

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie
Département : Génie Mécanique.
Domaine : Sciences et techniques
Filière : Génie mécanique
Spécialité : Génie des matériaux

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**Caractérisation des matériaux destinés aux chaînes à
rouleaux de transmission mécanique sous l'effet du
brunissage par glissement**

Présenté par : *Merabet Billel*

Encadrant : *Hamadache Hamid* Grade Professeur Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

Chaoui Kamel	Pr.	UBMAnnaba	Président
Hamadache Hamid	Pr.	UBMAnnaba	Encadrant
Zemouri Zahia	Pr.	UBMAnnaba	Examineur
Menail Younes	MCA	UBMAnnaba	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Je remercie en premier dieu pour tout.

Je remercie en second mes parents ,qui ont sacrifié leur vie pour notre bien .

En fin mes sincères reconnaissances et gratitudes à tous mes enseignants , du primaire aux études supérieurs et en particulier le directeur de ce mémoire Dr h.hamadache .

Je remercie également le président et les membres de jury d'avoir accepter d'examiner mon travail.

TABLE DES MATIEURS

Introduction Générale

Introduction Générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Les chaînes de transmission mécanique (chaîne a rouleaux)

I.1 Les composants d'une chaîne de transmission mécanique.....	4
I.1.1 Maillons et maillons de liaison.....	4
a) Maillons	4
b) Maillons de liaison	4
I.1.2 Pignons et roues dentée.....	5
a) Pignons	5
b) Roues dentées	5
I.1.3 Galets de tension.....	6
a) Fonction des galets de tension	6
b) Types de galets de tension	6
I.1.4 Lubrification et entretien des composants.....	6
a) Lubrification	7
b) Nettoyage et dégagement de la saleté	7
c) Tension de la chaîne	7
I.2 Les types de chaînes de transmission mécanique.....	8
I.2.1 Chaînes à rouleaux.....	8
I.3 Structure des chaînes à rouleaux	8
I.4 Avantages des chaînes à rouleaux	9
a) Haute capacité de charge	9
b) Transmission de puissance efficace	9
c) Durabilité	9
d) Polyvalence	9
I.5 Inconvénients des chaînes à rouleaux	9
I.5 Différents types de chaines	10

I.5.1 Chaînes à maillons plats.....	11
I.5.1.1 Structure des chaînes à maillons plats	11
I.5.1.2 Utilisations des chaînes à maillons plats	11
I.5.2 Chaînes à denture asymétrique.....	12
I.5.2.1 Structure des chaînes à denture asymétrique	13
I.5.2.2 Avantages des chaînes à denture asymétrique	13
a) Réduction du bruit	13
b) Réduction des vibrations	13
c) Amélioration de l'efficacité	14
d) Durabilité	14
I.5.3 Chaînes à blocs.....	14
I.5.4 Les chaînes à maillons coudés	15
I.5.5 Les chaînes à mailles jointives	15
I.6 Assemblage et installation d'une chaîne de transmission mécanique.....	16
I.6.1 Préparation des composants	16
a) Inspection initiale	16
b) Nettoyage	16
c) Lubrification	16
d) Alignement et ajustement	16
I.6.2 Montage des maillons et des pignons	17
I.6.2.1 Préparation des maillons.....	17
I.6.2.2 Montage des maillons sur les pignons	17
I.6.2.3 Vérification de l'alignement et de la tension	18
I.6.2.4 Fixation des extrémités de la chaîne	18
I.6.2.5 Réglage de la tension de la chaîne.....	18
I.6.2.6 Vérification de l'alignement	19
I.7 Les caractéristiques dynamiques des chaînes de transmission mécanique	19
I.8 Les problèmes courants et la maintenance des chaînes de transmission mécanique ...	20
a) Usure de la chaîne	20
b) Maintenance régulière	20
I.9 Les applications des chaînes de transmission mécanique	21
a) Industrie automobile	21
b) Industrie manufacturière	21
c) Équipements agricoles	21

d) Équipements de construction	21
e) Équipements industriels et de manutention	22
f) Équipements de transmission de puissance	22
I.10 Les avancées technologiques dans les chaînes de transmission mécanique	22
a) Matériaux et revêtements avancés	22
b) Conception optimisée des maillons et des pignons	22
c) Chaînes à faible entretien	23
d) Chaînes à rendement élevé	23
e) Surveillance et maintenance prédictive	23
f) Modélisation et simulation avancées	23
I.11 Etudes d'une chaîne à transmission mécanique	24
I.11.1 Caractéristiques géométriques	24
I.11.2 Charges appliquées	24
I.11.3 Calcul de la puissance et du couple	24
I.11.4 Choix de la chaîne et des composants	24
I.11.5 Analyse de la durée de vie et de la lubrification	24
I.11.6 Analyse de la tension de la chaîne	25
I.11.7 Analyse de la fatigue	25
I.11.8 Maintenance et lubrification	25
I.11.9 Analyse de la dynamique de la chaîne	25
I.12 Conclusion.....	26

Chapitre II. Matériaux et essais mécaniques

II.1 Introduction.....	28
II.2 Dégradation d'une structure et propriétés mécaniques	28
II.2.1 Dégradation d'une structure.....	28
II.2.2 Intérêt des propriétés mécaniques.....	29
II.3 Les aciers de traitements thermiques.....	30

II.4	Elasticité et plasticité.....	30
II.5	Concept de la mécanique de la rupture et ténacité.....	30
II.5.1	Concept fondamental	30
II.5.2	Facteur d'intensité de contrainte	33
II.6	L'état des surfaces	34
II.6.1	Généralités.....	34
II.6.2	Défauts géométriques	35
II.6.3	Rugosité.....	35
II.6.4	Paramètres de rugosité.....	36
II.7	Essais mécaniques.....	37
II.7.1	Intérêt des essais.....	37
II.7.2	Essais dureté	38
II. 7.2.1	Domaines de la dureté	38
II. 7.2.2	L'essai de dureté Vickers.....	40
II.8	Essai de traction.....	41
II.8.1	Intérêt et déroulement de l'essai	41
II.8.2	Courbes conventionnelle et rationnelle.de traction.....	43
II.8.3	Propriétés de traction	44
II.8.4	Mesure d'après l'essai de traction.....	45
II.9	Essai de fatigue	46
II.9.1	Description de la fatigue d'une piece metalique	46
II.9.2	Rupture en fatigue d'une éprouvette lisse de traction compression.....	48
II.9.3	Courbes de fatigue.....	49
II.9.4	Fatgue des détails structuraux	52
II.10	Conclusion.....	53

Chapitre III. Le brunissage

III.1	Introduction.....	55
III.2	Définition et principe.....	55

III.3 Intérêt et paramètres du brunissage.....	56
III.4 Effets du brunissage	57
III.4.1 Effets sur la qualité géométrique de surface.....	57
III.4.2. Effets sur la qualité physique de surface.....	61
III.4.3. Effets sur la qualité mécanique de surface.....	64
II.5. Conclusion.....	67

Chapitre IV. Matériaux et techniques expériment

IV.1 Introduction	69
IV.2 Matériaux.....	69
IV.2.1 Définition.....	69
IV.2.2. Composition chimique.....	69
IV.2.3	
Caractéristiques	
mécaniques.....	70
VI.2.4. Microstructure des aciers.....	70
IV.3 Eprouvettes.....	71
IV.3.1 Géométrie.....	71
IV.3.2 Gamme de préparation	72
IV.4 Essais de traction sur une éprouvette plate.....	72
IV.5 essai de fatigue sur eprouvet plate.....	73
IV.5 .1 Paramètres de l'essai	73
IV.5 .2 Surveillance et enregistrement	74
IV.6. Brunissage	74
IV.6.1. Dispositif de brunissage	74
IV.6.2 Conditions du brunissage	75
IV.7 Mesure de rugosité	75

Chapitre V. Résultats & Discussions

V.1. Influence du brunissage sur la rugosité	78
V.2 Influence du brunissage sur la microdureté	81

V.3 Influence du brunissage sur la résistance à la traction.....83

V.4 Influence du brunissage sur la tenue en fatigue84

Conclusion Générale

Conclusion Générale.....89

LISTEX DES FIGURES

Chapitre I : Les chaînes de transmission mécanique (chaîne a rouleaux)

Fig. I.1 Chaînes à rouleaux.....	8
Fig. I.2 Chaînes à maillons plats.....	11
Fig. I.3 Chaînes à denture asymétrique.....	13
Fig. I.4 Chaînes à blocs.....	14
Fig. I.5 chaînes à maillons soudés.....	15
Fig. I.6 chaînes à mailles jointives.....	15

Chapitre II. Matériaux et essais mécaniques

Fig. II.1 Rupture d'un solide : a) solide idéal, b) solide soumis à une force de traction, c) rupture.....	31
Fig. II.2 Rupture des matériaux : a) Rupture fragile de l'acier du Titanic, b) Rupture ductile d'un acier A36	32
Fig. II.3 Les trois modes de rupture.....	32
Fig. II.4 Fissure traversante de longueur $2a$ dans une plaque infinie	33
Fig. II.5 Représentation schématique en coupe d'une surface.....	34
Fig. II.6 Défauts géométriques de différents ordres.....	35
Fig. II.7 Rugosité moyenne arithmétique.....	36
Fig. II.8 Rugosité totale moyenne.....	36
Fig. II.9 Rugosité totale maximale.....	37
Fig. II.10 Définitions des différents domaines de dureté.....	39
Fig. II.11 Principe de dureté Vickers.....	40
Fig. II.12 Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique.....	41
Fig. II.13 Etat des contraintes dans une éprouvette soumise à un essai de traction :a) la force s'exerce sur le plan xy perpendiculaire à l'axe de traction ; b) la force s'exerce sur un plan faisant un angle avec l'axe de traction.....	42
Fig. II.14 Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6.....	43

Fig. II.15 Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile).....	44
Fig. II.16 Comparaison de la ténacité de trois matériaux (I, II et III), grâce à l'aire sous leurs courbes de traction.....	45
Fig. II.17 Faciès de rupture de fatigue (manivelle de pédalier de vélo)	47
Fig. II.18 Courbe de fatigue de Wöhler (<i>Wöhlerlinie</i> en allemand), représentant en échelles logarithmiques la contrainte à rupture en fonction du nombre de cycles de chargement.....	50

Chapitre III. Le brunissage

Fig. III.1. Principe de fonctionnement du brunissage.....	55
Fig. III.2 Outil du brunissage .commercialisé par la firme <i>COGSDILL TOOL</i> : a) partie active, b) corps de l'outil.....	56
Fig. III.3. Différentes surfaces à traiter par brunissage.....	56
Fig. III.4 Lissage du profil de surface par brunissage d'acier <i>41Cr4</i> , <i>HT-S1</i> (a), <i>HT-W1</i> (b), <i>HT-S1 + SF</i> (c), <i>HT-W2 + SF</i> (d), <i>HT-S2 + BUR</i> (e), and <i>HT-W2 + BUR</i> (f),.....	58
Fig. III.5. Effet du brunissage sur la rugosité de surface.....	58
Fig. III.6 Influence de la vitesse de brunissage sur la rugosité.....	59
Fig. III.7. Influence de l'avance sur la rugosité : a) tournage, b) brunissage.....	60
Fig. III.8. Variation de la rugosité : a) en fonction du rayon d'outil brunissage [57], b) en fonction d'un nombre de passe.....	60
Fig. III.9. Influence de la vitesse de brunissage sur la dureté de l'acier <i>RB40</i>	61
Fig. III.10. Influence de l'avance de brunissage sur la dureté de l'acier <i>ST37</i> après brunissage pour: $V=250\text{tr/mn}$; $f=0,054\text{mm/tr}$; $P= 25\text{Kgf}$; $r= 3\text{mm}$ et $i=1\div 5$	62
Fig. III.11. Influence de l'effort de brunissage sur la dureté : a) acier <i>35NC6</i> ; b) aluminium (<i>AISI 1045</i>).....	63
Fig. III.12. Influence de rayon de l'outil sur la dureté.....	63
Fig. III.13. Influence de nombre de passe de brunissage sur la dureté.....	64
Fig. III.14. Contraintes résiduelles obtenues sur une pièce forgée à froid : a) état de brunissage, b) état de tournage, c) état de grenailage.....	65
Fig. III.15 Evolution des contraintes résiduelles avec la vitesse sur pièces en <i>6061-T6</i> traitée par brunissage : a) en fonction du nombre de passe, b) en fonction de la profondeur de pénétration..	66

Fig. III.16. Courbe de Wöhler d'alliage de magnésium AZ80 Pour différent traitements : <i>EP= electrolytical polishing, RB=Roller burnishing, SP=Shot peening</i>	66
---	-----------

Chapitre IV. Matériaux et techniques expérimentales

Fig. IV.1 Microstructures des aciers :a)42CD4, b)100C6.....	71
Fig . IV.2 Eprouvete de traction.....	71
Fig. IV.3 une fraiseuse.....	72
Fig. IV.4 Machine de traction Zwick /Roell 50 KN.....	73
Fig .IV.5 Machine de fatigu.....	74
Fig. IV.6 dispositife du Brunissage.....	75
Fig. IV.7 Rugosimètre someco RT-10.....	76

Chapitre V. Résultats & Discussions

Fig. V.1 Influence du Brunissage sur la rugosité.....	78
Fig. V.2 Effet du brunissage sur la rugosité de l'acier 100C6.....	79
Fig.V.3 Influence des paramètres du brunissage sur la rugosité a) Diagramme de surface, b) Graphique de contour	80
Fig. V.4 Influence des paramètres du brunissage sur la rugosité a) Graphique des effets principaux b) Graphiques de interactions.....	80
Fig. V.5 Effet du brunissage sur la microduret HV de l'acier 100C6.....	81
Fig. V.6 Influence des paramètres du brunissage sur la microdureté a) Diagramme de surface, b) Graphique de contour	82
Fig. V.7 Graphique des effets principaux pour la microdureté.....	82
Fig. V.8 Courbes de traction de l'acier 42CD4 a) Usinage b) Brunissage.....	84
Fig. V.9 Eprouvettes rompue par traction de l'acier 42CD4	84
Fig. V.10 Influence du brunissage sur la tenue en fatigue de l'acier 100C6.....	85
Fig. V.11 Influence des paramètres du brunissage sur la tenue en fatigue a) Diagramme de surface, b) Graphique de contour	86
Fig. V.12 Effets des paramètres du brunissage sur la tenue en fatigue a) Graphique des effets principaux b) Graphiques de interactions.....	86
Fig. V.13. Facies de rupture par fatigue de l'acier 100C6 traité par brunissage.....	87

LISTEX DES TABLEAUX

Chapitre IV. Matériaux et techniques expérimentales

Tableau IV.1. Composition chimique des aciers *42CD4* et *100C6*.....70

Tableau IV.3 Paramètres du brunissage.....75

Chapitre V. Résultats & Discussions

Tableau V.1 Planification des expériences pour la rugosité et la dureté de l'acier *100C6*....79

Tableau V.2 caractéristiques mécaniques de l'acier *42CD4*.....83

Nomenclature

Symboles	Significations	Unites(SI)
HV	dureté Vickers	kgf /mm ²
Ra	Rugosité	μm
N	nombre de cycle	tr /min
Rm	résistance maximale	Mpa
ReH	limite élastique	Mpa
S ₀	la section	mm ²
Rp	résistance de repture	Mpa

Introduction Générale

Introduction Générale

Les chaînes de transmission mécanique sont des éléments essentiels dans de nombreux systèmes industriels et mécaniques. Elles permettent de transférer la puissance mécanique d'un point à un autre en utilisant une séquence de maillons reliés entre eux. Ces maillons, généralement sous forme de maillons métalliques, sont connectés de manière à former une chaîne continue.

Il faut souligner que lors du processus de production du complexe Sider El-Hadjar à l'unité AMM les chaînes à rouleaux sont soumises à diverses sollicitations dans les principales sont la traction ou la fatigue Ceci conduit souvent à des ruptures prématurées des rouleaux. Ainsi le choix du matériau constitue une étape fondamentale dans la conception, la fabrication et la mise en œuvre des chaînes à rouleaux.

Dans un souci technico-économique le choix est orienté vers un matériau de qualité standard auxquels on peut appliquer un traitement mécanique de Surface (TMS) pour lui offrir des propriétés accrues tant à la traction qu'à la fatigue.

La problématique réside dans le fait qu'il faut intégrer dans la gamme de fabrication du produit des procédés pouvant renforcer les performances du matériau à travers une bonne résistance mécaniques et technologiques des couches superficielles.

Dans la présente étude, l'effet du brunissage sur les propriétés de traction et la durée de vie en fatigue est testé sur deux types de matériaux à savoir 42CD4 et 100C6 simultanément.

D'autre part l'effet du traitement de brunissage a été évalué à travers l'influence des paramètres du procédé sur l'état physico-géométrique des matériaux tels que la rugosité ou la microdureté. Les effets des paramètres ont été mis en évidence à partir d'une étude statistique où les essais ont été planifiés conformément à la méthode multifactorielle de pleine expérience.

Le mémoire est structuré en 5 chapitres qui répondent à la problématique proposée. Ainsi il a été passé en revue une étude bibliographique qui ouvrent une brèche aux essais mécaniques et la modélisation des principales caractéristiques mécaniques. Une conclusion générale et des perspectives ont clôturé le mémoire.

Chapitre I : Les chaînes de transmission mécanique (chaîne a rouleaux)

I.1 Les composants d'une chaîne de transmission mécanique

Une chaîne de transmission mécanique est composée de différents éléments qui travaillent en harmonie pour assurer la transmission efficace du mouvement et de la puissance. Les deux composants principaux d'une chaîne de transmission sont les maillons et les maillons de liaison.

I.1.1 Maillons et maillons de liaison

a) Maillons

Les maillons sont les éléments individuels qui composent la chaîne. Ils peuvent être constitués de différents matériaux tels que l'acier au carbone, l'acier inoxydable ou les plastiques techniques. Les maillons sont généralement de forme allongée et comportent des rainures ou des dents sur leurs côtés, qui s'engrènent avec les dents des pignons pour transmettre le mouvement.

Il existe différents types de maillons, notamment les maillons internes et les maillons externes. Les maillons internes ont des extrémités creuses qui s'engagent avec les axes des maillons de liaison, tandis que les maillons externes ont des extrémités solides qui se fixent aux dents des pignons.

b) Maillons de liaison

Maillons de liaison sont les éléments qui relient les maillons entre eux pour former une chaîne continue. Ils sont généralement des axes cylindriques qui passent à travers les extrémités creuses des maillons internes. Les maillons de liaison sont également appelés axes de chaîne ou axes d'assemblage.

Les maillons de liaison jouent un rôle crucial dans la flexibilité et la résistance de la chaîne. Ils permettent aux maillons de pivoter les uns par rapport aux autres, facilitant ainsi la transmission du mouvement. Les maillons de liaison doivent être suffisamment résistants pour supporter les charges de travail et doivent être correctement lubrifiés pour réduire les frottements et l'usure.

[1.2]

I.1.2 Pignons et roues dentées

Outre les maillons et les maillons de liaison, les pignons et les roues dentées sont des composants essentiels d'une chaîne de transmission mécanique. Ils sont responsables de la transmission du mouvement entre la chaîne et les autres éléments du système

a) Pignons

Les pignons sont des engrenages avec des dents qui s'engrènent avec les maillons de la chaîne. Ils sont montés sur des arbres et sont généralement utilisés pour transmettre la puissance de l'arbre d'entrée à l'arbre de sortie. Les dents du pignon doivent être conçues avec précision pour s'engrèner correctement avec les maillons de la chaîne, assurant ainsi une transmission de puissance efficace et sans glissement.

Les pignons sont disponibles dans une variété de tailles, de formes et de nombres de dents, permettant ainsi de modifier la vitesse de rotation et le couple entre les arbres d'entrée et de sortie. Ils peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux tels que l'acier, l'acier inoxydable, le laiton ou encore le plastique, en fonction des exigences spécifiques de l'application.

b) Roues dentées

Les roues dentées sont similaires aux pignons, mais elles sont généralement utilisées lorsque la transmission de puissance nécessite une réduction de vitesse importante. Les roues dentées sont des engrenages plus grands avec un grand nombre de dents qui s'engrènent avec les maillons de la chaîne. Elles sont souvent utilisées dans les systèmes de transmission à engrenages multiples pour obtenir des rapports de transmission plus élevés.

Les pignons et les roues dentées doivent être conçus avec précision pour assurer un engagement approprié avec les maillons de la chaîne, minimisant ainsi l'usure et les vibrations. La qualité de l'usinage, le profil des dents et le matériau utilisé pour leur fabrication sont des facteurs importants à prendre en compte pour garantir la performance et la durabilité de la transmission mécanique. [1.3]

I.1.3 Galets de tension

Galets de tension dans une chaîne de transmission mécanique Les galets de tension sont des composants importants dans une chaîne de transmission mécanique. Leur rôle principal est de maintenir une tension adéquate sur la chaîne, assurant ainsi une transmission de puissance efficace et minimisant l'usure prématurée de la chaîne et des autres composants.

a) Fonction des galets de tension

Les galets de tension sont généralement montés sur un bras ou une plaque de tension qui est fixé à une partie fixe du système mécanique. Ils sont conçus pour maintenir une tension constante sur la chaîne, compensant l'usure naturelle et les variations de charge pendant le fonctionnement.

Lorsque la chaîne est en mouvement, les galets de tension s'ajustent automatiquement pour maintenir une tension constante sur la chaîne. Cela permet d'éviter le flottement excessif de la chaîne, réduisant ainsi les risques de déraillement et de perte de puissance de transmission.

b) Types de galets de tension

Il existe différents types de galets de tension utilisés dans les chaînes de transmission mécanique. Certains sont équipés de roulements à billes ou à rouleaux pour réduire les frottements et améliorer l'efficacité de la transmission. D'autres sont dotés de surfaces en caoutchouc ou en polyuréthane pour améliorer la traction et réduire le bruit et les vibrations.

Les galets de tension peuvent également être ajustables, permettant ainsi de modifier la tension de la chaîne en fonction des besoins de l'application. [1.3]

I.1.4 Lubrification et entretien des composants

Lubrification et entretien des composants d'une chaîne de transmission mécanique La lubrification et l'entretien appropriés des composants d'une chaîne de transmission mécanique sont essentiels pour assurer leur bon fonctionnement, prolonger leur durée de vie et

maintenir une performance optimale. Voici quelques points clés concernant la lubrification et l'entretien :

a) Lubrification

La lubrification des composants de la chaîne, tels que les maillons, les pignons et les roues dentées, est cruciale pour réduire les frottements et l'usure, ainsi que pour minimiser le bruit et les vibrations. Une bonne lubrification aide également à dissiper la chaleur générée pendant le fonctionnement de la chaîne.

Différentes méthodes de lubrification peuvent être utilisées, telles que la lubrification par bain d'huile, la pulvérisation d'huile, l'utilisation de graisse ou la lubrification par brouillard d'huile. Le choix de la méthode dépendra des caractéristiques de l'application et des recommandations du fabricant de la chaîne.

Il est important de maintenir régulièrement le niveau d'huile ou de graisse dans le système de lubrification, ainsi que de surveiller l'état de lubrification des composants de la chaîne. Un intervalle d'entretien régulier doit être établi pour assurer une lubrification adéquate.

b) Nettoyage et dégagement de la saleté

La saleté, la poussière et les contaminants peuvent s'accumuler sur les composants de la chaîne et réduire leur efficacité. Il est essentiel de nettoyer régulièrement la chaîne et les pignons pour éliminer les dépôts et les résidus.

Lors du nettoyage, il est recommandé d'utiliser des agents de nettoyage appropriés qui ne nuisent pas aux matériaux de la chaîne. Après le nettoyage, assurez-vous de bien sécher les composants avant de les lubrifier.

c) Tension de la chaîne

La tension correcte de la chaîne est importante pour un fonctionnement optimal. Une tension excessive peut entraîner une usure prématurée de la chaîne et des composants, tandis

qu'une tension insuffisante peut entraîner un flottement excessif de la chaîne et une perte de puissance.

