



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Mécanique des Matériaux

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MASTER II**

**Prédiction Des Propriétés De Traction De L'acier S355 JR Sous
L'effet Du Brunissage**

Présentée Par :
Mr. BOURI Abdeldjalil

ENCADREUR DE MEMOIRE : Hamid HAMADACHE Pr Université d'Annaba
CO-ENCADREUR : Mounira Bourebia Dr URASM-CRTI

Devant le Jury composé de :

Président : H. Hamadache Pr. Université Badji Mokhtar Annaba
Membres : Z. Zemouri Pr. Université Badji Mokhtar Annaba
A.Merabtine Dr. Université Badji Mokhtar Annaba
Y.Menail Dr. Université Badji Mokhtar Annaba

Année : 2016/2017

Remerciements

Louange à DIEU le tout puissant, qui m'a éclairé le chemin de la science et de la connaissance et m'a aidé à accomplir ce devoir et ma accorder la chance pour accomplir ce travail.

Je tiens à remercier lieu le docteur Hamid HAMADACHE qui a dirigé se mémoire dans la continuité de mes études. Tout au long de cette année, il a su oriente mes recherches, tout en tirant partie de ma formation d'ingénieur. Il a toujours été disponible pour d'intenses et rationnelles discussions. Pour tout cela, sa confiance et son soutien en fin de travail, je le remercie vivement.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à madame BOURIBIA MOUNIRA ma collègue de travail a URASM-CRTI/ANNABA, Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je tiens aussi à remercier le Directeur de l'URASM-CRTI Monsieur le Dr.CHOUCHANE Toufik ainsi que toute l'équipe du laboratoire essais mécaniques Mr. ZIANI SLIMANE, HESSAINIA Chaouki, AMIRAT Fethi qui m'a beaucoup aider dans ce travail et principalement Mr.BOUKHRIS Said notre cher préparateur.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants, collègues et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes études et travaux.

Un remerciement spécial pour ma femme qui ma soutenue juste au bout, à mes parents, mes frères, mes sœurs, et toute ma famille pour leurs soutiens et encouragements.

Enfin, je remercie tous mes amis pour leurs sincères amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance.

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	ii
Introduction	1
Chapitre I Matériaux et essais mécaniques	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Propriétés mécaniques des métaux.....	2
I.2.1 Elasticité et plasticité	2
I.2.2 Résistance mécanique	3
I.2.3 Rigidité.....	3
I.2.4. Ductilité	3
I.3 Essais mécaniques	3
I.3.1 Essais dureté	4
I.3.2 Type d'essai de dureté	4
I.3.2.1. Essai de dureté Brinell	5
I.3.2.2. Essai de dureté Rockwell	6
I.3.2.3. Essai de dureté Vickers	6
I.3.3 Essai de traction.....	7
I.3.3.1 Intérêt et déroulement de l'essai	7
I.3.3.2 Courbes conventionnelle et rationnelle.de traction	9
I.4 Qualité de surface.....	10
I.4. Rugosité	10
I.5 Dégradation d'une structure.....	11
I.5.1 Architecture atomique et défauts du réseau cristallins	11
I.5.2 Dislocations et leur rôle dans la déformation plastique	12
I.6 Phénomène d'érouissage.....	13

I.6.1 Courbe et coefficient d'écrouissage.....	13
I.7 Traitements Mécaniques De Surface.....	15
I.7.1 Introduction.....	15
I.7.2 Principe de traitement de finition par pression	16
I.7.3 Différents type de Traitement Mécanique de Surface	16
I.7.3.1 Galetage.....	16
I.7.3.2 Différents types de galetage	18
I.7.3.3 Brunissage	19
I.7.3.4 Principe de brunissage	19
I.8 Plans D'expériences Et Modélisation	21
I.8.1 Introduction.....	21
I.8.2 Terminologie	21
I.9 Conclusion.....	25
CHAPITRE II Matériau et techniques Expérimentales	
II.1 Introduction.....	26
II.2 Caractérisation du matériau.....	26
II.2.1 Composition chimique	26
II.2.2 Mesure de rugosité	28
II.2.3 Caractéristiques mécaniques.....	29
II.2.3.1 Micro-dureté Vickers	29
II.2.3.2 Essai de traction.....	30
II.3 Méthodologie expérimentale	32
II.3.1 Opération de brunissage	33
II.3.2 Conditions du brunissage	34
II.4 Conclusion.....	35

Chapitre III: Résultats expérimentaux et discussion

III.1 Introduction	36
III.2 Mesure de Rugosité de surface :	36
III.2.1 Effet du brunissage sur les profils de rugosité Ra	37
III.2.2 Effet du brunissage sur les profils de rugosité	38
III.3 Mesure de Micro-Dureté des couches superficielles	41
III.3.1 Effet du brunissage sur la Micro-Dureté Hv	42
III.4 Essai de traction sur les éprouvettes traitées par brunissage	43
III.4.1 Effet du brunissage sur Caractéristiques mécaniques Re, Rm et A%	44
III.4.1.1 Effet du brunissage sur la résistance élastique Re	44
III.4.1.2 Effet du brunissage sur la résistance mécanique Rm	45
III.4.1.3 Effet du brunissage sur l'allongement A%	45
III.5 Conclusion.....	46

Chapitre IV : Plan D'expérience Et Modélisation

IV.I Plan D'expérience	47
IV.2 Modèle des plans factoriels.....	48
IV.3 Les réponses avec les facteurs codées	48
IV.4 Les réponses avec les unités légales	49
IV.5 Validation du modèle	49
Conclusion générale	50
Références bibliographiques	51

Liste des figures

Figure I.1: Courbe contrainte–déformation

Figure I.2 Définition des différents domaines de dureté.

Figure I.3. Principe de dureté brinell.

Figure I.4. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.

Figure I.5. Principe de dureté Vickers

Figure I.6. Epreuve de traction : a) cylindrique, b) prismatique

Figure I.7. Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6

Figure I.8 Paramètres de rugosité

Figure I.9 Les structures cristallines les plus courantes des métaux : a) réseau c.f.c. b) réseau c.c, c) système h.c.

Figure I.10 Représentation schématique d'une dislocation : a) Dislocation coin, b) Dislocation vis

Figure I.11 Phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction.

Figure I.12 Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques

Figure I.13 Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille

Figure I.14 Principe du galetage

Figure I.15 Outils de galetage

Figure I.16 : Principe de brunissage

Figure I.17 Différentes formes de brunissoirs : a) sphérique ; B) conique ; C) cylindrique plate ;
D) cylindrique bombé

Figure I.18 Différentes surfaces à traiter par brunissage

Figure I.19 Schéma de l'expérimentation

Figure I.20 le niveau bas du facteur est noté par -1, et le niveau haut par +1, le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre -1 et +1

Figure I.21 Espace expérimental

Figure I.22 Domaine d'étude

Figure I.23 Domaine d'étude et surface de réponse d'un plan d'expérience à deux facteurs.

Figure II.1 : échantillon après découpage

Figure II.2 : Tronçonneuse MECATOME T300

Figure II.3 : POLISSEUSE

Figure II.4 : Séchoir

Figure II.5 : Echantillon préparé

Figure II.6 : Spectromètre SRS3000

Figure II.7. Rugosimètre Mitutoyo SJ-210

Figure II.8. a) Microduromètre Matsuzawa (MXT70), b) empreinte

Figure II.9. Eprouvette de l'essai de traction.

Figure II.10. Tour universel, ALMO type SN

Figure II.11. a) Machine de traction ZWICK 1476 10KN, b) fixation des éprouvettes

c) Eprouvette témoin

Figure II.12 Représentation du domaine d'étude par les sommets A, D, C, D

Figure II.13 : Six éprouvettes usinées sur le tour

Figure II.14 : Tour parallèle 1A616

Figure II.15 : Brunissage a) Photo du montage sur tour, b) Schéma du dispositif

Figure II.16 : a) Eprouvettes après brunissage. b) Opération de brunissage

Figure III.1 Effet du brunissage sur la rugosité avec le taux de réduction.

Figure III.2. Profil de surface de l'acier S355JR : a) état d'usinage : b) état de brunissage à la bille.

Figure III.3. Effet du brunissage sur la Micro-dureté avec le taux d'amélioration.

Figure III.4. Effet du brunissage sur les caractéristiques mécaniques en fonction des régimes de brunissage.

Figure III.5. Taux de réduction de R_e après brunissage.

Figure III.6 Taux de d'amélioration de R_m après brunissage

Figure III.7. Taux de réduction de $A\%$ après brunissage.

Figure V.1 : Fichier Excel de la Modélisation de l'expérience.

Liste des figures

Figure I.1: Courbe contrainte–déformation

Figure I.2 Définition des différents domaines de dureté.

Figure I.3. Principe de dureté brinell.

Figure I.4. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.

Figure I.5. Principe de dureté Vickers

Figure I.6. Epreuve de traction : a) cylindrique, b) prismatique

Figure I.7. Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6

Figure I.8 Paramètres de rugosité

Figure I.9 Les structures cristallines les plus courantes des métaux : a) réseau c.f.c. b) réseau c.c, c) système h.c.

Figure I.10 Représentation schématique d'une dislocation : a) Dislocation coin, b) Dislocation vis

Figure I.11 Phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction.

Figure. I.12 Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques

Figure I.13 Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille

Figure I.14 Principe du galetage

Figure I.15 Outils de galetage

Figure I.16 : Principe de brunissage

Figure I.17 Différentes formes de brunissoirs : a) sphérique ; B) conique ; C) cylindrique plate ;
D) cylindrique bombé

Figure I.18 Différentes surfaces à traiter par brunissage

Figure I.19 Schéma de l'expérimentation

Figure I.20 le niveau bas du facteur est noté par -1, et le niveau haut par +1, le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre -1 et +1

Figure I.21 Espace expérimental

Figure I.22 Domaine d'étude

Figure I.23 Domaine d'étude et surface de réponse d'un plan d'expérience à deux facteurs.

Figure II.1 : échantillon après découpage

Figure II.2 : Tronçonneuse MECATOME T300

Figure II.3 : POLISSEUSE

Figure II.4 : Séchoir

Figure II.5 : Echantillon préparé

Figure II.6 : Spectromètre SRS3000

Figure II.7. Rugosimètre Mitutoyo SJ-210

Figure II.8. a) Microduromètre Matsuzawa (MXT70), b) empreinte

Figure II.9. Eprouvette de l'essai de traction.

Figure II.10. Tour universel, ALMO type SN

Figure II.11. a) Machine de traction ZWICK 1476 10KN, b) fixation des éprouvettes

c) Eprouvette témoin

Figure II.12 Représentation du domaine d'étude par les sommets A, D, C, D

Figure II.13 : Six éprouvettes usinées sur le tour

Figure II.14 : Tour parallèle 1A616

Figure II.15 : Brunissage a) Photo du montage sur tour, b) Schéma du dispositif

Figure II.16 : a) Eprouvettes après brunissage. b) Opération de brunissage

Figure III.1 Effet du brunissage sur la rugosité avec le taux de réduction.

Figure III.2. Profil de surface de l'acier S355JR : a) état d'usinage : b) état de brunissage à la bille.

Figure III.3. Effet du brunissage sur la Micro-dureté avec le taux d'amélioration.

Figure III.4. Effet du brunissage sur les caractéristiques mécaniques en fonction des régimes de brunissage.

Figure III.5. Taux de réduction de R_e après brunissage.

Figure III.6 Taux de d'amélioration de R_m après brunissage

Figure III.7. Taux de réduction de $A\%$ après brunissage.

Figure V.1 : Fichier Excel de la Modélisation de l'expérience.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Matrice d'expérience

Tableau II.1 : Composition chimique du S355 JR

Tableau II.2 : les valeurs mesurées de Ra

Tableau II.3 : Les valeurs de la micro-dureté Hv.

Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques sur éprouvette témoin (T).

Tableau II.5 : Facteurs codés en brunissage

Tableau II.6 : Matrice d'expérience

Tableau III.1 : les valeurs mesurées de Ra avant traitement de brunissage.

Tableau III.2 : les valeurs mesurées de Ra après traitement de brunissage.

Tableau III.3 : tableau comparatif des Ra moy avant et après traitement par brunissage

Tableau III.4 : les valeurs micro-dureté mesurées Hv avant traitement de brunissage.

Tableau III.5 : les valeurs de micro-dureté mesurées Hv après traitement de brunissage.

Tableau III.6 : Tableau comparatif de Hv moy avant et après traitement de brunissage

Tableau III.7 : caractéristiques mécaniques en fonction des régimes de brunissage.

Tableau III.8 : Tableau des taux d'améliorations ou de réductions des propriétés mécaniques après brunissage

Tableau IV.1 : Facteurs codés

Tableau IV.2 : Matrice des essais

Tableau IV.3 : Les réponses mesurées

Tableau IV.4 : Valeurs des coefficients polynôme

I. Introduction

Dans les structures mécaniques, les surfaces des organes de machines sont les plus exposées aux attaques extérieures qui sont de natures diverses (frottement, usure, corrosion, fatigue,...), des sollicitations dynamiques (sollicitations de fatigue) qui occasionnent la rupture brutale des pièces en service. Dans la pratique, il a été constaté que la majorité des cas de rupture débute souvent avec un amorçage en surface [1].

La qualité de la couche superficielle représente un facteur essentiel pour l'intégrité de la structure mécanique. En effet, la dégradation de la surface de la pièce entraîne l'effondrement de la pièce, ce qui occasionne des avaries voire l'arrêt des ensembles mécaniques (machines, équipements de transport, mécanismes de sécurité,...). [1].

Les procédés sans enlèvement de copeaux ou traitements mécaniques de surface (TMS), qui agissent par déformation plastique superficielle (DPS) trouvent leur place comme procédés de finition tel que le grenailage, le galetage, le brunissage etc. Ils assurent aux pièces usinées de bonnes propriétés physique et géométrique avec un indice économique relativement amélioré, moins coûteux et consistent à améliorer les propriétés locales (en surface) du matériau.

Ce travail porte sur le brunissage d'une nuances d'aciers S355 JR pour déterminer son aptitude à subir une déformation plastique superficielle (DPS) en variant le nombre de passes (i) et la force de pression (P) afin d'évaluer l'effet de ces paramètres du régime de traitement sur la rugosité de surface R_a , la micro-dureté H_v , et les caractéristiques mécaniques tel que la résistance élastique R_e , résistance de rupture R_m , et l'allongement $A\%$.

Le mémoire comporte les parties suivantes : Dans le premier chapitre sont présentés des généralités sur les métaux et leurs propriétés mécaniques et de présentée quelques essais mécaniques qui peuvent fournir au matériau ces données nécessaires ; (rugosité, Dureté, et traction).

Le deuxième chapitre regroupe l'ensemble des appareils, machines et outils utilisés, la description de matériau étudié, les techniques expérimentales employées lors de la préparation des pièces (éprouvettes d'essai) et leurs traitements par brunissage Dans le troisième et quatrième chapitre, sont présentées la synthèse des résultats expérimentaux et leurs discussions avec la modélisation de l'expérience. Il est suivi par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Matériaux et essais mécaniques

CHAPITRE I : Matériaux et essais mécaniques

I.1. Introduction :

Les matériaux métalliques constituent la base du développement technologique. Ceci est également valable pour la construction des outils, des machines, des installations et des automobiles que pour l'aéronautique et l'aérospatial et la médecine. Les alliages à base de fer, aciers et fontes, constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques.

I.2 Propriétés mécaniques des métaux

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.

1.2.1 Elasticité et plasticité

L'une des propriétés principale de l'état métallique est l'aptitude à la déformation sous l'effet d'une contrainte. la déformation résultante peut être élastique, c'est-à-dire qu'elle se résorbe si la contrainte cesse d'être appliquée (la zone OA) voir (figI.1), ou plastique, dans le cas où le solide conserve une déformation permanente après que la sollicitation mécanique est été supprimée (la zone AB) voir (figI.1), [1]

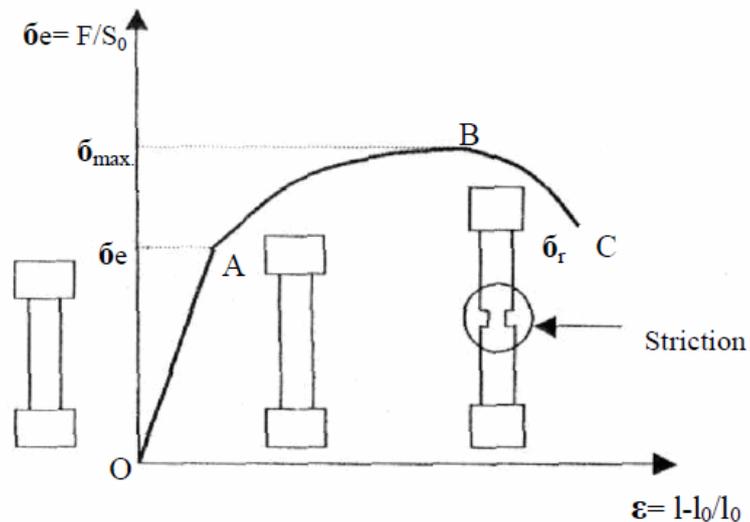


Figure I.1: Courbe contrainte-déformation [1]

L'élasticité est la faculté que possède le métal de pouvoir subir une déformation qui cesse après suppression de l'effort qui la provoque, quand un échantillon de métal est soumis à un effort relativement faible, il ne subit que des déformations élastiques. La position moyenne des atomes n'est que légèrement modifiée.

La plasticité du métal revêt deux aspects principaux :

- malléabilité : possibilité de réduire le métal en feuille plus ou moins mince.
- ductilité : faculté de pouvoir étirer le métal en fils sans le rompre.

1.2.2 Résistance mécanique

C'est la capacité d'une structure de résister aux efforts mécaniques extérieurs, le plus souvent cette grandeur est caractérisée par la résistance à la rupture « σ_r » mesurée à la suite d'un essai de traction, c'est la grandeur la plus utilisée pour la majorité des pièces soumises à un chargement statique. [2], [3].

1.2.3 Rigidité

Intervalle de la déformation élastique réversible d'une structure atomique. Cette propriété est liée aux forces inter atomiques dues à la variation de distance entre les atomes. Elle est caractérisée par le module longitudinal de Young où la loi de HOOK est valable. Elle est mesurée suite à un essai de traction. [4],[5].

1.2.4 Ductilité

C'est le domaine de déformation permanente irréversible d'une structure, souvent désigné sous le nom de domaine plastique, cette plasticité est due au glissement irréversible entre les plans Cristallographiques du matériau, un matériau ductile peut être étiré ou allongé sans se rompre. [4].

1.3 Essais mécaniques

Nous définissons dans le cadre de ce travail, deux essais fondamentaux (dureté, traction,) qui intéressent d'une voie directe ou indirecte la résistance à la rupture du matériau et caractérisent sa consolidation.

I.3.1 Essais duresté

La détermination des propriétés mécaniques des couches mince et de la surface des matériaux est très importante. L'essai de duresté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie sur la surface d'un échantillon [6].

