

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

BRAICHE Toufik & DJOULEM Ayoub

Thème

Etude de l'influence de la température du revenu sur le comportement en traction d'un acier faiblement allié

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
SLAMANI Mohamed	Pr	Président
ELHADI Abdemalek	MCA	Encadreur
BENKHARBECH Houria	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2021 / 2022

N° d'ordre : GM/...../2022

REMERCIEMENTS

Louange à Allah par la grâce duquel les bonnes choses se réalisent.

Nous remercions toute la famille pour avoir toujours été présent à mes côtés durant toutes ces années, plus particulièrement mon père et ma mère pour leur précieux soutien et encouragements.

Nos sincères remerciements vont à monsieur l'encadreur ELHADI Abdelmalek pour la qualité du sujet et ses précieux conseils et orientations durant toute la période de réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement Messieurs : Aoufi Belkacem, Bourezg Mohamed et Bouchareb Khaled pour leurs soutiens pendant la phase expérimentale de notre travail.

Nous remercions également les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce travail.

DEDICACES

Nous dédions notre travail à :

Mon cœur et mon âme, ma lune dans les nuits, mon bonheur, mon amour et ma joie qui se sont sacrifiés pour me donner l'espoir dans la vie, a ceux qui m'ont donné l'amour sans limite,

À vous ma mère et mon père.

Sans oublier :

Ma sœur, Mon frère, Mes chers amis, et toute ma famille.

*A tous les étudiants des promotions Master2021/2022
de Génie Mécanique.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I	GENERALITES SUR LES ACIERS
I.1. Introduction	5
I.2. Définition de l'acier	5
I.3. Différentes classifications des aciers	5
I.3.1. Aciers non alliés	6
I.3.1. 1. Aciers non alliés d'usage général	6
I.3.1. 2. Aciers non alliés spéciaux de type C	6
I.3.2. Aciers alliés	8
I.3.2. 1. Aciers faiblement alliés	8
I.3.2. 2. Aciers fortement alliés	9
I.3.2. 3. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)	10
I.4. Influence des éléments d'addition	10
I.4.1. Effet du carbone	11
I.4.2. Effet du chrome	11
I.4.3. Effet du Molybdène	11
I.4.4. Effet du tungstène	11
I.4.5. Effet du silicium	12
I.4.6. Effet du manganèse	12
I.4.7. Le nickel	12
I.4.8. Le titane	13
I.4.9. Le cuivre	13
I.4.10. Le soufre	13
I.5. Propriétés mécaniques de l'acier	13
I.6. Propriétés physiques	14
CHAPITRE II	TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS
II.1. Introduction	16

II.2. Définition du traitement thermique	16
II.3. Procédés des traitements thermiques	17
II.4. Types de fours et leurs atmosphères	17
a/Fours à sole	17
b/Fours à bain de sels	18
C/Fours électriques	18
II.5. Types de traitements thermiques	18
II.5.1. Traitement de trempe	18
II.5.1.1. Milieu de trempe	20
II.5.1.2. Vitesse de refroidissement	21
II.5.2. Revenu	21
II.5.2.1. Principe et but de revenu.....	21
II.5.2.2. Différents types de revenu	22
II.5.2.2.1. Revenu de relaxation ou de détente	23
II.5.2.2.2. Revenu de structure ou classique	23
II.5.2.2.3. Revenu de durcissement.....	23
CHAPITRE III EQUIPEMENTS UTILISES ETPROCEDURESTECHNIQUES .	24
III.1. Introduction	25
III.2. Principe de l'essai.....	25
III.2.1. Eprouvette d'essai de traction.....	26
III.2.2. Dimensionnement de l'éprouvette	26
III.2.3. Courbe de traction conventionnelle	27
III.2.4. Vitesses d'essai de traction	28
III.2.5. Caractéristiques mécaniques.....	28
III.2.5.1. Résistance à la rupture	28
III.2.5.2. Allongement	29
III.2.5.3. Coefficient de striction (Z%)	29
III.2.5.4. Module d'élasticité longitudinale (Module d'Young) (E)	29
III.3. Matériau utilisé	31

III.3.1. Composition chimique.....	31
III.3. 2. Présentation des échantillons (éprouvette)	32
III.3.3. Préparation des éprouvettes	32
III.3.3.1. Usinage des éprouvettes	32
III.3.4. Traitements thermiques Appliqués	33
III.3.6. Déroulement de l'essai de traction.....	37
CHAPITRE IV RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION.....	43
IV.1. Introduction	44
IV.2. Caractéristiques de traction	44
IV.3. Résultats obtenus par traitement thermique de revenu.....	47
IV.3. 1. Variation de la dureté en fonction de la température de revenu	47
IV.3.2. Variation de la Résistance à la rupture en fonction de la température de revenu. ..	48
IV.3.3. Variation de l'allongement A % en fonction de la température de revenu	49
IV.3.4. Variation du Coefficient de strictionZ% en fonction de la température de revenu	50
CONCLUSION GENERALE.....	52
REFERENCES.....	54
BIBLIOGRAPHIQUES.....	54
RESUME	57

LISTE DES FIGURES

FIG II 1 : CYCLE D'UN TRAITEMENT THERMIQUE.....	17
FIG II 2 : TEMPERATURES DE TREMPERATURE SUIVANT LE DIAGRAMME FE-C [20].	20
FIG II 3 CYCLE COMPLET (TREMPERATURE ET REVENUE).....	22
FIG.III.1.EPROUVETTE DE TRACTION CYLINDRIQUE.	26
FIG.III.2.COURBE CONVENTIONNELLE DE TRACTION (EFFORTS- ALLONGEMENTS).....	27
FIG.III.3.MACHINE DE TRACTION WP 310.....	30
FIG.III.4.EPROUVETTE DE TRACTION UTILISEE.....	32
FIG.III.5.DECOUPAGE DE L'EPROUVETTE AVANT L'USINAGE.....	32
FIG.III.6.USINAGE DE L'EPROUVETTE PAR TOURNAGE.....	33
FIG.III.7.FOUR ELECTRIQUE DE TYPE NABERTHERM.....	33
FIG.III.8.TEMPERATURES DE TREMPERATURE ET REVENUE SUIVANT LE DIAGRAMME FE-C	34
FIG.III.9.EPROUVETTES DE TRACTION : (A) AVANT TRAITEMENT THERMIQUE ; (B) APRES TRAITEMENT THERMIQUE.....	35
FIG.III.10.POLISSEUSE	35
FIG.III.11.MICRODUROMETRE ZWICK/ROELL.	36
FIG.III.12.EMPREENTE DE L'INDENTEUR DE VICKERS.....	36
FIG.III.13.EPROUVETTE FIXEE SUR LES DEUX MORS.	37
FIG.III.14.COURBES DE TRACTION : (A) FORCE /ALLONGEMENT (B) CONTRAINTES /DEFORMATION.....	38
FIG.IV.1.COURBE DE TRACTION (CONTRAINTES- DEFORMATION A LA TEMPERATURE DE REVENUE 350°C).	45
FIG.IV.2.COURBE DE TRACTION (CONTRAINTES- DEFORMATION A LA TEMPERATURE DE REVENUE 450°C).	45

FIG.IV.3.COURBE DE TRACTION (CONTRAINTE- DEFORMATION A LA TEMPERATURE DE REVENU 550°C).	46
FIG.IV.4.COURBE DE TRACTION (CONTRAINTE- DEFORMATION A ETAT DE LIVRAISON NON TRAITE.....	46
FIG.IV.5.HISTOGRAMME DE LA VARIATION DE LA DURETE EN FONCTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES DE REVENU.....	48
FIG.IV.6.HISTOGRAMME DE LA VARIATION DE LA RESISTANCE A LA RUPTURE EN FONCTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES DE REVENU.	49
FIG.IV.7.HISTOGRAMME DE LA VARIATION DE L'ALLONGEMENT A % EN FONCTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES DE REVENU.....	49
FIG.IV.8.HISTOGRAMME DE LA VARIATION DU COEFFICIENT DE STRICTION Z% EN FONCTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES DES REVENUS.....	50

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I 1 ELEMENTS ALLIES ET LEURS FACTEURS MULTIPLICATEURS .	9
TABLEAU II 1 VITESSE DE REFROIDISSEMENT.....	21
TABLEAU III 1 VITESSE DE SOLLICITATION EN TRACTION DE DIFFERENTS MATERIAUX.	28
TABLEAU III 2 COMPOSITION CHIMIQUE DE L'ACIER 42CRMO4 SELON LA NORME EN 10277-2.....	31
TABLEAU III 3 COMPOSITION CHIMIQUE EN MASSE %DE L'ACIER 42CRMO4 PAR SPECTROSCOPIE.....	31
TABLEAU IV 1 CARACTERISTIQUES MECANQUES EN FONCTION DES TRAITEMENTS THERMIQUES DE REVENU.....	47

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'identification et la caractérisation d'un matériau est d'un grand intérêt technologique et pratique. Avant de l'utiliser dans une application donnée, il est nécessaire de débiter une étude préalable de ses propriétés qui devront répondre à son bon fonctionnement dans diverses réalisations afin de l'exploiter rationnellement.

Les aciers sont parmi ceux les plus couramment employés dans les applications industrielles. La grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermomécaniques conditionnant les propriétés mécaniques de ces aciers permettent de couvrir une gamme d'applications extrêmement large. Leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées à la microstructure de l'alliage, donc à sa composition et aux traitements thermiques appliqués. Enfin, leurs faibles coûts présentent un grand intérêt pour leurs utilisations.

Les essais mécaniques sont l'étape nécessaire pour atteindre les grandeurs caractéristiques des matériaux (La dureté, la résistance à la rupture...etc.).

L'essai de traction permet de déterminer de nombreuses grandeurs normalisées, comme la limite d'élasticité, l'allongement et la contrainte à la rupture. Ces grandeurs sont nécessaires dans les calculs des structures.

L'objectif de notre travail est d'analyser quelques caractéristiques mécaniques de l'acier faiblement allié 42CrMo4 à différentes températures de revenu (350°C -450°C et 550°C) après trempe à l'aide des essais de traction uni axiale. Cet acier très employé dans l'industrie mécanique pour des pièces de moyennes à fortes sections : arbre, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages.... etc.

Pour ce faire, nous réalisons les essais de dureté et les essais de traction qui permettent d'obtenir les propriétés mécaniques telles que, la dureté, la résistance à la traction, l'allongement et le coefficient de striction.

Notre mémoire s'articule sur quatre chapitres.

Le premier chapitre est une recherche bibliographique sur les aciers.

Le deuxième chapitre est consacré pour une étude générale sur les traitements thermiques des aciers, exclusivement les traitements thermiques trempe et revenu de l'acier 42CrMo4.

Pour le troisième chapitre, c'est une description des équipements expérimentaux utilisés ainsi que les procédures techniques de mesures.