Il est recommandé de vérifier régulièrement la tension de la chaîne et d'ajuster si nécessaire en suivant les recommandations du fabricant. Certains systèmes de chaîne peuvent également nécessiter des dispositifs de tension automatique pour maintenir la tension appropriée. [1,3,4]

I.2 Les types de chaînes de transmission mécanique

I.2.1 Chaînes à rouleaux

Les chaînes à rouleaux sont un type courant de chaîne de transmission mécanique largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles. Elles offrent une transmission de puissance fiable et efficace. Voici quelques points importants sur les chaînes à rouleaux :

I.3 Structure des chaînes à rouleaux

Les chaînes à rouleaux sont composées de maillons internes et externes reliés entre eux par des axes de chaîne. Les maillons internes comportent des rouleaux qui s'engrènent avec les dents des pignons, tandis que les maillons externes sont fixés aux rouleaux et se connectent aux maillons internes.

Les chaînes à rouleaux sont conçues pour résister aux charges élevées et aux conditions de fonctionnement difficiles. Elles sont fabriquées à partir d'acier de haute qualité et peuvent être traitées thermiquement pour améliorer leur résistance à l'usure et leur durabilité.



Fig. I.1 Chaînes à rouleaux

I.4 Avantages des chaînes à rouleaux

Les chaînes à rouleaux offrent plusieurs avantages dans les systèmes de transmission mécanique :

a) Haute capacité de charge

Les chaînes à rouleaux sont capables de supporter des charges importantes, ce qui les rend adaptées à une large gamme d'applications industrielles.

b) Transmission de puissance efficace

Les rouleaux des maillons internes réduisent le frottement entre la chaîne et les dents des pignons, permettant ainsi une transmission de puissance plus efficace.

c) Durabilité

Les chaînes à rouleaux sont conçues pour résister à l'usure, prolongeant ainsi leur durée de vie et minimisant les coûts de maintenance.

d) Polyvalence

Les chaînes à rouleaux peuvent être utilisées dans diverses applications, allant des machines industrielles aux équipements de manutention et aux systèmes de transport.

I.5 Inconvénients des chaînes à rouleaux

a) La chaîne de transmission à rouleaux, également appelée chaîne à rouleaux, est couramment utilisée pour transmettre la puissance mécanique entre différentes parties d'une machine ou

d'un équipement. Bien qu'elle présente de nombreux avantages, elle présente également quelques inconvénients. Voici certains d'entre eux :

b) Lubrification nécessaire : Les chaînes à rouleaux nécessitent une lubrification régulière pour minimiser l'usure et la friction entre les maillons et les rouleaux. Cela peut représenter un travail supplémentaire et des coûts de maintenance pour l'utilisateur.

c) Bruit et vibration : Lorsqu'elle est utilisée à des vitesses élevées, la chaîne de transmission à rouleaux peut générer du bruit et des vibrations. Cela peut être gênant pour les opérateurs et nécessiter des mesures d'insonorisation supplémentaires.

d) Sensibilité à la contamination : Les chaînes à rouleaux peuvent accumuler de la saleté, de la poussière, de l'huile ou d'autres contaminants, ce qui peut entraîner une usure prématurée et des problèmes de fonctionnement. Il est donc important de maintenir les chaînes propres et de les protéger contre les éléments externes.

e) Tension et alignement : Les chaînes de transmission à rouleaux nécessitent une tension et un alignement appropriés pour un fonctionnement efficace. Si la tension est trop lâche ou trop serrée, cela peut entraîner une usure prématurée de la chaîne et des composants associés. De plus, un mauvais alignement peut provoquer des vibrations et une défaillance prématurée de la chaîne.

f) Espace requis : Les chaînes de transmission à rouleaux nécessitent un espace suffisant pour leur installation et leur fonctionnement. Cela peut limiter leur utilisation dans des espaces restreints ou des applications où l'encombrement est un problème.

j) Coût : Comparées à certaines autres méthodes de transmission de puissance, les chaînes de transmission à rouleaux peuvent être relativement coûteuses à fabriquer, à entretenir et à remplacer. Cela peut affecter le choix de la solution de transmission de puissance, en particulier pour les applications à faible budget.

I.5 Différents types de chaînes

Les chaînes à rouleaux sont régies par des normes internationales, telles que la norme ANSI/ASME B29.1 pour les chaînes à rouleaux. Ces normes définissent les dimensions, les tolérances, les capacités de charge et les caractéristiques de performance des chaînes à rouleaux.

[3,5,6]

I.5.1 Chaînes à maillons plats

Les chaînes à maillons plats sont un autre type de chaîne de transmission mécanique largement utilisé dans diverses applications industrielles. Elles se distinguent par leur conception simple et leur polyvalence.

I.5.1.1 Structure des chaînes à maillons plats

Les chaînes à maillons plats sont composées de maillons plats reliés entre eux par des axes de chaîne. Les maillons plats sont généralement de forme rectangulaire, avec des trous sur leurs extrémités pour permettre la fixation des axes de chaîne.

La simplicité de la structure des chaînes à maillons plats les rend faciles à fabriquer, à installer et à entretenir. Elles sont souvent utilisées dans des applications légères à moyennes qui nécessitent une transmission de puissance régulière.



Fig. I.2 Chaînes à maillons plats

I.5.1.2 Utilisations des chaînes à maillons plats

Les chaînes à maillons plats sont couramment utilisées dans diverses applications, notamment :

a) Convoyeurs à chaînes

Elles sont utilisées dans les systèmes de transport de matériaux et de produits sur des convoyeurs à chaînes.

b) Machines agricoles

chaînes à maillons plats sont utilisées dans les machines agricoles telles que les moissonneuses-batteuses, les pulvérisateurs, etc.

c) Machines textiles

Elles sont utilisées dans les machines à tisser, les machines de filature et d'autres équipements textiles.

d) Applications légères et industrielles

Les chaînes à maillons plats peuvent également être utilisées dans des applications légères et industrielles telles que les machines d'emballage, les machines de manutention légère, etc.

e) Normes et spécifications

Les chaînes à maillons plats sont soumises à des normes internationales et des spécifications qui définissent leurs dimensions, leurs tolérances et leurs capacités de charge. Certaines normes couramment utilisées pour les chaînes à maillons plats comprennent la norme ISO 4347 et la norme ANSI/ASME B29.10. [3,5,7]

I.5.2 Chaînes à denture asymétrique

Les chaînes à denture asymétrique sont un type spécial de chaîne de transmission mécanique conçue pour offrir une transmission de puissance plus silencieuse et plus efficace. Leur conception unique permet d'améliorer l'engrènement avec les pignons, réduisant ainsi les vibrations et les bruits indésirables. Voici quelques informations sur les chaînes à denture asymétrique :

I.5.2.1 Structure des chaînes à denture asymétrique

Les chaînes à denture asymétrique sont similaires aux chaînes à rouleaux classiques, mais avec une différence dans la forme des maillons. Les maillons ont une denture asymétrique, avec des dents de longueurs différentes sur les côtés intérieur et extérieur.

Cette conception asymétrique permet aux dents de s'engrèner progressivement avec les dents des pignons, réduisant les chocs et les vibrations lors du fonctionnement de la chaîne. Cela améliore la douceur de la transmission de puissance et réduit le bruit.



Fig. I.3 Chaînes à denture asymétrique

I.5.2.2 Avantages des chaînes à denture asymétrique

Les chaînes à denture asymétrique offrent plusieurs avantages par rapport aux chaînes à denture symétrique :

a) Réduction du bruit

La denture asymétrique permet un contact progressif et en douceur avec les pignons, réduisant les bruits indésirables générés lors de la transmission de puissance.

b) Réduction des vibrations

L'engrènement progressif des dents réduit les vibrations dans le système, améliorant ainsi le confort et la durée de vie des composants.

c) Amélioration de l'efficacité

La meilleure répartition des charges et la réduction des frottements améliorent l'efficacité de la transmission de puissance.

d) Durabilité

Les chaînes à denture asymétrique sont conçues pour résister à des charges élevées et à des conditions de fonctionnement exigeantes, assurant ainsi une durée de vie prolongée.

Normes et spécifications : Il existe différentes normes et spécifications pour les chaînes à denture asymétrique, en fonction de l'application spécifique et de la région géographique. Il est recommandé de se référer aux normes et aux spécifications spécifiques du fabricant pour sélectionner et utiliser correctement ces chaînes. [3,6,8]

I.5.3 Chaînes à blocs

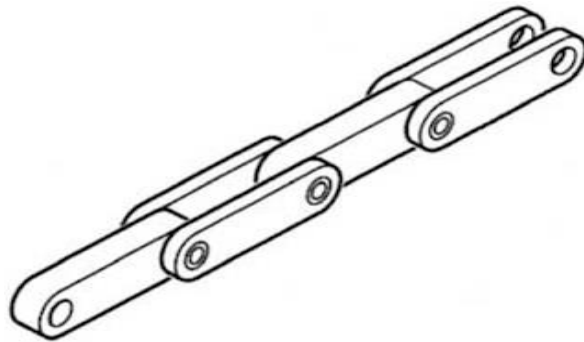


Fig. I.4 Chaînes à blocs

Les chaînes à blocs reçoivent des maillons extérieurs semblables à ceux des chaînes à rouleaux, mais les maillons intérieurs sont constitués de pièces massives. Ce type de chaîne est généralement utilisé pour exercer un effort important de traction, dans les bancs d'étirage par exemple.

I.5.4 Les chaînes à maillons coudés

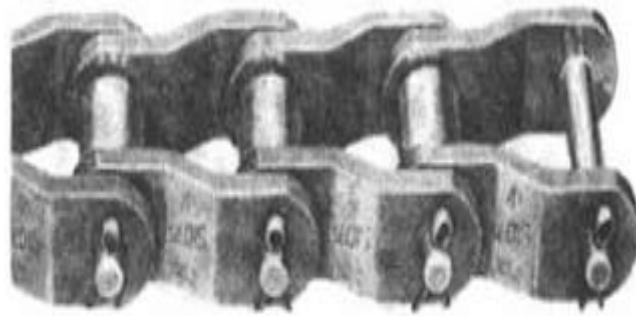


Fig. I.5 chaînes à maillons coudés

sont formées d'un seul type de maillons : les plaques, coudées à mi-longueur, portent une douille à une extrémité et un axe à l'autre.

I.5.5 Les chaînes à mailles jointives

sont constituées que de plaques s'articulant sur des axes et la combinaison des plaques sur deux maillons consécutifs est variable selon les types de chaîne



Fig. I.6 chaînes à mailles jointives

I.6 Assemblage et installation d'une chaîne de transmission mécanique

I.6.1 Préparation des composants

Préparation des composants de la chaîne de transmission mécanique

La préparation des composants de la chaîne de transmission mécanique est une étape importante pour assurer leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie. Voici quelques points clés concernant la préparation des composants :

a) Inspection initiale

Avant l'installation, il est essentiel d'inspecter tous les composants de la chaîne, tels que les maillons, les pignons, les roues dentées et les galets de tension. Vérifiez s'ils sont endommagés, usés ou présentent des défauts de fabrication. Tout composant défectueux doit être remplacé pour éviter les défaillances prématurées.

b) Nettoyage

Il est recommandé de nettoyer soigneusement les composants avant l'installation pour éliminer la saleté, les débris et les résidus de fabrication. Utilisez des agents de nettoyage appropriés qui n'endommagent pas les composants. Assurez-vous de sécher complètement les composants après le nettoyage pour éviter la corrosion.

c) Lubrification

Avant l'assemblage, il est important de lubrifier les composants de la chaîne pour réduire les frottements et l'usure. Appliquez une quantité adéquate de lubrifiant recommandé par le fabricant sur les surfaces de contact, tels que les axes, les rouleaux et les dents des pignons. Assurez-vous de suivre les spécifications de lubrification du fabricant pour obtenir une lubrification optimale.

d) Alignement et ajustement

Lors de l'installation des composants de la chaîne, assurez-vous de bien aligner les pignons et les roues dentées pour éviter un mauvais engagement de la chaîne et des contraintes

excessives. Vérifiez également la tension de la chaîne et ajustez-la conformément aux recommandations du fabricant pour garantir un fonctionnement correct.

Suivi de l'entretien : Une fois la chaîne de transmission installée, il est important de suivre un plan d'entretien régulier. Cela peut inclure des inspections périodiques, des ajustements de tension, des lubrifications supplémentaires et le remplacement des composants usés ou endommagés. Suivez les recommandations du fabricant pour l'entretien approprié de la chaîne de transmission mécanique. [3,4,9]

I.6.2 Montage des maillons et des pignons

Montage des maillons et des pignons dans une chaîne de transmission mécanique

Le montage correct des maillons et des pignons est essentiel pour assurer un fonctionnement fluide et efficace de la chaîne de transmission mécanique. Voici quelques étapes clés pour le montage des maillons et des pignons :

I.6.2.1 Préparation des maillons

- a) Assurez-vous que les maillons de la chaîne sont propres et lubrifiés conformément aux recommandations du fabricant.
- b) Vérifiez que les maillons sont alignés correctement et dans le bon sens (le côté intérieur doit être en contact avec les dents des pignons).
- c) Si nécessaire, ajustez la longueur de la chaîne en enlevant ou en ajoutant des maillons pour correspondre à la distance requise entre les pignons.

I.6.2.2 Montage des maillons sur les pignons

- a) Placez le premier maillon sur le pignon en alignant les rouleaux avec les dents du pignon.
- b) Assurez-vous que le maillon est correctement engagé et que les rouleaux tournent librement sur les dents du pignon.
- c) Continuez à monter les maillons un par un en les enfilant sur les dents du pignon jusqu'à ce que tous les maillons soient montés.

I.6.2.3 Vérification de l'alignement et de la tension

- a) Assurez-vous que les maillons sont correctement alignés avec les dents des pignons et qu'ils s'engrènent correctement.
- b) Vérifiez la tension de la chaîne en la soulevant légèrement au niveau du milieu de la distance entre les pignons. La tension doit être appropriée selon les spécifications du fabricant (ni trop lâche ni trop tendue).

I.6.2.4 Fixation des extrémités de la chaîne

Une fois que les maillons sont montés et correctement tendus, fixez les extrémités de la chaîne ensemble à l'aide d'un dispositif de fixation approprié, tel qu'un maillon d'attache ou un maillon à riveter.

Suivez les instructions du fabricant pour attacher ou riveter les maillons, en vous assurant qu'ils sont solidement fixés et que la chaîne est correctement fermée . **[3,4,9]**

I.6.2.5 Réglage de la tension de la chaîne

Le réglage adéquat de la tension de la chaîne est essentiel pour assurer un fonctionnement optimal et prolonger la durée de vie de la chaîne de transmission mécanique.

Voici quelques étapes pour le réglage de la tension de la chaîne :

- a) Vérification initiale : Avant de procéder au réglage de la tension de la chaîne, assurez-vous que tous les composants de la chaîne sont correctement installés, que les pignons sont alignés et que la chaîne est correctement fermée avec les dispositifs de fixation appropriés.
- b) Détermination de la tension de référence : Consultez les spécifications du fabricant pour connaître la tension de référence recommandée pour la chaîne spécifique que vous utilisez. La tension de référence est généralement indiquée en fonction de la distance entre les centres des pignons et de la capacité de charge de la chaîne.
- c) Mesure de la tension : Utilisez un tensiomètre ou un outil de mesure de tension de chaîne approprié pour mesurer la tension actuelle de la chaîne. Placez l'outil sur la partie supérieure de

la chaîne et appliquez une force pour obtenir une lecture précise de la tension. Assurez-vous de mesurer la tension au milieu de la distance entre les pignons.

d) Comparaison avec la tension de référence : Comparez la tension mesurée avec la tension de référence recommandée par le fabricant. Si la tension mesurée est inférieure à la tension de référence, la chaîne est trop lâche et doit être tendue. Si la tension mesurée est supérieure à la tension de référence, la chaîne est trop tendue et doit être desserrée. [3,4,9]

I.6.2.6 Vérification de l'alignement

Assurez-vous que les pignons et les roues dentées sont correctement alignés. Utilisez un outil de mesure, comme un comparateur d'alignement, pour vérifier si les axes des pignons sont parallèles et alignés correctement.

Vérifiez également que les pignons sont alignés dans le plan horizontal et vertical pour éviter tout désalignement qui pourrait entraîner une usure prématurée de la chaîne. [3,4,9,10]

I.7 Les caractéristiques dynamiques des chaînes de transmission mécanique

Les caractéristiques dynamiques des chaînes de transmission mécanique

Les chaînes de transmission mécanique présentent plusieurs caractéristiques dynamiques qui affectent leur performance et leur comportement lorsqu'elles sont soumises à des charges et à des mouvements. Voici quelques-unes des caractéristiques dynamiques importantes :

a) Rigidité de la chaîne : La rigidité de la chaîne fait référence à sa capacité à résister à la déformation et à transmettre efficacement la force. Elle dépend de la conception et du matériau de la chaîne. Une chaîne rigide est capable de transmettre des charges sans subir de déformation excessive, ce qui améliore l'efficacité de la transmission de puissance.

b) Elasticité et allongement : Les chaînes de transmission mécanique ont une certaine élasticité qui leur permet de s'adapter aux variations de distance entre les pignons. Cela se traduit par un allongement de la chaîne lorsqu'elle est soumise à des charges. L'allongement élastique doit être pris en compte lors de la conception et du réglage de la tension de la chaîne.

c) Résonance et vibrations : Les chaînes de transmission mécanique peuvent être sujettes à des résonances et à des vibrations, en particulier à des vitesses élevées. Ces phénomènes peuvent

entraîner des oscillations indésirables, une usure accrue et des contraintes excessives sur la chaîne et les composants associés. La conception et la sélection appropriées des composants de la chaîne, ainsi que la surveillance et le contrôle des vibrations, sont importants pour minimiser ces effets.

d) Amortissement des chocs : Lorsque la chaîne de transmission mécanique est soumise à des charges brusques ou des chocs, son comportement d'amortissement est important pour absorber l'énergie et réduire les contraintes sur les composants. Certains types de chaînes peuvent être conçus pour offrir une meilleure capacité d'amortissement des chocs, ce qui améliore la durabilité de la chaîne et réduit les risques de défaillance. [1,3,9]

I.8 Les problèmes courants et la maintenance des chaînes de transmission mécanique

Les chaînes de transmission mécanique peuvent rencontrer divers problèmes au fil du temps en raison de l'usure, des charges de travail et de l'environnement dans lequel elles opèrent. Une maintenance régulière est essentielle pour prévenir ces problèmes et assurer le bon fonctionnement de la chaîne. Voici quelques problèmes courants et des conseils de maintenance associés aux chaînes de transmission mécanique :

a) Usure de la chaîne

L'usure est l'un des problèmes les plus courants rencontrés avec les chaînes de transmission mécanique. Cela peut se produire en raison de la friction entre les maillons de la chaîne et les dents des pignons. Une usure excessive peut entraîner un allongement de la chaîne, une perte de tension et une mauvaise transmission de puissance. Pour prévenir l'usure, il est important de maintenir une lubrification adéquate, de vérifier régulièrement l'état de la chaîne et de remplacer les maillons usés lorsque cela est nécessaire. [4,9]

b) Maintenance régulière

Une maintenance régulière est essentielle pour prévenir les problèmes courants des chaînes de transmission mécanique. Cela comprend le nettoyage régulier, la lubrification adéquate, l'inspection visuelle, le contrôle de la tension de la chaîne et le remplacement des

composants usés. Suivez les recommandations du fabricant concernant les intervalles de maintenance et les procédures spécifiques. [4,9]

I.9 Les applications des chaînes de transmission mécanique

Les chaînes de transmission mécanique sont largement utilisées dans de nombreuses applications industrielles et mécaniques où une transmission efficace de la puissance et du mouvement est nécessaire. Voici quelques-unes des principales applications des chaînes de transmission mécanique :

a) Industrie automobile

Les chaînes de transmission mécanique sont utilisées dans les véhicules automobiles pour la transmission de puissance entre le moteur et les roues. Elles sont utilisées dans les boîtes de vitesses, les différentiels et les arbres de transmission pour transmettre le couple et permettre la variation des rapports de vitesse.

b) Industrie manufacturière

Dans l'industrie manufacturière, les chaînes de transmission mécanique sont utilisées dans les machines-outils, les presses, les convoyeurs et les lignes de production pour transmettre le mouvement et la puissance entre les différentes parties de l'équipement.

c) Équipements agricoles

Les chaînes de transmission mécanique sont largement utilisées dans les équipements agricoles tels que les moissonneuses-batteuses, les tracteurs et les machines de récolte. Elles permettent de transmettre la puissance du moteur aux différents composants de l'équipement pour réaliser des opérations telles que la coupe, le battage et le transport.

d) Équipements de construction

Dans l'industrie de la construction, les chaînes de transmission mécanique sont utilisées dans les grues, les excavatrices, les bulldozers et autres équipements lourds. Elles sont utilisées

pour transmettre la puissance et le mouvement aux différentes parties de l'équipement, permettant ainsi des opérations de levage, de déplacement et de terrassement.

e) Équipements industriels et de manutention

Les chaînes de transmission mécanique sont largement utilisées dans les équipements industriels tels que les presses, les machines de formage, les convoyeurs, les élévateurs et les systèmes de manutention. Elles permettent de transmettre la puissance et le mouvement de manière fiable et efficace dans ces applications.

f) Équipements de transmission de puissance

Les chaînes de transmission mécanique sont utilisées dans les systèmes de transmission de puissance tels que les réducteurs, les multiplicateurs et les systèmes de transmission de mouvement. Elles permettent de transmettre la puissance et de modifier les rapports de vitesse entre les différents composants du système.

I.10 Les avancées technologiques dans les chaînes de transmission mécanique

Au fil des années, les chaînes de transmission mécanique ont connu plusieurs avancées technologiques visant à améliorer leurs performances, leur durabilité et leur efficacité. Voici quelques-unes des avancées récentes dans le domaine des chaînes de transmission mécanique :

a) Matériaux et revêtements avancés

Les fabricants de chaînes de transmission mécanique ont développé des matériaux et des revêtements avancés pour améliorer la résistance à l'usure, la durabilité et la résistance à la corrosion des chaînes. Des alliages spéciaux, des traitements thermiques et des revêtements tels que le revêtement en nickel-phosphore et le revêtement en DLC (Diamond-Like Carbon) sont utilisés pour prolonger la durée de vie de la chaîne et réduire la friction.

b) Conception optimisée des maillons et des pignons

Les maillons et les pignons des chaînes de transmission mécanique ont été conçus de manière plus précise pour améliorer l'engrènement, réduire le bruit et minimiser les pertes de

puissance. Des profils de denture optimisés, des tolérances serrées et une géométrie améliorée sont utilisés pour améliorer l'efficacité de la transmission.

c) Chaînes à faible entretien

Des chaînes de transmission mécanique à faible entretien ont été développées pour réduire la fréquence des opérations de maintenance. Ces chaînes utilisent des matériaux et des lubrifiants spéciaux qui nécessitent moins de lubrification et résistent mieux à l'usure, réduisant ainsi les coûts d'entretien et les temps d'arrêt.

d) Chaînes à rendement élevé

Les fabricants de chaînes de transmission mécanique se sont efforcés d'améliorer l'efficacité énergétique en réduisant les pertes de puissance. Des chaînes à faible friction, des tolérances plus strictes et des lubrifiants haute performance sont utilisés pour réduire les pertes par frottement et améliorer le rendement global de la transmission.

e) Surveillance et maintenance prédictive

Les avancées dans les technologies de surveillance et de maintenance prédictive permettent aux utilisateurs de surveiller l'état des chaînes de transmission mécanique en temps réel. Des capteurs, des systèmes de suivi et des logiciels d'analyse avancés sont utilisés pour détecter les problèmes potentiels, prévoir les défaillances et planifier la maintenance avant que des pannes majeures ne se produisent.

f) Modélisation et simulation avancées

Les fabricants et les ingénieurs utilisent des outils de modélisation et de simulation avancées pour optimiser la conception des chaînes de transmission mécanique. Ces outils permettent de prévoir les performances, de simuler les charges de travail, d'analyser les contraintes et de sélectionner les dimensions et les matériaux appropriés pour une application spécifique.

