



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : FABRICATION MECANIQUE & PRODUCTIQUE

Présenté par :

Ben aissi Mouloud & CHENITI Hamza

Thème

CARACTERISATIONS MECANQUES D'UN ACIER TRAITABLE XC-52

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
Dr. Meddah Mustapha	MAA	Président
Dr. Charif Saib	MCA	Encadreur
Dr. Daoudari Ameur	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/2022/2023

Remerciements

Nous remercions « الله » **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage ainsi que la force durant ces longues années d'étude et de nous avoir aidé d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. Charif Saib**, pour son précieux conseil et nous avoir guidées durant toute la période du travail avec sérénité patience et objectif.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Une pensée particulière à nos chers parents pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute cette période.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu et participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Pour l'âme de mon très cher père.

À ma mère : qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie. Reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

À mes chères frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

À mes chères amies et tous mes chers collègues de section.

À tous les membres de ma famille «**CHENITI**» petits et grands, pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaires.

À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Hamza.CH

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents sur qui j'ai pu compter et le source d'affection et de bénédiction durant toute ma vie, que Dieu me les garde.

Mes chers

Mon frère et mon chère amie **Hamza**

À tous les membres de la famille **Ben aissi**,

À tous mes chers amis sans exception

et tous ce qui m'ont enseignés le long de ma vie scolaire.

Mouloud.Ben

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur les aciers.....	4
I.1. Définition d'un acier :.....	4
I.2. Désignation Normalisée des aciers	9
I.2.1. Désignation des aciers	9
I.2.2. Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique.....	10
I.2.3. Désignation des aciers pour traitements thermique.....	12
I.3.1. Désignation des aciers alliés	13
I.3.2. Désignation des aciers faiblement alliés	15
I.3.3. Désignation des aciers fortement alliés	16
I.4. Caractéristique physiques.....	18
I.5. Caractéristique mécaniques des aciers API.....	18
Chapitre II: Les traitements thermiques des aciers XC-52.....	25
II.1. Définition et but des traitements thermiques	25
II.2. Procédés des traitements thermiques :.....	25
II.3. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques	30
II.3.1.Types de fours et leurs atmosphères	31
II.4. Refroidissement des pièces	32
II.5. Le Revenu	39
Chapitre III : Partie expérimentale.....	33
III.1. Acquisition des tôles de l'étude	33
III.2. Analyse chimique	33
III.3. CNC plasma	35
III.3.1. le démarrage.....	35
III.3.2. le découpe CNC	36

III.4. Le sablage	36
III.5. CNC fraiseuse	38
III.6. Préparation et méthodes de caractérisation	39
III.6.1. La trempe	43
III.6.2. Le revenu	44
III.6.3. Mesure de la micro dureté	45
III.7. Essai de traction	48
Chapitre IV : Résultats et discussion	44
Conclusion générale	56
Bibliographie.....	59
Résumé.....	60
Abstract	60

Liste de figure

Figure I .1 : Diagramme Fer-carbone stable ou à graphite.....	5
Figure I.2 : Diagramme Fer-carbone métastable.....	6
Figure II.1 : Différentes opérations des traitements thermiques.....	26
Figure II.2 : Les deffirents types de chauffage	28
Figure II.3 : La courbe de chauffage pour le contour	29
Figure II.4 :La différence de température entre le cœur et la couche extérieure de la pièce.....	30
Figure II.5 : Les aciers hypoeutectoides	33
Figure II.6 : La structure de martensite d'un acier.	35
Figure II.7 : Les courbes TTT de la transformation de l'austénite.....	37
Figure II. 8 : Cycle complet (trempe, revenu).....	40
Figure III.1 : Une tôle XC52	33
Figure III.2 : Machine S1 TITAN Handheld XRF Analyzer	34
figureIII.3 : Les compositions chimiques d'un XC52.....	34
Figure III.4 : Cabine de sablage Unicraft SSK4.	37
Figure III.5 : Dimensions de l'éprouvette.	39
Figure III.6 : Machine CNC Plasma.....	40
Figure III.7 : Le parti de commande CNC Plasma.....	40
Figure III.8 : La méthode de coupage des échantillons	41
Figure III.9 : L'opération de sablage.....	41
Figure III.10 : Machine CNC Fraiseuse.....	42
Figure III.11 : L'opération de fraisage	42
Figure III.12 : Le four tubulaire horizontal.....	43
Figure III.13 : Refroidissement par l'eau des éprouvettes après TTH.....	44
Figure III.14 : Refroidissement par l'air	44
Figure III.15 : Le principe de teste de dureté.....	45
Figure III.16 : Les échantillons enrobés avec les éprouvettes de traction.	46

Figure III.17 : Préparation des échantillons	47
Figure III.18 : Machine de la micro-dureté.....	47
Figure III.19 : Les résultats numériques de la micro-dureté	48
Figure III.20 : Préparation des échantillons pour la traction.....	49
Figure III.21 : Machine de traction	51
Figure III.22 : L'opération de traction	51
Figure IV.1 : Dureté en fonction de la température.	45
Figure IV.2 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes brutes	47
Figure IV.3 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes 870 c°	48
Figure IV.4 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes 950 c°.....	50
Figure IV.5 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes 1000 c°.....	52
Figure IV .7 : Diagramme effort-allongement d'essai de traction.....	53
Figure IV .8 : Diagramme des résultats de Rm et E en fonction de T (C°).....	55

Liste de tableaux

Tableau I. 1 : AECF	6
Tableau I. 2 : Fer-carbone métastable	8
Tableau I. 3 : Désignation des aciers	10
Tableau I. 4 : Les aciers ordinaires.	11
Tableau I. 5 : les coefficient de teneur des aciers	15
Tableau I. 6 : Caractéristique mécanique (tubes de conduite PSL1).	19
Tableau II. 1 : Les choix de la température d'austénisation.	35
Tableau IV. 1 : Résultats de dureté.	44
Tableau IV. 2 : Les résultats de traction à température 870 c°.	54
Tableau IV. 3 : Les résultats de traction à température 950 c°.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 4 : Les résultats de traction à température 1000 c°.	Erreur ! Signet non défini.
Tableau IV. 5 : Les résultats de traction des éprouvettes bruts.	Erreur ! Signet non défini.

Nomenclature

Mn : manganèse

Mo : molybdène

C : carbone

Al : aluminium

Cr : chrome

Ni: nickel

ϵ_p : déformation plastique

B : transformation du bain

R : rotation nécessaire à ramener le plan invariant (plan d'habitat) dans sa position initiale

P : transformation à réseau invariant.

F: Fraction volumique de martensite formée

ϵ : Déformation macroscopique

α et β : Coefficients dépendant de la composition chimique et de la température

α' : martensite

γ :Austénite

E : module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals(GPa).

R_m : la résistance à la traction (contrainte à la rupture).

A% : Allongement % (déformation, Allongement relatif à rupture).

R_e : Limite d'élasticité.

Z % : Le coefficient de striction.



Introduction générale

Introduction générale :

L'acier est un alliage à base de fer additionné d'un faible pourcentage de carbone (de 0,008 à environ 2,14 % en masse). La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier : en deçà de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de " fer " ; au-delà de 2,14 %, les inclusions de carbone sous forme graphite fragilisent la microstructure et on parle de fonte [1]. Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la résistance mécanique et la dureté de l'alliage ; on parle d'aciers " doux, mi- doux, mi-durs, durs ou extra-durs " (classification traditionnelle).

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers alliés. De plus, on peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes) prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'aciers traités [1].

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales :

- _ Résistance aux efforts : module d'élasticité, limite élastique, résistance mécanique ;
- _ Dureté ;
- _ Résistance aux chocs (résilience).

D'autre part, leur coût d'élaboration reste relativement modéré, car le minerai de fer est abondant sur terre (environ 5 % de l'écorce) et sa réduction assez simple (par addition de carbone à haute température). Enfin les aciers sont pratiquement entièrement recyclables grâce à la filière ferraille.

On peut retenir leur reconnaître quelques inconvénients, notamment leur mauvaise résistance à la corrosion, mais à laquelle on peut souffrir, soit par divers traitements de surface (peinture, brunissage, zingage, etc.), ou par addition des éléments réalisant des nuances dites "inoxydables". Par ailleurs, les aciers sont difficilement modulables, donc peu recommandés pour les pièces volumineuses de formes complexes (bâtis de machines, par exemple). On leur préfère alors des fontes. Enfin, lorsque leur masse volumique est compromettante (dans le secteur aéronautique par exemple), on se tourne vers des matériaux

plus légers (alliages à base d'aluminium, composites, etc.), mais parfois beaucoup plus chers [2].

De ce fait, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application techniques : équipements publics (rails, signalisation), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), moyens de transport (carrosseries, transmissions), composeriez, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forêts, porte-plaquette). Les aciers sont aussi très présents dans des produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine) : cette liste est loin d'être exhaustive.

Chapitre I : Généralités sur les aciers

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I.1. Définition d'un acier

Selon le dictionnaire ROBERT, un acier est un « alliage de fer et de carbone (moins de 1,5 %) auquel on donne, par traitement mécanique ou thermique, des propriétés variées (malléabilité, résistance...) ».

Selon la norme NF EN 10020 (qui en juin 1989 a remplacé la norme NF A 02-025), « 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 ces deux définitions, on ne 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.

La solidification d'une fonte s'achève par une réaction eutectique qui inclut la précipitation de carbure de fer et/ou de graphite. [1]

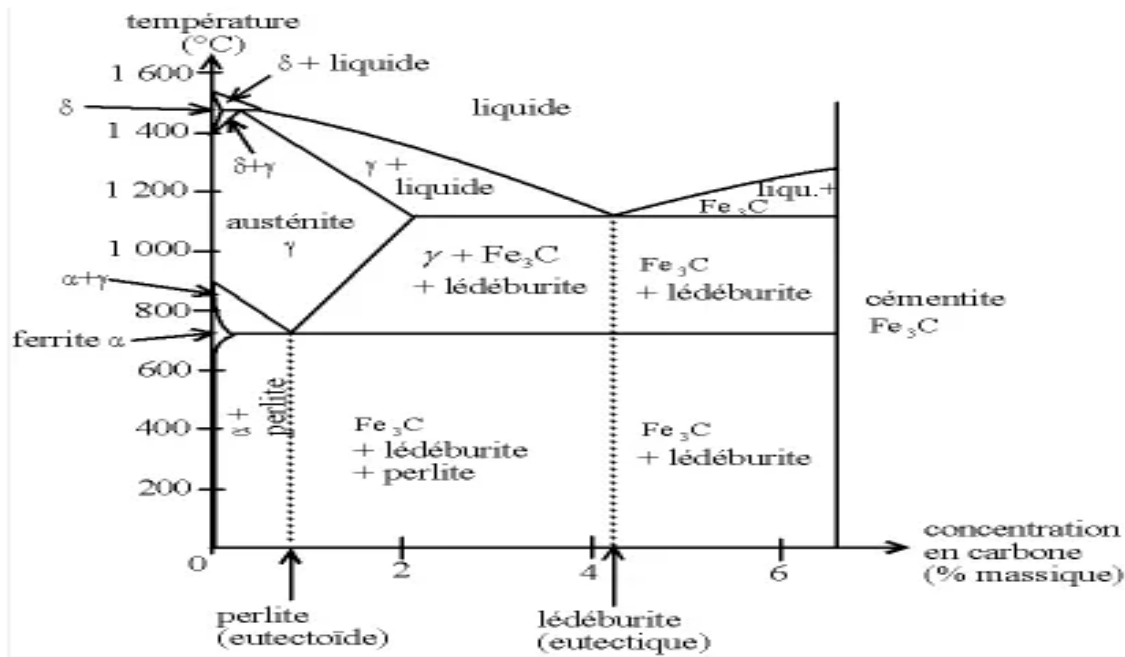


Figure I .1 : Diagramme Fer-carbone stable ou à graphite

A. Description du diagramme stable

L'étude de ce diagramme est analogue à celle faite précédemment (fer- cémentite), il suffit donc de remplacer le mot cémentite par le mot graphite. On doit seulement noter que les températures de l'eutectique et de l'eutectoïde sont plus élevées de quelques degrés (1152°C au lieu de 1145°C et 735°C au lieu de 721°C). Il s'ensuit que toutes les teneurs en carbone des points d'intersections des isothermes (paliers) correspondants avec les branches obliques du diagramme sont légèrement abaissées. C'est ainsi que la teneur en carbone de l'austénite à 1152°C est de 1.55% au lieu de 1.7% et que la lédéburite ne contient que 4.2% au lieu de 4.3%. De même la perlite ne contient que 0.77% au lieu de 0.85%.

