



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté du génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Option : fabrication mécanique et productive

Thème

*L'étude de l'influence de traitement thermique
sur la déformabilité des tôles minces*

Etudié par :

Mr. GANOUN Ammar Amechtoh

Mr. Hamdi Omar

Dirigé par :

Mr FERHOUM. R

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimerons nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous remerciant tout d'abord le bon dieu de m'avoir donné la force, la volonté et la patience pour l'élaboration de notre travail.

Nous remerciant également notre encadreur Monsieur FERHOUM.R et monsieur OULD OUALIM qui nous a encadrées avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Ces conseils, ces encouragements et ça disponibilité nous ont été bien utile, notamment pour la rédaction de ce projet.

Nous remercîments s'adressent aussi en particulier aux personnels de Hall de technologie de Oued Aissi et de laboratoire de RDM et SDM au niveau de département de génie mécanique qui nous aussi aidé en nous donnant des informations cruciales.

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce travail.

Enfin nous tenons à remercier sincèrement l'ensemble du corps enseignant de l'université UMMTO- faculté de génie mécanique.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

❖ *Mes très chers parents :*

Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.

Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux,

Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

❖ *A mes frères, mes sœurs et mes neveux,*

❖ *A Tous mes amis et tous ceux que j'aime.*

❖ *A tous les amies de ma promotion en master 2 fabrication mécanique et productique.*

❖ *A Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.*

Ammar Amechtoh GANOUN

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

❖ *Ma chère mère qui m'a encouragé durant toutes mes études, et qui sans elle, ma réussite n'aura pas eu lieu.
Qu'elle trouve ici mon amour et mon affection
Je prie Dieu de la bénir, de veiller sur elle, en espérant qu'elle sera toujours fière de moi.*

❖ *A mon frère, ma sœur*

❖ *A Tous mes amis et tous ceux que j'aime.*

❖ *A tous les amis de ma promotion en master 2 fabrication mécanique et productique*

❖ *A Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de ce travail.*

Omar Hamdi

Sommaire

Sommaire

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

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I.1	Introduction.....	2
I.2	Définition d'acier.....	2
I.3	Diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-C).....	3
I.3.1	Eléments de base.....	4
	a.Le fer.....	4
	b.Le carbone.....	6
I.3.2	Constituants du diagramme Fer-Carbone.....	7
	a.La ferrite.....	7
	b.La perlite.....	7
	c.L'austénite.....	7
	d.La ledeburite.....	8
	e.La Cémentite.....	8
	f.Le graphite (carbone pur).....	9
I.4	Caractéristiques fondamentales des aciers.....	9
I.5	Classification des aciers.....	10
I.5.1	Classification par composition chimique.....	11
I.5.1.a	Aciers non alliés.....	11
I.5.1.b	Aciers fortement alliés.....	11
I.5.1.c	Aciers rapide.....	12
I.5.1.d	Aciers faiblement alliés.....	13
	• Exemples des familles d'aciers faiblement alliés.....	15
	• Applications des aciers faiblement alliés.....	15
I.5.2	Classification selon leur domaine d'utilisation.....	16
I.5.2.1	Aciers à outils.....	16
I.5.2.2	Aciers inoxydables.....	17
I.6	Influence des éléments d'addition.....	17
I.6.1	Manganèse.....	18

Sommaire

I.6.2 Nickel.....	18
I.6.3 Silicium.....	18
I.6.4 Chrome.....	18
I.6.5 Molybdène.....	19
I.7 Oxydation des aciers à haute température.....	19
I.8 Résistance à l'oxydation des aciers.....	20

Chapitre II : Traitement thermique des aciers

II.1 Introduction.....	21
II.2 Définition.....	21
II.3 Cycle d'un traitement thermique.....	22
II.4 Buts et rôle des traitements thermiques.....	23
II.5 Principaux types de traitements thermiques.....	24
II.5.1 Lerecuit de l'acier.....	24
II.5.1.1 Le but de recuit.....	24
II.5.1.2 Les principes de recuit.....	25
• Chauffage.....	25
• Maintenu.....	25
• Refroidissement.....	26
II.5.1.3 Les types de recuit.....	26
II.5.1.3.a Recuit demandant des températures supérieures à ac1.....	26
Le recuit d'homogénéisation.....	26
Recuit de régénération (ou d'affinage structural).....	27
Le recuit complet.....	29
II.5.1.3.b Recuit demandant des températures inférieures à ac1 :.....	30
Le recuit de normalisation.....	30
Recuit de détente.....	32
Le recuit de recristallisation.....	32
Le recuit de sphéroïdisation : (ou de COALESCENCE).....	32
II.5.2 La trempe de l'acier.....	33
II.5.2.1 Austénitisation.....	35
II.5.2.2 Choix du temps de maintien.....	35
II.5.2.3 Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe.....	36

Sommaire

II.5.2.4 Choix du milieu de trempe	37
L'essai Jominy.....	37
La trempe à l'eau.....	38
La trempe à l'huile	38
La trempe à l'air forcée	38
La trempe sous vide.....	38
II.5.2.5 Les différents types de trempe.....	38
II.5.2.5.a La trempe martensitique	38
II.5.2.5.b La trempe bainitique.....	39
II.5.2.5.c La trempe austénitique (ou hypertrempe).....	40
II.5.2.5.d La trempe superficielle	40
II.5.3 Revenu.....	41
II.5.3.1 Choix des conditions de revenu après trempe	41
II.5.3.2 Différents types de revenu	42
Revenu de relaxation ou de détente.....	42
Revenu de structure ou classique	42
Revenu de durcissement.....	42
II.6 La formation des grains	43
II.6.1 Lagermination.....	43
II.6.2 Lacristallisation	43
II.6.3 La variation de la grosseur des grains.....	44
II.6.4 L'affinage des grains d'acier	44
II.6.5 Le grossissement des grains	45
II.6.5.a La caractérisation de la grosseur des grains.....	46
II.6.5.b L'influence de la grosseur des grains sur les propriétés mécaniques.....	47

Chapitre III : étude expérimentale

III.1 Introduction	48
III.2 Présentation de l'acier	48
III.2.1 Définition de l'acier.....	48
III.2.2 Composition chimique en %	48
III.2.3 Géométrie de l'éprouvette.....	49
III.3 Traitement thermique	49
III.3.1 Traitement thermique a 950°C et 1100°C	50

Sommaire

III.4. Présentation des essais mecaniques utilisés dans notre étude	51
III.4.1 Essai de flexion	51
III.4.1.1 Réalisation des essais de flexion trois points	52
III.4.1.2 Dispositif de l'essai de flexion trois points	53
III.4.2 Essais de dureté	55
III.4.2.1 Polissage des echantillons.....	56

Chapitre IV : résultats et interprétation

IV.1 Introduction	58
IV.2 Résultats des essais de flexion trois points	58
IV.2.1 La superposition des courbes de flexion trois points	60
IV.2.2 évolution de la flèche en fonction des différents traitements thermiques.....	61
IV.3 Résultats des essais de la dureté Vickers	63
Conclusion Générale et prespective	65

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les aciers

Figure I.1: aciers au carbone et aciers faiblement alliés.	3
Figure I.2: Diagramme d'équilibre Fer-Carbone	4
Figure I.3: Structure cristalline de Fer α	5
Figure I.4: Structure cristalline de Fer γ	5
Figure I.5: Structure cristalline de la ferrite (Réseau cubique centré)	7
Figure I.6: Structure cristalline de l'austénite (réseau CFC).....	8
Figure I.7: Influence des éléments gamma gène et alpha gène sur le diagramme d'équilibre des alliages binaires Fe-C (Fe ₃ C).	10
Figure I.8: aciers inoxydables.	17

Chapitre II : traitement thermique des aciers

Figure II.1: Le cycle thermique.....	23
Figure II.2: Cycle thermique du recuit.	25
Figure II.3: cycle thermique de recuit d'homogénéisation.	27
Figure II.4: cycle thermique de Recuit de régénération (ou d'affinage structural).	28
Figure II.5 : cycle thermique de recuit complet.	30
Figure III.6: cycle thermique de recuit de normalisation.	31
Figure II.7:Le cycle de la trempe	34
Figure II.8:La formation des grains d'acier.	43
Figure II.9:La frontière des grains.....	44
Figure II.10:L'affinage des grains.....	45
Figure II.11:Le grossissement des grains.....	46

Chapitre III : Partie expérimentale

Figure III.1 : éprouvette utilisé.....	49
Figure III.2 : four électrique utilisé et sont régulateur.	50
Figure III.3 : flexion trois points.	51
Figure III.4 : machine de traction hydraulique.....	52
Figure III.5 : dspositif avant modification.	53
Figure III.6 : dispositif après modification.....	53

Liste des figures

Figure III.7 : plaque d'appui.	54
Figure III.8 : fer plat de fixation.....	54
Figure III.9 : dispositif final de l'essai de flexion trois points.	55
Figure III.10 : polisseuse.	56
Figure III.11 : Les échantillons avant et après polissage.	56
Figure III.12 : Duromètre.	56
Figure III.13 : la surface d'échantillon tester.	57
Figure III.14 : principe de dureté Vickers.	57

Chapitre IV : résultats et interprétation

Figure IV.1 : Evolution effort déplacement pour éprouvette brute.....	58
Figure IV.2: Effort déplacement (T= 950°C, refroidissement à l'eau).....	58
Figure IV.3 : Effort – déplacement (T= 950 °C, refroidissement à l'huile).....	59
Figure IV.4: effort – déplacement (T= 950 °C, refroidissement à l'aire).....	59
Figure IV.5 : Effort- déplacement (T= 1100 °C, refroidissement à l'eau).....	59
Figure IV.6 : Effort – déplacement (T= 1100 °C, refroidissement à l'huile).....	59
Figure IV.7 :Effort – déplacement (T= 1100 °C, refroidissement à l'air libre).....	59
Figure IV.8 : Superposition des courbes de flexion trois points pour chaque traitement.	60
Figure IV.9 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 500N.....	61
Figure IV.10 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 1000N.....	61
Figure IV.11 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 1500N.....	62
Figure IV.12 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 1750N.....	62
Figure IV.13 : Courbe de la dureté en fonction de type de traitement.	64

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : généralité sur les aciers

Tableau I.1: Caractéristique du Carbone.....	6
Tableau I.2: désignation des éléments selon les métallurgistes	12
Tableau I.3: coefficient multiplicateur	13
Tableau I.4: Aciers faiblement alliés usuelle	14
Tableau I.5: Les classes d'aciers à outils	16

Chapitre II : traitement thermique des aciers

Tableau II.1: Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours.	36
Tableau II.2:L'échelle de classification des grains.	46
Tableau II.3:L'influence de la grosseur des grains sur les propriétés mécaniques.	47

Chapitre III : étude expérimentale

Tableau III.1 : composition chimique de l'acier xc38 en %	48
---	----

Chapitre IV : résultats et interprétation

Tableau IV.1 : les valeurs de la dureté Vickers pour les échantillons.	63
---	----

Liste des symboles

Liste des symboles

α : La Ferrite (diagramme Fe-C).

γ : L'austénite (diagramme Fe-C).

δ : Fer (diagramme Fe-C).

CFC : Cubique à faces centrées.

CC : Cubique centrée.

Ni : le nickel.

Mn : manganèse.

Hv : la dureté Vickers.

B : Bainite.

Cr : Chrome.

t : Le temps en seconde.

T : Température.

Mf : La fin de transformation de la martensite.

Mo: le molybdène.

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction

Depuis plusieurs années, l'homme était toujours à la recherche de matériaux de qualité, d'un aspect décoratif (aspect présentable vis à vis de la touche, visuel,...etc.) et résistants à la flexion, d'où le traitement de surface métallique. Les traitements et revêtements de surface constituent actuellement un des moyens essentiels pour améliorer les propriétés fonctionnelles des métaux.

L'acier jouait un rôle majeur dans notre vie quotidienne. Son intérêt et sa demande le qualifie pour qu'il soit à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles.

L'acier a opéré sa révolution technologique pour être aujourd'hui présent dans presque tous les secteurs de l'activité économique. Plusieurs facteurs expliquent cette importance sur le plan mécanique, les aciers ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique, et à cause de leurs meilleures propriétés aussi physicochimiques que mécaniques qu'ils possèdent, ils se prêtent facilement à une production en masse. L'acier demeure le seul matériau capable tout à la fois de soutenir des efforts et des charges considérables, de conserver ses vertus à haute et basse température et de résister à la flexion, la traction et la corrosion...Ets. On peut modifier également leurs propriétés en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle des aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements mécaniques prenant en surface ou à cœur de la matière, on parle alors des aciers traités.

Le but de notre travail consiste à l'étude de l'influence de traitement thermique sur la déformabilité des tôles minces.

Afin d'atteindre cet objectif, différentes étapes ont été adoptées :

La première étape est consacrée à la recherche bibliographique, elle est composée de deux chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les aciers, en particulier, nous sommes intéressés à définir les aciers faiblement alliés.
- Le deuxième chapitre consiste à présenter le traitement thermique des aciers en général et formation de grossissement des grains.

La deuxième étape est composée de deux chapitres :

- Le troisième chapitre, défini l'étude expérimentale, il décrit les essais mécaniques (l'essai de flexion trois points et l'essai de dureté Vickers).
- Le quatrième chapitre, concerne la dernière partie de ce mémoire qui regroupe les résultats expérimentaux et leurs interprétations.

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle nous avons résumé les points essentiels de notre travail ainsi que par des perspectives envisagées.

CHAPITRE I: généralité sur les aciers

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I.1 Introduction :

Un acier est un alliage métallique constitué principalement de fer et de carbone (dans des proportions comprises entre 0,02 % et 2 % en masse pour le carbone).

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés de l'acier. Il existe d'autres alliages à base de fer qui ne sont pas des aciers, comme les fontes et les ferroalliages.

L'acier est élaboré pour résister à des sollicitations mécaniques ou 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).

I.2 Définition d'acier :

On appelle acier un matériau dont le fer est l'élément prédominant, sa teneur en carbone est généralement inférieure à 2 % et il contient d'autres éléments ; un nombre limité d'aciers au chrome peut avoir une teneur en carbone supérieure à 2 %, mais cette valeur de 2 % est la teneur limite courante qui sépare l'acier de la fonte ».

À la lecture de cette définition, on constate que la limite supérieure de la teneur en carbone des alliages Fe-C susceptibles de s'appeler des aciers (par différence avec les fontes) est délicate à préciser. C'est la raison pour laquelle il peut être préférable d'adopter un point de vue plus métallurgique en prenant en compte la différence intervenant lors de la solidification de ces alliages.



Figure I.1: aciers au carbone et aciers faiblement alliés.

I.3 Diagramme d'équilibre Fer-Carbone (Fe-C) :

Il est probable que l'alliage binaire du fer et du carbone soit le plus important de tous les systèmes d'alliages. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles [1].

La figure I.2 représente les différentes températures importantes pour l'acier et la fonte. Il représente la composition des phases et la structure des alliages dont la concentration du fer et du carbone varie.

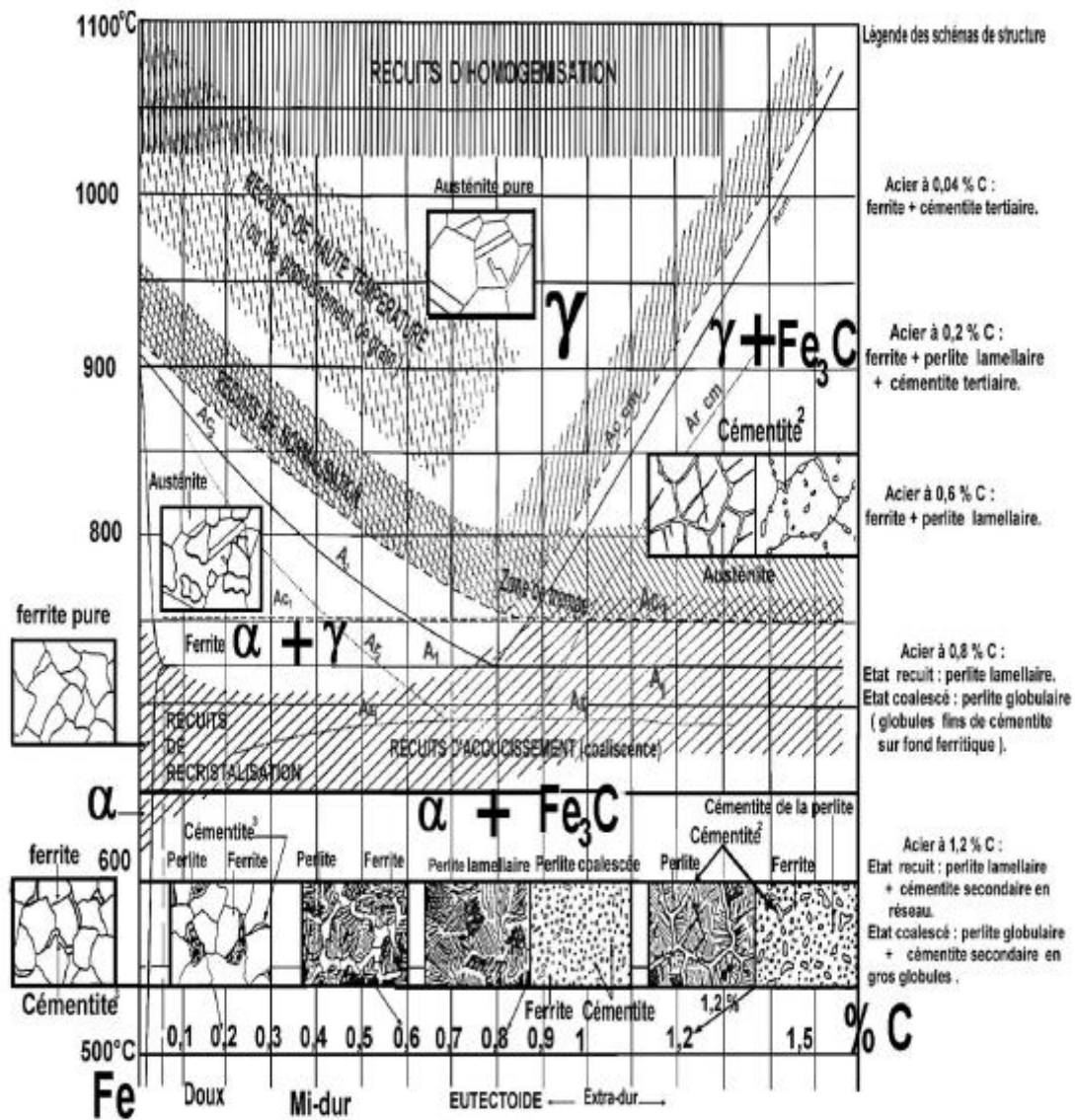


Figure I.2: Diagramme d'équilibre Fer-Carbone [2]

I.3.1 Éléments de base :

Le diagramme d'équilibre se compose des éléments suivants :

a. Le fer

Le fer existe sous trois variétés allotropiques, il existe sous la forme de fer alpha, gamma et delta de structures cristallines : CC et CFC.