Le dernier chapitre est un regroupement des résultats expérimentaux obtenus par les tests effectués et leurs analyses.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES ACIERS

I.1. Introduction

Les aciers sont les plus couramment employés dans les applications industrielles parmi tous les matériaux métalliques à cause de la grande diversité de leurs nuances et la possibilité de réaliser les traitements thermiques et thermochimiques afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et leurs faibles coûts qui présentent un grand intérêt pour leurs utilisations.

Les éléments d'alliages, entrant en solution solide jouent un rôle prépondérant dans les différentes transformations de phases des aciers. L'étude de leur rôle, de leur influence et des conditions dans lesquelles elles surviennent constitue donc une étape exigée dans la compréhension des différentes propriétés d'un alliage. Ces éléments influent sur les différentes propriétés en modifiant leur cinétique, et les microstructures obtenues [1].

I.2. Définition de l'acier

L'acier est un alliage résultant d'une transformation de matières premières naturelles, tirées du sol ou recyclées. Les conditions matérielles de cette transformation entraînent la présence dans sa composition d'une faible proportion d'autres éléments (phosphore, soufre) considérés comme des impuretés [2].

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,02% à environ 2,11% en masse). La teneur en carbone a une influence considérable sur les propriétés de l'acier : au-dessous de 0,02 %, l'alliage est malléable et on parle de fer ; au-delà de 2,11%, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone améliore la dureté de l'alliage et la résistance mécanique à la rupture [3].

I.3. Différentes classifications des aciers

Les aciers sont classés d'après leur composition chimique en trois classes :

- Aciers non alliés.
- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

I.3.1. Aciers non alliés

I.3.1. 1. Aciers non alliés d'usage général

Ils forment presque 70% des aciers dans l'industrie, sont caractérisés par une faible teneur en carbone. Ils sont destinés à l'usage général : la construction soudée, à l'usinage, au pliage, etc. Désignés par une lettre représentant la classe :

S : acier d'usage général de base (construction de bâtiment) ;

E : utilisé dans la construction mécanique.), suivie de la limite élastique à la traction en MPa ou N/mm² et d'indications complémentaires S : soudable ; s'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G [4].

L pour les tubes de conduites ;

R pour les rails.

Exemples de nuances des aciers non alliés d'usage général :

- S185 (anciennement A33), Re = 185 MPa ;
- S235 (anciennement A37, E24), Re = 235 MPa ;
- E295 (anciennement A50), Re = 295 MPa ;
- GE295, acier moulé, Re = 295 MPa ;
- S355 J2 WP (anciennement A52, E36), Re = 355 MPa, à grain fin et auto-patinable (c'est l'acier Corten A).

I.3.1. 2. Aciers non alliés spéciaux de type C

Destinés aux traitements thermiques (trempe et revenu, trempe superficielle, cémentation...). Le traitement thermique donne à ces aciers des propriétés d'emploi très performantes. La majorité est disponible sous forme de profilés et barres aux dimensions normalisées.

La désignation de ces aciers est : Lettre C suivie du pourcentage de carbone multiplié par 100 plus des indications complémentaires [5].

L'addition de carbone augmente la résistance à la traction, à la dureté et à la corrosion, mais diminue la ductilité et la malléabilité. Les aciers au carbone se divisent en trois sous-familles : les aciers doux, les aciers à moyenne teneur en carbone (mi-dur) et les aciers à forte teneur en carbone (dur). Du point de vue pratique, la teneur en carbone de l'acier peut varier entre 0.05% et 1.35%, donnant ainsi diverses nuances. Outre le carbone, il existe dans l'acier, en proportions minimales, d'autres éléments tels que le manganèse, le phosphore, le soufre et le silicium. La dureté d'un acier est fonction de sa teneur en carbone.

Selon la teneur en carbone, on peut distinguer :

a) Aciers à faible teneur de carbone (%C<0.25%)

Ces aciers sont produits en grande quantité et à moindre coût et se caractérisent par une grande ductilité et une grande ténacité mais une faible résistance. Ils sont généralement renforcés par écrouissage (amélioration de la résistance et de la dureté par déformation plastique). Leur résistance à la traction se situe entre 415 et 550 MPa et leur allongement à la rupture peut atteindre 25%. Par ailleurs, ils peuvent être facilement usinés et soudés. On les trouve dans diverses applications (éléments de construction tels que les poutres, les profilés, les cornières, carrosserie de voitures, boîtes de conserve).

Exemple : C 18

Acier non allié

0, 18% de carbone

S'il s'agit d'un acier moulé la désignation est précédée de la lettre G.

Exemple : GC 25.

GC 25 : acier non allié moulé.

0,25% de carbone.

b) Aciers à moyenne teneur de carbone (0.25% à 0.6% de C)

Ces aciers offrent de meilleures combinaisons résistance-ductilité lorsqu'ils sont traités thermiquement (recuit, trempe et revenu). L'ajout d'éléments tels que le chrome, le nickel et le molybdène facilitent ces traitements. Ces aciers sont utilisés dans la fabrication de vilebrequins, d'engrenages, de roues et voies ferrées et autres pièces de structures qui nécessitent de grandes résistances et ductilité.

c) Aciers à forte teneur de carbone (0.6% à 1.4% de C)

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité. Étant résistants à l'usure, ils sont utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices. On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté [6].

I.3.2. Aciers alliés

Il est parfois nécessaire d'utiliser un acier avec des propriétés spécifiques que l'acier non allié ordinaire n'a pas. À cet effet, lors de la production du matériau, certains éléments sont ajoutés pour obtenir de nouvelles fonctionnalités. C'est ce qu'est l'acier allié. Selon les normes françaises, la teneur en un composant supplémentaire doit être égale ou supérieure à celle contenue dans le tableau avec la concentration massique autorisée.

I.3.2. 1. Aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dans lesquels aucun des éléments alliés n'a une teneur à 5%.

Ils sont utilisés en l'état de livraison ou avec traitement thermique. Ils sont utilisés pour des applications nécessitant une haute résistance à la fatigue et à l'abrasion.

Désignation : Pourcentage de carbone multiplié par 100, suivi des symboles chimiques des principaux éléments d'addition classés en ordre décroissant. Puis, dans le même ordre, les pourcentages de ces éléments multipliés par 4 ou 10 [4].

Le tableau 1.1 indique les éléments alliés et leurs facteurs multiplicateurs

Elément	Facteur
Chrome (Cr)	4
Cobalt (Co)	
Manganèse (Mn)	
Nickel (Ni)	
Silicium (Si)	
Aluminium (Al)	10
Molybdène (Mo)	
Niobium (Nb)	
Soufre (S)	
Titane (Ti)	
Tungstène (W)	
Vanadium (V)	

Tableau I 1 : Eléments alliés et leurs facteurs multiplicateurs [7]

Exemple de désignation normalisée

35NiCrMo16 : contient 0.35% de carbone, 4% de nickel, du chrome et molybdène en plus faible teneur. Cet acier présente une bonne tenue aux chocs ainsi qu'une haute résistance mécanique jusqu'à 600 °C [4].

I.3.2. 2. Aciers fortement alliés

Au moins un élément d'addition dépasse les 5 % en masse, destinés à des usages bien spécifiques, on y trouve des aciers à outils, réfractaires, (très haute résistance, utilisés dans l'aéronautique et pour la fabrication de coque de sous-marins), ont très grande résistance à l'usure et faible coefficient de dilatation.

- Les teneurs pour cent d'une partie des éléments rangées dans le même ordre et sans coefficient multiplicateur [5].

Les aciers rapides spéciaux ARS font partie de cette famille.

Exemple de désignation : G X 6 Cr Ni Ti 18-11

G: acier moulé X: catégorie des aciers fortement alliés

0,06% de carbone

18% de chrome, 11% de nickel et des traces de titane (moins de 1%).

I.3.2. 3. Aciers à haute tenue à la corrosion (aciers inoxydables)

Ces aciers présentent une grande résistance à la corrosion, à l'oxydation à chaud et au fluage (déformation irréversible). Ils sont essentiellement alliés au chrome, élément qui confère la propriété d'inoxidabilité, et au nickel, élément qui confère de bonnes propriétés mécaniques. Les aciers inoxydables sont classés en quatre familles : ferritique, austénitique, martensitique et austéno-ferritique. Les aciers inoxydables austénitiques sont les plus malléables et conservent cette propriété à très basse température ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Leurs applications sont multiples : chimie, nucléaire, alimentaire, mais aussi coutellerie et équipements ménagers. Ces aciers contiennent au moins 10,5 % de chrome et moins de 1,2 % de carbone.

Les aciers à haute tenue à la corrosion peuvent être classés en deux groupes : les aciers alliés au chrome qui, après refroidissement à l'air obtiennent une structure martensitique ou ferritique et les aciers alliés au chrome-nickel à structure austénitique [8].

I.4. Influence des éléments d'addition

L'acier est élaboré pour résister à des sollicitations mécaniques, chimiques ou une combinaison des deux. Pour résister à ces sollicitations, des éléments chimiques peuvent être ajoutés à sa composition en plus du carbone. Ces éléments sont appelés éléments d'additions, les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo) [9].

Pour leurs emplois, ces aciers doivent posséder les propriétés suivantes :

- Une grande dureté, pour résister aux déformations lors de travail par pénétration, enfoncement ou par cisaillement du métal ;

Une bonne résistance à l'usure pendant le contact dynamique des pièces du système mécanique ;

Une absence de fragilité, notamment dans les utilisations pour lesquelles la pièce est soumise à des changements de température brusques et des chocs ;

Une bonne trempabilité pour que la structure soit homogène sur une très grande épaisseur après traitements thermiques de trempe. Cet ensemble des propriétés peut être assuré par l'addition des éléments d'alliage. A ces buts, on cite :

I.4.1. Effet du carbone

Le carbone est l'élément d'alliage de l'acier ayant la teneur la plus importante et aussi celui qui a le plus d'influence. C'est un élément qui participe activement à la formation des carbures. C'est un élément à grand pouvoir abrasif. Il en résulte que l'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique, par contre l'allongement, la striction et la résilience diminuent [10]

I.4.2. Effet du chrome

Améliore la résistance, la dureté et la ténacité du matériau. Dans certains types, par exemple les aciers à outils, il a un effet positif sur la trempabilité. À son tour, dans les aciers inoxydables, il est responsable de la résistance à la corrosion [11].

Cet élément est très employé, en teneur variant de (0,25 à 30%), suivant l'application précise que l'on veut obtenir.

I.4.3. Effet du Molybdène

Le molybdène est un élément d'addition principal dans la composition chimique étudiée. Il élève la résistance à la traction et à la fatigue, augmente la dureté et la trempabilité (la trempabilité est l'aptitude d'un acier à se transformer en martensite dans la masse d'une pièce), tout en diminuant l'allongement. Sa présence conduit à la formation de petites particules résistantes à l'abrasion et évite le grossissement des grains austénitiques à haute température.