B. Interprétation du diagramme stable

Tout alliage contenant moins de 4.3% C, sa solidification commence par un dépôt de solution solide de carbone dans le fer γ le long de la branche AC et tout alliage contenant plus de 4.3% jusqu'à 6.7% de carbone, sa solidification commence par un dépôt de cémentite primaire.

Tout alliage à température et une teneur donnée, situé au-dessous de AECF représente un alliage entièrement solide formé de 1 ou 2 phases et 1 ou plusieurs constituants (voir tableau ci-dessous).

Domaines	Zones	Phases	Constituants
AESG	AESG	1	1 (austénite)
GSP	GSP	2	2 (austénite + ferrite)
GPQ	GPQ	1	1 (ferrite)
ECFKS	EE'S	2	2 (austénite + cémentite)
	ECC'E'	2	3 (austénite + cémentite secondaire + lédéburite)
	CFKC'	2	2 (lédéburite + cémentite primaire)

PSKLQ	PSS'Q	2	2 (ferrite + perlite)
	SE'E''S	2	2 (cémentite secondaire + perlite)
	E'C'C''E''	2	3 (cémentite secondaire + perlite + lédéburite)
	C'KRC''	2	2 (cémentite primaire + lédéburite)

Tableau I. 1 : AECF

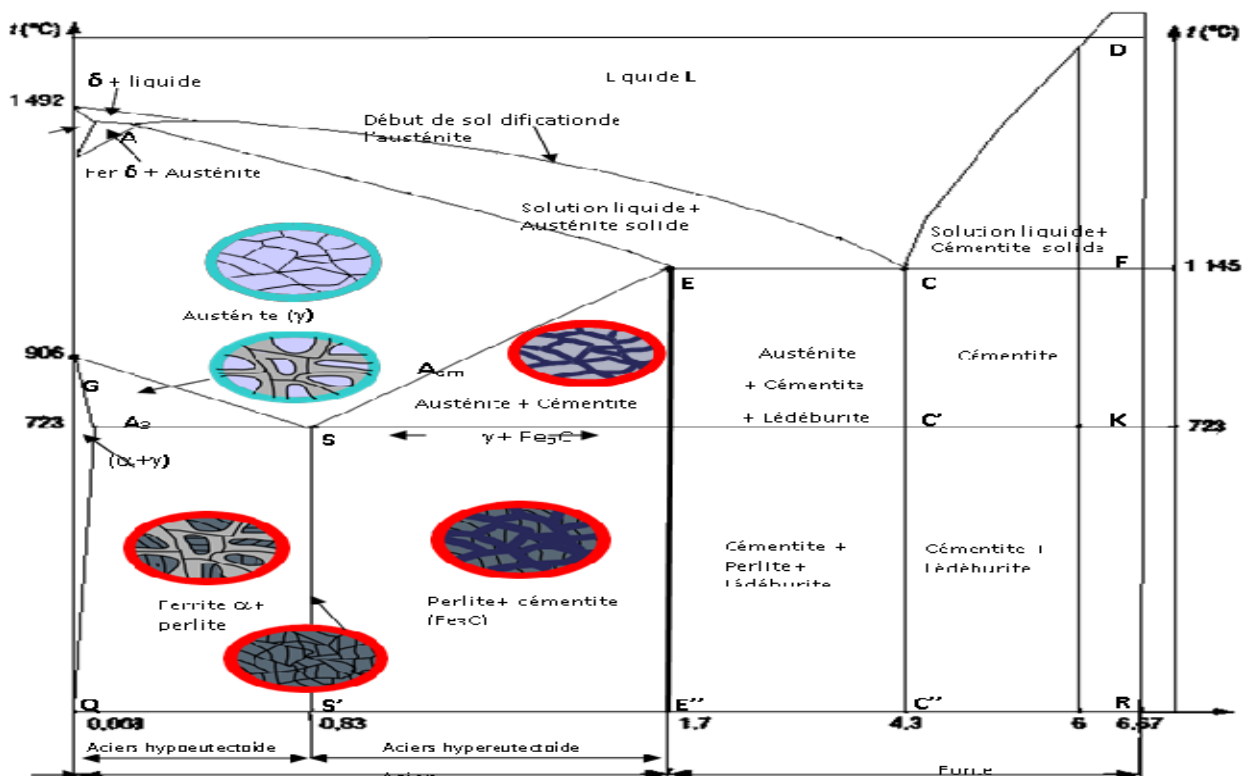


Figure I.2 : Diagramme Fer-carbone métastable

Généralités sur les aciers

Description du diagramme métastable	
Les Lignes	
ACD	Liquidus
AEF	Solidus
ECF	Eutectiques (palier)
A ₁ (723°C) (PK)	Eutectoïde (palier) Elle marque la fin de la solidification de la perlite, mixture de fer contenant 0.83% C, en austénite ; Au-dessus de 723°C la perlite n'existe plus.
A ₃	Elle précise la fin de la transformation de la ferrite en austénite ; la ferrite n'existe plus au-dessus de cette ligne
A _{cm}	Elle indique la fin de la dissolution, aux normes internationales. Après dissociation, de la cémentite dans l'austénite lorsque celle-ci existe.
Les phases	
Austénite	C'est une <u>solution solide</u> de carbone dans le fer γ Cette solution solide occupe seule le domaine AESG (fer γ) et coexiste avec d'autres phases dans les domaines adjacents: - avec la ferrite (GSP) - avec la cémentite (ESKF)
Ferrite	C'est une <u>solution solide</u> de carbone dans le fer α . Cette solution occupe seule le domaine GPQ et coexiste avec l'austénite dans le domaine GPSet avec la cémentite PQRK
Cémentite	C'est une <u>combinaison chimiquement définie</u> (carbure de fer à 6.67% de carbone). La cémentite coexiste avec l'austénite dans le domaine (SEFK) et avec la ferrite dans le domaine (PQRK).
Les points particuliers	

Généralités sur les aciers

Point eutectiques Point C à 4.3% de carbone	A 1145°C, le liquide eutectique à 4.3% de carbone se solidifie en donnant la lédéburite (eutectique formé de Cémentite et d'austénite à 1.7% C). La règle des segments inverses donne le rapport des masses de ces constituants. $\% \text{ Austénite} = \frac{CF}{EF} \cdot 100 = \frac{6.7-4.3}{6.7-1.7} \cdot 100$ $\% \text{ Cémentite} = \frac{CE}{EF} \cdot 100 = \frac{4.3-1.7}{6.7-1.7} \cdot 100$
Point eutectoides Point S à 0.83% de carbone	Au point S, l'austénite de composition 0.83% de carbone est convertie en perlite eutectoïde formée de ferrite et de cémentite dans des proportions :

Tableau I. 2 : Fer-carbone métastable

Description du diagramme Fer-carbone métastable

Ce diagramme peut être ainsi considéré comme le diagramme d'équilibre Fer-cémentite. Ces alliages contiennent le carbone sous forme d'une combinaison Fe_3C et correspondent à un état Métastable permettant l'étude des aciers et les fontes blanches.

Ce diagramme est très utile pour comprendre les aciers, les fontes et les traitements Thermiques. Il est limité à droite par la cémentite (6.67% C, matériau fragile, cassant, très Dur) et fait apparaître les deux grandes familles de métaux ferreux :

- Les aciers (entre 0.008 et 1.7% C)
- Les fontes (de 1.7% à 6.67%C).

Pour chaque température et pour chaque teneur en carbone, ce diagramme indique la nature des phases et des constituants de l'alliage considéré, mais ne renseigne en rien sur la Répartition de ces constituants c'est à dire sur la structure micrographique.

Ce diagramme est simplifié en ce sens que l'on a supprimé tout ce qui concerne le fer δ et la Solution solide de carbone dans le fer δ qui occupe une petite région au-dessus de 1400°C et Ne présente aucune utilité pour l'explication des transformations industrielles des aciers

Interprétation du diagramme métastable

Ce diagramme présente d'intérêt pratique que pour les alliages dont les teneurs en carbone sont supérieures à 2% puisque les seuls alliages industriels contenant du carbone libre sont les fontes.

L'interprétation de ce diagramme est similaire du diagramme fer-cémentite néanmoins il ne faut pas omettre que pour certains calculs ce diagramme n'est pas limité à 6.7% de carbone mais bien à 100% et par conséquent les proportions de l'austénite eutectique et du graphite dans la lédéburite sont donnés par:

$$\% \text{ Austenite eutectique} = \frac{C_F}{C_E} \cdot 100 = \frac{100-4.2}{100-1.55} \cdot 100$$

$$\% \text{ Graphite} = \frac{C_E}{E_F} \cdot 100 = \frac{4.2-1.55}{100-1.55} \cdot 100$$

I.2.Désignation Normalisée des aciers

I.2.1.Désignation des aciers

Les aciers sont classés en deux groupes :

- Aciers non alliés (aciers ordinaires et aciers spéciaux, ...).
- Aciers alliés (faiblement et fortement alliés).

Le tableau ci-dessous donne un aperçu sur le pourcentage des éléments d'alliages dans les aciers alliés et non alliés.

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

% des éléments addition	Acier non alliés	Acier faiblement allié	Acier fortement allié
Al	< 0,3	> 0,3	>0.3
B	> 0		>0
Co	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3
Cr	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Cu	< 0,4	> 0,4	>0.4
Mn + Si	< 1,5	1,5 à 3	> 3
Mo	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
Ni	< 0,3	0,3 à 0,5	> 0,5
Pb	< 0,4	> 0,4	>0.4
V	< 0,05	0,05 à 0,1	> 0,1
W	< 0,2	0,2 à 0,3	> 0,3

Tableau I. 3 : Désignation des aciers.

I.2.2 Désignation des aciers ordinaires sans traitement thermique

Les aciers ordinaires correspondent à des produits de grande consommation. Ils sont obtenus dans les convertisseurs, fours martin. Ce sont des aciers qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire d'éléments d'alliage et qui ne doivent pas dépasser valeurs-limites comme le montre le tableau ci-dessous.

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

Eléments	P+S	Si+Mn	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Al	Ti	Cu	Pb
%	0,20	2	0,5	0,25	0,10	0,05	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,10

Tableau I. 4 : Les aciers ordinaires.

Deux solutions se présentent pour les désigner :

a. La lettre A : est utilisée pour les aciers de constructions mécaniques.

Cette nuance est indiquée par la lettre A suivie d'un nombre correspondant à la limite minimale de résistance à la rupture par traction RM exprimée en dan/mm^2 , éventuellement suivie des chiffres 1, 2, 3 ou 4 (indice de qualité des propriétés mécaniques).

Le chiffre 4 indique la plasticité la plus élevée. On utilise ces chiffres car deux aciers ayant la même charge de rupture peuvent avoir des plasticités différentes.

Exemple : A 60 – 3

A : Acier ordinaire.

60 : Résistance minimale à la rupture à la traction 60 dan/mm^2 .

3 : Indice de qualité.