Fer α :

Il a une structure cristalline cubique centrée qui n'existe qu'en dessous de 906°C. Ne dissout pratiquement pas le carbone. Il est très malléable.

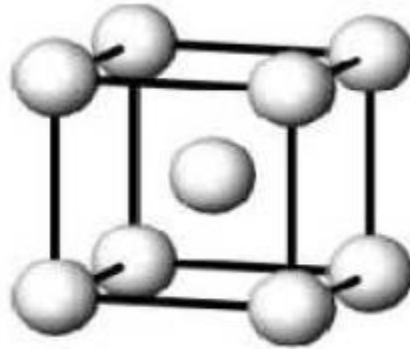


Figure I.3: Structure cristalline de Fer α .

Fer γ :

Il a une structure cristalline cubique à face centrée qui n'existe qu'entre 906°C et 1400°C. Il dissout facilement le carbone.

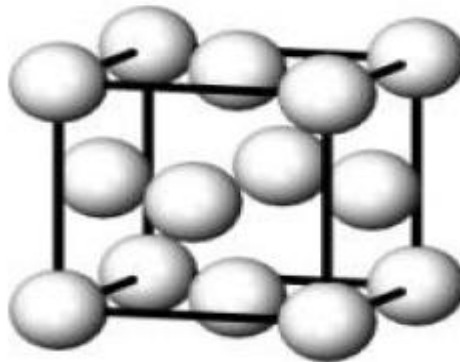


Figure I.4: Structure cristalline de Fer γ

Fer δ :

Cette forme existe entre la température 1401°C et 1538°C température à la quelle fusionne le fer, sa structure est cubique centres (cc) .son paramètre cristallin varie entre 0.29260.2935 nm.

b. Le carbone :

C'est un élément non métallique peut abondant (0,1% en masse dans l'écorce terrestre). Il est rare à l'état libre, on le rencontre à l'état combiné dans toutes les substances végétales et animales comme dans le pétrole, le charbon, le bois, la houille etc.... Ses caractéristiques sont les suivantes :

Tableau I.1: Caractéristique du Carbone

Numéro atomique	Masse atomique (g/mole)	Rayon atomique (Å)	Masse volumique (g/cm ³)	Température de fusion (°C)
6	12	0.77	2.5	3500

Le carbone dont le point de fusion est supérieur à 3500°C est soluble dans le fer et peut se cristalliser à l'état pur en formant le graphite ou se combiner avec le fer en formant une phase intermétallique Fe₃C appelée cémentite ou carbone de fer.

- La phase intermétallique cémentite a une structure très compliquée et elle est très dure.
- La Formation du graphite ou de la cémentite dépend des éléments d'alliage qui accompagnent le fer et surtout du type de refroidissement (vitesse de refroidissement).
- Lorsque le refroidissement du métal liquide est lent les atomes de carbone se cristallisent en formant le graphite et selon le cas contraire, lorsque le refroidissement est rapide on a la formation de la cémentite (Fe₃C), qui ne peut se décomposer à la température ambiante, mais à un maintien de température supérieure à 500°C et d'une durée très longue. [2]

I.3.2 Constituants du diagramme Fer-Carbone :

Le diagramme Fer-Carbone met en évidence la présence des constituants suivants :

a. La ferrite :

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer α , elle se cristallise dans un réseau cubique centré (CC).

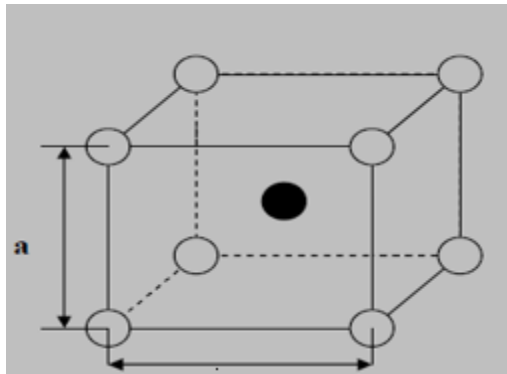


Figure I.5: Structure cristalline de la ferrite (Réseau cubique centré)

b. La perlite :

Formée d'agrégats intimes de ferrite et de cémentite d'où la composition est 87,6 % de ferrite et de 12,4 % de cémentite.

c. L'austénite :

C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer γ ; elle se cristallise dans un réseau cubique à faces centrées.

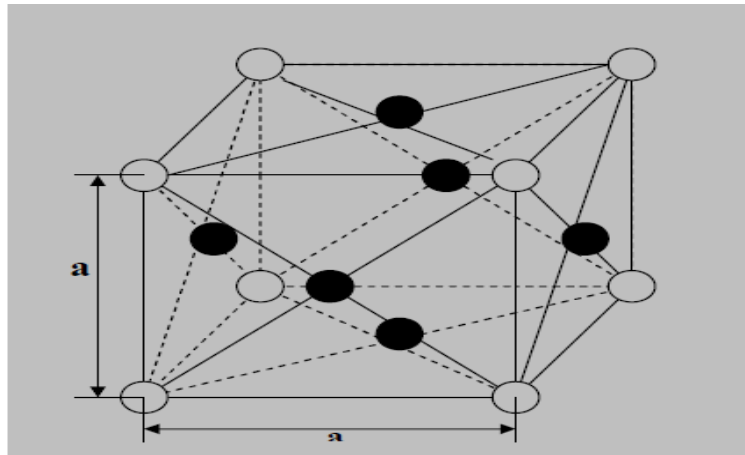


Figure I.6: Structure cristalline de l'austénite (réseau CFC)

d. La ledeburite :

Les alliages dont la teneur en carbone excède 2,06%, donne naissance au refroidissement à un eutectique, mélange de cémentite et d'austénite correspondant à une teneur en carbone de 4,3 %, c'est la ledeburite.

e. La Cémentite :

C'est un composé chimique de dureté élevée, elle représente différents modes de formation :

- Cémentite primaire

Elle apparaît sur le diagramme Fer- carbone au début de la solidification des alliages hyper eutectiques.

- Cémentite secondaire

Elle est libérée par l'austénite pendant le refroidissement entre 1147°C et 723 °C.

- **Cémentite tertiaire**

Elle est libérée par la ferrite pendant le refroidissement au-dessus du palier eutectoïde

f. Le graphite (carbone pur) :

Le graphite est la forme stable de la phase riche en carbone, il remplace la cémentite dans le diagramme Fer- carbone, et il cristallise dans le système hexagonal [3].

I.4 Caractéristiques fondamentales des aciers :

La solubilité des éléments d'alliages diffère d'une forme allotropique du fer à une autre. Ceci entraîne l'existence de domaines de transformations très différentes en présence d'éléments d'addition. Dans le fer pur, le passage du fer α au fer γ se produit à une température bien définie. La présence d'un élément d'addition provoque l'apparition d'un domaine plus ou moins étroit dans lequel les deux variétés allotropiques peuvent coexister en équilibre [4].

Les diagrammes d'équilibre Fer - Carbone permettent de classer les éléments d'addition en deux types :

- 1) Eléments stabilisateurs d'austénite ou gamma gène (type A).
- 2) Eléments stabilisateurs de ferrite ou alpha gène (type B)

a. Eléments gamma gènes de type A

Dans ce cas l'élément d'addition élargit le domaine de stabilité de l'austénite en abaissant la température de transformation $\alpha \leftrightarrow \gamma$ et en élevant la température de transformation $\gamma \leftrightarrow \delta$. La région biphasée ($\gamma + \delta$) atteint le domaine de fusion. Le domaine ($\alpha + \gamma$) est déporté vers la température ambiante sous l'action de certains éléments (exemple : Mn, Ni, Co).

b. Eléments alpha gènes de type B

Les éléments de ce type rétrécissent le domaine de stabilité de la phase γ et, finalement, le suppriment. Le domaine austénitique est entouré d'une région biphasée ($\alpha + \gamma$) ou ($\delta + \gamma$) non coupée par des domaines de stabilité de composés intermétalliques ou de solutions solides dans l'élément d'addition (exemple : Si, Cr, W, Mo, P, V, Ti, Be, Sn, Sb, As, Al voir la figure I.7).

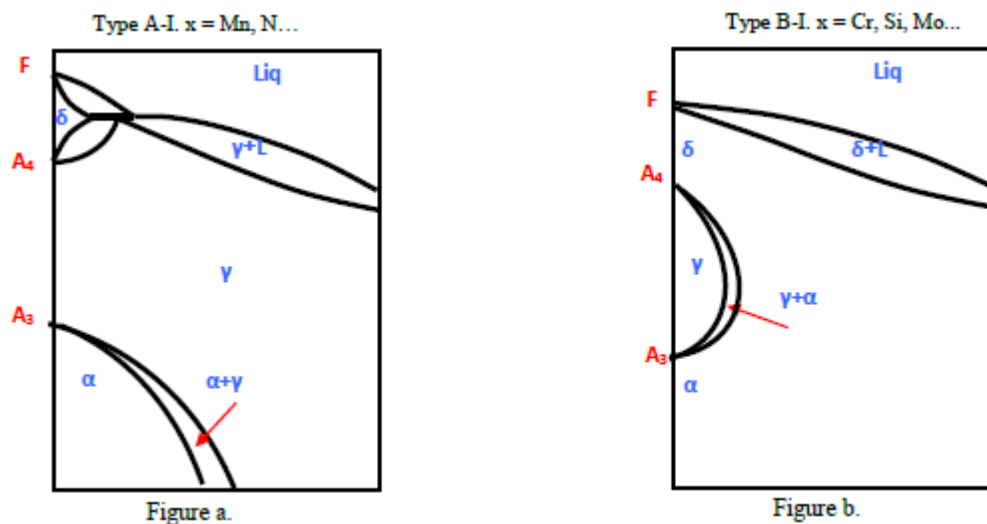


Figure I.7: Influence des éléments gamma gène et alpha gène sur le diagramme d'équilibre des alliages binaires Fe-C (Fe₃C).

I.5 Classification des aciers :

Du fait du nombre élevé d'éléments ajoutés au fer et de la gamme étendue de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes.

On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation [5].

I.5.1 Classification par composition chimique :

I.5.1.a Aciers non alliés :

(Teneur en Manganèse $\leq 1\%$)

La désignation se compose de la lettre multipliée par 100.

Exemple :

C22 Acier non allié de 0.22 % de Carbone.

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

Exemple :

GC40 Acier non allié obtenu par moulage de 0.40 % de Carbone.

Principaux aciers non alliés :

C22 C25 de construction mécanique

C30, C35, C40, C45, C50, C55, ces aciers conviennent aux traitements thermiques.

I.5.1.b Aciers fortement alliés :

Teneur d'au moins un élément d'alliage $\geq 5\%$.

La désignation commence par la lettre **X** suivie de la même désignation que celle des aciers faiblement alliés à l'exception des valeurs des teneurs qui sont des pourcentages nominaux réels.

Exemple :

XC 30 Cr 13 Aciers fortement alliés de 0,30 % de Carbone – 13% de Chrome.

Nuances usuelles :

X 4 Cr Mo S 18, X 30 Cr 13, X 2Cr Ni 19-11, X 5 Cr Ni 18-10, X 5 Cr Ni Mo 17-12, X 6 Cr Ni Ti 18-10, X 6 Cr Ni Mo Ti 17-12.

I.5.1.c Aciers rapide :

La désignation comprend successivement les symboles suivants :

- ✓ Les lettres **HS**
- ✓ Les nombres indiquant les valeurs des éléments d'alliage dans l'ordre Tungstène **W**, Molybdène **Mo**, Vanadium **V**, Cobalt **Co**
- ✓ Chaque nombre représente la teneur moyenne.

Exemple :

- ✓ HS 8,5 – 3,5 – 3,5 – 11.
- ✓ 8,5% de tungstène, 3,5% de molybdène, 3,5% de vanadium, 11% de cobalt.

Tableau I.2: désignation des éléments selon les métallurgistes

Elément	Symbole	Elément	Symbole	Elément	Symbole
Aluminium	A	Etain	E	Silicium	S
Antimoine	R	Fer	Fe	Soufre	F
Azote	Az	Magnésium	G	Tantale	Ta
Béryllium	Be	Manganèse	M	Titane	Ti
Bismuth	Bi	Molybdène	D	Tungstène	W
Bore	B	Nikel	N	Vanadium	V
Cadmium	Cd	Niobium	Nb	Zinc	Z
Chrome	C	Phosphore	P	Zirconium	Zr
Cobalt	K	Plomb	Pb		
Cuivre	U	Sélénium	Se		

I.5.1.d Aciers faiblement alliés :

Ce sont des aciers où la teneur en manganèse est supérieure ou égale à 1% et où la teneur de chaque élément d'alliage est inférieure à 5%.

- **La désignation comprend dans l'ordre :**
 - ✓ Un nombre entier, égal à cent fois pourcentage de la teneur moyenne en carbone.
 - ✓ Un ou plusieurs groupes de lettres qui sont les symboles chimiques des éléments d'addition rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes.
 - ✓ Une suite de nombre rangé dans le même ordre que les éléments d'alliage, et indiquant le pourcentage de la teneur moyenne de chaque élément.
 - ✓ Les teneurs sont multipliées par un coefficient multiplicateur variable en fonction des éléments d'alliage (voir tableau 3 ci-dessous).

Tableau I.3: coefficient multiplicateur

Coefficient multiplicateur			
Elément d'alliage	Coéf.	Elément d'alliage	Coéf.
Cr,Co,Ni,Si,W	4	Ce,N,P,S	100
Al,Be,Cu,Mo,Nb,Pb,Ta,Ti,V,Zr	10	B	1000

Exemple : 55 Cr 3

55 Cr 3 :

- ✓ Acier faiblement allié
- ✓ 0,55% de carbone
- ✓ 0,75% de Chrome (3 :4 = 0,75)

Exemple : 54 Cr V 4

54 Cr V 4 :

- ✓ Acier faiblement allié
- ✓ 0,55% de carbone
- ✓ 1% de Chrome (4 :4 = 1)

Exemple : 30 Cr Ni Mo 6

30 Cr Ni Mo 6 :

- ✓ Acier faiblement allié
- ✓ 0,30% de carbone
- ✓ 1,5% de Chrome (6 :4 = 1,5)
- ✓ des traces de nickel
- ✓ des traces de molybdène

Tableau I.4: Aciers faiblement alliees usuelle [8]

Aciers faiblement alliees		
Nuances usuelles	Traitement de référence	
	R min	Re min
38 Cr 2	800	650
34 Cr 4	880	660
37 Cr 4	930	700
41 Cr 4	980	740
55 Cr 3	1100	900
25 Cr Mo 4	880	700
35 Cr Mo 4	980	770
42 Cr Mo 4	1 080	850
16 Cr Ni 6	800	650
17 Cr Ni Mo 61	1 130	880
30 Cr Ni Mo 81	1 030	850
51 Cr V 4	1 180	1 080
16 Mn Cr 5	1 080	835
20 Mn Cr 5	1 230	980
36 Ni Cr Mo 16	1 710	1 275
51 Si Cr 7	1 000	830
60 Si Cr 7	1 130	930

- **Exemples des familles d'aciers faiblement alliés :**

1. Aciers pour formage à froid, (ils vont devenir des canettes de boissons gazeuses).
2. Aciers à limite d'élasticité garantie, ou à haute limite d'élasticité, ou à très haute limite d'élasticité (ils sont déformables, et vont devenir, à partir de tôles des poulies, des outils, des éléments de carrosserie).
3. Aciers résistant à la corrosion atmosphérique, aciers à calamine adhérente (ils servent à la réalisation de rambardes, de portes, de barrières, de tôles qu'on laisse à l'extérieur, sans précaution).
4. Aciers à haute teneur en carbone ou aciers trempant au bore (on va en faire des outils, des lames de couteaux).
5. Aciers à caractéristiques mécaniques contrôlées (comme leur nom l'indique, ils peuvent servir à de nombreuses applications).
6. Aciers de construction (tous les aciers des travaux publics et du bâtiment, structures, renforts).

- **Applications des aciers faiblement alliés :**

Les aciers faiblement alliés ont de nombreuses applications, dont :

- Aciers pour gros tubes soudés
- Aciers pour appareils à pression et chaudières
- Aciers pour bouteilles à gaz soudées
- Aciers pour la construction navale

Ils servent également avec leurs propriétés internes sous l'aspect d'un revêtement ajouté :

- Aciers émaillés
- Aciers revêtus métalliquement : électro zingués, galvanisés à chaud, revêtus d'un alliage zinc-aluminium ou aluminium-zinc ou aciers aluminés ou revêtus d'aluminium pur.