Plusieurs domaines de duresté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée (fig. I.2) : *Bückerle* [7] a introduit en 1965 la notion de la macro-duresté pour des charges supérieures à 3÷5 kgf et celle de micro-duresté pour des charges inférieures à 100÷200 gf. Le domaine intermédiaire étant celui de la duresté sous charge réduite. Dans les années 80, est apparu le domaine de nanoduresté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.

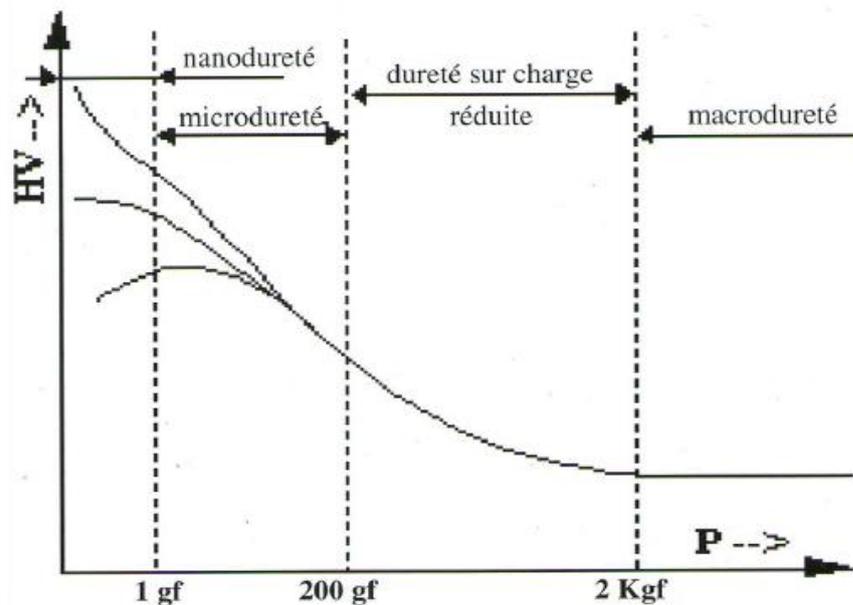


Figure I.2 Définition des différents domaines de duresté.

1.3.2 Type d'essai de duresté

Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours le même : un pénétrateur indéformable de forme géométrique précise, pénètre dans le métal sous l'action d'une charge constante et laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté.

Dans une première approche, On peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité R_e avec la surface de l'empreinte : plus l'objet pénétrant s'enfonce, plus la surface S de pression

s'agrandit, donc la force F étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est pas suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête et la dureté est calculée à partir du rapport de la force appliquée sur la surface indentée (relation I.5) [8].

$$R_E = \frac{F}{S} \quad \text{I.5}$$

I.3.2.1. Essai de dureté Brinell

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène (**Fig. I.3**). Le diamètre D utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5mm et 10mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide. Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d .

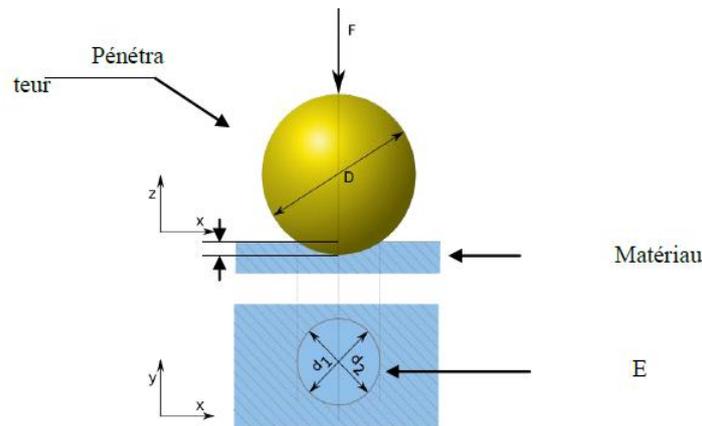


Figure I.3. Principe de dureté brinell.

La force F étant exprimée en kgf , le diamètre de l'empreinte d en mm et la dureté *Brinell* HB est exprimée en kgf/mm^2 selon la relation suivante (I.1).

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

avec:
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

1.1

I.3.2.2 Essai de dureté Rockwell

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère *HRC* (fig. I.4a), ou bien sphérique pour le critère *HRB* (fig.I.4b) est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet 120° à pointe arrondie sphérique de rayon de $0,2mm$. Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre $1,588 mm$ ou $3,175mm$ [8]. L'essai se déroule en trois phases.

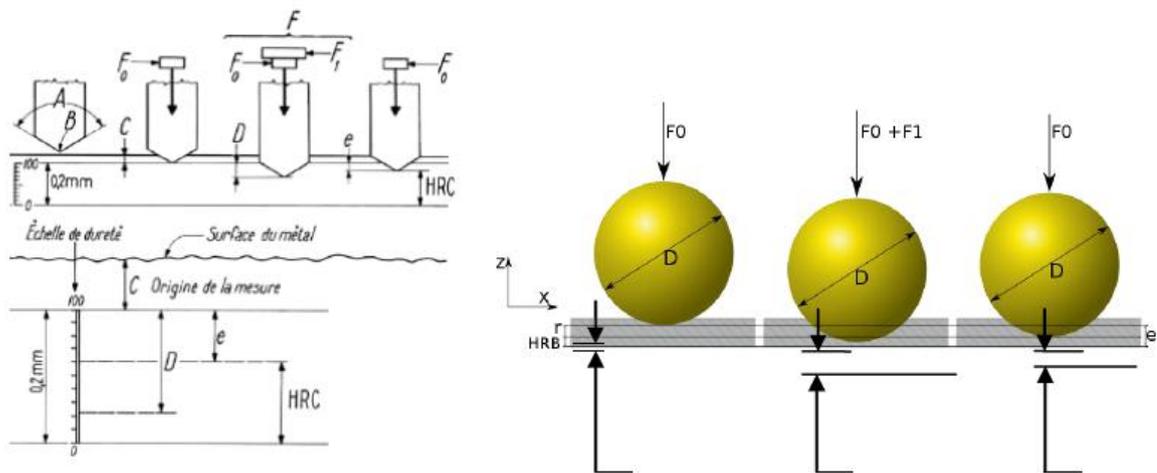


Figure I.4. Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle *HRC*, b) échelle *HRB*.

i) Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale $F_0 = 98N$ (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.

ii) Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire F_1 , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur P

iii) Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force F_1 est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

I.3.2.3. 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.5**).

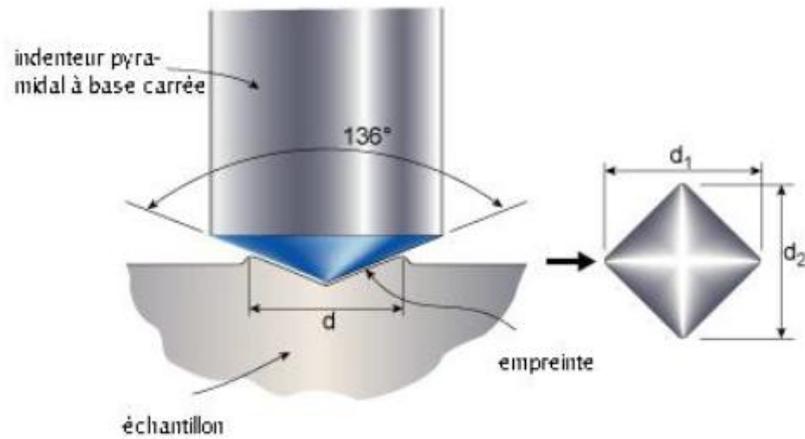


Figure I.5. Principe de dureté Vickers

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 [9]. 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.2).

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2} \quad 1.2$$

avec:
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

I.3.3 Essai de traction

I.3.3.1 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 [5].

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 :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad 1.3$$

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

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \quad 1.4$$

L'essai est le plus souvent normalisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique (**fig. I.6**).

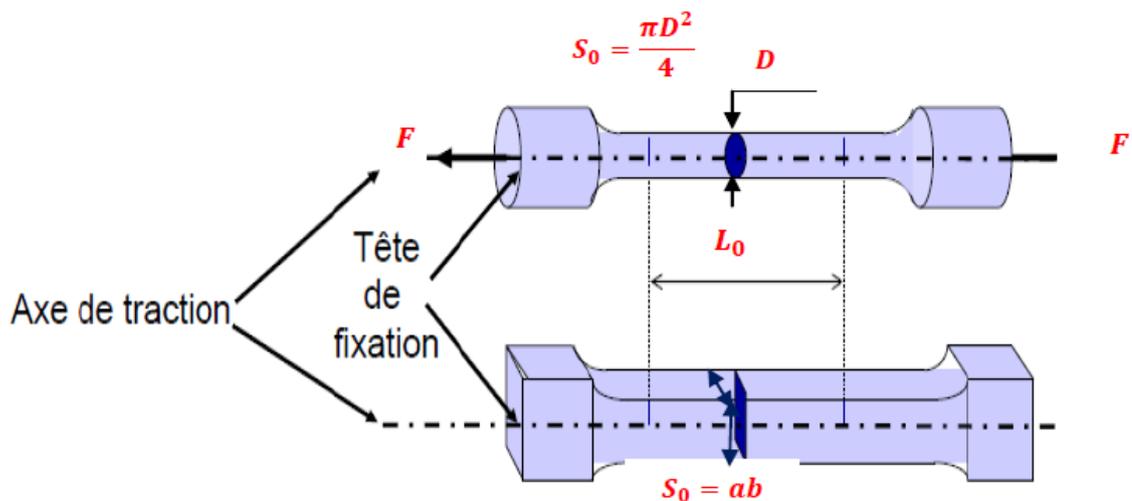


Figure I.6. Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique

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.

1.3.3.2 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 (**Figure I.1**) puisqu'on l'on rapporte les efforts F à la valeur initiale S_0 de la section. Cela peut être accepté dans le domaine des petites déformations ($\epsilon \leq 20\%$). Cependant lorsque les déformations deviennent importantes ($\epsilon \rightarrow \infty$), 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 .

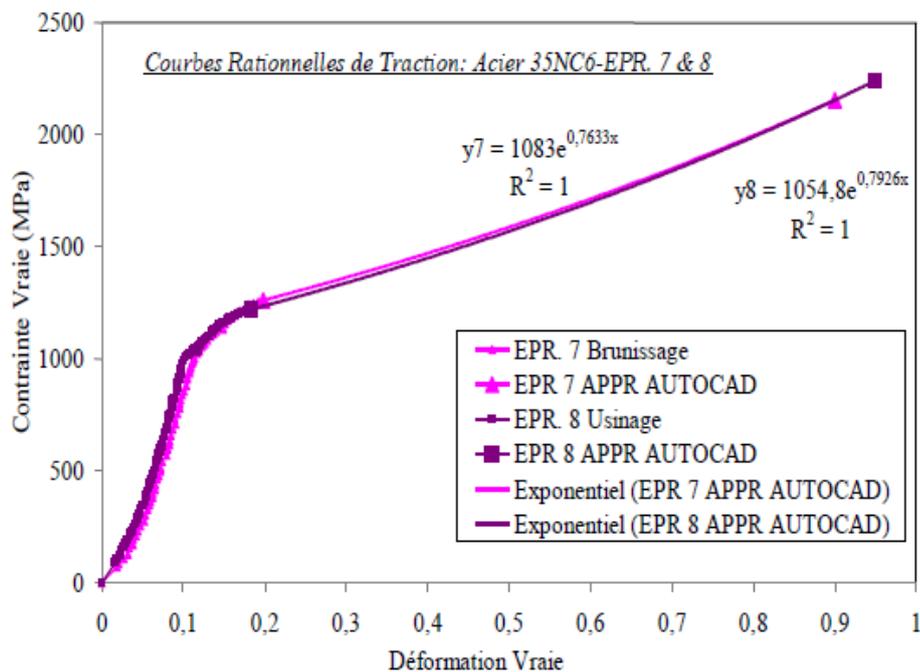


Figure I.7. Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6 [9].

La courbe de traction rationnelle (**Fig. I.7**) 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.

I.4 Qualité de surface

I.4.1 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... 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..

Les paramètres d'état de surface les plus couramment utilisés sont récapitulés sur la **figure1.8**.

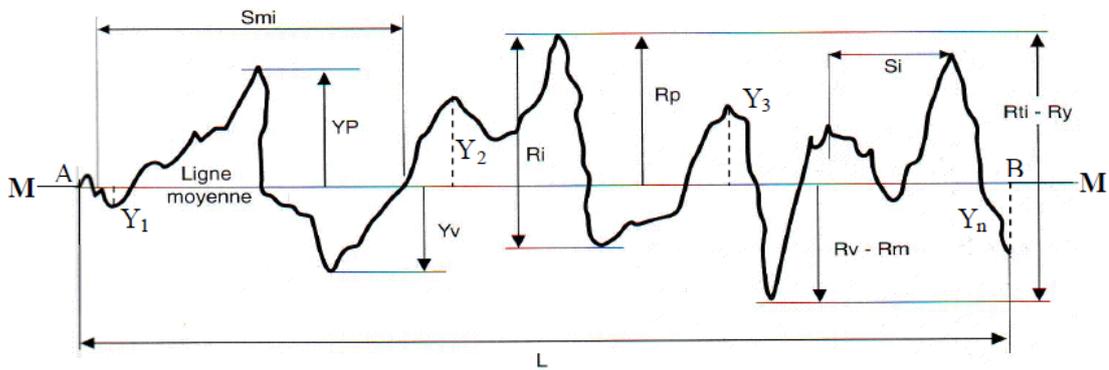


Figure 1.8 Paramètres de rugosité

MM: Ligne moyenne indiquant la direction générale du profil

- L : Longueur de base servant de mesure et de calcul les paramètres de rugosité
- YP : Hauteur d'un pic par rapport à MM
- YV : Profondeur d'un creux par rapport à «MM»
- Rp, Rv (ou Rm) : Hauteur, Profondeur maxi des pics et creux, par rapport à « MM»
- RT : Rti (ou Ry) Ecart max sur la longueur d'évaluation, ($Ry=Rp+Rm$)
- Rtm: Moyenne des Rti sur la longueur totale d'évaluation

- R_i : Profondeur élémentaire de la rugosité
- R : Profondeur moyenne de la rugosité (moyenne R_i sur la longueur d'évaluation)
- R_{max} : Profondeur maximum de la rugosité
- R_z : Hauteur des irrégularités sur 10 points (moyenne des valeurs absolues des $5Y_p$ et $5Y_v$ les plus grands, sur 5 segments d'évaluation consécutifs.
- R_a : Moyenne arithmétique des écarts de profil par rapport à la ligne moyenne, représente la valeur moyenne des distances des pointes successives.
- S_i : Pas de saillies locales du profil

I.5 Dégradation d'une structure

I.5.1 Architecture atomique et défauts du réseau cristallins

La microstructure d'un matériau est formée par l'ensemble des grains et des particules de taille microscopique, ou des défauts observables par microscopie (*électronique ou bien optique*). Elle nous permet de caractériser les structures et les propriétés de plusieurs matériaux [10].

Un monocristal, géométriquement parfait, est un ensemble d'ions régulièrement repartis dans l'espace. Pour décrire cet arrangement, on définit un réseau cristallin par un ensemble de nœuds obtenus à partir d'une maille élémentaire répétitive avec une périodicité tridimensionnelle.

Les trois structures cristallines les plus fréquentes dans les métaux sont les structures cubiques à faces centrées (*c.f.c.*) (**fig. I.9a**), cubique centrée (*c.c.*) (**fig. I.9b**) et hexagonale compacte (*h.c.*) (**fig. I.9c**). Les structures *c.f.c.* et *h.c.* sont les plus compactes.

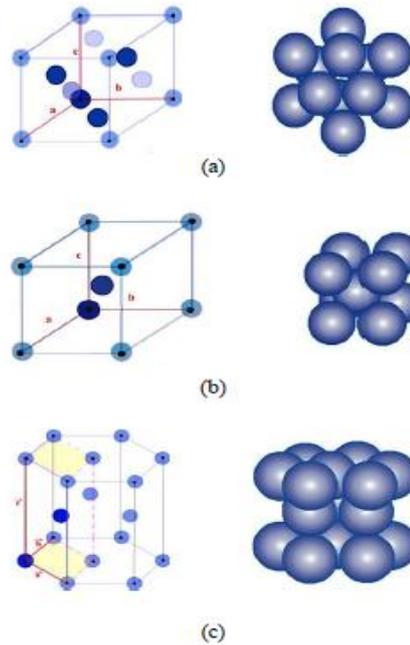


Figure I.9 Les structures cristallines les plus courantes des métaux :

a) réseau c.f.c. b) réseau c.c. c) système h.c.

I.5.2 Dislocations et leur rôle dans la déformation plastique :

Dans un cristal réel, il existe en plus des défauts ponctuels, des défauts linéaires ou dislocations (**fig. I.10**). Une dislocation est caractérisée par le vecteur de Burgers. Ce vecteur est le défaut de fermeture d'un circuit qu'on aurait tracé autour de la dislocation dans un plan normal à celle-ci. Dépendamment de la nature du défaut, Les dislocations peuvent être classées en plusieurs catégories :

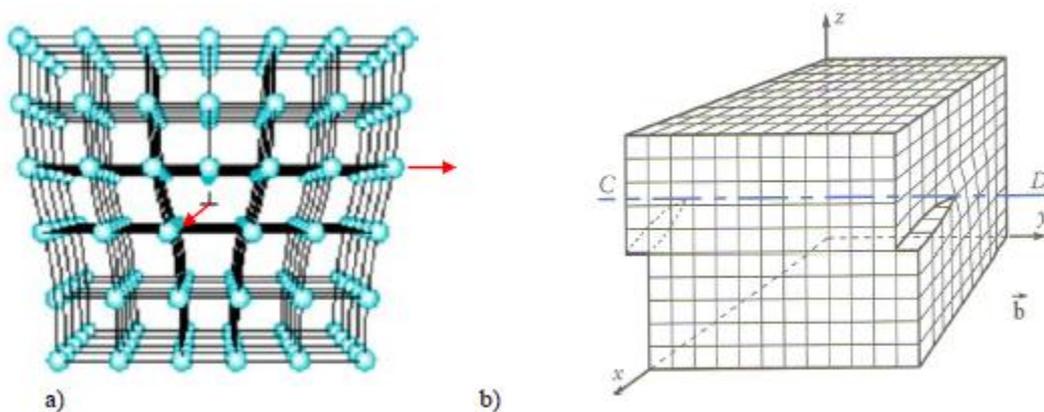


Figure I.10 Représentation schématique d'une dislocation :

a) Dislocation coin, b) Dislocation vis

a) Une **dislocation coin** est représenté à la **figure I.10.a** dans une structure cubique simple. Une telle dislocation est la ligne sur laquelle se termine un demi-plan atomique supplémentaire à l'intérieur du cristal. On peut remarquer sur cette figure que le cristal est déformé au voisinage de la dislocation : au-dessus de la ligne de dislocation AB, la distance entre les atomes étant moins grande que leur distance d'équilibre, le réseau est en compression ; la situation inverse prévaut sous la dislocation : le réseau y est en tension.

b) Une **dislocation vis** représentée à la **figure I.10.b**, est le résultat d'un cisaillement du réseau parallèlement à la ligne de dislocation.