Leur désignation peut être aussi des indices d'utilisation comme :

S : soudable

M : modulable

L'indice de qualité est défini selon l'expression suivante :

$$N = 2,5 A + R$$

N : nombre définissant l'indice de qualité.

A : allongement en %.

R : résistance en Heard.

Qualité	1	2	3	4
$N \geq$	96	108	114	118

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

Exemple de nuances normalisées : A33, A34, A50, A52, A60, etc.

b. La lettre E : est utilisée pour désigner les aciers destinés à la construction métallique

Cette nuance est désignée par la lettre E suivie d'un nombre correspondant à la limite d'élasticité minimale à la traction et éventuellement suivie d'un chiffre 1, 2 3 ou 4.

Exemple : E 24 – 2

E : Acier ordinaire.

24 : limite d'élasticité minimale de 24 dan/mm².

2 : Indice de qualité.

La catégorie de certains aciers retenus par la norme AFNOR sont :

E 24 – 1 E 26 – 2 E 36 – 2

E 24 – 2 E 26 – 3 E 36 – 3

E 24 – 3 E 30 – 3

Pour distinguer la pureté chimique en soufre et en phosphore des aciers, leur

désignation peut être éventuellement suivie d'une lettre minuscule indiquant la pureté en P et S comme indiqué sur le tableau ci-dessous.

Symbol	a	b	c	d	e	f	g	h	k	m
P + S	0,140	0,120	0,100	0,090	0,070	0,065	0,060	0,055	0,045	0,035

I.2.3. Désignation des aciers pour traitements thermique

Cette catégorie d'aciers est apte aux traitements thermiques la teneur en carbone et en impuretés est contrôlée, on distingue deux nuances :

a. Les aciers courants :

Ils sont désignés par les lettres CC suivis d'un nombre qui désigne la teneur moyenne du carbone en centième pour cent (100 fois la teneur en carbone).

Exemple : CC 35

CC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

35 : contenant 0,35 % de carbone.

Exemple de nuances normalisées : CC 10, CC 20, CC 30, CC 35, CC 55, etc.

b. Les aciers fins :

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

Ces aciers sont employés lorsque les caractéristiques mécaniques exigées sont sévères et nécessitent des transformations de structure par traitement thermique, leur élaboration s'effectue dans le four Martin.

Leur désignation commence par les lettres XC suivies d'un nombre indiquant la teneur en carbone en centième pour cent. Dans cette catégorie d'aciers, les écarts tolérés pour le carbone et les impuretés sont réduits, ces aciers présentent plus de garantie que les aciers courants vis à vis de la teneur en carbone et en impureté.

Exemple : XC 85

XC : Acier ordinaire pour traitement thermique.

85 : contenant 0,85 % de carbone.

Leur désignation peut être aussi suivie d'une lettre minuscule indiquant l'indice de pureté comme :

a : pureté minimale.

d : pureté moyenne.

m : pureté maximale.

Exemple de nuances normalisées : XC 10, XC 12, XC 18, XC 35, XC 38, etc.

I.3. Modes de traitement thermique pour les aciers au carbone c

- L'acier contenant moins de 0,30 % C est destiné à subir une cémentation est appelé acier trempé.
- Les aciers contenant 0,35 à 0,50 % C sont destinés à l'amélioration qui est la trempe suivie d'un revenu à haute température.
- Les aciers contenant 0,60 à 0,75 % C sont destinés à recevoir une trempe et un revenu à température moyenne.

Les aciers contenant 0,8 à 1,3 % C sont dits aciers à outils et sont destinés à subir une trempe suivie d'un revenu à température basse.

I.3.1. Désignation des aciers alliés

Ces types d'aciers sont obtenus par l'addition volontaire d'éléments d'alliage. Ce sont des aciers contenant, outre le fer et le carbone un ou plusieurs éléments destinés à améliorer leurs propriétés mécaniques.

Ce sont des aciers de grande pureté. Leur élaboration s'effectue dans le four Martin, le four

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

électrique ou le creuset.

Les principaux éléments d'alliages et leurs symboles normalisés sont présentés dans le tableau ci-dessous avec le coefficient de teneur de chaque élément.

Eléments	Symbole		Coefficient
	Chimique	Normalisé	
Aluminium	Al	A	x 10
Chrome	Cr	C	x 4
Cobalt	Co	K	x 4
Cuivre	Cu	U	x 10
Etain	Sn	E	x 10
Magnésium	Mg	G	x 10
Manganèse	Mn	M	x 4
Molybdène	Mo	D	x 10
Nickel	Ni	N	x 4
Phosphore	P	P	x 10
Plombs	Pb	Pb	x 10
Silicium	Si	S	x 4
Soufre	S	F	x 10
Titan	Ti	T	x 10
Tungsten	W	W	x 10
Vanadium	V	V	x 10
Zinc	Zn	Z	x 10
Antimoine	Sb	R	x 10
Cadmium	Cd	Cd	x 10

Tableau I. 5 : les coefficients de teneur des aciers

Les éléments d'addition sus-mentionnés agissent de deux façons principales sur l'acier.

a. Leur action sur la formation de l'austénite

Les éléments alphagènes tels que Si, Cr, Al, W, Mo et V s'opposent à la formation de l'austénite pour une teneur suffisante, l'alliage demeure à l'état perlitique depuis la température ordinaire jusqu'à la température de fusion.

Les autres éléments gammagènes Ni, Mn et Co facilitent la formation de l'austénite au point de la rendre stable à la température ordinaire lorsqu'ils sont en proportion suffisante.

b. Leur action sur la formation de carbures complexes

Ils facilitent la naissance des carbures complexes, généralement plus durs que le carbone de fer et qui demeurent noyés et non dissous dans le reste de l'alliage. Ces carbures influent sur les propriétés mécaniques de l'acier.

Selon les éléments d'addition et leurs quantités d'addition, on distingue deux types d'aciers :

- Aciers faiblement alliés.
- Aciers fortement alliés.

I.3.2. Désignation des aciers faiblement alliés

Ce sont des aciers dont la teneur en n'importe quel élément d'addition ne doit pas dépasser 5 %, ils sont désignés par :

- Un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone exprimé en centième Pour cent (multiplié par 100).
- Suivi de symboles normalisés des éléments alliés dans l'ordre des teneurs décroissantes, c'est à dire, le premier élément indique toujours l'élément dont la teneur est la plus élevée.
- Les symboles sont suivis par des nombres indiquant la teneur moyenne des éléments d'additions multiplié par 4 pour les éléments C, K, M, N, S et par 10 pour tous les autres éléments.

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

Remarque :

La désignation des éléments mentionnés ci-dessous est négligée dans le cas où leur teneur est égale ou inférieure à celle mentionnées ci-dessous

M, S	N	C	D, V
1 %	0,5 %	0,25 %	0,10 %

Exemples :

45 CD 20 – 4

C'est un acier faiblement allié contenant :

- 0,45 % de carbone.
- $20/4 = 5$ % de chrome (C).
- $4/10 = 0,4$ % de molybdène (D).

20 NC 6

C'est un acier faiblement allié contenant

- 0,20 % de carbone.
- $6/4 = 1,5$ % de nickel (N).
- Le pourcentage de chrome (C) est inférieur à 1,5 %.

Exemples de nuances d'aciers faiblement alliés selon AFNOR :

18 CD 4, 10 NC 6, 16 NC 6, 14 NC 11

20 NCD 2, 45 S 7, 38 C 4, 100 C 6, 25 CD 4

35 CD 4, 42 CD 4, 20 NC 6, 30 NC 11 etc.

I.3.3. Désignation des aciers fortement alliés

Ce sont des aciers caractérisés par la présence d'un ou de plusieurs éléments d'addition et au moins un de ces éléments a une teneur supérieure à 5 %. Dans cette catégorie, on trouve les aciers inoxydables, les aciers rapides pour la confection d'outils, les aciers à résistance thermique etc.

Leur désignation normalisée est toujours précédée par la lettre Z suivie :

- D'un nombre indiquant la teneur moyenne en carbone au centième pour cent.

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

- Des symboles normalisés des éléments d'addition rangés dans l'ordre de teneur décroissante.
- Des chiffres indiquant la teneur moyenne en pour cent des éléments d'addition. Dans le cas des aciers fortement alliés, les chiffres indiquent directement la teneur en % des éléments d'addition, donc il n'est pas nécessaire de diviser par les coefficients 4 ou 10 Comme dans le cas des aciers faiblement alliés. [2]

Exemples :

Z 160 CDV 12

Z : symbole de l'acier fortement allié contenant :

- 1,60 % de carbone.
- 12 % de chrome

Z 6 CN 18 – 09

C'est l'acier inoxydable courant contenant :

- 0,06 % de carbone
- 18 % de chrome.
- 9 % de nickel.

I.3.3.1. Aciers au carbone pour appareils à pression

Aciers de qualité non alliés (Fe/C ou Fe/C/Mn) auxquels il est demandé de retrouver leur structure d'emploi par normalisation (et éventuellement revenu) après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage.

I.3.3.2. Aciers pour emboutissage et pliage à froid

Aciers de qualité livrés en produits plats auxquels il est demandé de présenter des propriétés particulières de ductilité, d'emboutissage et d'état de surface. En général, les teneurs en éléments interstitiels de ces aciers sont réduites le plus possible (sauf parfois en phosphore ajouté pour augmenter la limite d'élasticité). Parmi ces aciers, on peut classer les aciers pour emballages, aciers de qualité auxquels, outre l'aptitude à l'emboutissage, on demande une propreté inclusionnaire particulière et, dans certain cas, une protection spécifique contre la corrosion (fer

blanc et fer chromé notamment).

I.3.3.3. Aciers de qualité alliés

Aciers qui contiennent des éléments d'alliage mais ne sont pas, en général, destinés à un traitement thermique. Font partie de cette catégorie :

- des aciers à grains fins soudables de construction métallique;
- des aciers pour tôles magnétiques;
- des aciers pour rails, palplanches ou cadres de mine;
- des aciers en produits plats destinés à un formage à froid sévère et contenant des éléments d'affinement du grain tels que B, Nb, Ti, V et/ou Zr;
- des aciers ne contenant comme élément d'alliage que Cu;
- des aciers dits « dual phase » (aciers biphasés ferritiques avec 10 à 35 % de martensite). [3]

I.4. Caractéristique physiques

La couleur, la masse volumique, le point de fusion, conductibilité et le coefficient Thermique de dilatation.

La densité de la majorité des métaux dépasse 7000 kg/m³, celle des métaux légers (Al, Mg) est inférieure à 3000 kg/m³.

Il est important de connaître le point de fusion des métaux pour pouvoir le traiter à chaud Afin d'obtenir les éléments coulés.

La dilatation produite par l'échauffement est caractérisée par le coefficient de dilatation Linéaire ou volumique, ces coefficients sont pris en compte lors de toute étude de construction Métallique puisque des désordres peuvent survenir à la suite d'une variation de température. [4]

I.5. Caractéristique mécaniques des aciers API

Les qualités d'acier couramment utilisées dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications API [American petroleum Institute] qui sont adaptées depuis 1922 par l'industrie pétrolière Américaine

- Dénommées 5L pour les qualités normales
- 5L(□), pour les qualités à haute résistance.

Généralités sur les aciers

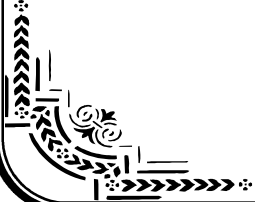
Ces spécifications sont utilisées d'une façon générale dans le monde entier. Les qualités d'acier les plus employées ont les propriétés mécaniques présentées dans le: [5].

API 5L – PSL1	Résistance à la rupture [N/mm²]	Limite élastique [N/mm²]
X42	414	290
X52	455	359
X60	517	414
X65	531	448
X70	565	483

Tableau I. 6 : Caractéristique mécanique (tubes de conduite PSL1).

Chapitre II : Les traitements thermiques des aciers

XC-52.