Ces aciers peuvent se présenter avec des laques, des revêtements organiques (électroménager, bâtiment intérieur et extérieur)

Il y a des aciers dont l'aspect est étudié pour ressembler à du béton, du bois, et autres.

N'oublions pas les ensembles insonorisant réalisés grâce à ces aciers.

Les listes et les propositions sont longues, et les applications encore plus nombreuses.

Ces aciers sont côtoyés dans notre quotidien : mobilier, électroménager, automobile, bâtiment structures,...

I.5.2 Classification selon leur domaine d'utilisation :

1.5.2.1 Aciers à outils :

Sont des aciers utilisés pour la fabrication d'outils mécaniques tels que les mèches, outils de coupe, cisailles, marteaux, burins...etc. Les caractéristiques d'utilisation des aciers à outils sont semblables à celles des aciers alliés, mais elles exigent l'amélioration d'un certain nombre de propriétés : la dureté, la trempabilité ; la tenue à chaud, la ténacité, la résistance mécanique et la résistance aux chocs thermiques [7].

Tableau I.5: Les classes d'aciers à outils [8].

Classes	Caractères Communs
Aciers à outils au carbone	Aciers d'usage général
Aciers à outils alliés pour travail à froid	Acier à haut résistance
Aciers à outils alliés pour travail à chaud	Aciers résistant aux chocs thermiques
Aciers rapides	Aciers sur carburés

I.5.2.2 Aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables comprennent un ensemble de familles d'alliages à base de fer dont la principale propriété est la résistance à la corrosion généralisée. Toutefois, bien qu'on les qualifie d'inoxidables, ces aciers ne sont pas dans tous les cas totalement exempts d'une possibilité de corrosion. Le chrome est l'élément essentiel qui, à des teneurs supérieures à environ 12 %, rend l'acier inoxydable en favorisant, en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface [7].



Figure I.7: aciers inoxydables.

I.6 Influence des éléments d'addition :

Les éléments d'addition (éléments d'alliage) sont en général des "métaux" surtout dans les aciers mais ce peut être des "non métaux" ou des "gaz". En général, les éléments d'alliage améliorent les propriétés de ces métaux. Les éléments d'addition dans les aciers sont nombreux (une trentaine) [14].

Ces éléments ont une action spécifique dans les aciers :

I.6.1 Manganèse :

On l'utilise surtout pour améliorer les propriétés des aciers d'usage général et la trempabilité des aciers de traitements thermiques, et ce a un faible cout. Le manganèse se retrouve rarement seul comme élément d'alliage, car il entraîne plusieurs inconvénients : sensibilité à la surchauffe au cours de l'austénitisation, sensibilité qui provoque une croissance des grains ; augmentation de la fragilité au revenu ; diminution de la ductilité et de la résistance mécanique mesurées selon une direction perpendiculaire au laminage (sens travers) [15].

I.6.2 Nickel :

Le nickel, qui ne forme pas de carbures, agit principalement sur les propriétés de la ferrite augmentation de la résistance mécanique et de la ténacité. Les aciers qui contiennent plus de 0.5% de nickel conservent une bonne résilience, même à des températures très basses (aciers à 9 % de nickel utilisés pour les réservoirs cryogéniques). Le nickel freine en outre la croissance des grains austénitiques (aciers de cémentation) et il exerce une action moyenne sur la trempabilité (facteur d'augmentation de la trempabilité de 1,4/1 % Ni).

I.6.3 Silicium :

Le Silicium augmente par ailleurs la stabilité du revenu, mais il accroît la fragilité de l'acier. Cet élément améliore la résistance à l'oxydation à chaud et la résistance au fluage ; c'est pourquoi on peut le retrouver dans des aciers au chrome. On la retrouve également en présence de manganèse (1,5 à 2 % de Si et 0,6 à 0,9 % de Mn) dans les aciers mangano-siliceux utilisés pour la fabrication des ressorts (limite d'élasticité élevée).

I.6.4 Chrome :

Le chrome augmente considérablement la trempabilité (facteur d'augmentation de la trempabilité de 3,2/1 % Cr). Il améliore également la résistance au revenu et la tenue à chaud, grâce à la formation de carbures de chrome qui exercent un effet de durcissement par précipitation, durcissement qui pallie l'adoucissement de la martensite.

Enfin, le chrome, qui joue un rôle de premier plan dans la résistance à la corrosion, est l'élément d'addition le plus important des aciers inoxydables. On emploie le chrome dans les aciers de cémentation lorsqu'on veut améliorer la résistance à l'usure des surfaces carburées. Les aciers hyper eutectoïdes (0,8% de C) au chrome (0,50 à 1,70 % de Cr) sont largement utilisés pour la fabrication des roulements (billes, rouleaux, etc.)

I.6.5 Molybdène :

Le molybdène améliore la résistance au revenu en favorisant l'apparition d'un durcissement secondaire dû à la formation de carbures, Mo_2C , et en diminuant la sensibilité à la fragilisation au revenu.

I.7 Oxydation des aciers à haute température :

L'oxydation des aciers se produit lorsqu'une interaction de type physico-chimique intervient entre la surface de l'acier et son environnement.

Il existe deux types d'oxydation :

- **L'oxydation sèche** (par des gaz à haute température) lorsqu'il s'agit d'un environnement sec, comme par exemple l'attaque d'un métal par un gaz qui se traduit par une réaction chimique d'oxydoréduction entre le métal et un agent corrosif non métallique (O, Cl, F, SO_2 , CO, CO_2 , H_2O ...), avec formation d'un composé (oxyde, chlorure, sulfure, fluorure...), en milieu gazeux.
- **L'oxydation humide ou corrosion** (électrochimique ou aqueuse) lorsqu'il s'agit d'un environnement liquide servant d'électrolyte : Il s'agit là encore d'une réaction d'oxydoréduction, mais avec des échanges d'électrons (à travers le métal) et d'ions (à travers un liquide polaire, généralement une solution aqueuse, jouant le rôle d'électrolyte). Le mécanisme de formation des produits de corrosion repose généralement sur les étapes qui se résument comme suit : [11]

- a. Epaissement de ce film assuré par la diffusion des espèces (cations métalliques et/ou anions) à travers la couche d'oxyde.
- b. Apparition de fissures ou microfissures dans le métal et/ou dans la couche d'oxyde.

La protection de l'acier est assurée par la formation après oxydation d'une couche d'oxyde protectrice, adhérente, stable, dense et à croissance lente. Une protection efficace est généralement associée à un oxyde qui croît lentement grâce à un mécanisme contrôlé par la diffusion.

I.8 Résistance à l'oxydation des aciers :

La dégradation des pièces mécaniques par l'oxydation, la fatigue, la corrosion, l'usure, le grippage débute toujours par la surface par conséquent la surface doit avoir des caractéristiques mécaniques particulières (dureté élevée, précontraintes de compression...).

Un traitement de surface est préconisé dans le but d'améliorer les caractéristiques superficielles des aciers et concerne donc en toute généralité la résistance à la corrosion (sèche ou électrolytique), la conductibilité, les propriétés optiques, la résistance au frottement ou à l'usure par frottement. Pour améliorer les propriétés superficielles des aciers, plusieurs méthodes de protection sont utilisées. [12]

Chapitre II : traitement thermique des aciers

Chapitre II : traitement thermique des aciers

II.1 Introduction :

Les traitements thermiques se définissent comme étant « l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlé » appliqués à des métaux et alliages. De manière générale, les traitements thermiques agissent au niveau microstructural des métaux (matrice, précipités, distribution, etc.). Ils permettent de modifier les propriétés mécaniques (en les augmentant ou en les diminuant), les propriétés physiques (par exemple, les conductibilités thermiques et électriques) et les propriétés chimiques (par exemple, la résistance en corrosion). En somme, les traitements thermiques sont des opérations qui consistent à faire varier la température des métaux qui reste néanmoins à l'état solide. La variation de la température en fonction du temps est appelée cycle thermique (chauffage, maintien et refroidissement). [13]

II.2 Définition :

Les traitements thermiques ont pour un objet de soumettre l'acier à l'action de cycles thermiques appropriés afin de lui conférer des propriétés particulières adaptées à sa mise en œuvre ou à son utilisation.

Les principaux objectifs poursuivis peuvent être décrits comme suit :

- produire des modifications de la nature des constituants présents, sans changement de la composition chimique globale moyenne. Ces constituants peuvent être en équilibre ou hors d'équilibre enfin d'opérations. Les principaux traitements de ce type sont le traitement de durcissement par trempe, le traitement de durcissement par précipitation, le recuit, le traitement par le froid.

- Produire des modifications microstructurales de la dimension, de la forme et de la répartition des constituants sans modifier leur nature. Les principaux traitements de ce type sont le recuit globularisation, le traitement d'affinage structural, le recuit de grossissement du grain, le traitement de recristallisation, le traitement de normalisation.

- Provoquer la formation de microstructures favorables, par exemple à l'usinage ou à la mise en forme par déformation à froid. Les principaux traitements de ce type sont le traitement d'adoucissement, le patentage, le revenu classique.

-Éliminer ou réduire les contraintes internes propres ou modifier leur répartition avec modification de la microstructure. Le revenu de détente ou de dimensionnement en est par exemple le plus courant.

Provoquer le rétablissement au moins partiel des propriétés physiques ou mécaniques d'un acier écroui sans modification apparente de la structure par un traitement de restauration. [14]

II.3 Cycle d'un traitement thermique :

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose des étapes suivantes : (voir la figure 1)

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).
- BC : Maintient 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).

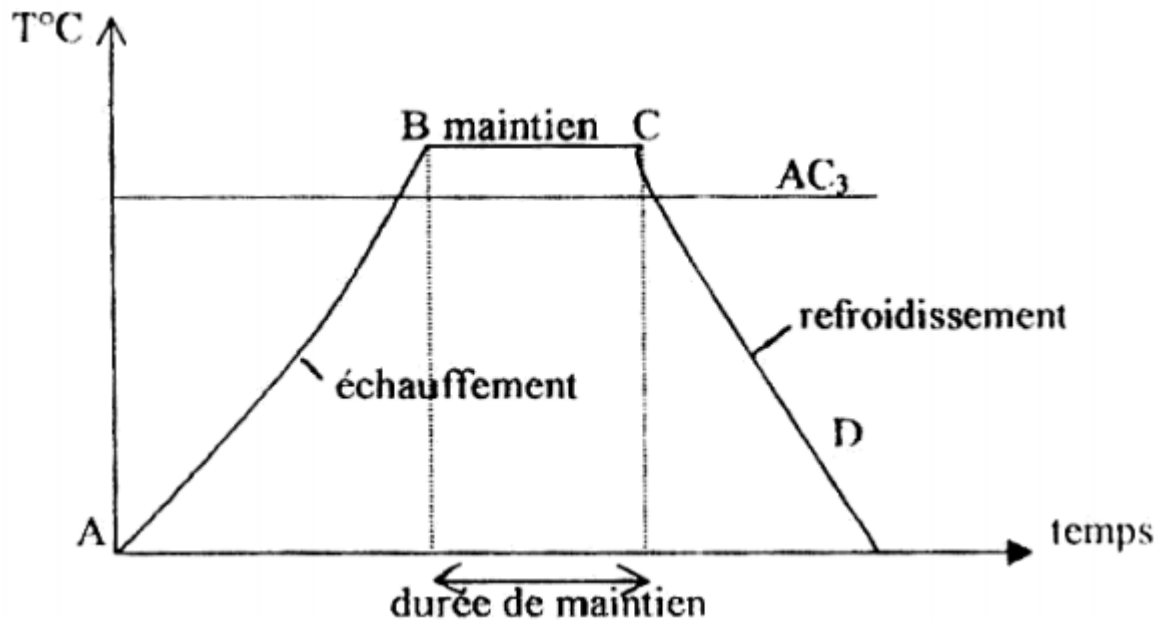


Figure II.1: Le cycle thermique. [15]

II.4 Buts et rôle des traitements thermiques :

Le but des traitements thermiques est de donner à une pièce métallique les propriétés les plus convenables, soit pour sa mise en forme, soit pour son utilisation :

- conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie.
- Augmenter la dureté et la résistance mécanique.
- Augmenter la malléabilité.
- Facilité de mise en forme.
- Changement de la microstructure de la pièce.
- Affiner les grains et homogénéiser la structure.

II.5 Principaux types de traitements thermiques :

Les traitements thermiques appliqués aux aciers peuvent être classés en trois types principaux :

- Les traitements d'homogénéisation, généralement appliqués sur les produits coulés avant leurs transformations ou également sur les produits déjà corroyés.
- Les traitements d'adoucissements par recuit ou restauration généralement appliqués en cours ou en fin de transformation.
- Les traitements de trempe structurale comportent :
 - une mise en solution.
 - une trempe.
 - une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement. [16]

II.5.1 Le recuit de l'acier :

II.5.1.1 Le but de recuit :

Le recuit d'une pièce métallique ou d'un matériau est un procédé correspondant à un cycle de chauffage. Celui-ci consiste en une étape de montée graduelle en température suivie d'un refroidissement contrôlé.

Cette procédure, courante en sciences des matériaux, permet de modifier les caractéristiques physiques du métal ou du matériau étudié. Cette action est particulièrement employée pour faciliter la relaxation des contraintes pouvant s'accumuler au cœur de la matière, sous l'effet de contraintes mécaniques ou thermiques, intervenant dans les étapes de synthèse et de mise en forme des matériaux.

À l'occasion d'un recuit, les grains (mono-cristaux) de matière se reforment et retrouvent en quelque sorte, leur « état d'équilibre ».

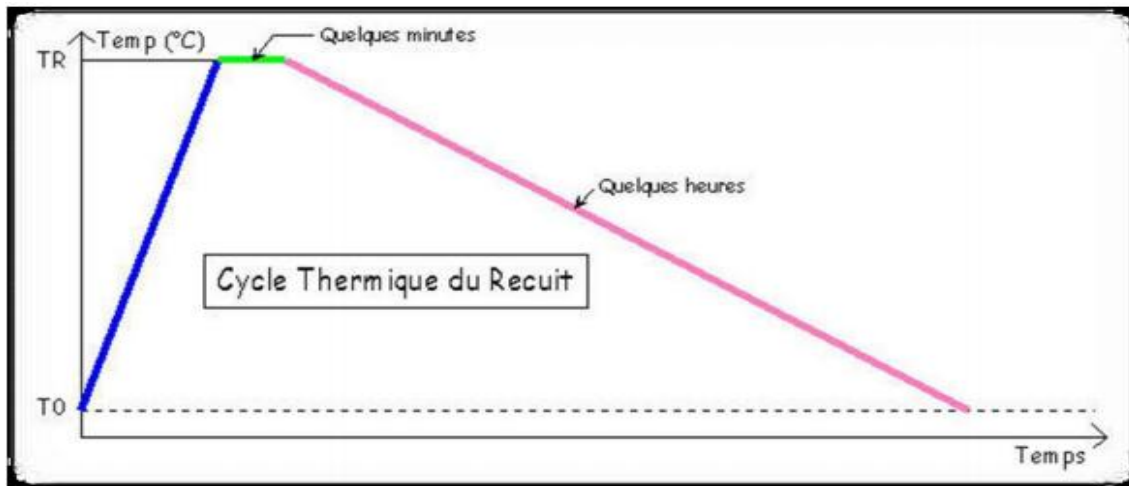


Figure II.2: Cycle thermique du recuit. [16]

II.5.1.2 Les principes de recuit :

a. Chauffage :

Le chauffage se fera à vitesse modérée. Certains aciers "difficiles" demanderont des paliers intermédiaires ou des vitesses de montée en température précises. La température de recuit (TR sur le graphe) est spécifique à chaque acier.

Une fourchette est généralement donnée par le fournisseur d'acier. A défaut, il sera toujours possible d'utiliser les données techniques d'un acier proche ou similaire.

En général, cette température est de l'ordre de :

Pour les aciers hypoeutectoïdes = $AC3+50^{\circ}C$.

Pour les aciers hypereutectoïdes = $AC1+50^{\circ}C$.

b. Maintient :

La température de recuit sera maintenue pendant un moment. Les ouvrages théoriques donnent en général des durées genre 1 minute par millimètre de la pièce. Si la montée en température n'a pas été trop rapide, la température est relativement homogène (surtout sur une pièce de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur) et on peut diminuer le temps de maintien en température.

c. Refroidissement :

Idéalement, le refroidissement devrait être le plus lent possible. Dans la pratique, il doit être adapté à l'acier. Certains aciers (particulièrement ceux avec du Chrome) exigent un refroidissement très lent. [15]

II.5.1.3 Les types de recuit :

II.5.1.3.a Recuit demandant des températures supérieures à $ac1$:

Le recuit comporte un chauffage et un maintien à une température égale ou supérieur à $Ac1$, suivi d'un refroidissement généralement lent. Cela dit, on distingue divers types de recuits, soit des recuits d'homogénéisation, de régénération, d'adoucissement, de détente, de sphéroïdisation, de normalisation, de recuit total, etc.

1. Le recuit d'homogénéisation :

Le recuit d'homogénéisation s'applique aux aciers bruts de fonderie pour lesquels le refroidissement a entraîné une mauvaise répartition des constituants (hétérogénéité). Il a pour but de réduire cette hétérogénéité.

En fait, ce traitement vise à la fois une composition chimique homogène et adoucissement du matériel, par chauffe et retenue prolongée à température élevée.

Champ d'application :

- Aciers bruts de coulée.
- Aciers moulés.

Technologies de chauffe :

- Four à l'air.
- Four sous vide.
- Four à atmosphère contrôlée.
- Four à bain de sel.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage;

B → C : Maintien pendant plusieurs heures à une température élevée, soit de 1000 °C à 1200 °C = domaine austénitique.

C → D : Refroidissement lent.