I.6 Phénomène d'écrouissage

L'écrouissage des matériaux cristallins s'explique par l'immobilisation progressive des dislocations et va jusqu'à leur blocage complet. En effet, pour qu'il y ait déformation plastique, il faut des dislocations. L'écrouissage d'un métal correspond aux modifications qu'il subit lorsque les contraintes qui lui sont appliquées sont suffisamment fortes pour provoquer des déformations plastiques permanentes. Suivant les métaux considérés les propriétés mécaniques peuvent évoluer vers une augmentation de la résistance (cas des aciers alliés) jusqu'à un certain point (seuil de rupture) ou à l'inverse vers sa diminution (cas des aciers peu alliés). [11], [12] .L'écrouissage ne se produit que sur les matériaux ductiles et dans le domaine plastique. L'écrouissage entraîne une augmentation de la limite d'élasticité et de la dureté, il est caractérisé par un coefficient d'écrouissage ou de consolidation "n".

II.6.1 Courbe et coefficient d'écrouissage

Dans le domaine des déformations plastiques homogènes (*avant l'apparition de la striction*), le phénomène d'écrouissage peut être évalué sur les courbes rationnelles de traction. Sur une courbe de traction classique, la charge à la rupture est une grandeur conventionnelle puisque elle ne tient compte que de la section initiale S_0 ; ($R_m = \sigma_{max} / S_0$) .Cela empêche de tenir compte dans les calculs de plasticité car la section est variable dans le temps. A cet effet, on définit une contrainte vraie σ_v qui correspond à la charge appliquée rapportée à la section instantanée $S=S(t)$.

$$\sigma_v = F/S \quad 1.6$$

Une portion parabolique AB de cette Courbe peut être mise sous une certaine forme empirique qui relie la contrainte vraie σ_v à la déformation relative ε_v . (**fig.I.11**) L'expression la plus utilisée est celle de *Lüdiuk* [13] :

$$\sigma_v = \sigma_0 + K.(\varepsilon_v)^n \quad 1.7$$

Où σ_0 et k sont des constantes du matériau
Et n est le coefficient d'écrouissage

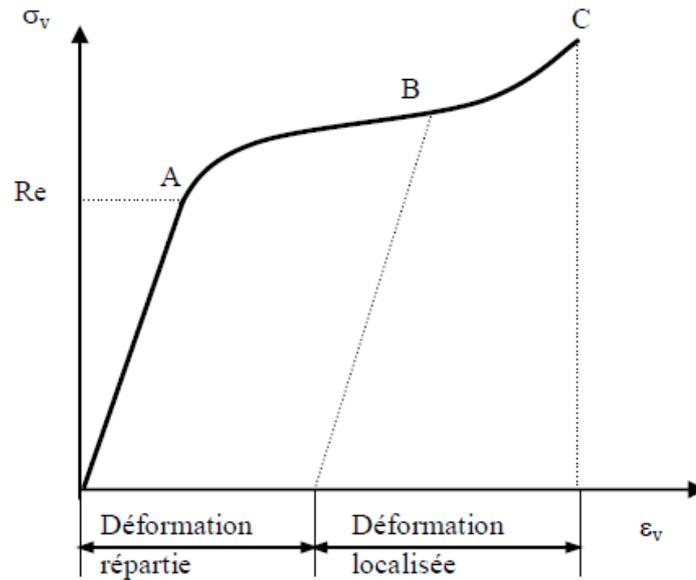


Figure I.11 Phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction.

Le coefficient d'écrouissage caractérise la déformation rationnelle répartie (*homogène*) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation. Ce coefficient dépend du matériau et du traitement qu'il a subi. En général on a :

$$0,1 \leq n \leq 0,4$$

N.B:

Si $n = 0,1$: le matériau a une faible consolidation ;

Si $n = 0,4$: le matériau a une forte consolidation ;

Si $n = 0$: Le matériau ne subit aucune consolidation, C'est donc que ce matériau est parfaitement plastique.

Remarque : Pour mettre en évidence le coefficient d'écrouissage, il est commode de tracer la courbe rationnelle en coordonnées logarithmiques :

On a (*pour* $\sigma_0=0$)

$$\ln \sigma_v = \ln [k.(\varepsilon_v)^n] \quad (I.21) \quad 1.8$$

Où : $\ln \sigma_v = \ln k + n.\ln (\varepsilon_v) \quad (I.22) \quad 1.9$

Dans ce cas, la courbe : $\ln \sigma_v = f(\ln \varepsilon_v)$ représente une droite de pente n (**fig. I.12**).

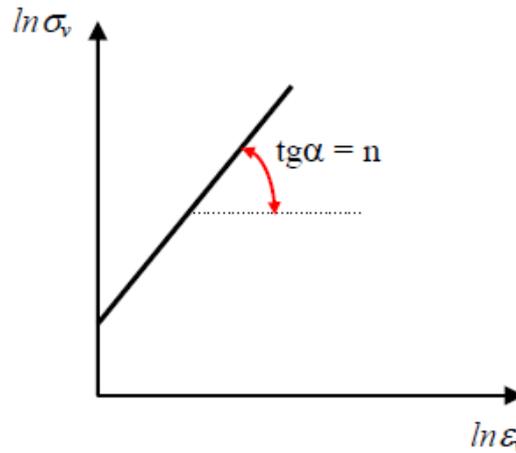


Figure. I.12 Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques

I.7 Traitements Mécaniques De Surface

I.7.1 Introduction

Les traitements mécaniques de surface sont des procédés qui permettent d'améliorer les caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux par une action combinée de durcissement superficiel, de modification structurale et d'introduction de contraintes résiduelles de compression grâce à une déformation plastique hétérogène à la surface des pièces mécaniques [14]. Le principe de base de ces procédés est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation plastique par un outil (ex : rouleau ou galet). La déformation plastique n'est pas homogène sur la profondeur de la pièce à partir de la surface traitée. Ce type de traitements génère des contraintes résiduelles de compression qui sont souvent favorables pour la résistance à la fatigue et à la corrosion [15,16].

I.7.2 Principe de traitement de finition par pression

Le traitement de finition par pression est un procédé de traitement à froid sans enlèvement de matière. Son principe est basé sur les propriétés des matériaux et leur aptitude à la déformation élasto-plastique de la couche superficielle. Sous la pression des métaux durs, des alliages durs ou diamant, de l'outil (bille, galet, pointe sphérique), les microreliefs de départ de la pièce se déforment plastiquement, se compriment en formant un nouveau microrelief avec plus de régularité (**figure 1.13**). [1]

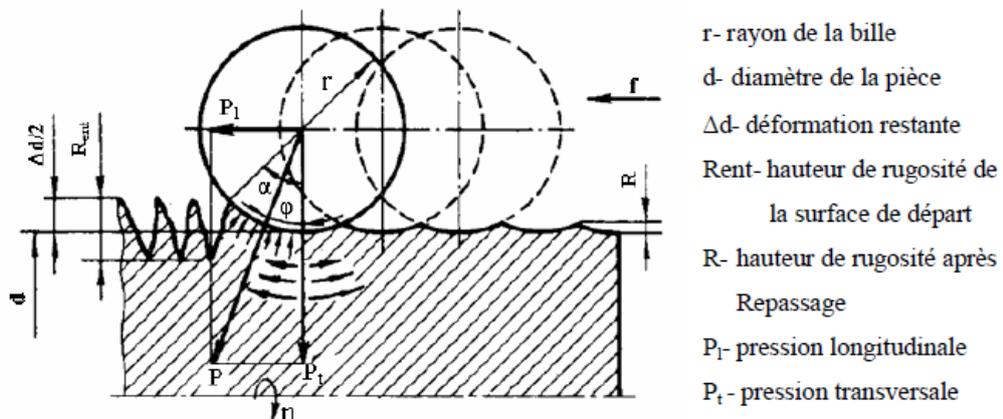


Figure I.13 Schéma de la déformation des irrégularités de surface lors d'un traitement par bille [1]

La couche superficielle s'écoule sous l'influence de la force de pression développée par la bille, par conséquent les parties en saillies se déplacent vers les creux, la hauteur des irrégularités d'entrée « R_{ent} » diminue.

I.7.3 Différents type de Traitement Mécanique de Surface :

Les traitements les plus utilisés sont le brunissage, le galetage, le martelage. Le principe de base est la mise en application d'une pression à la surface d'un matériau pour provoquer une déformation plastique soit par un outil de forme comme pour le galetage, soit par une onde de choc comme pour le traitement par choc laser. Cette déformation plastique n'est pas homogène sur la profondeur de la pièce à partir de la surface traitée.

Ce type de traitements génère des contraintes résiduelles de compression qui sont souvent favorables pour la résistance à la fatigue et à la corrosion. [17]

I.7.3.1 Galetage

Depuis de nombreuses années le galetage des surfaces est utilisé pour la finition des essieux des wagons moteurs des chemins de fer. Précisément on le rencontre dans différentes

branches de l'usinage mécanique, il s'impose de plus en plus comme étant une technique extrêmement importante et rentable [17].

Le galetage est une opération de finition mettant en contact des galets en acier traité poli et une pièce d'une dureté inférieure comme indiqué sur la figure I.30. La surface obtenue par galetage est plus fine et présente une meilleure résistance à l'usure que celle obtenue par abrasion. Le galetage travaille par déplacement de la matière plutôt que par enlèvement [18], Il oblige, sous l'application d'une force orthogonale, les crêtes d'une rugosité de surface qui a subi un usinage antérieur (tournage, fraisage) à fluer dans les creux **figure I.14**, il s'applique sur des pièces métalliques qui ont un allongement $A > 6\%$.

Plusieurs recherches ont confirmé les avantages imputés au galetage tels : l'amélioration de la dureté superficielle, la rugosité de surface lui donnant une bonne précision dimensionnelle et géométrique, et la production des contraintes résiduelles de compression qui permettent l'amélioration des résistances à l'usure, à la fatigue, à la corrosion [19].

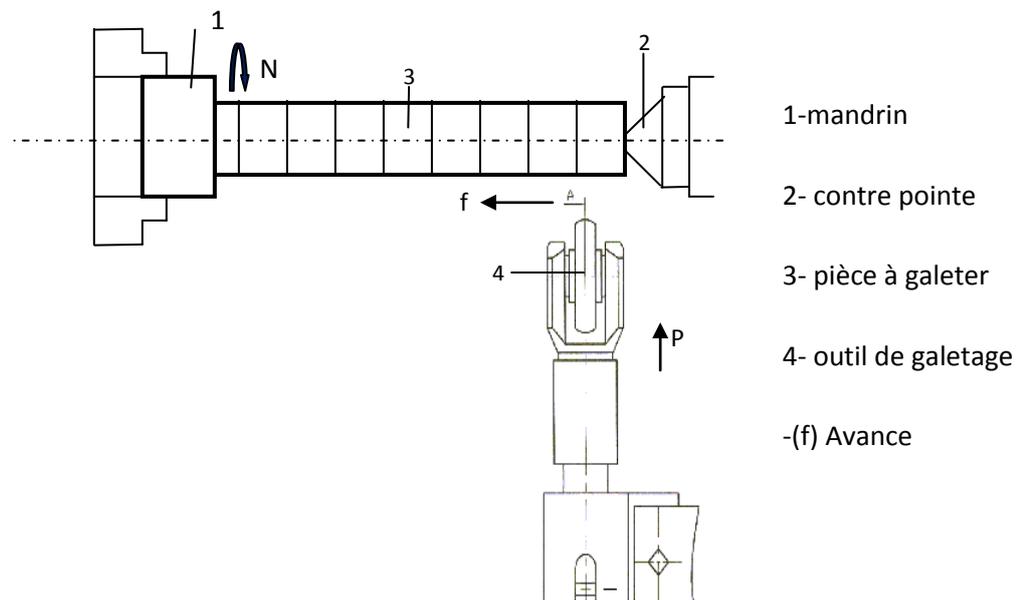


Figure I.14 Principe du galetage [19]



Figure I.15 Outils de galetage

I.7.3.2 Différents types de galetage

Galetage de renforcement : il permet d'augmenter la résistance à la fatigue des pièces de construction

Galetage dimensionnel ou de forme : le but de ce galetage est modifier la forme initial de la pièce

Galetage de surface : avec ce galetage on peut améliorer la surface au niveau macro et miro géométrique et il est possible d'atteindre un niveau de super finition.

- Influence du galetage sur la rugosité

L'amélioration de la rugosité sur les pièces brunies dépend des paramètres de procédés.

- Par l'augmentation de la vitesse de déformation on augmente la température dans la zone de déformation qui permet, la stabilisation au moment donné, ainsi que le métal prend un aspect de plus en plus visqueux ce qui réduit le frottement entre l'outil et la pièce ce qui provoque l'amélioration de l'état de surface avec une diminution de la rugosité.

L'amélioration de Ra et aussi assurée par:

- L'augmentation de l'effort de brunissage qui provoque le fluage du métal et par conséquent la plastification, ce qui diminue la rugosité.
- L'augmentation du rayon de l'outil qui réduit la hauteur d'aspérité; ce qui permet la diminution de Ra [15].

- Avantages du galetage

1. Amélioration de l'état de surface de 0,05 à 0,1 Ra soit 2 à 4 microns
2. Meilleur contrôle de la cote jusqu'à 0,01 mm
3. Amélioration de la dureté en surface de 5 à 10%
4. Amélioration du temps de contact jusqu'à 300%
5. Amélioration de la résistance à la corrosion

6. Réduction de la friction
7. Elimination des traces et des imperfections
8. Remplace des opérations onéreuses comme la rectification ou rodage
9. Production accrue à cout réduit comparée à d'autres opérations de finition

I.7.3.3 Brunissage

Il est d'usage courant qu'une pièce mécanique soit destinée à un rôle fonctionnel dans des conditions sévères. De ce fait, le matériau doit avoir de hautes caractéristiques mécaniques dont le choix reste un souci majeur pour les industriels à cause des contraintes économiques que peut causer ce choix. Néanmoins, ce problème peut être résolu en faisant appel à des méthodes de fabrication et des modes de traitement sur des matériaux « classique » pour satisfaire les exigences techniques[20].

Le brunissage est un procédé qui agit par déformation plastique superficielle, cette technique est utilisée dans le parachèvement ou finition des surfaces de contact des pièces métalliques dures et des métaux plastiquement déformables [21].

L'opération est réalisée avec un outil : **le brunissoir**.

I.7.3.4 Principe de brunissage

Le brunissoir exerce une pression sur les crêtes de la surface, ce qui a pour conséquence un fluage de la matière dans les creux, au fur et à mesure de l'avance de l'outil. Il sert à niveler les aspérités de la surface usinée en créant une zone de métal écrouie indice d'une amélioration de l'état de surface voir **figure I.16**.

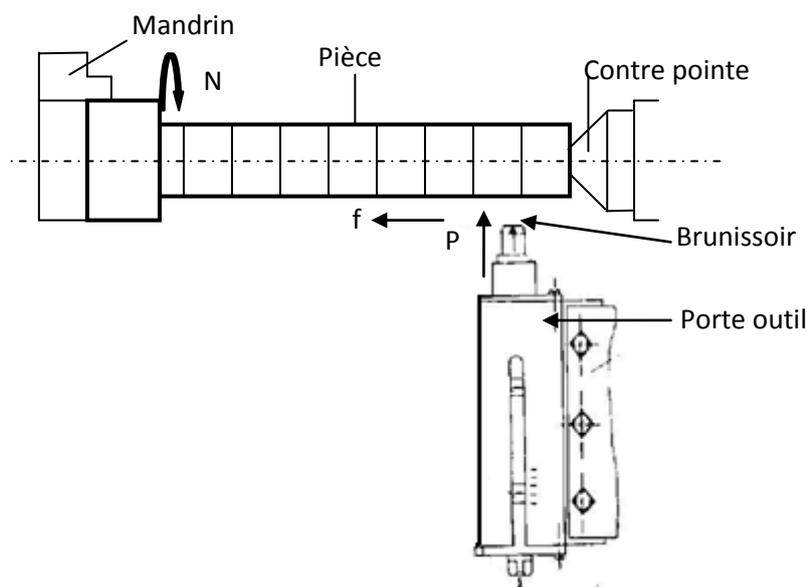


Figure I.16 : Principe de brunissage [19]

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) [22].

La forme de la partie active de l'outil la plus souvent utilisée est sphérique (bille de rayon 0.8 à 5 mm), mais dans certains cas, elle peut être cylindrique, conique (fig I.17) et parfois torique.

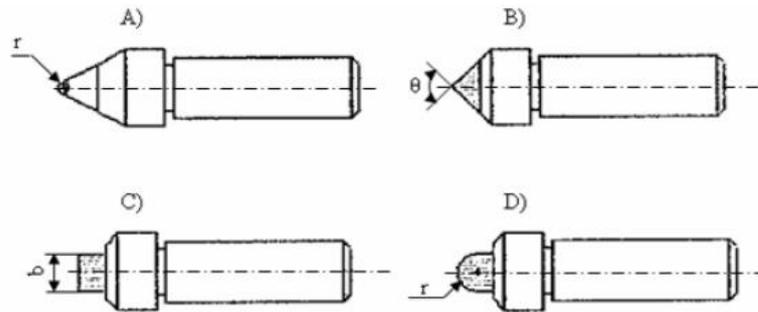


Figure I.17 Différentes formes de brunissoirs

A) sphérique ; B) conique ; C) cylindrique plate ; D) cylindrique bombé [1]

Le procédé intéresse aussi bien les surfaces extérieures que les surfaces intérieures (fig I.18).et peut être appliqué sur des pièces de haute dureté pouvant atteindre jusqu'à plus de 50HRC [6].

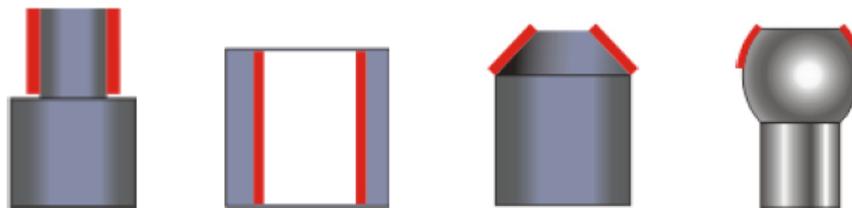


Figure I.18 Différentes surfaces à traiter par brunissage [6]

Le brunissage a pour but de :

- ✓ Rendre la surface du métal brillante
- ✓ Améliorer l'état de surface
- ✓ Réduire la rugosité de la surface
- ✓ Augmenter la dureté superficielle.