Chapitre II : Les traitements thermiques des aciers XC-52

II.1. Définition et but des traitements thermiques

La définition retenue par la norme NF EN 10052 pour traitement thermique 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. De cela, on peut dire que les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement : c'est la variation de la température en fonction du temps.

Les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Ils sont appliqués surtout aux aciers destinés aux traitements thermiques (aciers fins et aciers alliés). En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage. Il faut prendre en compte avant tout, la composition chimique, les dimensions et la géométrie de la pièce traitée. Les traitements thermiques ayant pour but :

- 1) D'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux et les rendre plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications de ;
 - La ductilité (capacité de déformation),
 - La résilience, ou ténacité (résistance au choc),
 - La résistance (limite d'élasticité, résistance à la traction),
 - La dureté.
- 2) De régénérer un métal qui présente un grain grossier : affiner les grains, homogénéiser la structure (matériaux ayant subi le forgeage).
- 3) De supprimer les tensions internes des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (écrouissage, emboutissage, fluotournage).

II.1.1 Matériau industriel acier C52

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).

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

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.

II. 2. Procédés des traitements thermiques

Le procédé de traitement thermique (fig. 1) se compose de :

- 1) AB : Echauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple AC_3).
- 2) BC : Maintient à une température bien définie :
- 3) CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - Lente (à l'air).
 - Très lente (dans le four).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau).

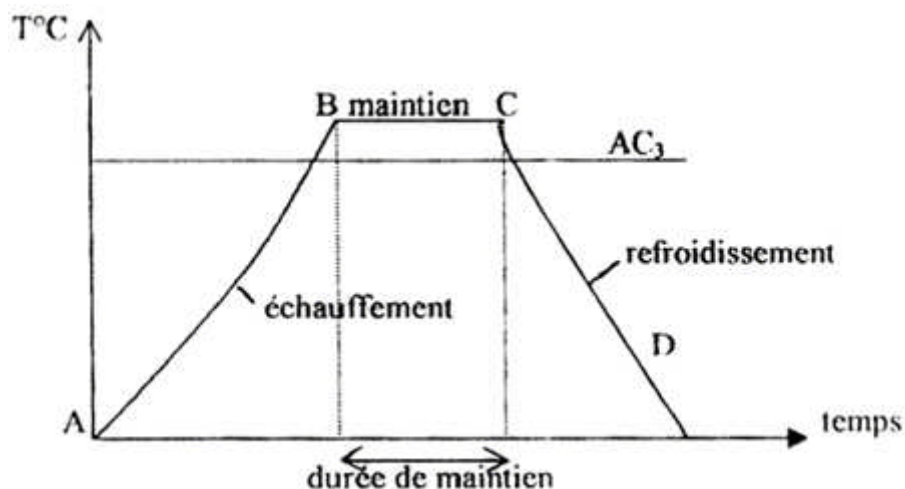


Figure II.1 : Différentes opérations des traitements thermiques.

L'ensemble des traitements thermiques jouent sur les transformations de phases au chauffage et au refroidissement, les mises en solution ou apparition des précipités et la diffusion d'éléments divers au chauffage. La taille des grains et leur grossissement interviennent. Cela agit sur le résultat final de la structure et par ailleurs dépend également des conditions des traitements thermiques et éventuellement des éléments d'addition. [1]

II.2.1. Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir un faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces.

a. Par transmission de la chaleur

On distingue trois possibilités :

- Par conductibilité : La pièce est chauffée dans un four ordinaire où elle est en contact qu'avec le sol du four, elle ne reçoit par conductibilité qu'une petite quantité de la chaleur dépensée.
- Par convection : Dans ce cas, la pièce est chauffée par contact avec un fluide chaud (gaz ou liquide) qui se déplace et lèche la pièce en lui cédant une grande partie de la chaleur dépensée.
- Par rayonnement : La chaleur absorbée par les parois et la voûte du four est rayonnée vers la pièce qui l'absorbe. C'est le cas où l'apport de chaleur est le plus important.

Dans la plupart des cas, le chauffage des pièces, est effectué simultanément par convection et rayonnement.

b. Par production de la chaleur dans la pièce

C'est une possibilité de chauffer la pièce en créant dans cette dernière un flux de courant, soit par l'utilisation de la pièce comme conducteur dans un circuit électrique (chauffage par résistance) ou l'emplacement de la pièce dans un champ variable (chauffage par induction) comme le montre les figures(2).

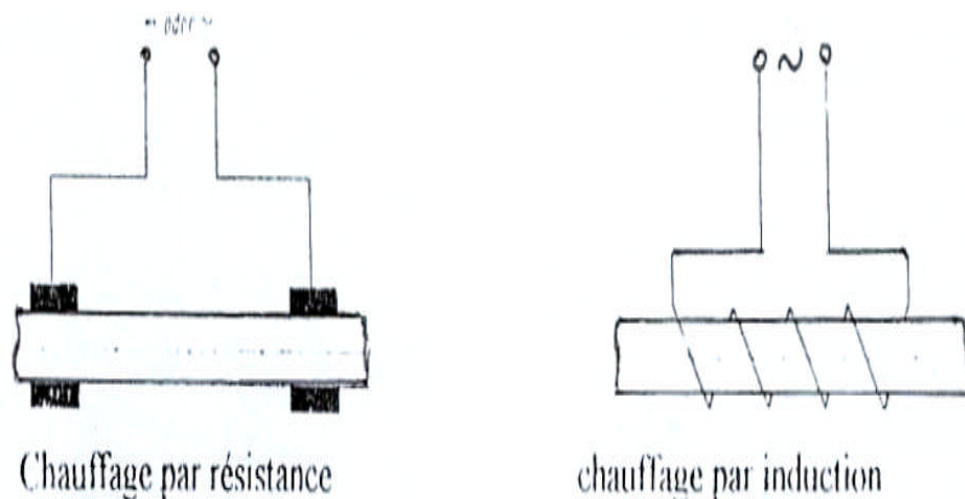


Figure II.2 : Les différents types de chauffage

Cette méthode est utilisée surtout pour les pièces à sections petites et uniformes. On peut obtenir des vitesses de chauffage très élevées. Par exemple pour une pièce de section $\emptyset$

300 mm, la durée de chauffage pour atteindre $T = 1200^{\circ}\text{C}$ est de :

- 26 mm pour le chauffage par induction.
- 4.3 mm pour le chauffage par résistance.
- 2 à 3 heures pour le chauffage dans un four.

Cette méthode est rentable seulement pour des sections inférieures à 150 mm. Les difficultés qui peuvent se présenter lors d'un chauffage rapide sont les fissures et étirages des pièces à la suite de la différence de dilatation de la couche extérieure et du cœur de la pièce où se créent des contraintes pouvant provoquer des fissures pour des températures basses et des déformations plastiques pour des températures élevées.

Quelque soit le procédé de chauffage utilisé, il existe toujours une différence de température dans les différentes parties de la pièce. Répartition de la chaleur non uniforme.

La figure 3 représente la courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce, la courbe est simplifiée comme une droite.

Durant le chauffage, on distingue trois étapes :

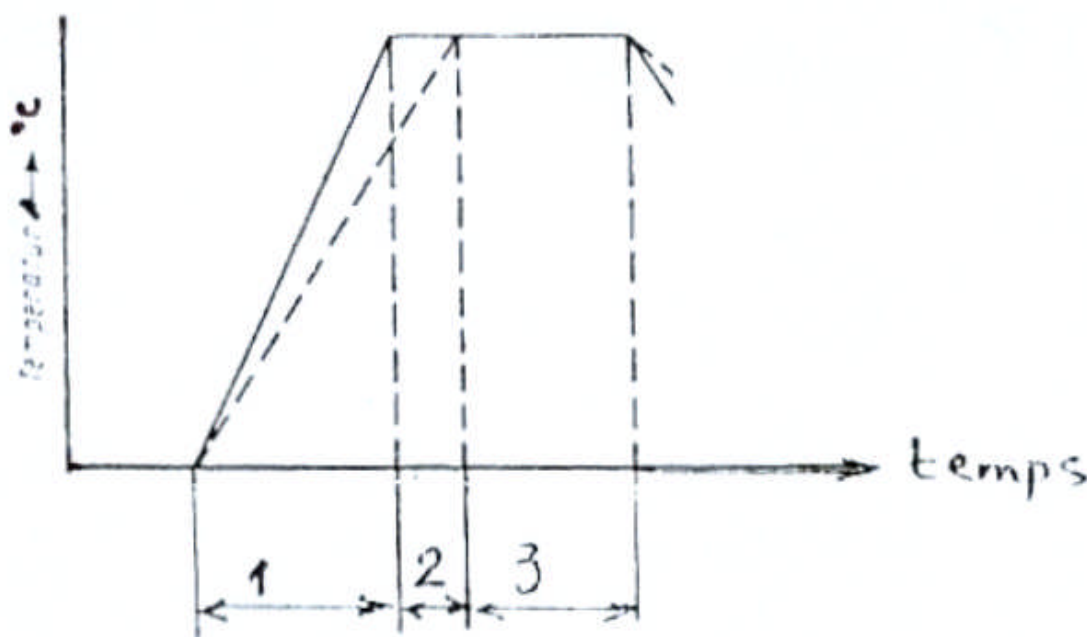


Figure II.3 : La courbe de chauffage pour le contour

a. Durée de préchauffage : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale est atteinte à la surface de la pièce.

b. Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation : C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.

c. Durée de maintien : C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

Les facteurs principaux, qui influent sur le chauffage de la pièce sont le diamètre (épaisseur), conductibilité, température du four, etc. En général le régime de chauffage pour les aciers est déterminé selon le diamètre de la pièce et les caractéristiques qui sont définis par le carbone équivalent.

Pour des teneurs maximales jusqu'à : 0,9 % C, 1,1 % Mn, 1,8 % Cr, 0,5% Mo, 5,0 %

Ni, 0,25% V, 1,8% Si, 2% W, 0,4 %Ti, 2% Al, et selon RUHFUS et PLFAUME, il est

possible de déterminer la durée de chauffage de la pièce en dépendance de son diamètre et du carbone équivalent (Ceq).

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

$$C_{\text{équivalent}} = C + \frac{Mn}{5} + \frac{Cr}{4} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{10} + V + \frac{Si-0,5}{5} + \frac{W}{10} + \frac{Ti}{5} + \frac{Al}{10}$$

Les paliers représentés sur les courbes (fig.4) ont pour but de diminuer la différence de température entre le cœur et la couche extérieure de la pièce (égalisation de la température). Ces courbes sont valables pour des chauffages de trempe et de recuit de normalisation.

