 2[\% \text{Si}] + 1,5 [\% \text{Mo}] + 5,5 [\% \text{Al}] + 1,75 [\% \text{Nb}] + 1,5 [\% \text{Ti}] + 0,75 [\% \text{W}]$$

.....(1)

$$[\text{Ni } \text{éq}] = [\% \text{Ni}] + [\% \text{Co}] + 0,5 [\% \text{Mn}] + 30 [\% \text{C}] + 0,3 [\% \text{Cu}] + 25 [\% \text{N}]$$

.....(2)

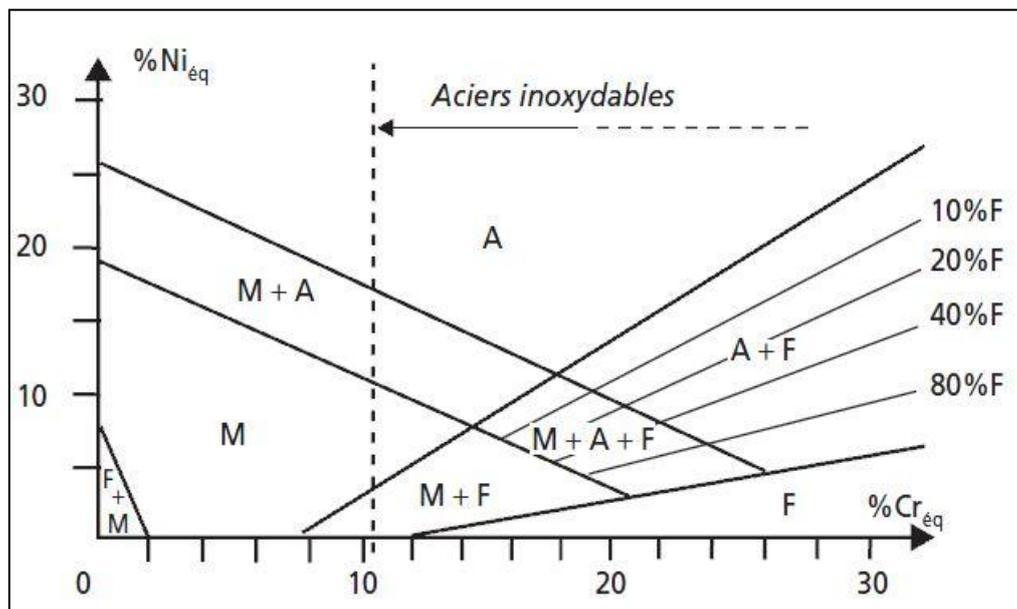


Figure I.1. Diagramme de Schaeffler [1]

(F) Aciers ferriques

(M) Aciers martensitiques

(A) Aciers austénitiques

(A+F) Aciers austéno-ferritiques (Duplex)

1.5. Les principaux éléments d'addition et leur Rôle

a) Le chrome

À lui seul que l'on doit la résistance des aciers inoxydables aux agents oxydants. Un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 10,5% en masse de chrome et moins de 1,2% de carbone.

b) Le nickel

C'est un élément gammagène, favorise la formation de structures homogènes de type austénitique et améliore les propriétés de la couche passive. Il apporte les propriétés de ductilité, mais à éviter soigneusement dans le domaine du frottement.

c) **Le manganèse**

Est un substitut du nickel, il renforce ainsi la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides.

d) **Le carbone**

La teneur en carbone est limitée à un maximum de 1,2 % afin d'éviter la formation de carbures.

e) **Le molybdène**

Il accroît la stabilité des films de passivation, également pour l'essentiel des métaux relativement nobles comme le titane et le cuivre améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides.

1.6. Etude des aciers inoxydables

1.6.1. Diagramme Fe-C

Le diagramme Fe-C est utilisé pour l'étude des phases dans les aciers et fontes blanches. Le Carbone favorise la formation de l'austénite. Sa solubilité maximale dans l'austénite à la température du palier eutectique (~ 1150 °C) est de 2.1%, elle est de 0.04% à la température du palier eutectoïde (727°C) et de 0.15% dans la ferrite δ à la température du palier péritectique (Figure I.2).

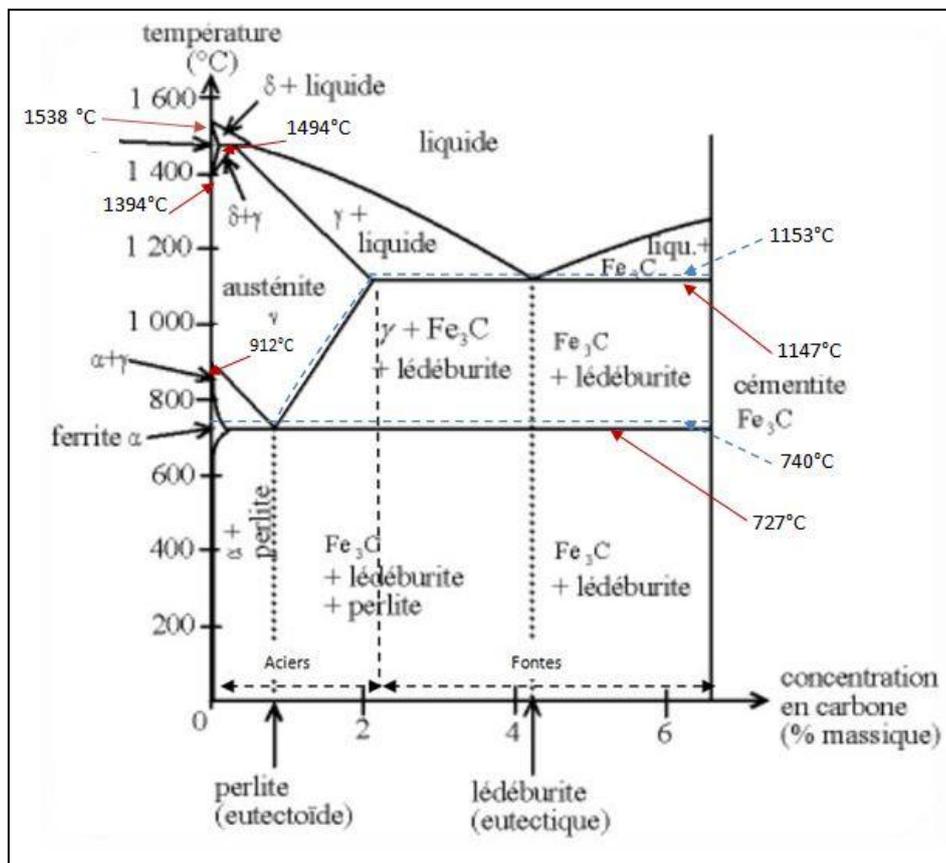


Figure I.2. Diagramme binaire fer-carbone.

1.6.2. Diagramme Fe-Cr

Le système Fe-Cr est la base de tous les aciers inoxydables (figure I.3).

On remarque que le domaine γ est réduit à une zone fermée appelée : boucle γ . Les éléments d'alliage et leurs proportions peuvent modifier le diagramme d'équilibre Fer-Carbone, comme par exemple le chrome étant un élément alphagène avec sa structure cristallographique, a tendance à rétrécir la boucle avec un maximum de solubilité à 12 % Cr dans l'austénite à 1000° C. L'austénite ne se présente qu'entre 830° et 1390°.

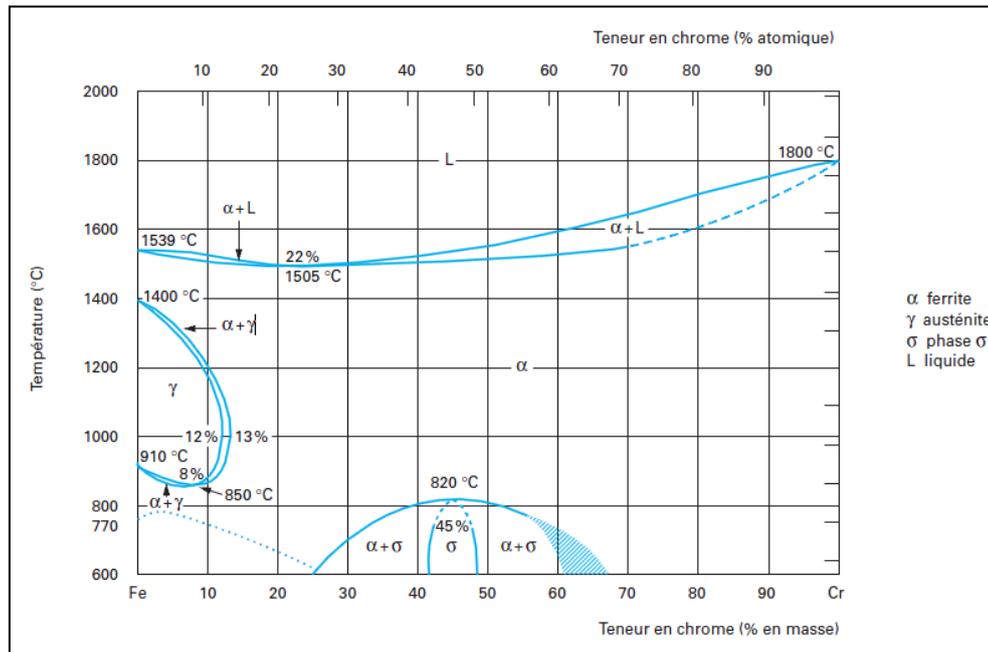


Figure I.3. Diagramme binaire Fe-Cr [3].

- $0 < \%Cr < 13\%$
Ces alliages ont la possibilité de subir des traitements thermiques pour but d'austénitisation totale ou partielle, suivi d'un refroidissement afin de donner des structures martensitique.
- $13\% < \%Cr < 100\%$
Dans le cas de ces alliages, leur structure est entièrement ferritique. Ils sont sensibles au grossissement de grain du au chauffage.
Pour une composition entre 45% à 55% en Cr, en dessous de 820°C, il y a apparition d'une phase intermédiaire sigma fragilisante [3].

1.6.3. Diagramme Fe-Ni

Contrairement au Chrome, le Nickel étant de structure Cubique à Faces Centrées favorise la formation d'une solution solide austénitique. Le diagramme de la figure (I.4) montre que le domaine d'existence de la phase de γ augmente avec la teneur en nickel à

température ambiante, tandis que pour des teneurs faibles (< 5 à 6%) la structure peut être ferritique. Entre ces deux teneurs, la structure est biphasée austéno-ferritique.

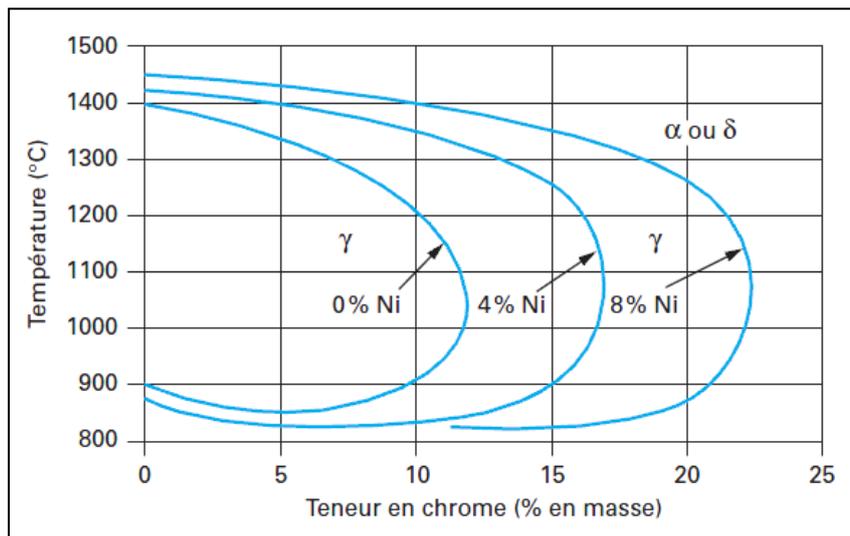


Figure I.4. Coupe du diagramme de phase ternaire Fe-Cr-Ni montrant l'évolution du domaine austénitique γ en fonction de la teneur en nickel. (Influence du nickel sur l'extension de la boucle γ) [3].

1.6.4. Système Fe-Cr-Ni

La figure (I.5) présente la section du système ternaire Fe-Cr-Ni à 650°C. Ce diagramme d'équilibre des phases ne peut pas être toujours utilisé pour prédire les structures qui pourraient être en présence dans les alliages. L'addition du nickel au système Fe-Cr élargit le domaine d'existence de la phase austénitique γ et augmente sa stabilité à la température ambiante.

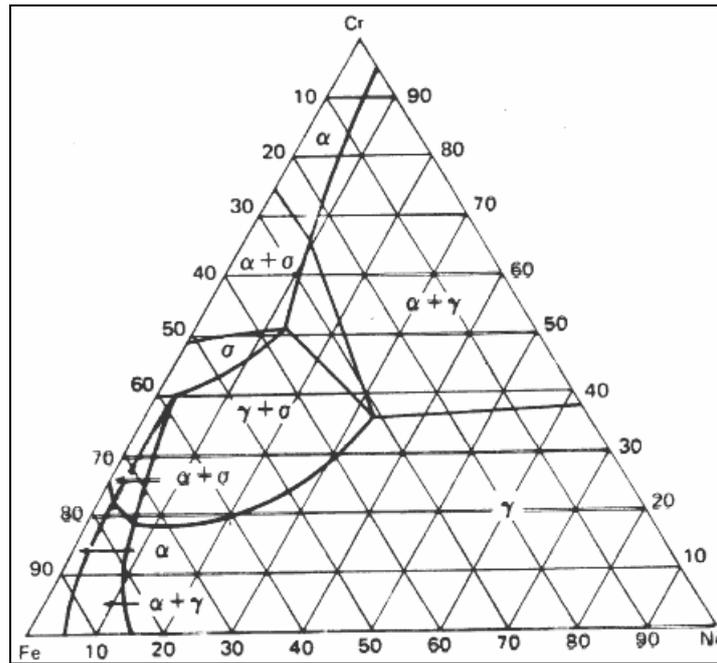


Figure I.5. Sections des diagrammes ternaires Fe-Cr-Ni à 650°C

1.7. Classification des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont classés en quatre grandes familles en fonction de leur composition et de leur structure cristallographique. On distingue les aciers ferritiques (Figure I.6.a), les aciers martensitiques (Figure I.6.b), les aciers austénitiques (Figure I.6.c) et les aciers austéno-ferritiques (Figure I.6.d).

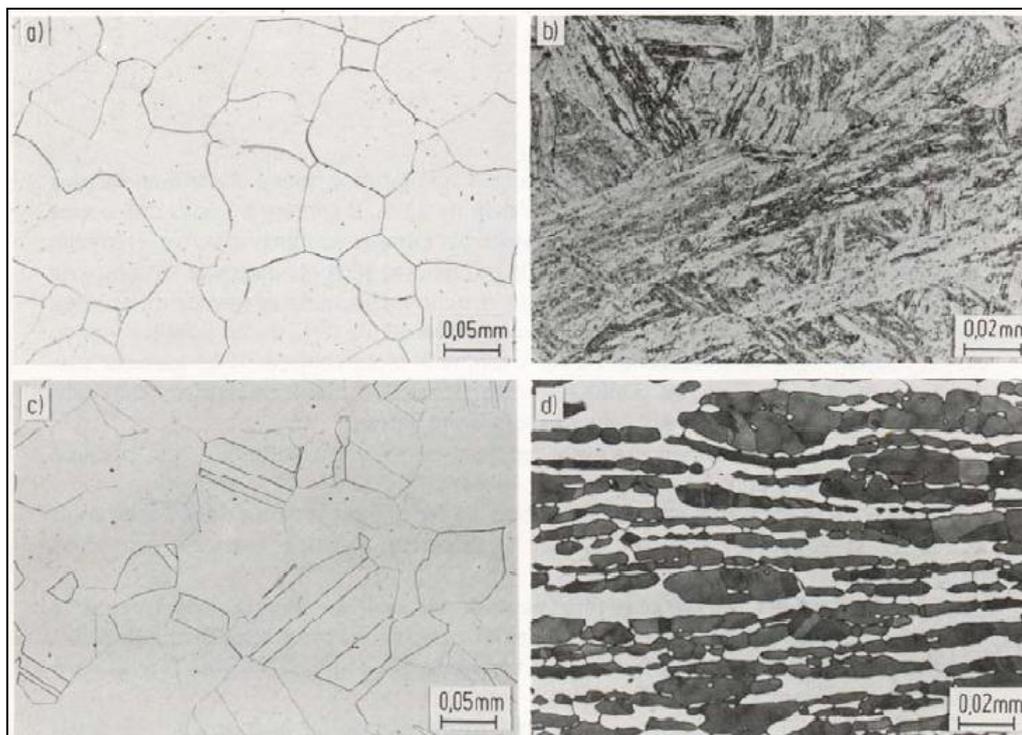


Figure I.6. Microstructures des aciers inoxydables ferritique (a), martensitique (b), austénitique (c), et austéno-ferritique (d) [4].

1.7.1. Les aciers inoxydables ferritiques

Les aciers ferritiques possèdent une structure cubique centrée (cc), ils ne subissant pas de transformation austénitique $\alpha \rightarrow \gamma$. Ces aciers ne prennent pas la trempe. Ils sont appelés ferritiques parce que leur structure cristalline est la même que celle du fer à température ambiante [5].

- ✓ Les aciers ferritiques sont magnétiques à température ambiante,
- ✓ Ils sont moyennement ductiles ($A\% \approx 18\%$).
- ✓ Le principal élément d'addition est le chrome,
- ✓ Leur limite d'élasticité est de l'ordre de 300 MPa.

1.7.2. Aciers inoxydables martensitiques

Ces aciers sont magnétiques. La composition de l'acier inoxydable martensitique, est similaire à celle du groupe ferritique, mais contient un équilibre de C et Ni contre Cr et Mo. Ces aciers peuvent prendre la trempe et le traitement thermique (trempe, revenu, recuit). Ils ont une très bonne trempabilité en général,

Les aciers martensitiques sont en général moins résistants à la corrosion que les aciers ferritiques.

- ✓ Ces aciers sont utilisés à l'état trempé et revenu,
- ✓ Limite d'élasticité est 100 MPa
- ✓ Taux d'allongement $A=10\%$.

Exemple d'utilisation : lames de couteaux de cuisine.

1.7.3. Aciers inoxydables austénitiques

Ces aciers ont une structure cubique à faces centrées à température ambiante. Cette structure est amagnétique et peut être conservée à température ambiante grâce à des éléments d'alliage approprié.

Les aciers austénitiques contiennent suffisamment de chrome pour offrir une résistance à la corrosion et du nickel pour assurer la structure austénitique à la température ambiante, et ils peuvent augmenter leurs propriétés mécaniques par écrouissage.

- ✓ La composition de base des aciers austénitiques est 18% de chrome et 8% de Nickel (acier inoxydable 18.8).
- ✓ Ils sont très résistants à la corrosion,
- ✓ Ils sont aussi très ductiles ($A\% \leq 45\%$),
- ✓ Ils présentent une ductilité et ténacité exceptionnelle,
- ✓ Leur limite d'élasticité est comprise entre 350 et 400 MPa,
- ✓ Transformation partielle de l'austénite en martensite.

1.7.4. Aciers inoxydables austéno-ferritiques appelés aussi aciers duplex

Une structure biphasée composée de ferrite complétée de 40 à 60 % d'austénite. Ils sont aussi désignés comme appartenant à la famille des aciers austéno-ferritiques. Ils sont utilisés à des températures n'excédant pas 300°C; au-dessus de 20 %Cr éq, il y a apparition d'une phase fragilisante.

Le soudage des aciers inoxydables doit s'effectuer à l'abri de l'oxygène, sous peine de formation d'oxyde de chrome, qui précipite dans le cordon de soudure [1].

1.8. Caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables

Evaluer l'aptitude à la mise en forme de tout matériau implique de comprendre ses caractéristiques mécaniques et physique.

De manière générale, tous les aciers ont les caractéristiques suivantes :

- module de Young : $E \simeq 200 \text{ GPa}$;
- module de Poisson : $\nu \simeq 0,3$.

Ces propriétés sont très peu dépendantes de la composition chimique, mais dépendent de la structure cristalline :

Aciers ferritiques, martensitiques, bainitiques

- module de Young : $E \simeq 210 \text{ GPa}$;
- module de Poisson : $\nu \simeq 0,3$;

Aciers austénitiques

- module de Young : $E \simeq 193 \text{ GPa}$;
- module de Poisson : $\nu \simeq 0,27$.