- Avantages du brunissage

- ✓ Amélioration de l'état de surface
- ✓ Amélioration des caractéristiques mécaniques
- ✓ Outillage simple, durée de vie élevée, et peu couteux
- ✓ Opération économique car le brunissage est appliqué sur des pièces non traitées
- ✓ Il Crès des précontraintes de compression qui agissent favorablement sur l'endurance

- Inconvénients du brunissage

- ✓ Moyens de contrôle onéreux
- ✓ Utilisé que pour le matériau plastiquement déformable

I.8 Plans D'expériences Et Modélisation [1]

1.8.1 Introduction

La conduite d'une expérimentation obéit à une démarche précise. Cette démarche est facilitée par l'application de la méthode des plans d'expériences. Les plans d'expériences servent à optimiser l'organisation des essais. Cette organisation permet d'obtenir le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences, ce qui aide à gagner du temps et à économiser la matière première. Elle permet également d'obtenir la meilleure précision possible sur la modélisation des résultats. Cette méthode des plans d'expériences est basée sur des règles mathématiques strictes et elle exige une démarche rigoureuse. Les plans d'expériences présentent beaucoup d'avantages comme la possibilité d'utiliser un grand nombre de facteurs, évaluer des représentations graphiques des réponses obtenues à la sortie en fonction des paramètres d'entrée (**figure I.19**) et d'utiliser un modèle mathématique répondant aux objectifs à atteindre suivant le besoin. [23], [24], [25].

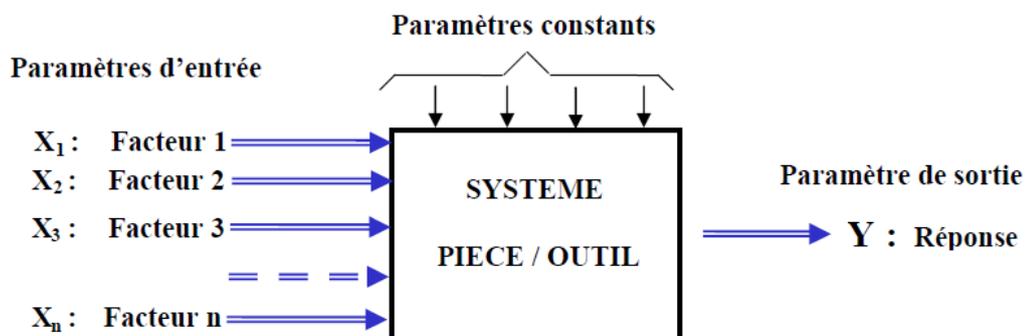


Figure I.19 Schéma de l'expérimentation

I.8.2 Terminologie [26]

a) Réponse

Les grandeurs qui sont mesurés à chaque expérience sont appelées réponses. Le choix des réponses est un problème difficile qui ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des enjeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir là où les bonnes réponses.

b) Surface de réponse

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne, a priori, une loi d'évolution. C'est le modèle mathématique a priori ou le modèle postulé. La forme la plus générale de ce modèle est:

$$Y = F (X_1, X_2, \dots, X_k) \dots\dots\dots (5.1)$$

Où

Y est la grandeur de la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation :

Les **X_i** représentent les niveaux des différents facteurs.

c) Facteur

Les variables que l'on désire étudier sont appelés facteurs. En général un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans d'expériences, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure que l'on note le plus souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure que l'on note le plus souvent par +1). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, constitue le domaine du facteur (Cf.figure I.20). Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

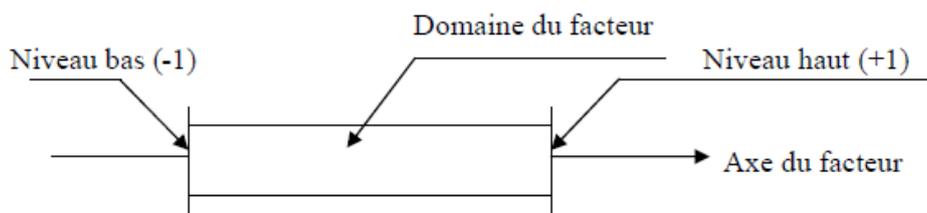


Figure I.20 le niveau bas du facteur est noté par -1, et le niveau haut par+1,le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre -1 et +1 [26].

Les facteurs étudiés peuvent être des variables continues ou discontinues , Un facteur est représenté par un axe orienté (**figure1.21**). Si le facteur est continu, cet axe est gradué selon une certaine échelle.

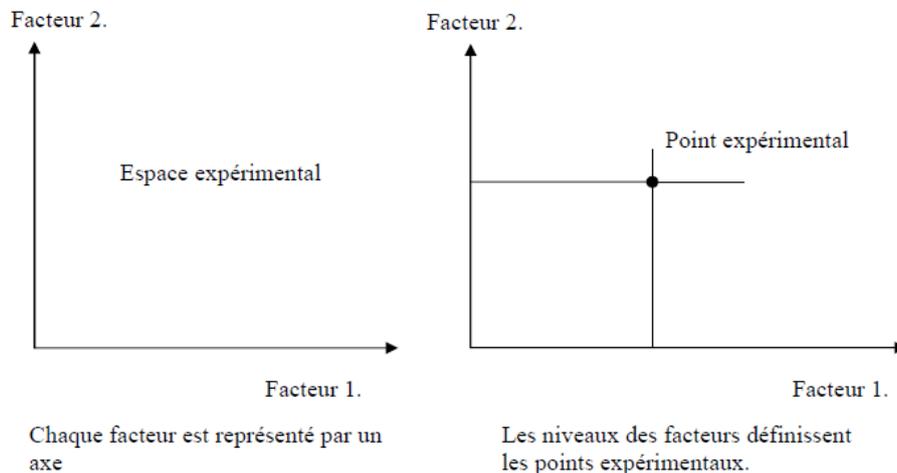


Figure I.21 Espace expérimental

L'ensemble de plusieurs points expérimentaux constitue un plan d'expérience. La réunion des domaines de variation de chaque facteur définit le domaine d'étude (**fig I.22**).

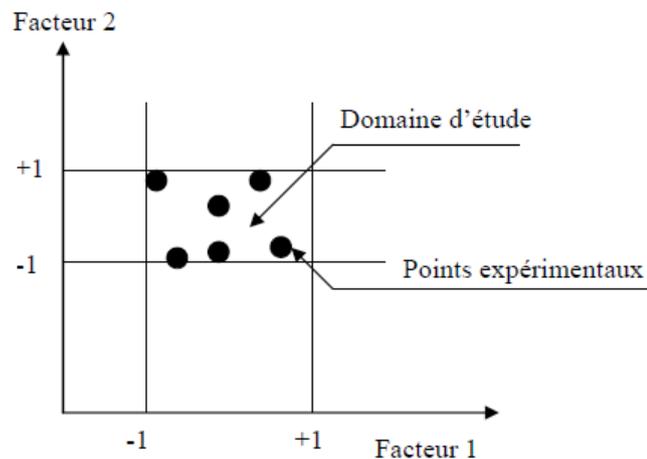


Figure 1.22 Domaine d'étude

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent la surface de réponse. La représentation géométrique des résultats d'un plan de deux facteurs nécessite un espace à trois dimensions : une dimension pour la réponse, deux pour les facteurs (**Cf. fig I.23**) [29].

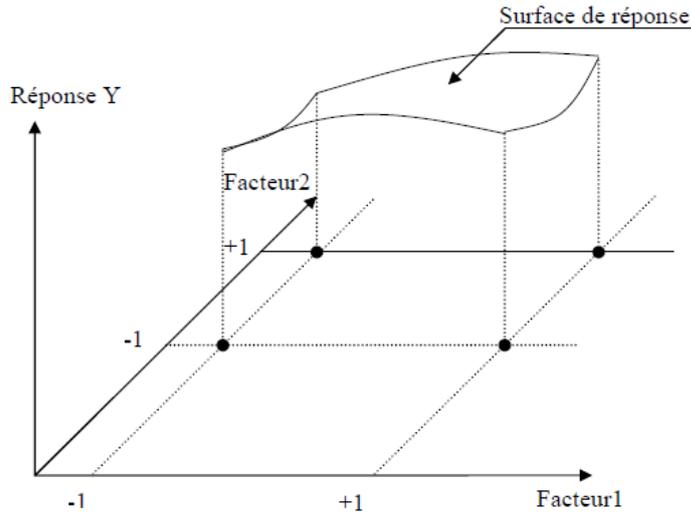


Figure I.23 Domaine d'étude et surface de réponse d'un plan d'expérience à deux facteurs.

d) Coordonnées centrées réduites

L'étude à l'aide des plans d'expérience est réalisée au moyen de nouvelles variables. Il est donc nécessaire de procéder à un changement de variables. Lorsqu'on attribue la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur +1 au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- On change l'unité de mesure
- On déplace l'origine de mesures.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables appelées variables centrées réduites ;

- Centrées pour indiquer le changement d'origine,
- Réduites pour signaler la nouvelle unité.

Le passage des variables d'origine « A » aux variables centrées réduites « X », est donné par la formule suivante (A0 est la valeur centrale de l'intervalle [-1 ; +1], exprimé en unité courante) ;

$$X = A - A_0 / \text{Pas} \dots \dots \dots (3.2)$$

La formule (3.2) permet également de passer des variables centrées réduites aux variables d'origines. L'intérêt des variables centrées réduites est de pouvoir présenter les plans d'expériences de la même manière quel que soient les domaines d'étude retenus et quels que soient les facteurs et leurs unités. La théorie des plans d'expériences présente ainsi une grande généralité. [29].

e) Matrice d'expériences

La matrice d'expérience (**tableau I.1**) définit les essais à réaliser. Le terme essai est l'équivalent de points d'expérience lorsque l'on emploie la représentation en tableau des plans d'expériences.

Tableau I.1 : Matrice d'expérience

N° essai	Facteur 1	Facteur 2
1 (A)	-1	-1
2 (B)	+1	-1
3 (C)	-1	+1
4 (D)	+1	+1

I.9 Conclusion

On peut conclure d'après la recherche bibliographique, l'intérêt de propriétés mécaniques de matériaux tel que : R_e , R_m , $A\%$. et l'importance des essais mécaniques essais de traction et dureté superficielle pour la caractérisation des matériaux. La qualité de surface (R_a) ainsi que la dégradation des structures des matériaux ont été mets en relief. Par ailleurs, un aperçu sur le phénomène d'écrouissage a été présenté avec les différents traitements mécaniques de surface (TMS) en l'occurrence le procédé de brunissage à la bille. Des travaux d'expérimentations et de modélisations seront développés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II Matériau et techniques Expérimentales

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, une présentation des moyens et des méthodes expérimentales seront exposées afin d'évaluer les paramètres suivants : la rugosité Ra, la dureté superficielle Hv, Résistance Re, Résistance maximale Rm et l'allongement A. La caractérisation du matériau sera présentée ainsi que les machines, l'appareil de mesure de la micro-dureté, et la rugosité. Les plans adoptés pour l'expérimentation et les différentes opérations réalisées seront exposés.

II.2 Caractérisation du matériau

Le matériau utilisé est l'acier S355 JR fourni sous forme de barres cylindriques. Cet acier comme tous les aciers à moyen carbone s'emploie dans la construction générale.

II.2.1 Composition chimique

L'analyse du matériau a été réalisée au niveau du laboratoire d'analyses chimiques URASM-CRTI/Annaba. L'échantillon destiné à la détermination de la composition chimique est préparé selon la norme ISO 14284 :2002 en passant par trois étapes:

1/-découpage

L'échantillon présenté sur la **figure II.1** a été découpé sur une Tronçonneuse type MECATOME T300 (**fig. II.2**)



Figure II.1 : échantillon après découpage



Figure II.2 : Tronçonneuse MECATOME T300

2/- Opération de Polissage

La surface de l'échantillon a été préparée sur une polisseuse (fig. II.3).



Figure II.3 : POLISSEUSE

3/- Opération de séchage

L'échantillon a été séché sur le séchoir indiqué sur la figure II.4.



Figure II.4 : Séchoir

Une fois l'échantillon préparé (fig. II.6) est placé dans le porte échantillon du spectromètre de fluorescence aux rayons X à dispersion de longueur d'onde (WDS) de marque SRS3000 7KP1025 voir (Fig. II.7).



Figure II.5 : Echantillon préparé



Figure II.6 : Spectromètre SRS3000

Les résultats de l'analyse chimique du matériau sont indiqués sur le tableau II.1.

Tableau II.1 : Composition chimique du S355 JR

Teneur des éléments%										
C	S	Al	Si	P	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Mo
0,188	0,003	0,0273	0,2314	0,0051	0,00327	0,1571	1,053	0,0548	0,0575	0,0297

II.2.2 Mesure de rugosité

Les mesures des rugosités ont été effectuées par un rugosimètre modèle Mitutoyo SurfTest SJ-210 indiqué sur la **figure II.7** Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'étude de la variation de l'état de surface.



Figure II.7. Rugosimètre Mitutoyo SJ-210

Les résultats de mesure des valeurs de rugosité sur l'échantillon réparée sont représentés sur le tableau 2.

Tableau II.2 : les valeurs mesurées de Ra

Rugosité Ra				
Mesure	1	2	3	Ra _{moy}
Ra (µm)	0,049	0,047	0,054	0.050

II.2.3 Caractéristiques mécaniques

II.2.3.1 Micro-dureté Vickers

La dureté superficielle a été mesurée avec un micro-duromètre de type Matsuzawa (MXT70) présenté sur la figure II.8 sous une charge de 200 grammes forces.

La dureté Vickers Hv est le rapport (1) entre la charge appliquée et la surface projetée de l’empreinte rémanente:

$$HV \approx 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

- F est la charge appliquée en N
- d est la moyenne des diagonales de l’empreinte d_1+d_2 en mm.

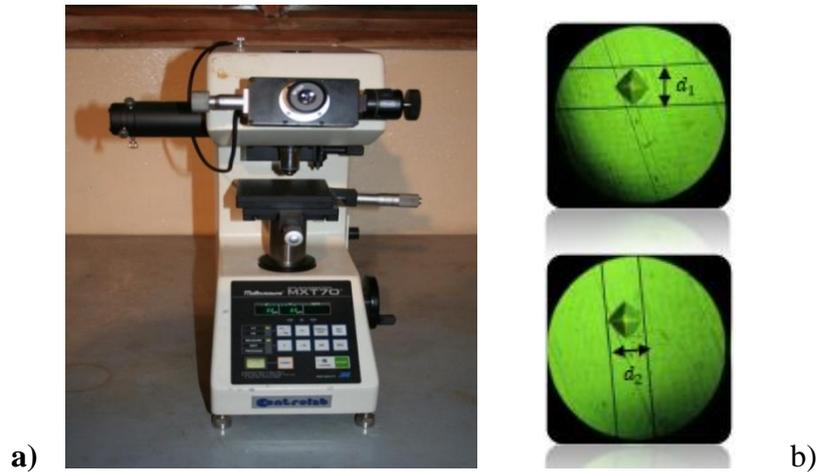


Figure II.8. a) Microduromètre Matsuzawa (MXT70), b) empreinte

Les valeurs relevées de la microdureté Hv sont enregistrées sur le tableau 3.

Tableau II. 3 : Les valeurs de la micro-dureté Hv.

Micro-Dureté vickers Hv				
Mesure	1	2	3	Hv _{mov}
Hv	239,5	232,3	240,2	237.3

II.2.3.2 Essai de traction

Les éprouvettes de l'essai de traction ont été usinées à partir des barreaux cylindriques (**fig. II.9**) de longueur $L=130\text{mm}$ et de diamètre $D=12\text{mm}$ sur un tour universel, ALMO type SN (**Fig II.10**) en montage mixte suffisamment rigide.

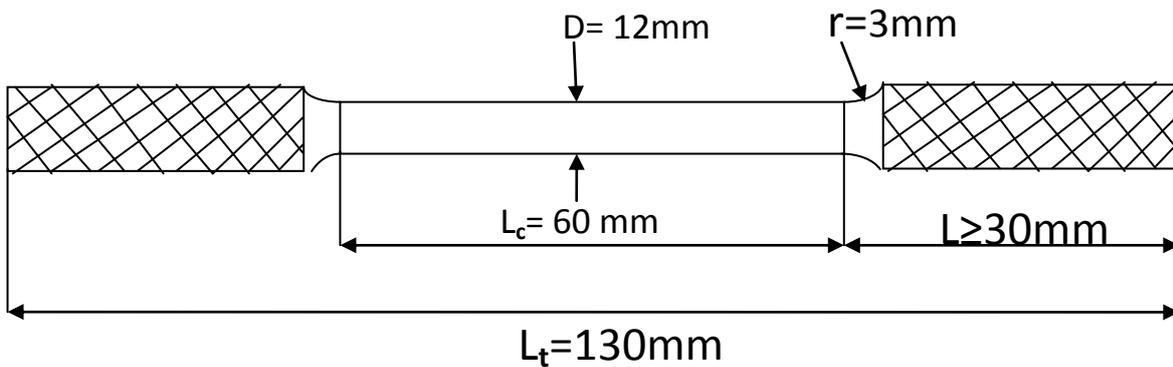


Figure II.9. Eprouvette de l'essai de traction.



Figure II.10. Tour universel, ALMO type SN

L'essai de traction a été effectué selon la norme ISO 6892-1 au laboratoire de l'URASM/CRTI sur machine de traction Type ZWICK 1476 de capacités 10KN voir (**fig. II. 11.a**). Et qui est constituée d'un bâti rigide qui comprend une traverse fixe sur laquelle est montée l'une des têtes de l'éprouvette. L'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile dont le mouvement est assuré par commande mécanique. La fixation des éprouvettes métalliques se fait avec des têtes d'amarrage interchangeables en fonction des dimensions et du type des éprouvettes (**Fig. II.11.b**). Les essais sont pilotés par micro-ordinateur. L'acquisition s'effectue à l'aide d'un logiciel Zwick Z1011 adapté pour PC. Et assure la collecte et l'analyse des courbes de traction. Les résultats sont enregistrés puis imprimés.