I.4.4. Effet du tungstène

Il augmente la résistance à l'usure par abrasion. Le tungstène possède une vaste gamme de propriétés intéressantes. Ce métal très dense, a le point de fusion le plus élevé de tous

les métaux (3410°C). Il se caractérise par un coefficient de dilatation thermique bas, une grande résistance à la traction à des températures élevées, une résistance supérieure à la corrosion et une bonne conductivité thermique et électrique. Le tungstène est un métal le plus dur des métaux réfractaires et le carbure de tungstène qu'il développe compte parmi les plus durs des carbures. Les carbures de tungstène sont peu sensibles au revenu d'où son avantage dans les aciers devant résister à chaud.

I.4.5. Effet du silicium

Le silicium est un désoxydant, permet également d'améliorer la trempabilité de l'alliage et accroît la résistance à l'usure abrasive. Grâce à cette propriété, on peut augmenter la dureté après traitement thermique d'un acier. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une augmentation de dureté se fait très souvent au détriment de la ductilité. Il améliore la résistance à l'oxydation des aciers au chrome

I.4.6. Effet du manganèse

Augmente également la dureté et la résistance. Le manganèse est un élément désoxydant et désulfurassent, tout comme le silicium, il augmente la trempabilité d'un acier et élève à la fois la limite d'élasticité et la ténacité. En revanche, il réduit la plasticité de l'alliage.

I.4.7. Le nickel

Donne des propriétés similaires au Chrome. De plus, il réduit la température seuil de fragilité. En combinaison avec le chrome et le molybdène, il améliore la trempabilité de l'acier et la ténacité.

Il stabilise l'austénite aussi bien à la température ambiante qu'aux températures très basses. Cependant, il augmente la teneur en austénite résiduelle après trempe ce qui entraîne des difficultés lors du revenu. Il favorise ainsi la mise en œuvre par déformation plastique.

I.4.8. Le titane

Le titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite la dégradation des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (Tic) évitant de ce fait la perte du caractère d'in oxydabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC).

I.4.9. Le cuivre

Le cuivre, en petites proportions, améliore la résistance de l'acier à l'oxydation

I.4.10. Le soufre

Le soufre diminue la résistance à la corrosion [6].

I.5. Propriétés mécaniques de l'acier

Les propriétés mécaniques d'un acier varient énormément en fonction de sa composition chimique et du traitement thermomécanique appliqué pendant le processus de fabrication. Elles concernent la déformation d'un matériau (acier) soumis à une force.

Les principales propriétés mécaniques d'un acier sont :

La résistance à la rupture : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre.

- La dureté : résistance d'un matériau à la pénétration contre un autre matériau.

- La ductilité : capacité du matériau à se déformer plastiquement de manière irréversible avant de rompre [12]. Un matériau qui présente une grande déformation plastique à la rupture est dit ductile.

- La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules (module d'Young).

- La ténacité : La ténacité est la capacité d'un matériau à résister à la propagation. D'une fissure [13].

I.6. Propriétés physiques

Les propriétés physiques de l'acier en font un matériau particulièrement apte à la construction métallique. Par la grande diversité de ses caractéristiques, à chaque emploi peut correspondre un acier (masse volumique, coefficient de dilatation, conductivité thermique et résistivité électrique...) [2].

CHAPITRE II

TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS

II.1. Introduction

Le choix d'un matériau dépend essentiellement de sa composition chimique et des conditions de son élaboration, notamment ses propriétés mécaniques. Les traitements thermiques lui confèrent des changements notables au niveau de sa structure propre. Les traitements thermiques ont pour but de donner à la pièce traitée les propriétés mécaniques les plus convenables pour sa mise en œuvre et son emploi. D'une manière générale les traitements thermiques ne modifient pas la composition chimique mais apporte des modifications du point de vue constitution (état du carbone, forme allotropique), structure (taille de grain, répartition des constituants) et état de contrainte. Un traitement thermique comporte obligatoirement :

1. Un chauffage ;
2. Un maintien pendant un temps à la température de traitement ;
3. Un refroidissement (retour à la température ambiante) [6].

II.2. Définition du traitement thermique

La norme NF EN 10052 a retenu la définition pour traitement thermique comme suit : c'est une succession d'opérations au cours desquelles un produit ferreux solide est soumis en totalité ou partiellement à des cycles thermiques pour obtenir un changement de ses propriétés et/ou de sa structure. Les cycles thermiques appliquées à des vitesses de chauffage et de refroidissement jouent un rôle essentiel et peuvent provoquer des modifications sur :

- La microstructure (transformations de phases, taille de grains, précipitation...).
- Les propriétés mécaniques, dureté et fragilité...

Lors d'un traitement thermique, On joue sur 3 variables :

- La température : la montée et le maintien à température et le refroidissement.
- le temps (durée de maintien dans le four selon la forme et les dimensions)
- le milieu de séjour durant le maintien en température (neutre ou réactif) [14].

II.3. Procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Généralement, un traitement thermique comprend trois étapes (figure II.1)

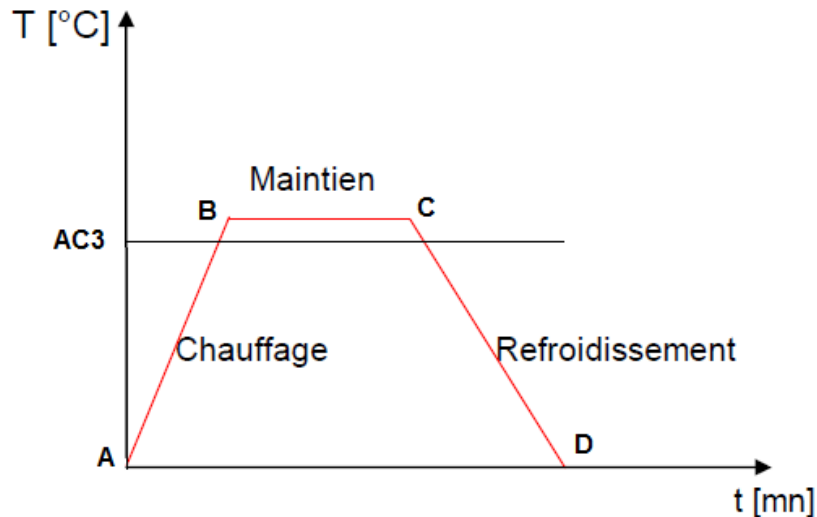


Fig II. 1 : Cycle d'un traitement thermique.

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC3).
- BC : Maintien à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau) [15].

II.4. Types de fours et leurs atmosphères

a/Fours à sole

Dans les fours à sole, le chauffage se fait surtout par rayonnement et ils présentent une chambre dans laquelle on met la pièce à chauffer. Dans certains cas une deuxième chambre située au-dessus de la première et récupérant une partie de la chaleur formée, sert comme chambre de préchauffage.

b/Fours à bain de sels

Ils présentent les avantages suivants :

- Rapidité de chauffage : car la pièce est en contact sur toutes ses faces avec le sel liquide en mouvement permanent.
- Uniformité de chauffage : les écarts de température entre les différents points du bain sont très faibles, la pièce s'échauffe régulièrement, ce qui diminue l'importance de déformation.
- Absence de dénaturation du métal : le bain qui peut être choisi neutre, oxydant ou réducteur, protège la pièce de tout contact avec l'oxygène de l'air

C/Fours électriques

Les fours électriques peuvent être à sole ou à bain de sel. Ils sont chauffés le plus souvent par résistances métalliques en nickel-chrome pour des températures ne dépassant pas 1000°C et en silicium pour des températures de 1300°C. Les fours électriques à bain de sel à haute température sont à électrodes, le sel fondu formant résistance entre celles-ci [15].

II.5. Types de traitements thermiques

Nous présentons dans cette partie, les principaux types de traitements thermiques liés à l'acier. Ceux-ci sont exposés selon le but du traitement, sur le champ d'application, le cycle thermique et les technologies de chauffage qui y sont associés [16].

Les principaux traitements thermiques sont :

II.5.1. Traitement de trempe

La trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation jusqu'à l'austénisation (transformation de la structure cristalline du fer de la forme α cubique centré à la forme γ cubique à face centré), puis on lui fait subir un refroidissement rapide (air, eau ou huile) pour obtenir une dureté maximale.

En fonction de la vitesse de refroidissement et de la composition chimique, l'austénite produite se transforme en martensite, bainite ou troostite. Ainsi, on obtient :

- La martensite apparaît au cours d'un refroidissement est très rapide.
- La bainite s'obtient lorsque le refroidissement est assez rapide.
- La troostite est obtenue lorsque le refroidissement est moyennement rapide [17]

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure ou égale à 20 °C. Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Cette nouvelle structure nomme martensite.

Pour les aciers au carbone, on utilise le plus souvent de l'eau comme milieu de trempe, alors que pour les aciers alliés, c'est fréquemment de l'huile ou un bain de sel [18]

Pour obtenir la bainite par trempe, l'acier austénitisé est refroidi à une température choisie, à vitesse suffisante pour éviter la transformation en ferrite ou perlite. On maintient à cette température (240 °C à 450 °C) pour obtenir une transformation totale et l'on refroidit ensuite à la température ambiante. La température choisie pour la trempe bainitique dépend de la microstructure désirée (et la dureté recherchée) et de la vitesse de transformation de l'acier.

Les propriétés de la bainite confèrent certaines qualités aux aciers, malgré les inconvénients signalés, en particulier, une meilleure ductilité (pour les fortes teneurs en carbone) que pour la trempe martensitique, et de meilleures propriétés de fluage, (aux températures de 400 °C à 500 °C) que la martensite revenue. Dans les deux cas, les structures obtenues (martensite ou bainite) présentent une dureté élevée.

La troostite est formée de lamellaire très minces, en éventail, de ferrite et de cémentite. Plus la température de formation est basse, plus l'épaisseur des lamelles diminue. Elle se retrouve sous la forme de nodules plus ou moins ronds et de couleur sombre situés au joint des anciens grains d'austénite.

Après l'opération de trempe, des modifications parfois notables sur les caractéristiques mécaniques sont obtenues : la résistance à la rupture (R_r), la limite élastique (R_e) et la dureté s'améliorent. L'allongement ($A\%$) et la résilience (K) diminuent [17,19].

Les températures de trempe des échantillons sont illustrées dans la figure II.2 à partir du diagramme Fe-C qui précise la température d'austénitisation en fonction du pourcentage de carbone.