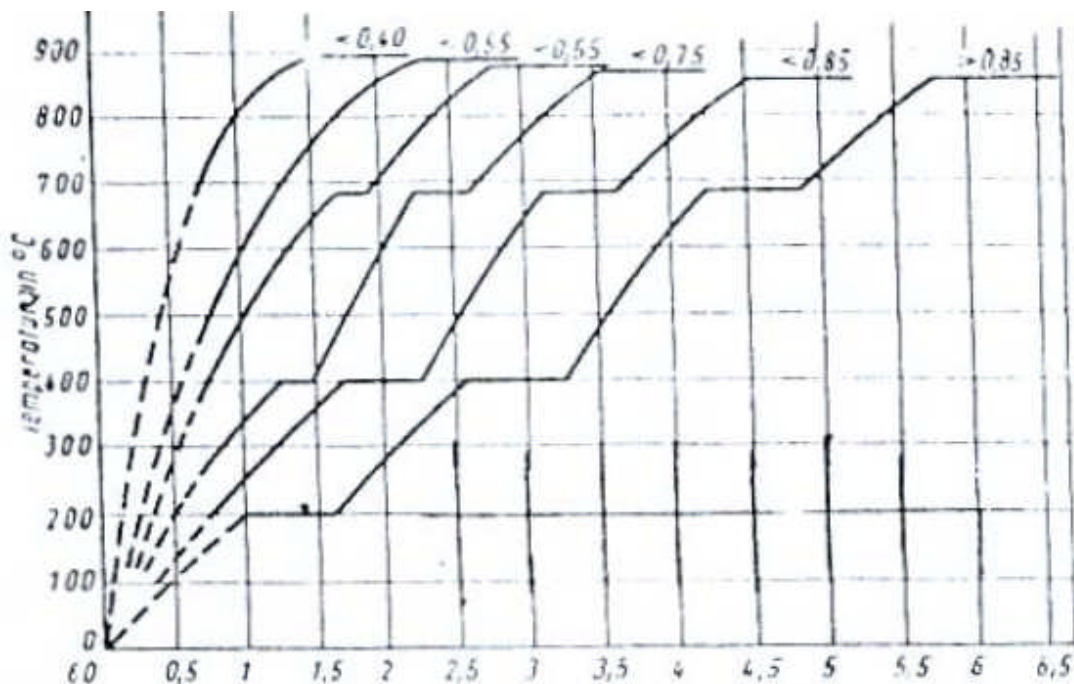


Figure II.4 : La différence de température entre le cœur et la couche extérieure de la pièce.

Temps de chauffage en min, recommandés pour revenu normal et trempe en dépendance de C_e pour une pièce de diamètre 60 mm. (Fig. 4)

Pour les différents chauffages, on peut choisir les vitesses suivantes :

- Chauffage lent : 3 à 10°C/min.
- Chauffage technique conventionnel (normal) : 50°C/s.
- Chauffage rapide : > 50°C/s.

II.3. Conditions de chauffage des pièces en traitements thermiques

L'appareil de chauffage doit permettre :

- D'atteindre et de maintenir toutes les parties de la pièce à une température déterminée et avec une précision de l'ordre de plus ou moins 5°C.
- D'éviter une dénaturation du métal et principalement une décarburation dans le cas des aciers.
- De présenter des possibilités de préchauffage lorsque la température à atteindre est élevée, En général seul le chauffage dans une enceinte fermée possédant une régulation automatique de température est susceptible d'offrir la solution cherchée.

II.3.1.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.

d. Atmosphères

Lorsque les pièces sont chauffées jusqu'aux hautes températures dans ces fours à flammes ou dans les fours électriques, les gaz entrent en réaction avec la surface du

métal, ce qui entraîne l'oxydation ou la décarburation des couches superficielles des pièces.

- L'oxydation résulte de l'interaction du métal avec l'oxygène ou la vapeur d'eau se trouvant dans le milieu du four. En général, le dioxyde de carbone CO_2 réagit avec le fer en l'oxydant.

II.4. Refroidissement des pièces

Le point important pour la détermination du régime de refroidissement de la pièce est celui de l'état de structure souhaitée à obtenir. Bien sûr, on cherche toujours à refroidir rapidement pour avoir une productivité élevée, mais on doit prendre en considération les dangers de fissuration et d'étirage des pièces. La vitesse de refroidissement nécessaire à l'obtention d'un état de structure est déterminée selon le diagramme TTT (Température, Transformation, Temps). Le refroidissement s'effectue dans des bacs utilisant l'eau ou l'huile, dans les deux cas, le bain est maintenu à température constante. L'eau chaude se trouvant constamment remplacée par de l'eau froide arrivant par le bas du bac.

On utilise aussi les jets permettant de régler le refroidissement des pièces sur toute leur surface, et enfin des chambres spéciales avec production du brouillard obtenu par jet d'eau et d'air sous pression, surtout utilisé en aviation pour le traitement de certaines pièces en aluminium.

II.4.1. Définition La trempe

La trempe consiste à un chauffage de l'acier à une température de 30 à 50°C au-dessus de la ligne GSK supérieure à celle de AC_3 , pour les aciers hypoeutectoides et supérieure à AC_1 , pour les aciers hypoeutectoides.

A cette température l'acier est maintenu jusqu'à l'achèvement du chauffage complet c'est à dire jusqu'à la transformation des phases, ensuite l'acier subit un refroidissement rapide avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de la trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau et pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'autre nature).

Le but du refroidissement rapide est d'obtenir une structure martensitique, donc éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

termine dans le domaine de la martensite.

Donc la trempe permet de donner un maximum de dureté à l'acier $HV = 700$ à 800 Kp/mm^2 ou $HRC = 60$ à 65 , ce qui donne une structure convenable pour le traitement de revenu.

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif, le plus souvent elle est suivie d'un revenu destiné à diminuer la fragilité et les contraintes internes afin de donner à l'acier les propriétés mécaniques appropriées.

II.4.2. Choix de la température d'austénisation

Les aciers hypoeutectoides doivent être chauffés de 30 à 50°C au-dessus de AC_3 .

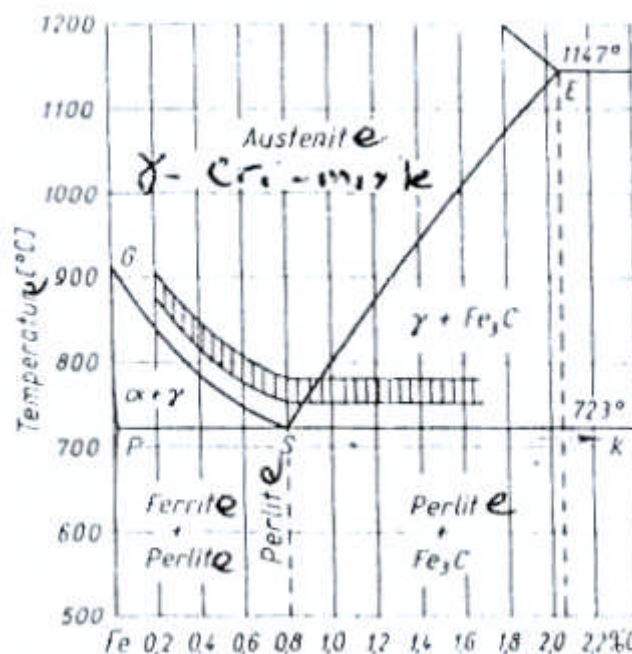


Figure II.5 : Les aciers hypoeutectoides .

Un acier à structure initiale (perlite + ferrite) acquiert, au bout d'un maintien dont la durée dépend de la nuance de l'acier et de ses dimensions une structure austénitique qui se transforme en martensite lorsqu'on refroidit à une vitesse plus grande que la vitesse critique de la trempe.

Un acier hypoeutectoïde chauffé dans l'intervalle AC_1 à AC_3 , garde après la trempe, en plus de la martensite, des plages de ferrite. La présence de ferrite diminue

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

la dureté de l'acier après trempe et ses propriétés mécaniques après revenu. Aussi ce mode de trempe incomplète ne s'emploie pas généralement pour les aciers hypoeutectoïdes.

Les aciers hypereutectoïdes sont portés à $AC_1 + (50 \text{ à } 70^\circ\text{C})$, c'est la température à laquelle apparaît l'austénite, bien qu'une certaine quantité de cémentite secondaire reste encore. Il en résulte qu'après la trempe, la matrice martensitique compte des particules de cémentite non dissoutes lors du chauffage. Cette structure assure une dureté et une tenue à l'usure plus élevées.

Pour de nouveaux aciers, la température d'austénitisation avant la trempe dépasse les limites mentionnées ci-dessus à cause de la faible dissolution des carbures contenant des éléments d'alliage. Dans ces cas, l'augmentation de la température d'austénitisation n'entraîne pas un grossissement perceptible du grain d'austénite car les carbures non dissous ralentissent la croissance du grain austénitique.

L'augmentation de la température de chauffe pour trempe (ou augmentation de séjour à cette température) entraîne la dissolution des carbures, le grossissement du grain et l'homogénéisation de l'austénite, L'austénite surfusionnée se trouve aussi stabilisée surtout dans l'intervalle de température de la transformation perlitique, la vitesse critique de trempe diminue et la pénétration de trempe de l'acier s'améliore. La martensite obtenue à partir de ces conditions de trempe à la forme d'aiguilles fines et relativement ductile.

La figure (6), ci-dessous, représente la structure de martensite d'un acier à 0,86 % C chauffé à 760°C et refroidi dans l'eau, la martensite à structure à aiguilles fines est difficile à reconnaître. Ce même acier est chauffé à des températures encore supérieures 1000°C (surchauffé), on aura un développement rapide des cristaux d'austénite, ce qui donne après refroidissement une martensite à structure d'aiguilles mais plus épaisses (fig6).

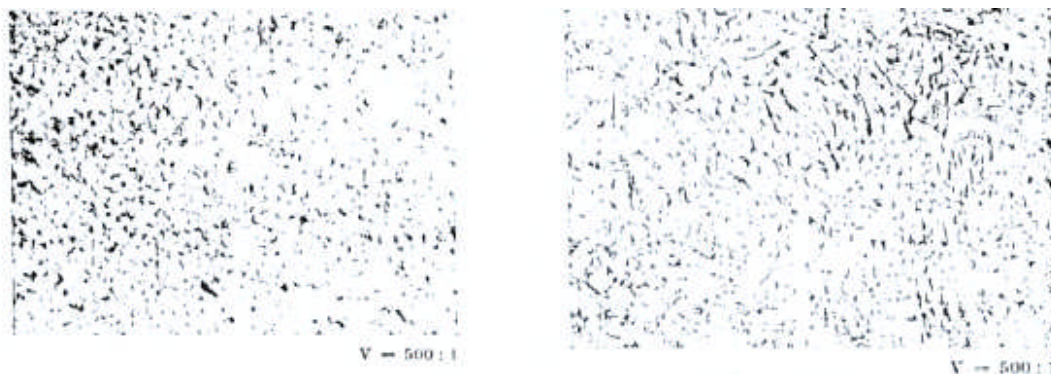


Figure II.6 : La structure de martensite d'un acier.

Ce type de martensite est sensiblement fragile que le premier type à aiguilles fines et il est préférable d'éviter la structure à aiguilles épaisses durant le traitement thermique.

La surchauffe durant la trempe produit une grande quantité du reste d'austénite et avec

l'augmentation de la température la quantité d'austénite augmente effectivement, ce qui provoque une diminution de la dureté de l'acier (surtrempé). Sur le tableau ci-dessous on peut remarquer que la dureté HV d'un acier à 0,86 % C est croissante avec l'augmentation de la température, mais à partir des températures de surchauffe, d'environ 950°C, HV diminue.

Les aciers trempés avec une grande quantité de reste d'austénite produisent des changements de dimensions et doivent subir avant le travail de finition, un refroidissement profond ($T = -60^{\circ}\text{C}$) afin de transformer le reste de l'austénite en martensite.

Température de trempe en $^{\circ}\text{C}$	750	800	850	900	950	1000	1100	1200
HV	740	790	810	800	750	650	425	320

Tableau II. 7 : Les choix de la température d'austénisation.

II.4.3. Choix du temps de maintien (durée de chauffage)

Le maintien, à la température nécessaire de trempe doit assurer le chauffage de la pièce jusqu'au cœur et l'achèvement des transformations de phases, sans être trop long pour ne pas

provoquer le grossissement du grain et la décarburation des couches superficielles de l'air. La durée totale de chauffage ($t_{tot} = t_{ec} + t_{si}$) dépend donc de :

- t_{ec} : durée d'échauffement à cœur jusqu'à la température demandée. Elle dépend de la forme des pièces et des dimensions, de la nuance de l'acier, du type de four etc.
- t_{si} : durée de séjour isotherme qui dépend de la composition et de l'état initial de l'acier.

Dans la pratique pour déterminer t_{tot} , on se réfère aux données expérimentales. La durée différents types prévus pour la trempe des pièces (durée d'austénitisation). approchée du chauffage peut atteindre jusqu'à 800 ou 850°C dans des fours de

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

Tableau II.2 : Durée d'épaisseur de pièce.