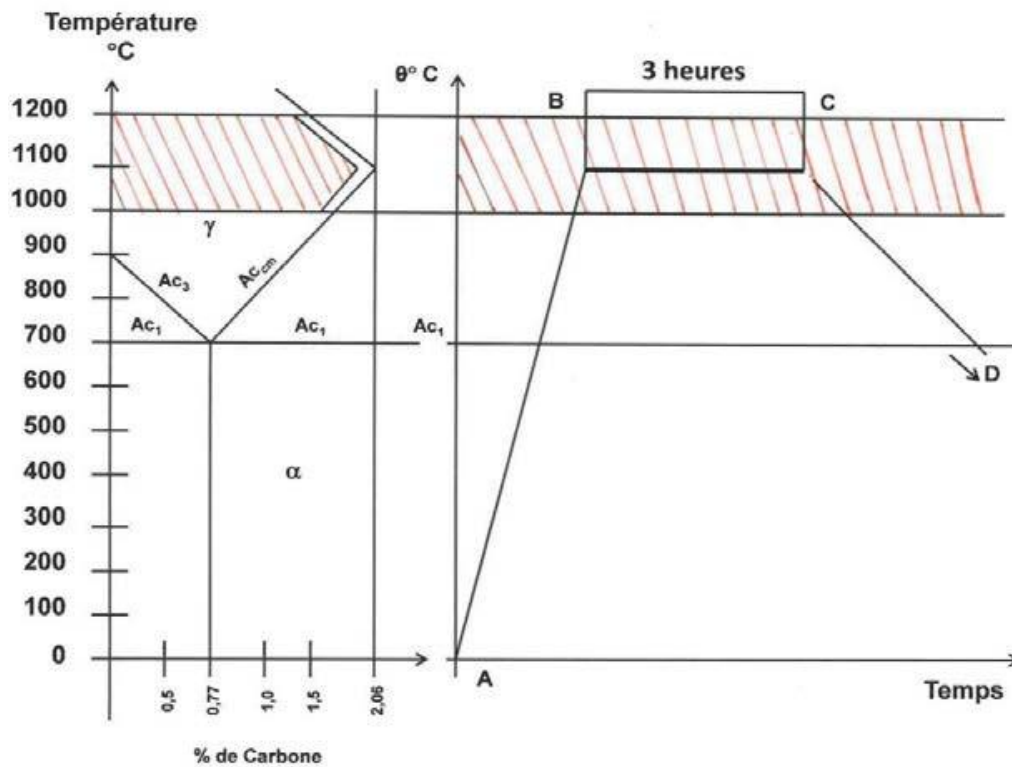


Figure II.3: cycle thermique de recuit d'homogénéisation. [18]

2. Recuit de régénération (ou d'affinage structural) :

Ce recuit est appliqué aux pièces qui ont souvent des structures surchauffées telles que :

- celles ayant subi un traitement d'homogénéisation par diffusion.
- Les pièces moulées.
- Les zones voisines des joints de soudure.
- Les pièces forgées à haute température, etc.....

Le recuit de régénération comprend :

- un chauffage sans maintien prolongé à une température légèrement supérieure à Ac_3 de manière à obtenir une austénite à grains fins.
- Un refroidissement à une vitesse convenable conduisant à une structure ferritoperlitique fine (cas des aciers hypoeutectoides). [1]

Cycle thermique :

A → B : Chauffage rapide avec fragmentation des grains.

B → C : Maintien à une température $\geq Ac_3$, le temps nécessaire pour permettre une uniformisation de la température (durée variant selon les dimensions de la pièce), entre 750 °C à 950 °C.

C → D : Refroidissement lent à l'air.

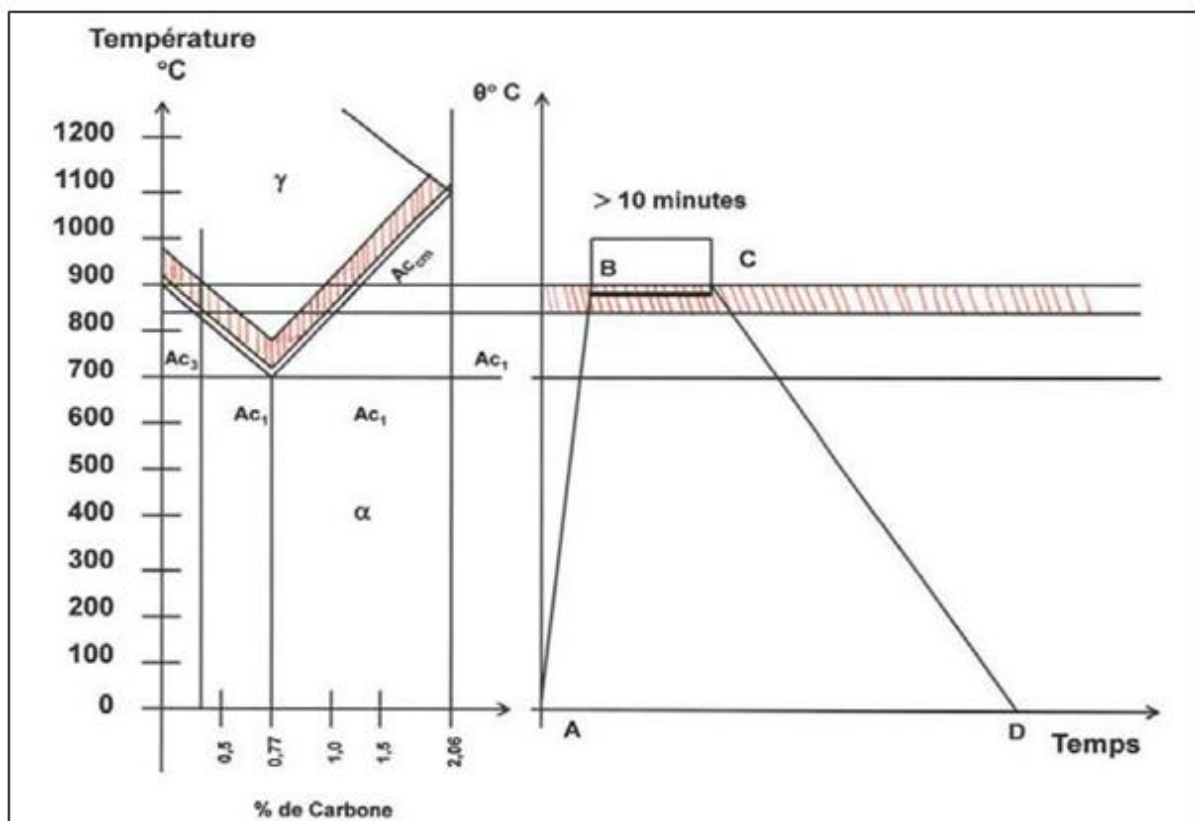


Figure II.4: cycle thermique de Recuit de régénération (ou d'affinage structural). [18]

3. Le recuit complet :

Le recuit complet est un traitement qui annule tous les traitements précédents. Bien que semblable au recuit de normalisation, le refroidissement se fait toutefois de manière contrôlée au four car selon la nuance d'acier traitée et l'épaisseur, Les températures et les temps de traitement sont sensiblement les mêmes que pour le recuit de normalisation avec un maintien d'une minute par millimètre d'épaisseur de la pièce. Ce recuit permet de détruire partiellement ou totalement l'effet d'écrouissage que le métal a subi préalablement.

Champ d'application :

- Aciers à haute teneur en carbone.
- Acier hypoeutectoïdes.
- pièces forgées.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage.

B → C : Le cycle thermique est semblable à celui du recuit de régénération sauf que la température de chauffage est un peu plus élevée.

C → D : Refroidissement très lent dans le four. [18]

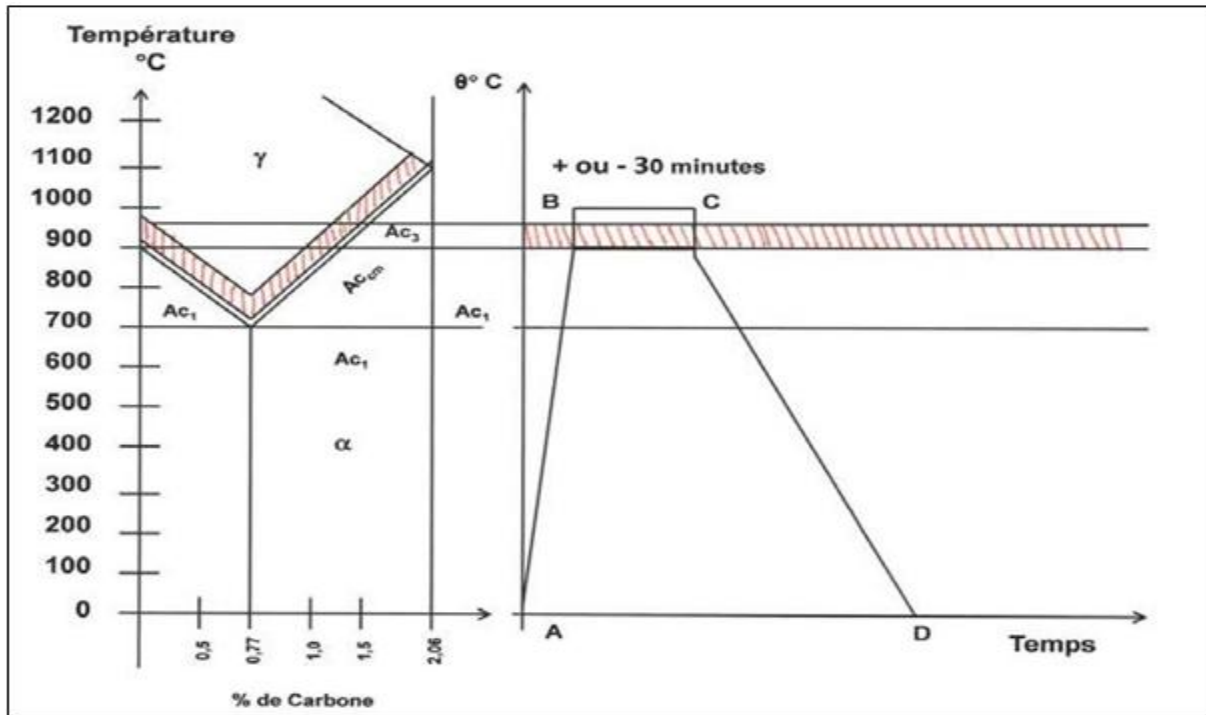


Figure II.5 : cycle thermique de recuit complet.

II.5.1.4.b Recuit demandant des températures inférieures à ac1 :

1. Le recuit de normalisation :

Le recuit de normalisation consiste en un traitement thermique des aciers faiblement alliés comportant une austénitisation suivie d'un refroidissement à l'air calme, permettant en particulier d'affiner le grain. Ce traitement comme le recuit complet conduit à des structures ferrite-perlite. Cependant la température de maintien est plus élevée. En outre le refroidissement à l'air calme utilisé est plus rapide que dans le cas du recuit complet. Les structures ferritoperlitique obtenues correspondent donc à des grains ferritiques fins et à de faibles espacements lamellaires dans la perlite. Ces microstructures très homogènes peuvent être recherchées dans certaines applications mécaniques et constituent un état initial pour le traitement d'austénitisation avant trempé. [18]

Champ d'application :

- Aciers à haute teneur en carbone
- Acier hypereutectoïde
- Aciers alliés.

Cycle thermique :

A → B : Chauffage.

B → C : Maintien pendant de 2 à 3 heures à une température comprise entre 700 °C et 1200°C.

C → D : Refroidissement lent à l'air.

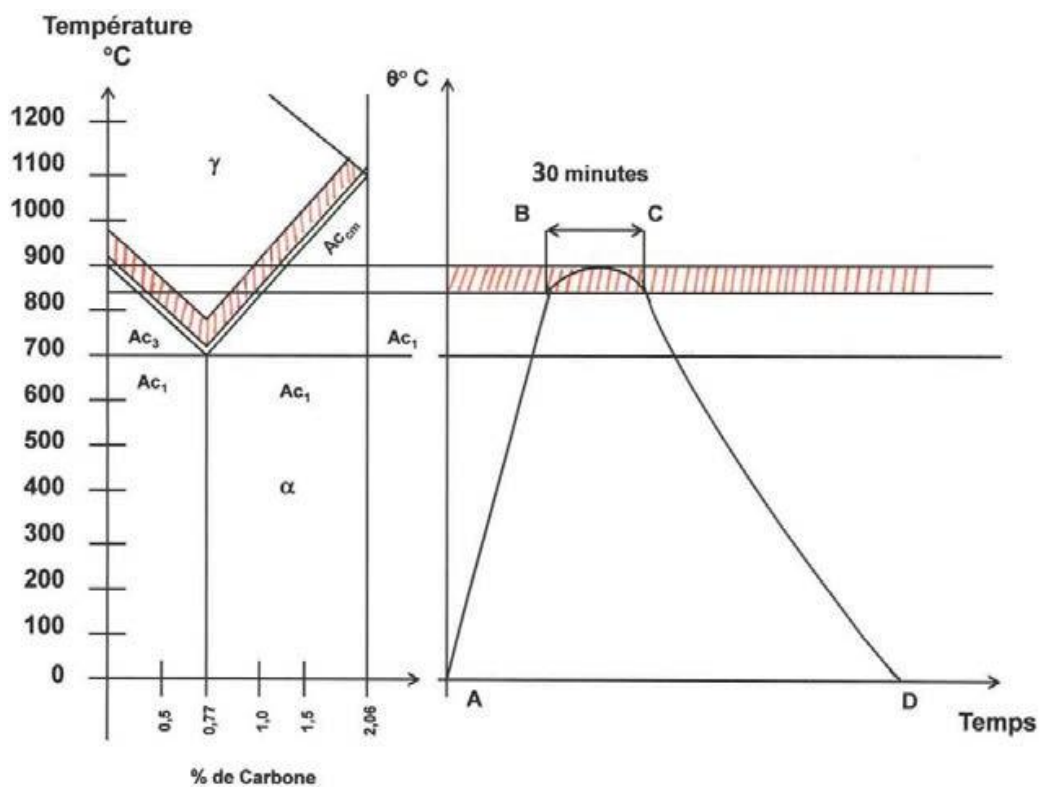


Figure III.6: cycle thermique de recuit de normalisation. [18]

2. Recuit de détente :

Il est effectué entre l'usinage de la première ébauche et l'usinage de la deuxième ébauche ou l'opération de finition (rectification par exemple). Pour les aciers où les propriétés mécaniques de résistance à la déformation à chaud et au fluage de l'acier sont plus fortes. Il est conseillé de au lieu de faire un traitement à une température inférieure à AC1 où l'élimination des contraintes ne dépasse guère les 90% d'appliqué un traitement de pré trempe Qui consiste en une austénitisation à basse température (860 à 920 oC), suivie par un refroidissement à l'air, à l'huile, ou par étape, et un revenu à haute température immédiatement au-dessous de Ac1 (700 à 750 oC), [19]

3. Le recuit de recristallisation :

C'est un recuit destiné à faire recristalliser un acier pour obtenir un grain plus fin, après un recuit de stabilisation. On l'utilise également pour régulariser les effets des contraintes provoquées par la déformation à froid à une température inférieure, les parties extérieures des pièces ainsi façonnées étant plus écrouies qu'à cœur. Dans ce cas, la structure cristalline du métal a été d'autant plus modifiée que les contraintes de déformation ont été plus importantes. Ce traitement est absolument nécessaire entre chaque opération de déformation importante. La recristallisation s'accompagne généralement d'une réduction de la résistance et de la dureté d'un matériau, ainsi qu'une augmentation simultanée de la ductilité.

4. Le recuit de sphéroïdisation : (ou de COALESCENCE)

Ce recuit consiste, après chauffage à une température légèrement inférieure à Ac1, à maintenir l'acier à cette température pendant un temps plus ou moins long, puis à le refroidir lentement, de façon qu'il soit dans un état aussi doux que possible et exempt de contraintes. Il s'agit également d'un recuit permettant de faire évoluer la forme géométrique des carbures, telles que les lamelles de cémentite, vers la forme sphérique stable. Il sert également à améliorer la capacité de déformation à froid du matériau traité. [18]

II.5.2 La trempe de l'acier :

En gros, la trempe est un traitement thermique de durcissement qui consiste à chauffer la pièce à une température supérieure à la ligne de transformation fer $\alpha \rightarrow$ fer γ (austénitisation), puis on lui fait subir un refroidissement rapide pour obtenir une dureté maximale. Ce mode de durcissement, commun à de nombreux métaux, est réalisé selon le schéma général, à travers trois opérations successives : austénitisation, trempe et revenu.

La première étape consiste donc d'abord à chauffer l'acier puis de le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique, à au moins quelques degrés au-dessus de son point de transformation (entre 30 °C et 50 °C). Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques en austénite et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite.

S'ensuit la trempe qui consiste en un traitement visant à refroidir rapidement le métal à partir de sa température d'austénitisation (généralement entre 815 °C à 870 °C / 1500 °F à 1600 °F) afin d'obtenir une constitution martensitique. C'est cette transformation qui permet d'augmenter les caractéristiques mécaniques du métal traité, notamment sa dureté.

La possibilité, de faire subir à un acier un durcissement par trempe, est soumise à deux conditions indispensables :

- **une condition métallurgique** : existence d'un domaine austénitique sur le diagramme d'équilibre de l'acier choisi de manière à pouvoir austénitiser cet acier en le portant à une température convenable;
- **une condition thermique** : possibilité de refroidir cet acier à une vitesse suffisante à partir de l'état austénitique de manière à provoquer la formation des constituants, hors d'équilibre, recherchés. [20]

Le cycle thermique de la trempe sera caractéristique de la dureté finale recherchée. Ce degré de dureté envisagé fera recourir à différentes méthodes de refroidissement. La vitesse de refroidissement dépend principalement, pour une pièce déterminée :

- de la chaleur spécifique et la conductibilité thermique de l'acier.
- de la masse, la forme et l'état de surface de la pièce; plus la pièce sera massive plus le temps sera long.
-
- du pouvoir refroidissant du médium de trempe (air, eau, eau-sel, huile, sel, air forcé, etc.).