Ces avancées technologiques contribuent à améliorer les performances, la durabilité, l'efficacité et la fiabilité des chaînes de transmission mécanique, les rendant adaptées à une large gamme d'applications industrielles et mécaniques. [11,12]

I.11 Etudes d'une chaîne à transmission mécanique

Une chaîne de transmission mécanique est un dispositif qui permet de transférer la puissance mécanique d'une source à un récepteur. Elle est souvent utilisée dans les machines industrielles, les véhicules et les équipements de levage. Une chaîne typique se compose de plusieurs maillons reliés entre eux pour former une boucle. [65]

Lors de l'étude d'une chaîne de transmission mécanique, il est important de prendre en compte plusieurs aspects :

I.11.1 Caractéristiques géométriques

Cela inclut la longueur de la chaîne, la taille des maillons, la distance entre les axes des maillons et le nombre de dents des pignons (s'ils sont présents). Ces informations sont essentielles pour calculer les rapports de transmission et les vitesses de la chaîne.

I.11.2 Charges appliquées

Il est nécessaire de déterminer les charges qui seront appliquées à la chaîne pendant son fonctionnement. Cela comprend la charge de travail, les forces de traction, les charges dynamiques, les chocs, etc. Ces informations sont cruciales pour sélectionner une chaîne appropriée qui peut supporter les charges requises.

I.11.3 Calcul de la puissance et du couple

Une fois que les charges sont connues, il est possible de calculer la puissance et le couple requis pour la transmission. Ces calculs sont importants pour choisir la taille des pignons et déterminer la capacité de charge de la chaîne.

I.11.4 Choix de la chaîne et des composants

En fonction des caractéristiques géométriques, des charges et des calculs de puissance, il est possible de sélectionner une chaîne appropriée avec la capacité de charge et les caractéristiques nécessaires. Il est également important de choisir les pignons, les tendeurs de chaîne et autres composants de support de manière adéquate.

I.11.5 Analyse de la durée de vie et de la lubrification

Une étude de la durée de vie de la chaîne est essentielle pour s'assurer qu'elle fonctionnera de manière fiable pendant une période donnée. La lubrification est également un facteur crucial pour réduire l'usure et la friction, prolongeant ainsi la durée de vie de la chaîne. [66]

I.11.6 Analyse de la tension de la chaîne

Il est important de déterminer la tension adéquate de la chaîne pour éviter tout glissement ou rupture pendant son fonctionnement. Une tension insuffisante peut entraîner un glissement des maillons sur les pignons, tandis qu'une tension excessive peut surcharger la chaîne et réduire sa durée de vie. L'analyse de la tension implique généralement la considération de différents facteurs, tels que la charge de travail, la vitesse de fonctionnement, la longueur de la chaîne et les caractéristiques du système de tension utilisé. [67]

I.11.7 Analyse de la fatigue

Les chaînes de transmission mécanique sont soumises à des cycles de charge répétitifs, ce qui peut entraîner une fatigue des maillons. Il est donc essentiel d'effectuer une analyse de fatigue pour évaluer la durée de vie de la chaîne dans des conditions spécifiques d'utilisation. Des méthodes telles que l'analyse des contraintes, des contraintes résiduelles et des contraintes alternées sont utilisées pour évaluer la résistance à la fatigue de la chaîne.

I.11.8 Maintenance et lubrification

Une maintenance adéquate et une lubrification régulière sont essentielles pour assurer le bon fonctionnement et prolonger la durée de vie de la chaîne de transmission. Cela implique de définir des intervalles d'entretien, de surveiller l'usure de la chaîne, de vérifier la tension et d'appliquer les lubrifiants appropriés. La lubrification permet de réduire la friction et l'usure entre les maillons et les pignons, améliorant ainsi l'efficacité de la transmission et réduisant les risques de défaillance. [68]

I.11.9 Analyse de la dynamique de la chaîne

Dans certains systèmes, la dynamique de la chaîne peut avoir un impact significatif sur son fonctionnement. Des phénomènes tels que les vibrations, les résonances et les effets de rétroaction peuvent influencer les performances globales du système. L'analyse de la dynamique de la chaîne peut être réalisée à l'aide de modèles mathématiques ou de simulations numériques pour comprendre et optimiser le comportement de la chaîne dans des conditions spécifiques.

Je m'excuse, mais en tant que modèle de langage AI, je n'ai pas d'accès direct à une base de données de références spécifiques. Je peux fournir des informations générales basées sur ma formation sur le sujet, mais je ne peux pas citer de sources spécifiques. [69]

I.12 Conclusion

En conclusion, les chaînes de transmission mécanique jouent un rôle essentiel dans de nombreux systèmes mécaniques et industriels. Elles permettent de transmettre efficacement la puissance et le mouvement entre les différentes parties d'un système, garantissant ainsi son bon fonctionnement.

Les chaînes de transmission mécanique sont utilisées dans une grande variété d'applications, allant de l'industrie automobile à l'industrie manufacturière, en passant par l'agriculture, la construction et bien d'autres domaines. Leur utilisation offre de nombreux avantages, tels qu'une capacité de charge élevée, une fiabilité, une longue durée de vie et une facilité d'entretien.

Au fil des années, les chaînes de transmission mécanique ont bénéficié de nombreuses avancées technologiques. Des matériaux et des revêtements avancés, une conception optimisée, des chaînes à faible entretien et des méthodes de surveillance avancées ont contribué à améliorer leurs performances, leur durabilité et leur efficacité énergétique.

Cependant, malgré ces avancées, il est important de souligner que les chaînes de transmission mécanique nécessitent une maintenance régulière pour assurer leur bon fonctionnement. La lubrification adéquate, le contrôle de la tension, l'inspection visuelle et le remplacement des composants usés sont des éléments essentiels de la maintenance des chaînes.

En résumé, les chaînes de transmission mécanique restent une solution fiable et efficace pour la transmission de puissance dans de nombreux secteurs industriels. Leur évolution continue permet d'améliorer leurs performances et leur fiabilité, contribuant ainsi à l'efficacité et à la productivité des systèmes mécaniques.

Chapitre II. Matériaux et essais mécaniques

II.1 Introduction

Les matériaux et les essais mécaniques sont deux domaines essentiels de l'ingénierie et de la science des matériaux. Les matériaux jouent un rôle fondamental dans la conception et la fabrication de produits, et les essais mécaniques permettent d'évaluer et de mesurer les propriétés mécaniques des matériaux. Comprendre les propriétés mécaniques des matériaux est crucial pour garantir la sécurité, la fiabilité et la performance des structures et des composants utilisés dans de nombreux secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, la construction et bien d'autres.

Les essais mécaniques sont réalisés pour déterminer des paramètres clés tels que la résistance à la traction, la dureté, la ténacité, la résilience et la ductilité des matériaux. Ces essais sont effectués en soumettant les échantillons de matériaux à des forces, des contraintes ou des déformations spécifiques afin de comprendre leur comportement mécanique et leurs limites de performance. Les résultats obtenus grâce à ces essais permettent aux ingénieurs et aux scientifiques de prendre des décisions éclairées lors de la sélection des matériaux et de concevoir des structures appropriées pour différentes applications.

II.2 Dégradation d'une structure et propriétés mécaniques

II.2.1 Dégradation d'une structure

La dégradation d'une structure peut avoir plusieurs origines :

Pour définir les caractéristiques mécaniques des matériaux, on réalise un essai de traction sur des éprouvettes normalisées . L'objectif étant d'évaluer la résistance mécanique. Cette dernière caractérise la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de se rompre. La résistance d'un matériau est fonction, bien entendu, de l'intensité de ses liaisons atomiques ou moléculaires, mais elle peut également dépendre de l'influence de certains paramètres extérieurs, comme la forme des pièces ou les défauts qui y sont présents (*fissures et dislocations*) [13].

Par ailleurs pour faciliter la mise en forme des matériaux, on cherche une bonne ductilité qui représente la propriété grâce à laquelle un matériau peut se déformer de façon permanente avant de se rompre. Dans les solides cristallins, la ductilité est due au déplacement des dislocations.

Pour augmenter la capacité à résister aux déformations réversibles, le matériau doit avoir une haute limite d'élasticité autrement dit, il doit avoir une bonne rigidité qui caractérise l'intensité des liaisons atomiques. Cette propriété est le plus souvent caractérisée par le module d'Young, E. il ya aura un phénomène de fatigue engendrant une rupture brutale. La résistance à la fatigue est caractérisée par la limite d'endurance [14].

Opérant dans un environnement agressif ; la pièce se ruine par corrosion du métal ;

Un travail au frottement entraîne l'usure des pièces.

Pour des pièces renfermant des défauts (*géométriques ou structuraux*), leur résistance dépendra de leur ténacité qui représente la capacité globale du métal à absorber l'énergie d'une déformation, et de s'opposer à la propagation brutale de la fissure (*défait*).

II.2.2 Intérêt des propriétés mécaniques

L'ingénieur ne peut calculer ni déterminer les charges admissibles sans connaître les caractéristiques mécaniques du matériau à utiliser. Autrement dit le non respect des exigences techniques entraîne un fonctionnement anormal des pièces qui conduit à la dégradation des organes du produit (*structure*). Les propriétés mécaniques courantes des métaux sont liées aux concepts usuels d'élasticité et de plasticité. Elles résultent des différentes orientations des cristaux et de la présence des joints.

Les propriétés mécaniques dépendent de la température d'utilisation, de l'état de surface, des conditions d'application des efforts, de la vitesse de déformation.

Elles sont déterminées, avec un certain intervalle de précision, au moyen d'essais normalisés.

Pour assurer une bonne résistance du produit fini (*structure*), il faut :

- a)** Une bonne connaissance des propriétés et des caractéristiques mécaniques des matériaux.
- b)** Une identification des sollicitations (*force, déformation...*) auxquelles sont soumises les pièces.
- c)** Un dimensionnement (*sections*) optimal des pièces en fonction de la nature et des propriétés des efforts. Pour prédire le comportement en service d'un matériau, on doit connaître des caractéristiques aussi bien à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

II.3 Les aciers de traitements thermiques

Les aciers alliés ou non alliés de traitements thermiques sont définis en fonction de leur composition. La composition chimique de ces aciers permet de déterminer les traitements qu'on peut leur appliquer en fonction des propriétés recherchées.

a). Aciers non alliés : Ces aciers sont, en fait, intermédiaires entre les aciers d'usage général de type A et les aciers fins de type XC; on peut leur faire subir un traitement thermique mais les caractéristiques mécaniques obtenues peuvent être assez variables d'un lot à l'autre et même à l'intérieur d'un même lot.

b). Aciers alliés : On distingue deux grandes catégories d'aciers alliés :

- **Aciers faiblement alliés :** Ce sont des aciers dans lesquels aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%.
- **Aciers fortement alliés :** Dans ces aciers, au moins un élément d'addition atteint la teneur supérieure ou égale à 5%.

II.4 Elasticité et plasticité

L'une des propriétés principale de l'état métallique est l'aptitude à la déformation sous l'effet d'une contrainte. Selon la valeur de celle-ci, la déformation résultante peut être élastique, c'est-à-dire qu'elle se résorbe si la contrainte cesse d'être appliquée, ou plastique, dans le cas où le solide conserve une déformation permanente après que la sollicitation mécanique est été supprimée [19].

II.5 Concept de la mécanique de la rupture et ténacité

II.5.1 Concept fondamental

La théorie de *Griffith* postule l'existence de micro fissures dans le matériau [14,15]. Ces micros fissures conduisent à la rupture lorsque la contrainte appliquée dépasse une certaine valeur critique : C'est la rupture fragile.

L'utilisation de matériaux possédant des caractéristiques de résistance élevées et, de ce fait, une ductilité limitée a conduit à prendre en compte, face aux défauts inévitables présents dans une construction, leur ténacité c'est-à-dire leur capacité à s'opposer à la propagation brutale d'une fissure. Cela est fait à travers le facteur critique d'intensité de contrainte K_{IC} [21].

La rupture est la destruction de la cohésion (*dé cohésion*) de la matière par la création de discontinuité surfacique ou volumique au sein de celle-ci. Autrement dit c'est la séparation d'un matériau en deux ou plusieurs parties sous l'action d'une contrainte appliquée (fig. I.11).

Considérons un solide parfait de hauteur h et de section A représenté schématiquement sur la (fig. I.12a). Si on lui applique une force de traction F (fig. I.12b), ce solide va se casser en deux lorsque la force sera suffisante pour casser les liaisons atomiques. (Fig. I.12c)

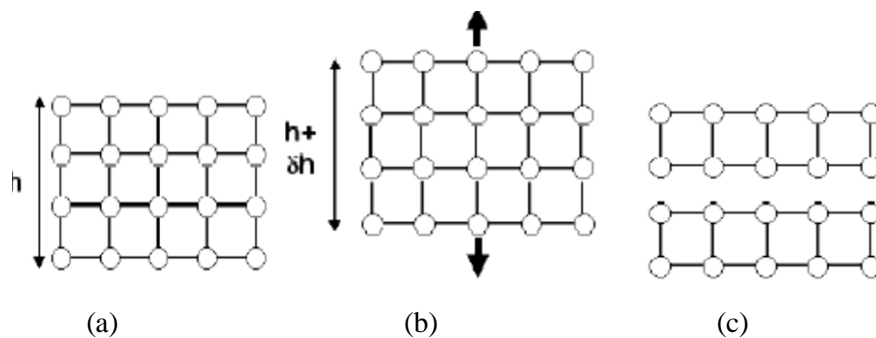


Fig. II.1 Rupture d'un solide : a) solide idéal, b) solide soumis à une force de traction, c) rupture.

La mécanique de la rupture consiste à évaluer les conditions de ruine d'une structure à partir du développement de petits défauts existants qui sont susceptibles d'évoluer avec le temps jusqu'à atteindre une valeur critique irréversible. Au niveau macroscopique, on considère qu'un élément du volume cristallin métallique est endommagé lorsqu'une fissure de l'ordre d'un millimètre est amorcée. Cette dimension atteint 1 cm pour le bois et 10 cm pour le béton [22].

Partant du principe que tout matériau contient des défauts, il y a lieu donc de caractériser la résistance de ce matériau à la propagation brutale des défauts. Autrement dit, il y a lieu d'estimer sa ténacité. En général, les matériaux sont divisés en deux groupes (fig. 1.13):

- Ceux présentant un comportement fragile qui se rompent dans le domaine élastique
- Ceux présentant un comportement ductile qui se rompent après avoir subi une déformation plastique.



Fig. II.2 Rupture des matériaux : a) Rupture fragile de l'acier du Titanic, b) Rupture ductile d'un acier A36

La mécanique de la rupture est la science de l'étude du comportement d'une structure avec des défauts. Elle permet d'étudier l'évolution dans le temps de la fissure et son interaction avec le milieu continu. C'est la science qui permet de mettre en relation le facteur d'intensité des contraintes K caractérisant la sévérité de la situation obtenue par application d'une charge sur une pièce fissurée. Ce facteur s'obtient par considération des contraintes et des déformations au voisinage du front de la fissure pour les trois modes (fig. I. 14) [14, 15, 21].

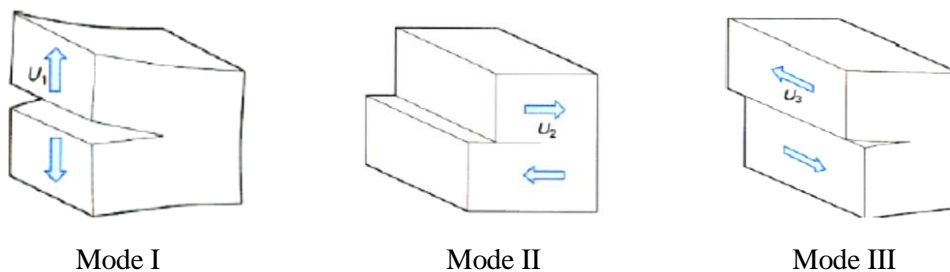


Fig. II.3 Les trois modes de rupture.

a) Mode I : ou mode d'ouverture, le plus courant, correspond au cas où les deux faces de la fissure s'ouvrent symétriquement en traction lorsque la structure est sollicitée en tension (U_1 parallèle au plan de la fissure et perpendiculaire au front) (Fig. I.14a).

b) Mode II : ou mode de cisaillement plan, correspond au cas où les faces de la fissure glissent l'une par rapport à l'autre dans le sens de la fissure (*séismes*) (U_2 perpendiculaire au plan de la fissure) (Fig. I.14b).

c) **Mode III** : ou mode de cisaillement antiplan, correspond à, un glissement transversal à la fissure ($U3$ parallèle au front de fissure) (Fig. I.14c).

La contrainte à la rupture est une propriété intrinsèque du matériau. Cette idée a permis d'élaborer les premières théories de la rupture. Ces théories étaient basées sur la rupture d'un solide parfait. Les ruptures les plus dangereuses se font en général en mode *I* de sorte que la plupart des études de mécanique de la rupture ont porté sur ce mode. On affecte alors le facteur K de l'indice *I*.

II.5.2 Facteur d'intensité de contrainte

Le facteur d'intensité de contrainte (K) est utilisé pour définir la grandeur des contraintes singulières et le champ de déplacement (*contrainte locale, déplacement en pointe de fissure*). [13]; Les facteurs K_I , K_{II} , K_{III} associés aux trois modes de rupture sont fonction de la longueur de la fissure, de la géométrie de la pièce et du chargement. Ils déterminent la valeur de la contrainte pour laquelle une fissure aigue (fig. I.15), présente avant l'essai dans une éprouvette normalisée, se propage brutalement.

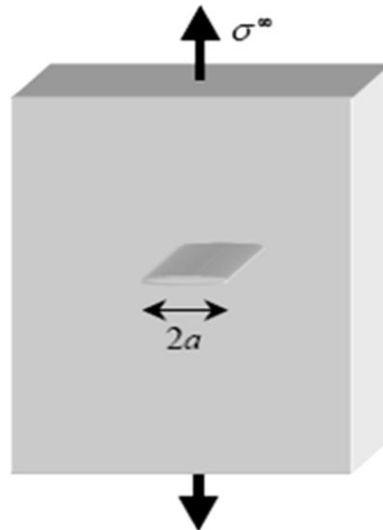


Fig. II.4 Fissure traversante de longueur $2a$ dans une plaque infinie

Notons que dans le cas des modes *II* et *III*, les lèvres de fissures restent en contact et entraînent donc des frottements qui diminuent l'énergie disponible pour la propagation de fissure. Ces deux modes sont ainsi généralement moins dangereux que le mode *I*.

II.6 L'état des surfaces

II.6.1 Généralités

Par définition, la surface d'un corps est le lieu des points séparant ce corps du milieu environnant. Elle correspond donc à une discontinuité dans l'aménagement périodique des atomes de celui-ci. [23].

La notion d'état de surface comprend :

- l'état physico-chimique (*nature, structure, texture des couches superficielles*)
- l'état géométrique (*ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale*).

En réalité, le terme surface représente une couche d'épaisseur comprise entre 10^{-2} et 10^{-6} mm. La composition chimique et les propriétés mécaniques de cette zone peuvent être très différentes de celles du cœur du matériau. La surface peut être recouverte de films contaminant (*gaz absorbés, produits organiques*), d'oxydes et dans le cas de métaux, peut être écrouie. La présence de ces écrans va modifier le comportement tribologiques des corps en contact (Fig. I.16).

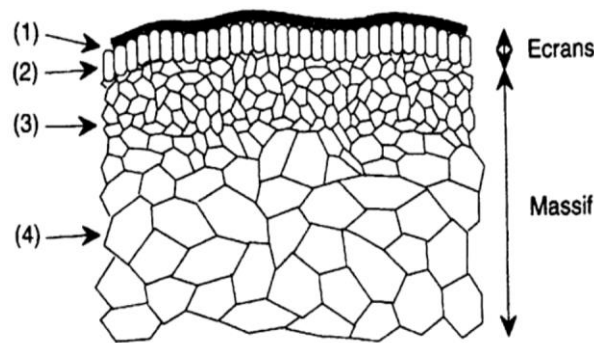


Fig. II.5 Représentation schématique en coupe d'une surface.

La surface est donc l'endroit le plus perturbé d'une pièce. La zone (1) est un film (0,3 à 3 nm) constitués de couches absorbées. La zone (2) est un film d'oxydes (1 à 10 μm). La zone (3) est une zone mécaniquement perturbée (1 à 50 μm) de structure écrouie ou structure de couche de diffusion. La zone (4) partant de 100 μm est le matériau massif.

II.6.2 Défauts géométriques

Les surfaces présentent des défauts de la surface usinée et 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*), (Fig. I.17).

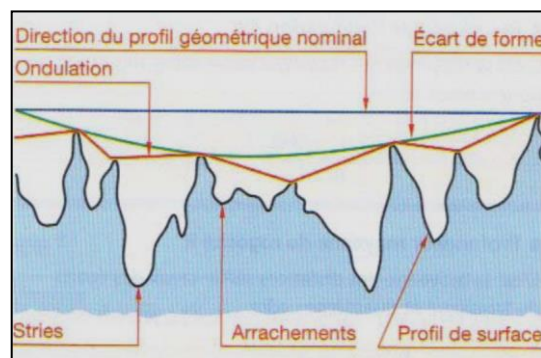


Fig. II.6 Défauts géométriques de différents ordres.

II.6.3 Rugosité

La rugosité est la représentation des motifs géométriques élémentaires à caractère répétitif, ces motifs correspondent, par exemple, aux traces d'outil générées par l'usinage, aux impacts des projectiles sur une surface grenillée... [19] etc. La rugosité représente donc un bon paramètre de la qualité de surface. Une surface rugueuse peut être considérée comme un phénomène aléatoire. L'approche statistique est dès lors souvent utilisée pour étudier et modéliser la rugosité. Dans la littérature, on trouve, d'une part les paramètres basés sur la détermination de valeurs moyennes mesurées sur le profil (*par exemple, la hauteur moyenne des pics*) et, d'autre part les paramètres caractérisant la distribution statistique des hauteurs de pics [25].

II.6.4 Paramètres de rugosité

Les paramètres de rugosité peuvent utiliser différentes notations, en fonction des normes de référence. Il est important de choisir les conditions de mesure du profil (*localisation, orientation du plan de mesure... etc.*), pour avoir accès aux valeurs représentatives des écarts géométriques qui doivent être identifiés, ce qui conduit souvent dans la pratique à réaliser plusieurs mesures. Parmi les différents paramètres de la rugosité ou de l'état de surface, dans le domaine d'usinage, on utilise surtout les paramètres R_z et R_a ; on choisit généralement R_a parce qu'il est le plus précis ce qui fait sa préférence dans les travaux de laboratoire, Ce critère R_a représente la moyenne arithmétique de toutes les distances absolues du profil de rugosité R mesurée à partir de la ligne médiane du profil sur la longueur d'évaluation l_m

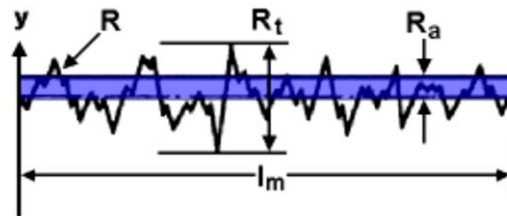


Fig. II.7 Rugosité moyenne arithmétique.

La rugosité totale moyenne R_z représente la moyenne des profondeurs de rugosité de 5 zones d'évaluations successives l_m (fig. I.19).

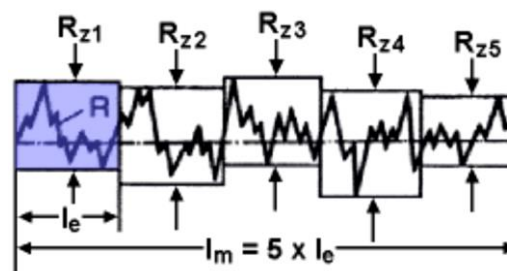


Fig. II.8 Rugosité totale moyenne.

La Rugosité totale (*maximale*) R_t représente l'écart vertical entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil de rugosité R , sur la longueur totale d'évaluation l_m . (Fig. I.20).

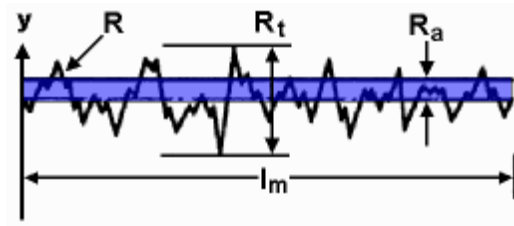


Fig. II.9 Rugosité totale maximale.