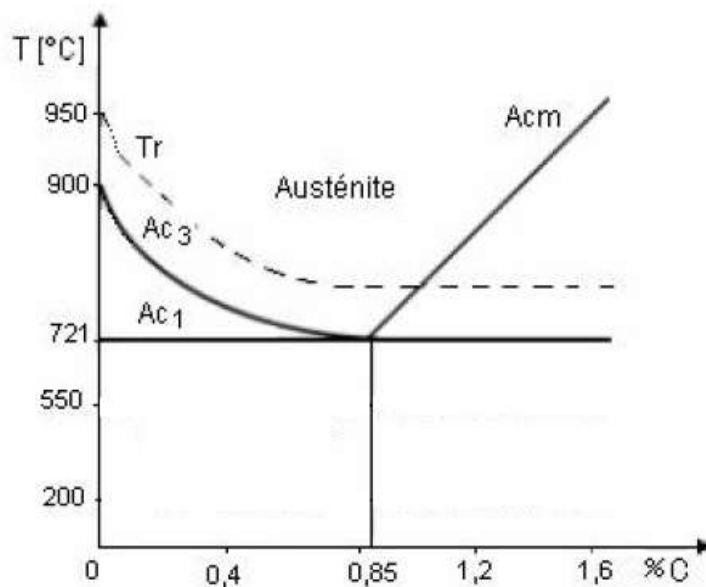


Fig II. 2 : Températures de trempe suivant le diagramme Fe-C [20].

II.5.1.1. Milieu de trempe

Dans la pratique, la trempe est généralement réalisée par immersion de la pièce dans un milieu qui extrait la chaleur contenue dans celle-ci, ce milieu peut être :

- **Gazeux** : air ou gaz : N_2 , H_2 ...etc.
- **Liquide** : Eau, huiles et bains de sels fondus (l'eau et les huiles peuvent contenir des additifs qui modifient leur pouvoir refroidissant) ;
- **Mixte** : brouillard (gaz + liquide atomisé), lit fluidisé (gaz + solide pulvérulent).

Le refroidissement en chaque point d'un volume d'acier dépend :

- Des propriétés thermiques du milieu de trempe et de certaines de ses propriétés physiques (viscosité notamment) ;

- Des propriétés thermiques du métal ;
- De la géométrie de la pièce (forme, dimensions, etc.) ;
- De la température du milieu de trempe [5].

II.5.1.2. Vitesse de refroidissement

La vitesse de refroidissement selon la nature du bain de trempe est indiquée sur le tableau II.2.

Nature du bain	Vitesse de refroidissement
Saumure	220 °C / seconde
Eau froide	160 °C / seconde
Eau tiède	150 °C / seconde
Eau chaude	140 °C / seconde
Huile de trempe	70 °C / seconde
Air soufflé	20 °C / seconde
Air calme	2 °C / seconde
Dans un moule de sable	0,05 °C / seconde
Dans le four	0,01 °C / seconde (ou selon la programmation du cycle)

Tableau II. 1 : Vitesse de refroidissement [16].

II.5.2. Revenu

II.5.2.1. Principe et but de revenu

Le revenu est un traitement complémentaire à la trempe. Il permet de supprimer les défauts que présentent les pièces trempées, tels que :

- La grande fragilité procurée par la martensite ;

- Les tensions internes élevées dues à l'hétérogénéité de la structure produite par un refroidissement irrégulier des pièces.

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre R_m , R_e , d'une part et la résilience K et l'allongement $A\%$ d'autre part.

Le cycle de revenu en trait rouge (figure II.3) est comme suit :

- Un réchauffage à une température $TR < A_{c1}$
- maintien à température pendant le temps nécessaire à la transformation métallurgique de toute la masse chauffée.
- Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci [21].

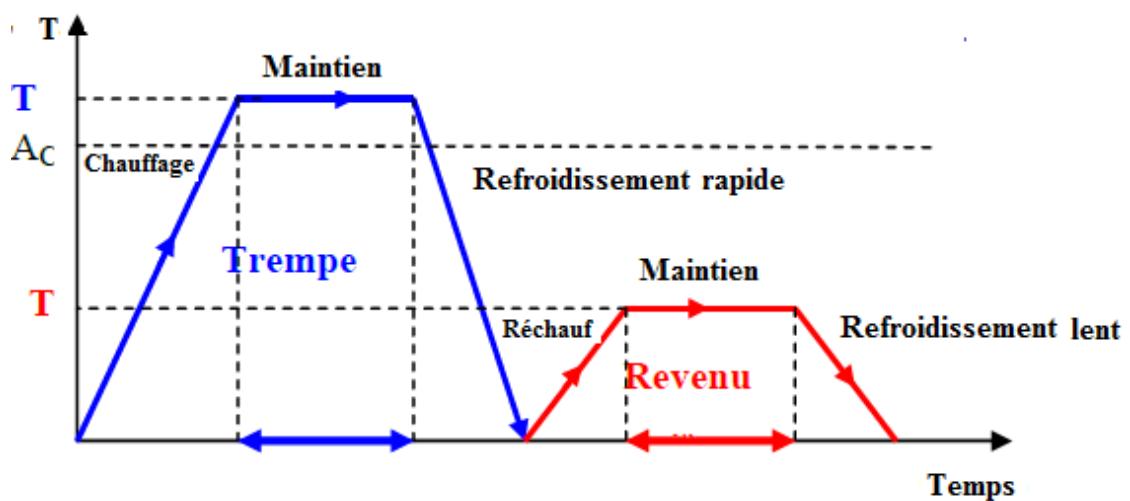


Fig II. 3 : Cycle complet (trempe et revenu).

II.5.2.2. Différents types de revenu

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

- Revenu de relaxation ou de détente,
- Revenu de structure ou classique,
- Revenu de durcissement.

II.5.2.2.1. Revenu de relaxation ou de détente

Il s'effectue entre 180°C, 220°C et 250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la martensite. Il provoque une légère détente et au changement de structure austénite diminution de la dureté et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle.

II.5.2.2.2. Revenu de structure ou classique

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 250 et 500°C. On observe une augmentation des caractéristiques K et A et une diminution plus importante de H , R_m et R_e . Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

II.5.2.2.3. Revenu de durcissement

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires) [21].

CHAPITRE III

EQUIPEMENTS UTILISES ET PROCEDURES TECHNIQUES

III.1. Introduction

Pour la résolution de problèmes de calcul des structures mécaniques, on constate la nécessité d'avoir quelques données expérimentales concernant les propriétés des matériaux utilisés, notamment, les propriétés mécaniques telles que la dureté la rigidité, la ductilité, la limite élastique et les grandeurs par exemple, le module d'élasticité longitudinale (module de Young) E et le coefficient de poisson (μ). Ces paramètres varient en fonction des propriétés des matériaux, en premier lieu de la composition chimique du matériau et les conditions de traitement thermique et d'usinage s'il ya lieu.

L'essai de traction à lui seul permet de définir les caractéristiques mécaniques courantes utilisées en RDM. La seule connaissance des paramètres de l'essai de traction permet de prévoir le comportement d'une pièce sollicitée en cisaillement, traction, compression et flexion [22].

Cette partie a pour objet, de présenter le principe de l'essai de traction pour déterminer certaines caractéristiques mécaniques essentielles des matériaux et les dispositifs expérimentaux utilisés lors des caractérisations de matériaux étudiés.

III.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort consécutif de traction suivant son axe (traction uni axiale), généralement jusqu'à la rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques [23].

La machine de traction est constituée de :

Un dispositif de traction, un système de mesure précise les allongements et un système de mesure précise les efforts engendrés.

En général, les efforts sont mesurés par jauges de contraintes. Les allongements sont mesurés soit par le déplacement de la traverse soit par un extensomètre.

Le dispositif d'attache des éprouvettes devra être conçu de telle sorte qu'au moindre effort l'éprouvette s'alignera sur l'axe de l'effort de traction [23].

III.2.1. Epreuve de traction

En utilisant des éprouvettes cylindriques, les normes nous obligent à respecter un rapport bien précis entre la longueur de référence (L_0) et le diamètre initial (d_0) de la section droite de l'éprouvette.

La longueur calibrée (L_c) de l'éprouvette est toujours supérieure à la longueur de référence (L_0). La partie utile de l'éprouvette est terminée par deux têtes d'amarrages destinées à la fixation. L_t est la longueur totale de l'éprouvette.

Les arrondis à l'extrémité de la longueur calibrée (L_c) sont créés pour éviter les concentrations de contraintes à la traction entre les deux parties de section (figure III.1).

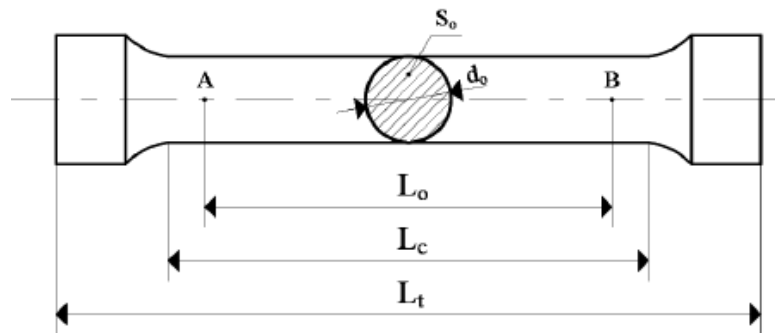


Fig III 1 : Epreuve de traction cylindrique.

La fixation de l'éprouvette est réalisée au moyen de dispositifs (les têtes de serrage à coin) assurant le centrage de la charge et évitant la flexion transversale de l'éprouvette.

L'allongement de l'éprouvette peut être mesuré en enregistrant le déplacement relatif des têtes de serrage à coin.

III.2.2. Dimensionnement de l'éprouvette

Selon la norme (ISO 6892-1) :

Généralement on prend : $L_0 = 5d_0$

Sachant que la section $S_0 = \pi \cdot d_0^2/4$

Alors, On peut exprimer la longueur de référence L_0 comme suit :

$$\text{On a : } L_0 = 5,65 (S_0)^{1/2}$$

La longueur calibrée L_c est donnée par la formule suivante :

$$L_0 + 2 d_0 \geq L_C \geq L_0 + 0,5 d_0$$

Le diamètre de la tête d'amarrage de l'éprouvette est :

$$2 d_0 \geq D \geq d_0$$

III.2.3. Courbe de traction conventionnelle

La courbe conventionnelle de traction (figure III.2) est la courbe obtenue à partir de l'enregistrement (F - ΔL) effectué en cours d'essai en rapportant la force à la section initiale pour raisonner en termes de contrainte $R = F / S_0$, et en rapportant l'allongement à la longueur initiale pour raisonner en termes d'allongement relatif

$$e = \Delta L / L_0.$$

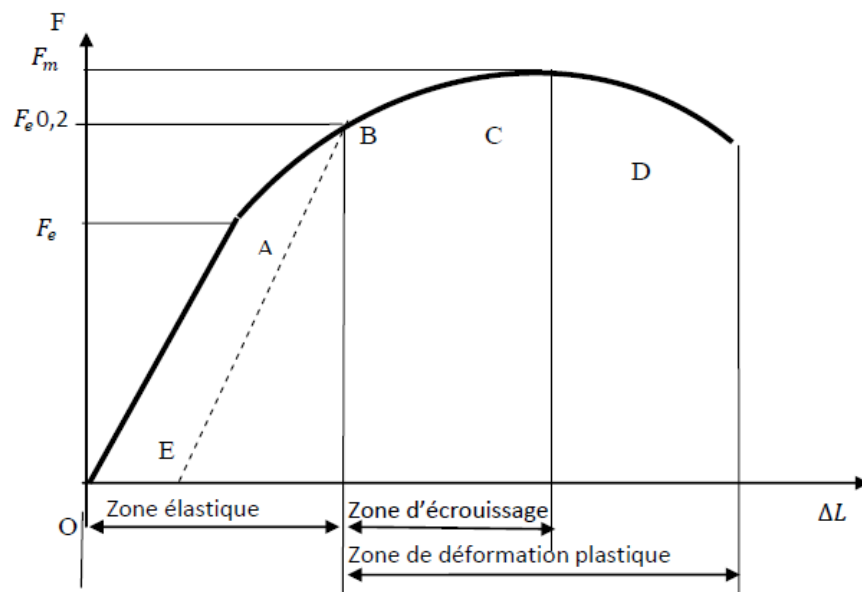


Fig III. 2 : Courbe conventionnelle de traction (efforts-allongements).