II.4.4. 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 : $T = f(\log t)$ représenté 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}),

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

- exprimée dans un gradient de température généralement compris entre 700 et 300°C (V 30 , 700 , 0)

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.

La figure (6) représente les courbes TTT de la transformation de l'austénite, surfusionnée avec indication de la vitesse critique de trempe V_c qui effleure le domaine de transformation austénite $\rightarrow$ perlite. Chaque vitesse de trempe $V_t \geq V_c$, assure donc la transformation austénite $\rightarrow$ martensite, c'est à dire qu'elle assure la trempe martensitique[2]

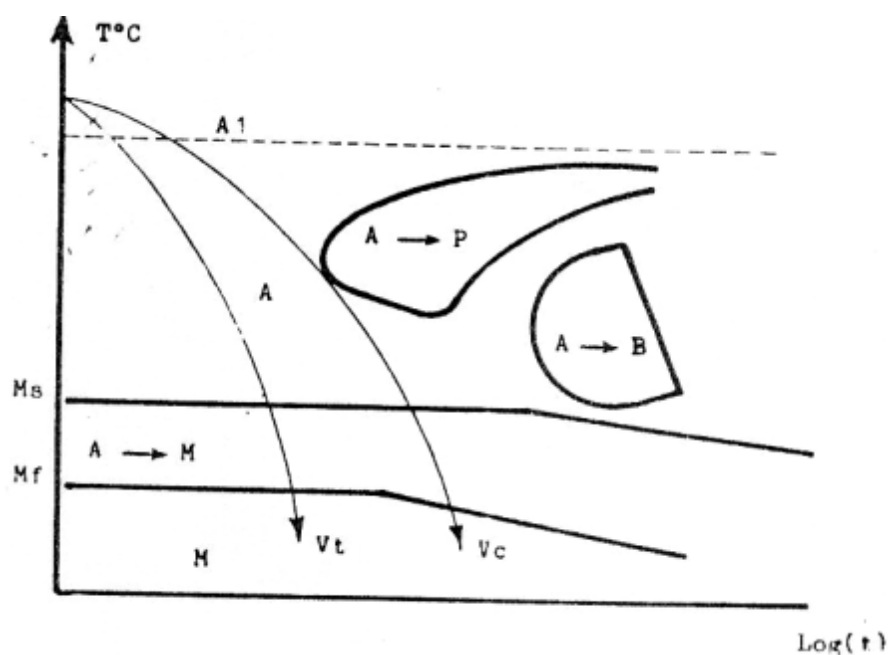


Figure II.7 : Les courbes TTT de la transformation de l'austénite.

II.4.5. La trempe à l'eau

Dans la pratique de tous les jours, l'utilisation de la trempe à l'eau est la plus adéquate car c'est le milieu de refroidissement le moins cher, la vitesse de

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

refroidissement de ce dernier n'est pas constante, l'avantage de l'eau est de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique, l'eau peut former facilement des billes de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux et se dépend de la géométrie de la pièce, Le pouvoir de refroidissement diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée) lorsque la température de l'eau s'élève.

L'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- La température de l'eau.
- L'agitation de la pièce.
- La circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel.

Il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produit étranger (sels) qui changerait sa sévérité de trempe et empêcheraient d'obtenir des résultats constants.

II.4.6. La trempe à l'huile

La vitesse de refroidissement n'est pas constante lors d'une trempe à l'huile, elle est

maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise entre 400 et 600°C suivant les propriétés de l'huile considérées. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente.

L'huile de trempe peut différer par :

- L'huile de base (minérale ou synthétique).
- Les additifs qu'elles contiennent, additifs qui ont pour l'objet soit de modifier le pouvoir refroidissant, soit d'améliorer certaines propriétés (résistance à l'oxydation).

II.4.7. La trempe à l'air

C'est le cas le plus simple à mettre en œuvre, les risques de déformations sont plus grands et plus rapide, le milieu de trempe est choisi surtout en fonction de la trempabilité de l'acier, Pour les aciers au carbone, la trempe se fait dans l'eau de 20 à 40°C. En ajoutant environ 10% de chlorure de sodium à l'eau pour obtenir une trempe plus efficace [3]

II.5. Le Revenu

Appliqué aux aciers au carbone alliés ou non alliés, après une trempe martensitique et/ou martensito-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 martensito-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.

II.5.1. Principe et But de Revenu

La trempe anisotherme est en général un traitement énergétique conduisant à un métal à R_m , R_e , H élevées du fait de la présence recherchée de martensite, mais dont la ductilité (A%)

et la résilience (K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé.

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 A%, K d'autre part. contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal.

Les traitements thermiques des aciers XC-52.

Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en :

- Un réchauffage à une température $T_R < A_{c1}$,
- Un maintien de durée t_R à T_R ?
- 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. Le choix de T_R et t_R permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

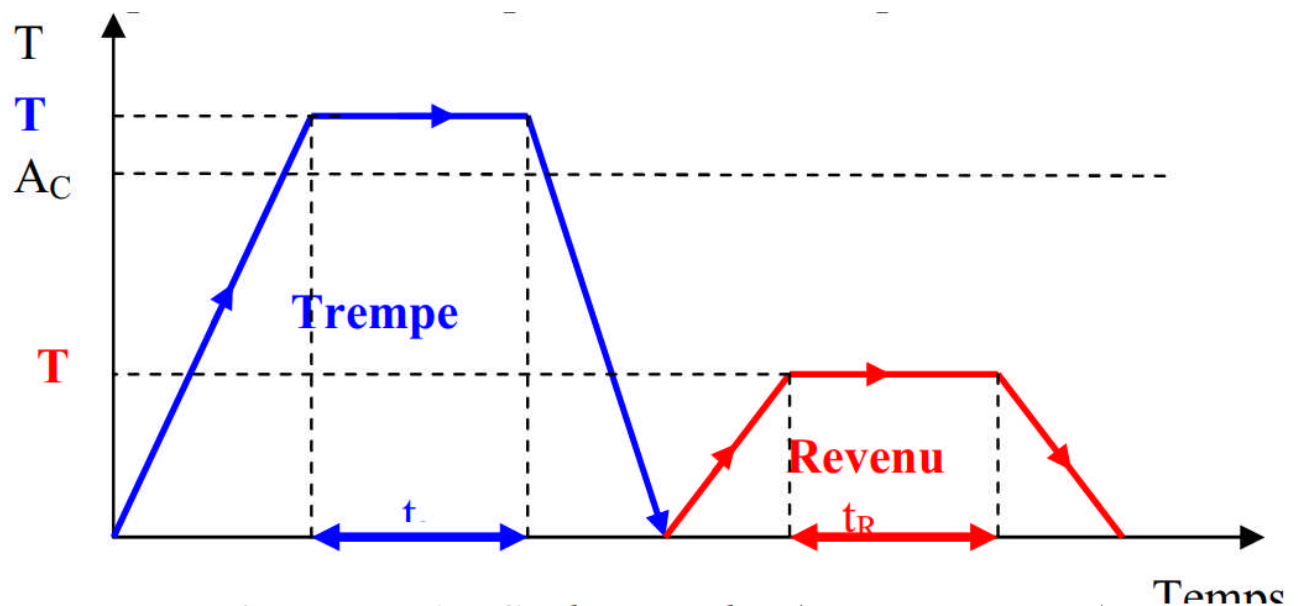


Figure II. 8 : Cycle complet (trempe, revenu)

II.5 .2. DIFFERENTS 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.5.2.1. 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 → 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.

II.5.2.2. 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.

II.5.2.3. Revenu de durcissement

Des revenus effectués entre 450°C 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). [4]

Chapitre III : Partie expérimentale

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1. Acquisition des tôles de l'étude

Les tôles dédiées à l'étude ont été parvenues de la section SONATRACH SP3

Dont les dimensions étaient de 2200x1000 mm²



Figure III.1 : Une tôle XC52

III.2. Analyse chimique

Afin de connaître la composition chimique de la tôle on a procédé à une analyse d'un petit échantillon découpé de la tôle par l'utilisation de l'appareil de THERMOFISHER à laser qui se trouve au niveau de l'unité de MEI – SONEL **GAZ**, la composition chimique révélée était :



Figure III.2: Machine S1 TITAN Handheld XRF Analyzer

Thermo SCIENTIFIC			
Thermo Fisher Scientific 900 Middlesex Turnpike Billerica, MA 01821			
Certificate of Verification			
XL3t-62240			
Reading No	449		
Mode	General Metals		
Time	2022-05-24 09:06		
Duration	27.97		
Units	%		
Sigma Value	2		
Sequence	Final		
Alloy1	Iron/CS : 0.00		
Alloy2	No Match : *3.22		
Flags			
SAMPLE	Eprouvette		
HEAT			
LOT			
BATCH			
MISC			
NOTE			
	%	±	Error
Sn	0	±	N/A
Pd	0	±	N/A
Ag	0	±	N/A
Ru	0	±	N/A
Mo	0	±	N/A
Nb	0	±	N/A
Zr	0	±	N/A
Bi	0	±	N/A
Pb	0	±	N/A
Se	0	±	N/A
W	0	±	N/A
Zn	0	±	0.009
Cu	0.037	±	N/A
Ni	0	±	0.050
Co	0.187	±	0.063
Fe	99.323	±	0.019
Mn	0.365	±	N/A
Cr	0	±	N/A
V	0	±	0.017
Ti	0.044	±	N/A
Sb	0	±	N/A
Al	0	±	N/A
Supervised By: _____			

Figure III.3 : Les compositions chimiques d'un XC52.

Découpage des tôles : pour ce travail nous avons utilisé le procédé de découpage à plasma

III.3. CNC plasma

Les systèmes de découpe plasma offrent des vitesses et un débit de découpe élevés, combinés à un faible coût de découpe par mm. Avec l'introduction des systèmes haute définition, les opérations secondaires sur les pièces traitées sont presque ou complètement éliminées. Les systèmes de découpe au plasma sont efficaces pour traiter des matériaux électriquement conducteurs de différentes épaisseurs. KNUTH propose de nombreux types de tables plasma avec des sources Hyperthermie adaptées à des applications ou à des objectifs spécifiques. Disponible en tables ventilées sèches ou à eau avec tête de coupe à 5 axes ou coupe de tube en option. [9]

La découpe au plasma est un processus qui coupe à travers des matériaux électriquement conducteurs au moyen d'un jet accéléré de plasma chaud. Les matériaux typiques coupés avec une torche à plasma comprennent l'acier, l'acier inoxydable, l'aluminium, le laiton et le cuivre, bien que d'autres métaux conducteurs puissent également être coupés. La découpe au plasma est souvent utilisée dans les ateliers de fabrication, la réparation et la restauration automobiles, la construction industrielle et les opérations de récupération et de mise au rebut. En raison des coupes à grande vitesse et de précision combinée à un faible coût, la découpe au plasma est largement utilisée, des applications CNC industrielles à grande échelle jusqu'aux petits ateliers d'amateurs.

III.3.1. Méthodes de démarrage

Les coupeurs au plasma utilisent un certain nombre de méthodes pour démarrer l'arc. Dans certaines unités, l'arc est créé en mettant la torche en contact avec la pièce à usiner. Certains coupeurs utilisent un circuit haute tension et haute fréquence pour démarrer l'arc. Cette méthode présente un certain nombre d'inconvénients, notamment le risque d'électrocution, la difficulté de réparation, l'entretien de l'éclateur et la grande quantité d'émissions de radiofréquences.[7] Les découpeurs au plasma travaillant à proximité d'appareils électroniques sensibles, tels que du matériel CNC ou des ordinateurs, démarrent l'arc pilote par d'autres moyens. La buse et l'électrode sont en contact. La buse est la cathode et l'électrode est l'anode. Lorsque le gaz plasma commence à s'écouler, la buse est soufflée vers l'avant. Une troisième méthode, moins courante, est la décharge capacitive dans le circuit primaire via un redresseur commandé au silicium.