La rugosité moyenne quadratique R_q représente la moyenne quadratique de toutes les valeurs du profil de rugosité R calculée sur la longueur d'évaluation l_m .

La rugosité contribue à la concentration des contraintes et à la formation des criques de fatigue, surtout dans le cas des charges alternatives, alors que la décarbonisation et autres défauts de la couche superficielle réduisent la limite de fatigue du métal.

II.7 Essais mécaniques

II.7.1 Intérêt des essais

Pendant plus longtemps, l'empirisme et l'habitude suffisaient pour mener à bien les opérations de mise en œuvre des matériaux tels que : le laminage, le filage, l'extrusion, le forgeage, l'usinage, etc. Or, l'augmentation de la dimension des demi-produits, les exigences accrues de qualité et de précision, les économies d'énergie et même la fiabilité du produit fini à réaliser concourent à rendre nécessaires les calculs détaillés de ces diverses opérations.

La fabrication des diverses structures mécaniques et le rôle fonctionnel que joue chaque pièce dans son assemblage exige en premier lieu de connaître le comportement mécanique du matériau vis-à-vis les sollicitations qui sont imposées par le milieu extérieur. En fait connaître les propriétés mécaniques d'un matériau, c'est un indice technique indispensable pour les ingénieurs qui s'occupent des calculs des structures à chaque étape de mise en œuvre des matériaux. Il est évident que ces calculs ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux souvent influencées par d'autres phénomènes extérieurs telles que : la vitesse de sollicitation, la température, ou même les interactions entre les propriétés mécaniques et les évolutions de la structure microscopique.

Quoique plusieurs modèles et des lois de comportement mécanique ont vu le jour ces derniers temps [2, 4, 13] ; la validation de ces modèles ne peut être signée qu'une fois les résultats trouvés seront en bonne corrélation avec les valeurs expérimentales. C'est à dire que les essais mécaniques qui fournissent directement la réponse des matériaux face à une sollicitation donnée, sont d'un grand intérêt pour la caractérisation de ceux-ci. Nous définissons dans le cadre de ce travail, trois essais fondamentaux (*dureté, traction, ténacité*) qui intéressent d'une voie directe ou indirecte la résistance à la rupture du matériau et caractérisent sa consolidation.

II.7.2 Essais dureté

II. 7.2.1 Domaines de la dureté

La détermination des propriétés mécaniques des couches mince et de la surface des matériaux est souvent délicate. Les raisons principales en sont les hétérogénéités de la matière.

L'essai de dureté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie (*indenteur*) et de la surface d'un échantillon.

De nouvelles techniques ont élargi le champ d'application de l'essai de dureté. Ainsi les fabricants proposent maintenant des appareils permettant de mesurer quelques caractéristiques supplémentaires (*module Young, module de Coulomb, coefficient de Poisson, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.*) à partir de l'enregistrement de la courbe force-déplacement [26].

Plusieurs domaines de dureté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée (fig. I.21) : *Bückle* [27] a introduit en 1965 la notion de la macrodureté pour des charges supérieures à $3\div 5$ kgf et celle de microdureté pour des charges inférieures à $100\div 200$ gf. Le domaine intermédiaire étant celui de la dureté sous charge réduite. Dans les années 80, est apparu le domaine de nanodureté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.

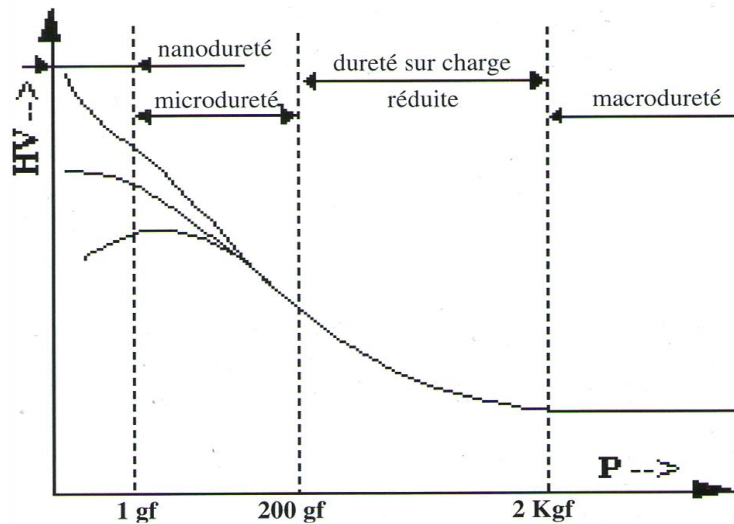


Fig. II.10 Définitions des différents domaines de dureté [27].

L'essai peut être conduit selon les méthodes statique et dynamique. La méthode statique qui regroupe les essais par indentation (voir § I. 9.2.3) est la plus répandue. La méthode dynamique dans laquelle, la pointe du pénétrateur est en mouvement relatif par rapport à la surface du matériau à tester, permet d'avoir une idée de l'amortissement et de la rigidité de la surface soit par oscillation d'un duromètre pendulaire, soit par rebond d'une masse tombante, ou soit par la rayure d'indenteur de forme géométrique bien définie.

Les essais de dureté (*dynamique ou statique*), présentent l'avantage d'être simples, rapides, et non destructifs. Ils offrent un moyen intéressant et très employé dans l'industrie et les laboratoires [26].

La littérature rapporte l'existence de plusieurs critères de dureté qui dans la majorité des cas sont classés selon :

- La géométrie de l'indenteur (*pyramide, cône, sphère etc.*)
- Le type et le mode de sollicitation, suivant le comportement viscoélastique que l'on désire mettre en évidence : fluage, recouvrance, relaxation ou amortissement.
- Les normes et les appareils correspondant à chaque classe.
- La taille de l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface.

Les techniques de mesure peuvent être groupées essentiellement en 3 catégories :

II. 7.2.2 L'essai de dureté Vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur (fig. I.25).

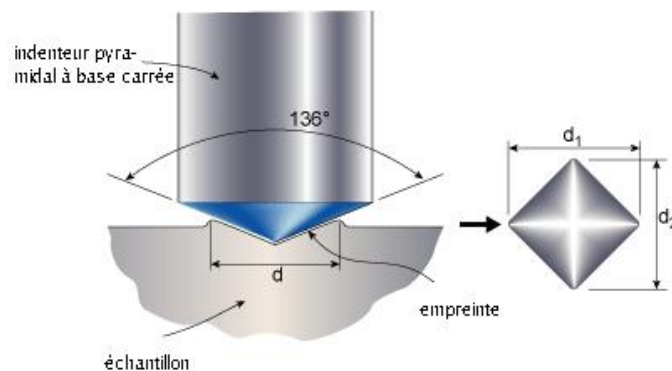


Fig. II.11 Principe de dureté Vickers.

Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester [26].

La force F étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm^2 selon la relation suivante (I.7).

L'essai de Vickers celui qui fournit la plus grande diversité de renseignement. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructifs et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (*dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne*).

II.8 Essai de traction

I.8.1 Intérêt et déroulement de l'essai

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts F de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette. On mesure instantanément l'allongement Δl , correspondant [15].

Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge F à la section initiale S_0 de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte nominale σ :

Et on rapporte l'allongement Δl à la longueur initiale entre repères l_0 , pour obtenir la déformation nominale ε

L'essai est le plus souvent normalisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique (fig. I.26).

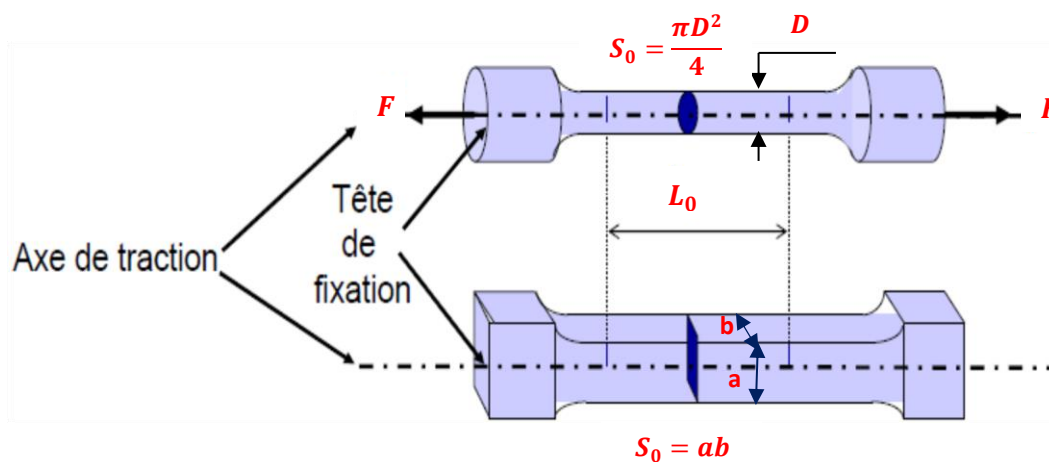


Fig. II.12 Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique.

Les extrémités, ou têtes, de l'éprouvette ont une section supérieure à S_0 , ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai. La géométrie des têtes dépend du mode de fixation utilisé (*serrage sur têtes lisses, filetage ou épaulement*). Le raccordement entre la partie centrale et les têtes doit toujours être progressif afin de minimiser l'effet de concentration des contraintes.

L'éprouvette comprend toujours, entre deux repères séparés par une distance l_0 , une section constante S_0 . Comme la charge de traction est appliquée selon l'axe de l'éprouvette, on comprend que dans la zone centrale, entre les repères, la contrainte soit uniforme tant que la section demeure constante. La figure II.7a donne l'état des contraintes dans la partie de l'éprouvette située entre les repères. Sur les plans perpendiculaires à l'axe de traction, la contrainte nominale de tension, σ est donnée par la relation I.12:

Et les cisssions sont nulles. Par contre, sur un plan dont la normale forme un angle $(\pi/2 - \alpha)$ avec l'axe de traction, la force dF se décompose en une force dN normale au plan de coupe et en une force dT parallèle à celui-ci .

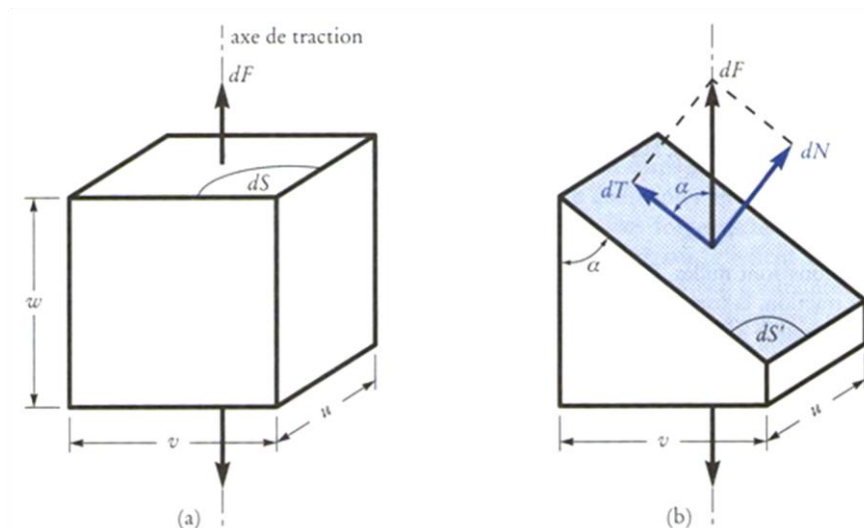


Fig. II.13 Etat des contraintes dans une éprouvette soumise à un essai de traction :a) la force s'exerce sur le plan xy perpendiculaire à l'axe de traction ; b) la force s'exerce sur un plan faisant un angle avec l'axe de traction.

Notons que dans ce cas la cission est maximale pour un angle $\alpha = 45^\circ$. Suivant ce plan, le glissement est plus facile et par conséquent la déformation plastique est plus aisée. Ceci est bien justifié à l'échelle microscopique où le glissement dans les matériaux à structure cubique centrée (cc) ou cubique à face centrée (cfc) s'opère en premier lieu suivant les plans de plus grande densité atomique ($PPGDA$). Ces plans étant orientés suivant une direction favorable proche de 45° [13, 15].

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe à laquelle est fixée l'une des têtes, de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique (*vérins*), soit par des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre, ce qui permet d'obtenir un enregistrement de la courbe brute de traction, $F = f(\Delta l)$ caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie.

II.8.2 Courbes conventionnelle et rationnelle.de traction

L'essai de traction nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'une courbe dite courbe de traction du matériau.

Dans le cas général, les machines d'essai fournissent une courbe dite conventionnelle (§I.6.3) puisqu'on l'on rapporte les efforts F à la valeur initiale S_0 de la section (§I.10.1). Cela peut être accepté dans le domaine des petites déformations ($\varepsilon \leq 20\%$). Cependant lorsque les déformations deviennent importantes ($\varepsilon \rightarrow \infty$), la réduction de la section le devient aussi à cause de l'instabilité plastique à tel point que la contrainte réelle ou vraie σ_v soit représentée par le rapport de la force à la section instantanée S . Une courbe rationnelle de traction est donc la représentation graphique de la contrainte vraie σ_v en fonction de la déformation relative ε_v . Ces deux caractéristiques seront revues en détails au § I.11.4.3.

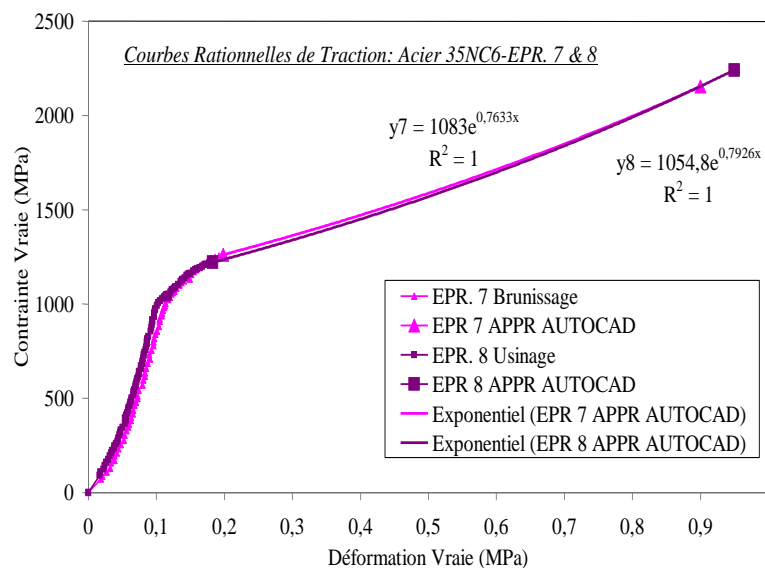


Fig. II.14 Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6 [12].

La courbe de traction rationnelle (Fig. I.28) délivre donc des informations plus importantes que l'essai classique. L'intérêt est d'en déduire des lois permettant de modéliser le comportement du matériau. Cependant les propriétés de traction sont souvent définies à partir d'une courbe conventionnelle de traction.

II.8.3 Propriétés de traction

D'une façon générale, on peut estimer les principales propriétés mécaniques à partir d'une courbe conventionnelle de traction $\sigma = f(\varepsilon)$ d'un matériau à comportement ductile en traction. (fig. I.29) [3, 4].

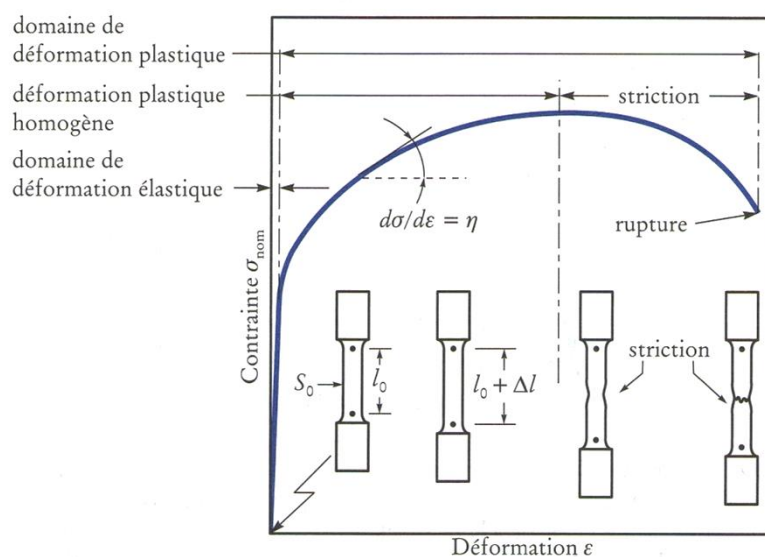


Fig. II.15 Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile).

L'exploitation de la courbe de traction permet de distinguer deux domaines fondamentaux :

II.8.4 Mesure d'après l'essai de traction

Comme nous l'avons montré au § I.11.6, l'aire sous la courbe de traction représente l'énergie dépensée, par unité de volume de matériau, pour rompre l'éprouvette. La figure I.43 représente schématiquement les courbes de traction de trois matériaux ductiles : *I*, *II* et *III*. Le matériau *II*, bien qu'ayant une rigidité moyenne, est le plus tenace; le matériau *III*, dont la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont les plus faibles, est cependant beaucoup plus tenace que le matériau *I*, qui est le plus rigide.

Le fait d'augmenter la limite d'élasticité d'un matériau ductile, en entravant le déplacement des dislocations dans les métaux, nuit à la ductilité du matériau et entraine en général une diminution de sa ténacité. Le spécialiste des matériaux doit donc s'attacher à améliorer la limite d'élasticité d'un matériau ainsi que sa résistance à la traction (*pour satisfaire aux exigences de l'ingénieur chargé de la conception d'une structure*), mais il doit également veiller à obtenir une bonne ductilité (*pour qu'on puisse le mettre en forme*) et une bonne ténacité (*résistance à la propagation brusque de fissures*) [13, 15].

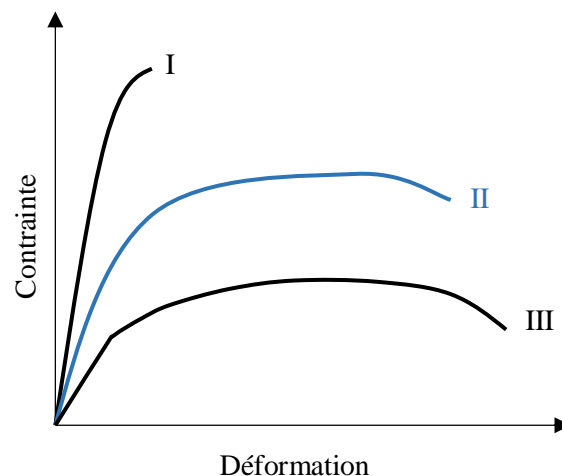


Fig. II.16 Comparaison de la ténacité de trois matériaux (I, II et III), grâce à l'aire sous leurs courbes de traction.

A partir de l'aire (*énergie*) plastique A_p ; (fig. I.38), on peut remarquer que la ténacité dépend non seulement de la ductilité caractérisée par l'allongement $A\%$ mais également de la limite élastique R_e et la résistance à la rupture R_{rt} (Voir § I.10.6).

Pour les aciers maraging (*cas d'une structure épaisse (déformation plane)*), il a été trouvé la corrélation suivante [36] :

II.9 Essai de fatigue

La fatigue est l'endommagement local d'une pièce sous l'effet d'efforts variables : forces appliquées, vibrations, rafales de vent, etc. Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, la variation de l'effort, même à des niveaux bien plus faibles que ceux pouvant provoquer sa rupture, peut à la longue provoquer sa rupture. Les essais de fatigue permettent de déterminer la résistance des matériaux à de telles faibles charges répétées.

À titre d'exemple, si une vis de diamètre 6 mm peut tenir un objet d'une tonne^a, elle va en revanche casser si on lui suspend un objet de 100 kg un million de fois de suite.

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui sous l'action de contraintes ou déformations variables dans le temps modifie les propriétés locales d'un matériau. Ces dernières peuvent entraîner la formation de fissures et éventuellement la rupture de la structure. La fatigue est notamment caractérisée par une étendue de variation de contrainte qui peut être bien inférieure à la limite d'élasticité du matériau. Les étapes principales de la ruine par fatigue d'un assemblage sont l'amorçage de fissures (si des défauts ne sont pas déjà présents dans le matériau), la propagation de fissures et la rupture finale.

Les paramètres souvent utilisés pour prédire le comportement en fatigue et ainsi le nombre de cycles à la rupture d'une structure sont : l'amplitude de la sollicitation (chargement ou déformation imposée), sa valeur moyenne, l'état de surface et le milieu dans lequel la structure sera utilisée.

II.9.1 Description de la fatigue d'une pièce métallique

Lorsque l'on exerce une contrainte monotone (voir *Essai de traction*) sur une éprouvette lisse (avec un champ de contrainte quasi uniforme) métallique ductile, au-delà d'une valeur de contrainte appelée « limite d'élasticité » et notée R_e l'éprouvette commence à se déformer de manière irréversible par déformation plastique. Lorsque l'on continue à exercer une contrainte supérieure à R_e sur l'éprouvette, cette déformation plastique génère un endommagement puis

une rupture, la contrainte provoquant l'endommagement étant appelée « résistance à la traction » et notée R_m ; R_m est supérieure à R_e .

Lorsque l'on conçoit une pièce, on la dimensionne pour que la contrainte ne dépasse jamais R_e , ce qui provoquerait une déformation irréversible de la pièce et donc perturberait le fonctionnement du système. Donc *a fortiori* pour que la contrainte ne dépasse jamais R_m .

Or, dans le cas d'un chargement cyclique, on observe une rupture après plusieurs cycles (parfois plusieurs millions de cycles), pour des valeurs de contrainte inférieures à R_e .

Certains matériaux présentent une limite d'endurance, inférieure à R_e : si la contrainte est inférieure à cette limite d'endurance, on n'observe « jamais » de rupture (du moins pas dans un temps raisonnable, typiquement plus de cent millions de cycles). Certains matériaux n'ont pas de limite d'endurance, et la rupture survient toujours au bout d'un nombre plus ou moins long de cycles même pour de faibles valeurs de contrainte ; c'est notamment le cas des alliages d'aluminium.



Fig. II.17 Faciès de rupture de fatigue (manivelle de pédalier de vélo)

on distingue les lignes de progression de fissures en bas à droite (zone sombre) et la zone d'arrachement (zone claire)

Lors de la conception d'une pièce, on doit examiner ses différents modes de dégradation :

- la rupture statique ou rupture en moins d'un cycle (dans la phase ascendante de la charge, soit dans le premier quart du cycle dans le cas d'un cycle de type sinusoïdal) ;
- la déformation permanente (déformation plastique) si elle peut obérer le fonctionnement ultérieur ;

Ces différents modes de ruine correspondent à des chargements d'amplitudes décroissantes.

L'endommagement en fatigue se produit en priorité dans les zones dont les contraintes alternées sont les plus fortes, c'est-à-dire dans les zones à concentration de contraintes (trous, entailles...).

La surface rompue, observée au microscope, a un faciès typique : on observe des stries globalement parallèles, correspondant à la propagation de la fissures à chaque sollicitation, puis une zone d'arrachement, correspondant à la rupture finale.

La durée de vie à l'amorçage de fissure a souvent une durée importante devant celle de propagation. Dans le cas d'une éprouvette lisse, la durée de vie en propagation est faible. En revanche, pour une structure, la partie propagation peut être significative. On distingue donc deux phases :

- la phase d'amorçage durant laquelle le matériau est endommagé de façon non détectable (N.B. : un anglicisme couramment employé est « initiation » ; l'emploi de ce terme est incorrect en français) ; la durée de vie est souvent définie à l'amorçage de fissure détectable de la structure, avec un choix approprié des propriétés minimales du matériau ;
- la phase de propagation de fissure pendant laquelle des inspections peuvent être effectuées avant rupture ; c'est le domaine de la mécanique de la rupture.

II.9.2 Rupture en fatigue d'une éprouvette lisse de traction compression

Le cas de l'éprouvette lisse de traction-compression est un cas élémentaire. Les ruptures en situations réelles sont plus complexes, mais cette étude permet la compréhension des concepts de base et la mise en place des concepts.

On se limite en général à 30 Hz pour un acier, et à 3 Hz pour un polymère.