La limite d'élasticité R_e , la limite à la rupture R_m et l'allongement à la rupture $A\%$ dépendent, outre de la composition chimique, des traitements thermomécaniques et donc de l'état de livraison : moulé, écroui (laminé, tréfilé, forgé), recuit et trempé [7].

2. Transformation martensitique

2.1. La phase martensitique

La structure de la phase martensitique est une structure extrêmement fine résulte d'une transformation de l'austénite, phase mère, qui est généralement stable à haute température, en martensite, phase fille [6]. Le terme "martensite" provient du métallurgiste allemand Adolf Martens. La transformation martensitique est une transformation de phase à l'état solide qui peut se résumer en ces points :

- Transformation sans diffusion (sans déplacement d'atomes). Il n'y a pas modification de la composition chimique du matériau.
- Déformation du réseau cristallin qui conduit à un changement de forme macroscopique caractérisé par une faible variation de volume et un cisaillement important selon un plan et une direction bien définie (figure I.7).
- Différentes variantes d'orientations équivalentes sont formées, afin de minimiser l'énergie d'interaction entre la martensite formée et l'austénite encore présente.

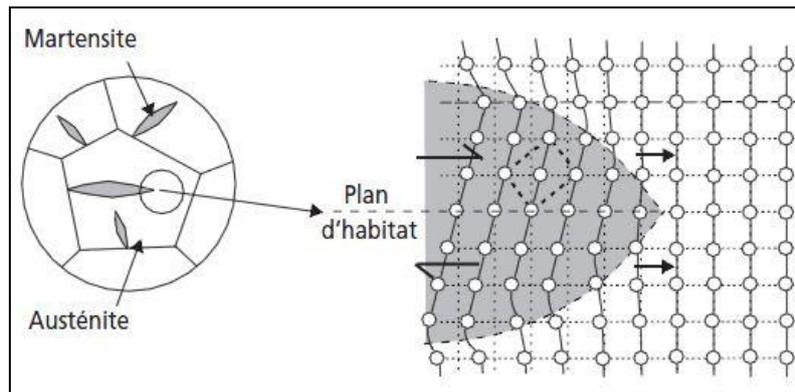


Figure I.7. Représentation schématique simplifiée du mécanisme de la transformation martensitique du fer [1].

2.2. Structure cristallographique

2.2.1. De l'austénite

La structure cristalline de l'austénite, solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ , est une structure cubique à faces centrées (CFC). Les atomes de carbone sont situés dans les sites interstitiels octaédriques du type $1/2, 1/2, 1/2$ (centre de la maille) et $0, 0, 1/2$ (milieu de chaque arête) [16], représentés sur la figure (I.8)

2.2.2. De la martensite

La martensite est une solution sursaturée en carbone dans le réseau du fer α . Cette sursaturation en carbone provoque une distorsion du réseau de la maille de la martensite α' dépendent de sa teneur en carbone [8]. La teneur en carbone augmente la dureté de la martensite [7].

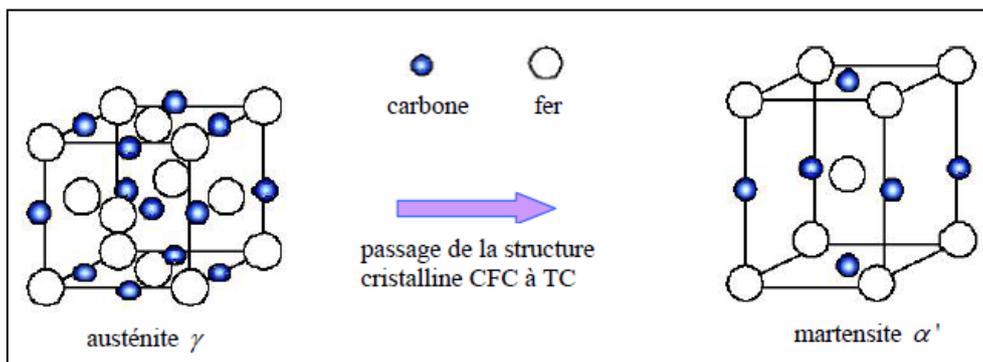


Figure I.8. Structures de l'austénite et de la martensite α' dans les aciers [6].

Deux phases martensitiques sont possibles :

➤ La martensite α'

Elle possède une structure tétragonale (ou quadratique) centrée, elle se trouve dans les aciers TRIP industriels. Elle a une forte énergie de fautes d'empilement.

Le réseau cristallin quadratique centré est caractérisé par les paramètres a et c , qui ne dépendent que de la teneur en carbone de l'alliage [9], [10].

➤ La martensite ϵ

De structure hexagonale compacte, ce type de martensite peut se présenter dans les alliages fortement alliés, les aciers inoxydables et certains alliages Fe-Mn [9], [10].

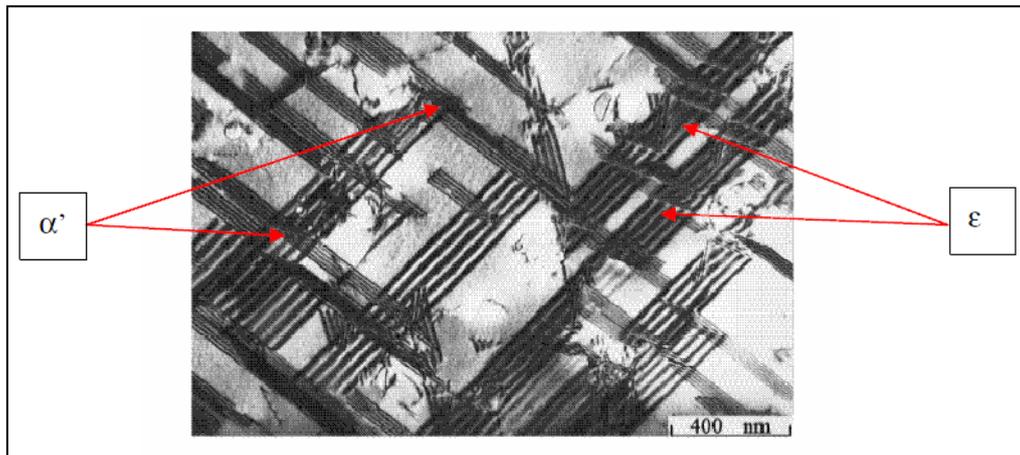


Figure I.9. Mécanisme de déformation d'un acier austénitique à basse énergie d'empilement [11], [12].

2.3. La morphologie de la martensite

Des études et des observations microscopiques de la martensite nous révèlent deux principaux types de morphologie de la martensite [13]: sous forme de plaquettes ou sous forme de lattes. Ces deux morphologies dépendent de la teneur en carbone de l'acier [14].

La Figure (I.10) présente les domaines d'existence des deux morphologies de la martensite. De ce fait, la martensite en lattes est observée pour un acier à faible teneur en carbone [15], ne dépassant pas les 0,6%. Pour une teneur en carbone supérieure à 1%, seule la martensite en plaquettes est présente.

Enfin, pour des teneurs en carbone comprises entre 0,6% et 1%, les deux types de morphologie coexistent [17].

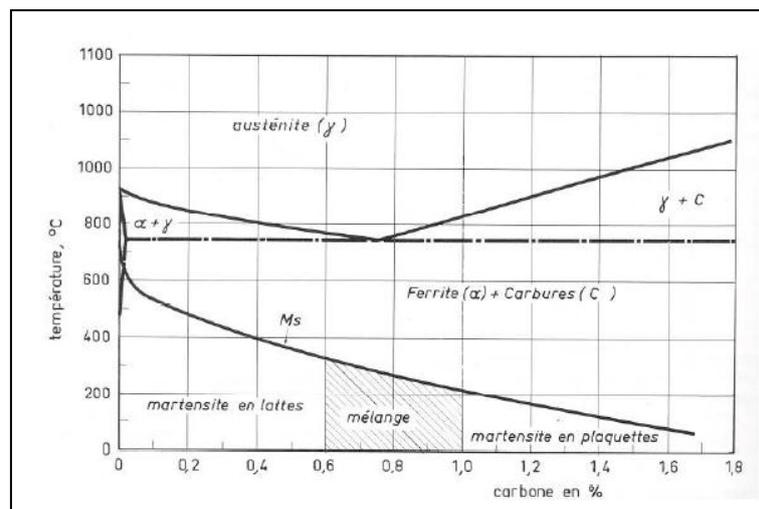


Figure I.10. Morphologie de la martensite en fonction de la teneur en carbone de l'acier [14]

2.3.1. *Martensite en plaquettes*

Appelée aussi la martensite lenticulaire, possède une forme aplatie quasi bidimensionnelle, elle résulte de la transformation de phase ou lors de la déformation plastique [18].

Chaque plaquette a une microstructure constituée de fines macles parallèles (Figure I.11) [9], [10]. La croissance des plaquettes se développe dans le grain d'austénite suivant des directions définies, qui sont parallèles aux plans d'accolement et limitées par les joints de grains [18].

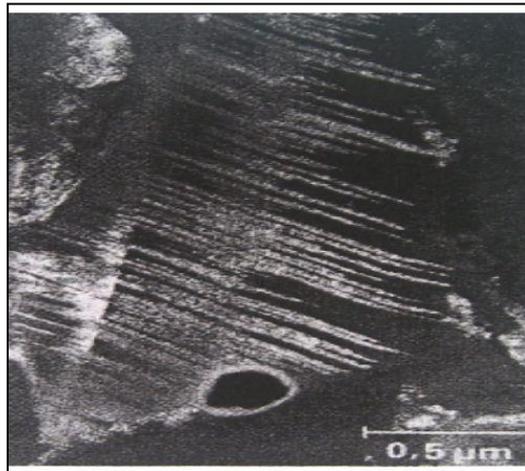


Figure I.11. Des lignes de macles qui constituent les plaquettes de martensite observées par la microscopie électronique [9].

2.3.2. *Martensite en lattes*

Elle est reliée à la formation de défauts d'empilement et aux maclages répétés [19]. La Figure (I.12) présente les microstructures observées sur un acier au carbone d'une structure martensitique en lattes. Cette dernière se caractérise par une structure constituée de paquets de lattes grossièrement parallèles. A l'approche d'un joint de grains, la croissance de ces lattes est bloquée.

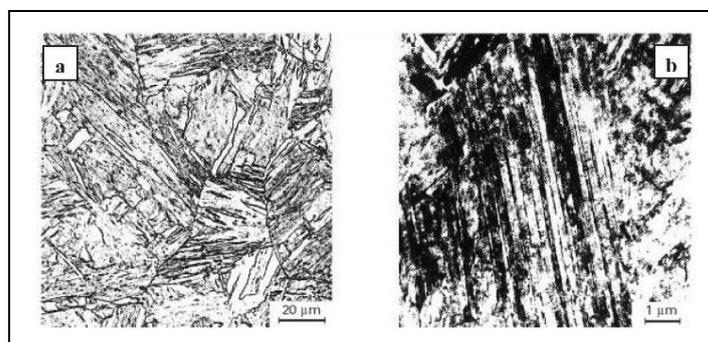


Figure I.12. Morphologie de la martensite en lattes a) observation optique – b) observation MET [20].

3. Les aciers TRIP

3.1. Instabilité de l'austénite dans les aciers TRIP

Comme mentionné précédemment, l'austénite métastable en acier inoxydable est susceptible de se déformer ce phénomène appelé transformation martensitique induite.

A température ambiante, les aciers inoxydables austénitiques ont une structure d'austénite γ . Elle peut se transformer partiellement en une structure cubique centrée (cc) ou légèrement quadratique ferromagnétique appelée martensite α' ou bien en une structure hexagonale compacte (HC) paramagnétique appelée martensite ε [21].

La martensite α' peut se produire directement de la phase mère ($\gamma \rightarrow \alpha'$) par un mécanisme de cisaillement local [21], [22]. Les atomes de fer se déplacent sur quelques distances interatomiques parallèlement à un plan cristallographique appelé plan d'accolement vers des positions voisines plus stables à basse température (Figure I.13).

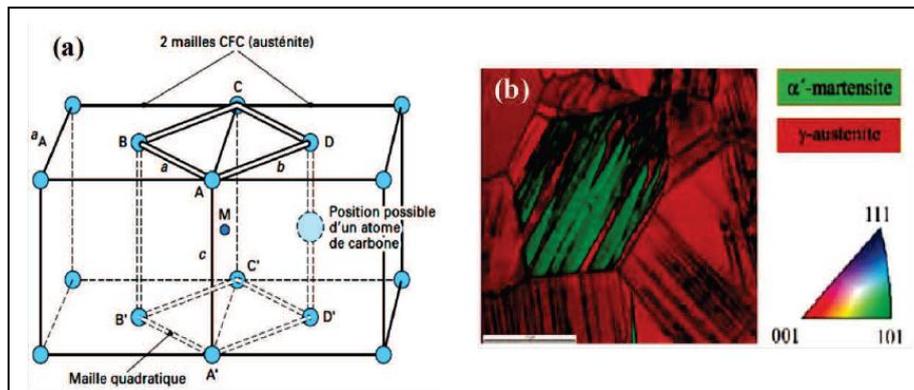


Figure I.13. Formation de la martensite α' a partir de structure cubique face centrée (a) présentation schématique du mécanisme [21] et (b) carte EBSD représentant la nucléation de la martensite α' dans la phase mère γ [23].

Cette transformation adopte la forme de bandes parallèles et peut être aussi indirecte en passant par une structure intermédiaire, la martensite ε ($\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$). Le mécanisme de la formation de la martensite ε est différent de celui de la martensite α' . La formation de la martensite ε est liée directement à l'apparition des fautes d'empilements et des maclages répétés dès l'entrée en déformation [24], [26].

3.2. Mécanisme de formation de la martensite dans les aciers TRIP

Comme mentionné auparavant, les aciers inoxydables austénitiques ont une structure métastable à température ambiante et peuvent subir une transformation martensitique soit par refroidissement à basse température soit par déformation plastique.

3.2.1. Transformations au cours de refroidissement

La structure austénitique dans les aciers inoxydables est parfaitement stable à haute température. Lors d'un refroidissement, on définit une température M_s (Martensite Start) en dessous de laquelle l'austénite peut se transformer en martensite ε ou α' qui peuvent aussi se former simultanément [27].

Il faut au préalable chauffer et maintenir l'acier dans le domaine d'existence de la phase austénitique. Puis il faut que l'acier soit refroidi avec une vitesse, de l'ordre de 100-1000°C/s pour un acier au carbone [28].

Après un refroidissement rapide, à partir de la température M_s , on distingue les transformations par diffusion, les transformations de l'austénite (structure cubique à faces centrées) en martensite α (structure cubique centrée) [29].

Nous savons qu'en refroidissement lent, les transformations sont gouvernées par la diffusion de carbone et sont couramment appelées « transformations diffusives ». [30].

Il est cependant important de souligner que durant les transformations, le mouvement coordonné d'atomes est tel que le déplacement d'un atome par rapport à ses voisins reste inférieur à la distance inter-atomique [31].

3.2.2. Transformation martensitique par déformation plastique

La transformation de l'austénite en martensite par déformation plastique, se produit dans les aciers inoxydables austénitiques pour lesquels l'énergie de faute d'empilement est faible, il se forme de la martensite α' de structure cubique centrée, et/ou formation de martensite ϵ de structure hexagonale compacte [21]. Cette transformation se fait suivant l'un des trois schémas suivants : $\gamma \rightarrow \alpha'$; $\gamma \rightarrow \epsilon$; ou $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$.

La transformation martensitique de l'austénite par déformation est souvent caractérisée par un critère de température Md_{30} : température pour laquelle une déformation vraie de 30% provoque la formation de 50% de martensite en volume. D'après Angel cité par : Cunat J-P [32] la température Md_{30} peut être estimée par la formule suivante :

$$Md_{30} = 413 - 462(\% C + \% N) - 9,2(\% Si) - 8,1(\% Mn) - 13,7(\% Cr) - 9,5(\% Ni) - 18,5(\% Mo) \dots \dots \dots (3)$$

Pour un acier inoxydable contenant 18% de chrome et 10% de nickel, la température Md_{30} est de l'ordre de 50°C. La nuance étudiée 304 L est donc sensible à la transformation martensitique par déformation plastique sous chargement à température ambiante.

4. Etude de la plasticité de transformation (TRIP)

Lors d'une transformation métallurgique, certaines régions du matériau, voient leurs volumes réformés, ce changement d'état du matériau est dû aux contraintes internes qui résultent de la cohabitation entre les régions du matériau nouvellement formé et les régions voisines. Cet état de contrainte interne diffère d'un point à un autre de la structure.

Dans la plupart des cas, cette différence conduit au moins à la plastification du matériau, parfois même à la plastification des régions transformées elles-mêmes. Si une contrainte extérieure est appliquée, le champ de contrainte interne peut être orienté induisant une plastification, et une déformation plastique macroscopique est alors observée. C'est cet effet mécanique associé aux transformations de phases qui est appelé Plasticité de Transformation [33].

La plasticité de transformation, comparé à la plasticité classique présente deux particularités macroscopiques [34]:

- Elle peut se produire à un niveau de contrainte appliquée pour lequel, sans transformation, aucune déformation irréversible significative n'est générée.
- Sous une contrainte appliquée constante, la plasticité de transformation se développe au moment où la transformation métallurgique se développe.

4.1. Etude microscopique de l'effet TRIP

Dans les aciers à effet TRIP, la plasticité induite par transformation correspond à un changement de phase particulier qui se produit à l'état solide et qui est à l'origine des propriétés remarquables des matériaux dans lesquels elle se produit.

La transformation martensitique se produit sans aucun phénomène de diffusion atomique, se fait par le déplacement des atomes de leurs sites dans la phase mère vers des sites voisins qui définissent la configuration de la nouvelle phase. [35], Il en résulte une déformation macroscopique sous la forme d'un cisaillement qui se compense par une déformation supplémentaire et la plastification de l'austénite. Cette transformation est caractérisée par un changement de volume et par un changement de forme laissant un plan invariant, et par une énergie de déformation élastique [36].

D'après Mitter [25] la plasticité de transformation est : « un accroissement significatif de la plasticité pendant une transformation de phase pour une contrainte externe appliquée, dont la contrainte équivalente est inférieure à la limite d'élasticité du matériau. ». Cette plasticité de transformation est généralement décrite par l'action simultanée de deux phénomènes distincts.

4.2. Etude macroscopique de l'effet TRIP

Deux mécanismes sont responsables de ce phénomène de plasticité : le mécanisme de Magee, relatif à la transformation Martensitique, et le mécanisme de Greenwood-Johnson qui est, quand à lui, relatif aux transformations par diffusion et aux différences entre les caractéristiques des différentes phases.

4.2.1. Mécanisme de Magee

Selon Magee [37], la plasticité de transformation est due à une orientation de phases, nouvellement formées, sous l'effet d'une contrainte appliquée (transformation de l'austénite en martensite). Durant cette transformation, la martensite se développe sous la forme de plaquettes générant des contraintes de cisaillement élevées dans la phase austénitique. En absence de contrainte appliquée, les plaquettes s'orientent aléatoirement et ont un effet global (macroscopique) isotrope. Par contre, l'application d'une contrainte externe favorise l'orientation des plaquettes suivant une même direction, dans ce cas, la résultante des contraintes de cisaillement ne sera donc pas nulle, ce qui va engendrer une déformation macroscopique irréversible dans la direction de la contrainte effective appliquée.

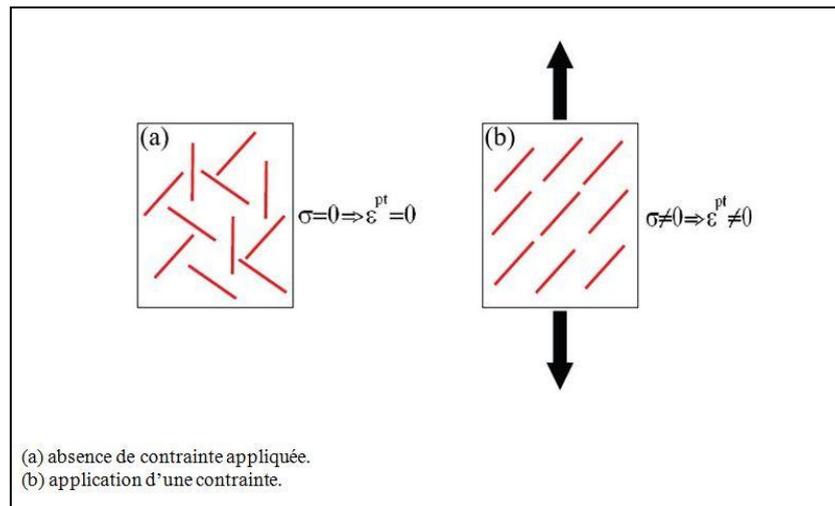


Figure I.14. Représentation schématique de la plasticité de transformation due au mécanisme de Magee [38].