Notons que la vitesse de refroidissement est maximale à la surface de la pièce et diminue vers le cœur.

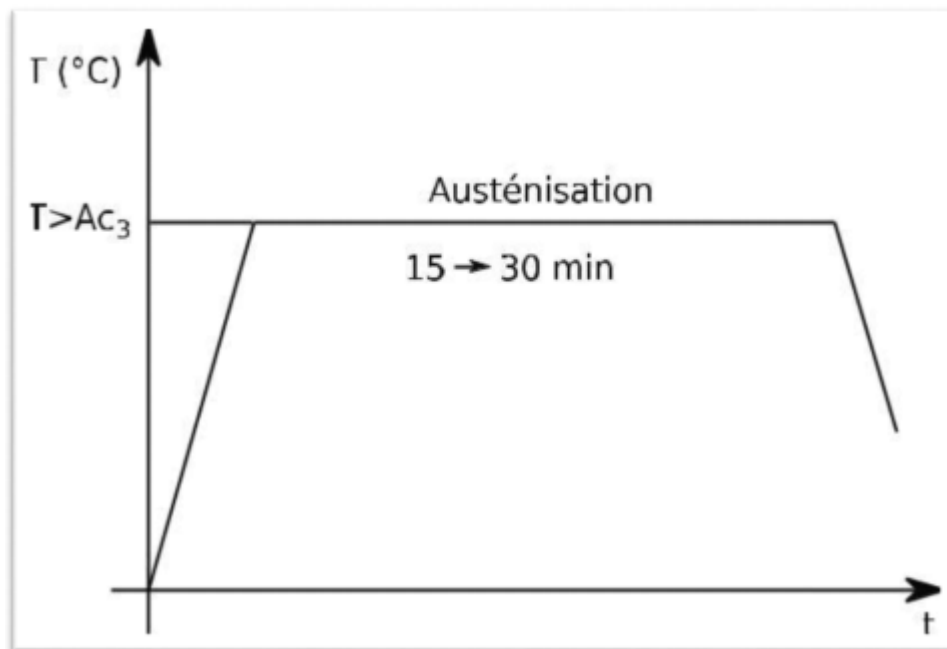


Figure II.7:Le cycle de la trempe. [17]

II.5.2.1 Austénitisation :

Durant l'austénitisation, la structure de l'acier s'homogénéise en transformant les éléments microstructuraux ferritiques (cc) en austénite (cfc) et en dissolvant la cémentite et les carbures dans l'austénite. L'austénite consiste :

- A chauffer l'acier à au moins quelques degrés (30-50) °C au-dessus de son point de transformation.
- Le maintenir pendant environ 30 minutes dans son domaine austénitique.

II.5.2.2 Choix du temps de maintien :

Le maintien du métal à la température de trempe doit assurer le chauffage à cœur et l'achèvement des transformations de phase, sans qu'il soit trop lent pour éviter le grossissement des grains et la décarburation des couches superficielles des pièces. La durée totale du chauffage t_t dépend:

- du temps d'échauffement à cœur " $t_{éc}$ " jusqu'à la température demandée. Ce temps dépend de la forme et des dimensions des pièces, de la nuance de métal, du type de fours, ...etc.
- du temps de maintien isotherme " t_{mi} " qui dépend de la composition et de l'état initial de métal.

Donc: $t_t = t_{éc} + t_{mi}$

En réalité pour déterminer t_t , on se réfère aux données expérimentales. (Le tableau 1) résume la durée moyenne rapportée à 1 mm d'épaisseur dans différents types de fours. [21]

Tableau II.1: Durée approchée d'austénitisation dans différents types de fours.

Moyen de chauffage	Durée en (s/mm) d'épaisseur de pièce		
	Ronde	carrée	Rectangulaire
Four électrique	40-50	50-60	60-75
Four à flamme	35-40	45-50	55-60
Bain de sel	12-15	15-18	18-22
Bain de plomb	6-8	8-10	10-12

II.5.2.3 Choix de la vitesse de refroidissement pour la trempe :

Pour estimer la vitesse de refroidissement, on utilise la relation entre la température et le temps: $T = f(\log t)$ représentée graphiquement. L'échelle logarithmique permet un étalement convenable des courbes de refroidissement rapide.

La vitesse critique de trempe martensitique est soit:

- mesurée à 700°C (V_{r700})
- exprimée dans un gradient de température généralement compris entre 700 et 300°C (v).

Le refroidissement doit se réaliser à une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe. Celle-ci étant la vitesse limite qui assure la transformation totale de l'austénite en martensite. [21]

II.5.2.4 Choix du milieu de trempe :

La trempe s'effectue en général soit à l'eau, à l'huile ou à l'air. Le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier (se référer à l'essai Jominy). La nature du bain de trempe (eau, huile, etc.) caractérise la vitesse de refroidissement de la pièce immergée après chauffage.

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

L'essai Jominy :

Il a pour but d'obtenir, en une seule opération sur une éprouvette normalisée des indications globales sur la trempabilité d'un acier, sous forme d'une courbe appelée courbe Jominy.

Cet essai est réalisé en trois étapes :

- l'austénitisation d'une éprouvette normalisée prélevée dans l'acier à tester.
- le refroidissement en bout par un jet d'eau dans des conditions imposées
- la mesure de dureté sur un méplat le long d'une génératrice et dont l'usinage ne doit pas provoquer un échauffement excessif. Les points de mesure de la dureté sont situés à : 1,5 - 3 - 5 - 7 - 9 - 11 - 13 - 15 - 20 - 30 - 40 - 50 - 60 - 70 - 80 mm de l'extrémité arrosée et sont désignés par J1,5 - J3 - J5 - Jx. [18]

La trempe à l'eau :

Ce traitement est réservé à des aciers peu alliés qui ont besoin de ce médium pour atteindre les caractéristiques recherchées (1045, W1). Le taux de refroidissement dans l'eau étant très élevé, ce traitement présente des risques importants de distorsion, voire de fissuration.

La trempe à l'huile :

Ce traitement est réservée utilisée pour des aciers faiblement alliés comme 1045, 4140, 4340, 8620, 9310, 52100 ou des aciers outils tel que le O1.

La trempe à l'air forcée :

Ce traitement est surtout utilisé sur des aciers dont les dimensions sont supérieures à la capacité des fours sous vide (par exemple, aciers inoxydables 410, 420, 431 et acier outil H13).

La trempe sous vide :

Ce type de traitement s'adresse essentiellement aux aciers outils (A2, D2 S7, H13, H21, T1, M2) et aux aciers inoxydables martensitiques (410, 420, 440C).

II.5.2.5 Les différents types de trempe :

II.5.2.5.a La trempe martensitique :

La trempe martensitique consiste à amener rapidement le métal à une température inférieure à la valeur critique M_s , généralement inférieure ou égale à 20 °C. Le refroidissement rapide de l'austénite provoque un blocage des atomes de carbone insérés dans le réseau gamma. Ce réseau devient quadratique centré instantanément. Cette nouvelle structure (solution solide d'insertion) se nomme martensite. Afin de pouvoir obtenir une structure martensitique, il faut que la vitesse de refroidissement soit supérieure à la vitesse critique de trempe martensitique. Il est évident que cette condition n'est pas réalisée en tous les points d'une pièce. En effet, la loi de refroidissement en un point d'une pièce dépend de la

conductivité thermique du métal, de la forme et des dimensions de la pièce, ainsi que du pouvoir de refroidissement du fluide de trempe qui, lui, dépend de l'agitation du fluide.

Le milieu de trempe doit assurer le refroidissement dans toute la section des pièces, et l'obtention d'une structure martensitique sans produire de défauts tels que tapures⁸, déformations, contraintes résiduelles, etc. Le meilleur refroidissement est celui qui se fait à grande vitesse dans l'intervalle de température A–Ms. Ceci permet d'étouffer la décomposition de l'austénite sur fusionnée dans le domaine des transformations : perlitique et intermédiaire. Ce refroidissement est ralenti vers les basses températures dans le domaine de la transformation martensitique Ms–Mf. Une grande vitesse de refroidissement dans l'intervalle martensitique est indésirable car elle accroît les contraintes résiduelles et produit des tapures. L'uniformisation de la température en cours de refroidissement permet de limiter les tensions thermiques et se traduit par une suppression des déformations des pièces et une augmentation de la résilience et du % d'allongement de l'acier.

Généralement, on utilise pour les bains de trempe, des liquides qui peuvent bouillir tels que l'eau, les solutions aqueuses de sels et d'alcalins, les huiles. La trempe par ces agents passe par une étape de refroidissement pelliculaire (ou caléfaction) où une gaine de vapeur protège les pièces et empêche le refroidissement. Une fois que l'agent refroidissant se met en ébullition, la gaine se rompt et l'évacuation de la chaleur s'accélère. Notons que l'agitateur permet aussi de rompre la gaine.

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.

II.5.2.5.b La trempe bainitique :

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.

II.5.2.5.c La trempe austénitique (ou hypertrempe) :

Les aciers austénitiques dont la structure ne change pas, aussi bien par chauffage que par refroidissement, ne « prennent » pas la trempe. Le procédé d'hypertrempe permet d'adoucir ces aciers et consiste à chauffer les pièces vers 1 100 °C. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la précipitation des carbures vers 600 °C à 800 °C. Il est généralement effectué à l'eau. L'huile est utilisée comme fluide de trempe pour les aciers à forte teneur en nickel.

Cette technique est appliquée plus particulièrement au traitement des aciers inoxydables et des aciers ferromanganèse, pour permettre d'effectuer un usinage ultérieur ou maintenir, voire remettre en solution dans l'austénite, les carbures dont la précipitation dans les espaces inter-grains favoriserait la corrosion cristalline.

II.5.2.5.d La trempe superficielle :

La trempe superficielle permet de modifier les caractéristiques mécaniques de la couche superficielle d'une pièce en fonte grise, en fonte spéciale, en fonte malléable perlitique ou en fonte G.S. Ce traitement permet d'obtenir simultanément deux caractéristiques opposées :

- une grande dureté en surface.
- une grande résilience de la pièce.

Comme pour les aciers, il existe trois types de trempe superficielle :

- au chalumeau oxyacéthylique.
- par induction.
- par immersion. [18]

II.5.3 Revenu :

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensite-bainitique, le revenu a pour objet de provoquer une précipitation du carbone sous une forme et dans des conditions contrôlées afin de parvenir au durcissement optimal. Cette opération engendre une évolution structurale depuis l'état métastable obtenu après trempe vers un état plus proche de l'équilibre physico-chimique. Éventuellement, ce revenu peut provoquer la transformation de l'austénite résiduelle en bainite pendant le maintien ou en martensite secondaire au cours du refroidissement final. Les paramètres qui définissent les conditions d'exécution d'un revenu sont :

- la température de revenu ou température maximale à laquelle est porté l'acier.
- la durée du maintien à la température maximale, c'est-à-dire le temps pendant lequel la température des zones martensitiques et/ ou martensite-bainitiques est maintenue constante et égale à la température de revenu.
- la loi de refroidissement à laquelle la pièce est soumise à la fin du revenu. Pour apprécier ou prévoir le comportement au revenu d'un acier.

Différents type de revenu (après trempe) existe :

- le revenu de détente.
- le revenu habituel (ou banal).
- le revenu de durcissement secondaire [22]

II.5.3.1 Choix des conditions de revenu après trempe :

Le choix des conditions de revenu commence par la définition du type de revenu qui est réalisé (fonction des propriétés recherchées) :

- Dureté maximale et conditions de service n'imposent pas une certaine ductilité par exemple (revenu de détente à la T 180-220°C, compatible avec les exigences de dureté).
- Compromis bien déterminé entre le niveau haut de la résistance et un niveau haut de ductilité revenu banal.

Pour les aciers contenant des éléments carburigènes revenu de durcissement secondaire Tenir compte que la périphérie d'une pièce subit toujours un maintien à la température de revenu plus long que celui auquel est soumis le cœur. Cette différence est d'autant plus grande que le chauffage est plus rapide et la section de la pièce plus importante chauffage lent et contrôlé [23].

II.5.3.2 Différents types de revenu :

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

a. Revenu de relaxation ou de détente :

Il s'effectue entre 180°C et 220°C -250°C. Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite et martensite. Il provoque une légère 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.

b. Revenu de structure ou classique :

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et Ac1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re.

Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

c. 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 second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires). [15]

II.6 La formation des grains :

La solidification d'un métal liquide se traduit par le passage d'un état désordonné instable des atomes constitutifs à un état ordonné stable (empilements d'atomes à maille c.c. ou c.f.c.).

II.6.1 La germination :

Quelques atomes s'associent pour former des germes (1). Le nombre de germes est d'autant plus important que la vitesse de refroidissement est rapide (2).

II.6.2 La cristallisation :

Les germes se développent et grossissent progressivement (3, 4 et 5). À la disparition du métal liquide, ils forment des grains jointifs (6 et 7).

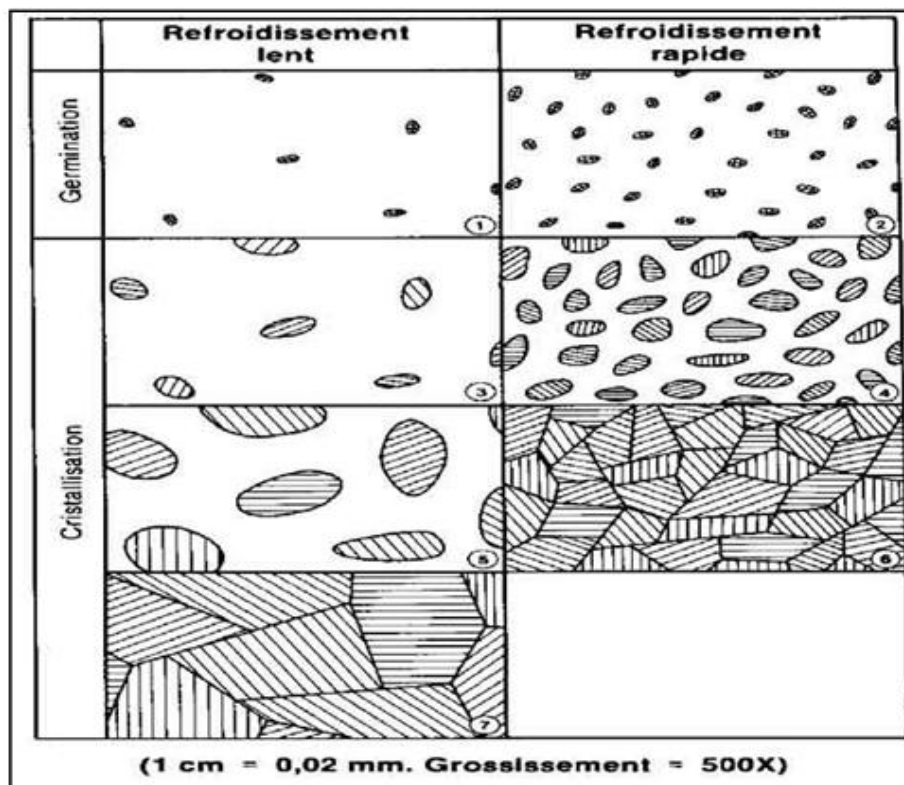


Figure II.8: La formation des grains d'acier.

À la frontière des grains, on trouve généralement des impuretés ou matériaux non miscibles (figure 9).

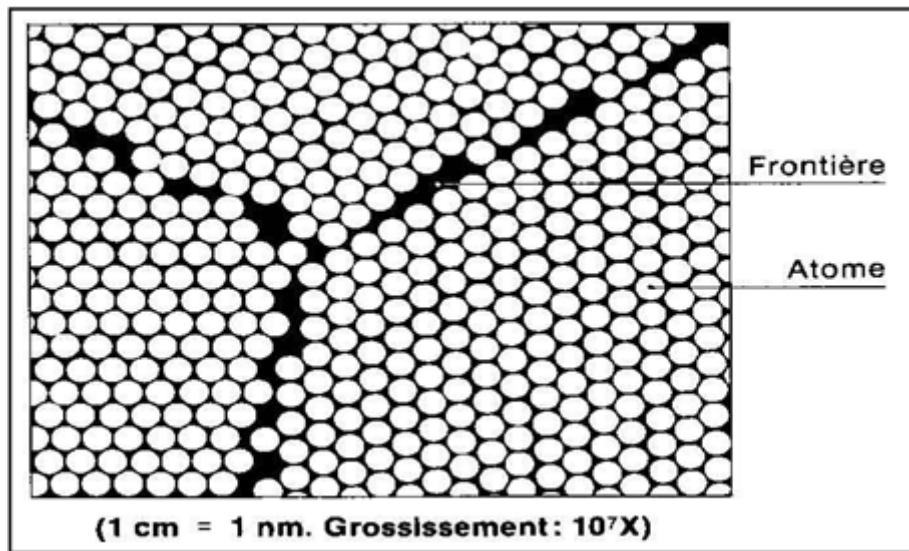


Figure II.9: La frontière des grains.

II.6.3 La variation de la grosseur des grains :

L'acier restant à l'état solide, les grains qui le constituent peuvent varier de dimensions. Selon les conditions, ils peuvent devenir plus petits (s'affiner) ou grossir.

II.6.4 L'affinage des grains d'acier :

En cours de chauffage, lors du passage de la phase α à la phase γ , les grains se fragmentent.

Cette fragmentation varie avec la vitesse de chauffage lors de la transformation de l'acier :

- a. Vitesse élevée : fragmentation important (1).
- b. Vitesse moyenne : fragmentation moyenne (2).
- c. Vitesse faible : fragmentation faible (3).