L'éprouvette casse de manière aléatoire. Pour un matériau donné, il faut donc effectuer plusieurs essais pour un niveau de contrainte alternée σ_a donné : au minimum 3, dans l'idéal une vingtaine. Dans la pratique, on utilise 3 à 9 éprouvettes.

La principale limitation de cet essai est la durée et le coût. Pour cette raison, on a souvent un nombre limité d'éprouvettes, et l'on arrête les tests au bout de dix millions de cycles (10^7) même si l'éprouvette n'est pas rompue (censure) : à 30 Hz, un essai dure $3,3 \times 10^5$ s soit trois jours et vingt heures. Pour les polymères, la fréquence étant plus faible, on se limite en général à un million de cycles (10^6).

II.9.3 Courbes de fatigue

Des essais sur éprouvettes lisses avec un chargement périodique caractérisé par sa contrainte moyenne et sa contrainte alternée permettent de définir le nombre de cycles à rupture du matériau. La rupture en 1/4 de cycle est le résultat de l'essai de traction, elle est obtenue quand la contrainte maximum (contrainte moyenne plus contrainte alternée) atteint la limite de rupture en traction. On peut représenter sous forme de courbes de Wöhler la relation entre son amplitude de contrainte alternée S_a et N le nombre de cycles à rupture pour chaque valeur de R , rapport de charge ; si nécessaire on répète les essais pour différentes températures. Le rapport de charge R est le rapport entre contrainte minimale (contrainte moyenne moins la contrainte alternée) et contrainte maximale (contrainte moyenne plus contrainte alternée). La limite d'endurance $S_aD(R)$ est la valeur de contrainte alternée en deçà de laquelle il n'y a pas de fatigue.

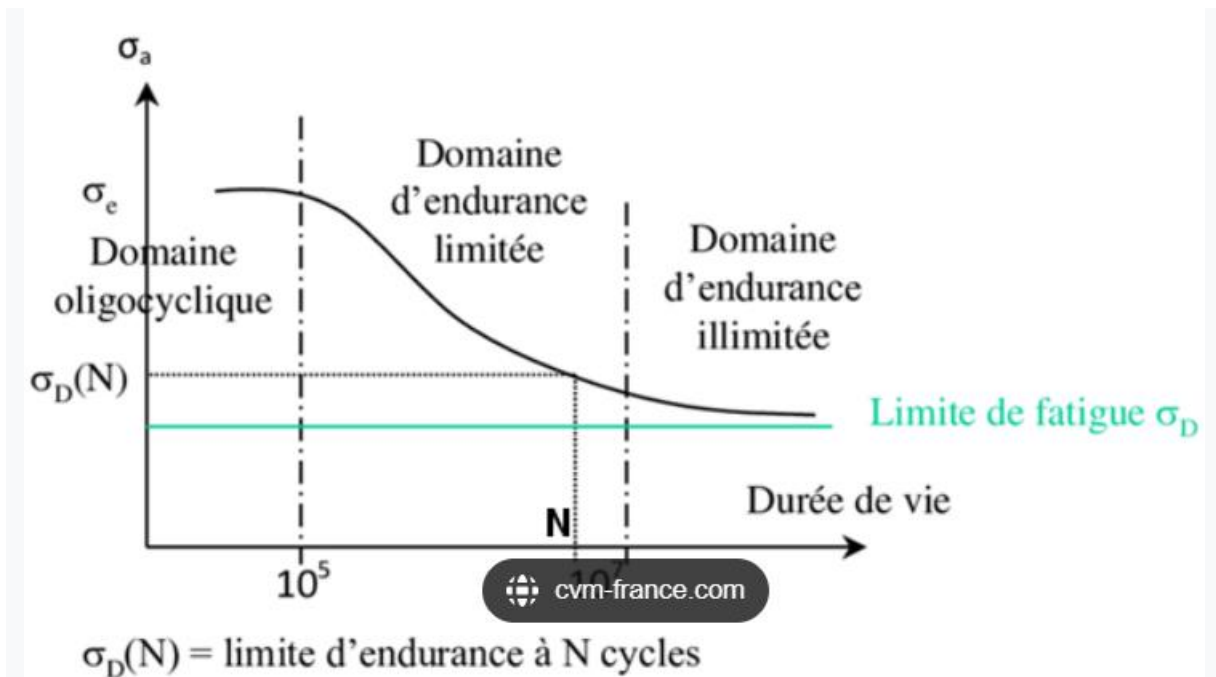


Fig. II.18 Courbe de fatigue de Wöhler (*Wöhlerlinie* en allemand), représentant en échelles logarithmiques la contrainte à rupture en fonction du nombre de cycles de chargement.

Des facteurs secondaires affectent le nombre de cycles à rupture N : l'état de surface, la fréquence du chargement, la taille de l'éprouvette. Aussi, la préparation des éprouvettes de fatigue avant essais est très importante pour garantir la fiabilité des résultats⁸. Pour étudier la durée de vie d'une structure, on peut utiliser les courbes de Wöhler pour des chargements conduisant à de grandes durées de vie (>50 000 cycles). Il faut pour cela transformer aux endroits les plus contraints le tenseur local variable en son équivalent uniaxial moyen et alterné. Pour des chargements plus intenses, les essais de fatigue conduisant à un effet de rochet (cumul des déformations permanentes à chaque cycle), on leur substitue des essais en déformation imposée. Le cycle de contrainte stabilisé obtenu, caractérisé par sa contrainte moyenne et sa contrainte alternée) permet d'étendre dans le domaine oligocyclique les courbes de Wöhler. Dans le cas d'une structure ou d'une éprouvette entaillée, on doit transformer aux endroits les plus chargés le tenseur local variable en son équivalent uniaxial moyen et alterné. On suppose de plus que s'il y a plastification, elle n'est que locale : il existe un cycle de contrainte qui se

stabilise et que l'on caractérisera par son tenseur moyen et son tenseur alterné ; le tenseur moyen peut donc être affectée par un état de contrainte initial (contraintes résiduelles) et par la plasticité en cas de dépassement local de la limite d'élasticité.

L'invariant pertinent du tenseur alterné est le second invariant de son déviateur, c'est-à-dire sa contrainte de von Mises. L'invariant pertinent du tenseur moyen est sa trace : en effet, des essais de torsion sur des éprouvettes axisymétriques démontrent, en l'absence de plasticité, que la fatigue en torsion n'est pas affectée par la torsion moyenne. Alors que la pression hydrostatique n'affecte pas la plasticité, elle réduit la durée de vie en fatigue quand elle est positive. C'est la variation de charge qui produit la fatigue, l'endommagement de fatigue est pondéré par la pression hydrostatique moyenne (égal au tiers de la trace du tenseur moyen).

En cohérence avec les hypothèses ci-dessus, il est nécessaire d'obtenir un chargement périodique.

- Si le niveau de contrainte maximum au sens de von Mises est faible (inférieur à 60 % de la limite d'élasticité), un chargement cyclé en effort est effectué.
- Si le niveau de contrainte maximum au sens de von Mises est supérieur, on effectue des essais en déformation imposée afin d'obtenir un cycle de contrainte-déformation stable lors du chargement périodique.

Aux cycles moyens et alternés stabilisés caractérisés par les invariants définis ci-dessus, on associe le nombre de cycles à rupture de l'essai de fatigue réalisé.

Les critères de fatigue consistent à combiner les deux invariants pour relier de façon biunivoque le scalaire ainsi défini au nombre de cycles à rupture.

Les courbes de fatigue relient de façon biunivoque le nombre de cycles à rupture à une amplitude de contrainte alternée, pour différents rapport de charge (ratio contrainte minimum sur contrainte maximum).

À partir de critère de fatigue, on peut relier une contrainte alternée effective au nombre de cycles à rupture, quel que soit le rapport de charge : on obtient une courbe unifiée.

Les essais de fatigue étant généralement effectués sur des éprouvettes lisses, la définition des invariants est évidente.

Pour un chargement quelconque, des décompositions plus ou moins justifiées (algorithme de type comptage rainflow) permettent d'obtenir des chargements cyclés équivalents.

On admet généralement que la période et la forme exacte des oscillations sont sans effet sur le nombre de cycles admissible. D'autre part, la résistance en fatigue peut être modifiée par de nombreux facteurs (état de surface, causes aléatoires, type de charge, température, concentration de contrainte, ...), ce qui peut conduire à des études complémentaires.

La prise en compte de l'aspect statistique des résultats d'essai de fatigue est impérative.

- Dans le domaine oligocyclique, on définit généralement les durées de vie avec la valeur moyenne moins trois écarts-types ($m - 3\sigma$), ce qui correspond à une probabilité de 1/741 ou avec la définition B0.1 qui correspond à la probabilité 1/1 000. Pour des procédés de fabrication maîtrisés comme ils le sont dans l'industrie aéronautique, un facteur 2,5 existe entre la valeur moyenne et la valeur minimale définie par $m - 3\sigma$.
- En fatigue conventionnelle, la dispersion est supérieure à celle de la fatigue oligocyclique.
- La limite d'endurance SaD minimale vaut environ la moitié de la limite d'endurance moyenne.

Les facteurs secondaires (état de surface, contraintes résiduelles, ...) sont plus forts quand la durée de vie augmente.

II.9.4 Fatigue des détails structuraux

L'analyse de la structure exige que l'on examine les états de contrainte en tout point. C'est généralement lors des variations de géométrie (entailles, trous...) que l'on obtient les états limitant en fatigue. La prévision de durée de vie exige donc que l'on s'attache à l'étude des détails structurels.

La méthode de prévision de durée de vie la plus élaborée utilise uniquement les résultats de fatigue obtenus sur éprouvettes lisses, en effort imposé ou en déformation imposée comme expliqué plus haut. Pour analyser une structure, on suppose que l'état de contrainte local cyclé de la structure, résultant de l'état de contrainte initial, de la redistribution de contrainte en cas de plastification due au chargement, et du chargement, donne la même durée à l'amorçage de

fissure que celle d'une éprouvette lisse soumis au même cycle de contraintes. On admet souvent que la durée de vie en propagation de fissure de l'éprouvette est négligeable.

II.10 Conclusion

Les matériaux et les essais mécaniques sont des éléments essentiels de l'ingénierie des matériaux et de la conception de produits. Comprendre les propriétés mécaniques des matériaux est crucial pour garantir la sécurité et la performance des structures et des composants utilisés dans de nombreux secteurs industriels. Les essais mécaniques permettent de mesurer et d'évaluer les propriétés mécaniques des matériaux, telles que la résistance, la dureté, la ténacité et la ductilité, ce qui aide à prendre des décisions éclairées lors du choix des matériaux et de la conception de produits.

Grâce aux avancées technologiques, de nombreuses méthodes et techniques d'essais mécaniques ont été développées, permettant une évaluation précise des propriétés des matériaux. Ces informations sont utilisées par les ingénieurs pour concevoir des structures sûres et durables, et par les scientifiques pour étudier et développer de nouveaux matériaux aux propriétés améliorées.

Chapitre III. Le brunissage

III.1 Introduction

Le brunissage est un trètement mécanique utilisé pour améliorer l'apparence et la résistance à la corrosion des surfaces métalliques. Il est largement utilisé dans diverses industries, notamment l'automobile, l'aéronautique, l'horlogerie et la fabrication d'armes à feu. Le brunissage donne aux pièces métalliques une finition attrayante et offre également une protection contre la rouille et l'usure.

Le processus de brunissage implique souvent l'utilisation d'acides ou de solutions mécanique spéciales qui réagissent avec la surface du métal pour former une couche protectrice. Cette couche peut varier en couleur, allant du brun foncé au noir, en fonction du type de métal et de la solution utilisée. Le brunissage peut être réalisé à la main ou de manière industrielle, en fonction de la taille et de la complexité des pièces métalliques.

III.2 Définition et principe

Le brunissage constitue un traitement de mise en œuvre à froid, il déforme plastiquement les couches superficielles [41] d'une pièce ayant subi en général un usinage préalable par enlèvement de copeaux (fig. II.1).

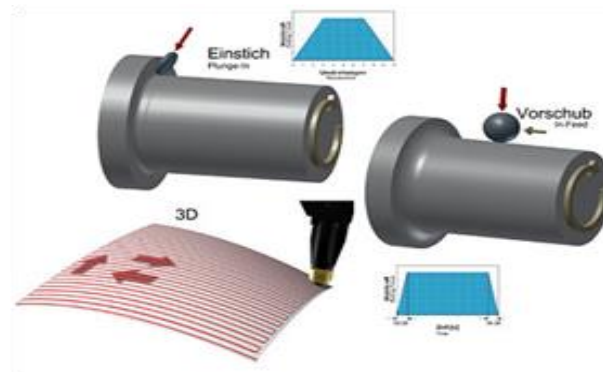


Fig. III.1. Principe de fonctionnement du brunissage.

La technologie du procédé est variée selon la machine et l'outil utilisé [40, 42]. Elle réside principalement dans le fait que la force appliquée par l'outil de brunissage (fig. II.2) sur la pièce à traiter oblige les couches superficielles de celles-ci à subir une déformation plastique.



Fig. III.2 Outil du brunissage .commercialisé par la firme *COGSDILL TOOL*:
a) partie active, b) corps de l'outil.

Le brunissage se fait à l'aide d'une pointe en diamant ou avec une bille en acier trempé ou en carbure métallique. Il constitue une opération simple à exécuter, vu qu'elle peut être réalisée sur des machines outils aussi bien classique (*tour, fraiseuse...*), que spéciales (*brunisseuse*) [54].

Le procédé intéresse aussi bien les surfaces extérieures que les surfaces intérieures (fig. II.3).et peut être appliqué sur des pièces de haute dureté pouvant atteindre jusqu'à plus de *50HRC*.

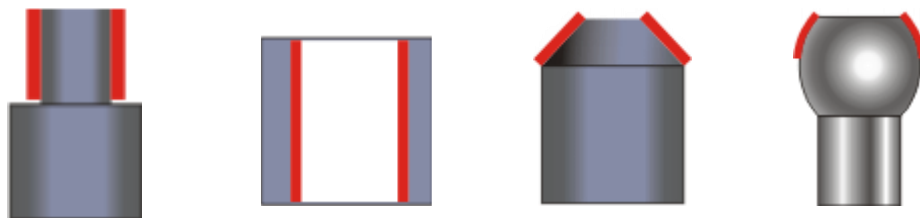


Fig. III.3. Différentes surfaces à traiter par brunissage.

III.3 Intérêt et paramètres du brunissage

Le souci d'avoir des surfaces de qualité irréprochable conjugué à celui de la rentabilité imposent le brunissage d'une part, comme un moyen d'obtention des qualités de surfaces et des tolérances dimensionnelles assimilables à celles déduites d'un usinage de finition (*tournage dur ou rectification*). En fait, il est établi que pour un usinage classique, les frais de fabrication augmentent rapidement avec une rugosité décroissante. On peut aussi économiser non seulement les frais de fabrication pour un temps de brunissage plus court, mais aussi par les frais réduits d'outillage et de préparation des pièces [44]. D'autre part, le brunissage s'impose

dans les gammes de fabrication à fournir un taux de consolidation aussi comparable à celui fourni par les traitements thermiques ou thermochimiques.

Le brunissage est utilisé de plus en plus comme une opération de finition et peut se substituer aux autres techniques conventionnelles de mise en œuvre des matériaux. C'est dire en conclusion que le traitement de brunissage constitue une alternative à plusieurs procédés de fabrication par enlèvement de copeaux.

Les paramètres affectant la finition des surfaces sont variés ; bien souvent on mise sur la vitesse, l'avance ou la force [39, 40], parfois d'autres facteurs sont introduits comme le nombre de passes, le rayon d'outil, la profondeur de pénétration ou l'interférence [38, 45]. Les réponses de sortie dépendent en grande partie d'une combinaison spécifique des différents paramètres envisagés en fonction des outils, du matériau traité, des conditions de travail ainsi que l'état initial des couches superficielles.

D'autres réponses de sortie ont été envisagées lors du brunissage comme l'introduction des contraintes résiduelles de compression, la résistance à l'usure ou la tenue en fatigue.

III.4 Effets du brunissage

De la déformation plastique superficielle induite par le brunissage, résulte un lissage du profil microgéométrique de la surface et un durcissement par écrouissage des couches superficielles. De ces effets résultent des améliorations des caractéristiques mécaniques et technologiques de nombreux alliages métalliques.

III.4.1 Effets sur la qualité géométrique de surface

Lors du brunissage, les crêtes des aspérités d'une surface sont amenées à fluer dans les creux de cette dernière et la surface acquiert un bel aspect microgéométrique (fig. II.4).

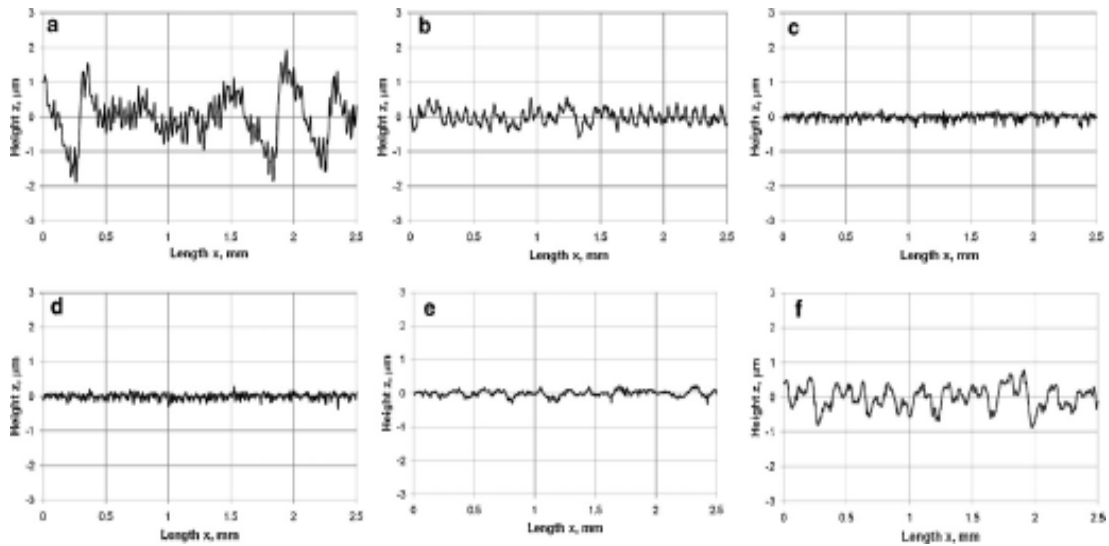


Fig. III.4 Lissage du profil de surface par brunissage d'acier 41Cr4, HT-S1 (a), HT-W1 (b), HT-S1 + SF (c), HT-W2 + SF (d), HT-S2 + BUR (e), and HT-W2 + BUR (f),

Dans le domaine industriel, le brunissage est considéré comme étant un procédé de finition [46], et aussi comme un procédé d'usinage sans enlèvement de copeaux, c'est-à-dire un usinage à volume constant de pièce [47].

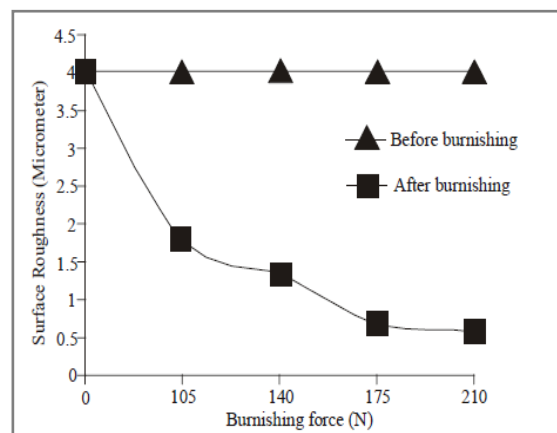


Fig. III.5. Effet du brunissage sur la rugosité de surface [49].

Ces effets sont affectés par plusieurs facteurs: la vitesse, l'avance, l'effort, le rayon de la bille et le nombre de passe sont les paramètres les souvent introduits comme paramètres d'entrée. Ils ont les effets les plus significatifs sur la qualité de surface.

D'après plusieurs travaux [50], [51], [52], [53], [54], lors de brunissage on constate que la vitesse de travail avec des faibles valeurs d'avance (fig. II.6) contribue à améliorer la rugosité. Selon les auteurs, cette amélioration pourrait s'expliquer par le fait que la température dans la zone de formage augmente avec la vitesse avant de se stabiliser à un certain moment. Cela permet au métal de prendre un aspect de plus en plus visqueux. Le frottement entre l'outil et la pièce se trouve réduit d'où la diminution de la rugosité et par conséquent un aspect de surface plus meilleur.

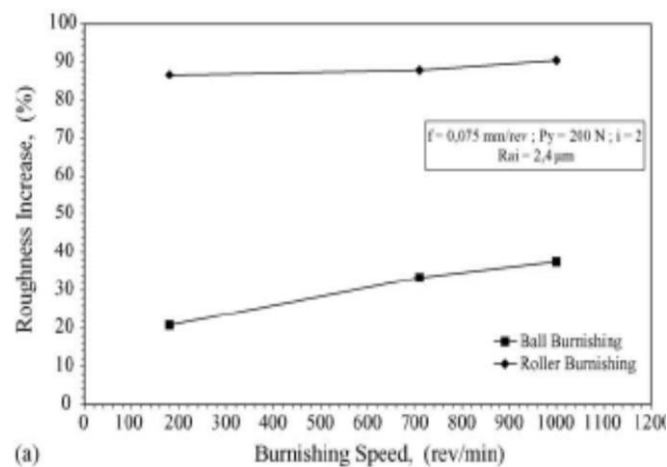


Fig. III.6 Influence de la vitesse de brunissage sur la rugosité [51].

Il a été montré que les avances trop importantes ne donnent pas un bon état de surface [55]. Par analogie à l'usinage conventionnel, l'augmentation de l'avance fait augmenter le pas de sillons laissés sur la surface de la pièce (Fig. II.7a) [56]. Dans ce cas, les aspérités ne sont pas nivelées de façon continue ; l'aspect de surface se trouve altéré et la rugosité se trouve perturbée. D'autres travaux ont montré que les faibles valeurs d'avance combinées à des efforts moyens ou à des valeurs de vitesse élevée [48] permettent des rugosités les plus faibles ; souvent inférieures à $0,3 \mu m$. (fig. II.7b).

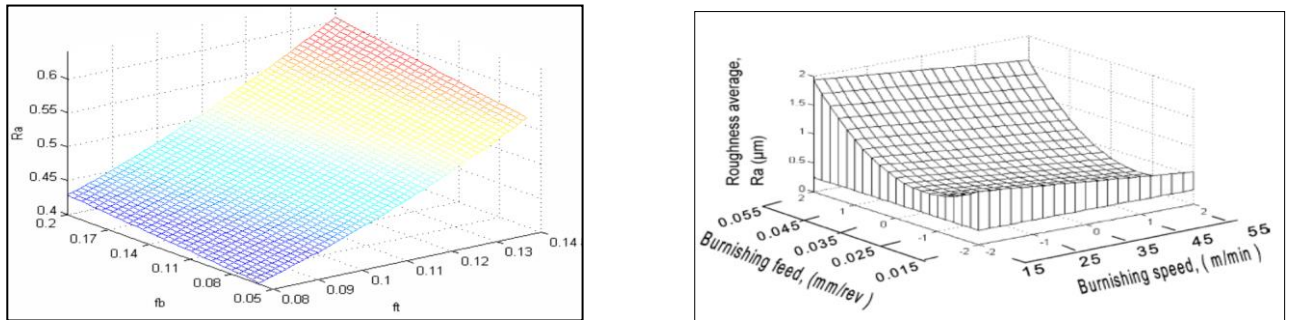


Fig. III.7. Influence de l'avance sur la rugosité : a) tournage, b) brunissage [55]

Un faible rayon d'outil génère des aspérités plus aiguës et très délicates à niveler [56]. Lorsque le rayon de l'outil augmente, les aspérités sont aplaties davantage et leur hauteur est réduite. La surface présente par conséquent un bel aspect avec de faibles valeurs de la rugosité. Cela a été confirmé par *A.M.Hassan et all*, qui ont montré que l'application du brunissage sur l'alliage *Al-Cu* pour différentes valeurs de la force de brunissage et les conditions de: $V=26$ m/min, $f=0.08$ mm/tour, $n=1$, $HV=127$; la rugosité diminue avec l'augmentation du diamètre de la bille. (fig.II.8a) [57]

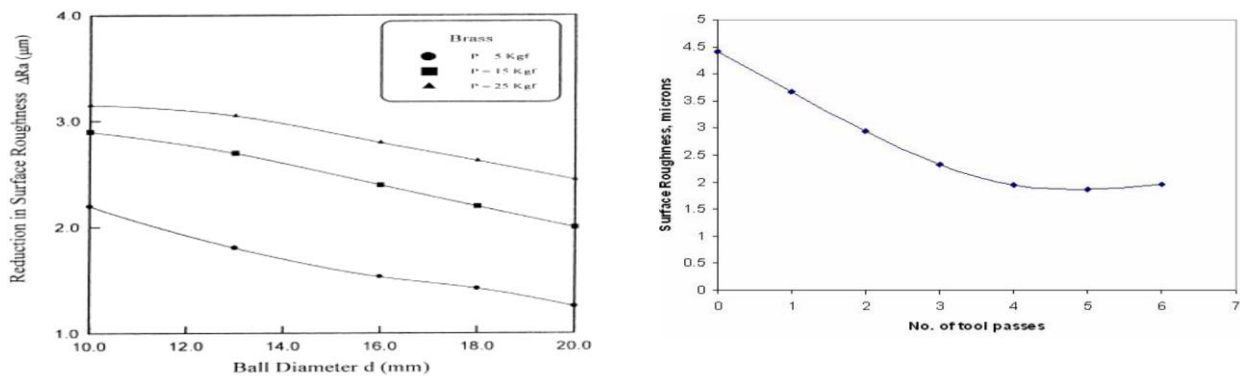


Fig. III.8. Variation de la rugosité : a) en fonction du rayon d'outil brunissage [57], b) en fonction du nombre de passe [58].