4.2.2. Mécanisme de Greenwood-Johnson

D'après Greenwood, G. et Johnson [39], la plasticité de transformation est due à la différence de compacité entre les phases parentes et produites. En effet, la phase austénitique est une structure cubique à faces centrées, alors que les structures ferritiques sont des structures cubiques centrées, la différence de compacité entre ces deux structures induit un changement de volume lors de la transformation.

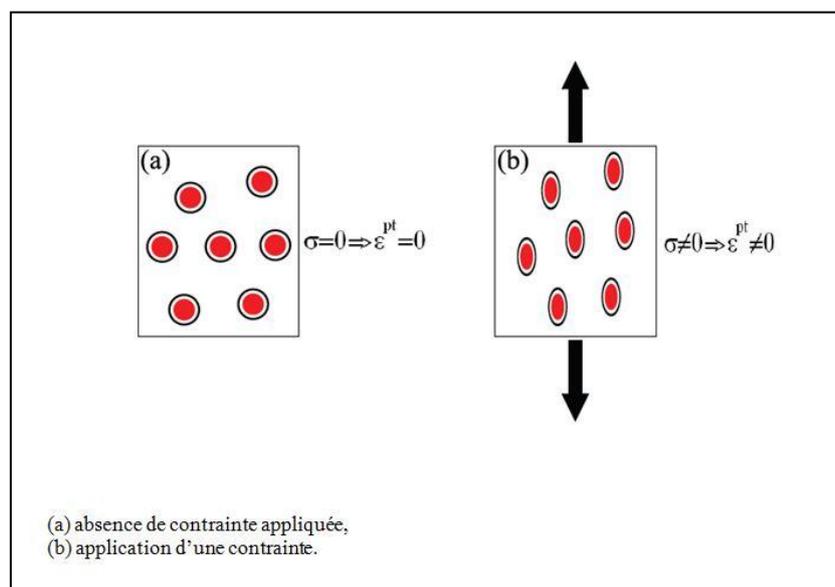


Figure I.15. Représentation schématique de la plasticité de transformation due au mécanisme de Greenwood et Johnson [38].

5. Caractéristique des aciers TRIP

L'une des principales caractéristiques des aciers à effet TRIP est leur grande capacité d'écroutissage, laquelle résulte de la compétition de deux mécanismes. Le premier correspond à la dureté produite par la transformation martensitique et ses caractéristiques morphologiques et constitue une autre source de stockage des dislocations. Le second caractérise les obstacles créés par les différentes variantes ou domaines de martensite, lesquels peuvent jouer un rôle significatif dans la réduction du libre parcours moyen des dislocations.

6. Conclusion

Cette partie bibliographique nous a permis d'approfondir nos connaissances sur une nouvelle catégorie de matériaux qui est les aciers inoxydables à effet TRIP. Nous avons aussi traité et expliqué les mécanismes gouvernant le phénomène de la transformation martensitique. Dans les aciers inoxydables austénitiques, l'austénite n'étant pas la phase stable à la température ambiante elle peut être déstabilisée par une déformation plastique.

CHAPITRE II
Tribologie et usure

1. Tribologie

1.1. Introduction

La tribologie est présente dans la très grande majorité de l'activité technologique et industrielle. Depuis ces dernières années, son domaine s'est largement développé. On peut citer entre autres : la construction mécanique, l'outillage de mise en forme et de coupe des métaux, les systèmes de contact électromécaniques, la biomécanique pour la réalisation des prothèses...

Les problèmes tribologiques rencontrés dans la mise en forme des matériaux sont de grande ampleur par rapport à ceux rencontrés dans l'industrie de contact et de transmission mécanique et ce pour au moins deux raisons :

➤ **Raison physique**

Ces problèmes tribologiques concernent les interactions superficielles des matériaux de surface du matériau et de l'outil entre lesquels viennent s'intercaler certains constituants du lubrifiant et des débris arrachés à la tôle et à l'outil. De ces interactions découlent le frottement et engendrent l'évolution de l'état de surface de la tôle, l'endommagement et l'usure de l'outil. Les phénomènes sous-jacents, dont l'échelle se situe entre une dizaine de nanomètres et de micromètres sont complexes et loin d'être tous compris et maîtrisés.

➤ **Raison industrielle**

Le succès de l'opération de la mise en forme dépend du savoir-faire d'au moins trois sociétés : celle qui fabrique la tôle, celle qui élabore le lubrifiant et celle qui réalise la mise en forme (voire celle qui fabrique l'outillage) ; une bonne coopération et une bonne circulation des informations entre ces trois partenaires est indispensable, mais cela n'est pas toujours le cas. Chacun est très soucieux de ne pas perdre l'avantage qu'il pense détenir sur ses concurrents, par exemple : la composition du lubrifiant est généralement confidentielle et chacun laisse ses partenaires prendre en charge la recherche d'une solution.

1.2. Contact tribologique

Le contact tribologique est composé de quatre éléments principaux, comme indiqué sur la figure (II.1), il se compose :

- ✓ du solide principal,
- ✓ du corps antagoniste,
- ✓ le milieu interfacial, dit troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...),
- ✓ de l'environnement (atmosphère, phénomènes thermiques...).

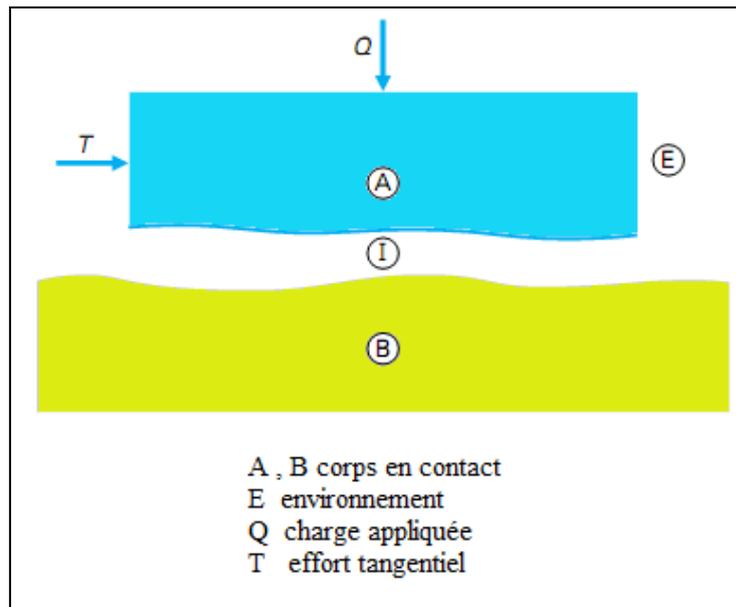


Figure II.1. Principaux éléments du contact tribologique [40].

1.3. Définition de la tribologie

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 [41] est un opérateur qui transmet la charge d'un premier corps sur l'autre d'une façon dissipative (frottement).

Les troisièmes corps séparent partiellement ou entièrement les deux premiers corps. Ils sont introduits dans le contact ou bien par entraînement cinématique (lubrifiants solides ou liquides) ou par formation de particules détachées. L'interface d'un tel système devient alors le siège de phénomènes dissipatifs d'énergie, regroupés sous le terme générique de frottement.

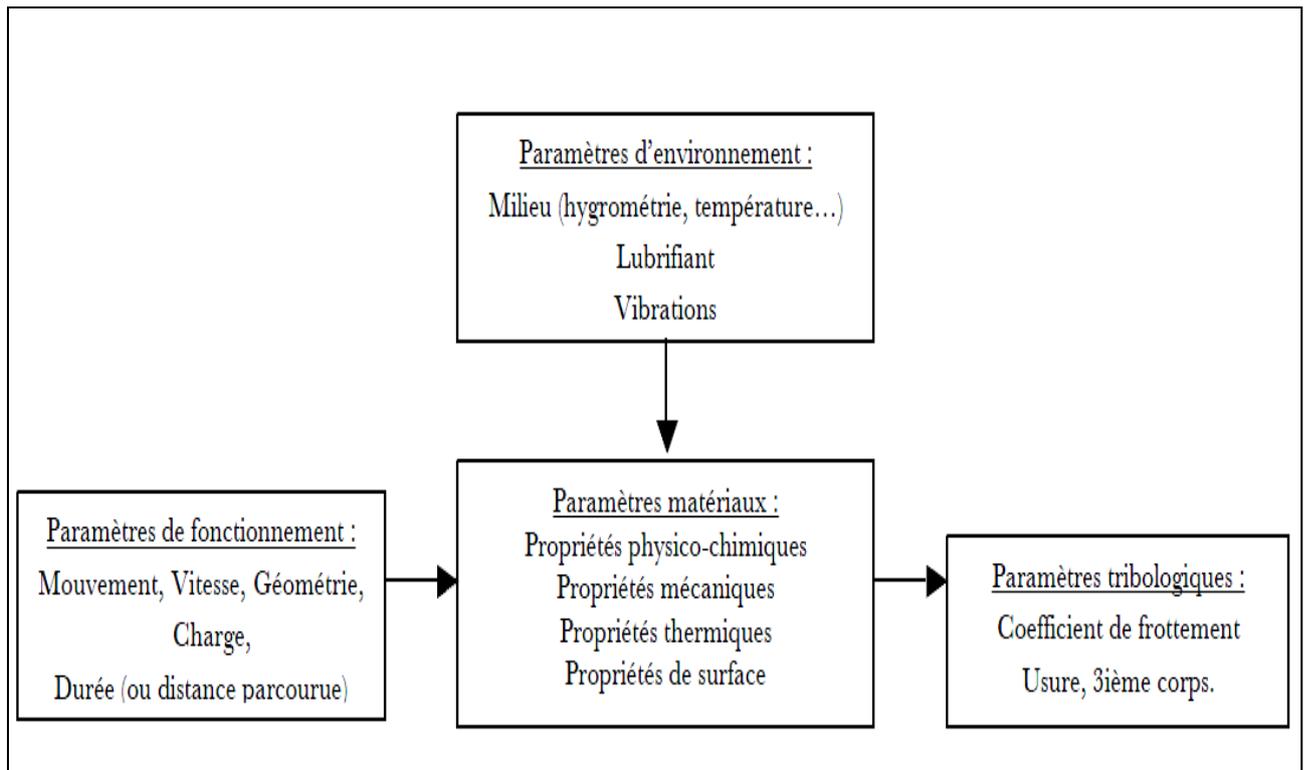


Figure II.2. Synoptique général d'un système tribologique [42].

1.4. Les éléments influant sur le contact tribologique

Parmi les éléments qui gouvernent le contact tribologique, on peut citer :

1.4.1. *L'énergie superficielle d'un solide* (exprimée en J/m^2)

Qui est définie comme le travail qu'il faut fournir pour créer, de façon isotherme et réversible, une unité d'aire de surface nouvelle.

1.4.2. *L'état physico-chimique* (nature, structure, texture des couches superficielles)

Quelque soit le processus de coupe, qui est toujours une rupture du matériau dans une zone plastifiée, il s'ensuivra de sévères perturbation du métal. Dont la structure à une profondeur d'une certaine de nanomètres est composée comme le montre la figure (II.3) ci-dessous.

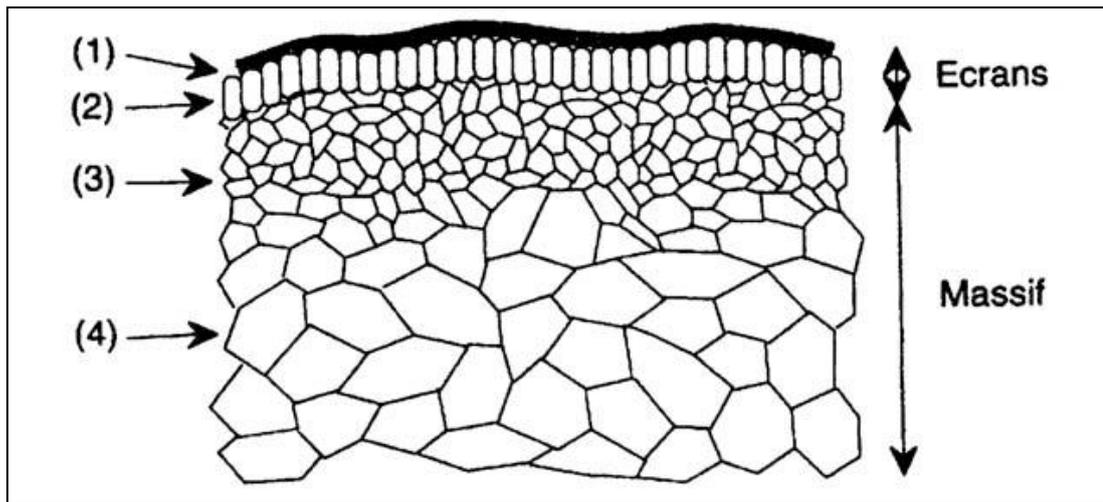


Figure II.3. Structure microscopique de la surface d'un métal usiné.

- (1) est un film de contamination (0,3 à 3 nm) constitué de couches absorbées
- (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μm). La zone
- (3) est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écaillée.
- (4) partant de 100 μm est le matériau massif.

1.4.3. Topographie

Elle concerne tous les effets qui résultent de la mise en œuvre et du parachèvement d'une pièce mécanique (Opération de mise en forme, traitement thermique et de surfaces...). Les défauts de topographie possèdent une grande influence sur les fonctions des surfaces, elles influent en effet sur : le frottement, le glissement de roulement, la résistance à l'écoulement des fluides, et la facilité d'accrochage des revêtements...

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres :

- ✓ ordres macroscopiques liés à des écarts de grande amplitude dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice (écart de forme du 1er et 2nd ordre),
- ✓ ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine ou encore aux piqûres de corrosion (rugosité, écarts de forme de 3ième et 4ième ordre).

1.5. Sollicitation du contact tribologique

La charge est le facteur déterminant du comportement mécanique des surfaces frottantes, puisqu'elle régit l'ensemble de contraintes superficielles au contact. La figure (II.4) nous montre l'influence de la charge sur le contact tribologique.

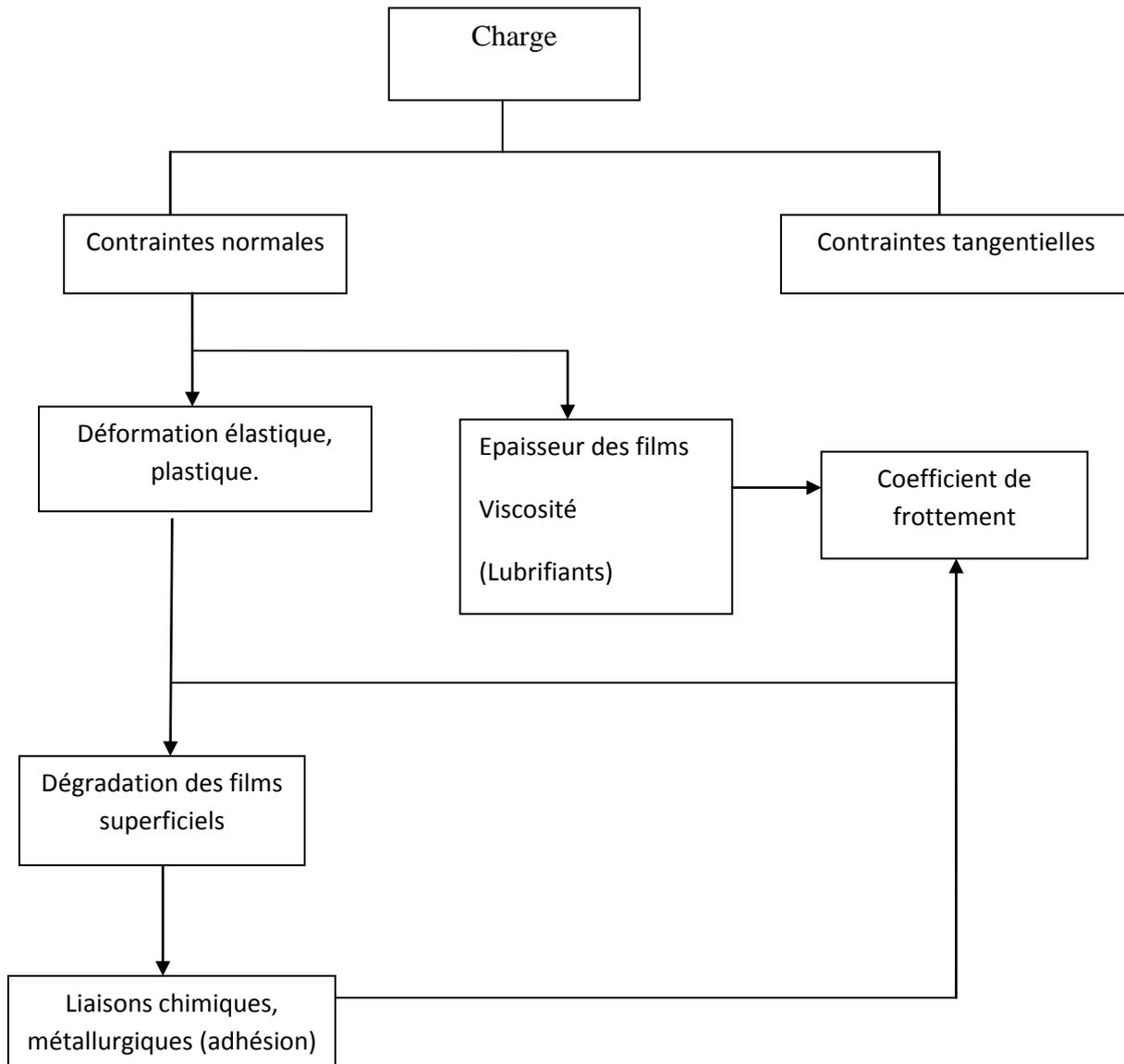


Figure II.4. Représentation schématique de l'influence de la charge.

2. Les frottements

2.1. Définition

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'une par rapport à l'autre.

Le frottement est aussi défini comme la résistance au mouvement qui existe lorsqu'un objet solide est déplacé tangentiellement par rapport à la surface d'un autre qu'il touche, ou lorsque l'on essaie de provoquer un autre déplacement.

Si les deux corps sont des solides cette force est appelée frottement solide qui peut être de type glissement ou de type roulement. Si l'un des deux corps est un fluide, la force est un frottement fluide.

Le frottement n'est pas une propriété intrinsèque d'un matériau mais plutôt une réponse à un système en interaction, il est dépendant de la texture de surface, de la contamination, de l'environnement, du lubrifiant etc.

On distingue de plus, dans chaque cas, le frottement statique est le frottement dynamique.

Quel que soit son type, le frottement a pour cause première deux types de force.

- ✓ **Force de cohésion** : est la force qui lie entre elles les molécules d'un corps, par exemple : les corps solides ont des forces de cohésion très forte, celles d'un liquide sont plus faibles et celles d'un gaz très faibles.
- ✓ **Force d'adhésion** : est la force qui accroche les liquides aux solides et, à un degré inférieur, les solides entre eux.

2.2. Formulation du coefficient de frottement

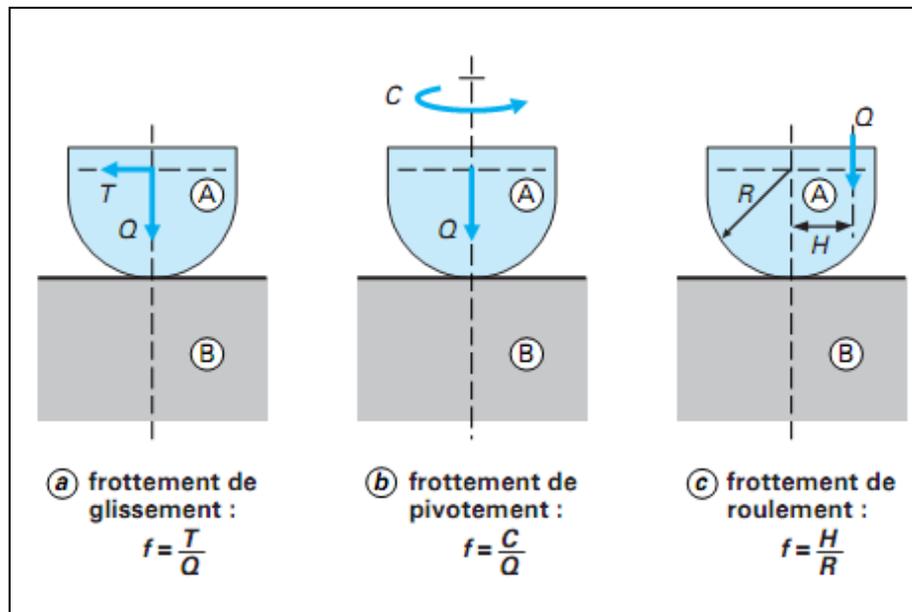


Figure II.5. Détermination du coefficient de frottement [40].