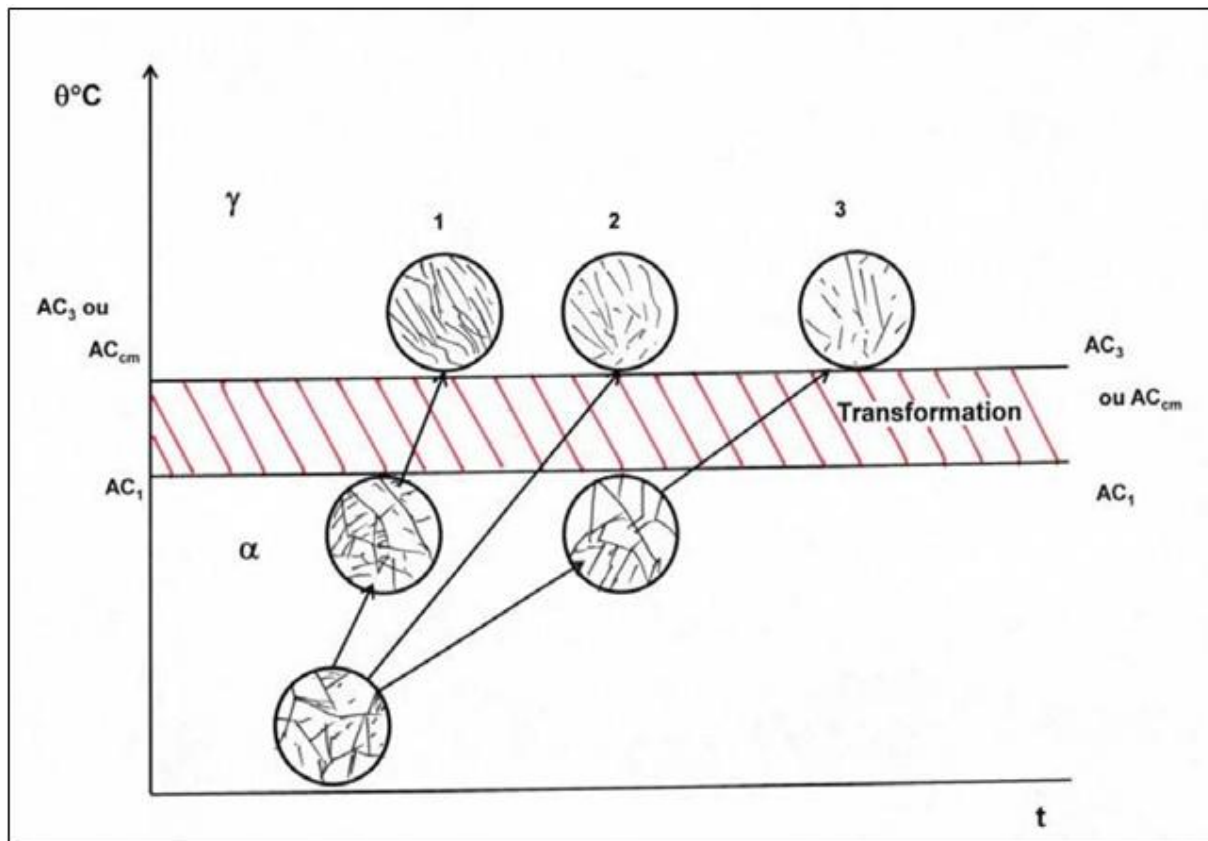


Figure II.10 : L'affinage des grains.

II.6.5 Le grossissement des grains :

Les grains d'austénite composant l'acier porté à une température supérieure à A_3 ou A_{cm} tendent toujours à grossir. Ce grossissement dépend de deux facteurs : la température de la pièce et la durée de maintien à cette température (figure 11).

À une température très élevée, les grains grossissent rapidement (3 et 4).

Une durée prolongée à ces températures favorise également le grossissement des grains (1, 2, 3 et 4).

Un acier dit surchauffer est constitué de gros grains. Cette structure grossière lui donne une certaines fragilités.

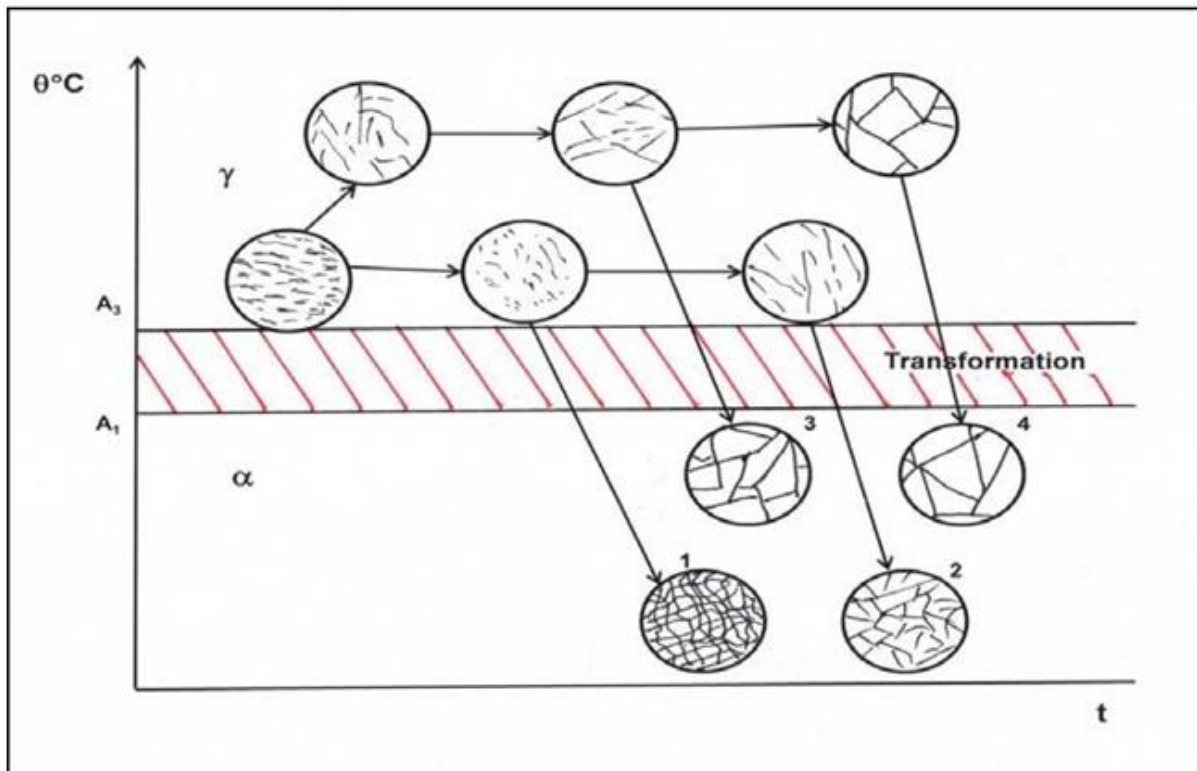


Figure II.11: Le grossissement des grains.

II.6.5.a La caractérisation de la grosseur des grains :

L'American Society for Testing and Materials a établi une échelle de grosseur de grains.

Tableau II.1:L'échelle de classification des grains.

Numéro	Échelle ASTM
1	64 grains par millimètre carré
2	128 grains par mm ²
3	256 grains par mm ²
4	512 grains par mm ²
5	1 024 grains par mm ²
6	2 048 grains par mm ²
7	4 096 grains par mm ²
8	8 192 grains par mm ²

II.6.5.b L'influence de la grosseur des grains sur les propriétés mécaniques :

Tableau II.2:L'influence de la grosseur des grains sur les propriétés mécaniques. [18]

Propriétés mécaniques	Grosseurs des grains 1-2-3-4-5-6-7-8	
Trempabilité	facile	difficile
Déformation à la trempe	faible	très faible
Tensions internes	faible	très faible
Tapures de trempe	possibles	improbables
Résilience	faible	moyenne
Austénite résiduelle	plus	moins
Usinabilité en ébauche	bonne	mauvaise
Usinabilité en finition	mauvaise	bonne
Malléabilité	bonne	médiocre

Chapitre III : Partie expérimentale

Chapitre III : partie expérimentale

III.1 Introduction :

Dans la partie expérimentale de ce travail, nous nous sommes intéressés tout d'abord à la mise en évidence de l'effet de traitement thermique sur la déformabilité de notre tôle. Pour cela nous avons effectué des traitements thermiques à différentes températures d'austénitisation sur des éprouvettes préalablement usinées. Ensuite, nous avons passé à la caractérisation de comportement de notre tôle par des essais de flexion et de dureté.

III.2 Présentation de l'acier :

III.2.1 Définition de l'acier :

Dans notre travail nous avons utilisé l'acier xc38, c'est un acier au carbone laminés, avec 0.38% de carbone.

III.2.2 Composition chimique en % :

La composition de notre nuance à été fait au niveau de SNVI à Rouïba. La composition chimique et le pourcentage de chaque élément de cet acier sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III.1 : composition chimique de l'acier xc38 en %

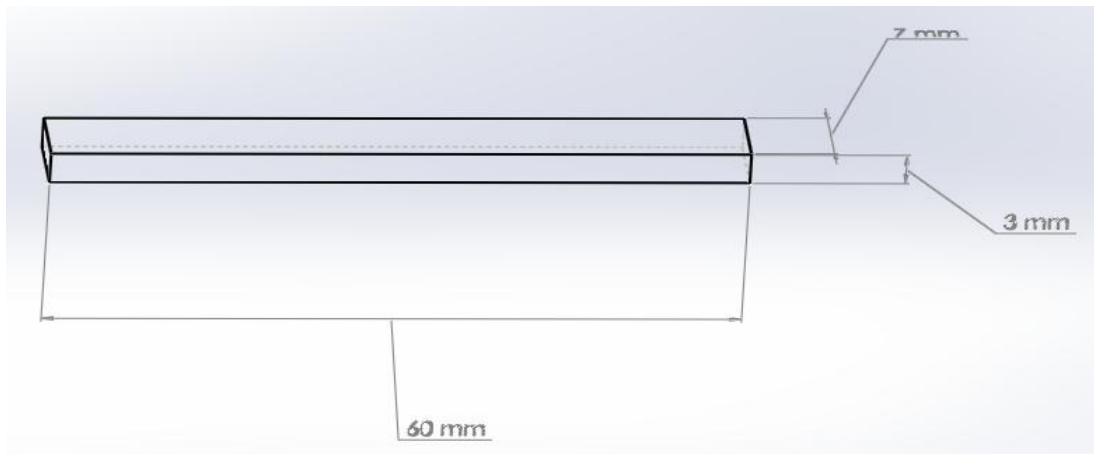
C	S	Si	Mn
0.38	0.008	< 0.1	0.371

Afin de réaliser nos essais, nous avons usinés des éprouvettes de forme rectangulaire (figure III.1).



Figure III.1 : éprouvette utilisé

III.2.3 Géométrie de l'éprouvette :



- Longueur de 60 mm
- Epaisseur 3 mm
- Largueur 7 mm

III.3 Traitement thermique :

Un traitement thermique comprend trois étapes :

- Un chauffage à une température d'austénitisation.
- Maintien isotherme à cette température de traitement.
- Un refroidissement dans un milieu préalablement défini.

Dans ce travail nous avons fait un traitement thermique à deux températures 950 °C et 1100 °C. Nous avons utilisé un four à moufle, qui est alimenté sous une tension de 380V avec une puissance P de 11 KW. Il est constitué d'une chambre isolée thermiquement appelée moufle et protégé extérieurement par une carcasse métallique .Les murs internes de four est constitué des résistances métalliques destinée à produire la chaleur nécessaire pour le

chauffage, dont la température maximale atteint 1200°C afin d'assurer la régulation de la température de chauffage, la vitesse de chauffage et la durée de séjour. Le four est équipé d'un régulateur de type OMRAN et un thermocouple placé dans la chambre du four permettant ainsi la mesure instantanée de la température.



Figure III.2 : four électrique utilisé et son régulateur.

III.3.1 Traitement thermique à 950°C et 1100°C :

Pour mettre en évidence les différentes transformations de phases à l'état solide dans notre acier, nous avons opté pour les deux traitements thermiques suivants :

- traitement thermique d'austénitisation à 1100°C puis suivi d'un refroidissement à l'eau, l'huile et l'air.
- traitement thermique d'austénitisation à 950°C suivi d'un refroidissement à l'eau, l'huile et l'air.

Afin d'étudier l'influence de traitement thermique sur la déformabilité de notre tôle, nous avons utilisé 18 éprouvettes et 12 échantillons :

- 9 éprouvettes et 6 échantillons pour une température de 950°C .
- 9 éprouvettes et 6 échantillons pour une température de 1100°C .



III.4 Présentation des essais mécaniques utilisés dans notre étude :

III.4.1 Essai de flexion :

L'essai de flexion est un test mécanique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps comme le choc et la dureté.

C'est un essai très utilisé dans la caractérisation mécanique des matériaux, le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'une panne située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante, dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux telles que le module de Young et la résistance en flexion, la flèche maximale...etc. on enregistre la courbe charge-flèche au milieu.

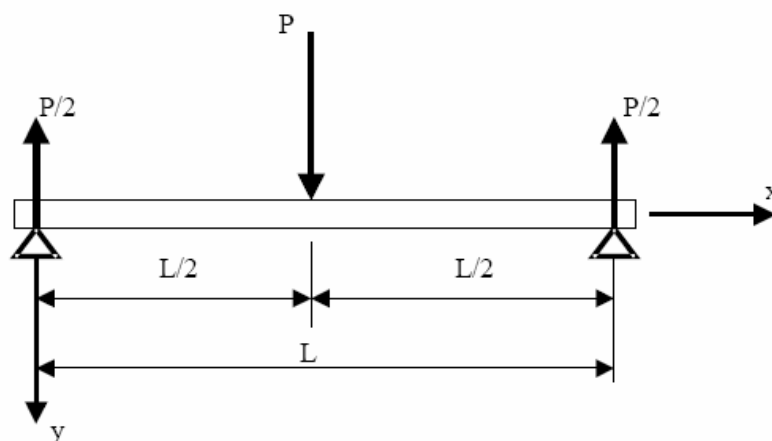


Figure III.3 : flexion trois points

III.4.1.1 Réalisation des essais de flexion trois points :

Les essais de flexion trois points sont réalisés à l'Université de Tizi-Ouzou, au niveau de département génie mécanique, sur une machine universelle de traction hydraulique d'un type OEHLGASS, qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion. Elle est dotée d'une cellule de charge d'une capacité de 120 KN.

Nous avons effectués des essais de flexion trois points avec une vitesse de 2mm/min.



Figure III.4 : machine de traction hydraulique

III.4.1.2 Dispositif de l'essai de flexion trois points :

Dans le cas d'une flexion à trois points on a utilisé un dispositif qui est au niveau de laboratoire de RDM, département de génie mécanique. Il représente le cas d'une éprouvette posée sur deux appuis simples (appuis linéaires cylindrique) et soumise à une charge concentrée appliquée au milieu de l'éprouvette avec elle aussi un contact simple. On a soumis quelque modification sur ce dispositif. Nous avons ajouté des pièces pour ce dispositif pour diminuer la distance entre appui, et un comparateur pour calculer la flèche.



Figure III.5 : dispositif avant modification.



Figure III.6: dispositif après modification

III.4.1.2.a Modifications de dispositif :

Nous avons réalisé au niveau de hall de oued Aissi deux pièces pour notre dispositif chaque une de ces pièces doit effectuer différentes opérations sur une machine de fraisage (type almo FV 1.5).

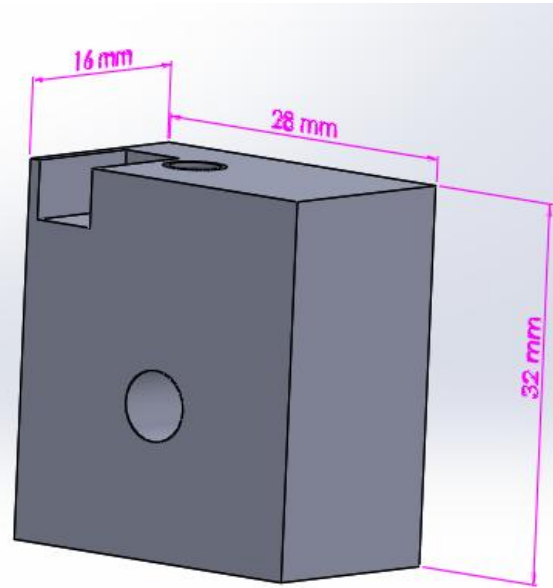


Figure III.7: plaque d'appui.

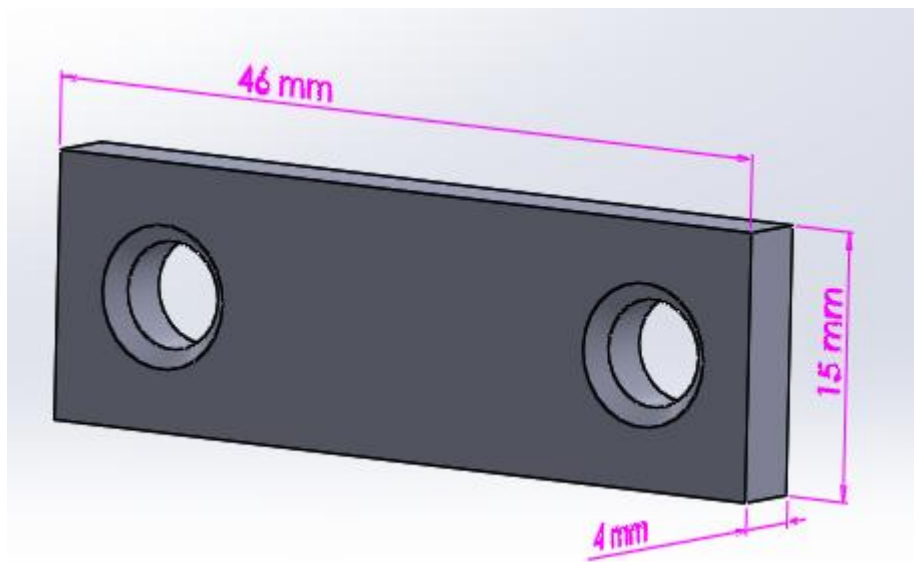


Figure III.8 : fer plat de fixation.