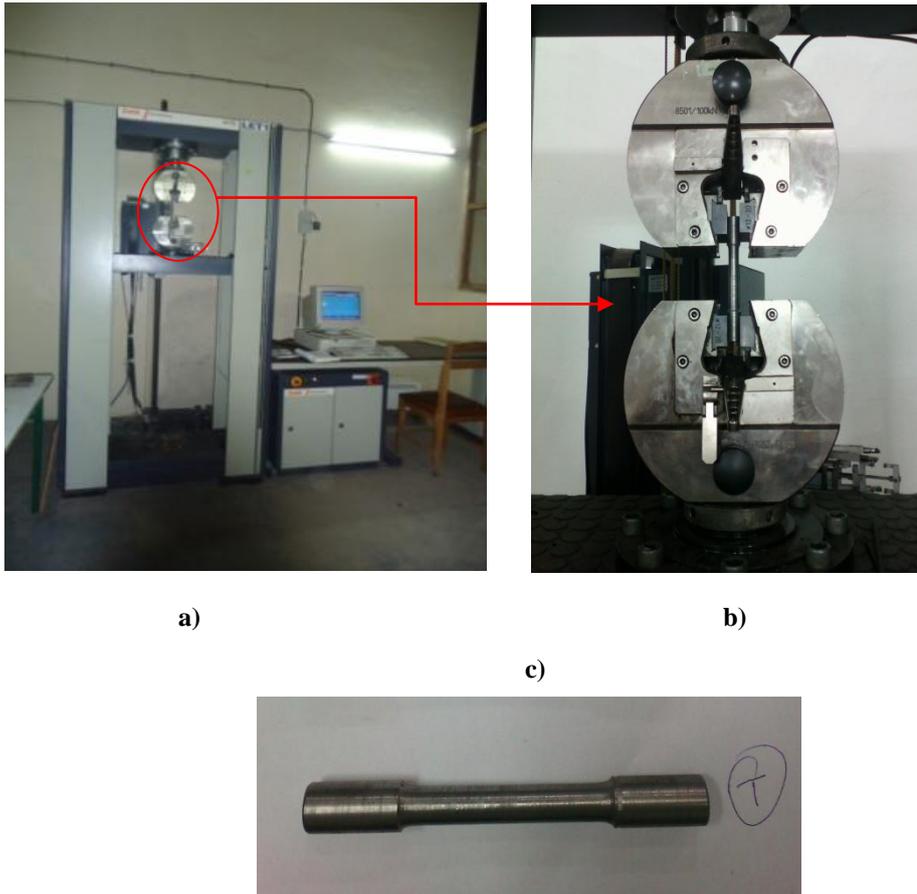


Figure II.11. a) Machine de traction ZWICK 1476 10KN, b) fixation des éprouvettes
c) Eprouvette témoin

Les résultats obtenus sur l'éprouvette témoin (T) (**fig. II.11.c**) sont indiqués sur le tableau 4 suivant :

Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques sur éprouvette témoin (T).

Caractéristiques mécaniques			
Module de Young	Rm (N/mm ²)	Re (N/mm ²)	A %
210 GPa	523,6	365,6	30,0

II.3 Méthodologie expérimentale

Pour rendre commode le déroulement des essais, une méthode des plans d'expériences a été introduite qui a pour rôle d'optimiser la disposition des essais. Cette technique nous permet de minimiser le nombre d'expériences tout en ayant le maximum de renseignements ce qui aide à gagner du temps et à économiser la matière première. Les plans d'expériences sont basés sur des règles mathématiques, Les essais expérimentaux ont été effectués selon les plans factoriels 2^2 composés de deux facteurs à deux niveaux (-1, +1) (**Fig. II.12**).

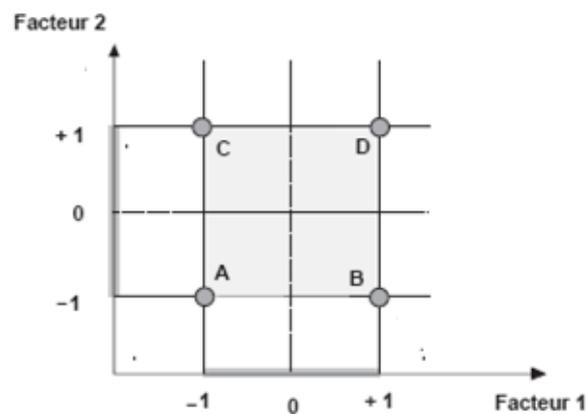


Figure II.12 Représentation du domaine d'étude par les sommets A, B, C, D

Le modèle mathématique postulé est un modèle polynomial du premier degré avec interactions présenté dans l'équation (1)

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 \quad (1)$$

- a_0 : coefficient constant du modèle ;
- a_1 : coefficient du facteur 1 ;
- a_2 : coefficient du facteur 2 ;
- a_{12} : coefficient du terme x_1x_2 ;
- Y : Réponse.

II.3.1 Opération de brunissage

Toute surface destinée pour finition par traitement mécanique en l'occurrence le brunissage doit être préparée préalablement afin d'obtenir les résultats souhaités. Six éprouvettes (**Fig. II.13**) ont été préparées sur tour universel, ALMO type SN (**Fig. II.10**), Selon la norme ISO 6892-1 :2016.



Figure II.13 : Six éprouvettes usinées sur le tour

Une fois les surfaces des éprouvettes préparées, on procède au traitement par brunissage sur un tour parallèle 1A616 (**Fig. II.14**). Dans un montage suffisamment rigide les éprouvettes sont exécutées en utilisant un dispositif préalablement étalonné (**fig. II.15.a**). Il peut être facilement monté sur un tour universel. La partie active est une bille en diamant artificiel de diamètre $D=3\text{mm}$ (**fig. II.15.b**).

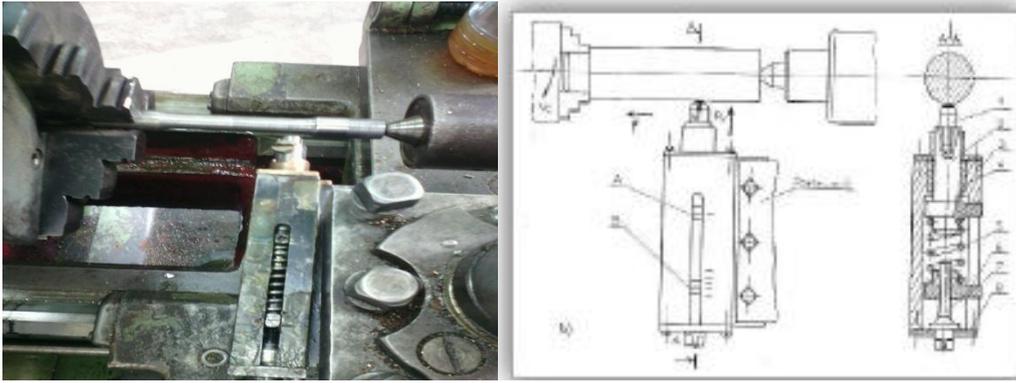
La réalisation du traitement par brunissage est analogue à une opération de chariotage, toute fois la déformation plastique superficielle (*DPS*) est assurée par un effort de formage exercé par l'outil sur la pièce animée d'un mouvement de rotation. Le mouvement d'avance étant attribué à l'outil.



Gamme des avances

1	2	3	4	
0.037	0.045	0.054	0.065	I
0.074	0.091	0.11	0.124	II
0.148	0.18	0.22	0.28	III
0.295	0.36	0.44	0.52	IV

Figure II.14 : Tour parallèle 1A616



a)

b)

Figure II.15 : Brunissage a) Photo du montage sur tour, b) Schéma du dispositif

II.3.2 Conditions du brunissage

Le procédé s'est déroulé conformément aux plans d'expériences 2², le régime adopté est en fonction du matériau et des caractéristiques de la machine outil (**tableau II.5**).

Tableau II.5 : Facteurs codés en brunissage

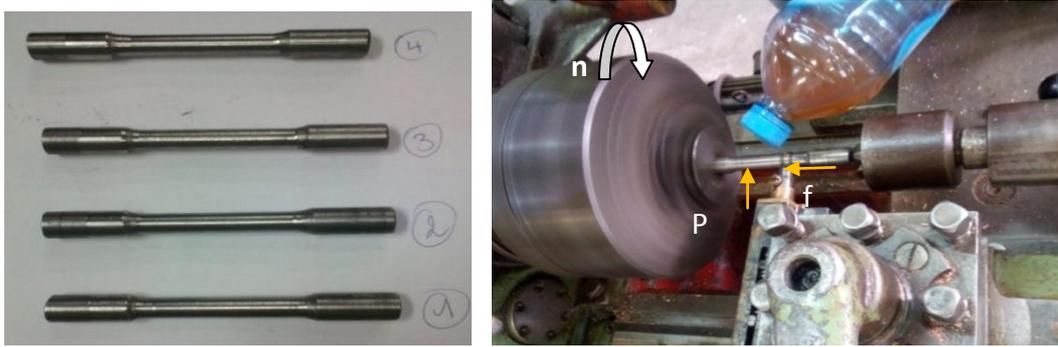
Facteurs codés	Paramètres	Niveaux	
		-1	+1
X ₁	Force de pression P (Kgf)	10	20
X ₂	Nombre de passes (i)	3	5

L'opération a été réalisée selon les régimes indiqués sur le **tableau II.6** avec une fréquence de rotation de la pièce "n=560 tr/mn" et une avance "f= 0.054 mm/tr" sous une lubrification abondante au moyen d'une émulsion d'huile SAE20 [30].

Tableau II.6 : Matrice d'expérience

N° d'essai	Paramètres d'entrée	
	P (kgf)	(i)
1	10	3
2	20	3
3	10	5
4	20	5

La déformation plastique des couches superficielles des éprouvettes (**Fig. II.16.a**) est le résultat de l'action de la bille avec une force de pression "P" combinée à une avance longitudinale "f" illustré sur la (**figure II.16.b**).



a)

b)

Figure II.16 : a) Eprouvettes après brunissage. b) Opération de brunissage

II.4 Conclusion

La méthodologie des plans factoriel 2^2 a été utilisée pour ce travail expérimental pour les buts suivants :

- L'évaluation des effets des paramètres du régime de traitement (effort "P" et le nombre de passes "i" et leurs influences sur les réponses étudiées : la rugosité Ra, la dureté superficielle Hv, la résistance élastique Re, résistance mécanique Rm, et l'allongement A% ;
- Aboutir à des modèles mathématiques de prédiction pour les différentes réponses.

Tous les équipements qui ont servis durant le travail expérimental ont été exposés ainsi que le plan expérimental utilisé pour l'opération de brunissage. Les étapes de préparation des épreuves, ainsi que la réalisation de l'opération de brunissage, ont été présentées.

Dans le chapitre suivant, les mesures de rugosité et de dureté de la couche superficielle, ainsi que les résultats de l'essai de traction vont être réalisées. Les résultats vont servir de réponses de sortie pour le modèle postulé.

Chapitre III: Résultats expérimentaux et discussion

III.1 Introduction

A partir des modèles obtenus précédemment, nous procédons à l'évaluation des paramètres mécaniques tel que Ra, Hv, Re, Rm, A% en fonction des régimes de traitement (effort de pression "P" et le nombre de passes " i").

III.2 Mesure de Rugosité de surface :

Les mesures de rugosité sont effectuées sur les éprouvettes avant et après traitement par brunissage, les résultats sont enregistrés sur les tableaux III.1 et III.2.

Tableau III.1 : les valeurs mesurées de Ra avant traitement de brunissage.

N° D'ESSAI	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra moy (µm)
Eprouvette N° T	6.95	6.52	6.78	6,75
ESSAI N° 1	5.48	5.62	5.40	5,50
ESSAI N° 2	5.63	5.4	5.57	5,53
ESSAI N° 3	7.87	7.61	7.59	7,69
ESSAI N° 4	9.6	9.70	9.54	9,61

Tableau III.2 : les valeurs mesurées de Ra après traitement de brunissage.

N° D'ESSAI	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Ra moy (µm)
ESSAI N° 1	1,41	1,43	1,50	1,45
ESSAI N° 2	1,95	1,94	1,83	1,91
ESSAI N° 3	2,09	2,14	2,27	2,17
ESSAI N° 4	2,67	2,55	2,42	2,55

Une comparaison des valeurs moyennes des rugosités Ra mesurées avant et après traitement par brunissage avec le résultat de calcul du taux de réduction sont indiquées sur le tableau III.3.

Tableau III.3 : tableau comparatif des **Ra moy** avant et après traitement par brunissage

N° D'ESSAI	Paramètres de régime		Ra moy (μm) avant brunissage	Ra moy (μm) après brunissage	Taux de réduction
	Effort P	Nombre de passes i			
Eprouvette N° T	/	/	6,75	/	/
ESSAI N° 1	P= 10 kgf	i = 3 passes	5,50	1,45	74%
ESSAI N° 2	P= 20 kgf	i = 3 passes	5,53	1,91	65%
ESSAI N° 3	P= 10 kgf	i = 5 passes	7,69	2,17	72%
ESSAI N° 4	P= 20 kgf	i = 5 passes	9,61	2,55	73%

III.2.1 Effet du brunissage sur les profils de rugosité Ra

L'effet de brunissage sur l'état de surface Ra est bénéfique, on remarque quelque soit l'effort de pression "P" et le nombre de passe "i", une net amélioration de la rugosité sur tous les essais réalisés (fig III.1).

Quelque que soit l'effort P et pour un nombre de passes $i=3$, on observe pour l'essai N° 1 la avec un effort $P= 10$ kgf, la rugosité $Ra= 1.45 \mu\text{m}$ s'améliore, avec un taux de réduction de 74% par rapport à sa valeur usinée $Ra=5.50 \mu\text{m}$, pour l'essai N° 2 avec un effort $P=20$ kgf, le taux de réduction atteint 65% avec $Ra=1.91 \mu\text{m}$, .on constate une perte de la qualité de surface

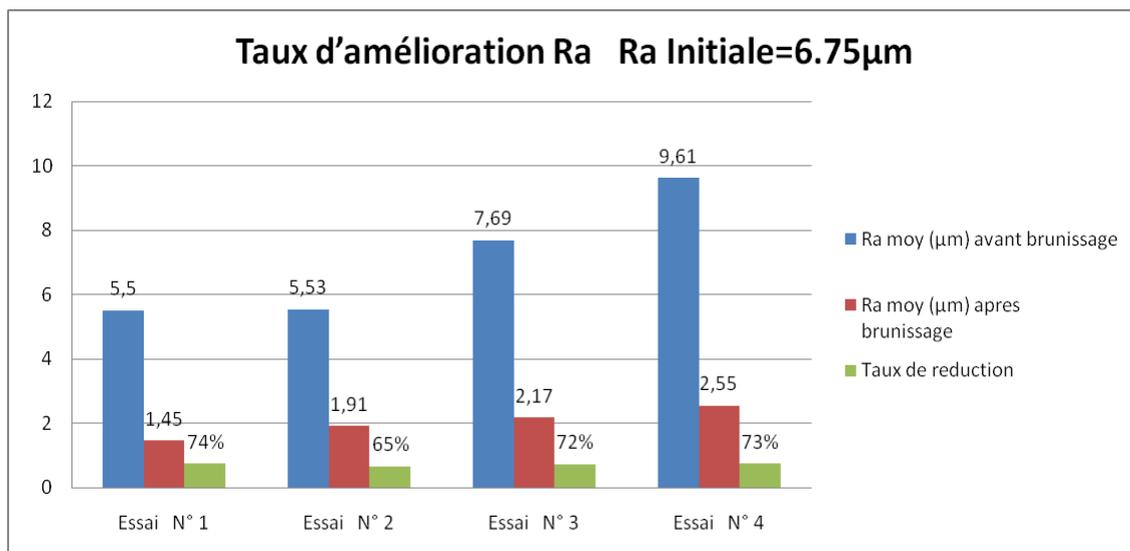
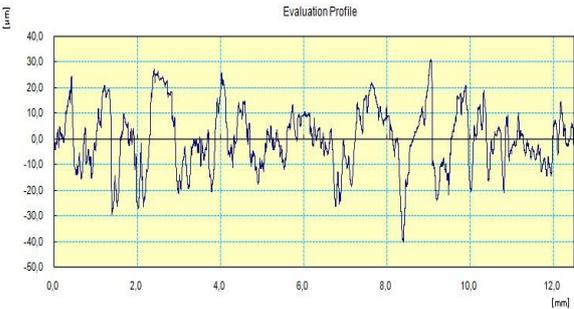
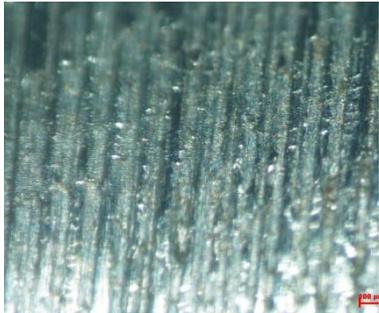
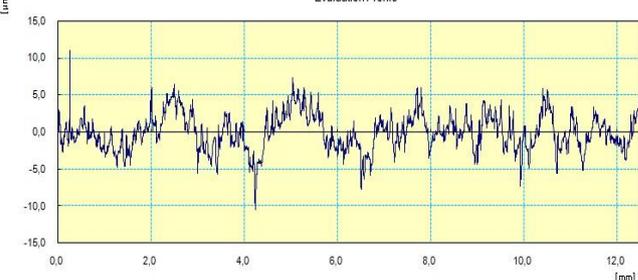


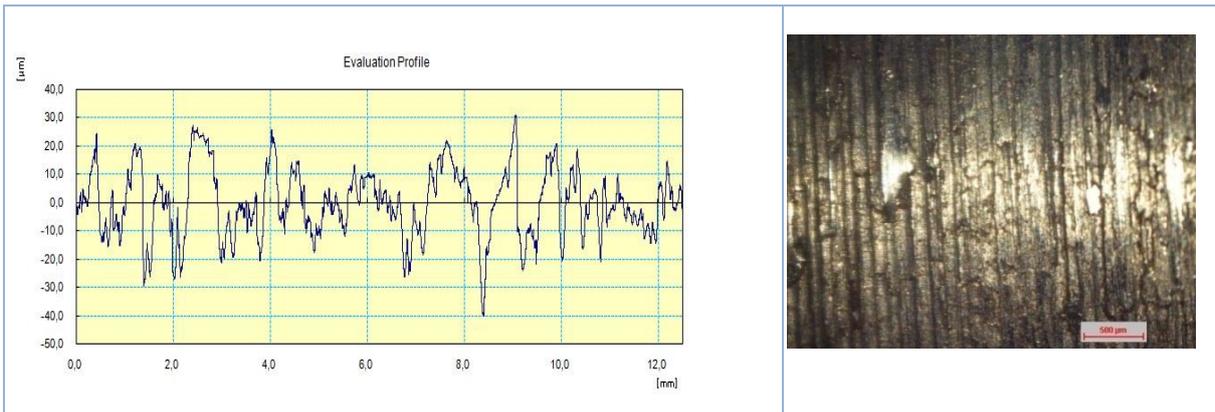
Figure III.1 Effet du brunissage sur la rugosité avec le taux de réduction.