Soient deux corps A et B appuyant l'un sur l'autre avec une force Q , et se mouvant l'un par rapport à l'autre en restant en contact.

Le cas le plus général est celui du « frottement de glissement » (Figure II.5.a). Le coefficient de frottement est déterminé comme suit : $f = \frac{T}{Q}$

Où : T : la force tangentielle parallèle au plan tangent commun à A et B.

f : le coefficient de frottement de glissement.

Q : la force appliquée.

Lorsqu'il s'agit de « frottement de pivotement », c'est-à-dire lorsqu'il existe un point de A qui coïncide pendant tout le mouvement avec un point de B, le mouvement s'obtient en exerçant

un couple C (Figure II.5.b.). Le coefficient de pivotement f est alors homogène à une longueur :

$$f = \frac{C}{Q}$$

Lorsqu'il s'agit d'un « frottement de roulement », c'est-à-dire lorsqu'un point ou une ligne de contact de A et de B joue le rôle de centre instantané de rotation, le mouvement peut s'obtenir en déplaçant la direction de la force Q parallèlement à elle-même d'une longueur H (Figure II.5.c). Le coefficient de frottement de roulement f est un nombre sans dimension :

$$f = \frac{H}{R}$$

Avec R rayon de courbure.

3. L'usure

La compétitivité des machines et produits ne se juge plus sur leurs seules performances techniques mais aussi sur leur fiabilité et longévité. C'est un atout incomparable que de savoir ce qu'il faut faire pour que les pièces ne s'usent point, ne grippent pas, résistent mieux à la corrosion, à la fatigue. La maîtrise de l'usure et du frottement apparaît donc comme l'une des actions prioritaires dans la conception de nouveaux produits sans oublier qu'il faut très souvent prendre en compte d'autres contraintes physiques ou chimiques en composant avec des exigences contradictoires comme la dureté et la résilience ou l'inoxidabilité.

Dans le cadre de notre étude, les objectifs visés sont : d'acquérir une meilleure compréhension des mécanismes de base qui régissent l'abrasion sous différentes contraintes qui représente l'une des formes d'usure prédominantes du monde industriel et d'en tirer les enseignements nécessaires en ce qui concerne les solutions à apporter pour lutter contre l'endommagement des matériaux d'une manière générale.

3.1. Définition

L'usure est une résultante des conditions d'applications du système tribologique. C'est une conséquence du frottement et désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles et correspond à une perte de matière ou d'esthétisme de la face soumise aux frottements. Cette dégradation est souvent associée aux phénomènes chimiques dus à la corrosion.

L'usure engendre des déformations plastiques, des fracturations et des enlèvements de matière et d'une perte de masse.

3.2. Phénomènes élémentaires d'endommagement des surfaces

D'après K. Philippe et al. [44], suite à des sollicitations tribologiques, une surface qui subit des transformations et endommagements peut être décrite aisément en faisant appel à un nombre restreint d'apparences et phénomènes:

3.2.1. Déformations plastiques

Lorsque les contraintes générées par le contact glissant surpassent la limite d'élasticité; ces déformations plastiques induisent des modifications de géométrie des surfaces frottantes ;

3.2.2. Fissurations

Sous l'effet de contraintes dépassant la limite à la rupture, ou de phénomènes de fatigue;

3.2.3. Transformations physicochimiques de surface

Transformations structurales sans intervention de l'environnement ou réaction tribochimique entre les corps frottant et cet environnement ;

3.2.4. Adhésion entre les corps frottant

Conduisant à la formation de transferts d'un des matériaux sur l'antagoniste. Ces différents phénomènes élémentaires peuvent se produire simultanément ou successivement dans un contact donné.

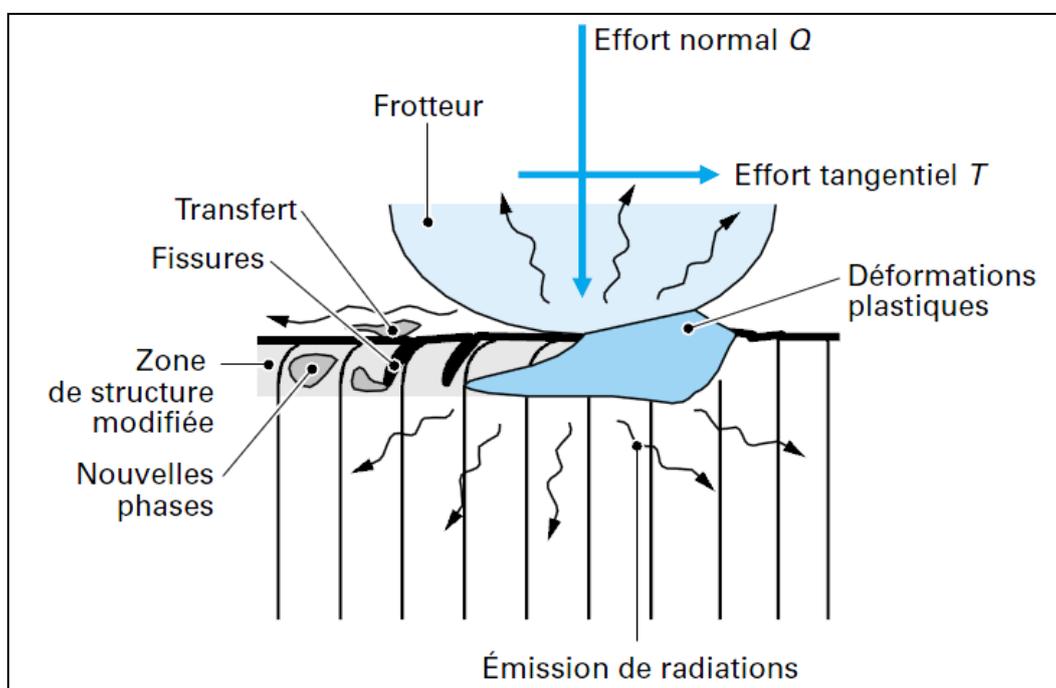


Figure II.6. Endommagement d'un corps frottant [40].

4. Classement des détériorations et étude des usures

Dans la pratique, on considère les détériorations de surfaces sous des angles différents :

4.1. Importance des détériorations sur la durée d'utilisation de l'organe

Selon DHERS.J [48], on peut estimer qu'il existe trois types d'usure :

- Une usure bénéfique : c'est l'usure dont l'importance décroît dans le temps et qui conduit à donner un meilleur fini de surface, à permettre un meilleur fonctionnement des organes, exemple : l'usure de rodage.

- Une usure dite normale : c'est une usure très lente, usure courante que subit un matériel en service. Cette usure conduit au vieillissement de la machine qui ne sera plus utilisable quand elle aura causé des jeux exagérés par exemple.
- Une usure catastrophique : c'est une usure qui conduit à la destruction rapide et complète de la surface, à la destruction de l'organe même.

4.2. Types des détériorations

L'étude du phénomène de l'usure conduit au classement des détériorations selon l'aspect sous lequel elles se présentent :

Schématiquement, on peut classer les détériorations en quatre grands groupes :

- a. Usure due au frottement des surfaces l'une sur l'autre.
- b. Usure liée à la fatigue des surfaces, fatigue qui conduit suivant les cas à la formation de piqures, d'écaillés et à la rupture même.
- c. Usure de corrosion : corrosion chimique, électrochimique, électrique bactérienne ; corrosion où les phénomènes sont complexes : cavitation, corrosion de contact.
- d. Déformation plastique du matériau.

4.3. Organes détériorés

Les conditions de fonctionnement dépendent du type d'organe. La géométrie des arbres dans les coussinets, les pistons dans les cylindres, les surfaces en contact sont séparées par un film lubrifiant relativement épais.

Dans les machines à écrire, à calculer, le parfait des surfaces est peu encouragé, la lubrification est réduite, les vibrations sont constantes, la corrosion de contact est fréquente.

5. Variables significatives qui gouvernent l'usure

En fonction de la structure d'un système, le même matériau peut occasionner soit une durée de vie très longue, soit une dégradation très rapide d'une pièce. Ainsi le développement de matériaux à haute résistance à l'usure ne peut se faire que pour un système déterminé avec une connaissance exacte des mécanismes de dégradation et des variables significatives qui gouvernent l'usure [40] :

- la vitesse relative du mouvement,
- la longueur de déplacement,
- la masse des particules,
- la dureté du matériau,
- la dureté de l'abrasif (ou du corps antagoniste),
- la force de contact,
- l'angle de contact α ,
- l'acuité de l'abrasif (ou du corps antagoniste) λ ,
- le coefficient d'activation :

$$Q^* = Q/RoTt$$

Tt: est la température de contact (K),

Ro: est la constante universelle des gaz parfaits (J/Kmole),

Q^* : est l'énergie d'activation du processus tribochimique (J/mole).

6. Principaux types d'usure

La résistance à l'usure est un facteur essentiel, les mécanismes de l'usure sont extrêmement complexes et le choix d'un matériau pour une application donnée dépend du type d'usure auquel la pièce est soumise et du milieu environnant.

Ces types d'usure peuvent se classer, selon [43], de la manière suivante :

6.1. L'usure abrasive

6.1.1. Nature du phénomène

Cette forme d'usure est due à l'endommagement des surfaces provoqué pendant l'enlèvement des particules sur la surface frottée par simple contact physique contre des corps étrangers plus ou moins durs. Ce phénomène est très complexe, de nombreux paramètres interviennent:

- ✓ les pièces soumises à l'abrasion (composition chimique, microstructure, caractéristiques mécaniques);
- ✓ l'abrasif (taille, dureté, angularité, aptitude à la fragmentation);
- ✓ les conditions de service (vitesse et angle d'attaque de l'abrasif, contraintes appliquées à la surface, température, milieu environnant).

La figure (II.7) nous permet de distinguer :

- **l'usure abrasive à deux corps** : des sillons sont formés parallèlement à la direction de déplacement, par les aspérités du corps le plus dur ;
- **l'usure abrasive à trois corps** : des particules dures présentes dans l'interface déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes.

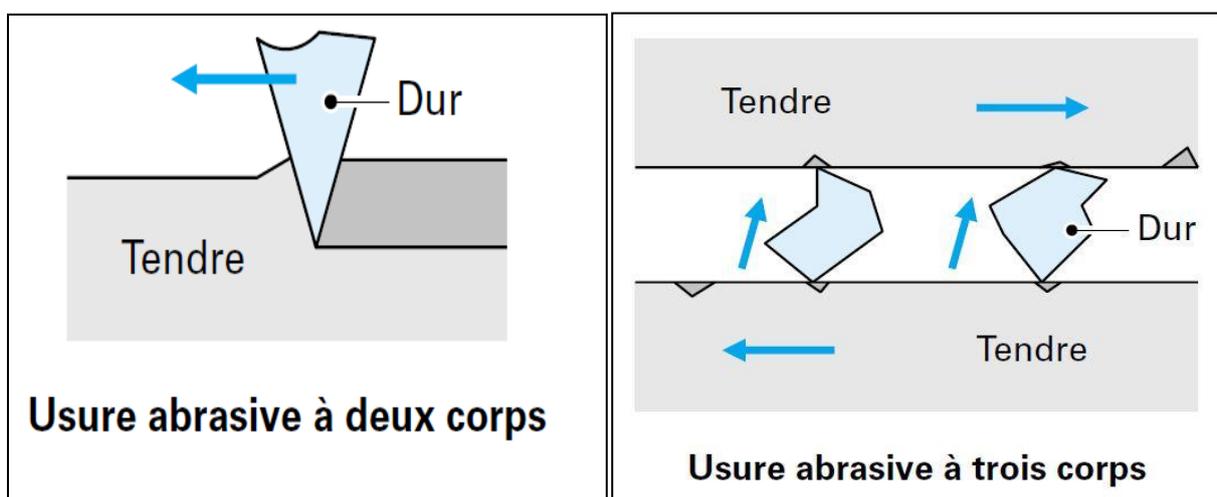


Figure II.7. Phénomènes élémentaires de l'usure abrasive à deux et trois corps [40].

Suivant les cas, l'usure abrasive peut engendrer des endommagements par déformation plastique, des enlèvements de matière par phénomène de coupe et/ou par fatigue superficielle.

L'usure abrasive est favorisée :

- ✓ par l'accroissement de température ;
- ✓ par l'humidité, l'agressivité chimique de l'ambiance (lorsque l'abrasion agit par effet de coupe).

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, la nature et l'acuité des phénomènes dépendent des formes, granulométries des particules abrasives, de la vitesse relative et de l'angle d'attaque de l'abrasif sur le substrat.

6.1.2. Prévention

- ✓ Il faut empêcher l'entrée des corps étrangers par une bonne étanchéité et imposer des jeux plus petits que les particules abrasives, si l'on sait que ces dernières sont assez grosses.
- ✓ Il faut aussi donner une dureté maximale à la pièce qui défile devant la zone de contact et faire l'autre aussi tendre que possible pour qu'elle puisse enliser les particules abrasives.
- ✓ Il est essentiel que les particules abrasives et les débris d'usure soient évacués des zones frottantes.
- ✓ On diminue l'abrasion en augmentant la dureté superficielle sur une profondeur importante. Une meilleure résistance à l'oxydation et à la corrosion donne moins d'oxydes abrasifs,
- ✓ L'écrouissage augmente la dureté et la résistance à l'usure.

6.2. L'usure par pitting

6.2.1. Nature du phénomène

Elle correspond à des pertes locales de matière sous forme d'écailles. Cet endommagement est dû à un phénomène de fatigue du matériau, initié par les sollicitations répétitives exercées en cours de frottement, et conduisant à une propagation de fractures parallèles à la surface frottante ; cette forme de dégradation est typique des contacts soumis à des chargements cycliques avec des sollicitations de roulement, de choc, ou de glissement en régime lubrifié.

6.2.2. Prévention

- ✓ Il faut avant diminuer les contraintes de contact par une géométrie appropriée,
- ✓ réduire le frottement en évitant absolument l'adhésion,
- ✓ On doit aussi utiliser des matériaux avec peu de défauts que possible, comme les aciers dégazés,
- ✓ On choisira des traitements augmentant la dureté et engendrant des contraintes résiduelles de compression : nitruration, cémentation, trempe superficielle, par exemple.
- ✓ La profondeur traitée doit dépasser le point de plus fort cisaillement, sinon le remède peut être pire que le mal.

6.3. L'usure par corrosion de contact

6.3.1. Nature du phénomène

Cette forme d'usure apparaît lorsque deux surfaces en contact sous charge subissent des microglissements de quelques centaines de microns au maximum et des efforts superficiels de cisaillement, le tout avec de rapides alternances : il y a d'abord émission de débris puis ces derniers sont broyés dans l'aire de contact où ils subissent des écrouissages, des transformations physico-chimiques telles que l'oxydation jusqu'à constituer un véritable abrasif; enfin la dégradation de surface s'autoaccélère.

Le phénomène se caractérise par une coloration des surfaces frottantes et la présence abondante de poudre rouge ou noire, dans le cas où l'une au moins des deux pièces en contact est faite d'un alliage ferreux.



Figure II.8. Aspect des dégâts des pièces endommagées par corrosion de contact.

6.3.2. Prévention

- ✓ Il faut éviter l'adhésion par des matériaux compatibles et en plus lutter contre l'oxydation par des revêtements de métaux mous et nobles (cuivre, argent, or, nickel, molybdène) ou des traitements (sulfinisation, nitruration, pour l'aluminium grenailage et oxydation anodique).
- ✓ Pour les métaux ferreux on doit préférer les structures martensitiques. Parmi les solutions éprouvées on note le frottement fonte sur fonte (le graphite assurant une bonne protection), les revêtements de phosphate ou de lubrifiants solides, ou l'acier laminé à froid sur lui-même.
- ✓ On utilise aussi des revêtements plastiques ou des matières plastiques inertes frottant sur des placages d'or ou un chromage dur.
- ✓ L'introduction entre les surfaces d'un troisième corps approprié peut être une solution intéressante. La lubrification retarde seulement la corrosion de contact,
- ✓ Choisir des huiles fluides ou des graisses inoxydables avec des savons d'aluminium,
- ✓ Une rectification est plus mauvaise qu'un usinage classique mais paradoxalement, une superfinish diminue le phénomène.

6.4. L'usure par fluage

6.4.1. Nature du phénomène

On remarque des écoulements de matière sans grand relief et très étalés engendrés par les contraintes de compression et entraîne une perte de cote.

Le matériau flue sous l'effet d'un état de contraintes de compression triaxiales, ce qui peut se produire même s'il est relativement fragile, comme par exemple de l'acier cémenté.

Par exemple, des engrenages très lourdement chargés en acier cémenté trempé peuvent présenter des déformations "en vagues" caractéristiques d'un fluage sans rupture.

6.4.2. Prévention

- ✓ Diminuer les pressions et le frottement,
- ✓ utiliser des matériaux très résistants à la compression.

6.5. L'usure par cavitation

6.5.1. Nature du phénomène

L'effet de la cavitation se traduit par l'enlèvement de gros débris métalliques aboutissant à la formation de trous. Ce phénomène, dû à l'implosion de bulles de gaz pouvant contenir des particules solides dans le liquide lubrifiant proche de la paroi métallique, comprend trois phases :

- le lubrifiant se charge de microparticules solides qui absorbent les gaz occlus pour former les germes de la future cavitation.
- lors de leur passage dans des zones à basse pression et à température élevée, ces germes solides croissent et s'enveloppent de bulles de gaz et de vapeur (le gaz est celui que les débris d'usure avaient absorbé, la vapeur provient du lubrifiant).
- lorsque le fluide arrive dans les zones à pression élevée, les bulles sont brutalement écrasées sous l'effet de la condensation de la vapeur : c'est l'implosion qui peut créer des pressions de plusieurs millions d'atmosphères.



Figure II.9. Pièces usées par cavitation.

6.5.2. Prévention

- ✓ Il faut filtrer les huiles, améliorer l'état des surfaces et leur intégrité cristalline.
- ✓ Un matériau supporte bien la cavitation si sa charge de rupture, sa limite d'élasticité, sa résilience et sa limite de fatigue sont élevées.
- ✓ On utilise aussi des rechargements au plasma avec des métaux résistants à la corrosion comme le molybdène ou les alliages à base de cobalt ou de nickel.
- ✓ Les contraintes résiduelles de compression, les traitements de surface de type nitruration, sulfuration, sont favorables.

6.6. L'usure par corrosion

6.6.1. Nature du phénomène

On appelle "corrosion" le phénomène de destruction d'un métal par action chimique ou électro chimique. Les principales formes de corrosion sont :

- **La corrosion uniforme** : se caractérise par une attaque du métal sur toute sa surface : la rouille d'un acier de construction immergé dans l'eau, l'oxydation des aciers en température sont des exemples de corrosion uniforme.
- **La corrosion par piqûres** : se manifeste par des piqûres très fines qui se développent en profondeur et en largeur dans le métal. Les aciers inoxydables immergés dans l'eau de mer sont typiques de cette forme de corrosion par piqûres.
- **La corrosion intergranulaire** : localisée comme la corrosion par piqûres, consiste en une attaque sélective des joints de grains de la structure du métal. Le métal ainsi attaqué prend un aspect terne, perd sa sonorité métallique et devient cassant.
- **La corrosion sous tension** : se manifeste sur des pièces soumises à des contraintes de surface, dans un milieu même peu ou pas agressif par des fissures profondes. L'exemple typique est celui de la corrosion des bouilleurs de chaudières par des eaux faiblement alcalines. Ce type de corrosion se rencontre plus particulièrement dans les aciers du type inoxydable ainsi que dans les laitons et alliages légers.

Les facteurs intervenant dans les phénomènes de corrosion peuvent être classés en quatre groupes :

1. Les facteurs chimiques (concentration du réactif, teneur en oxygène, PH, température...).
2. Les facteurs électrochimiques (différences de potentiel entre les matériaux et l'ambiance, les couples de matériaux...).
3. Les facteurs métallurgiques ou structuraux (composition du métal ou de l'alliage, procédé d'élaboration, impuretés, traitements thermiques, écrouissages...).
4. Les facteurs mécaniques (contraintes résiduelles, sollicitations mécaniques, états de surface...)

6.6.2. Prévention

- ✓ Il faut utiliser des matériaux appropriés au milieu,

- ✓ Il faut éviter la formation de couples électrochimiques.
- ✓ Les additifs détergents avec réserve d'alcalinité sont intéressants, de même que les antioxydants (pour l'huile) et les anticorrosifs.