De la courbe conventionnelle de traction, la zone linéaire OA représente le domaine élastique, dans cette zone si en diminuant la charge F_e jusqu'à zéro, on revient en point O suivant le même chemin. Mais, si on diminue la charge F_e , en un point B situé entre A et C, on revient en E suivant une droite parallèle au segment OA : il subsiste une déformation rémanente OE.

A partir du point B, on augmente à la charge jusqu'à la valeur, F_m au point C, C'est le cas du phénomène d'écrouissage (zone plastique). Au point C, apparition de la striction. en D, c'est la rupture de l'éprouvette.

III.2.4. Vitesses d'essai de traction

Elle désigne la vitesse d'éloignement de deux têtes d'amarrage, elle peut être lente et constante. Elle conduit à la rupture de l'éprouvette.

La machine enregistre une courbe et des valeurs donnant la charge de traction en fonction de déplacement des têtes d'amarrage (l'allongement de l'éprouvette) [24].

Le tableau III.1 donne les valeurs de la vitesse de sollicitation en traction de différents matériaux [22].

Aciers	$V \leq 0,15 L_0$ (mm/min)	ou $\leq 30 \text{ N/mm}^2/\text{sec}$
Aluminium	$V \leq 0,009 L_0$ (mm/min)	ou $\leq 10 \text{ N/mm}^2/\text{sec}$
Cuivre	$V \leq 0,006 L_0$ (mm/min)	

Tableau III. 1 : Vitesse de sollicitation en traction de différents matériaux.

III.2.5. Caractéristiques mécaniques

En général, l'essai de traction nous a permis de déterminer les propriétés mécaniques suivantes Limite d'élasticité (la résistance limite élastique) (R_e) :

On définit une résistance limite élastique comme étant le rapport de F_e par l'aire la section utile S_0 de l'éprouvette

$$R_e = F_e / S_0$$

III.2.5.1. Résistance à la rupture

La résistance à la rupture est la charge maximale appliquée à la section initiale de l'éprouvette sollicitée en traction, elle est définie par :

$$R_r = R_m = F / S_0$$

III.2.5.2. Allongement

L'allongement (A%) indique l'aptitude d'un matériau à se déformer plastiquement sans se rompre, donc l'allongement est un indicateur de la ductilité du matériau.

$A\% > 5\%$ le matériau est considéré comme ductile.

$A\% < 5\%$ le matériau est considéré comme fragile.

$$A\% = (L_U - L_0)/L_0 \times 100$$

L_U : longueur ultime (mesurée en raboutant les deux morceaux de l'éprouvette cassée).

L_0 : longueur initiale ou référence (la distance entre deux repères tracés sur l'éprouvette avant l'essai).

III.2.5.3. Coefficient de striction (Z%)

Le coefficient de striction (Z%) est aussi considéré comme un autre indicateur de ductilité du matériau.

$$Z\% = (S_0 - S_U) 100 / S_0$$

S_0 : Section initiale (calculée en mm^2 sur l'éprouvette avant l'essai).

S_U : Section ultime (calculée en mm^2 à partir du diamètre mesuré à l'endroit de la cassure de l'éprouvette cassée).

III.2.5.4. Module d'élasticité longitudinale (Module d'Young) (E)

Le module d'élasticité longitudinale (E) est la pente de la courbe contrainte - déformation dans le domaine élastique en traction pure, son unité est le pascal, il est défini par la loi de Hooke (l'effort F de traction est proportionnel à l'allongement ΔL)

$$E = (F_0 L_0) / (S_0 \Delta L) = \sigma / e$$

Avec :

L'allongement : $\Delta L = L - L_0$

La contrainte de traction : $\sigma = F_0 / S_0$

La déformation : $e = \Delta L / L_0$ [24].

III.2.6. Présentation de la machine de traction

Elle est disponible au sein du laboratoire de sciences des matériaux, faculté de technologie à l'université de M'silla.

Cette machine est un appareil d'essai vertical à colonne à entraînement hydraulique (figure III.3). La force de traction maximale peut atteindre 50 KN dans les deux directions. Elle est équipée d'un PC pour la saisie et l'acquisition des données et des informations relatives à l'éprouvette et à la machine.

La machine de traction est équipée d'un dispositif de mesure d'allongement et dispositif d'enregistrement de diagramme plus un capteur de force, et un système d'amarrage coaxiale adapté à la forme des éprouvettes. Le capteur d'allongement mesure instantanément l'allongement de l'éprouvette alors que le capteur de force indique la charge appliquée.



Fig III. 3 : Machine de traction WP 310.

III.3. Matériau utilisé

Le matériau 42CrMo4 est un alliage ferreux, parmi les matériaux les plus utilisés et les plus étudiés. Est un acier pour trempée revenu, qui présente un bon compromis entre dureté et résilience à l'état trempé et revenu. Bonne trempabilité à l'huile, bonne résistance aux surcharges à l'état traité. Ce matériau est un acier faiblement allié, destiné principalement à la fabrication des pièces des pièces de moyennes à fortes sections : arbres, essieux, crémaillères, vilebrequins, bielles, engrenages.

Cet acier est parfois utilisé pour des pièces trempées superficiellement. Cet acier contient des principaux éléments d'addition tels que le chrome et le molybdène ayant une teneur ne dépassant pas 5% [1]. Selon la norme AFNOR, ce matériau est connu sous l'appellation : 42CD4.

III.3.1. Composition chimique

Le tableau III.2 donne la composition chimique en masse % des échantillons suivant la norme EN 10277-2.

C	Cr	Mo	Mn	Si	P
0.38- 0.43	0.80- 1.1	0.15- 0.25	0.75 - 1.0	0.15 -0.30	≤ 0.035

Tableau III 2 : Composition chimique de l'acier 42CrMo4 selon la norme EN 10277-2.

La composition chimique du matériau étudié par spectroscopie est indiquée dans le tableau III.3 :

C	Cr	Mo	Mn	Cu	Co
0.40	1.058	0.180	0.813	0.161	0.130

Tableau III. 3 : Composition chimique en masse % de l'acier 42CrMo4 par spectroscopie.

III.3. 2. Présentation des échantillons (éprouvette)

La forme géométrique et les dimensions en mm de l'éprouvette choisie (selon la norme ISO 6892-1) sont représentées dans la figure III.4 :

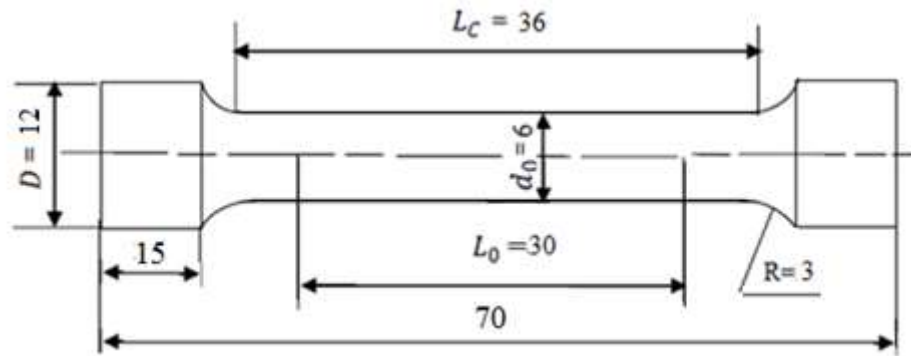


Fig III. 4 :Eprouvette de traction utilisée.

III.3.3. Préparation des éprouvettes

III.3.3.1. Usinage des éprouvettes

Des éprouvettes cylindriques ont été réalisées, tout d'abord, découpées à l'aide d'une scie mécanique (figure III.5), puis elles ont été usinées par le tournage : (figure III.6)



Fig III. 5 : Découpage de l'éprouvette avant l'usinage.



Fig III. 6 : Usinage de l'éprouvette par tournage.

III.3.4. Traitements thermiques Appliqués

Dans la première partie, les échantillons ont subi des traitements thermiques : trempe et revenu à différentes températures afin de déterminer l'effet de ces paramètres sur le comportement mécanique de l'acier étudié.

Un four électrique de type NABERTHERM a été utilisé pour le chauffage 'figure', dont la température est contrôlée, avec une capacité de chauffage atteint 850°C, l'échantillon a une température complètement homogène, gradient de température inférieur à 2 °C entre les différents points de l'échantillon.



Fig III. 7 : Four électrique de type Nabertherm.

Dans notre étude, nous avons appliqué les traitements thermiques suivants :

Chauffage à une température supérieure de 50 °C à celle d'austénisation. Nous avons choisi les températures de trempe des échantillons à partir du diagramme Fe-C illustré Dans la figure III.8 qui précise la température d'austénitisation en fonction du pourcentage de carbone.

Nous avons chauffé les échantillons à une température $AC3 + 50\text{ °C}$, soit 830°C.

- Maintien en température 830°C pour permettre une austénisation complète, la durée de maintien dépend du volume de la pièce, La durée de maintien dans nos échantillons est trente minutes.

Refroidissement rapide, en trempant les éprouvettes dans une huile de type SAE 15W40.