III.2.2 Effet du brunissage sur les profils de rugosité :

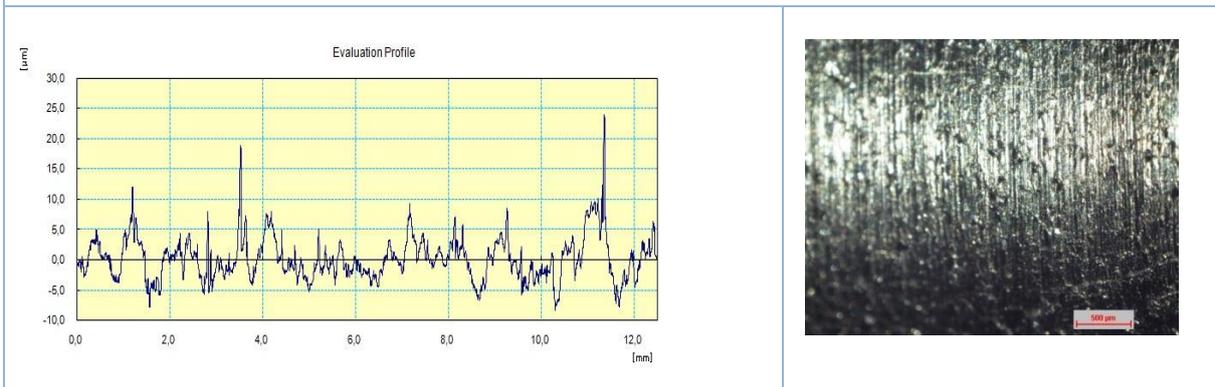
Le brunissage qui agit par déformation plastique superficielle, permet le nivellement des crêtes des rugosités et la pénétration de la pointe en diamant de faible rayon dans les creux donne un aspect ondulé du profil d'où l'améliore de la qualité de la surface. L'effet positif du procédé sur la rugosité est illustré sur la figure III.2, où on observe que pour :

L'essai N° 01, Après le traitement de brunissage (Fig III.2) montre une réduction des hauteurs des profils de rugosité où la hauteur max des pics atteint une valeur de $5.30\mu\text{m}$ (Fig III.2 a essai N°1) qui est inférieure à celle de la surface non traitée ($30.0\mu\text{m}$). L'aspect de la topographie de surface est marqué par des sillons dû au passage de l'outil de coupe, après traitement la topographie est plus régulière et uniforme.

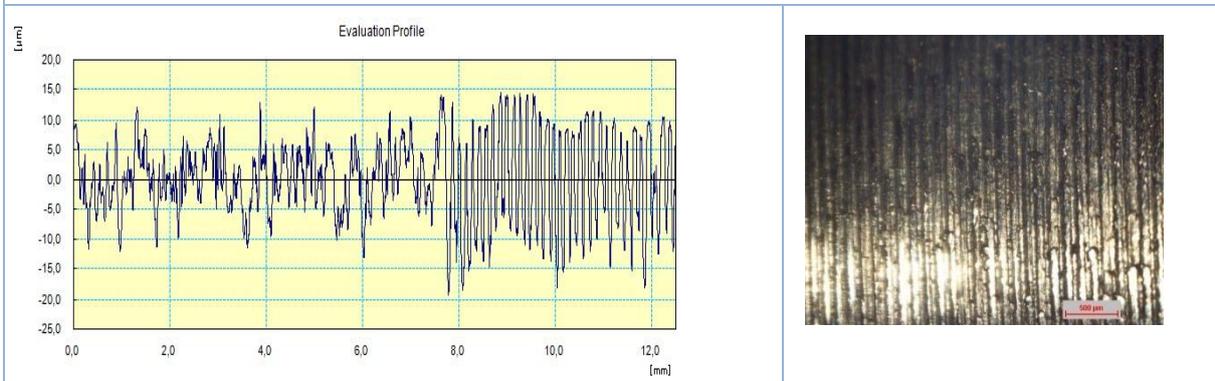
Profil de rugosité	Topographie de surface
	
<p>a) Essai N° 1 : Usinage avant brunissage à la bille, R_a moy=5.53 μm.</p>	
	
<p>b) Essai N° 1 : Après brunissage à la bille pour le regime1: $V=560\text{tr}/\text{min}$, $f= 0.054 \text{ mm}/\text{tr}$, $P=20 \text{ kgf}$, $r=3\text{mm}$, $i=3 \text{ passes}$, R_a moy=1,91 μm</p>	



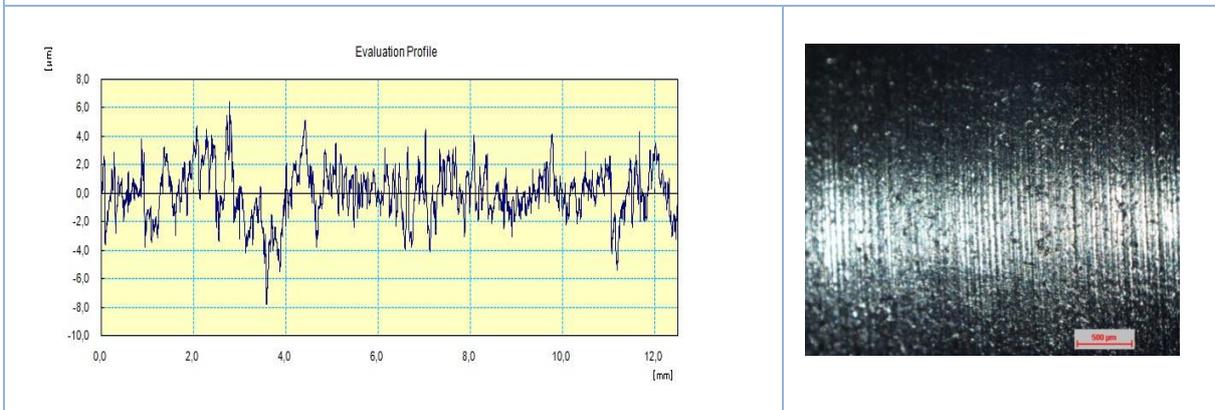
a) Essai N° 2 : Usinage avant brunissage à la bille. R_a moy=9.61 µm



b) Essai N° 2:Après brunissage à la bille regime2: $V=560\text{tr/min}$, $f= 0.054 \text{ mm/tr}$, $P=20 \text{ kgf}$, $r=3\text{mm}$, $i=5$ passes. R_a moy=2,55 µm

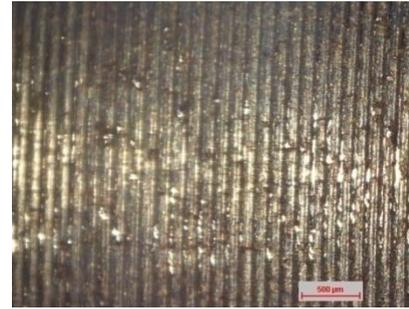
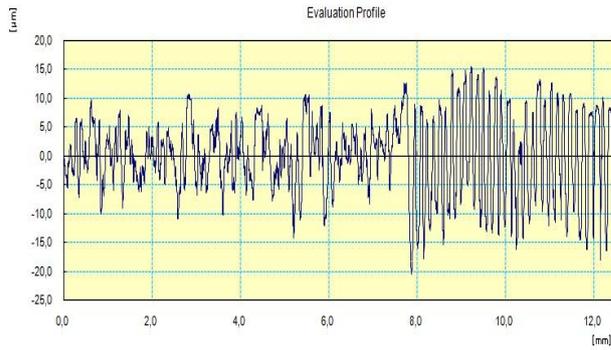


a) Essai N° 3 : Usinage avant brunissage à la bille R_a moy=5.50 µm.

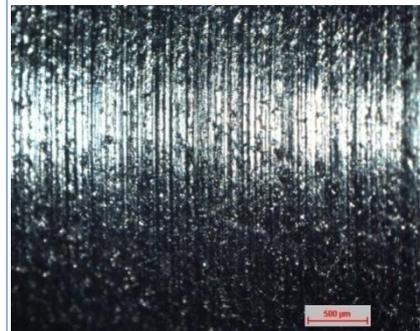
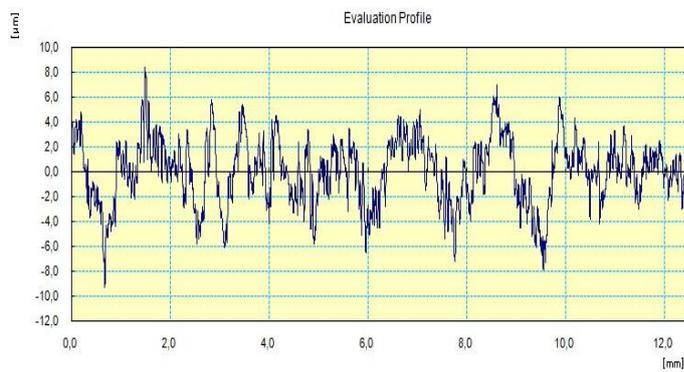


b) Essai N° 3 Après brunissage à la bille pour le regime3: $V=560\text{tr/min}$, $f= 0.054 \text{ mm/tr}$, $P=10 \text{ kgf}$, $r=3\text{mm}$,

$i=3$ passes. Ra moy=1,45 μm



a) Essai N° 4 : Usinage avant brunissage à la bille Ra moy=7,69 μm



b) Essai N° 4 : Après brunissage à la bille pour regime4: $V=560\text{tr}/\text{min}$, $f=0.054\text{ mm}/\text{tr}$, $P=10\text{ kgf}$, $r=3\text{ mm}$, $i=5$ passe. Ra moy=2,17 μm

Figure III.2. Profil de surface de l'acier S355JR :
a) état d'usinage : b) état de brunissage à la bille.

III.3 Mesure de Micro-Dureté des couches superficielles :

Le brunissage améliore la dureté des couches superficielles du matériau. Des mesures de micro-dureté sous une charge appliquée de 200gf, sur les éprouvettes avant traitement par brunissage et après traitement sont mentionnées sur le tableau III.4. et le tableau III.5.

Tableau III.4 : les valeurs micro-dureté mesurées Hv avant traitement de brunissage.

N° D'ESSAI	Hv 1	Hv 2	Hv 3	Hv moy
Eprouvette N° T	239,5	232,3	240,2	237,3
ESSAI N° 1	241,3	217,9	220,6	226,6
ESSAI N° 2	205,5	216,9	213,2	211,9
ESSAI N° 3	240,7	235,9	242,5	239,7
ESSAI N° 4	243,8	230,0	214,3	229,4

Tableau III.5 : les valeurs de micro-dureté mesurées Hv après traitement de brunissage.

N° D'ESSAI	Hv 1	Hv 2	Hv 3	Hv moy
ESSAI N° 1	302,7	312,5	336,4	317,2
ESSAI N° 2	293,4	304,4	324,6	307,5
ESSAI N° 3	319,8	316,1	326,5	318,0
ESSAI N° 4	291,0	295,1	289,3	291,8

Une comparaison des valeurs moyennes micro-dureté Hv mesurées avant et après traitement par brunissage avec le résultat de calcul du taux de d'amélioration sont indiquées sur le tableau III.6.

Tableau III.6 : Tableau comparatif de Hv moy avant et après traitement de brunissage

N° D'ESSAI	Paramètres de régime		Hv moy avant brunissage	Hv moy après brunissage	Taux d'amélioration
	Effort P	Nombre de passes i			
Eprouvette N° T	/	/	237,3	/	/
ESSAI N° 1	P= 10 kgf	i = 3 passes	226,6	317,2	40%
ESSAI N° 2	P= 20 kgf	i = 3 passes	211,9	307,5	45%
ESSAI N° 3	P= 10 kgf	i = 5 passes	239,7	318,0	33%
ESSAI N° 4	P= 20 kgf	i = 5 passes	229,4	291,8	27%

III.3.1 Effet du brunissage sur la Micro-Dureté Hv

L'influence des paramètres des régimes de traitement est remarquable avec un taux d'amélioration de micro-dureté par l'histogramme ci-dessous (figure III.3).

Les couches superficielles résultantes du tournage ont été caractérisées par une micro-dureté entre 211,9 HV et 239,7, après le traitement superficiel par brunissage il est constaté une amélioration de la dureté superficielle avec un taux d'amélioration entre 27% à 45%. Cette augmentation est due au fait que le brunissage crée par la déformation plastique de nouvelles sources de dislocation qui s'activent au niveau des couches superficielles.

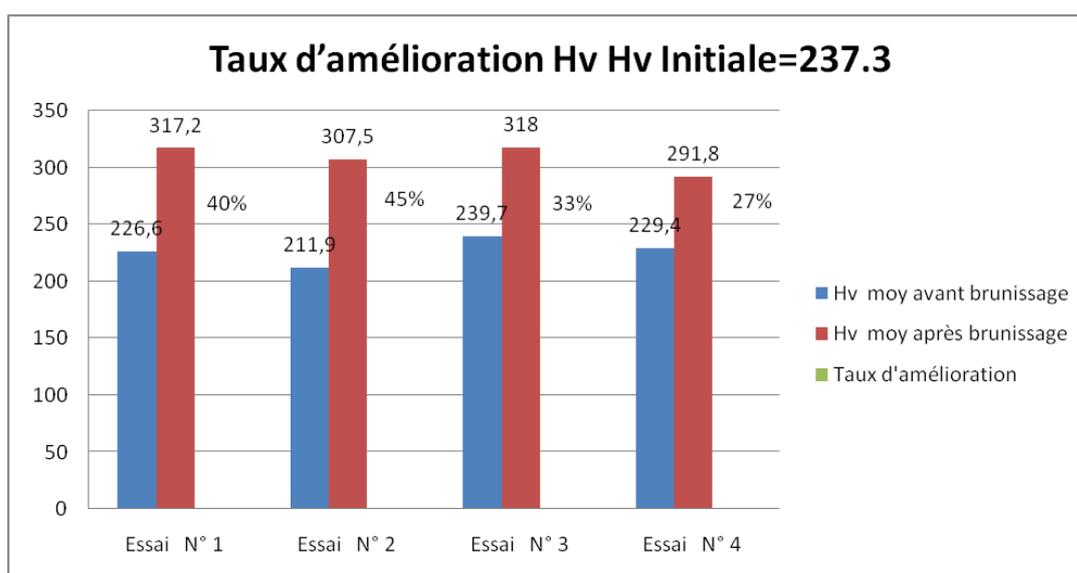


Figure III.3. Effet du brunissage sur la Micro-dureté avec le taux d'amélioration.

III.4 Essai de traction sur les éprouvettes traitées par brunissage :

Les résultats obtenus par l'essai de traction sur les éprouvettes traitées par brunissage sont présentés sur le tableau III.7 avec la variation du régime de traitement par brunissage:

Tableau III.7 : caractéristiques mécaniques en fonction des régimes de brunissage.

N° D'ESSAI	Paramètres de régime		Caractéristiques mécaniques		
	Effort P	Nombre de passes i	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%
Eprouvette N° T	/	/	365,6	523,6	30.0
ESSAI N° 1	P= 10 kgf	i = 3 passes	339,6	545,7	26.3
ESSAI N° 2	P= 20 kgf	i = 3 passes	334,2	544,2	27.5
ESSAI N° 3	P= 10 kgf	i = 5 passes	329,4	535,8	25.0
ESSAI N° 4	P= 20 kgf	i = 5 passes	322,2	531,6	26.6

Les résultats obtenus par l'essai de traction sont représenté sur la figure III.4

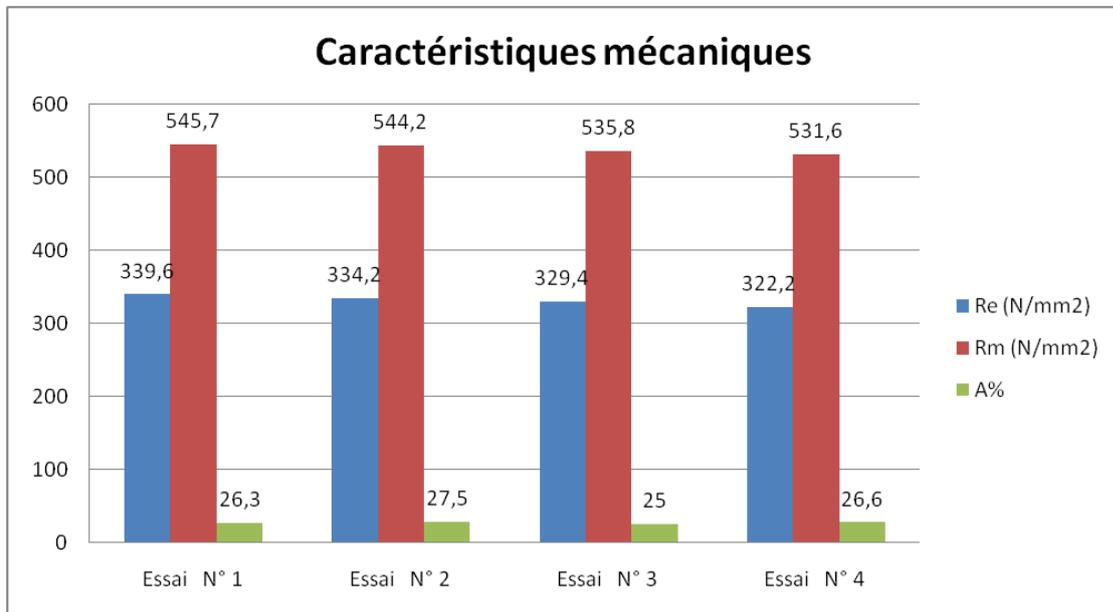


Figure III.4. Effet du brunissage sur les caractéristiques mécaniques en fonction des régimes de brunissage.

Une comparaison de résultats d'essais de traction avant le traitement de brunissage et après sont indiquées dans le tableau III.8 :

Tableau III.8 : Tableau des taux d'améliorations ou de réductions des propriétés mécaniques après brunissage

N° D'ESSAI	Re (N/mm ²)	Taux de réduction	Rm (N/mm ²)	Taux d'amélioration	A%	Taux de réduction %
Eprouvette N° T	365,6	/	523,6	/	30.0	/
ESSAI N° 1	339,6	7,11	545,7	4,22	26.3	12,3
ESSAI N° 2	334,2	8,59	544,2	3,93	27.5	8,3
ESSAI N° 3	329,4	9,90	535,8	2,33	25.0	16,7
ESSAI N° 4	322,2	11,87	531,6	1,53	26.6	11,3

III.4.1 Effet du brunissage sur Caractéristiques mécaniques Re, Rm et A%

III.4.1.1 Effet du brunissage sur la résistance élastique Re

L'effet des paramètres du régime de traitement sur la composante Re est illustré sur la figure III.5 On peut remarqué une diminution progressive de Re relative à la variation de la charge et le nombre de passes qui atteint une valeur de 322,2 N/mm² par rapport à Re initiale qui équivaut à 365,6 N/mm² avec un taux de réduction de 11.87 % pour un effort de pression égale à 20 Kgf et un nombre de passes i=5.Ce qui peut être expliquer par le phénomène d'érouissage des couches superficielles des éprouvettes ainsi que l'augmentation de la dureté superficielle engendrant une diminution de la résistance élastique Re.