7. Conclusion

Le contact tribologique engendre des phénomènes (frottement, usure...) qui sont difficiles à expliquer. Ils dépendent d'un grand nombre de facteurs (dureté, état des surfaces en contact, milieu de fonctionnement, la vitesse, la charge, la température, la lubrification...). Ces facteurs dépendent aussi de plusieurs autres paramètres plus complexes. On ne peut pas contrôler complètement ces paramètres mais on peut faire de sorte que le frottement soit le plus petit possible, en remédiant par la lubrification, les traitements thermiques, les revêtements de surfaces...

CHAPITRE III
Discussion des
résultats

1. Introduction

De nombreuses pièces ou structures sont soumises en service à l'usure dans le temps, le plus souvent sous contraintes modérées, le matériau est alors localement déformé plastiquement.

La transformation de l'austénite en martensite est également susceptible, sous l'effet d'une déformation plastique, ces transformations peuvent être induites par différents procédés et phénomènes : traction, cisaillement, usure...

Dans ce travail, nous allons étudier l'influence de la force normale (Nous avons retenus trois forces normales de contact 45.16 N, 67.74N, et 90.32 N, pour une vitesse constante de 0.89 m/s) sur le phénomène de l'usure d'un acier austénitique instable 304L et un acier Z200. Par la suite nous déterminerons le taux de martensite formée.

D'après A. Van Herpen et al. [44], dans les aciers inoxydables austénitiques, après usure, l'austénite transformée en martensite a été estimée être de la martensite α' , et sa fraction volumique est de l'ordre de 15%.

La martensite induite par déformation plastique est un phénomène bien connu dans les aciers inoxydables austénitiques [45] et a été remarqué dans d'autres expériences d'usure par plusieurs auteurs [46-47].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes suivies et les moyens expérimentaux utilisés tels que : tribomètre, microscope, balance électronique etc.

A partir d'essais sur un tribomètre disponible au niveau du Hall de technologie à Oued-Aissi, nous présenterons les résultats de l'analyse de nos échantillons, nous allons nous intéresser à l'ensemble des pions qui ont subi l'usure en fonction de la charge appliquée (avec une vitesse constante). Par la suite ces pions seront polis, attaqués et observés par un microscope optique et par microscope à balayage électronique (MEB) afin de révéler les changements et les différentes évolutions microstructurales engendrées par l'usure, puis identification des phases.

Après avoir acquis des images micrographiques, nous allons procéder au développement d'un programme de traitement d'image sous Matlab permettant d'améliorer l'aspect visuel de l'image (traitement d'image), d'en extraire des informations jugées pertinentes et calculer le taux de la phase martensitique.

2. Présentation du matériau utilisé

Les matériaux utilisés pour élaborer les échantillons sont :

2.1. Matériau des disques

Nous avons utilisé l'acier Z200, ces disques ont été réalisés en tournage à partir de barres rondes laminées leurs dimensions sont :

Diamètre : $D=40\text{mm}$,

Epaisseur : $e=10\text{mm}$.

Un trou au milieu réalisé avec perçage, son diamètre est $d=8\text{mm}$.

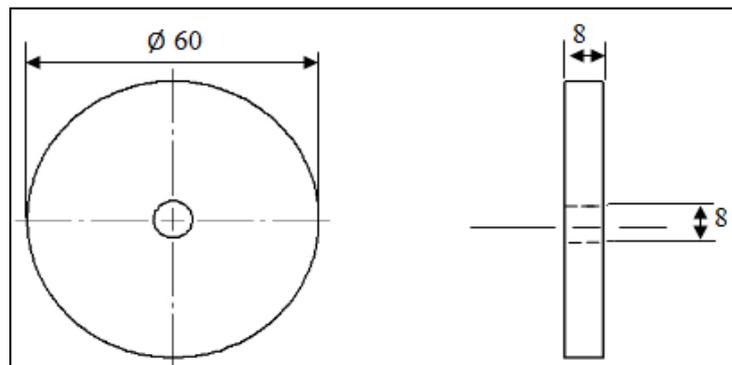


Figure III.1. Dimensionnement des disques.

2.2. Matériau des pions

Ils ont été réalisés en fraisage à partir d'une tôle laminée d'acier inoxydable austénitique de nuance 304L, ils sont parallélépipèdes avec les dimensions suivantes :

Longueur : $L=17\text{mm}$,

Largeur : $l=6\text{mm}$,

Epaisseur : $e=3\text{mm}$.

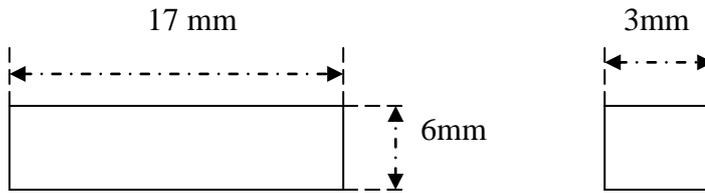


Figure III.2. Dimensionnement des pions.

EN 10027 (Européenne)	Afnor NF 35573 (France)	AISI (États- Unis)	Composition								
			% C	% Cr	% Ni	% Co	% Si	% Mn	% P	% S	Autres
X2CrNi18-09 1.4307	Z3CN18- 10	304 L	0,028	18.21	8.15	0.11	0.490	1.40	0,034	0,017	—

Tableau III.1. Composition chimique de l'acier inoxydable austénitique 304L en pourcentage massique.

3. Description des dispositifs utilisés

3.1. Tribomètre

Le tribomètre assure le frottement d'un contact entre pion / disque sous un effort normal de contact avec un courant électrique à travers les contacts constants au cours d'un essai. Il permet de mesurer simultanément les coefficients de frottement des deux contacts.

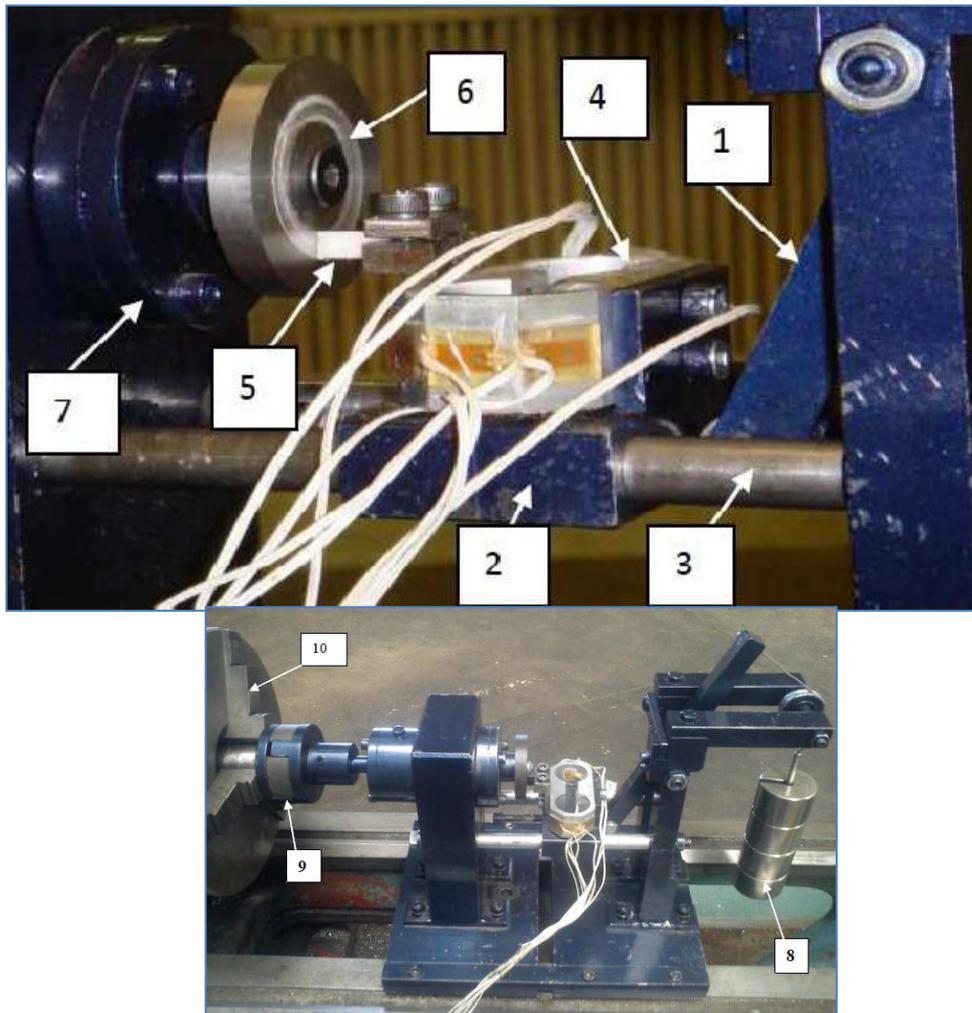


Figure III.3. Vue du tribomètre (Pion/Disque).

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| (1) Levier, | (6) Disque, |
| (2) Support du capteur, | (7) Broche, |
| (3) Glissière, | (8) Masse, |
| (4) Capteur, | (9) Mandrin du tour |
| (5) Pion, | (10) Arbre tournant. |

Le dispositif, se monte sur les glissières d'un tour. Le mouvement de rotation est transmis au disque (6) via un accouplement élastique(9). L'effort normal est appliqué en continu pendant le processus de frottement entre le pion (5) et le disque (6) grâce au levier (1) sur lequel on monte les masses mortes (8).

La force tangentielle F_t induite par le contact (pion /disque) et l'effort normale F_n sont mesurés en temps réel et simultanément par le capteur de force (4) qui est relié à une chaîne d'acquisition qui traite et enregistre les données.

4. L'examen micrographique

L'examen micrographique a pour but principal de mettre en évidence la structure de l'échantillon et des inclusions non métalliques par observation au microscope optique.

4.1. Enrobage des échantillons

Il permet d'obtenir des échantillons de taille standard (diamètre 31.5 mm) pour faciliter le polissage, en particulier pour les petits échantillons. L'enrobage est réalisé en résine à chaud (bakélite) chauffée à 180°C, puis refroidie avec de l'eau tiède.

4.2. Préparation des surfaces

La préparation de la surface consiste à un polissage, Il permet d'obtenir une surface d'observation parfaitement plane permettant une observation de qualité sur toute la zone préparée. il a été réalisé sur des polisseuses de type (Knuth-Rotor 2) (figure III.4.) tournant à 150 et 300 tours/min sur lequel est posé un papier abrasif de granulométrie 600, 800, 1000, 1200, 2000 et 4000 le procédé est réalisé avec lubrification continue (jet d'eau) pour éviter tout échauffement local suite au frottement. Nous avons pris le soin de tourner notre échantillon de 90° afin de diminuer les rayures causées par le polissage précédent. La durée de maintien en contact de l'échantillon est de 2 à 3 minutes.

Pour un polissage de finition, nous avons utilisé un tissu avec la pâte diamantée de 3µm, 1 µm et 1/4 µm respectivement, jusqu'à obtention de l'aspect miroir. Une durée de 2 à 3 min par granulométrie a été respectée.



Figure III.4. Polisseuse à deux disques.

4.3. Attaque électrolytique

On peut observer directement l'échantillon poli sans attaque chimique s'il s'agit d'examen d'inclusions non métalliques, de fissures, de porosités, L'attaque chimique permet de donner des différences des reliefs ou de coloration entre les différents constituants de l'échantillon orientés dans une même phase. Elle permet donc de révéler des inégalités dans les structures. L'opération de polissage garantira le bon résultat de votre attaque chimique. Nous avons apporté assez de soin et de propreté à cette opération, ce qui a augmenté les chances de réussir notre attaque.

Pour l'attaque chimique, on utilisait pour l'examen de la structure une attaque électrolytique. Cette attaque est réalisée à température ambiante, elle consiste à mettre la surface à attaquer en contact avec un électrolyte puis à faire passer un courant électrique à travers l'échantillon jouant le rôle d'une électrode.

Les paramètres utilisés (tension, temps d'exposition et le type d'électrolyte) dépendent de l'alliage à attaquer. Dans notre cas, les échantillons utilisés sont en acier inoxydable austénitique X2CrNi 18-9 (AISI 304L), le tableau suivant résume les différents paramètres utilisés :

Type d'électrolyte	Composition	Temps d'exposition	Tension
Solution aqueuse d'acide Oxalique (C ₂ H ₂ O ₄ , 2H ₂ O)	-10g d'acide oxalique -1 L d'eau distillée	50 s	6 v

Tableau III.2. Les paramètres utilisés pendant l'attaque électrolytique

Cette attaque révèle la phase α' en gris tandis que l'austénite reste blanche. Les joints de grains et les joints de macles sont aussi révélés par cette attaque en noire.

4.4. Microscope optique

Il sert pour l'observation de la microstructure du matériau. Le microscope optique, utilisé dans notre travail, est un microscope optique, muni de lentilles, permettant le grossissement de l'image et donc d'observer les petits détails, il est utilisé pour déterminer la microstructure de notre substrat.

Le but principal de l'observation microscopique est la mise en évidence de la structure des différents échantillons usés.

Notre microscope est doté de différents objectifs (x50, x100, x200, x500, x1000) et d'une caméra numérique permettant l'acquisition, la sauvegarde et le traitement des micrographies obtenues grâce à un logiciel de traitement d'images (AXIO Cam).

La figure (III.5.) montre le schéma de principe du microscope optique utilisé.

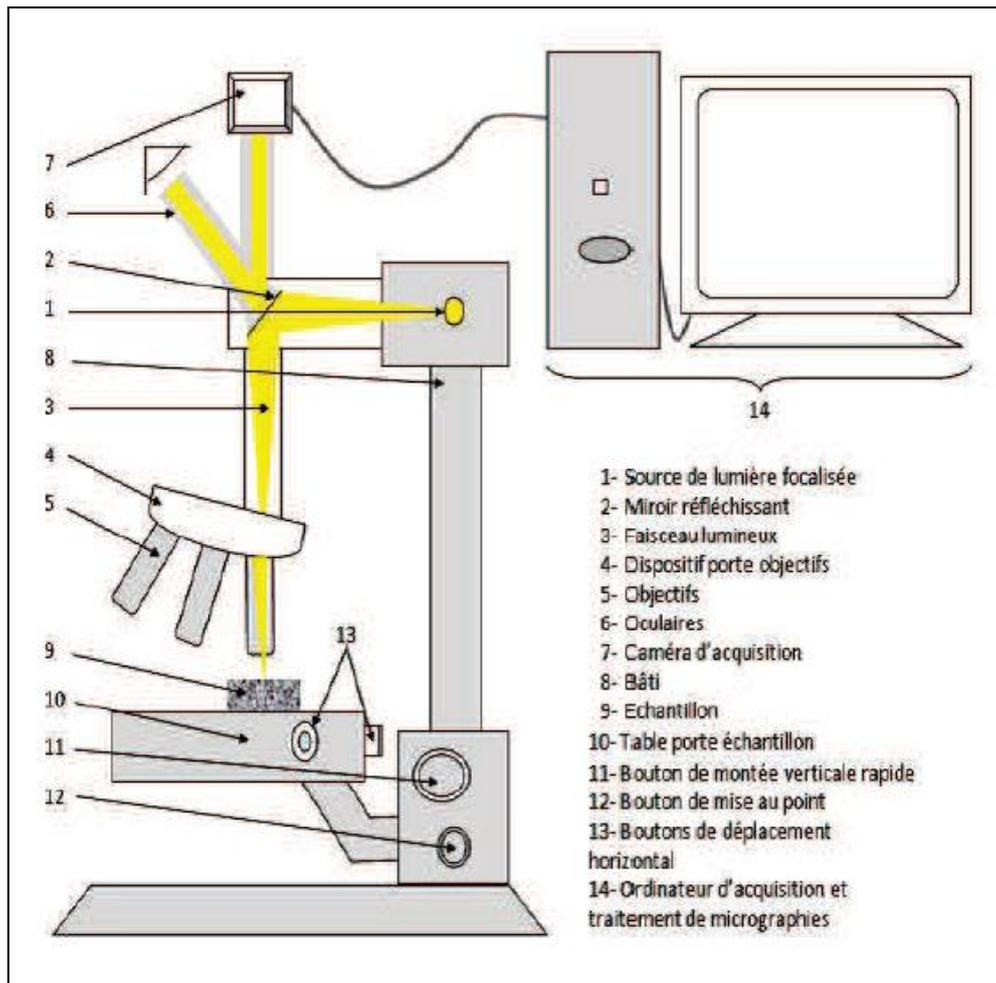


Figure III.5. Schéma de principe du microscope optique

4.5. Microscopie électronique à balayage

La microscopie électronique à balayage (MEB) est un outil de choix pour l'observation et la caractérisation de l'acier 304L étudiés dans ce mémoire à une échelle de l'ordre du micromètre.

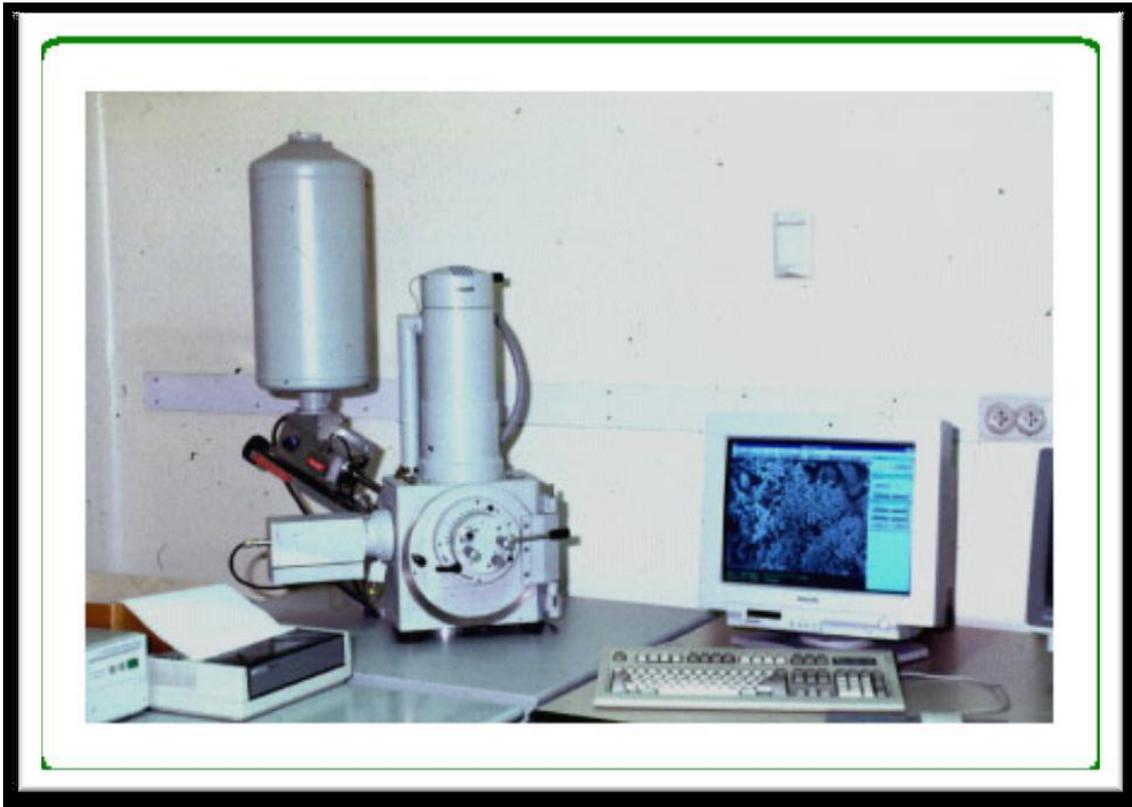


Figure III.6. Microscope électronique à balayage.

Le MEB (figure III.6.) avec ses modes d'imagerie et d'analyse chimique par spectroscopie de dispersion des rayons X contribue à la caractérisation morphologique et à la détermination des dimensions des phases présentes.

5. Microdureté

La microdureté permet de mesurer la valeur de la dureté à des points très localisées (sur environ $100 \mu\text{m}^2$), Il est utilisé pour caractériser la dureté de certains constituants de la matière et pour vérifier l'homogénéité de la pièce. À l'aide d'une machine de mesure de la microdureté figure (III.7.), on peut par exemple déterminer la dureté d'une phase donnée dans un échantillon polyphasé ou celle d'un échantillon très fragile et mince.



Figure III.7. Machine de mesure de la microdureté

La machine de mesure de la microdureté permet de mesurer la microdureté Vickers, grâce à une pyramide diamantée qui est imprimée dans le matériau à évaluer. On obtient ainsi une empreinte de forme carrée dont on peut mesurer les diagonales. A partir de la longueur de la diagonale, et connaissant la charge appliquée à la pyramide, on peut en déduire la microdureté Vickers.

Les mesures de micro-dureté ont été effectuées avec une charge de 100gr, pendant un temps de pénétration de 15 secondes.