III.3.2. Méthodes de découpe CNC

Certains fabricants de coupeurs au plasma construisent des tables de découpe CNC, et certains ont le coupeur intégré dans la table. Les tables CNC permettent à un ordinateur de contrôler la tête de la torche pour produire des coupes nettes et nettes. L'équipement plasma CNC moderne est capable de couper plusieurs axes de matériaux épais, ce qui permet des possibilités de cordons de soudure complexes qui ne seraient pas possibles autrement. Pour les matériaux plus minces, la découpe au plasma est progressivement remplacée par la découpe au laser, principalement en raison des capacités supérieures de découpe de trous de la découpeuse au laser.

Une utilisation spécialisée des découpeurs plasma CNC a été dans l'industrie HVAC. Le logiciel traite les informations sur les conduits et crée des motifs plats à découper sur la table de découpe par la torche à plasma. Cette technologie a considérablement augmenté la productivité au sein de l'industrie depuis son introduction au début des années 1980.

III.4. Le Sablage

Une technique industrielle de nettoyage de surfaces en utilisant un abrasif projeté à très grande vitesse, au travers d'une buse, à l'aide d'air comprimé. L'objectif principal de cette technique est le décapage d'un matériau.

De nombreux secteurs industriels ont recours au sablage. Les applications sont nombreuses : nettoyage de surface, ébavurage de pièces, décapage, et même décoration.

Comme son nom l'indique, le sablage utilise du sable comme abrasif. Du moins à l'origine. La sableuse est donc une sorte de récipient dans lequel on verse du sable préalablement lavé, séché et calibré. Le sable est projeté au travers d'une buse sur la surface à décaper, à très forte pression (minimum de 8kg/ cm²). [8]

Ce qu'il faut également savoir est que le sable utilisé est mélangé à de la silice cristalline. L'inhalation de cette substance est nocive pour la santé, et peut causer des maladies graves voire mortelles, comme la silicose.

Partie expérimentale

Parfois, de l'eau est ajoutée au sable, principalement dans le but de limiter la production de poussière. Cette technique de sablage est notamment utilisée dans le bâtiment, pour nettoyer les façades d'immeubles ou de monuments.



Figure III. 4 : Cabine de sablage Unicraft SSK4

Les évolutions :

La composition des abrasifs ont évolué, donc le sable n'est quasiment plus utilisé. Cet abrasif est remplacé par du corindon, un oxyde d'aluminium (a priori) plus sain. D'autres matériaux, plus surprenants mais tout aussi efficaces, sont parfois utilisés, comme les noyaux d'abricots broyés.

Dans des secteurs où le traitement de surface concerne des pièces haut-de-gamme, des solutions techniques innovantes sont utilisées. Par exemple, les industries aéronautiques ou automobiles, ou encore les activités d'horlogerie ou de maroquinerie, utilisent des corindons blancs de taille très réduite ou des carbures de silicium.

Le traitement de surface peut être réalisé par projection, mais aussi par tribofinition: procédé qui consiste à ébavurer et polir la surface de pièces métalliques ou autres. Par rotation

Partie expérimentale

ou vibration, une abrasion se produit à la surface et sur les arêtes des pièces. On obtient ainsi une surface très lisse, brillante ou mate.

Les équipements pour le sablage : sableuses, cabines de sablage et différents abrasifs.

Les cabines de sablage sont utilisées pour ôter la rouille ou traces d'oxydation de la surface de pièces de toutes sortes. La cabine de sablage permet la projection de plusieurs sortes d'abrasifs : billes ou granulats de verre, grenailles végétales etc.

Les cabines sont composées de portes latérales, permettant de charger les abrasifs aisément. Un certain nombre d'accessoires accompagnent la cabine de sablage comme le dépoussiéreur, le pistolet de sablage, les buses, le régulateur de pression, et également des options comme l'éclairage ou les gants de protection.

Trois familles d'abrasifs sont généralement utilisées :

Les abrasifs angulaires : Sable, fine de verre, corindon, grenaille métallique. Abrasifs adaptés pour le décapage, la désoxydation, ou l'ébavurage des surfaces.

Les abrasifs ronds : billes de verre, billes de céramiques, ou billes métallique. Abrasifs préconisés pour le nettoyage ou la rénovation.

Les abrasifs de gommage : essentiellement composés de plastique ou de matière végétale. Abrasifs plus doux utilisés pour le traitement de pièces délicates, ou nettoyer sans abîmer le support.

III.5. CNC fraiseuse

Le fraisage est une technique de fabrication qui combine deux mouvements : la rotation d'un outil utilisé pour couper et l'avancée d'une pièce à usiner. Actuellement, on ajoute le déplacement de l'outil (toutes les directions sont possibles) par rapport à la pièce. L'outil servant à fraiser se nomme, sans surprise, la fraise qui possède diverses arêtes de coupe, chacune ôtant une certaine quantité de métal sous la forme de copeaux. Les avantages du fraisage résident dans son rendement important, son excellent fini de surface, sa grande précision et son extrême souplesse quant à ses formes. Le fraisage est utilisé, le plus fréquemment, pour l'obtention de surfaces planes, de gorges et d'épaulements. Cependant, son efficacité en contournage ne cesse de croître via l'utilisation des techniques de Computerized Numerical Control (CNC) [10]. Nous avons utilisé pour la réduction de

Partie expérimentale

l'épaisseur des plaques la CNC fraiseuse de type «F-VMC 510L » qui se trouve au niveau du laboratoire « CNC-»des ateliers de la génie mécanique.

III.6. Préparation et méthodes de caractérisations

D'abord, en utilise la CNC Plasma pour fabrique 12 éprouvettes de traction selon la norme ASTM E8 d'un acier C52, les dimensions de l'éprouvette sont illustrées par la Figure 3-1, par les étapes suivantes :

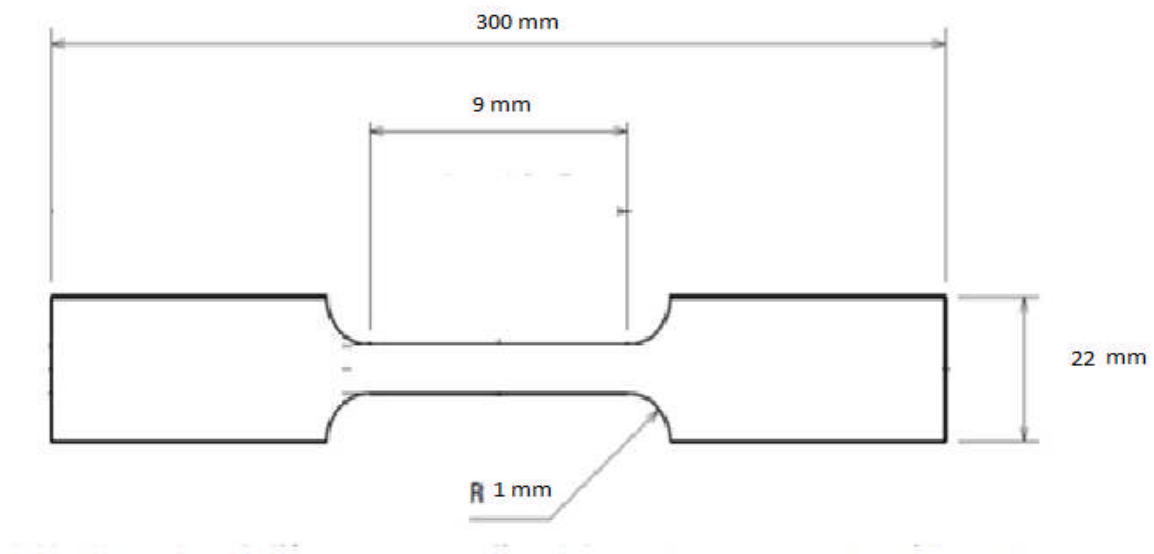


Figure III.5 : Dimensions de l'éprouvette.



Figure III.6 : Machine CNC Plasma

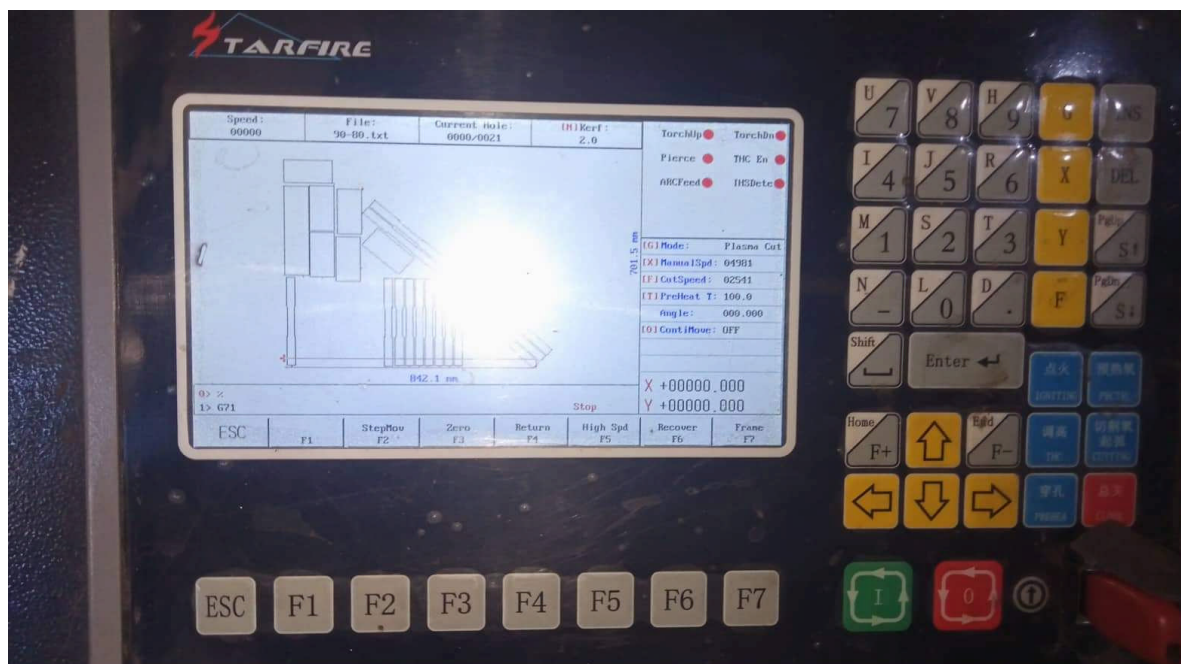


Figure III.7 : Le parti de commande CNC Plasma

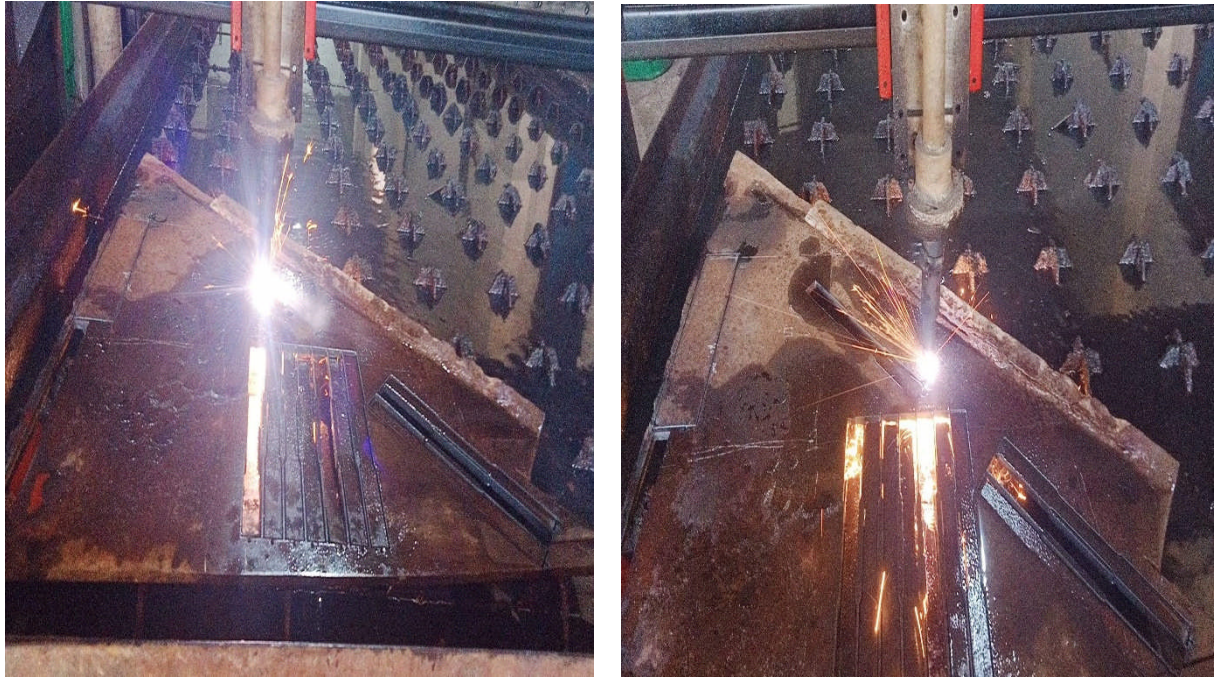


Figure III.8 : La méthode de coupage des échantillons

Le sablage : nous avons utilisé ce travail pour nettoyer les éprouvettes.