D'autres travaux ont montré que le nombre de passes est un paramètre très important par son influence. La figure II.8b représente la variation de la rugosité à divers valeurs du nombre de passes combiné avec les autres conditions de brunissage appliquée sur un d'acier doux ; il a été observé que la rugosité diminue progressivement. Toutefois au delà de 5 passes, la rugosité se stabilise. Généralement l'effet du nombre de passe sur la rugosité de la surface traitée par le

brunissage est limité par une certaine valeur de celui-ci en raison des effets secondaires incompatibles avec la rugosité [58].

III.4.2. Effets sur la qualité physique de surface

La majorité des travaux soulignent que le brunissage contribue à consolider davantage les couches superficielles. L'écroissage dépend du matériau, de la quantité de déformation appliquée et des conditions de déformation (*température, vitesse et mode de déformation*).

Sous l'effet de l'écroissage, la dureté superficielle croît pour certains types de matériaux.

Des travaux de *H. Hamadache et all* conduits sur l'acier *Rb 40* [55], ont montré que la vitesse et l'avance de formage ne sont pas avantageuses pour la microdureté puisque cette dernière diminue avec l'augmentation de ces deux paramètres. La plus grande chute de la microdureté a été observée lorsque la vitesse et l'avance sont associées à de faibles valeurs de la pression et du rayon de l'outil (fig. II.9).

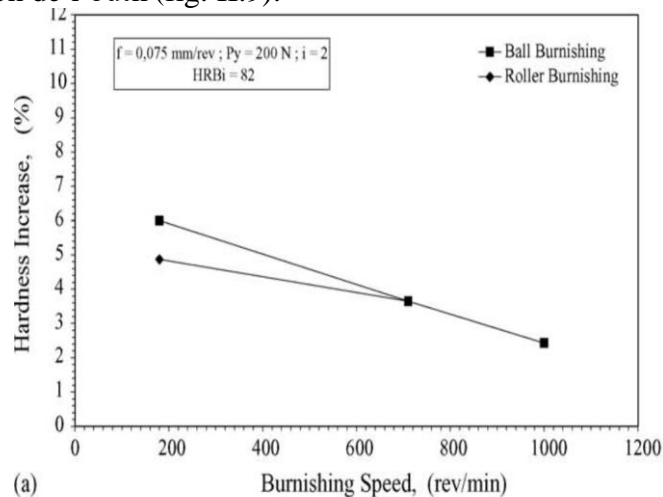


Fig. III.9. Influence de la vitesse de brunissage sur la dureté de l'acier *RB40* [55].

Certains auteurs [57] expliquent qu'à faible avance (fig. II.10), l'écoulement du métal (*acier ST37*) est plus régulier. En augmentant ce paramètre, le pas des sillons augmente, il s'en suit que l'outil ne déforme pas la matière de façon continue. En fait, si l'on considère un point de la pièce, celui-ci ne se déforme qu'une seule fois au passage de l'outil puisque la rotation de la pièce fait que le point en question ne se déforme que si l'outil est immobilisé en translation ($f = 0$), on pense alors que la rapidité d'exécution ne permet pas à la déformation de se manifester judicieusement.

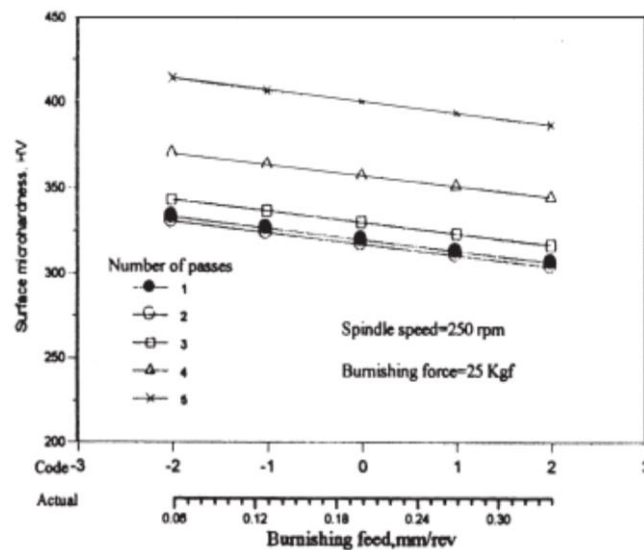


Fig. III.10. Influence de l'avance de brunissage sur la dureté de l'acier *ST37* après brunissage pour : $V = 250 \text{ tr/mn}$; $f = 0,054 \text{ mm/tr}$; $P = 25 \text{ Kgf}$; $r = 3 \text{ mm}$ et $i = 1 \div 5$ [57].

La vitesse de traitement étant liée cinématiquement à l'avance par la chaîne cinématique de la machine-outil, c'est pourquoi son effet est le même que celui de l'avance.

La force de brunissage est un des facteurs les plus importants qui gouvernent les effets du brunissage. L'importance de la surface déformée et le taux d'écaillage en dépendent fortement de ce paramètre. La microdureté augmente avec la force de brunissage. Plus la force est grande plus importantes sont les déformations et plus intense est l'écaillage superficiel. Ceci aura par conséquent un accroissement de la microdureté [55].

Cette augmentation est d'autant plus poussée que les paramètres v , f , r sont à leurs faibles niveaux et que l'outil présente un grand rayon. Toutefois en poussant ce paramètre au-delà de 10 kgf sur l'acier *35NC6* (fig. II.11a), on risque un écaillage et une microfissuration de la surface. En traitant de l'aluminium (*AISI 1045*), *U.M shirast et al* [59]; ont remarqué que la dureté superficielle diminue au delà de 18 kgf (fig.II.11b).

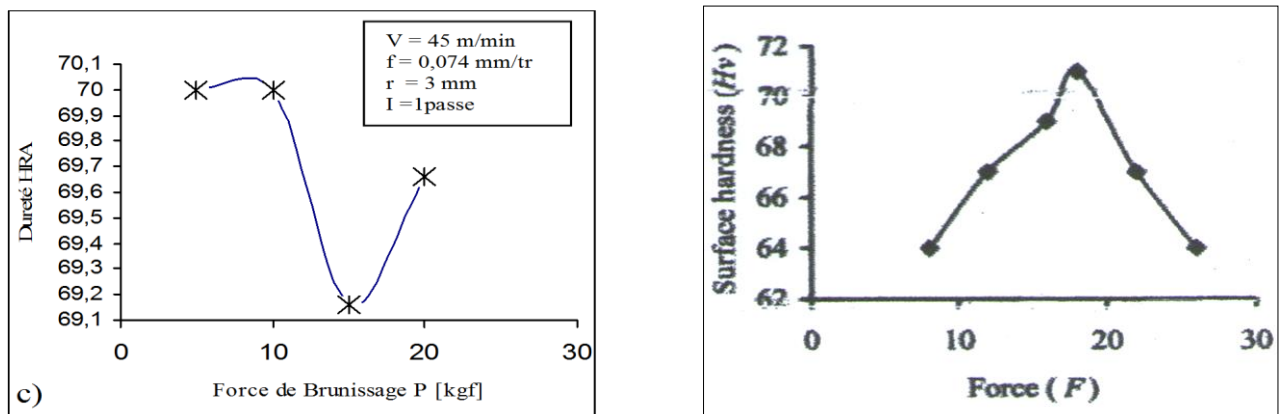


Fig. III.11. Influence de l'effort de brunissage sur la dureté : a) acier 35NC6 ; b) aluminium (AISI 1045) [55, 59].

Lorsque le rayon de l'outil est important, la surface de contact entre l'outil et la pièce le devient aussi. La pression hertzienne sera alors importante ; il s'en suit une déformation plastique plus accrue et par conséquent une augmentation de la microdureté. La figure II.12 montre que la dureté superficielle de l'acier 4140 augmente avec l'augmentation du diamètre de la bille de l'outil de brunissage [60].

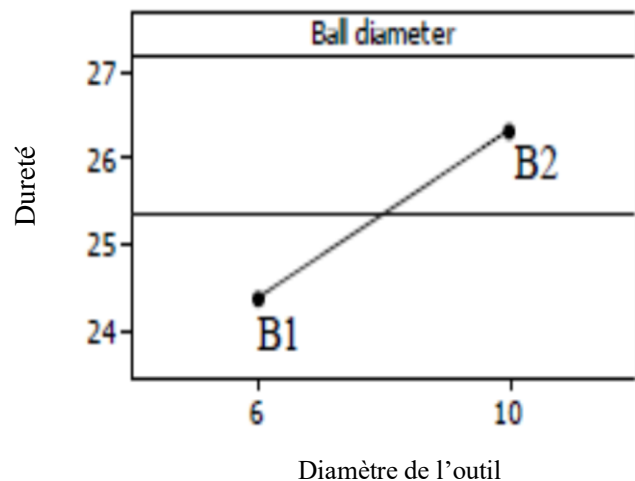


Fig. III.12. Influence de rayon de l'outil sur la dureté [60].

Les faibles valeurs du nombre de passes provoquent un faible écoulement plastique de la matière en surface qui a pour conséquence un faible écrouissage qui se traduit par un faible durcissement des couches superficielles [61]. Avec l'augmentation de ce paramètre, *El-Khabeery et al* ont remarqué une amélioration de la dureté pouvant atteindre 26% [37] lors de l'application du brunissage sur l'alliage d'aluminium 6061-T6 (fig.II.13).

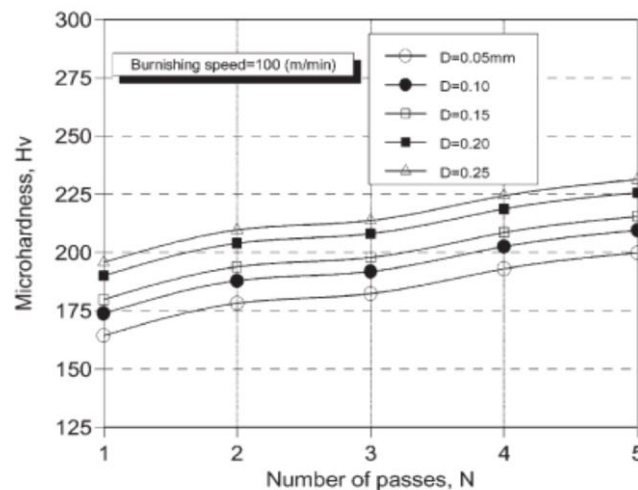


Fig. III.13. Influence de nombre de passe de brunissage sur la dureté [62].

III.4.3. Effets sur la qualité mécanique de surface

Tout procédé de fabrication introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles qui vont influencer son comportement en fatigue, en rupture et même en corrosion. Le brunissage fait partie d'une gamme de traitements mécaniques dont le rôle est d'introduire des contraintes résiduelles de compression. Grâce à ce champ de contraintes résiduelles favorables pour décharger les couches superficielles d'une pièce mécanique, les performances sont nettement améliorées. Cette action peut être assimilée à un béton précontraint. C'est pour cette raison que les traitements de surface mécaniques sont souvent considérés comme un traitement de précontrainte.

P. Zhang et al [61] ont remarquée que l'apparition des les contraintes résiduelles de compression se manifestent sur une faible profondeur pour une surface tournée. La profondeur affectée par le grenailage peut atteindre jusqu'à $30 \mu\text{m}$, alors que pour le cas du brunissage,

les contraintes résiduelles de compression sont observées jusqu'à une profondeur d'environ 120 μm par rapport à la surface (fig. II.14).

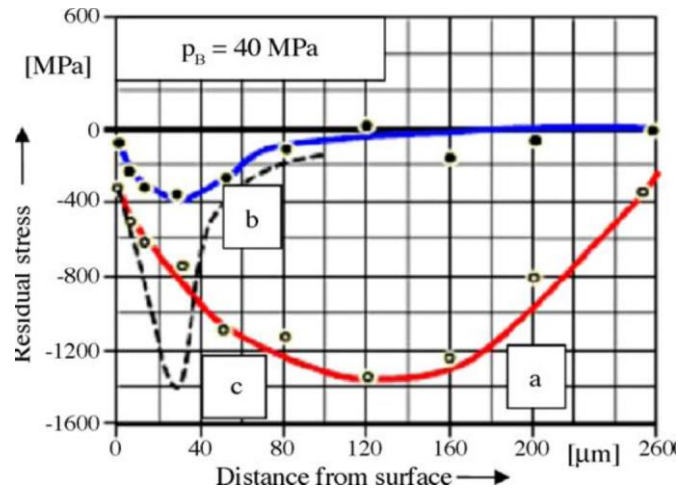


Fig. III.14. Contraintes résiduelles obtenues sur une pièce forgée à froid [75] : a) état de brunissage, b) état de tournage, c) état de grenailage.

Généralement les contraintes résiduelles, obtenues par le brunissage, dépendent du matériau traité. Certains travaux [62] ont fait remarquer que le maximum des contraintes résiduelles obtenu sur les pièces traitées en alliage de titane 606-T6 est situé en surface. Ce maximum est proportionnel à la vitesse appliquée (fig. II.15a), au nombre de passes et à la profondeur de pénétration (fig. II.15b).

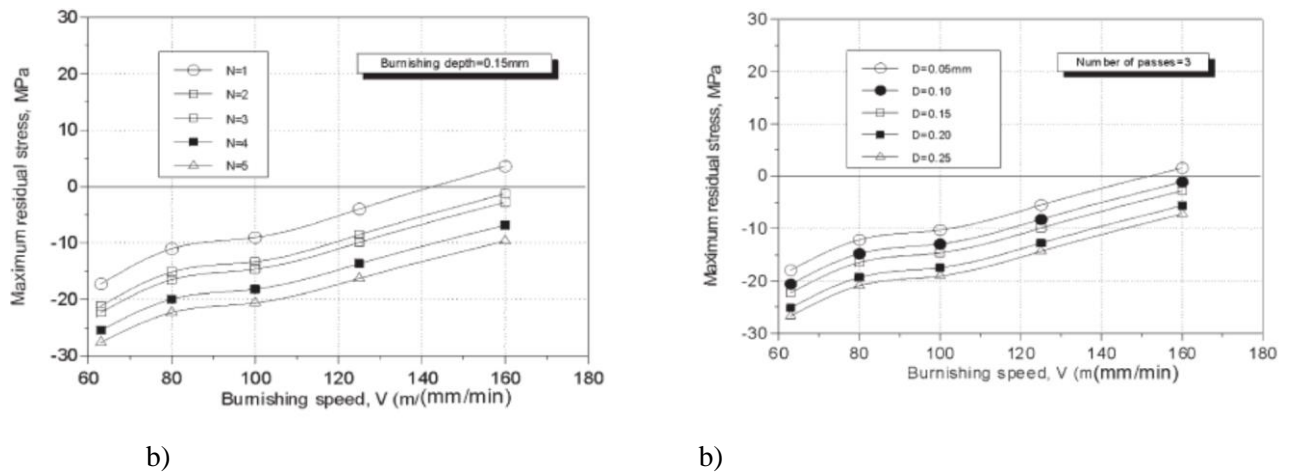


Fig. III.15 Evolution des contraintes résiduelles avec la vitesse sur pièces en 6061-T6 traitée par brunissage : a) en fonction du nombre de passe, b) en fonction de la profondeur de pénétration [62].

Comme dans les autres traitements de surface mécaniques, l'introduction des contraintes résiduelles de compression engendre une augmentation de la résistance à la fatigue.

Un écrouissage superficiel et donc une augmentation de la dureté avec une rugosité particulière qui élimine ainsi les défauts de surface telles que les stries d'usinage contribuent à l'amélioration de la limite de fatigue [36]. Puisque les fissures de fatigue s'amorcent à la surface du matériau, il en découle que l'état de cette surface exerce une influence importante sur la courbe d'endurance. La figure II.16 illustre graphiquement l'influence de l'état de surface sur l'endurance d'un alliage de magnésium AZ80 [63].

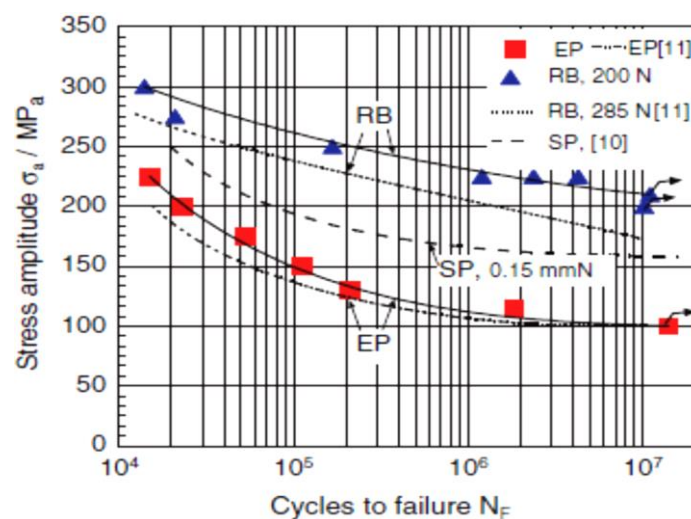


Fig. III.16. Courbe de Wöhler d'alliage de magnésium AZ80 Pour différent traitements [63] : EP= electrolytical polishing, RB=Roller burnishing, SP=Shot peening.

L'auteur a constaté que le brunissage ou le grenailage de précontrainte améliorent la résistance à la fatigue de l'alliage de magnésium AZ80 par rapport à l'usinage conventionnel. Pour le brunissage, cette amélioration est de 75%. Puisque ce matériau est plus sensible à la déformation plastique avec le brunissage qu'avec le grenailage de précontrainte, les valeurs de la dureté mesurées auparavant après le brunissage sont des valeurs très importantes. L'augmentation de la microdureté après le brunissage est de 80 à 100%, alors que l'augmentation apportée par le grenailage de précontrainte est seulement de 30 à 50%.

II.5. Conclusion

Le brunissage est un procédé polyvalent et largement utilisé dans l'industrie pour améliorer l'apparence et la durabilité des surfaces métalliques. En formant une couche protectrice sur le métal, le brunissage offre une résistance accrue à la corrosion, à l'usure et à d'autres formes de détérioration. De plus, il confère aux pièces métalliques une finition esthétiquement agréable.

Le brunissage présente de nombreux avantages par rapport à d'autres méthodes de finition de surface, notamment sa facilité d'application, sa rentabilité et sa capacité à être utilisé sur une grande variété de métaux. Cependant, il est essentiel de suivre les procédures de sécurité appropriées lors de l'utilisation de solutions chimiques pour éviter tout risque pour la santé et l'environnement.

En conclusion, le brunissage est un processus essentiel dans de nombreuses industries, offrant à la fois une protection contre la corrosion et une finition attrayante aux pièces métalliques. Son utilisation continue de se développer grâce à ses avantages pratiques et esthétiques, ce qui en fait une technique précieuse pour améliorer la durabilité et l'aspect des produits métalliques.

Chapitre IV. Matériaux et techniques expérimentales

IV.1 Introduction

Le but de cette recherche consiste à examiner de manière approfondie l'influence du processus de brunissage sur les caractéristiques clés de surface, à savoir la rugosité et la dureté, et les essais de fatigue et de traction en se concentrant sur deux types d'aciers alliés. Ces aciers AMM de l'entreprise Arcelor Mittal Steel Annaba. L'objectif est d'obtenir une compréhension approfondie des effets du brunissage sur ces propriétés de surface, afin d'améliorer les performances ont été spécifiquement choisis en raison de leur utilisation prépondérante dans les ateliers de l'unité et la qualité des produits fabriqués.

IV.2 Matériaux

IV.2.1 Définition

Les matériaux étudiés sont deux aciers de nuances *100C6* et *42CD4*, livrés à l'état brut de laminage par l'entreprise *Arcelor Mittal Steel Annaba*.

L'acier *42CD4* est un acier faiblement allié principalement utilisé dans la fabrication de pièces mécaniques dans l'industrie mécanique algérienne, L'acier contient des éléments ajoutés majeurs tels que le chrome et le molybdène, et la teneur ne dépasse pas 5 %

L'acier *100C6* est un acier à outil allié au chrome pour le travail à froid. Il est réputé par sa bonne résistance à l'usure et à la fatigue, alors qu'il est assez sensible au choc. Par ailleurs, il a une bonne ténacité et présente une faible déformation après trempe. L'acier est très utilisé en mécanique comme pour la fabrication des roulements à billes, des goupilles, des poinçons, des colonnes de guidage, et souvent pour les outillages tels que : les limes, les forets ou les alésoirs.

IV.2.2. Composition chimique

Les analyses sont réalisées aux niveaux du laboratoire centrale d'*Arcelor Mittal Steel*. Les compositions chimiques des aciers *42CD4* et *100C6* sont données dans le tableau suivant (Tab. IV.1) :

Tableau IV.1. Composition chimique des aciers 42CD4 et. 100C6.

Nuance	C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Ni	Cr	Mo
16NC6	0.17	0.83	0.22	0.013	0.024	0.15	0.04	0.17	0.90	0.04
42CD4	0.40	0.75	0.40	0.035	0.035	-	-	-	1.05	0.225

IV.2.3 Caractéristiques mécaniques

L'acier 42CrMo4 (42CD4) et l'acier 100Cr6 (100C6) sont deux types d'aciers alliés couramment utilisés dans l'industrie.

L'acier 42CrMo4 (42CD4) est un acier allié au chrome-molybdène avec une teneur en carbone d'environ 0,42%. Il possède une bonne résistance mécanique et une haute ténacité. Voici quelques caractéristiques mécaniques typiques de l'acier 42CrMo4

- Limite élastique : environ 900 Mpa
- Résistance à la traction : environ 1100 Mpa
- Allongement : environ 12%
- Dureté Brinell : environ 290 HB

L'acier 100Cr6 (100C6) est un acier allié au chrome avec une teneur en carbone d'environ 1,0%. Il est principalement utilisé pour la fabrication de roulements à billes et possède une excellente résistance à l'usure. Voici quelques caractéristiques mécaniques typiques de l'acier 100Cr6.

- Limite élastique : environ 700 Mpa
- Résistance à la traction : environ 900 Mpa
- Allongement : environ 12%
- Dureté Brinell : environ 260 HB

VI.2.4. Microstructure des aciers

Une observation au microscope optique a révélé la microstructure des deux matériaux . Cette microstructure est composée essentiellement de grains de ferrite et de perlite, la taille .