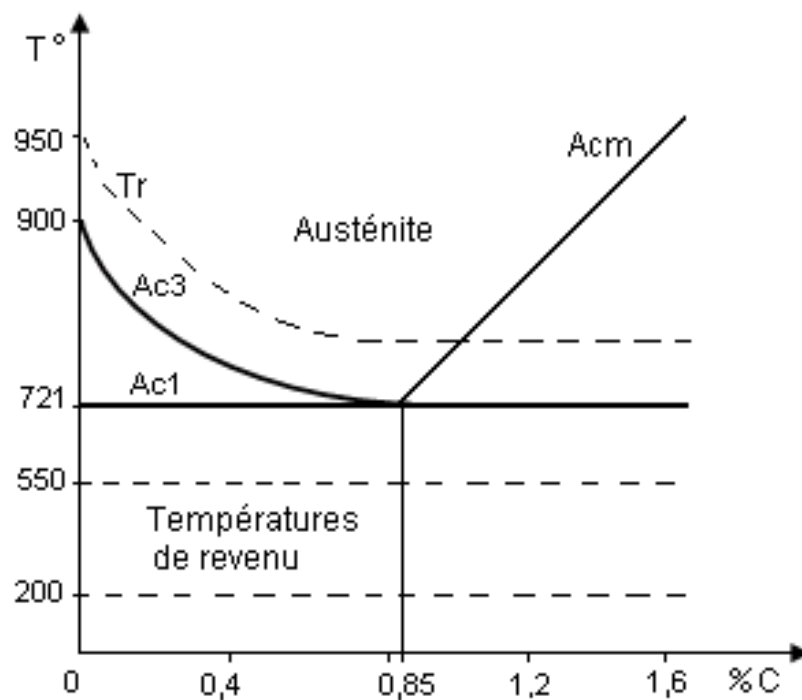


Fig III. 8 : Températures de trempe et revenu suivant le diagramme Fe-C [25].

La figure III.9 représente des éprouvettes, l'une avant traitement thermique (a) et les autres après trempe (b).



Fig III. 9 : Eprouvettes de traction : (a) Avant traitement thermique ; (b) Après traitement thermique.

III.3.5. Essai de micro dureté

L'essai de micro dureté nécessite des surfaces bien polies, de façon à ce qu'elles ne présentent aucune rayure susceptible de gêner la pénétration de l'indenteur. Nous avons poli nos échantillons à l'aide d'une polisseuse mécanique, (figure), en utilisant des papiers abrasifs de différents grades, 200, 400, 600, 800 et 1200. Après chaque polissage, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés.



Fig III. 10 : Polisseuse

Les valeurs de la dureté de Vickers (HV) ont été déterminées à l'aide d'un microduromètre de type Zwick/Roell (figure III.11).



Fig III. 11 : Microduromètre Zwick/Roell.

On mesure la micro-dureté déterminée par l'empreinte résultante après l'application de la charge 200grammes et le temps d'application de la charge 10 secondes (figureIII.12) pour une face de l'échantillon plusieurs fois (au moins cinq fois) et prendre la moyenne.

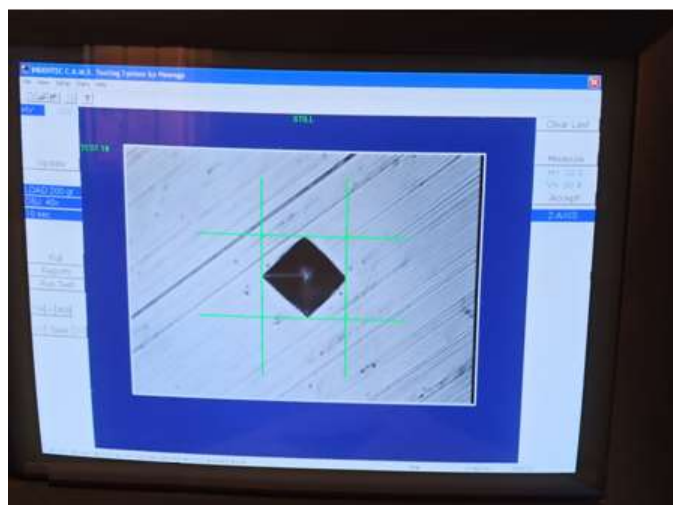


Fig III. 12 : Empreinte de l'indenteur de Vickers.

III.3.6. Déroulement de l'essai de traction

- a) Fixation de l'éprouvette sur les deux mors de la machine de traction (figure III.13).



Fig III. 13 : Eprouvette fixée sur les deux mors.

- b) Saisir les paramètres identifiants l'essai relatifs au fonctionnement de la machine, matière...etc.
- c) Revérifier les données déjà saisies puis lancer l'essai.
- d) L'interface visionne l'allure de la courbe au fur et à mesure que le mors mobile de La machine se déplace avec une vitesse de traction 1.5mm/min jusqu'à la rupture de l'éprouvette.
- e) Enregistrement des Courbes : Allongements / forces et contraintes /déformations.

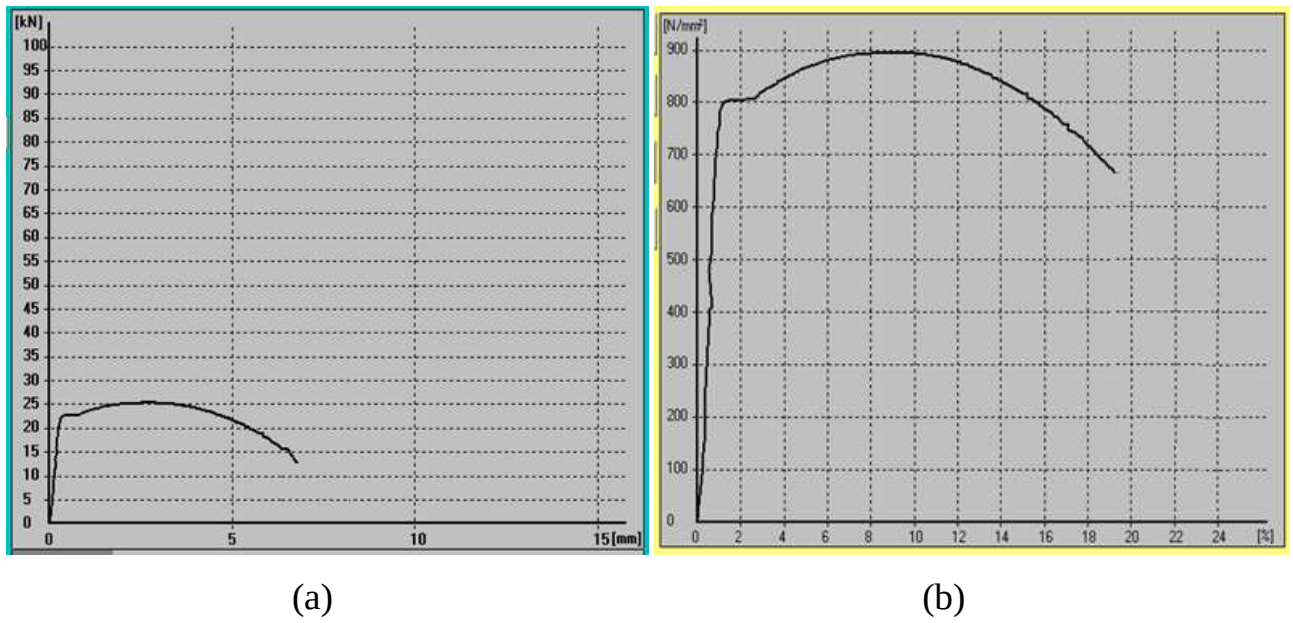


Fig III 14 : Courbes de traction : (a) force /Allongement ; (b) Contrainte /déformation

CHAPITRE IV

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

IV.1. Introduction

La recherche d'une meilleure optimisation des propriétés mécaniques, conduit à une analyse de l'ensemble de ces propriétés à partir des essais mécaniques tels que les essais de traction.

Dans cette partie on s'est intéressé à l'étude des effets de la variation de température de revenu du matériau 42CrMo4 sur quelques propriétés mécaniques, en effectuant des essais de traction et nous présentons nos résultats expérimentaux ainsi que leurs interprétations.

IV.2. Caractéristiques de traction

Les résultats de ces essais sont présentés sur les figures IV.1 jusqu'à la figure IV.4 par des courbes conventionnelles de traction (contrainte- déformation), Compte tenu de différentes températures de revenu (350°C, 450°C et 550°C) avec aussi des résultats pour le même matériau mais en état brut (état de livraison non traité) pour seulement montrer et comparer l'effet des traitements thermiques appliqués.

On remarque que toutes les courbes enregistrées après les tests de traction ont les mêmes allures et refléchissent le comportement mécanique du matériau en traction.

Chaque courbe montre qu'il ya une zone linéaire représente le domaine élastique, dans cette zone si on supprime la charge de sollicitation (de traction), on revient en point zéro suivant le même chemin (la déformation est réversible). La courbe s'infléchit : c'est le début de la déformation plastique. On augmente la charge jusqu' à une valeur maximale. Après ça, la déformation est concentrée dans une zone, c'est la striction (étranglement). La force enregistrée diminue, puisque la section diminue dans la zone de striction. C'est le domaine plastique homogène ou la déformation est permanente jusqu'à la rupture de l'éprouvette (fin de la courbe).



Fig IV. 1 : Courbe de traction (contrainte- déformation à la température de revenu 350°C).

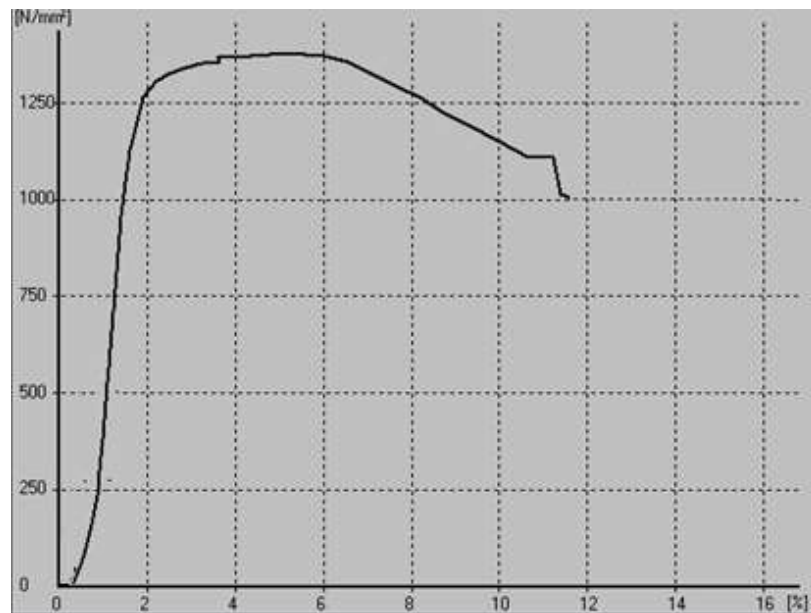


Fig IV. 2 : Courbe de traction (contrainte- déformation à la température de revenu 450°C).