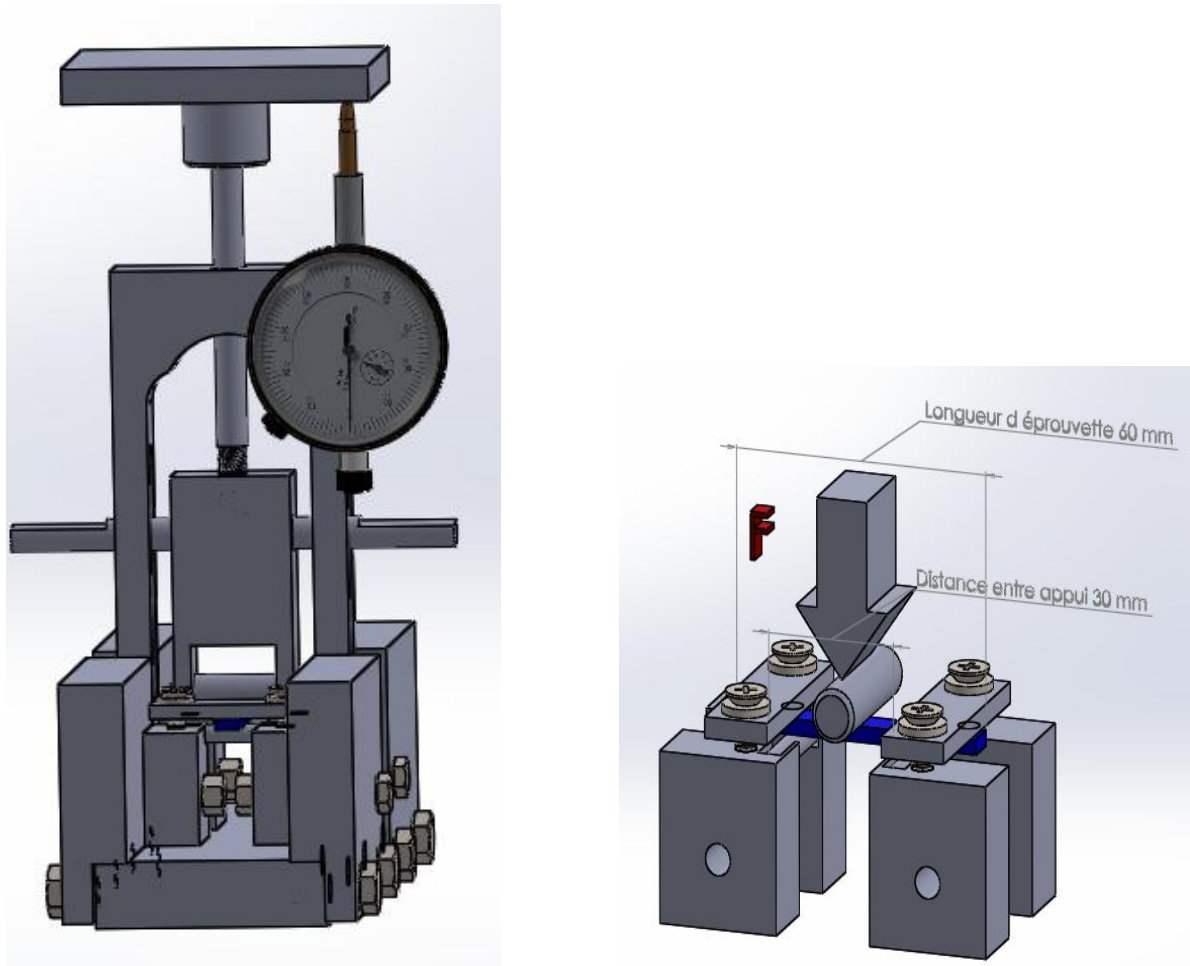


Figure III.9 : dispositif final de l'essai de flexion trois points.

III.4.2 Essais de dureté :

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration, un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif.

Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé.

III.4.2.1 Polissage des échantillons :

Avant l'essai de dureté, une préparation de la surface est nécessaire, (Figure III.14 et Figure III.15).



Figure III.10 : polisseuse



Avant polissage



Après polissage

Figure III.11 : Les échantillons avant et après polissage.

Les mesures de la dureté des échantillons ont été effectuées à l'aide des duromètre de type « WOPERT DIA TESTOR RC » (figure 16).

Ce dispositif est constitué de deux parties :

- la première est la partie d'essai nous permet d'effectuer l'essai de type VICKERS qui consiste à appliquer une charge sur un pénétrateur en forme de pyramide à base carrée.
- la deuxième partie qui nous permet de mesurer l'empreinte de la pyramide avec un agrandissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli.

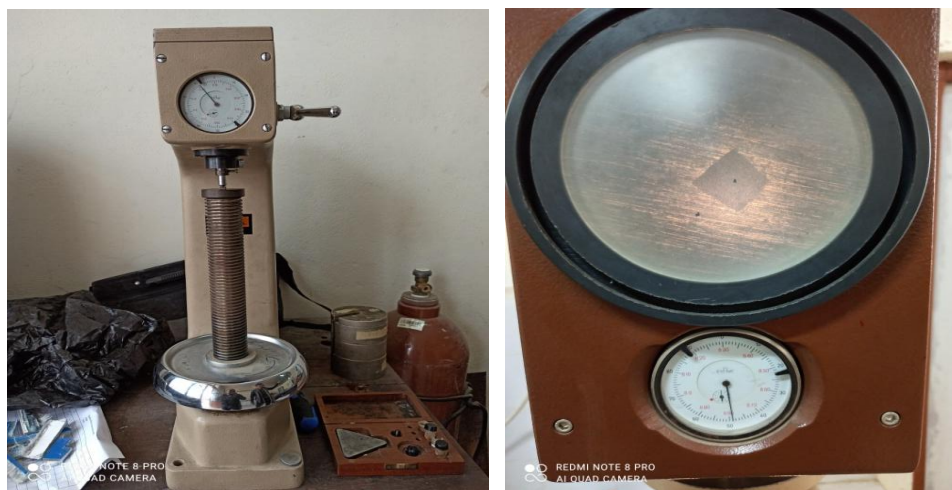


Figure III.12 : Duromètre

Pour chaque échantillon, nous avons réalisés une filiation de point de mesure, allant de 03 à 04 points.



Figure III.13 : la surface de l'échantillon tester

La formule qui nous permet de calculer la dureté (HV) est la suivante :

$$\text{La dureté HV} = \frac{F}{S}$$

Calculer la valeur moyenne de d soit :

$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

La valeur de la surface est donc :

$$S = \frac{d^2}{2 \sin \gamma / 2} = \frac{d^2}{1.8544}$$

Avec γ : angle de la pyramide.

Le rapport de la charge et de la surface devient :

$$\text{HV} = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (\text{F en Kg})$$

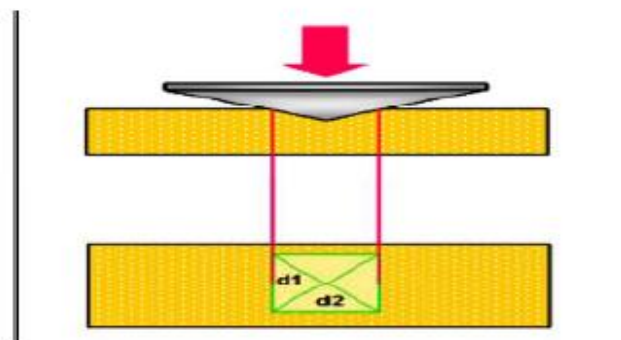


Figure III.14 : principe de dureté Vickers

Chapitre IV : résultats et interprétation

Chapitre IV : Résultats et interprétation

IV.1 Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la présentation, ainsi qu'à la discussion des résultats obtenus lors des différents essais réalisés au cours de la partie expérimentale.

IV.2 Résultats des essais de flexion trois points :

Les figures ci-dessous représentent l'évolution de l'effort en fonction du déplacement pour les différents traitements effectués, à savoir la trempe et le recuit à des températures d'austénitisation différentes (950 °C et 1100 °C).

La superposition des différentes courbes nous montre que :

- Les éprouvettes trempées sont plus résistantes et plus dures que les éprouvettes recuites.
- L'augmentation de la vitesse de refroidissement favorise la formation de la martensite.
- L'augmentation de la température de l'austénitisation favorise la croissance des grains austénitiques ce qui facilite la germination des lattes de martensite lors de refroidissement rapide.

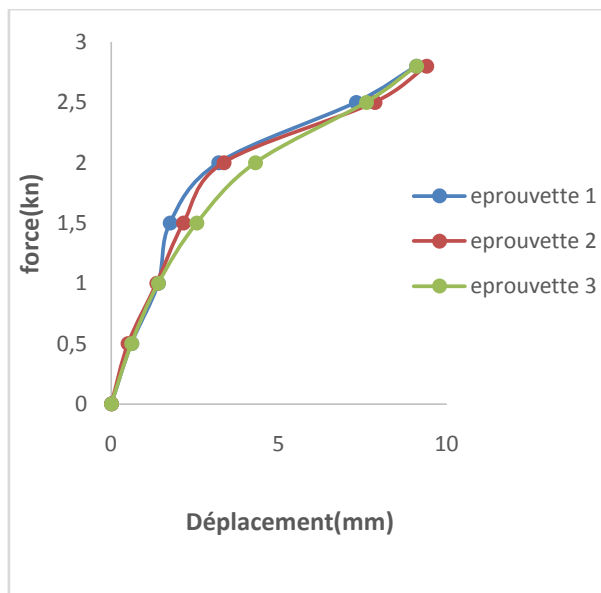


Figure IV.1 : évolution effort déplacement
Pour éprouvette brute.

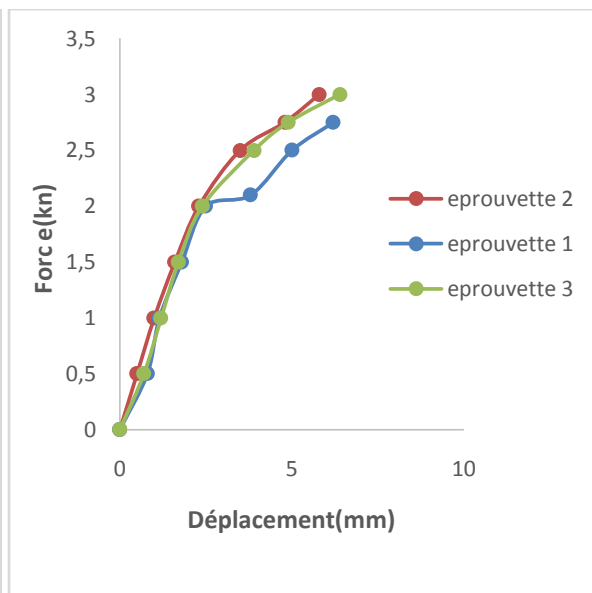


Figure IV.2 : Effort - déplacement (T=950 °C, refroidissement à l'eau)

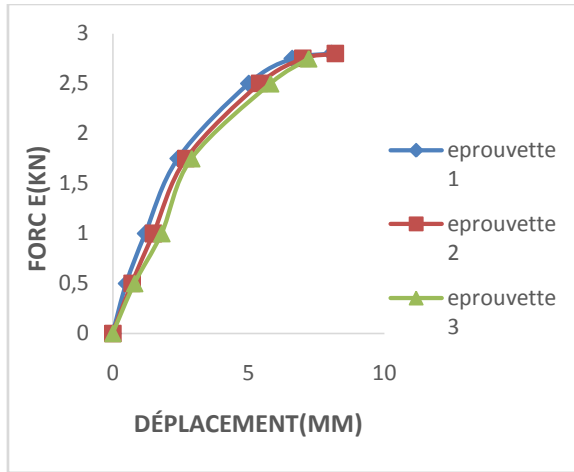


Figure IV.3: Effort – déplacement (T= 950 °C, refroidissement à l’huile).

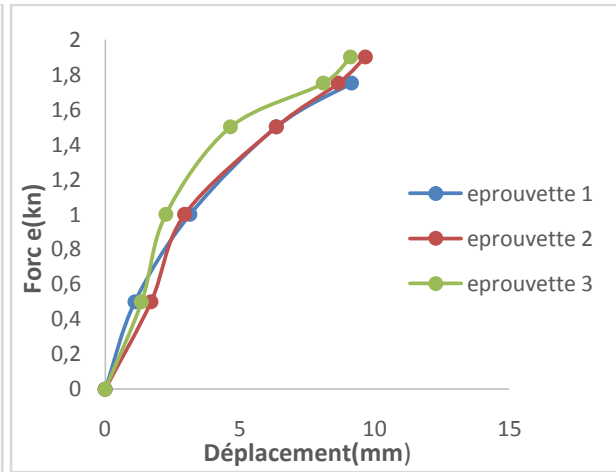


Figure IV.4 : effort – déplacement (T= 950 °C, refroidissement à l’aire).

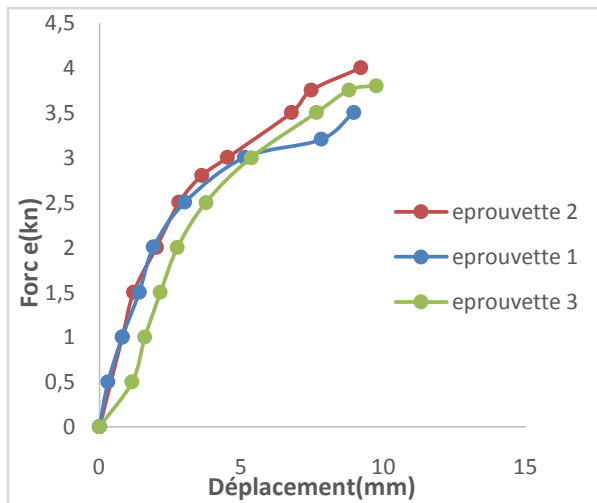


Figure IV.5: effort- déplacement (T= 1100 °C, refroidissement à l’eau).

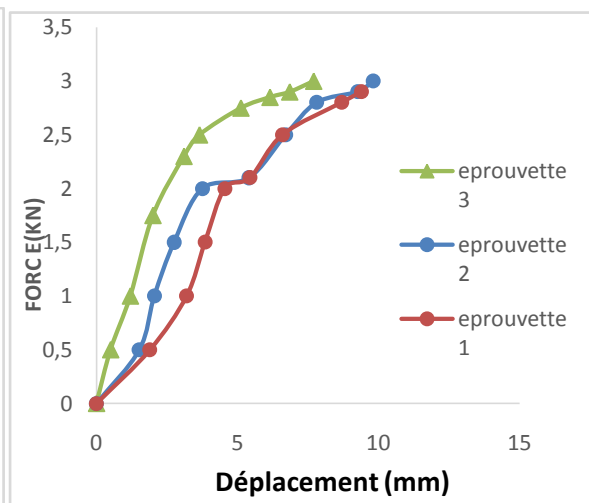


Figure IV.6 : Effort – déplacement (T= 1100 °C, refroidissement à l’huile).

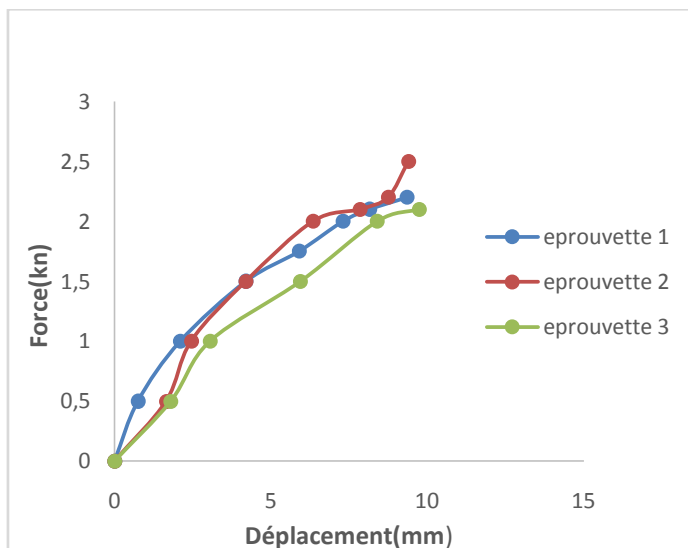


Figure IV.7: Effort – déplacement (T= 1100 °C, refroidissement à l’air libre).