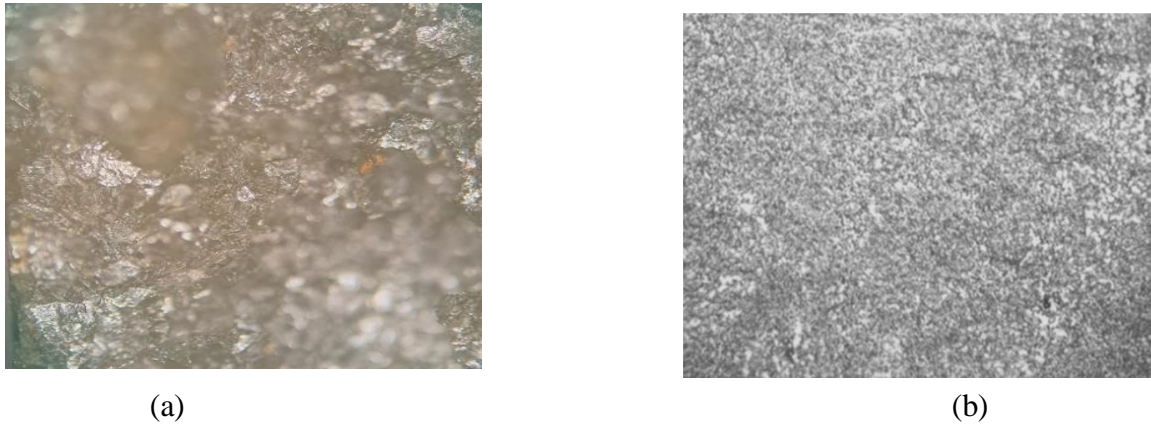


Fig. IV.1 Microstructures des aciers : a)42CD4, b)100C6

IV.3 Eprouvettes

IV.3.1 Géométrie

Les éprouvettes (Fig. III.2), ont été usinées à partir des pièces plates représentatives de chacun des matériaux. Leurs formes et dimensions sont dictées par la norme *NF EN 10002-1*.

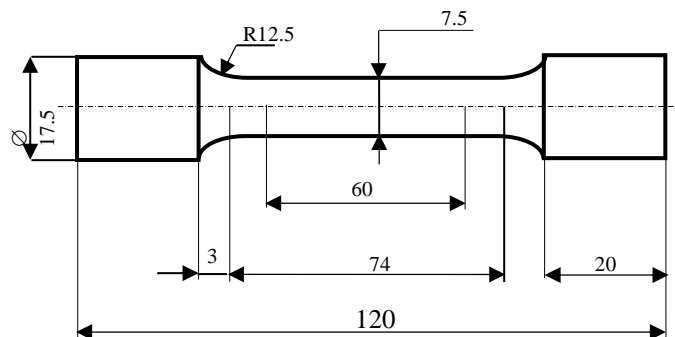


Fig . IV.2 Eprouvete de traction

Les éprouvettes présentent des têtes d'amarrage de formes plates lisses ce qui leur permet une adaptation simple et une prise rapide par les mors doux sur la machine d'essai.

. En ce que concerne l'acier 100C6 essais ont été réalisés dans d'une thèse de doctorat de mamme tamallah .

IV.3.2 Gamme de préparation

Les éprouvettes ont été préparées par fraisage au moyen d'une fraiseuse à commande manuelle. La machine-outil est destinée au fraisage extérieur et intérieur des pièces plates aux profils étagés et curvilignes de différente complexité en cycle semi-automatique fermé à une ou plusieurs passes.



Fig. IV.3 une fraiseuse

IV.4 Essais de traction sur une éprouvette plate

Voici une version plus concise du processus pour effectuer un essai de traction sur une éprouvette plate :

1. Préparez l'éprouvette en vérifiant ses dimensions et en vous assurant que ses extrémités sont planes et parallèles.
2. Fixez l'éprouvette à la machine d'essai en veillant à une bonne alignement.
3. Appliquez progressivement une charge à l'éprouvette en enregistrant les données de charge et de déformation.

4. Surveillez attentivement le comportement de l'éprouvette pendant l'essai et notez la charge maximale avant rupture.
5. Analysez les données recueillies pour interpréter les résultats et les comparer aux spécifications ou normes applicables.

N'oubliez pas de consulter les normes spécifiques et les procédures appropriées à votre domaine pour effectuer l'essai correctement.



Fig. IV.4 Machine de traction **Zwick /Roell** 50 KN

IV.5 essai de fatigue sur eprouvet plate

La réalisation d'un essai de fatigue sur une éprouvette cylindrique implique les étapes suivantes :

IV.5 .1 Paramètres de l'essai

Les essais ont été effectués dans le cadre des travaux de tamallah ce essai on été réalisés par flexion rotative sur une machine de fatigue type **Zwick /Roell** 50 KN (**Fig IV.4**)

IV.5 .2 Surveillance et enregistrement

Lors de l'essai il est conseillé de :

- Surveillez attentivement l'éprouvette pendant l'essai pour détecter tout signe de fissuration, de déformation ou d'autres changements.
- Enregistrez les données pertinentes, telles que le nombre de cycles appliqués et l'apparition de toute défaillance ou rupture.



Fig .IV.5 Machine de fatigu

IV.6. Brunissage

IV.6.1. Dispositif de brunissage

Le brunissage a lieu au moyen d'un dispositif préalablement étalonné (fig. III.5). Ce dispositif peut être facilement monté sur un tour universel. La partie active est une pointe endiamant artificiel parfois une bille en acier dur. L'opération de brunissage est analogue à une opération de chariotage, toute fois la déformation plastique superficielle (*DPS*) est assurée par un effort de formage exercé par l'outil sur la pièce animée d'un mouvement de rotation. Le mouvement d'avance étant attribué à l'outil.

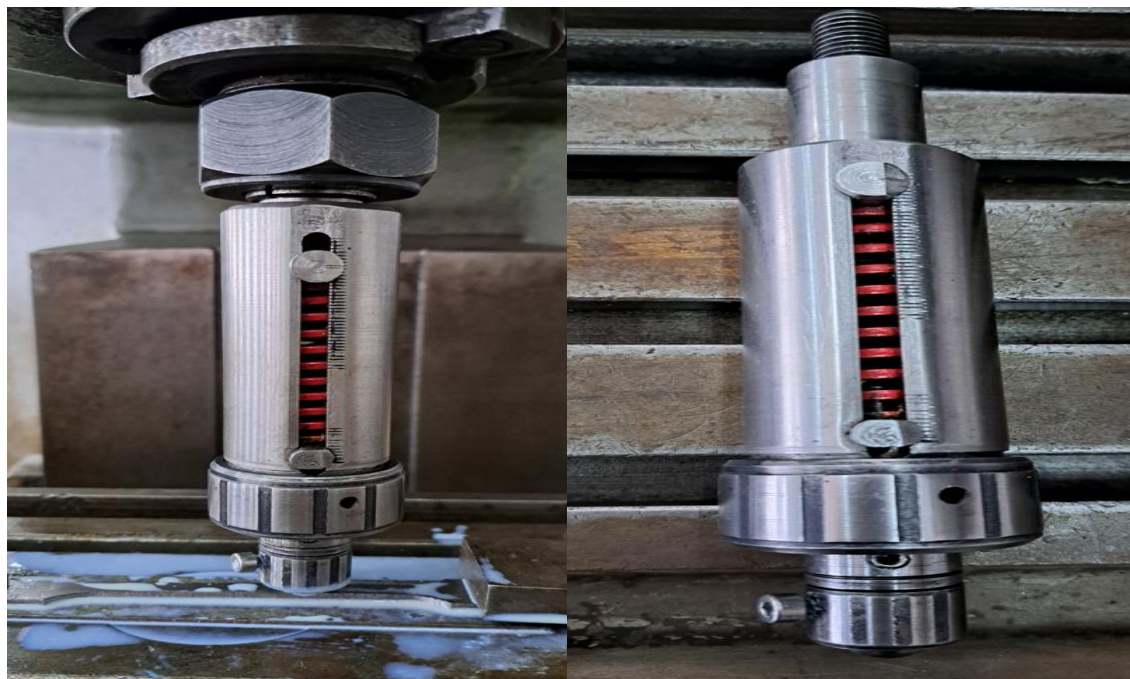


Fig. IV.6 dispositif de Brunissage

IV.6.2 Conditions du brunissage

Tableau IV.2 Paramètres du brunissage.

Paramètre	Régime 1	Régime 2
Nombre de tours	$n = 835 \text{tr/min}$	$n = 835 \text{tr/mn}$
Avance	$f = 0.05 \text{ mm/tr}$	$f = 0,05 \text{ mm/tr}$
Effort	$P = 150 \text{N}$	$P = 200 \text{N}$
Rayon d'outil	Bille en acier dur $r = 3 \text{mm}$	Pointe en diamant $r = 3 \text{mm}$
Nombre de passes	$i = 1 \text{ passes}$	$i = 1 \text{ passes}$

IV.7 Mesure de rugosité

Les mesures de rugosité ont été effectuées au moyen d'un rugosimètre électronique (Fig. VI.6) capable de transcrire le signal reçu en valeur Ra et Rq .



Fig. IV.7 Rugosimètre someco RT-10

L'appareil est caractérisé par une plage de mesure de $0,05$ à $04\mu m$ pour la mesure de Ra et de $0,3$ à $160\mu m$ pour la mesure de R

Chapitre V. Résultats & Discussions

V.1. Influence du brunissage sur la rugosité

Dans un premier temps l'étude est dédiée au matériau 42CrMo4 qui est un acier allié au chrome-molybdène, couramment utilisé dans l'industrie pour des applications mécaniques exigeantes. Ce matériau est reconnu comme un acier allié robuste avec une limite d'élasticité élevée, une résistance à la traction maximale notable et une certaine capacité d'allongement avant la rupture.

La figure V.1 montre l'effet global du brunissage sur l'état géométrique de la surface les valeurs de la rugosité mesurées longitudinalement sur les échantillons fraisés sont comprises entre 0,41 et 0,49 μm soit une moyenne de 0,45 μm . Après brunissage cette valeur est rendue entre 0,07 et 0,051 pour les paramètres du brunissage avec une force de 150 N Br (A) et 200 N Br (B) respectivement.

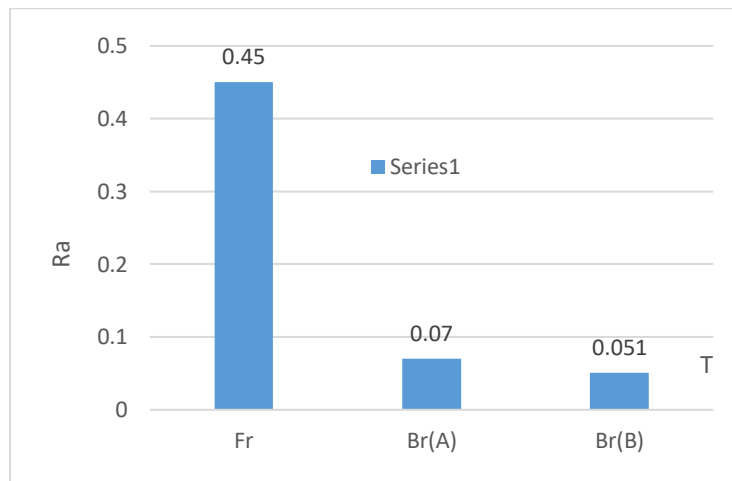


Fig. V.1 Influence du Brunissage sur la rugosité

Une étude spécifique pour l'acier 100C6 a été conduite selon le protocole de la méthodologie de pleine expérience où les facteurs d'entrée retenus sont : la force de brunissage (P_y) et le nombre de passe (i). Chacun de ces deux facteurs est considéré pour deux niveaux (bas et haut). Le tableau V.1 montre les résultats des essais pour toutes les combinaisons entre ces deux paramètres entre eux.

.Tableau V.1 Planification des expériences pour la rugosité et la dureté de l'acier 100C6

Mise en oeuvre	f	i	P _y	HV _B	Ra _B	N
Usinage	-	-	-	300	1.46	660
Brunissage (10 ;1)	0,074	1	10	378,59	0,2031	3448
Brunissage (24 ;1)	0,074	1	24	398,01	0,3693	6050
Brunissage (10 ;3)	0,074	3	10	499,95	0,1782	3397
Brunissage (24 ;3)	0,074	3	24	487,36	0,3987	9009

On remarque que dans toutes les conditions d'application, le brunissage réduit la rugosité de surface. Cet effet bénéfique du traitement semble être le résultat du lissage des aspérités laissées par l'usinage. Les cretes sont bien écrasés dans les creux de ceux-ci et génèrent un profil lisse et soyeux.

Le régime le plus avantageux du brunissage est caractérisé par une force (P_y) de 10kgf et un nombre de passe (i) de 3. En appliquant ce régime la rugosité d'usinage de 1.46μ est réduite à 0.1782μm (Fig. V.2).

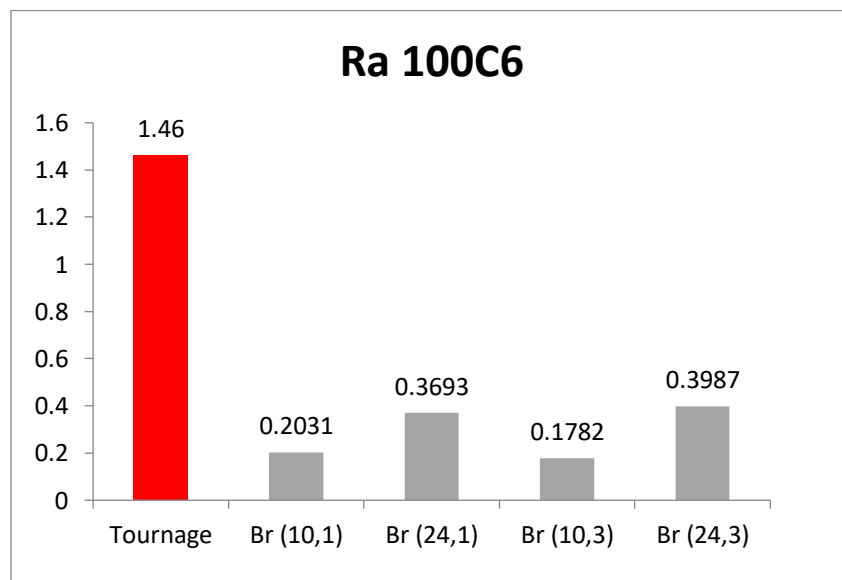


Fig. V.2 Effet du brunissage sur la rugosité de l'acier 100C6

l'influence des paramètres (P_y, i) du brunissage a été déduite d'une analyse statistique basée sur la méthodologie des surfaces de réponse et la régression linéaire. Cette étude a permis de

dégager un modèle de prédiction de la rugosité pour toutes les combinaisons entre les paramètres validés dans le domaine d'étude. Le modèle obtenu est décrit par l'équation V.1

$$Ra = 0.1162 - 0.03184 i + 0.009932 Py + 0.001939 i * Py \quad (V.1)$$

La figure V.3 illustre graphiquement l'influence de Py et i sur la rugosité. La rugosité est d'autant plus meilleure pour les faibles valeurs de la force et les nombres de passes élevés.

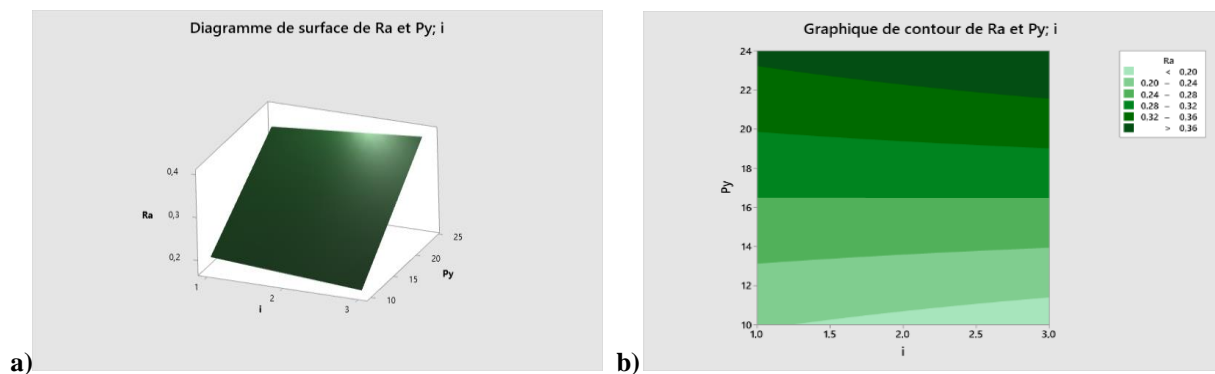


Fig.V.3 Influence des paramètres du brunissage sur la rugosité a) Diagramme de surface, b) Graphique de contour

Pars ailleurs, le modèle de prédiction fait bien montrer les effets principaux des paramètres de brunissage sur la rugosité (Fig. V.4a). A cet effet la force de brunissage s'est montré la plus influente donc plus signifiante pour les résultats obtenus. Toutefois le modèle montre qu'il y a une interaction entre les deux paramètres du brunissage. Ceci laisse à supposer que l'effet du nombre de passe dépend du niveau (bas ou haut) considéré pour la force de brunissage (Fig. V.4b)

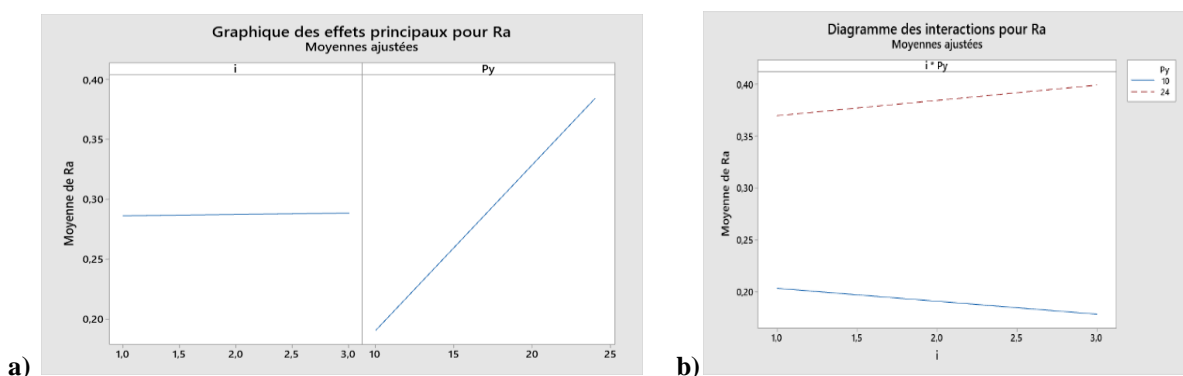


Fig. V.4 Influence des paramètres du brunissage sur la rugosité a) Graphique des effets principaux b) Graphiques de interactions

V.2 Influence du brunissage sur la microdureté

Cette étude est dédiée à l'acier 100C6. Expérimentalement (tab. V.1), l'effet du brunissage sur la microdureté de l'acier 100C6 peut être illustrée graphiquement par la figure V.5.

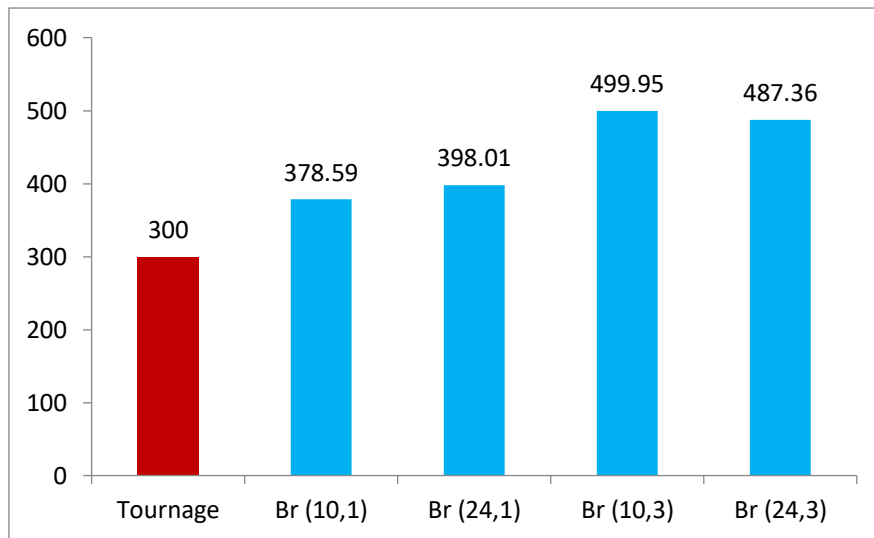


Fig. V.5 Effet du brunissage sur la microdureté HV de l'acier 100C6

L'effet global du traitement apporté à la microdureté est très intéressant vu l'augmentation de la microdureté pour toutes les conditions du brunissage. Ce résultat est probablement au phénomène de l'écroutissage induit par la déformation plastique des couches superficielles par suite du traitement de brunissage.

L'influence des paramètres du brunissage (P_y et i) est illustrée par la figure V.6. A cet effet il est montré que le résultat optimal est obtenu en combinant les niveaux les plus hauts du nombre de passes à presque toutes les valeurs de la force de brunissage.

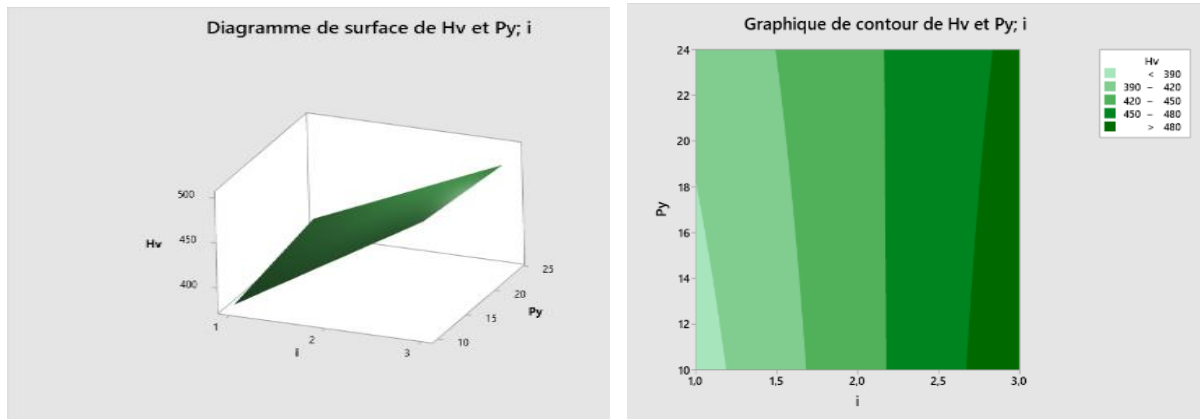


Fig. V.6 Influence des paramètres du brunissage sur la microdureté a) Diagramme de surface, b) Graphique de contour

D'une manière analogue à l'étude de la rugosité. Les résultats expérimentaux ont été modélisés par un modèle de prédiction de la microdureté en fonction de la force de brunissage et du nombre de passes. Le modèle déduit est exprimé par l'équation suivante (Eq. V.2).

$$Hv = 292.6 + 72.11 i + 2.530 Py - 1.143 i*Py \quad (V.2)$$

Selon le modèle, l'effet du nombre de passe est plus significatif (Fig. V.7). Dans ce cas il est recommandé d'effectuer le brunissage avec un nombre de passe le plus élevé possible pour écrouir davantage le matériau.

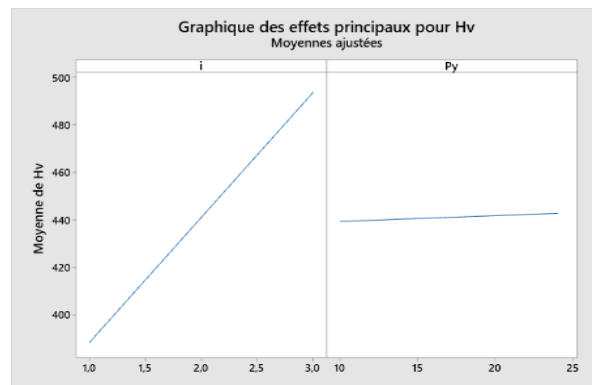


Fig. V.7 Graphique des effets principaux pour la microdureté

Le modèle de prédiction (Eq. V.2) montre une interaction ($i*Py$) entre la force et le nombre de passe du brunissage qu'il ne faut pas négliger. L'influence de chacun de ces paramètres est conditionnée par le niveau de l'autre.