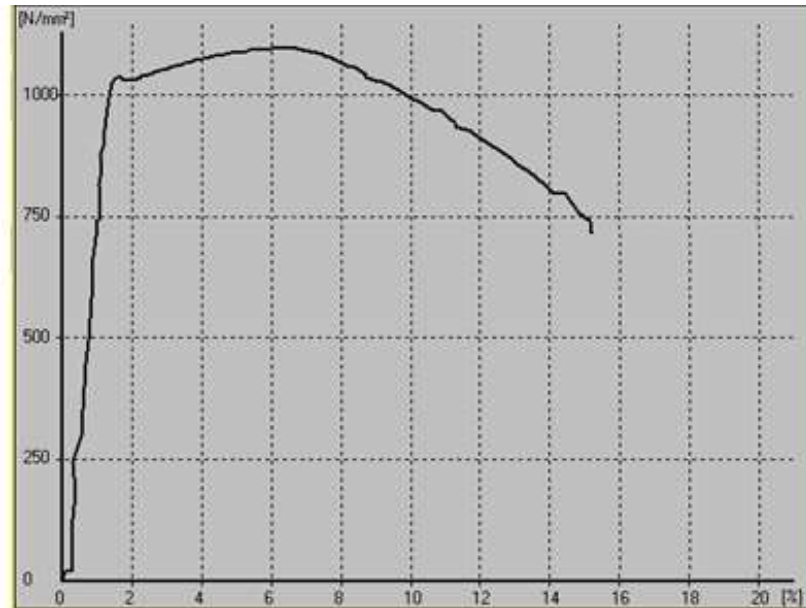


Fig IV. 3 : Courbe de traction (contrainte- déformation à la température de revenu 550°C).

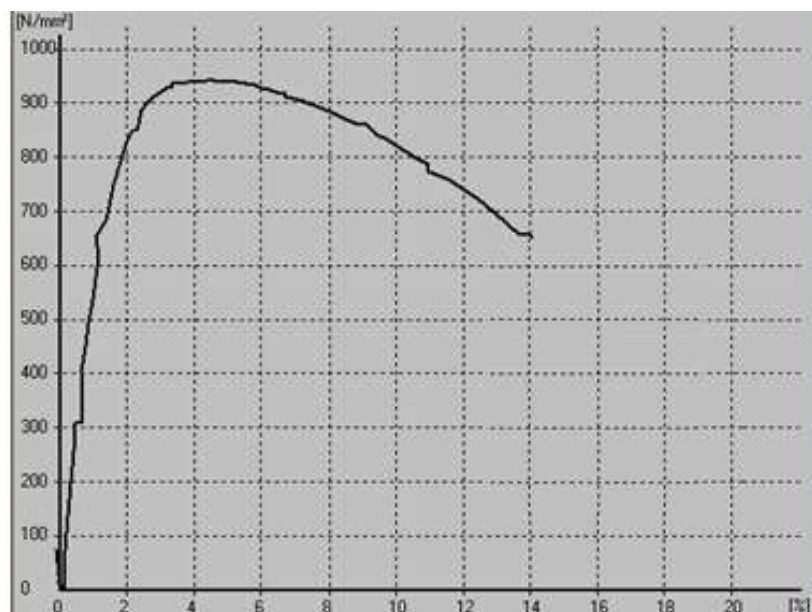


Fig IV. 4 : Courbe de traction (contrainte- déformation à état de livraison non traité.

IV.3. Résultats obtenus par traitement thermique de revenu

Les caractéristiques mécaniques obtenues par les essais de traction sur le matériau étudié en fonction des traitements de revenu sont regroupées dans le tableau IV.1. Dans ce tableau, sont reportées les valeurs de la dureté (HV), de la résistance maximale à la rupture (R_r), de l'allongement à la rupture (A%), du coefficient de striction (Z%).

Tempe de revenu [°C]	HV	Rm	A%	Z
350	517	1569.64	4.70	53.47
450	407	1397.41	5.33	54.05
550	360	1099.43	6.54	60.19
Non traité	334	944.60	6.17	59.19

Tableau IV. 1 : Caractéristiques mécaniques en fonction des traitements thermiques de revenu.

IV.3. 1. Variation de la dureté en fonction de la température de revenu

La variation de la dureté HV en fonction de la température de revenu est représentée sur la figure IV.5. Les données relatives à l'état non traité sont données à titre de comparaison. On constate sur cette figure, une décroissance des valeurs de la dureté avec l'élévation de la température de revenu.

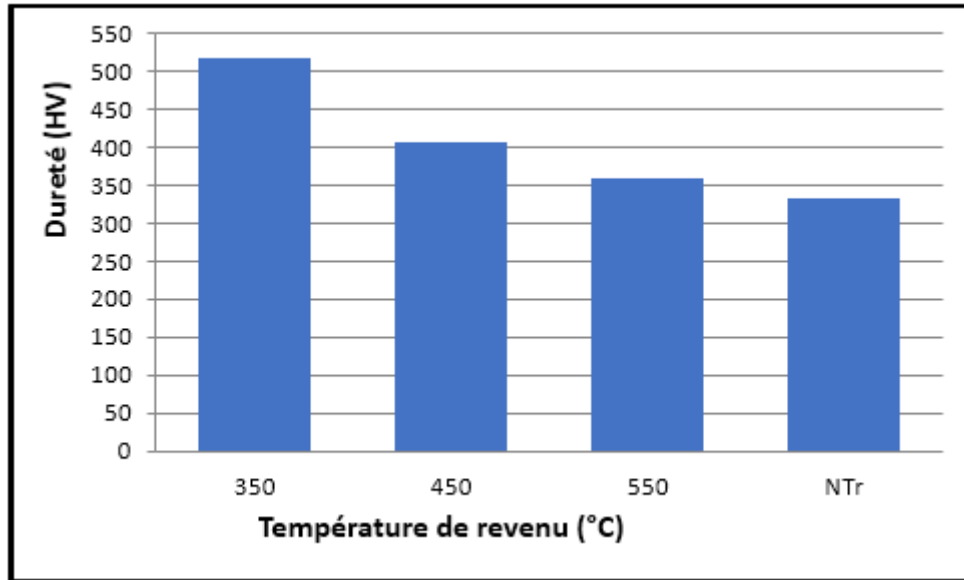


Fig IV. 5 : Histogramme de la variation de la dureté en fonction des traitements thermiques de revenu.

IV.3.2. Variation de la Résistance à la rupture en fonction de la température de revenu.

La variation de la résistance à la rupture en fonction de la température de revenu est représentée sur la figure IV.6. On note que la résistance à la rupture pour le matériau qui a subi un traitement de revenu à 350°C se situe à un niveau supérieur correspond à une charge maximale 44,060 KN, comparée avec le matériau qui a subi un traitement de revenu à 550°C (charge maximale 30,960 KN) ou avec le matériau non traité (charge maximale 26,600 KN).

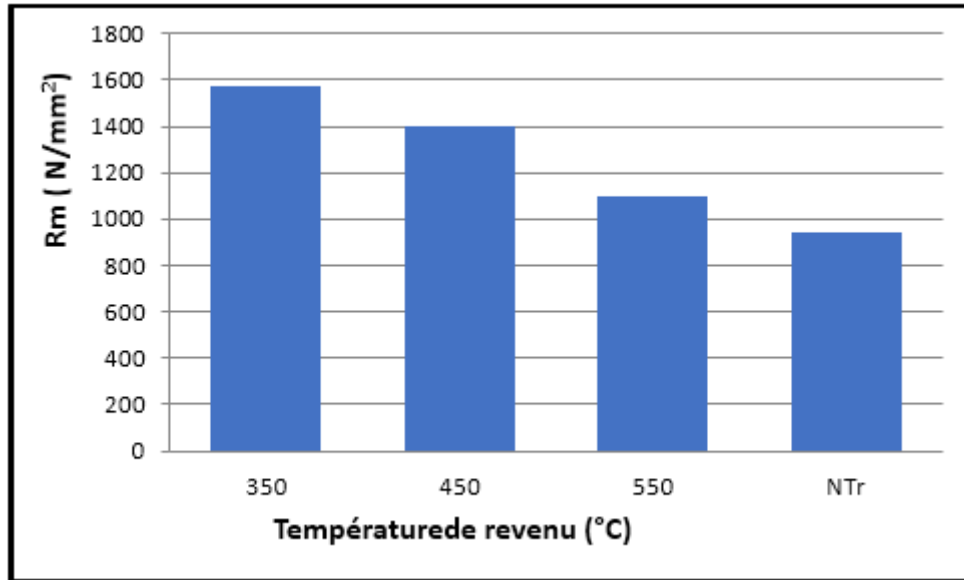


Fig IV. 6 : Histogramme de la variation de la résistance à la rupture en fonction des traitements thermiques de revenu.

IV.3.3. Variation de l'allongement A % en fonction de la température de revenu

On remarque sur la figure IV.7, que la valeur de l'allongement A % du matériau est maximale à la température de revenu $550^{\circ}C$ et minimale à la température de revenu $350^{\circ}C$.

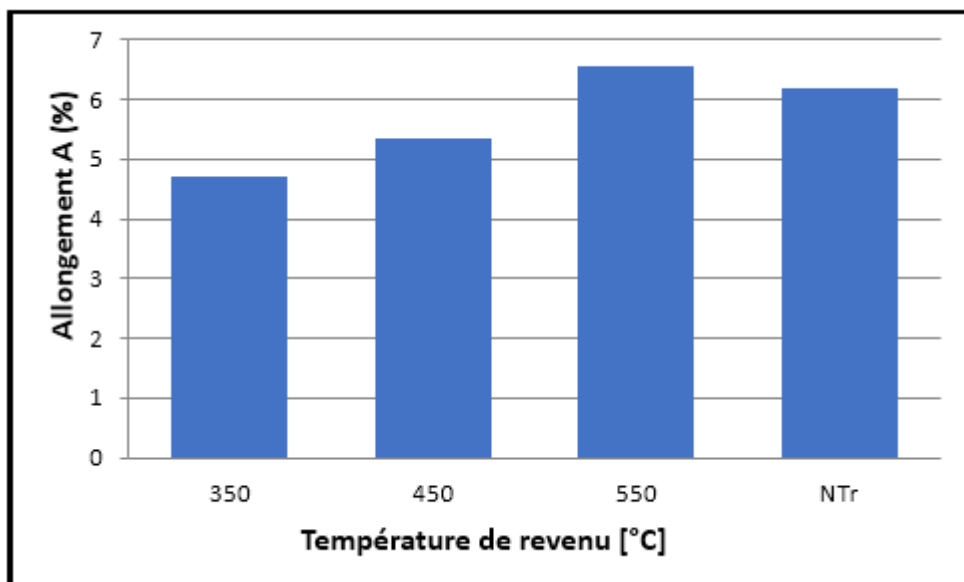


Fig IV. 7 : Histogramme de la variation de l'allongement A % en fonction des traitements thermiques de revenu.