6. Résultats et discussion

6.1. Caractérisation métallographique

6.1.1. Observation de la microstructure avant les essais d'usure

La structure métallographique de l'acier inoxydable AISI 304L a été révélée à l'aide d'une solution d'attaque électrolytique avec l'acide oxalique.

A fin d'étudier les différents changements qui ont affecté la surface des échantillons qui ont subi l'usure, nous avons analysé différentes faces des pions

Nous avons prélevé des échantillons de référence dans la plaque ayant servi à fabriquer les pions.

Les deux microscopies révèlent la même chose (figure III.8.). Des gros grains d'austénite qui ont peu de différence de tailles de grains entre le sens longitudinal et le sens transverse.

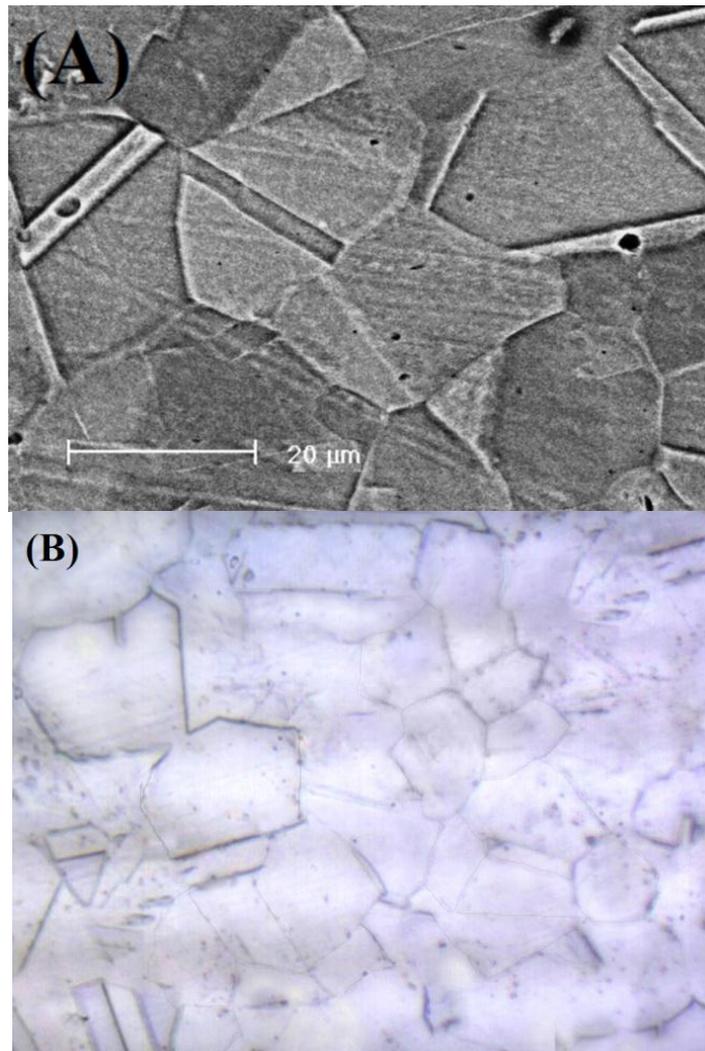


Figure III.8. Microstructure de référence de l'acier inoxydable 304L avant usure.

(A) Observation au MEB. (B) Observation au microscope optique.

6.1.2. Observation de la microstructure après les essais d'usure

D'après Lecroisey et al. [22] dans différents types d'aciers inoxydables austénitiques, durant la transformation martensitique la phase ϵ a été observée seulement dans les aciers à forte teneur en chrome et en nickel ($\%Cr > 15\%$, $\%Ni > 10\%$). Dans les autres aciers austénitiques, une transformation directe de la phase γ en phase α' est observée.

La martensite α' se trouve sous forme de plaquette (ou martensite lenticulaire) et possède une forme aplatie, Chaque plaquette est formée de fines macles [9].

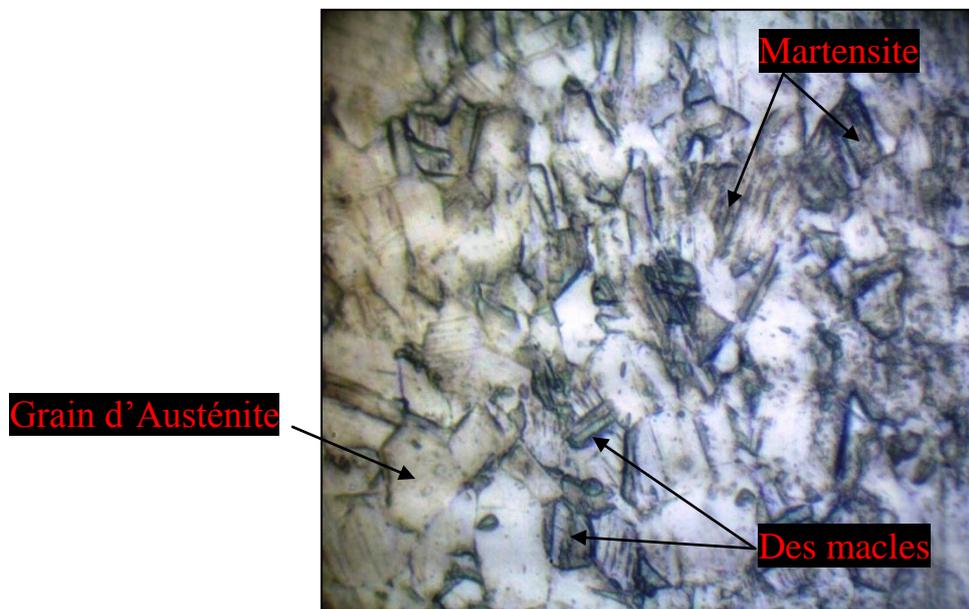


Figure III.9. Microstructure d'un échantillon usé sous une charge de 45.16 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s. (grossissement x400).

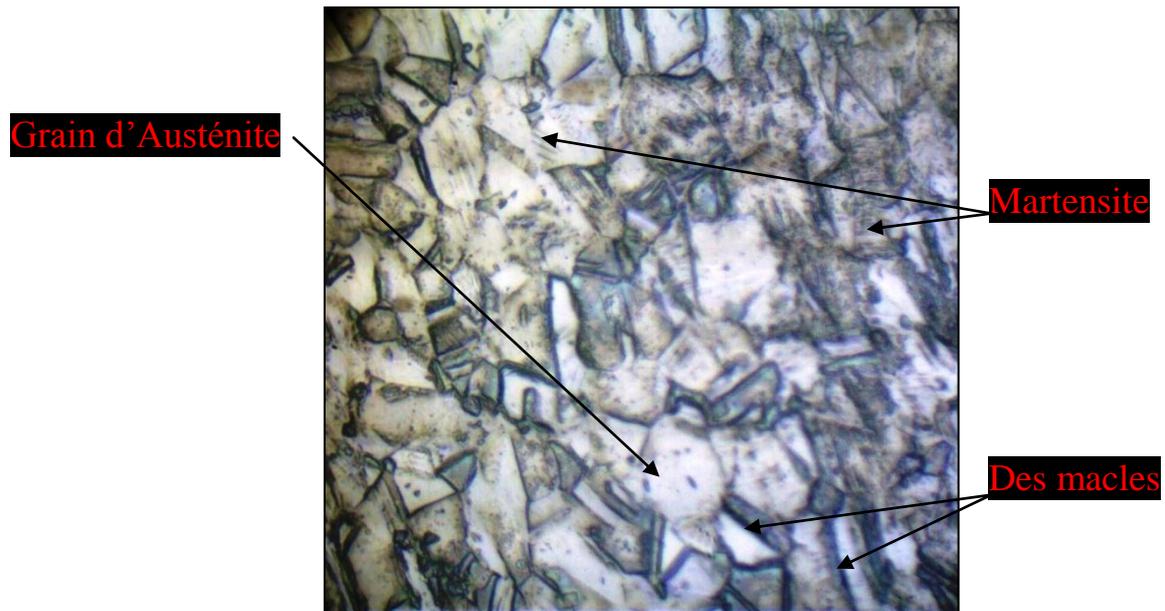


Figure III.10. Microstructure d'un échantillon usé sous une charge de 67.74 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s. (grossissement x400).

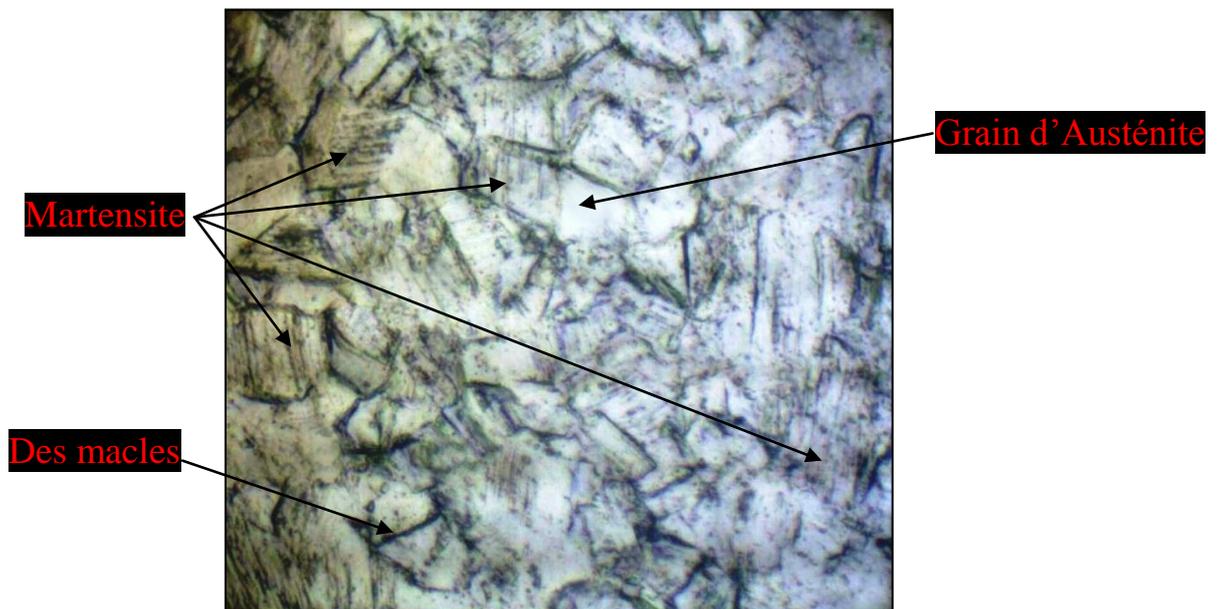


Figure III.11. Microstructure d'un échantillon usé sous une charge de 90.32 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s. (grossissement x400).

Au-delà de la température M_s , une transformation martensitique est possible par une déformation plastique, chaque frottement appliqué correspond à une faible quantité de déformation plastique, l'augmentation de la charge F appliquée est alors nécessaire pour

atteindre le niveau critique de déformation plastique indispensable pour la formation de la martensite. Lorsque la contrainte appliquée croît l'austénite se plastifie mais pas la martensite. En effet notre matériau contient des grains de martensite dure d'une matrice austénitique, ce qui développe des hétérogénéités de phases (des macles, phase martensitique et austénitique...).

Une macle est un glissement symétrique par rapport à un plan cristallographique particulier. Le maclage est plutôt caractéristique des déformations aux températures ambiantes et moyennes [12].

D'après les micrographies on remarque que :

- ✓ Les joints dans la phase austénitique sont d'autant plus difficiles à distinguer que le taux de phase martensitique transformée est important.
- ✓ Le taux de martensite transformée est maximal sur les bords de la section rectangulaire de la face usée et de très près, le taux de martensite transformée est différent d'une position à une autre, le taux plus important a été observé au centre des grains d'austénite. On a remarqué aussi que plus la formation de martensite augmente, la taille des grains diminue.
- ✓ Endommagement du substrat austénitique par la couche de martensite et extension de la déformation plastique vers le volume austénitique à la place d'une localisation surfacique ce qui engendre les macles qui sont très visibles sur les échantillons.
- ✓ Il en ressort de ces résultats de microscopie, que la mesure du taux de transformation de martensite est délicate pour ne pas dire irréalisable.
- ✓ La présence de la martensite favorise la dégradation tribologique par frottement, car la martensite rend difficile la déformation plastique du matériau. et cela revient à la sensibilité de la martensite à des ruptures fragiles.
- ✓ Il a été mis en évidence que les transformations martensitiques induites par le frottement tendaient à accroître le taux d'usure, à cause notamment de la dureté élevée de la phase martensitique.

6.1.3. Observation de la microstructure après usure de la face de profil du pion usé

La figure (III.12.) suivante présente le coté profil de la face usée du pion, enrobé dans une résine et préparé à l'analyse microscopique.

La figure nous montre qu'après l'usure, près de la limite supérieure de la zone usée, certaines bandes de glissement (des grains écrouis), des joints de grains difficiles à induire, jumelage et concentration des grains de l'austénite métastable, représentent l'écrouissage de cette zone s'est produit pendant le processus d'usure.

Vers le bas, loin de la zone usée, on peut voir des grains d'austénite, le matériau à son état vierge.

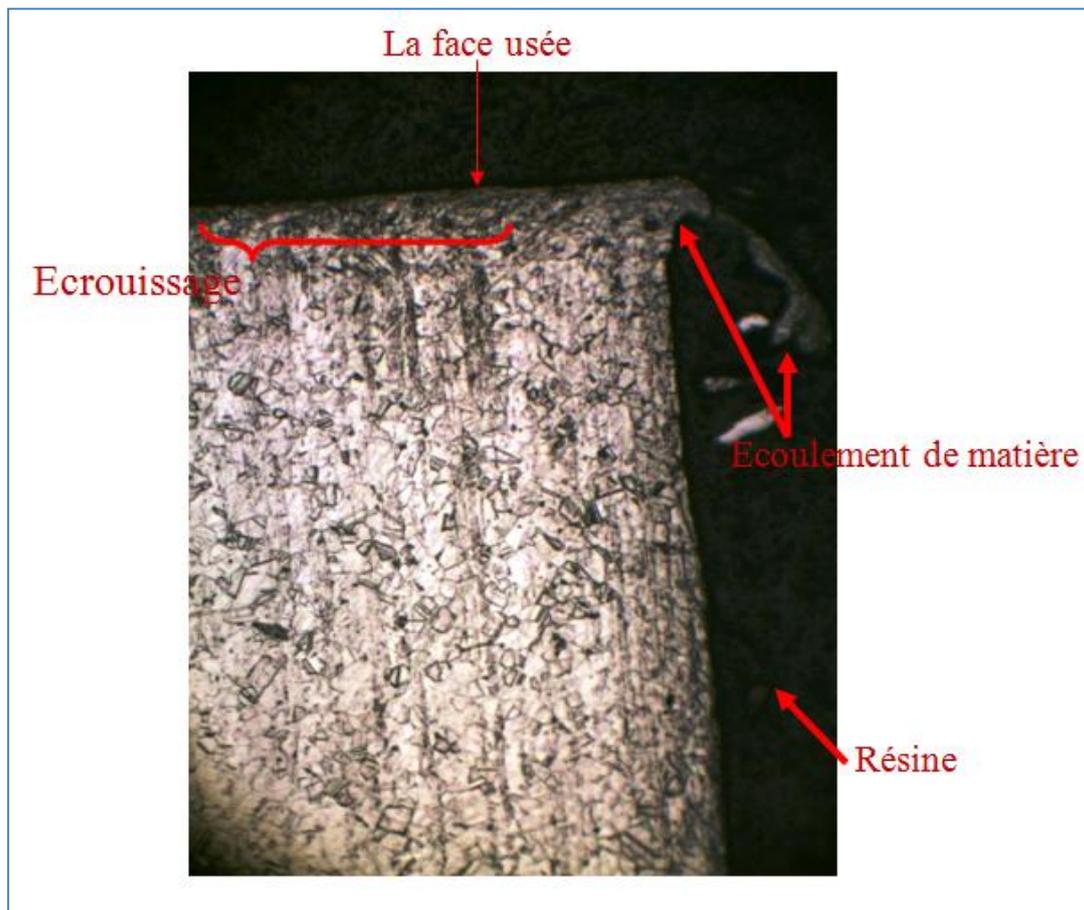


Figure III.12. Le côté profil d'un pion usé.

L'effet de la contrainte et la déformation au cours de l'essai sur la surface qui a subi l'usure a engendré un écoulement de matière, beaucoup plus important aux bords de la surface usée, ce qui est bénéfique pour la transformation de l'austénite en martensite.

6.1.4. Observation de la microstructure après usure au MEB

Les zones usées des pions ont été examinées en détail et elles sont montrées dans les figures (III.12, III.13, III.14) par microscopie électronique à balayage en mode électro-secondaire.

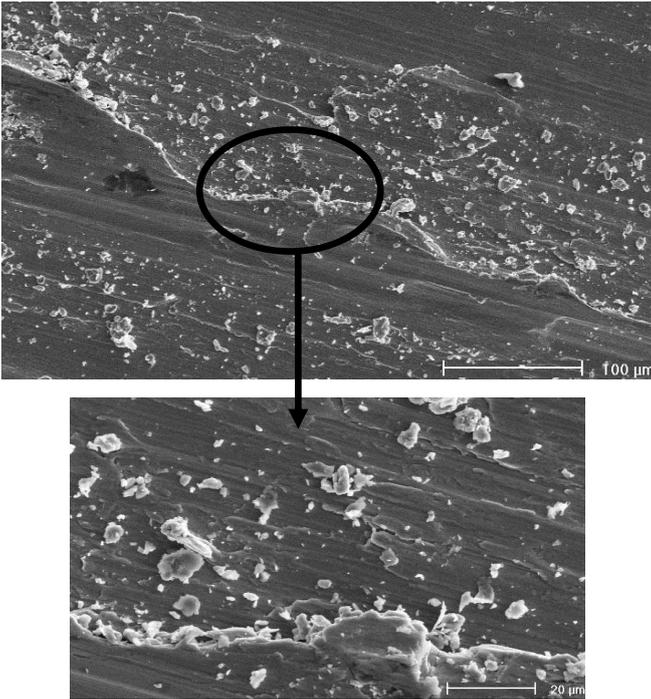


Figure III.13. Observation au MEB d'un échantillon utilisé sous une charge de 45.16 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.

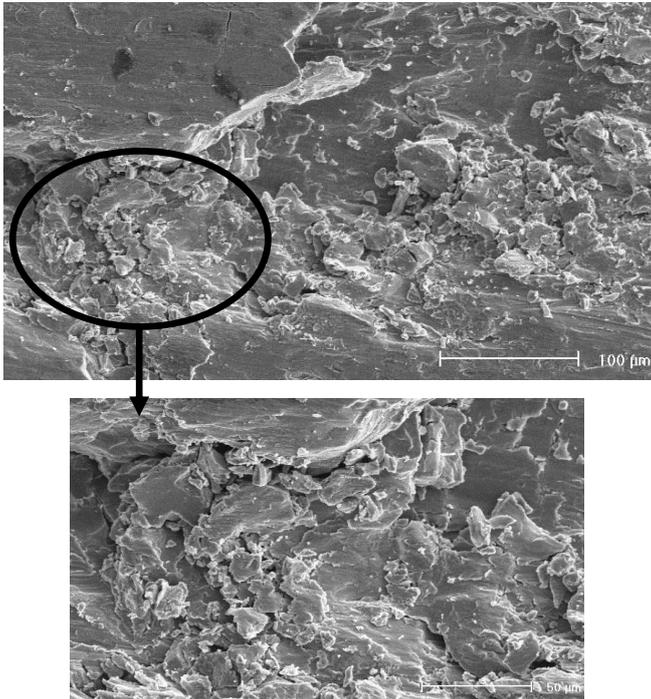


Figure III.14. Observation au MEB d'un échantillon utilisé sous une charge de 67.74 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.

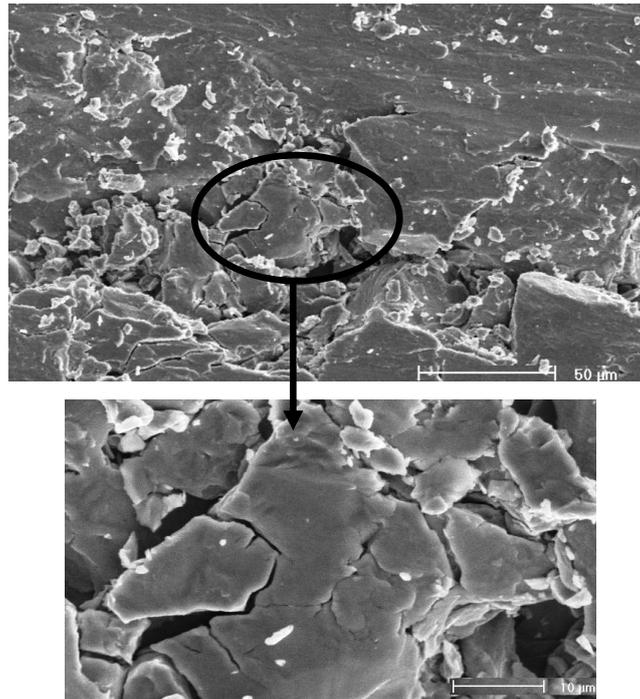


Figure III.15. Observation au MEB d'un échantillon utilisé sous une charge de 90.32 N pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.