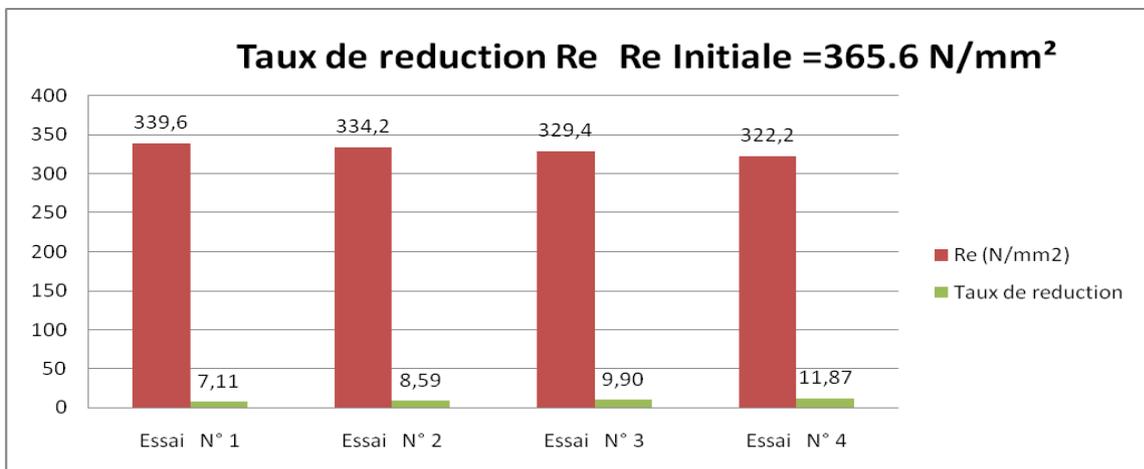


Figure III.5. Taux de réduction de Re après brunissage.

III.4.1.2 Effet du brunissage sur la résistance mécanique Rm

L'influence du régime sur le paramètre Rm est indiquée sur la figure III.6 On peut observer une augmentation de la résistance mécanique Rm en comparaison avec la valeur initiale $R_{mi} = 523$ sous l'effet de l'écrouissage des couches superficielles. Par ailleurs si on fixe le nombre de passe et on varie la charge on remarque une réduction plus au moins significative du paramètre Rm d'où la variation des paramètres du régime de traitement (P, i) ont peu d'influence sur Rm.

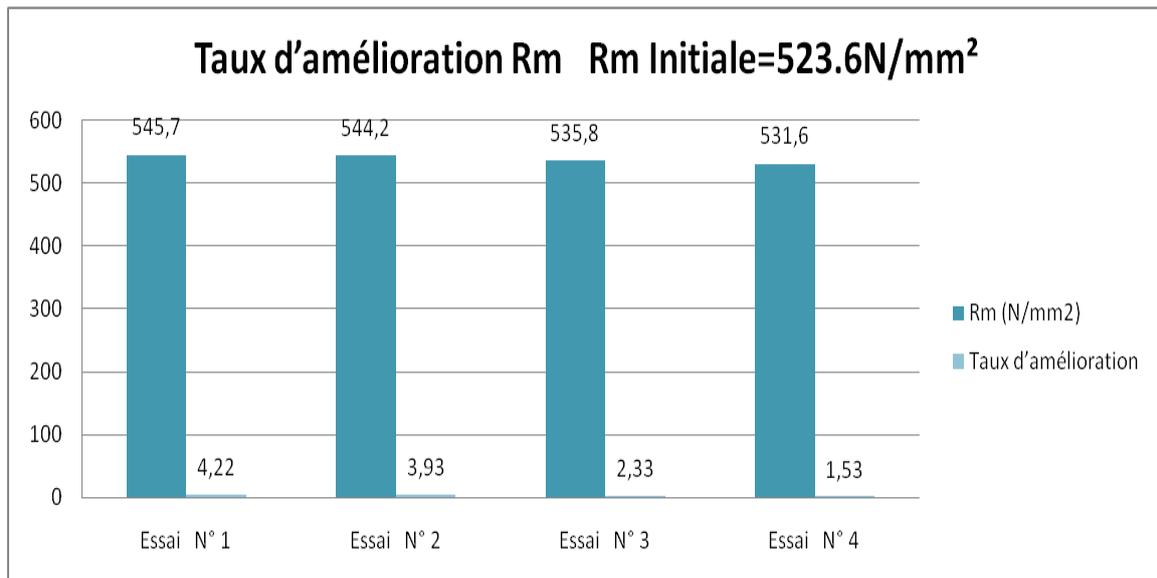


Figure III.6 Taux de d'amélioration de Rm après brunissage

III.4.1.3 Effet du brunissage sur l'allongement A%

L'effet des paramètres du régime de traitement sur l'allongement A % est illustré sur la figure (III.7) On peut remarquer une diminution de A % pour les quatre essais par rapport à allongement initiale qui équivaut à 30%. En observant l'effet de la charge et le nombre de passe on constate une augmentation plus au moins significative de l'allongement pour une charge $P=20\text{Kgf}$ et un nombre de passe $i=3$ et 5 pouvant atteindre une valeur de 27.5% avec un taux de réduction de 8.3%. Ceci peut être expliqué Par le fait de dilatation des grains sous l'effet de la forte charge.

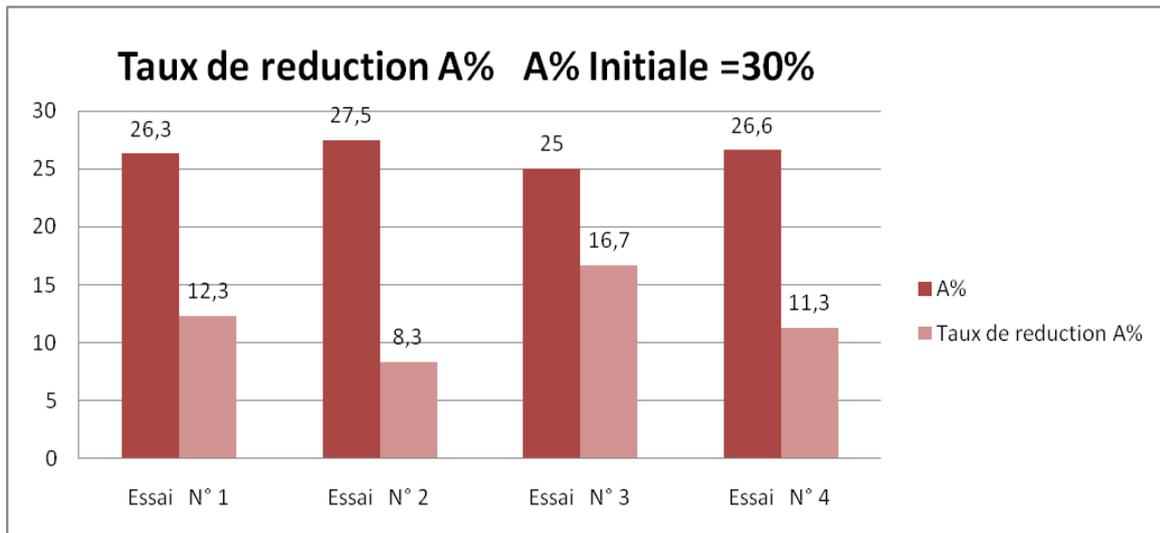


Figure III.7. Taux de réduction de A% après brunissage.

III.5 Conclusion

Les conclusions qui peuvent être tirées de ce de chapitre se résument en ce qui suit :

1. L'effet de brunissage sur l'état de surface Ra est bénéfique quelque soit l'effort p et le nombre de passes i.
2. Le brunissage qui agit par déformation plastique superficielle, permet le nivellement des crêtes des rugosités donne un aspect ondulé du profil d'où l'améliore de la qualité de la surface. .
3. On peut remarquer par le phénomène d'écrouissage des couches superficielles des éprouvettes traitées par brunissage et sont influence sur les caractéristiques mécaniques présentées dans les points suivant :
 - Une diminution progressive de Re relative à la variation de la charge de pression P et le nombre de passes i,
 - Une augmentation de la résistance mécanique Rm en comparaison avec la valeur initiale.
 - Une diminution de l'allongement A% par apport à l'allongement initiale e fonction de l'effort et le nombre de passe.

Chapitre IV : Plan D'expérience Et Modélisation

IV.I Plan D'expérience

Le procédé s'est déroulé conformément aux plans d'expériences 2², le régime adopté est en fonction du matériau et des caractéristiques de la machine outil (**tableau IV.I**).

Tableau IV.1 : Facteurs codés

Facteurs Codés	Paramètres	Niveaux	
		-1	+1
X ₁	Force de pression P (Kgf)	10	20
X ₂	Nombre de passes (i)	3	5

Le modèle de planification d'expérience adopté prend en compte deux niveaux de variation et deux facteurs selon la matrice suivante :

Tableau IV.2 : Matrice des essais

N° D'ESSAI	Paramètres de régime	
	Facteur 1 Effort P	Facteur 2 Nombre de passes i
ESSAI N° 1	P= 10 kgf	i = 3 passes
ESSAI N° 2	P= 20 kgf	i = 3 passes
ESSAI N° 3	P= 10 kgf	i = 5 passes
ESSAI N° 4	P= 20 kgf	i = 5 passes

Les réponses mesurées après les essais de traction « Ra », « Hv », «Re », «Rm » et «A% » sont consignées sur le tableau IV.3 :

Tableau IV.3 : Les réponses mesurées

N° D'ESSAI	Paramètres de régime			Ra moy (µm) après brunissage	Hv moy après brunissage	Caractéristiques mécaniques		
	X1 Effort P	X2 Nombre de passes i	X1X2 Interaction P, i			Re (N/mm2)	Rm (N/mm2)	A%
ESSAI N° 1	-1	-1	+1	1,45	317,2	339,6	545,7	26,3
ESSAI N° 2	+1	-1	-1	1,91	307,5	334,2	544,2	27,5
ESSAI N° 3	-1	+1	-1	2,17	318	329,4	535,8	25,0
ESSAI N° 4	+1	+1	+1	2,55	291,8	322,2	531,6	26,6

IV.2 Modèle des plans factoriels

Le modèle postulé des plans factoriels complets 2^2 est :

$$Y = [a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2]$$

- Y est la réponse,
- x1 représente le niveau du facteur 1
- x2 représente le niveau du facteur 2
- x1x2 est le produit des niveaux des facteurs 1 et 2

Ou,

- a_0 est le coefficient constant du modèle ; $a_0=1/4 [y_1 + y_2 + y_3 + y_4]$
- a_1 est le coefficient du facteur 1 ; $a_1=1/4 [-y_1 + y_2 - y_3 + y_4]$
- a_2 est le coefficient du facteur 2 ; $a_2=1/4 [-y_1 - y_2 + y_3 + y_4]$
- a_{12} est le coefficient du terme x_1x_2 . $a_{12}=1/4[+y_1 - y_2 - y_3 + y_4]$

Après calcul des coefficients polynôme pour chaque réponse, les valeurs sont consignés sur le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Valeurs des coefficients polynôme

Coef du polynôme	Ra	Hv	Caractéristiques mécaniques		
			Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%
a_0	2,020	308,625	331,35	539,325	26,350
a_1	0,210	-8,975	-3,150	-1,425	0,700
a_2	0,340	-3,725	-5,625	-5,625	-0,550
a_{12}	-0,020	-4,125	-0,450	-0,675	0,100

IV.3 Les réponses avec les facteurs codés

On introduit les valeurs des coefficients polynôme dans les expressions du modèle pour chaque paramètre, on trouve les réponses avec les facteurs codés suivantes :

1/ Réponse relative à la Rugosité de « Ra »:

$$Ra = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2$$

$$Ra = 2.020 + 0.210X_1 + 0.340X_2 - 0.02 X_1X_2$$

2/ Réponse relative à la dureté superficielle de « Hv »:

$$Hv = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2$$

$$Hv = 308.625 - 8.975 X_1 - 3.725X_2 - 4.125 X_1X_2$$

3/ Réponse relative à la résistance élastique «Re »:

$$Re = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2$$

$$Re = 331.35 - 3.150 X_1 - 5.625 X_2 - 0.450 X_1 X_2$$

4/ Réponse relative à la résistance de rupture «Rm »:

$$Rm = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2$$

$$Rm = 539.325 - 1.425 X_1 - 5.625 X_2 - 0.675 X_1 X_2$$

5/ Réponse relative à l'allongement «A% »:

$$A\% = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_{12} X_1 X_2$$

$$A\% = 26.350 + 0.700 X_1 - 0.550 X_2 + 0.100 X_1 X_2$$

IV.4 Les réponses avec les unités légales

Après développement des équations du modèle et on remplaçant les valeurs des équations de (1), (2) et (3) dans les équations relatives, on trouve les modèles mathématiques de notre expérience pour chaque paramètre comme suit :

$$X_1 = \frac{P-P_0}{Pas_p}, X_2 = \frac{i-i_0}{Pas_i} \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{P_{max} + P_{min}}{2}, Pas_p = \frac{P_{max} - P_{min}}{2} \quad (2)$$

$$i_0 = \frac{i_{max} + i_{min}}{2}, Pas_i = \frac{i_{max} - i_{min}}{2} \quad (3)$$

La Rugosité « Ra »:

$$Ra = -0,210 + 0,058 P + 0,400 i - 0,004 P i$$

la dureté superficielle « Hv »:

$$Hv = 300,95 + 1,505 P + 8,65 i - 0,825 P i$$

la résistance élastique «Re »:

$$Re = 357,6 - 0,270 P - 4,2 i - 0,09 P i$$

la résistance de rupture «Rm »:

$$Rm = 558,0 + 0,255 P - 3,6 i - 0,135 P i$$

Allongement «A% »:

$$A\% = 27,65 + 0,060 P - 0,850 i - 0,020 P i$$

IV.5 Validation du modèle

Un fichier Excel a été élaboré pour la Modélisation de l'expérience (fig IV.1)

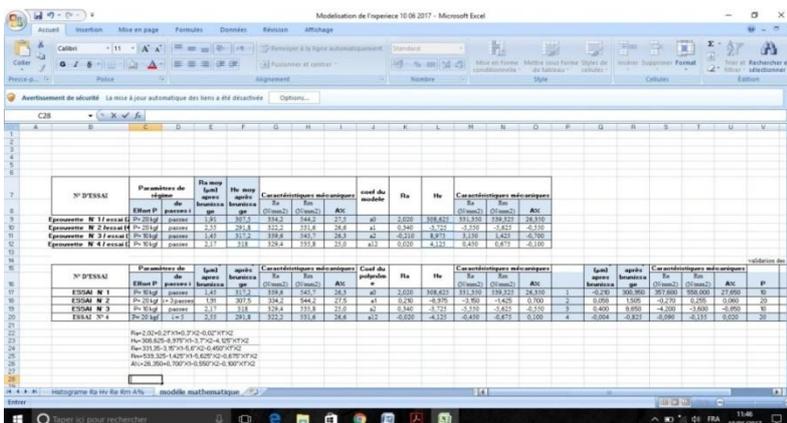
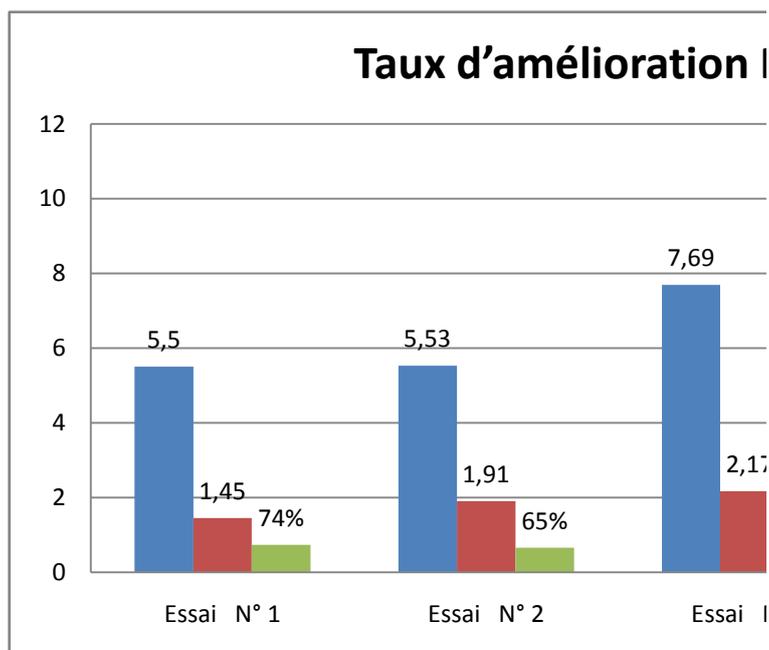


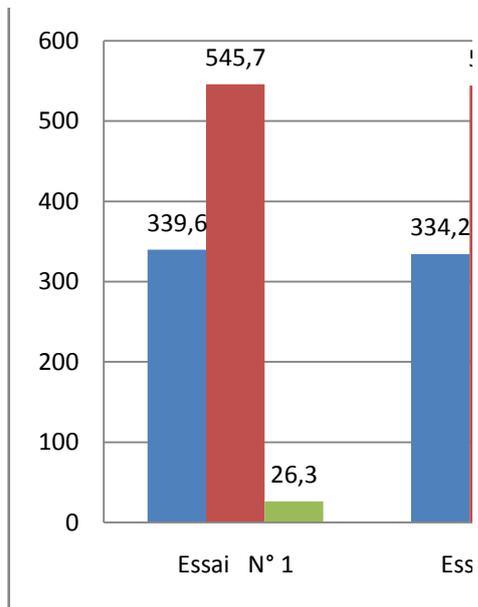
Figure V.1 : Fichier Excel de la Modélisation de l'expérience.