IV.3.4. Variation du Coefficient de striction Z% en fonction de la température de revenu

La figure IV.8 présente les résultats obtenus du coefficient de striction en fonction de la température de revenu

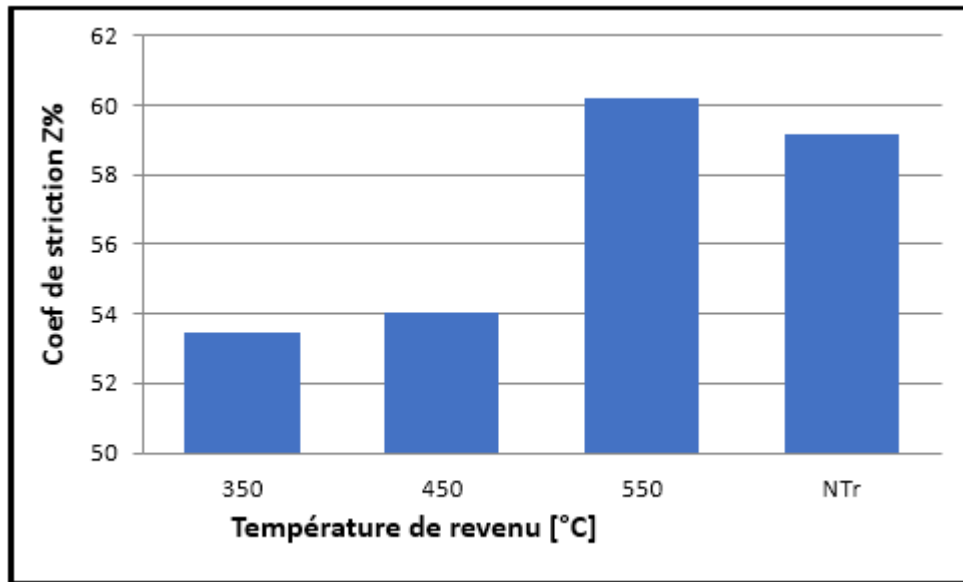


Fig IV. 8 : Histogramme de la variation du coefficient de striction Z% en fonction des traitements thermiques des revenus.

Les résultats des niveaux de dureté obtenus en fonction des températures du revenu réalisées dans la gamme de 350°C à 550 °C avec un pas de 100 °C pour un temps de maintien de 30 min. On observe que les différentes valeurs de la dureté obtenues concordent avec des études présentées par les auteurs [17] pour l'acier 42CrMo4. le revenu permet d'adoucir les effets de la trempe en produisant la martensite dite revenue sans trop modifier L'augmentation de la température de revenu provoque une diminution importante de la dureté jusqu'à une valeur de 360HV. Cette baisse de dureté est due probablement au degré relatif de grossissement des grains de la microstructure, autrement dit, la microstructure formée après ce cycle de traitement thermique présente des carbures précipités plus volumineux par rapport aux autres cycle thermiques appliqués [25].

L'augmentation de la température de revenu au-delà de 500 °C conduira à la jonction des carbures formés qui en fait, est la raison de l'importante diminution de la dureté.

L'augmentation du pourcentage des éléments d'addition tels que Mn (0.81%) et Cr (1.05%) justifie la croissance notable de la dureté du matériau en état non traité.

La rupture des échantillons est ductile, caractérisée par la présence de déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation lente des fissures avec grande consommation d'énergie. La ductilité de la rupture peut être souhaitée par le concepteur.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail que nous avons réalisé dans ce mémoire a pour objet de mieux comprendre l'influence des traitements thermiques appliqués : trempe et revenu à différentes températures de revenu, sur quelques propriétés mécaniques de l'acier faiblement allié 42CrMo4.

Pour cela, plusieurs dispositifs et techniques expérimentales ont été mises en œuvre, pour étudier cette influence, tels que les essais de traction et la micro dureté.

Les principaux résultats de ce travail sont concluants et en bon accord avec les travaux de recherche trouvés par d'autres auteurs. Ce travail peut nous donner les conclusions suivantes :

La recherche bibliographique a montré que les essais de tractions sont très importants dans les caractérisations des matériaux et la détermination de ses propriétés mécaniques.

L'acier faiblement allié 42CrMo4 est très important dans les différents secteurs industriels et technologiques, à cause de ses propriétés mécaniques requises.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques (dureté, allongement, résistance à la traction...etc.) varient sensiblement au cours de traitements thermiques de revenu.

L'augmentation de la température de traitement thermique de revenu diminue la dureté et la résistance à la rupture et par conséquent une augmentation de l'allongement et de la striction.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SILINI Baderzamane, ROUBACHE Mostapha "Etude de traitements thermochimiques Des aciers" Diplôme Master Académique. Université de M'sila. 2018-2019.
- [2] NF EN 10079. Construire acier, association d'idées pour l'architecteur. Classement AFNOR : A 40-001 décembre 1992.
- [3] SAHRAOUI Nabil, KORICHE Abdelghani " Etude d'élaboration et Caractérisation des Composés métalliques revêtant les aciers", Diplôme de Master Académique Université : M'sila 2016 /2017.
- [4] Mohamed Wessim Andolsi. " Désignation des aciers alliés et non alliés ". Concept Tec Mars 2020.
- [5] Mohammedi Taki Eddine. " Influence du chromage sur les caractéristiques mécaniques d'un acier faiblement allié de type (xc100) traité". Mémoire de Master. Université de Biskra Juillet 2019.
- [6] MOKRANI Kenza. " Microstructure et caractérisation d'un acier BS2". Mémoire de Master. Université de Biskra juillet 2019.
- [7] Les aciers, édition. SEYSSSES. France. Octobre 2007
- [8] BENSAAIDA Said "Cours CLASSIFICATION DES ACIERS ET DES FONTES", Université Mohamed KHIDER – Biskra.
- [9] J. Barralis et G. Maeder, Précis de métallurgie, Paris, Afnor, Nathan, 1991, 4^e éd. (ISBN 978-2-09-194017-5).
- [10] BERNIER Fabrice " Etude des propriétés mécaniques statiques et dynamiques de pièces d'acier élaborées par métallurgie des poudres" Thèse de Doctorat (génie métallurgique) décembre 2009.
- [11] Expondo Inspirations / Budownictwo i majsterkowanie / Types d'acier Auteur : Maciej Skorzępo février 1, 2021.
- [12] Frank MONTHEILLET, Laurent BRIOTTET, « Endommagement et ductilité en mise en forme », Techniques de l'Ingénieur, 10 juin 2009.

- [13] Dominique FRANÇOIS : « Essais de mesure de la ténacité - Mécanique de la rupture », École Centrale Paris Technique de l'ingénieur, 10 décembre 2007.
- [14] Makri Hocine " Cours chapitre 03 traitement thermique des aciers, module : Matériau" Université de Msila.
- [15] BENSAAIDA Said "Cours TRAITEMENTS THERMIQUES, Université de Biskra .
- [16] RAYMOND LANGEVIN "Guide de traitement thermique pour les opérateurs en traitement thermique " PERFORM. Bibliothèque et Archives Canada, 2015.
- [17] CHAOUCH Djamel, ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE L'ACIER FAIBLEMENT ALLIE 42CD4. THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS DE MOSTAGANEM, Janvier 2012.
- [18] Guide d'auto apprentissage pour les opérateurs en traitement thermique, Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique Industrielle PERFORM PERFORM. Canada, 2015.
- [19] C. CHAUSSIN, G. HILLY "Métallurgie". Alliages métalliques, tome 1, 1976.
- [20] R. BUTIN, M. PINOT. "Fabrications mécaniques". Technologie, tome 2, 1981.
- [21] RFAOUI Ali et CHAKER Med Amir "Cours Matériaux Métalliques Traitements Thermiques et thermochimiques", ISET Kasserine. Année 2009/2010.
- [22] BEN ZEMMOURI Lamouri et TAYEB BEY Nacer" Etude sur la caractérisation de comportement mécanique d'un alliage aluminium par les essais mécaniques" Diplôme de Master Académique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA 2018/2019.
- [23] CHERIFI Naima" Influence des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques d'un acier à outils pour travail à chaud (X38CrMoV5-1)". Diplôme de Master Académique. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2016.
- [24] Athman. M et al. "Influence des paramètres de traitement thermique sur les propriétés mécaniques et la microstructure d'un acier a outils de travail à chaud". 3ème Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Matériaux et Alliages (IC-WNDT-MI'12) Oran du 26 au 28 Novembre 2012.
- [25] P.B. "Madakson, The friction behaviour of materials". Wear 87(1983) 191-206.

Résumé

Les propriétés mécaniques de l'acier font partie des conditions nécessaires à connaître pour le bon fonctionnement des systèmes mécaniques dans l'industrie. Notre étude dans ce mémoire consiste à analyser les caractéristiques mécaniques de l'acier faiblement allié 42CrMo4. Nous considérons une approche expérimentale basée sur l'influence de différents traitements thermiques (trempe et revenu à différentes températures) sur le comportement de l'acier étudié en traction. Les caractéristiques mécaniques recherchées concernent la dureté, la résistance à la rupture, l'allongement et le coefficient de striction. Après la réalisation des tests de traction, il a été observé qu'il existe une réciprocity entre la température de revenu d'une part et la dureté du matériau et la résistance à la rupture d'autre part. Une certaine proportionnalité remarquée entre la dureté, l'allongement et le coefficient de striction.

ملخص

تعد الخواص الميكانيكية للصلب جزءا من الشروط الضرورية لمعرفة الأداء السليم للأنظمة الميكانيكية في الصناعة. تتكون دراستنا في هذه الأطروحة من تحليل الخصائص الميكانيكية لسبائك الفولاذ ضعيف المزج. قمنا بتجارب تعتمد على تأثير المعالجات الحرارية المختلفة (التصلب والارجاع في درجات حرارة مختلفة) على سلوك الفولاذ المدروس بالشد. تتعلق الخصائص الميكانيكية المطلوبة بالصلابة وقوة الكسر والاستطالة ومعامل التضيق. بعد اجراء اختبارات الشد، لوحظ ان هناك علاقة عكسية بين درجة حرارة الارجاع من جهة وصلابة المادة ومقاومة القطع من جهة أخرى. لوحظ كذلك تناسب بين الصلابة والاستطالة ومعامل التضيق.

Summary

The mechanical properties of steel are part of the necessary conditions to know for the proper functioning of mechanical systems in industry. Our study in this thesis consists in analyzing the mechanical characteristics of low alloy steel 42CrMo4. We consider an experimental approach based on the influence of different heat treatments (quenching and tempering at different temperatures) on the behavior of the steel studied in tensile test. The mechanical characteristics sought concern hardness, breaking strength, elongation and the coefficient of striction. After carrying out the tensile tests, it was observed that there is a reciprocity between the tempering temperature on the one hand and material hardness and breaking strength on the other hand. A certain proportionality noticed between the hardness, the elongation and the coefficient of necking.