La zone usée apparaît en gris clair dans le mode secondaire en particulier à faible grossissement.

Il existe des zones qui apparaissent clairement différentes des zones non usées, et cela revient à la nature aléatoire du contact.

La couleur blanche représente des oxydes qui sont, probablement, des particules qui s'arrachent du disque et qui restent coincées dans les pions. La température qui augmente au cours des essais d'usure favorise l'oxydation.

Des craquelures d'oxyde apparaissent nettement sur le métal de base qui est l'acier inoxydable.

6.2. Microdureté

L'évolution de la microdureté en fonction de la charge appliquée est représentée sur la figure (III.16.).

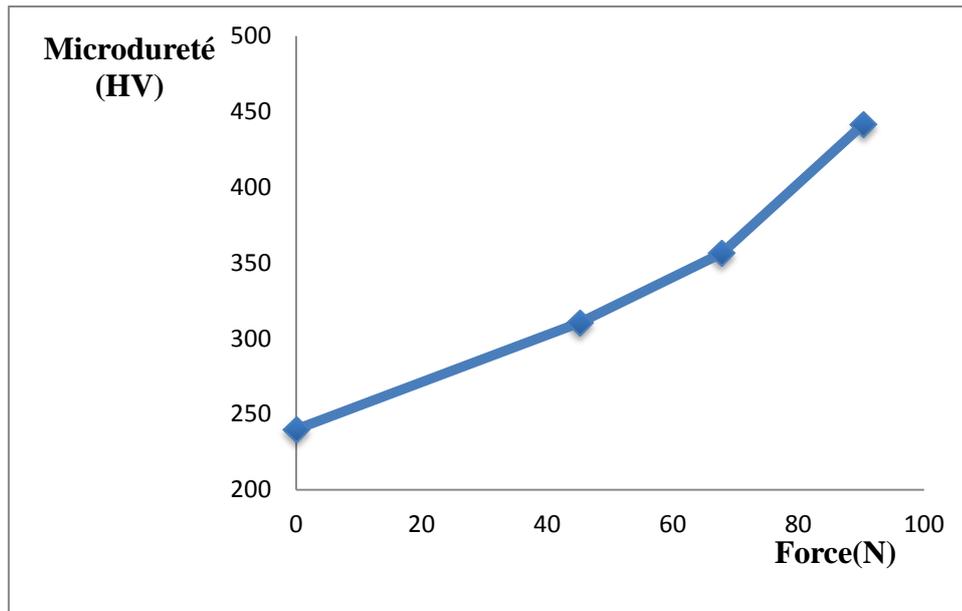


Figure III.16. Evolution de la microdureté en fonction de la charge appliquée pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.

Pour compléter les informations obtenues par des mesures de dureté (Hv) qui ont été réalisées sur les différents échantillons.

A l'état de départ, avant usure, le matériau a une dureté d'environ 250 Hv, mais la dureté augmente en fonction de la charge appliquée, car après usure, le grain austénitique a diminué et la dureté a augmenté

La teneur en carbone augmente la dureté. la martensite confère aux aciers inoxydables martensitiques une dureté très élevée et Les aciers inoxydables à faible teneur en carbone possèdent des martensites moins dures que celle des aciers à des fortes teneurs en carbone (>1%).

L'évolution de la dureté en fonction de la charge appliquée suit la même évolution que la formation de la martensite, parfois fois la dureté évolue moins rapidement revient au fait que la fraction de la martensite n'évolue presque plus et cela doit être attribué à l'écroutissage de la phase austénitique

6.3. Perte de masse

Ce graphe de la figure (III.17.) représente l'évolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.

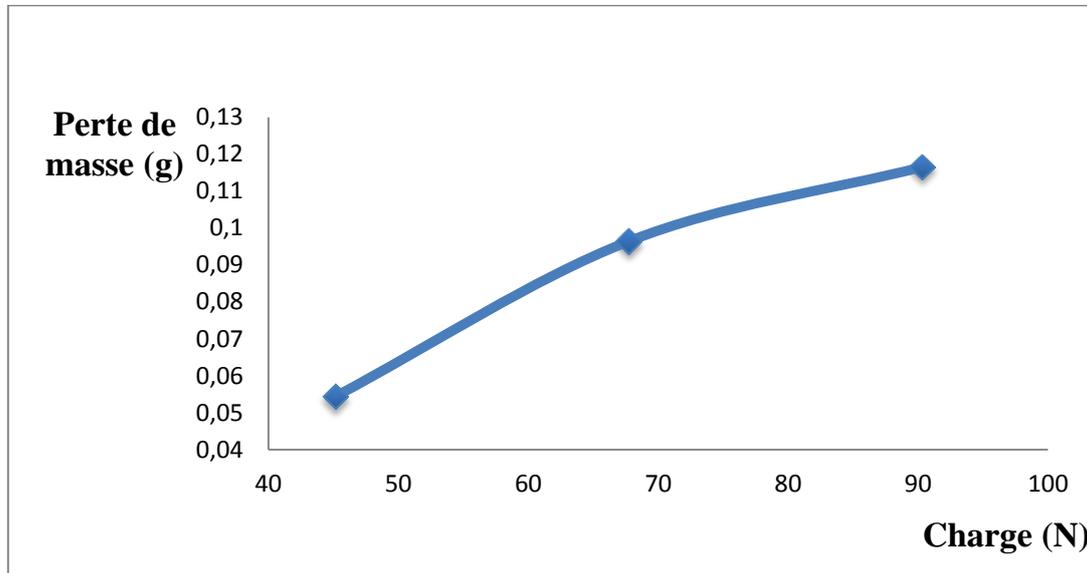


Figure III.17. Evolution de la perte de masse en fonction de la charge appliquée pour une vitesse de glissement constante 0.89 m/s.

Nous constatons que la perte de masse croît pour des charge importante signe d'une usure par abrasion plus importante aussi on peut confier l'évolution de la perte de masse à la croissance de la rugosité et aussi au durcissement qui augmente constamment avec la formation de la martensite.

6.4. Taux de la phase martensitique formée

6.4.1. Technique de traitement d'image sous Matlab

Le but de l'analyse d'image est de fournir une description quantitative de l'image ou une reconnaissance de forme et exploiter les caractéristiques morphologiques de l'image. Elle trouve des applications dans de nombreux domaines : sciences des matériaux, sciences de la vie, robotique, médecine (imagerie médicale) etc.

6.4.2. Définition du traitement d'image

Le traitement d'images est l'ensemble des méthodes et techniques opérant sur l'image, dans le but de rendre cette dernière possible, plus simple, plus efficace et plus agréable. Cette opération de traitement d'image permet d'améliorer l'aspect visuel de l'image et d'en extraire des informations jugées pertinentes.

6.4.3. Représentation des images numériques

Une image numérique est une matrice de pixels repérés par leur coordonnées (x, y) . S'il s'agit d'une image couleur, un pixel est codé par 3 composantes les plus connus étant RVB (Rouge Vert-Bleu) ou en anglais RGB (Rouge, Green, Blue). Chaque couleur est comprise au sens large entre 0 et 255, représentant respectivement les "doses" de rouge, vert et bleu qui caractérisent la couleur du pixel.

Si l'image est en couleur, le codage se fait sur 3 « niveaux » selon le mode RGB par une matrice $m \times n \times 3$, par exemple, un pixel noir sera $(0, 0, 0)$, un pixel blanc sera $(255, 255, 255)$, un pixel rouge sombre $(255, 0, 0)$, un pixel vert « moyen » $(50, 255, 50)$, un pixel bleu clair sera $(125, 125, 255)$.

S'il s'agit d'une image en niveau de gris, alors la matrice obtenue est une matrice $m \times n$ elle est composée par des composantes comprises au sens large entre 0 et 255, ses valeurs intermédiaires correspondent à des niveaux de gris allant du noir au blanc et représentent la luminosité du pixel.

S'il s'agit d'une image noir et blanc c'est une image binaire, elle contient uniquement deux niveaux de gris (noir et blanc), ses pixels sont formés de 0 et de 1. Ils permettent de stocker des images formées des teintes noires (0) et blanches (1)

Par exemple : 0 = noir et 1 = blanc.

Pour chaque point (x, y) on tire une valeur d'une variable aléatoire uniforme X :

Si $I(x, y) < X$ allumage du point (x, y) : nouveau niveau =1

Si $I(x, y) > X$ extinction du point (x, y) : nouveau niveau =0

Autrement dit, une image est une matrice $M \times N$ de valeurs entières prises sur un intervalle borné $[0, Nn]$ où Nn est la valeur maximale du niveau de gris.

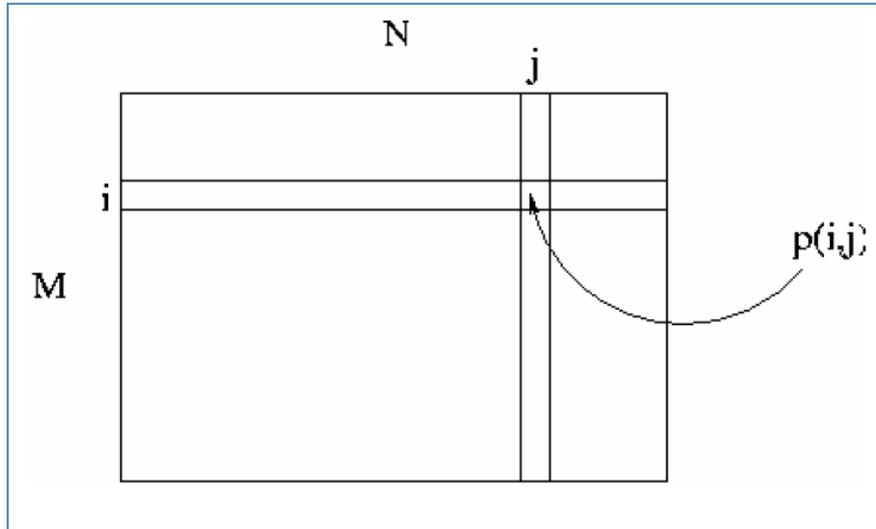


Figure III.18. Schéma représentatif d'une matrice de pixels.

$P(i, j)$ est le niveau de gris du pixel de coordonnées ligne i et colonne j dans l'image.

$P(i, j) \in [0, Nn]$.

6.4.4. Mesure du taux de la phase α'

La mesure des taux nécessite une préparation métallographique minutieuse, un polissage de finition, suivi d'une attaque électrolytique, ce qui donne une nette différence de contraste entre les phases austénitique et martensitique.

Dans ce cas, le taux de phase α' peut être mesuré, en utilisant un programme sur Matlab pour le traitement d'images qui consiste à détecter et estimer la phase considérée.

6.4.5. Etapes pour l'obtention d'une image binaire

La technique de traitement d'images permet de tirer profit des micrographies obtenues par microscopie optique d'une manière quantitative. A l'aide du logiciel Matlab, on a pu mesurer quantitativement la fraction volumique de la phase α' en exploitant la différence de contraste.

L'étude de la cinétique de précipitation de la phase α' a été réalisée pour les trois charges appliquées (54.16 N, 67.74 N, 90.32N). Cependant, nous nous contentons dans ce travail de présenter et de suivre l'évolution du taux de la phase α' qui précipite en fonction de la charge appliquée

Donc, les images ci-dessous représentent les étapes suivies pour l'obtention d'une image binaire servant à estimer le pourcentage de la phase α' .

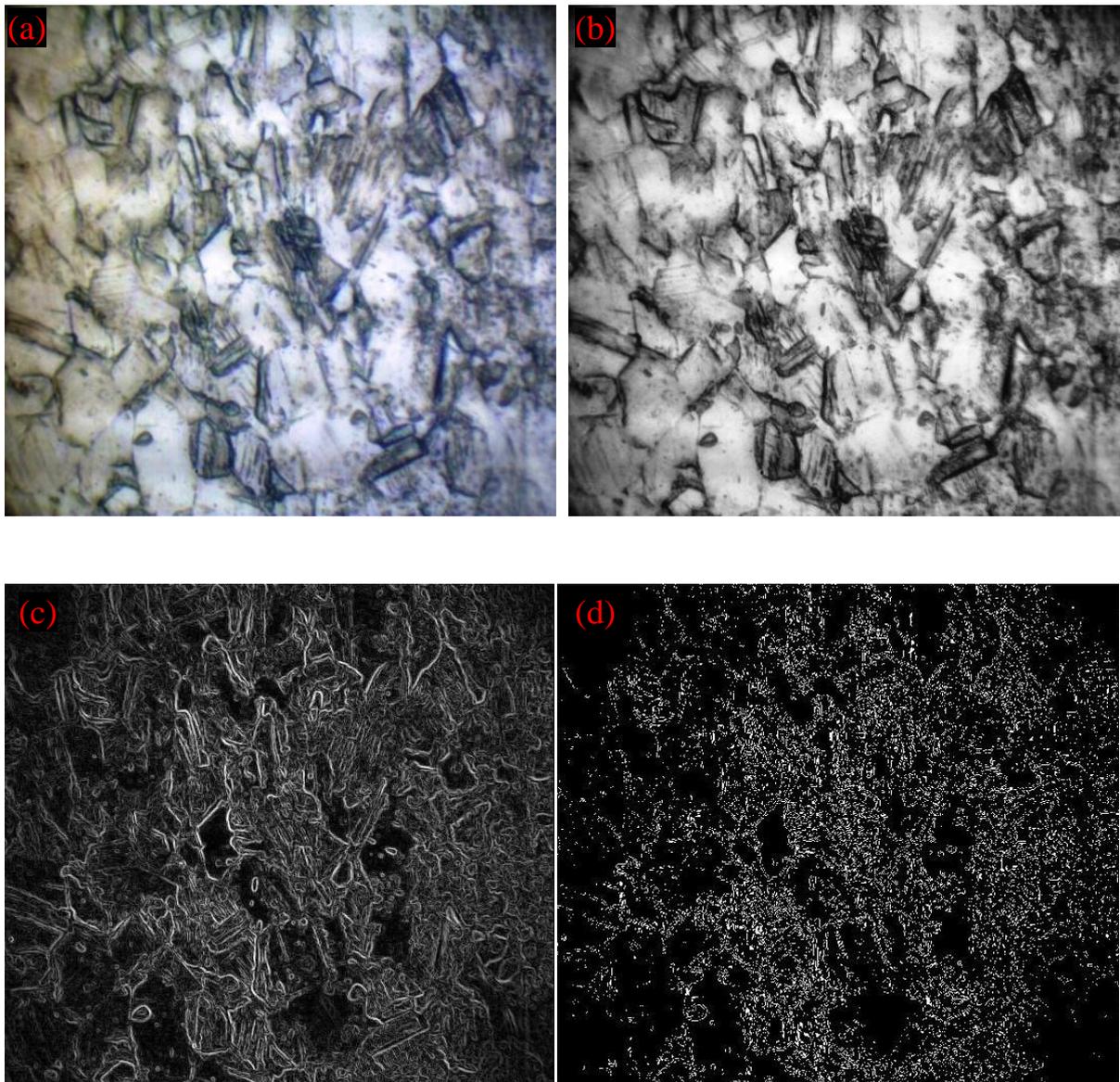


Figure III.19. Micrographie de l'échantillon utilisé sous une charge de 45.16 N, a) image initiale non traitée, b) image transformée en nuances de gris, c) image filtrée, d) image finale binaire.

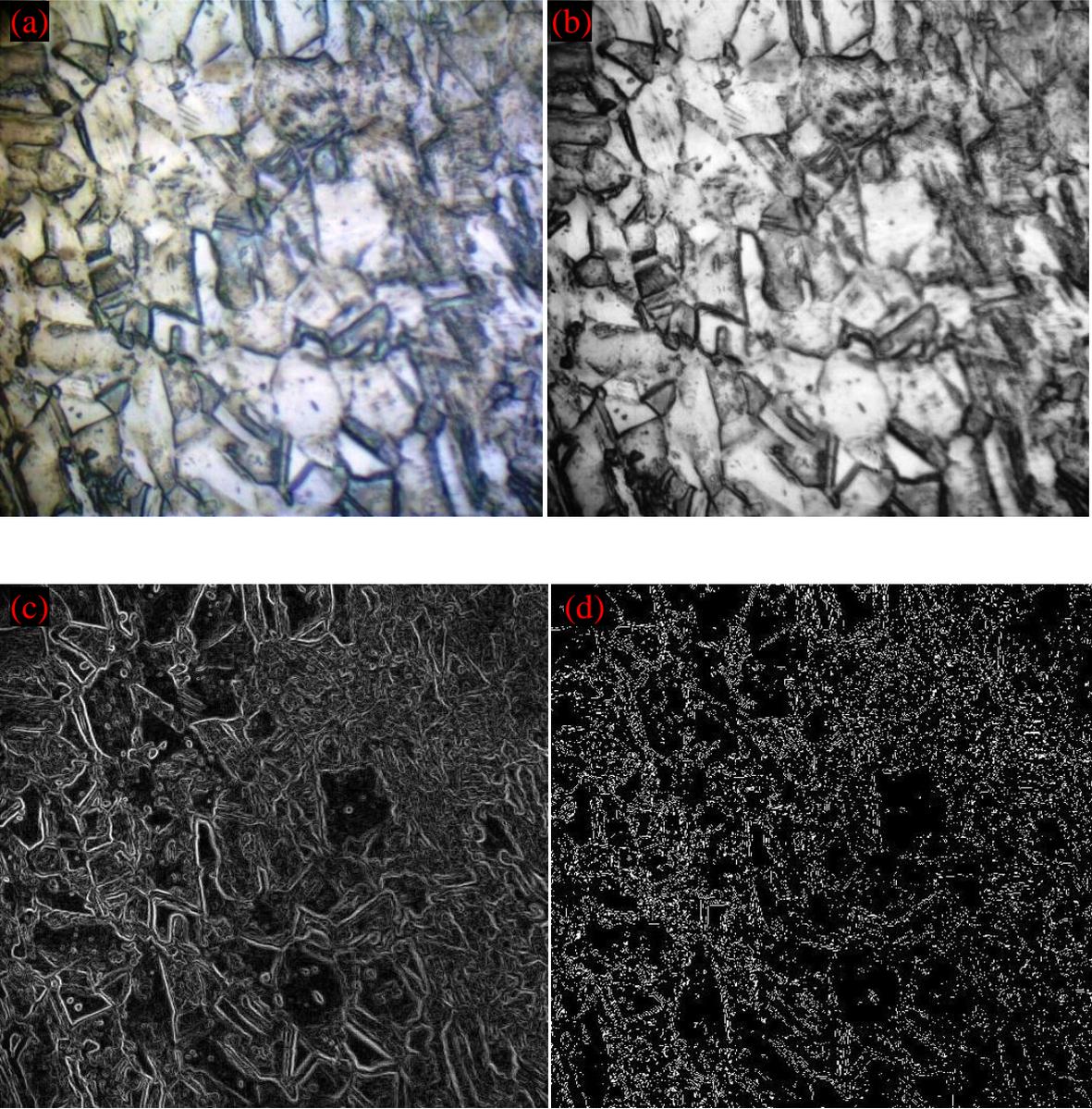


Figure III.20. Micrographie de l'échantillon utilisé sous une charge de 67.74N, a) image initiale non traitée, b) image transformée en nuances de gris, c) image filtrée, d) image finale binaire.