	Eprouvette N° 1 / essai (2)
	Eprouvette N° 2 /essai (4)
	Eprouvette N° 3 / essai (1)
	Eprouvette N° 4 / essai (3)
Rugosité	Ra moy (μm) avant brunissage
Eprouvette N° T	6,75
Essai N° 1	5,5
Essai N° 2	5,53
Essai N° 3	7,69
Essai N° 4	9,61



N° D'ESSAI	Paramètre
	Effort P
Eprouvette N° T	/
Essai N° 1	P= 10 kgf
Essai N° 2	P= 20 kgf
Essai N° 3	P= 10 kgf
Essai N° 4	P= 20 kgf

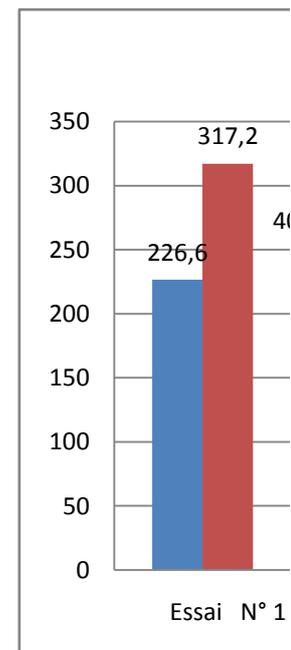
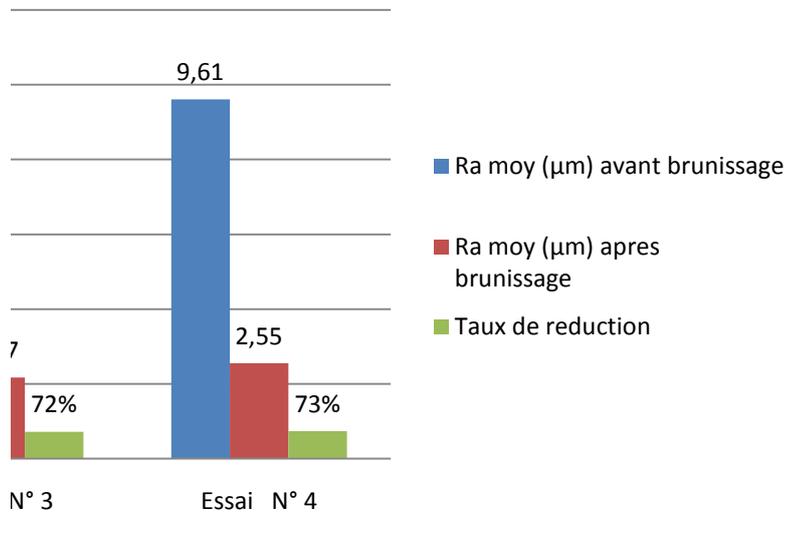
Car



Ra moy (μm) apres brunissage	Taux de reduction
1,45	74%
1,91	65%
2,17	72%
2,55	73%

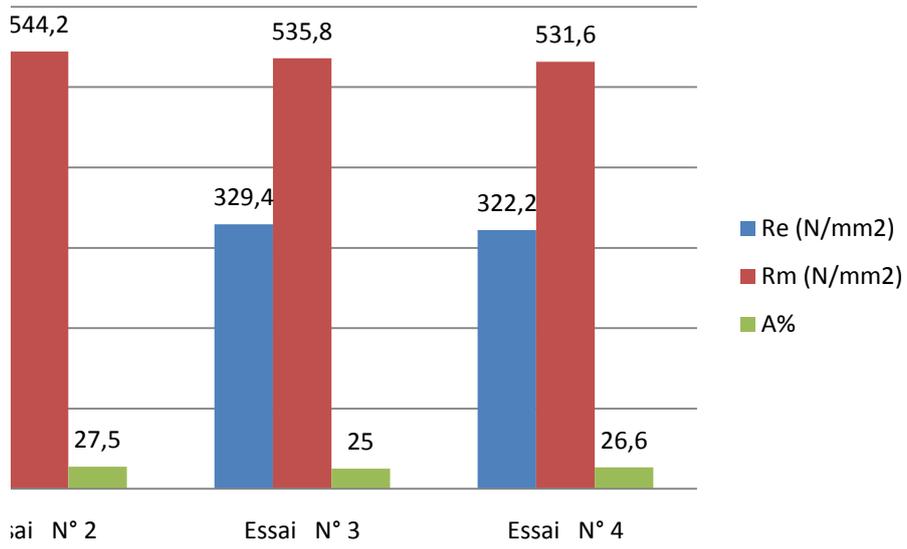
Microdureté
Eprouvette N° T
Essai N° 1
Essai N° 2
Essai N° 3
Essai N° 4

Ra Ra Initiale=6.75 μm



res de régime	Caractéristiques mécaniques		
	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%
/	365,6	523,6	30
i = 3 passes	339,6	545,7	26,3
i = 3 passes	334,2	544,2	27,5
i = 5 passes	329,4	535,8	25
i = 5 passes	322,2	531,6	26,6

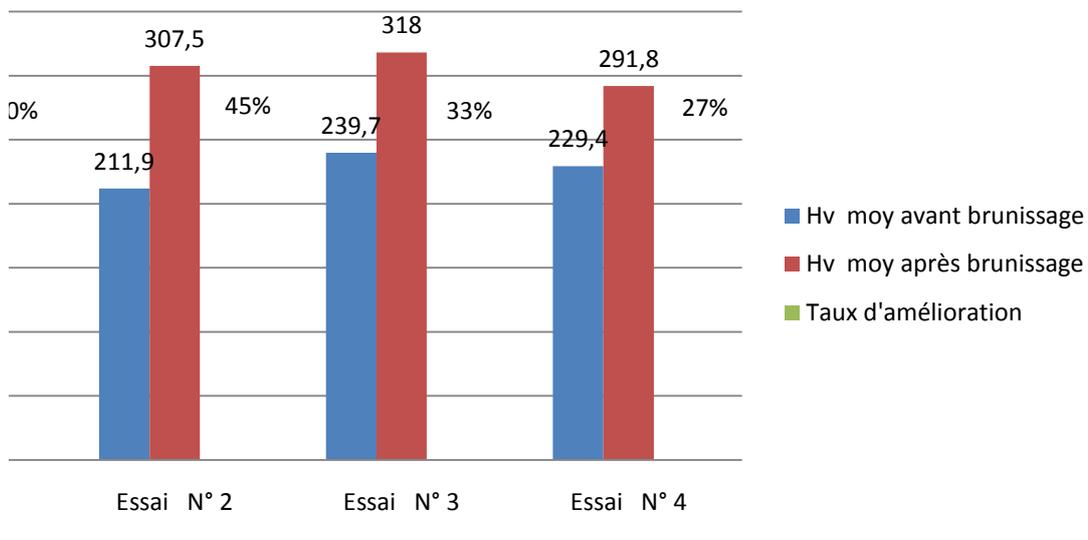
Caractéristiques mécaniques



Micro-durete

Hv moy avant brunissage	Paramètres de régime		Hv moy après brunissage	Taux d'amélioration
	Effort P	Nombre de passes i		
237,3	/	/		
226,6	P= 10 kgf	i = 3 passes	317,2	40%
211,9	P= 20 kgf	i = 3 passes	307,5	45%
239,7	P= 10 kgf	i = 5 passes	318	33%
229,4	P= 20 kgf	i = 5 passes	291,8	27%

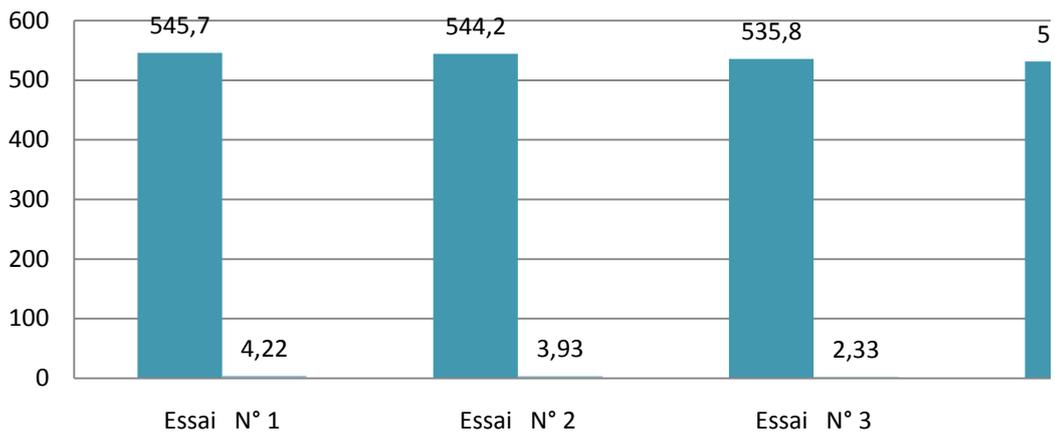
Taux d'amélioration Hv Hv Initiale=237.3



Taux d'amélioration

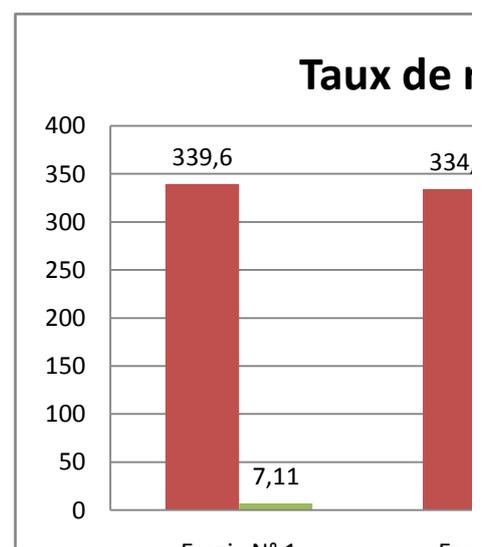
Rm (N/mm2)	N° D'ESSAI	Re (N/mm2)	Taux de reduction
	Essai N° T	365,6	/
	Essai N° 1	339,6	7,11
	Essai N° 2	334,2	8,59
	Essai N° 3	329,4	9,90
	Essai N° 4	322,2	11,87

Taux d'amélioration Rm Rm Initiale=50

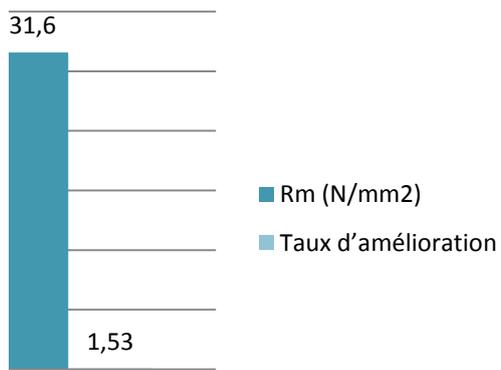


5,5	1,45	73,64
5,53	1,91	65,46
7,69	2,17	71,78
9,61	2,55	73,47

Rm (N/mm2)	Taux d'amélioration	A%	Taux de reduction A%
523,6	/	30,0	/
545,7	4,22	26,3	12,3
544,2	3,93	27,5	8,3
535,8	2,33	25	16,7
531,6	1,53	26,6	11,3



23.6N/mm²

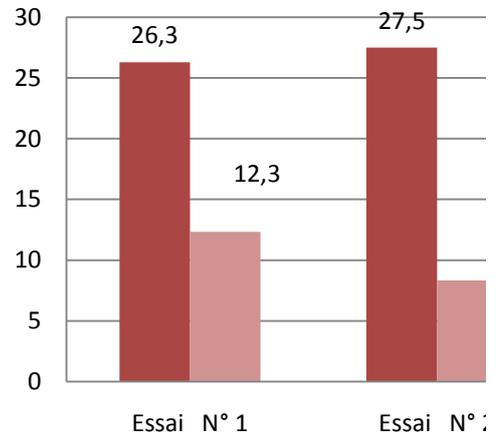


Essai N° 4

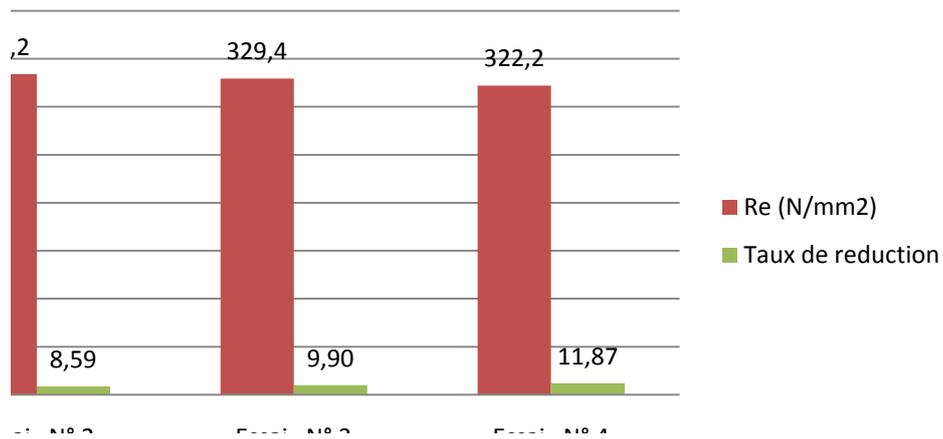
ESSAI N° 1

ESS

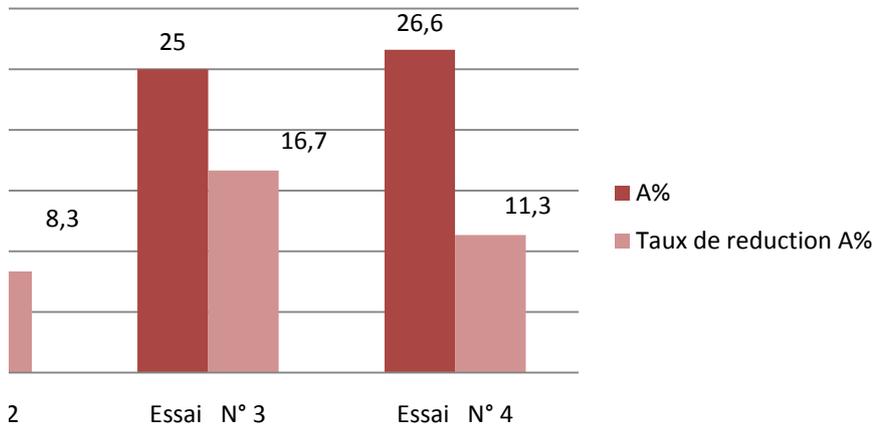
Taux de reduction A'



reduction Re Re Initiale =365.6 N/mm²



% A% Initiale =30%



CONCLUSION GENERALE

Dans les structures mécaniques, les surfaces des organes de machines sont les plus exposées aux attaques extérieures qui sont de natures diverses (frottement, usure, corrosion, fatigue,...), des sollicitations dynamiques (sollicitations de fatigue) qui occasionnent la rupture brutale des pièces en service. Dans la pratique, il a été constaté que la majorité des cas de rupture débute souvent avec un amorçage en surface

- ❖ Les travaux de cette thèse ont été orientés pour voir l'influence des régimes de brunissage sur les caractéristiques mécaniques la résistance élastique R_e , la résistance mécanique R_m et l'allongement $A\%$. Notre étude a été menée en s'appuyant sur une recherche bibliographique qui met en évidence, les propriétés mécaniques des métaux tel que la résistance élastique R_e et résistance mécanique R_m et un aperçu sur les essais mécaniques (essai de traction, dureté). une introduction sur la qualité des surfaces et la dégradation de la structure a été exposé ainsi qu'une présentation sur le phénomène d'écrouissage et les traitements mécaniques de surface.
- ❖ Les résultats obtenus dans ce travail reposent sur des essais expérimentaux qui ont été réalisés sur des échantillons en un acier S355 JR, traitées par le procédé de brunissage à la bille. Toutefois, l'effet de la déformation plastique dépend des propriétés du matériau. Par ailleurs, la méthodologie des plans d'expérience factorielle d'ordre 2^2 , a été suivie lors de la réalisation des essais, ce qui a permis d'observer l'influence des paramètres du régime de traitement par brunissage (P, i) sur les réponses étudiés ($R_a, H_v, R_e, R_m, A\%$). Ces plans peuvent constituer un outil d'envergure pour l'établissement des modèles mathématiques, permettant la prédiction des réponses et l'optimisation des régimes de traitement les plus adaptés avec un minimum d'essai.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L.Laouar, Traitement mécanique de surface par brunissage des aciers XC48 et XC18 – Optimisation et caractérisation, Thèse doctorat d'état ; Université de Annaba , 2007
- [2] L.SEDOV, mécanique des milieux continus, IZDATELVSTVO « Hayka » 1973, Traduction française, Editions Mir 1975.
- [3] L. KATCHANOV, Eléments de la théorie de la plasticité, traduction française, éditions Mir 1975.
- [4] G FRADE ; Métallographie essais mécaniques ; 1970.
- [5] J-P Baillon , J-M Dorlot, DES MATERIAUX, Presses Internationales polytechnique, Ecole polytechnique de Montréal , 2000.
- [6] O. Taâmallah, Effet des traitements mécaniques de surface (TMS) sur l'érouissage et la ténacité d'un acier, Thèse de Magister; Université de Annaba , 2012
- [7] H. Bückle la machine outil française, 206,125-147,1965.
- [8] A. Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge.77-79, 1995.
- [9] Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Nancy, Édito
- [10] O.CV.A Brsanti, voyage au coeur de l'acier. ns 1988.
- [11] ALEXANDRE N. OVCEYENKO, MAKSIMILIAN. M. GAJEK, VLADIMIR I. CEREBRYAKOV, Formation de l'état de surface des pièces par procédés technologiques, Politecnika OPOLOSKA, NAKLAD, Opole.2001.
- [12] Web www.wikipedia.org.
- [13] P.Lüdwik et R. Chen. Stahl und Eisen, 43, pp 999 et 1427, 1923.
- [14] Bourebia M. Laouar L. 2015. Influence des paramètres de traitement par brunissage sur la texture de la surface, IRevue, proceeding du 22ème Congrès Français de Mécanique, (Irevue, AFM), Lyon, France.

- [15] A.C.E.MENDER, La technique du galetage, métaux, déformation N°47, avril 1978.
- [16] Hamadache H., Laouar L & Chaoui K., 2006. Influence Des Traitements Mécaniques
De Surface sur La Rugosité, La Dureté et la Résistance a L'usure d'un Acier (RB40),
Revue des sciences et de la technologie Synthèse N° 15, 120-127.
- [17] M. Bourebia, Influence des procédés d'usinage sur les rugosités de surface et leurs répercussions sur un contact mécanique, Thèse de Magister; Université de Annaba , 2010
- [18] Tourab mohamed, et Bouchlaghem Abdelaziz, effets des paramètres du régime de galetage sur la rugosité et la dureté de surface des matériaux ferreux, Université Badji Mokhtar Annaba Département de Génie Mécanique
- [19] Cogsdill Tools produits Inc. outil de précision 2002 [www .cogsdill.com](http://www.cogsdill.com).
- [20] L. Laouar, H. Hamadache, S.Mekhilef, Influence du traitement mécanique par brunissage sur la tenue à l'usure de l'acier (RB40) produit à SIDER, revue des sciences et technologie "synthèse" n° 14, Université Badji Mokhtar Annaba 2005, pp.
- [21] H. Hamadache, L. Laouar, N.E. Zeghib, K. Chaoui, characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, journal of materials Technology 180-2006,130-136.
- [22] Brunissage.htm; Traitement mécanique de finition de surface
- [23] E.S. Bojonov, I. Voutchkov, Méthodes statistiques pour la modélisation, technica, Sofia, 1978.
- [24] SADO G., SADO M.-C., Les plans d'expériences. De l'expérimentation à l'assurance qualité, AFNOR technique, 1991.
- [25] ATKINSON A.C., Recent developments in the methods of optimum and related experimental designs, Inst. Stat. Rev., vol. 56, p.99-115, 1988.
- [26] Jaques Goupy, Plans d'expériences pour surfaces de réponse, Dunod Paris 1999.

- [27] DANIELIE P., Statistique théorique et appliquée, De Boeck & Larcier, Bruxelles, 508 pages,1988.
- [28] G.E.P. BOX, N.R. DRAPER, Empirical Model-Building and Response Surface John Wiley and Sons, New-York, 669p, 1987.
- [29] J. GOUPY, La Méthode des Plans d'Expériences, Dunod, Paris, 303p, 1988
- [30].A. Bouchleghem, Matériaux Et fonctions mécaniques, thèse de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2001.