V.3 Influence du brunissage sur la résistance à la traction

Le tableau V.2 résume les principales valeurs des propriétés de traction de l'acier 42CD4.

Tableau V.2 caractéristiques mécaniques de l'acier 42CD4

traitement °	L ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)	E (GPa)	R _{eH} (MPa)	R _{eL} (MPa)	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	R _{eH} /R _m (%)	A _{gt (corr)} (%)	A _{t(corr.)} (%)
Usinage	30,0	22,50	55	-	-	731	1032	-	6,58	8,50
brunissage	30,0	22,50	55,6	-	-	694	1077	-	4,76	5,20

En comparant les propriétés de traction du matériau à l'état d'usinage et l'état de brunissage, nous pouvons observer les différences entre les résultats des essais de traction de l'éprouvette brunie et de l'éprouvette tournée.

En ce qui concerne l'effet du brunissage sur les caractéristiques de l'acier 42CD4, les valeurs de la limite élastique (R_{eH}) et de la limite élastique inférieure (R_{eL}) pour les deux essais ne sont pas disponibles. Cela laisse à supposer que le matériau dans ces deux états ne manifeste pas de discontinuité due au phénomène de Piobert luders. Cependant, certaines différences entre les deux essais peuvent être observées.

Dans le cas de l'éprouvette brunie, la résistance maximale (R_m) est plus élevée (1077 MPa) par rapport à celle de l'éprouvette tournée (1032 MPa). Cela suggère une amélioration de la résistance à la traction de l'acier 42CD4 après le brunissage.

De plus, l'allongement après rupture corrigé (A_{gt}) de l'éprouvette brunie (4,76 %) est inférieur à celui de l'éprouvette tournée (6,58 %). Cela indique que l'éprouvette brunie présente une ductilité plus faible, c'est-à-dire qu'elle est moins capable de se déformer avant la rupture. La figure V.8 montre les courbes de traction en termes de force-déplacement à l'état usiné et l'état de brunissage.

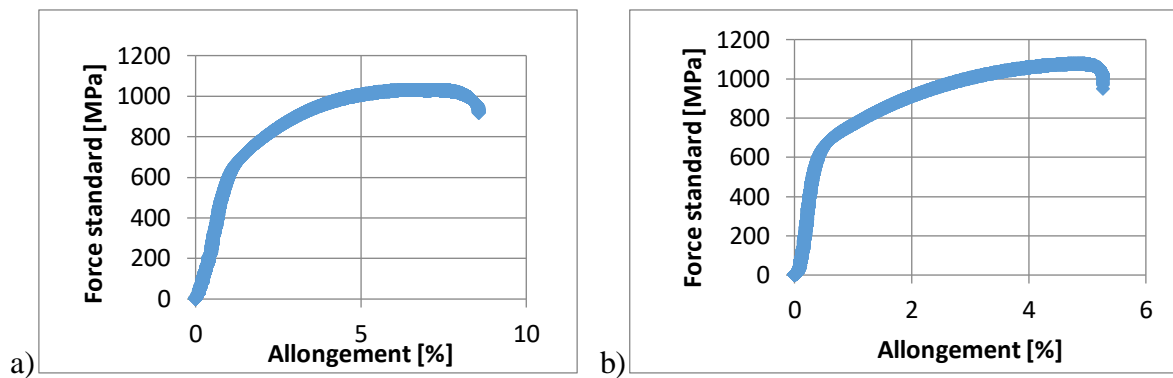


Fig. V.8 Courbes de traction de l'acier 42CD4 a) Usinage b) Brunissage

La courbe enregistrée présente une partie linéaire avec une pente plus marquée à l'état de brunissage. Pour ce même état l'instabilité plastique s'est développée après un niveau d'allongement supérieur à celui de l'éprouvette tournée. Aussi dans les deux états de mise en œuvre le matériau a développée un phénomène de striction qui atteste la ductilité du matériau (Fig. V.9).



Fig. V.9 Eprouvettes rompue par traction de l'acier 42CD4

V.4 Influence du brunissage sur la tenue en fatigue

L'étude est consacrée à l'acier 100C6. Les essais de fatigue en flexion rotative de ce matériau ont permis d'observer ce qui suit :

En ce qui concerne la résistance à la fatigue, l'échantillon à l'état d'usinage initial a atteint un nombre de cycles de rupture de 660. Cependant, après le brunissage, l'échantillon a montré une amélioration significative de la résistance à la fatigue, atteignant un nombre de cycles de rupture de 5476 (Fig. V.10). Cela indique que le brunissage en améliorant la rugosité de surface et la microdureté, a également renforcé la résistance du matériau à la fatigue, permettant à l'échantillon de résister à un plus grand nombre de cycles de flexion rotative avant la rupture.

Ce constat s'est validé pour toutes les combinaisons entre les paramètres (Py et i) du brunissage du tableau V.1.

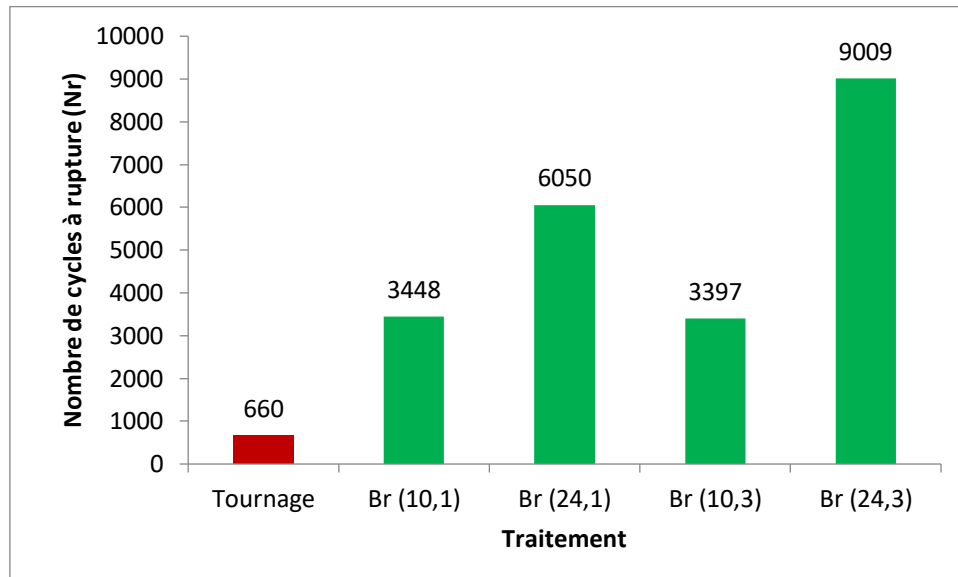


Fig. V.10 Influence du brunissage sur la tenue en fatigue de l'acier 100C6

Le meilleur effet du brunissage est observé dans les conditions du brunissage avec une force de 24kgf et 3passes de l'outil. Dans ce cas, les deux paramètres sont à leurs niveaux les plus hauts. Le traitement statistique des résultats a permis de dégager un modèle de régression linéaire qui prédit la durée de vie du matériau pour tous les paramètres du domaine d'étude (Eq. V.3).

$$N = 2690 - 1100 i + 78.36 Py + 107.5 i*Py \quad (V.3)$$

Selon ce modèle, l'influence des paramètres du brunissage sur la tenue en fatigue est illustrée graphiquement par la figure V.11.

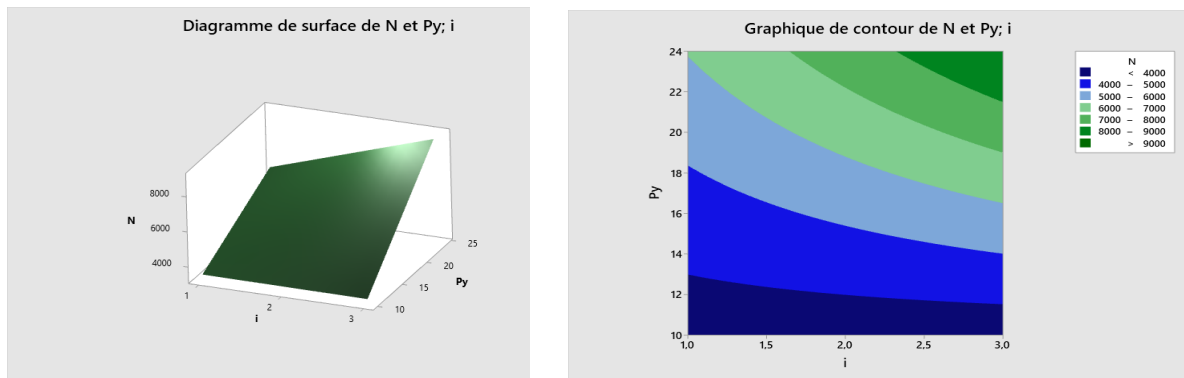


Fig. V.11 Influence des paramètres du brunissage sur la tenue en fatigue a) Diagramme de surface, b) Graphique de contour

Le modèle montre bien les effets et les interactions des deux paramètres. L'effet principal de la force de brunissage est plus marqué ce qui revient à dire que ce paramètres est plus significatif par rapport au nombre de passes. L'interaction entre ces paramètres fait que l'effet du nombre de passe s'accorde de façon plus avantageuse avec le niveau haut de la force de brunissage (Fig. V.12).

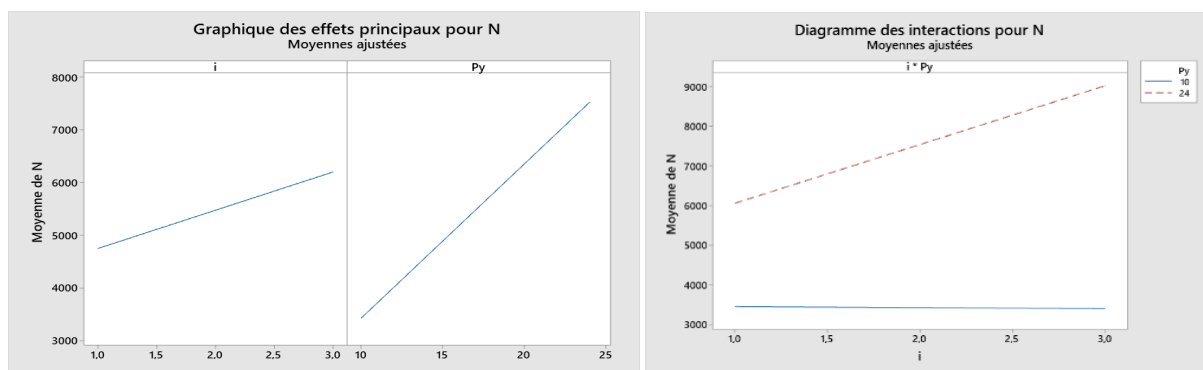


Fig. V.12 Effets des paramètres du brunissage sur la tenue en fatigue a) Graphique des effets principaux b) Graphiques de interactions

La figure V.13 montre le facies de rupture type d'une sollicitation de fatigue en flexion rotative. L'observation microscopique révèle plusieurs amorçages en surface alors que la fissure principale ayant conduit à la rupture s'est propagée en sous couche. Toutefois la rupture finale s'est produite au centre de l'éprouve et que la propagation à occupée une grande zone de la section de l'éprouvette. Cela laisse à supposer que pour l'état de brunissage, la taille de la fissure s'est largement développée en propagation et donc que le matériau a gagné en ténacité.



Fig. V.13. Facies de rupture par fatigue de l'acier 100C6 traité par brunissage

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les chaînes de transmission mécanique sont des éléments essentiels dans de nombreux systèmes industriels et mécaniques notamment dans le processus de production au niveau du complexe Sider d'El-Hadjar Annaba. Elles permettent de transférer la puissance mécanique d'un point à un autre en utilisant une séquence de maillons reliés entre eux. Ces maillons, sont généralement soumis à des diverses sollicitations mécaniques telles que la traction ou la fatigue des matériaux. Il convient de les surveiller de façon continue pour leur assurer un fonctionnement fluide et efficace. Cela comprend la lubrification régulière pour réduire les frottements et l'usure, ainsi que le remplacement des maillons endommagés ou usés.

Pour parer à d'éventuelles dégradations précoces des éléments des chaînes de transmission mécanique, le choix du matériau et les techniques de sa mise en œuvre constituent une étape fondamentale dans la gamme de production de celles-ci.

Cette étude porte sur le choix de deux nuances d'aciers l'un faiblement allié 42CD4 et l'autre fortement le 100C6 auxquels sont appliquées des opérations de brunissage. La caractérisation de ces aciers sous l'effet de ce traitement fait ressortir les conclusions suivantes :

- 1- Le brunissage est un traitement mécanique de surface (TMS) basé sur la déformation plastique des couches superficielles. Il se distingue par son domaine d'emploi très large dans le domaine de l'ingénierie mécanique tel que l'automobile, l'aéronautique etc. L'opération se réalise sans enlèvement de copeaux sur des machines outils conventionnelles tels qu'un tour ou une fraiseuse universels. De plus il peut s'appliquer de façon très rentable sur la majorité des matériaux présentant une certaine ductilité comme ce fut le cas de nos deux nuances 42CD4 et 100C6.
2. Le procédé de brunissage offre un lissage des aspérités et un écrouissage des couches superficielles et par conséquent des caractéristiques de surface très intéressantes pour les deux nuances d'aciers utilisés. Dans ce sens la rugosité de surface a été réduite de 0,45 à 0,051 pour la nuance 42CD4 et de 1,46 à 0,1742 μm pour l'acier 100C6. De même après application du traitement, la microdureté de ce dernier a augmenté de 300Hv à 499,95Hv.
- 3- La planification multifactorielle et l'analyse statistique s'avère un outil très efficace pour réduire le nombre d'essais et prédire la réponse de sortie. A cet effet des modèles de

prédiction de la rugosité et de la microdureté ont été établis. Ces modèles de régression linéaire ont fait ressortir les effets principaux et les interactions des paramètres étudiés à savoir la force de brunissage et le nombre de passes. La force est la plus significative pour la Rugosité alors que le nombre de passe est le plus contribuant pour la microdureté.

4-A travers le brunissage à bille, les caractéristiques de l'acier 42CD4 la limite élastique s'est réduite de 731 à 694 MPa alors que la résistance à la rupture s'est améliorée de 1032 à 1077 MPa pour. Toutefois le matériau a connu une légère baisse de la ductilité.

Les courbes Force-Allongement ont montré une instabilité plastique qui s'est développée après un allongement après le brunissage supérieur à celui après usinage.

5-A travers les effets positifs apportés par le brunissage à la rugosité et à la microdureté, la tenue en fatigue en flexion de l'acier 100C6 s'est considérablement améliorée. Pour les conditions optimales du brunissage ($P_y = 24$ et $i = 3$), le nombre de cycles à rupture (N_r) à augmenté de 660 cycles à 9009 cycles après le traitement par brunissage à la pointe.

L'influence des paramètres de brunissage à été étudié à travers un modèle de prédiction qui montré un effet plus significatif de la force de brunissage et une interaction avec le nombre de passe

6-l'observation microscopique des surface de rupture a montré un facies type de la flexion rotative où la surface s'est propagée en grande proportion par rapport à la section totale de l'éprouvette.

En perspective à ce travail, il serait très utile de considérer ce qui suit :

- 1-Envisager d'autres paramètres de brunissage tels que la vitesse, le rayon d'outil et d'inclure le matériau dans les modèles de prédictions
- 2- Evaluer le coefficient d'écroutissage du matériau sous l'effet de ce traitement et d'élargir les essais de fatigue aux courbes de Wöhler et les calculs de la propagation des fissures.
- 3- Effectuer des observations au microscope électronique à balayage (MEB) qui sont vivement recommandées pour une analyse profonde de l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue.

Référence bibliographique

- [1] ASME B29.1-2011 Standard, Roller Chains, Attachments, and Sprockets.
- [2] "Mechanical Power Transmission - Chains." Power Transmission Engineering, 2013
- [3] Mott, Robert L. "Machine Elements in Mechanical Design." Pearson, 2018.
- [4] SKF Maintenance Products, "Lubrication of Power Transmission Chains
- [5] ANSI/ASME B29.1-2011 Standard, Roller Chains, Attachments, and Sprockets.
- [6] Tsubaki, "Silent Chain Technology."
- [7] ISO 4347:2015, Conveyor chains, attachments and sprockets.
- [8] JIS B 1801:1997, Silent Chains.
- [9] Renold, "Chain Installation, Inspection, and Maintenance Guide."
- [10] Pruftechnik, "Shaft Alignment Handbook."
- [11] D. A. H. Mekki, "Advancements in Roller Chain Drives: Materials, Lubrication, and Wear," Journal of Mechanical Design, Vol. 129, No. 12, December 2007.
- [12] G. Berthier, P. Vexel, "Advanced Analysis of Roller Chain Drives," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 224, No. 4, April 2010.
- [13] H. Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions dde l'université de Badji Mokhtar, 2007.
- [14] J. Mandel, propriétés mécanique des matériaux, Editions Eyrolles, 1978.
- [15] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.
- [16] O.CV.A Brsanti, voyage au cœur de l'acier.
- [17] S. Naamane, Etude De La Déformation Plastique De La Ferrite A Basse Température ; Simulations De Dynamique Des Dislocations Université Pierre Et Marie Curie,Soutenance 2008.
- [18] Rupture et plasticité, Département de Mécanique, Ecole Polytechnique, 2010.
- [19] D. François, Lois de comportement des métaux : Élastoplasticité ; Viscoplasticité, École Centrale de Paris.2012.
- [20] F. yahamdi, modélisation des courbes de tractions et évaluation du coefficient d'érouissage des aciers traitée par brunissage, Université Badji Mokhtar Annaba; 2008.
- [21] Dominique FRANÇOIS, Essais de rupture, technique de l'ingénieur, 2012.
- [22] L. Kheloufi, Adhésifs et technique de collage caractérisation de 'adhérence, Thèse de Magister.

- [23] O. Barrau, Etude du frottement et de l'usure D'acier à outils de travail à chaud, thèse doctorat, 2004.
- [24] V.S. Parfianovitch ; les instructions sur la projection des du traitement de finition par repassage des surfaces MINSIA POLIMA, 1983, pp 78.
- [25] H. E.F groupe guide d'empli des traitements de surfaces appliquées aux problèmes de frottements tec et doc (2000).
- [26] Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Nancy, Éditions 1988.
- [27] H. Bückle la machine outil française, 206,125-147,1965.
- [28] A. Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge.77-79, 1995.
- [29] [Http://Fr.Wikipedia.Org/wiki/Duret%%C3%A9 %28mat%C.3%A9riatte 029](http://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_mat%C3%A9rielle), Catégories: Science des matériaux • Métallurgie • Essai mécanique.
- [30] M. GRUMBACH et al, Mitaux, Corrosion, Industrie, 58, 690, 69-74,1983.
- [31] M. GRUMBACH, "Les essais de dureté" dans Propriétés d'emploi des aciers. Etudes de bases. C. I. OTUA., 1977.
- [32] C.TOURNIER, Traitement Thermique, 246, 57-60, 1991.
- [33] B.CHENAL Pechiney CRV, Écrouissage d'alliages d'aluminium, (étude des métaux matériau).2012.
- [34] P.Lüdwik et R. Chen. Stahl und Eisen, 43, pp 999 et 1427, 1923.
- [35] D. FRANÇOIS Essais mécaniques des métaux Détermination des lois de comportement. Edition 2012.
- [39]. L. Barrallier, Transformation et comportement des matériaux, Materials behaviour and processing ARTS ET MÉTIERS ParisTech – Aix en Provence 7 octobre 2010.
- [37] L. Laouar. Traitement Mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18, Optimisation et caractérisation, thèse, Université de Badji Mokhtar Annaba,2008
- [38] Lee SSG, Tam SC, Loh NH, Miyazawa S. An investigation into the ball burnishing of an AISI 1045 freeform surface. J Mater Process Technol, 29:203, 1992.
- [39] N.H. Loh, S.C. Tam, S. Miyazawa. Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness. Wear; 129:235, 1989.
- [40] I. Yashcheritsyn, EI. Pyatosin, VV. Votchuga. Hereditary influence of pretreatment on roller-burnishing surface wear resistance. Sov J Friction Wear 1987;8(2):87.
- [41] F. Klocke, J. Liermann. Roller burnishing of hard turned surface.Int J Mach Tools Manufact; 38(5-6):419, 1998

- [42] F. Klocke, J. Liermann. Roller burnishing of hard turned surface. *Int J Mach Tools Manufact*; 38(5–6):419, 1998.
- [43] S. Braham. Modélisation du galetage des vilebrequins, évolution des contraintes résiduelles sous chargement du service, 1991
- [44] S. Braham. Modélisation du galetage des vilebrequins, évolution des contraintes résiduelles sous chargement du service, 1991.
- [45] S. Mittal, C.R. Liu. A method of modeling residual stresses in superfinish hard turning. *Wear*; 218:21, 1998.
- [46] L. Jian, Traitements de surface mécaniques, technique de l'ingénieur, M 1 190v2, 2012.
- [47] A.M. Hassan. The effect of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals, *Journal of Materials Processing Technology*
- [48] K. S. Rababa and M. M. Al-mahasne. Effect of Roller Burnishing on the Mechanical Behavior and Surface Quality of O1 Alloy Steel, *Journal of Applied Sciences, Jordan*, 3(3): 227-233, 2011.
- [49] A. M. Hassan. Investigation into the surface characteristics of burnishing cast AlCu alloys, *Int J. Mach Tools Manufact.* 37-6, 813-821, 1997.
- [50] H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui. Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, *Journal of Materials Processing Technology* 180, 130–136, 2006.
- [51] M.H. El-Axir. An investigation into roller burnishing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40, 1603–1617, 2000.
- [52] M. CARTER, HEF GROUPE, Guide de l'emploi des traitements de surface appliqués aux problèmes de frottement,
- [53] M.H. EL-Axir, M.M. EL-Khabeery. Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials, *J. Mater. Process Technol.* 132 82–89, 2003.
- [54] L. Luca, S. Ventzel, I. Marinescu. Burnishing of hardened steel components, an Alternative method of finishing, the university of Toledo.
- [55] H. Hamadache, K. Chaoui. Optimisation des Caractéristiques PhysicoGéométriques d'un Acier 35NC6 Traité par Brunissage, Université de Badji Mokhtar Annaba Annaba, 2009.
- [56] A.M. Hassan, A.M. Maqableh. The effects of initial burnishing parameters on nonferrous components, *Journal of Materials Processing Technology* 102 115±121, 2000.
- [57] M. Rao, C.K. Reddy, R. Rao. The effect of roller burnishing on surface hardness and surface roughness on mild steel specimens, *International journal of applied engineering research*, volume 1, no 4, 2011

- [58] U.M. Shirast, B.B. Ahuja. Parametric analysis of combined turning and ball burnishing process, journal of engineering and material science, India, Vol 11, PP 391- 396.
- [59] P. R. Prabhu, S. M. Kulkarni, S. S. Sharma. Influence of deep cold rolling and low Plasticity burnishing on surface hardness and Surface roughness of AISI 4140 steel, World Academy of Science, Engineering and Technology 72, 2010.
- [60] M. Tourab. Influence des paramètres de régime de galetage sur les fonctions finales et de dureté de surface des aciers, mémoire de magister, Annaba, 2003. 115
- [61] M.M. EL-Khabeery, M.H. EL-AXIR. Experimental techniques for studying the effect of milling roller-burnishing parameters on surface integrity, Int. J. Mach Tools Manufacture Vol. 41 pp1705-1719, 2001.
- [62] P. Zhang, J. Lindemann. Effect of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high-strength wrought magnesium alloy AZ80, Scripta Materialia, 52, 1011–1015, 2005.
- [63].A. Bouchlegem, Matériaux Et fonctions mécaniques, thèse de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2001
- [64] J. Barralis, G. Maeder, Précis de métallurgie: Elaboration, structures-propriétés et normalisation, Nathan, Avril 1990
- [65] "Mechanical Engineering Design" de Joseph E. Shigley et Charles R. Mischke.
- [66] "Design of Machinery" de Robert L. Norton.
- [67] "Machine Design: An Integrated Approach" de Robert L. Norton.
- [68] "Mechanical Power Transmission: A Practical Guide" de R. G. Bell.
- [69] "Handbook of Mechanical Engineering Calculations" de Tyler G. Hicks.