IV.2.1 La superposition des courbes de flexion trois points :

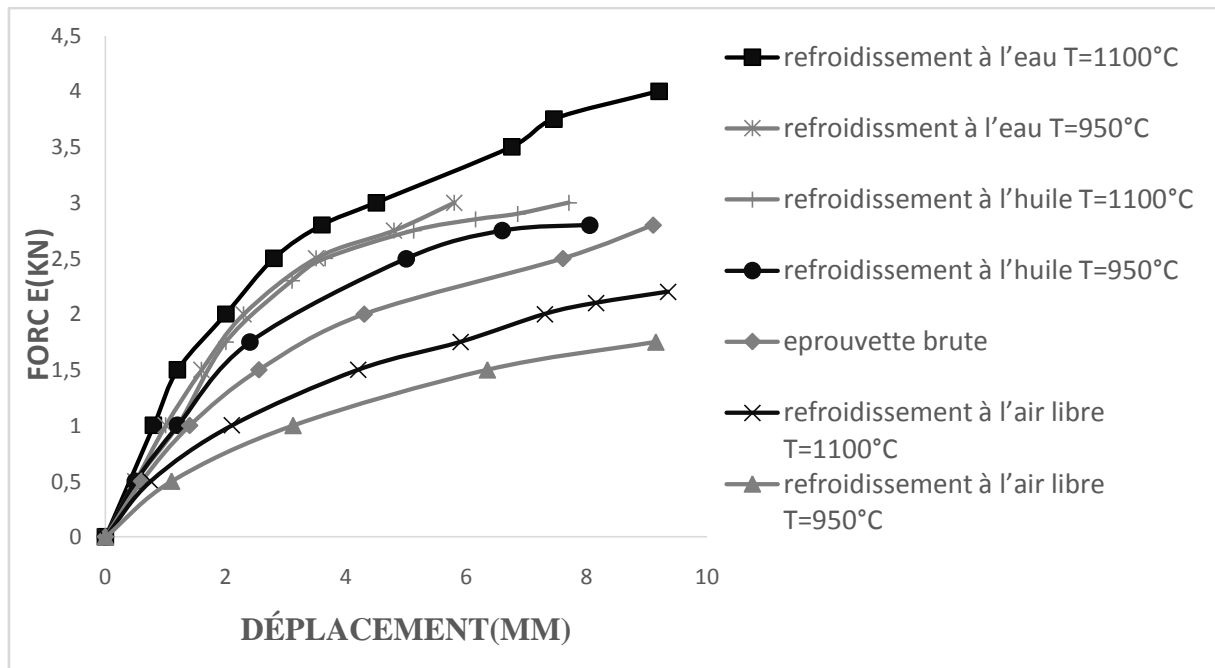


Figure IV.8 : Superposition des courbes de flexion trois points pour chaque traitement.

IV.2.2 évolution de la flèche en fonction des différents traitements thermiques.

Afin d'étudier la déformabilité de nos tôles en fonction des différents traitements effectués, nous avons tracés des courbes (déplacement – traitement correspondant) à des forces constantes 500, 1000, 1500 et 1750 N. Les figures ci-dessous montrent l'amplitude à une déformation plus importante pour des éprouvettes recuites à des températures plus importante, ce qui explique que la croissance des grains austénitiques favorise la déformabilité.

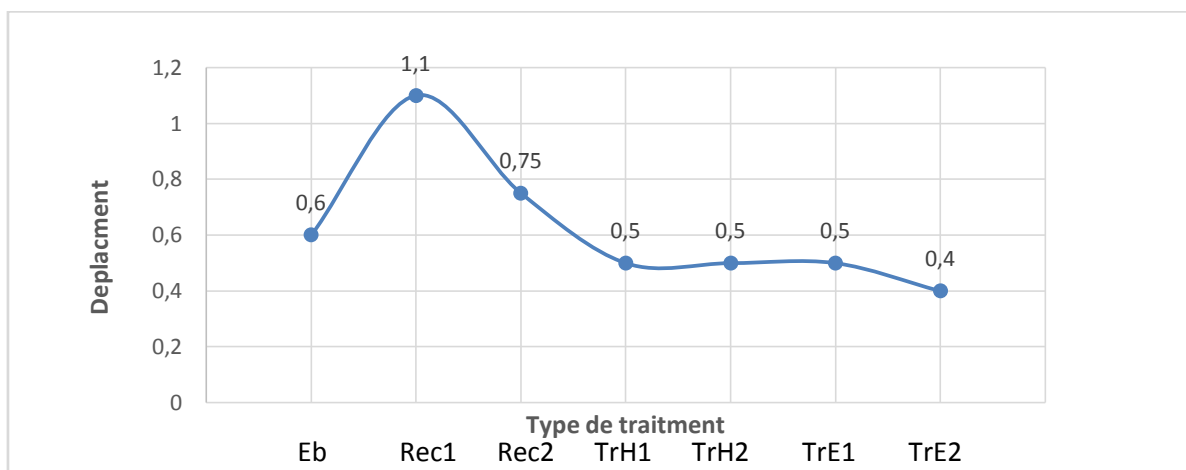


Figure IV.9 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 500N.

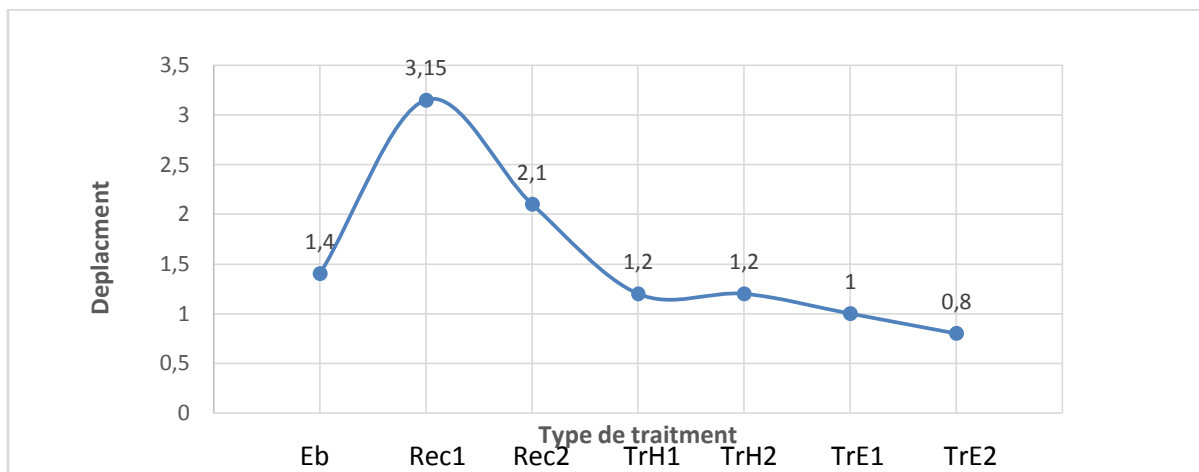


Figure IV.10 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 1000N.

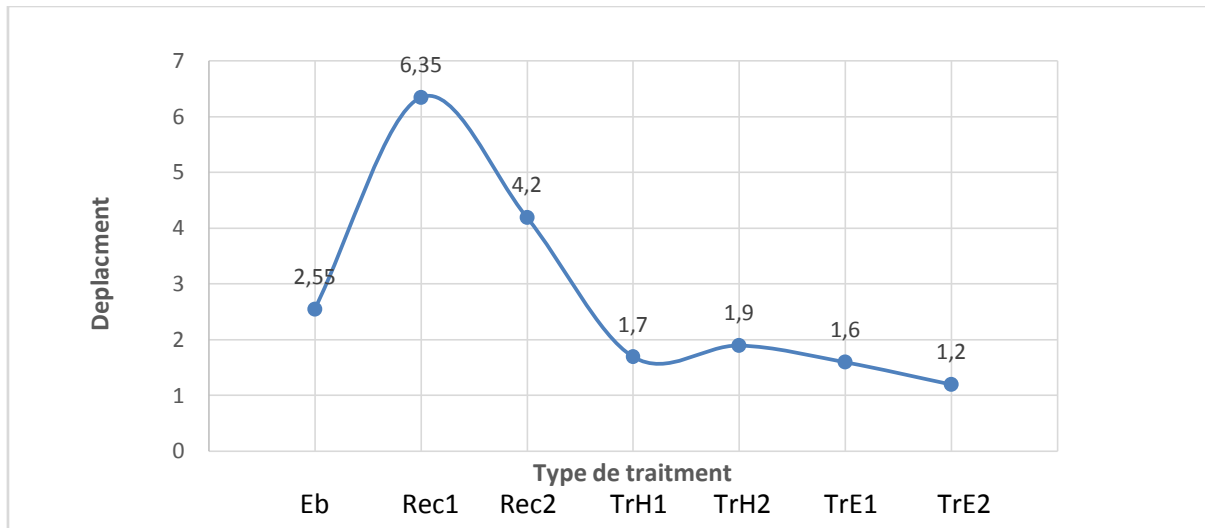


Figure IV.11 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 1500N.

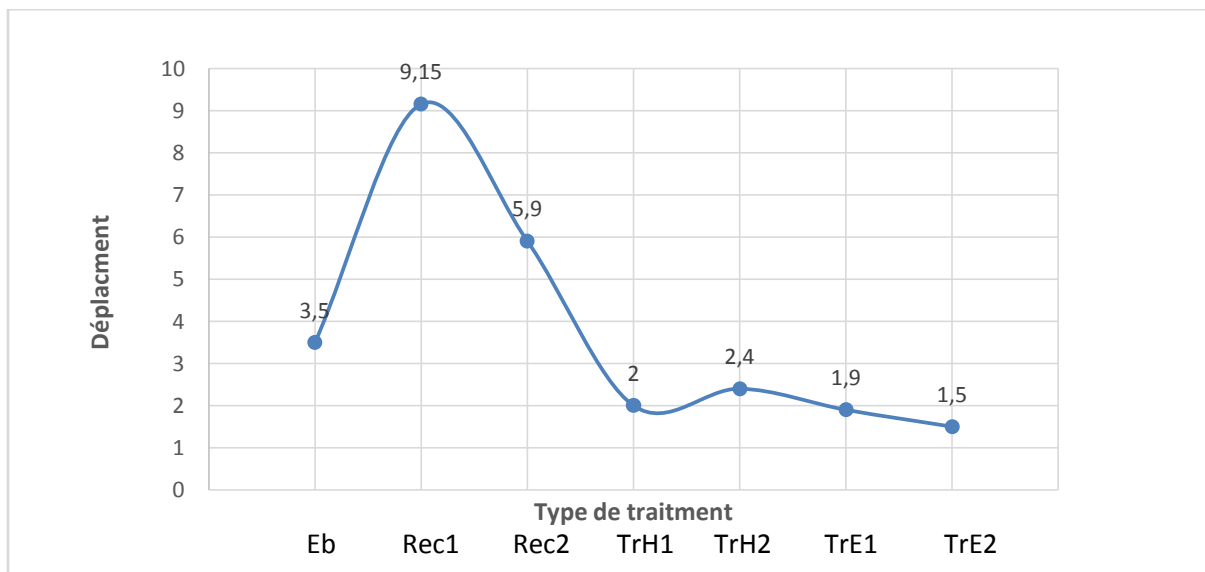


Figure IV.12 : l'évolution du déplacement en fonction de type de traitement à force fixe = 1750N.

IV.3 Résultats des essais de la dureté Vickers:

Le tableau IV.8 ci-dessous montre les valeurs de la dureté Vickers pour l'échantillon brut et les échantillons chauffés à température 950 °C et 1100 °C, refroidissement à l'air libre, l'eau et l'huile.

Tableau IV.1 : les valeurs de la dureté Vickers pour les échantillons.

échantillons	Température De chauffage	Type de refroidissement	Dureté HV
brut	Sans traitement	Sans refroidissement	8.73
1	950 °C	à l'air libre	9.16
2	1100 °C	à l'air libre	9.94
3	950 °C	à l'huile	11.8
4	1100 °C	à l'huile	14.77
5	950 °C	à l'eau	15.66
6	1100 °C	à l'eau	15.67

La figure IV.13 présente l'évolution de la dureté HV en fonction de type de traitement, ces derniers résultats montrent l'augmentation de la dureté au cours de type de traitement.

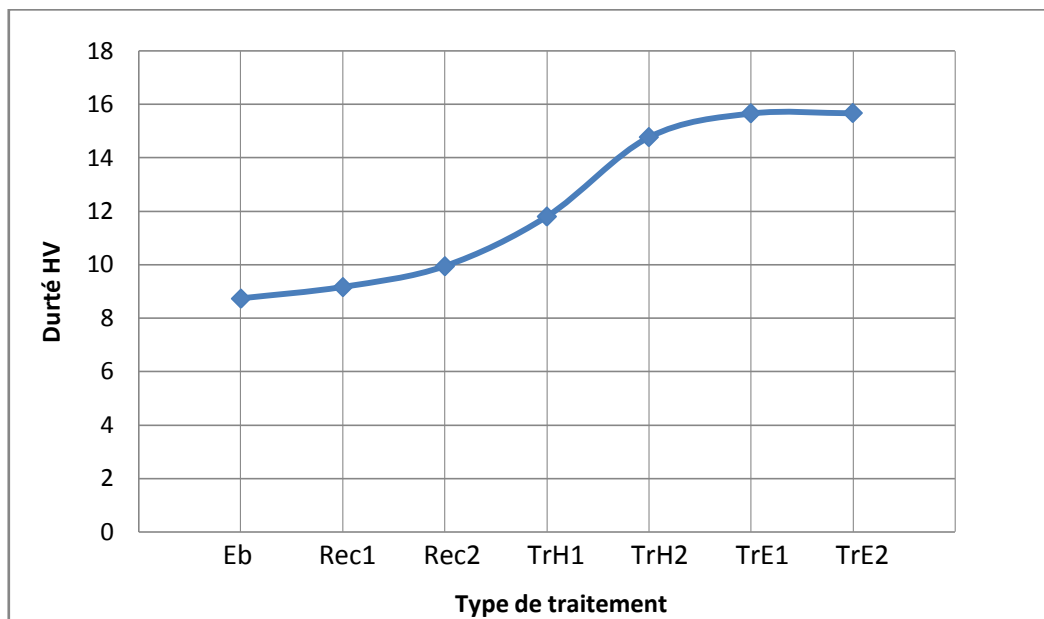


Figure IV.13 : Courbe de la dureté en fonction de type de traitement.

Il est bien connu que les propriétés optimales de mise en service des tôles minces, telles que la dureté et la ténacité dépendent de la température d'austénitisation.

Dans la Figure IV.13 sont reportés les résultats de mesure des duretés obtenus en fonction de type de traitement réalisées à deux températures de chauffage 950 °C et 1100 °C, Il est bien observable, qu'à températures 1100 °C le niveau de dureté est élevé par rapport à température 950 °C.

- Le niveau de dureté maximal 15.67 HV correspond à la température d'austénitisation 1100°C refroidi à l'eau.
- La dureté minimal 8.73 HV correspond à l'éprouvette brute qui n a pas subi un traitement.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire est principalement de nature expérimentale. Il nous a permis d'une part d'acquérir une expérience dans le domaine de l'expérimentation à savoir la manipulation des différents appareils. D'autre part d'étudier l'influence de traitement thermique sur la déformabilité des tôles minces.

Dans notre étude nous avons choisi l'acier hypoeutectioïde XC38 avec 0.38% de carbone, qui a une structure à forte quantité de ferrite et quelques cellules de perlite de structure lamellaire, dans le but de l'augmentation des caractéristiques mécaniques de ce dernier. Nous avons effectué plusieurs traitements thermiques (la trempe et recuit) suivi de différents refroidissements (à l'eau, à l'huile et à l'air libre) à 2 températures de chauffage 950°C et 1100°C.

Caractéristiques de l'acier sans traitement et celles de l'acier recuit varient peu. Par contre l'acier trempé à l'eau et l'huile vu ses caractéristiques de résistances augmentées et l'allongement diminué par rapport à celles du matériau de référence.

En effet l'augmentation de la dureté montre que les traitements thermiques rendent le matériau plus dur. En contrepartie, le matériau devient aussi plus fragile, c'est-à-dire que la déformation maximale supportée par l'échantillon diminue et le matériau casse plus rapidement.

D'autres essais sont nécessaires à savoir la traction et des observations métallographiques pour la microscopie électronique à balayage pour suivre l'évolution de la microstructure après les différents traitements.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] W.D. CALLISTER, Jr, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001.
- [2] Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 3ième édition 1982.
- [3] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, 2007.
- [4] Hache André : corrosion des métaux.
- [5] H.Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions de l'université de Badji Mokhtar, 2007.
- [6] TFM_Marocetude.com_M22_Materiaux_et_traitements_partie1-FM-TFM.
- [7] Muriel Hantcherli, pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 15 Avril 2010.
- [8] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, 2007.
- [9] Taotsung shun, C.M. Wan, J.G. Byrne: A study of work hardening in austenitic Fe---Mn-C and Fe-Mn-Al-C alloys. Acta Metallurgicaet Materialia: 40 (12), 3407-3412(1992).
- [10] CH. Harkati (1998), Thèse de magistère, Université de Constantine.
- [11] J. Campbell : Solidification structure castings second édition(2003), pages 117-177.
- [12] Traitement de surface controlab 1985.
- [13] Science et génie des matériaux modulo Editeur, 2001,233AV Dunbar Mont Royal Québec, Canada
- [14] J. Barralis et G. Maeder .précis de métallurgie, structure, propriétés, Normalisation
- [15] S.Bensaada, Traitements Thermiques, Classification Et Désignation Des Aciers Et Fontes.
- [16] M. AIT GHERBI Hamza, M. SALHI Sofiane. Amélioration de la dureté de la vanne de contrôle dans les systèmes de forage à entraînement supérieur. Editeur a l'université ummto 2013

Références bibliographiques

- [17] BOUIADA BOUTHEYNA et NOURI BESMA. Les effets des traitements thermiques sur la structure des aciers, 2019.
- [18] Raymond Langevin, Guide d'auto apprentissage pour les operateurs de traitement thermique. Québec 2015.
- [19] ROBERT LEVEQUE – traitements thermiques dans la masse des aciers à outils M1134 Techniques de l'ingénieur.
- [20] Chapitre 4 « Les transformations à l'état solide des alliages Fe-C », p. 57.
- [21] Lakhmide, métallographie et traitement thermique des métaux, Edition mir, 1986 Moscow.
- [22] M. Wiest, E.Kassa, W.Davas, J.C.O Nielsen and H.Ossberger : assissent of methods for calculating contact pressure in wheel-rail/switch contact.wear
- [23] Technique d'ingénieur, M1126, 2011.