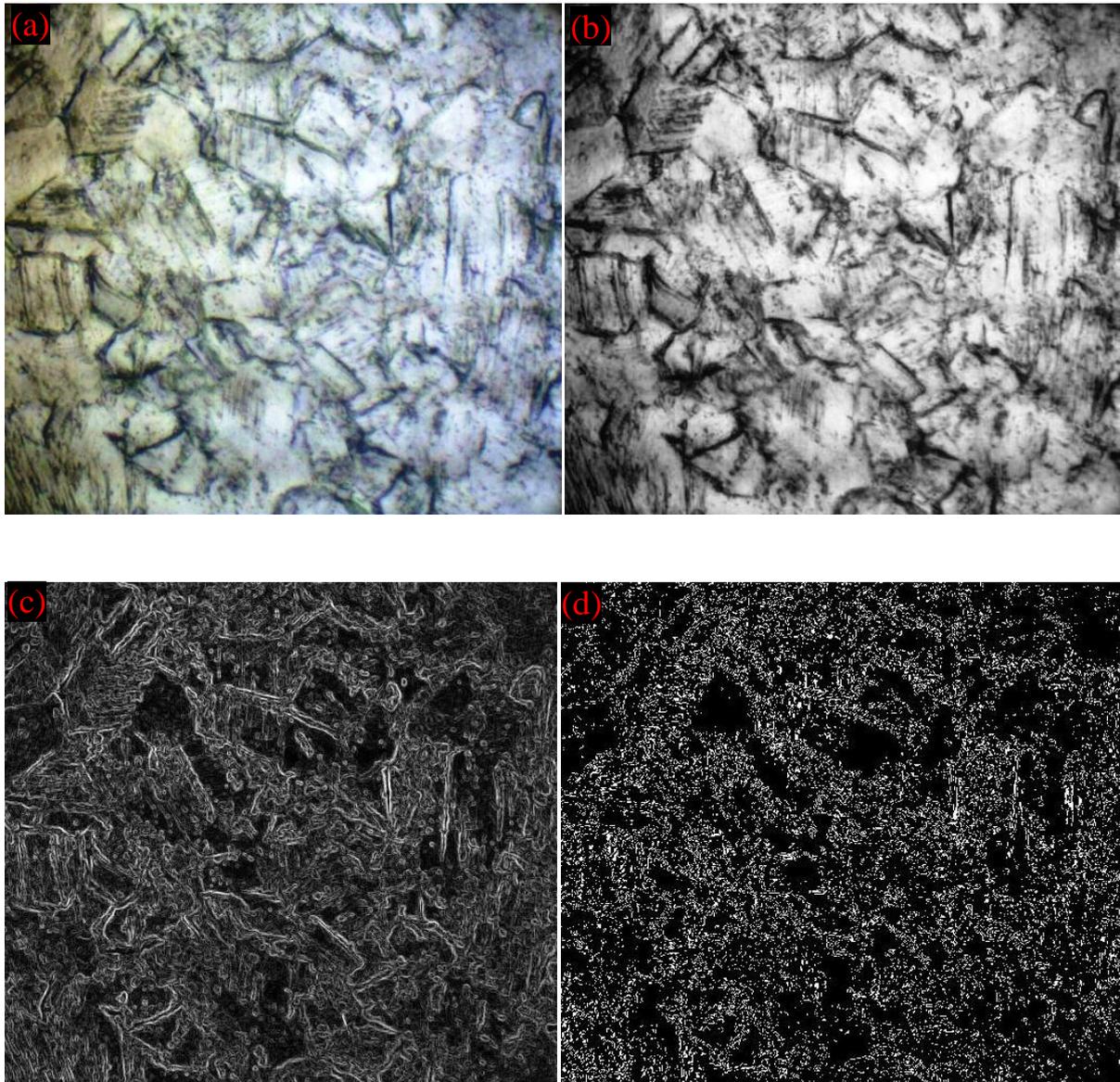


Figure III.21. Micrographie de l'échantillon utilisé sous une charge de 90.32N, a) image initiale non traitée, b) image transformée en nuances de gris, c) image filtrée, d) image finale binaire.

6.5. Organigramme du traitement d'image

L'organigramme de la figure (III.22.) nous permet de connaître les étapes suivies pendant la procédure du traitement d'image :

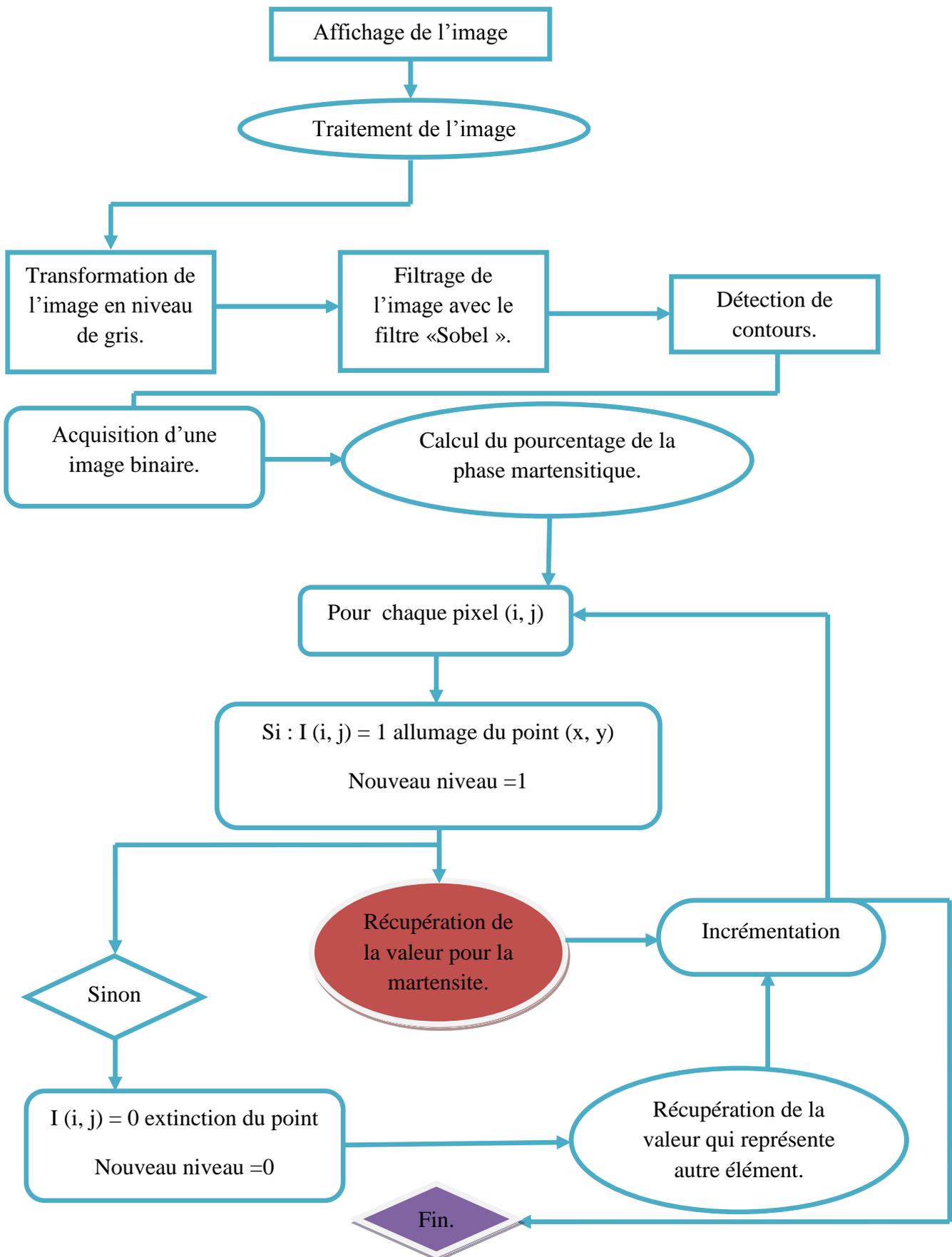


Figure III.22. Organigramme du programme de traitement d'image.

Les étapes suivies pour le calcul de la phase α' sont illustrés dans les figures (III.19. - III.20. - III.21).

Donc au premier lieu, nous avons procédé au traitement de l'image, nous avons transformé notre image initiale au niveau de gris pour réduire notre palette de couleur de 0 à 255, cela permet à répartir un dégradé de gris entre le noir et le blanc.

En suite nous avons effectué un filtrage qui nous a permis de rendre l'image plus claire sans bruit, le filtrage permet aussi de régler la sensibilité de l'image. Après le filtrage, nous avons détectée les contours avec des fonctions qui permettent d'extraire les contours des éléments présents sur l'image.

Et enfin, on a exécuté notre programme pour le calcul du pourcentage de la phase α' .

L'évolution de formation de la phase α' est montrée par la figure (III.23.), ce graphique illustre les étapes de précipitation ayant lieu lors des essais d'usure.

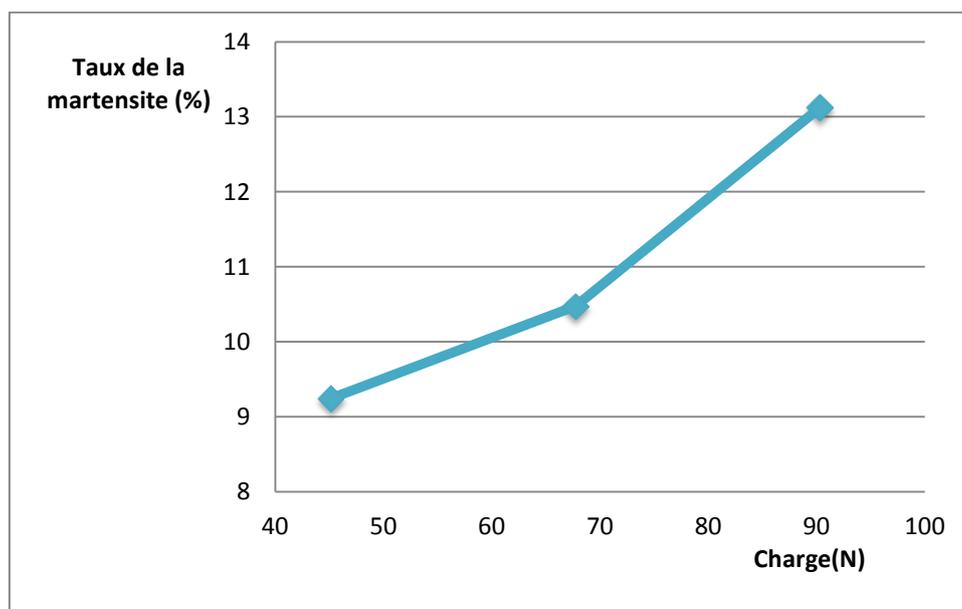


Figure III.23. Taux de la phase α' en fonction de la charge appliquée lors des essais d'usure.

D'après la courbe, on constate que la fraction volumique de la phase α' a évolué d'une façon progressive.

Le taux de la phase α' pour une charge de :

- 45.16 N est de 9.25% de martensite α' ,
- 67.74 N est de 10.47% de martensite α' ,
- 90.32 N est de 13.12% de martensite α' .

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré les moyens utilisés lors des essais expérimentaux et les différents résultats obtenus. Notre étude est consacrée essentiellement à l'analyse microstructurale qui a pour objectif principal de déterminer le taux de la martensite formée sur la face de contact du pion en frottement avec un disque.

L'intérêt de connaître l'évolution microstructurale qui se développe lors de l'usure est de mettre en évidence le fait que la nuance étudié (304L) est un acier inoxydable austénitique qui peut avoir un effet TRIP lors de l'application d'une contrainte. Sa forte capacité d'absorption d'énergie se traduit par une déformation plastique.

*CONCLUSION ET
PERSPECTIVES*

Conclusion et perspectives

Les essais d'usure réalisés sur la nuance 304L ont comme but de déterminer le taux de martensite engendrée par l'usure.

Ce sujet a fait appel à plusieurs domaines de la mécanique des matériaux tels que, le comportement des aciers inoxydables, la fatigue des matériaux, les transformations de phases et la caractérisation microstructurale. Les travaux menés ont permis de faire les principales conclusions résumées ci-dessous :

- ✚ La déformation plastique induite par la contrainte appliquée lors des essais d'usure, favorise la transformation de l'austénite en martensite, et cela s'effectue après écrouissage de l'austénite.
- ✚ Après les essais d'usure, des mesures de microdureté ont été faites, à ce niveau nous avons observé que le comportement de notre acier 304L tend à être de plus en plus dur respectivement avec l'augmentation de la charge appliquée. Cette dureté nous l'avons estimé être le résultat de la formation d'une martensite dure.
- ✚ Au cours des essais, le mécanisme d'usure était de l'usure abrasive. Nous avons remarqué une éjection des débris (détachement de matière du pion).
- ✚ Pendant les essais d'usure réalisés sur le tribomètre, nous avons constaté une élévation de la température à l'interface de contact du pion en frottement avec un disque, ce qui favorise la transformation martensitique.
- ✚ D'après les micrographies des faces usées, nous avons détecté une transformation partielle de l'austénite en martensite car nous avons observé des grains d'austénite non transformés.
- ✚ Les transformations martensitiques induites par le frottement tendaient à accroître le taux d'usure, à cause notamment de la dureté élevée de la phase martensitique.
- ✚ L'estimation du taux de la martensite α' formée au cours des essais d'usure a été réalisée avec la méthode de traitement d'image tout en exploitant une toolbox « image processing » dans Matlab. Le résultat final après exécution du programme sur

Conclusion et perspectives

différentes micrographie est que : la martensite détectée dans les échantillons usés augmente avec l'augmentation de la charge appliquée.

- ✚ Notre travail prend fin en évoquant quelques perspectives et éléments de continuation dans le domaine de recherche. Les perspectives éventuelles seraient d'approfondir les travaux entamés sur l'usure en faisant varier les différents paramètres : la vitesse, la température, la rugosité, la dureté... Souhaitons aussi qu'il soit complété par d'autres techniques numériques d'analyse d'images en utilisant d'autres logiciels tels que : Atlas, ImageJ, Aphelion...

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Michel DUPEUX, Aide mémoire science des matériaux, Edition Dunod, Paris, 2004.
- [2] Adel BELATTAR, Analyses multi-échelles du comportement et la durée de vie d'aciers inoxydables 304L sous sollicitations cycliques avec pré-écrouissage, thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées (insa) de Rouen, 2013.
- [3] C.Pierre-Jean, Acier inoxydable, Critère de choix et structure, Technique de l'ingénieur, traité matériaux métalliques, Paris 200.
- [4] Gypel, P. & Norbert, A. Constitution et propriétés. Les aciers inoxydables : Propriétés, mise en œuvre, emploi, normes. Technique et Documentation-Lavoisier, 1990.
- [5] Naima OUALI, comportement au vieillissement et à la restauration par traitement thermique de l'acier inoxydable austéno-ferritique SAF 2205. Mémoire de magister, université Saad DAHLAB Blida, 2012.
- [6] Jérôme SERRI, Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement plastique d'aciers à transformation martensitique. Applications à la mise en forme. Thèse de doctorat à l'Université Paul Verlaine de Metz
- [7] Robert C.S. Effect On Carbon On The Volume Fractions And Lattice Parameters Of Retained Austenite And Martensite. Trans AIME, 1953.
- [8] Bagher Mohammad SADEGHI, Analyse et identification du comportement mécanique d'aciers à effet triaxial à partir de mesures de champs cinématiques, thèse doctorat, Paris Tech, 2010.
- [9] Madeleine Durand-Charre, La microstructure des aciers et des fontes, genèse et interprétation, Paris : Sirpe, 2003.
- [10] Gobin Pierre François, Guenin Gérard, Morin Michel et Robin Michel, «Transformations de phases à l'état solide, transformations martensitiques». Année au département Génie Physique et Matériaux. Lyon : INSA, 1978.
- [11] E. Fukushima, Japanese Journal of Materials and Strength, Vol10, (1975).

Références bibliographiques

- [12] Mohamed Reda BERRAHMOUNE, Transformation martensitique et rupture différée dans l'acier austénitique instable 301LN, thèse de doctorat école nationale d'arts et métiers.
- [13] Maher SHAIRA, Caractérisation non destructive de la transformation martensitique de l'acier 304L induite par déformation cyclique, Thèse de doctorat à L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2006.
- [14] A.R. Marder et G. Krauss, The morphology of martensite in Iron-Carbon alloys, Transaction of the ASM, 1967.
- [15] G. Krauss et A.R. Marder, The morphology of martensite in Iron carbon alloys Met. Trans, 1971.
- [16] T. Maki, Materials Science Forum, « Microstructure and mechanical behaviour of ferrous martensite »,1990.
- [17] : Muriel HANTCHERLI. Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des mines, 2010.
- [18] Murry Guy, «Transformations dans les aciers», In : Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques, 1998.
- [19] La microstructure des aciers et des fontes, genèse et interprétation, Paris: Sirpe.
- [20] B. Thomas et J.H Schmitt, Durcissement des aciers : rôle de la microstructure, Techniques de l'ingénieur, M4341, Traités Matériaux Métalliques (2002).
- [21] Adel BELATTAR. Analyses multi-échelles du comportement et la durée de vie d'aciers inoxydables 304L sous sollicitations cycliques avec pré-écrouissage, these de doctorat INSA de Rouen. D'après Durand-Charre, 2003.
- [22] Lecroisey F. and Pineau A. Martensitic transformation induced by plastic deformation in the Fe-Ni-Cr-C system, Metallurgical transactions, February 1972.
- [23] Roth et al, 2010 : Roth, I., M. Kübbeler, U. Krupp, H. J. Christ & C. P. Fritzen "Crack initiation and short crack growth in metastable austenitic stainless steel in the high cycle fatigue regime, 2010.

Références bibliographiques

- [24] Olson, G. B., Cohen, M. "A mechanism for the strain-induced nucleation of martensitic transformation." *Journal of the Less-Common Metals* 28, 1972.
- [25] MITTER W., Umwandlungsplastizität und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung von Eigenspannungen. *Materialkundlich-Technische*, , Reihe 7, Gebr Borntraeger, Berlin, Stuttgart, Allemagne, 1987.
- [26] Diani, J. M. & D. M. Parks. "Effects of strain state on the kinetics of strain-induced martensite in steels." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998.
- [27] Breedis & Robertson, The martensitic transformation in single crystals of iron-chromium-nickel alloys." *Acta Metallurgica*, 1962.
- [28] Béranger G., Henry G. et Sanz G., «Le livre de l'acier». Paris : Tec & Doc Lavoisier, 1994.
- [29] L. Kaufman et M. Cohen, Thermodynamics and kinetics of martensitic transformations, *Progress in Metal Physics*, 1958.
- [30] D.P. Dunne et C.M. Wayman, The crystallography of ferrous martensites, 1971.
- [31] E.J. Fasiska et H. Wagenblas, Dilatation of alpha-iron by carbon, *Trans. AIME*, 1967.
- [32] Cunat J.-P, Aciers inoxydables, Critères de choix et structure, *Technique de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques*, vol MB4, dossier M4540, Paris. 2000.
- [33] Petit-Grostabussiat, S. Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France 2000.
- [34] Taleb, L., Cavallo, N. et Waeckel, F. Experimental analysis of transformation plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2001.
- [35] Olson G.B. et M, Stress Assisted Isothermal Martensitic Transformation : Application to TRIP steels. *Metall.Trans*, 1982.

Références bibliographiques

- [36] Olson G.B Et Cohen M. Kinetics Of Stain-Induced Martensitic Nucleation, 1975.
- [37] Magee, C. Transformation Kinetics, Microplasticity and Ageing of Martensite in Fe – 31 – Ni. Thèse de doctorat, Carnegie Institute of Technologie University, Pittsburgh, 1966.
- [38] Achraf BOUDIAF. Relation microstructure, comportement macroscopique dans les aciers : Effet de la taille de grain austénitique sur la plasticité de transformation. Thèse de doctorat, l'EMP et de l'INSA de Rouen, 2011.
- [39] Greenwood, G. et Johnson, R. The deformation of metals under small stresses during phase transformations. Proc. Roy. Soc., 1965.
- [40] Philippe KAPSA et Michel CARTIER. Techniques de l'ingénieur « usure des contacts mécaniques ».
- [41] G. ZAMBELLI, L. VINCENT, Matériaux et Contacts – une approche tribologique, Presses polytechniques et Universitaires Romandes, 1998.
- [42] Olivier BARRAU, Étude du frottement et de l'usure d'acier à outils de travail à chaud, Thèse de doctorat, 2004.
- [43] Rapport de synthèse endommagement des matériaux par abrasion, Agence Rhône-Alpes pour la Maîtrise des Matériaux, 1995.
- [44] A. Van Herpen, B. Reynier, C. Phalippou, Effect of test duration on impact/sliding wear damage of 304L stainless steel at room temperature: metallurgical and micromechanical investigations, 2001.
- [45] G. Blanc, Deformation mechanisms of austenitic stainless steel, Les aciers inoxydables, Les Editions de Physique, Les Ulis-France, 1990.
- [46] K. Hsu, T. Ahn, D. Rigney, Friction, wear and microstructure of un-lubricated austenitic stainless steel, 1980.
- [47] Z.Y. Yang, G.S. Naylor, D. Rigney, Sliding wear of 304 and 310 stainless steels, Wear 1985.
- [48] Jean DHERS. Usure, avaries, corrosion : facteurs de destruction des matériels industriels. Editeur : Technique et vulgarisation. 1978.