Figure III.9 : L'opération de sablage.

Partie expérimentale

En suites en utilisé la CNC Fraiseuse pour réduire l'épaisseur.



Figure III.10 : Machine CNC Fraiseuse F-VMC 510L



Figure III.11 : L'opération de fraisage

Partie expérimentale

De puit, entre 9 échantillons dans le four pour applique les deux opérations de trempe et revenu :

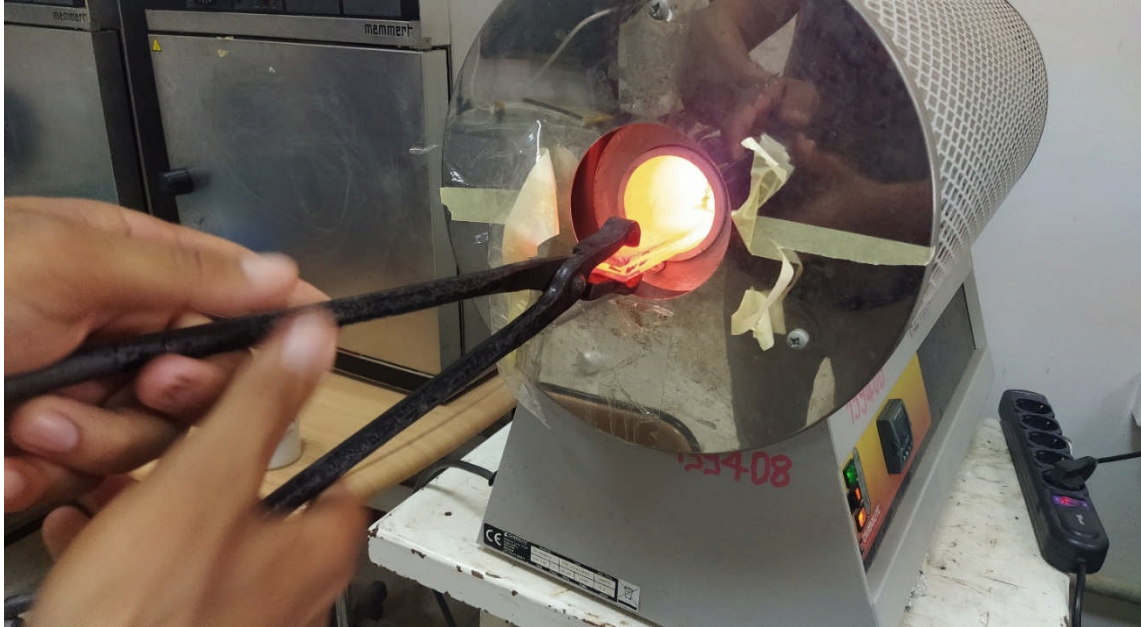


Figure III.12 :Le four tubulaire horizontal.

III.6.1. La Trempe

En utilise

-3 pièces à 1000°C pendant 40 minutes.

-3 pièces à 950°C pendant 40 minutes.

-3 pièces à 870°C pendant 40 minutes.

A la sortie du four, plongez directement dans l'eau.



Figure III.13 : Refroidissement par l'eau des éprouvettes après TTH.

III.6.2. Revenu

En utilise 9pieces à température 600c° pendant 2h, Apre sa Laisser refroidir à l'air libre.



Figure III.14 : Refroidissement par l'air

III.6.3. Mesure de la micro dureté

La dureté d'un matériau est caractérisée par la résistance qu'il l'oppose à sa déformation plastique. Elle peut être définie comme la résistance qui oppose un matériau à sa pénétration par un corps plus dur que lui.

Pour mesurer la dureté d'un matériau, un pénétrateur de faible déformabilité (cône ou sphère en diamant, carbure de tungstène lié au cobalt ou acier extra-dur) est enfoncé à 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. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré¹.

Il existe une grande variété d'essais de dureté possibles, les plus courants et les plus familiers sont les essais de pénétration ou de rebondissement pour caractériser la dureté des métaux, des matières plastiques et des élastomères, mais les essais par rayage peuvent dans certains cas offrir des possibilités intéressantes pour caractériser la dureté des minéraux. Ces essais ont l'avantage d'être plus simples à réaliser, rapides et généralement non destructifs. Par ailleurs, ils permettent d'apprécier et d'estimer dans certaines mesures la résistance mécanique des matériaux, leur rigidité, la résistance des corps fragiles, etc.

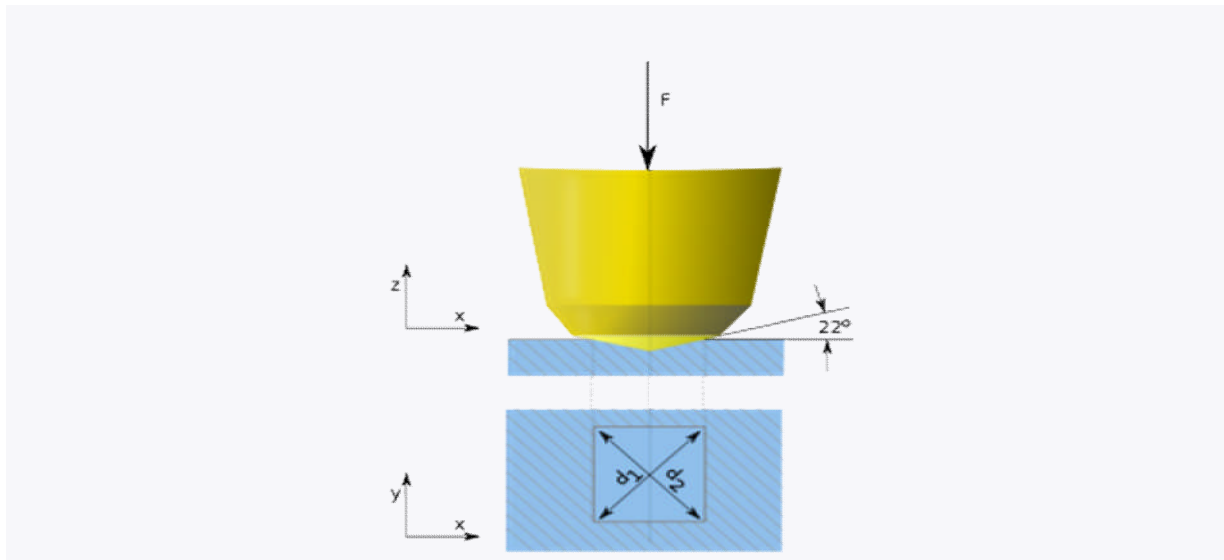


Figure III.15 : Le principe de teste de dureté

Partie expérimentale

HV = dureté Vickers
 F = force appliquée (N)
 d = moyenne des diagonales de l'empreinte (mm)
 g = accélération terrestre ($9,806\,65\text{ m s}^{-2}$)

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{g \cdot d^2}$$

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées². La dureté Vickers est donnée par la relation suivante :

Le degré de dureté, noté H_v , est ensuite lu sur un abaque (une table) ; il y a un abaque par force d'appui.



Figure III.16 : Les échantillons enrobés avec les éprouvettes de traction.



Figure III.17 : Préparation des échantillons



Figure III.18 : Machine de la micro-dureté

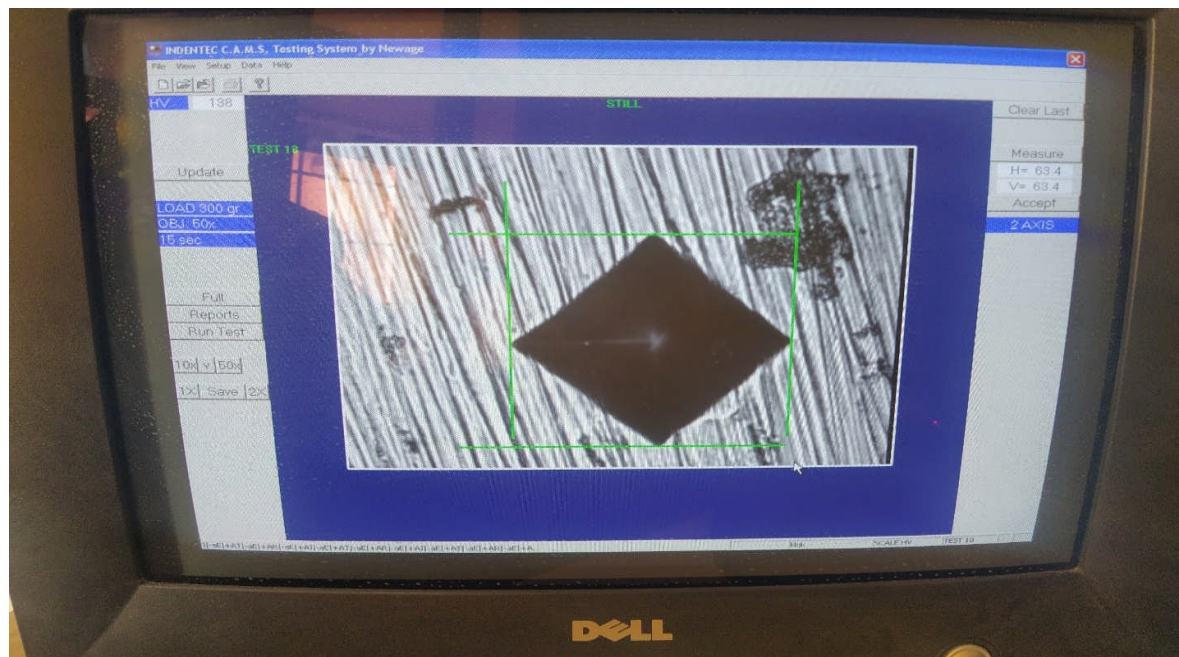


Figure III.19 : Les résultats numériques de la micro-dureté

III.7. Essai de traction

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet d'obtenir des informations sur le comportement élastique, le comportement plastique et le degré de résistance à la rupture d'un matériau, lorsqu'il est soumis à une sollicitation un axiale.

Certains objets manufacturés doivent avoir un minimum de solidité pour pouvoir supporter les charges, le poids et bien d'autres efforts. L'essai de traction permet de caractériser les matériaux, indépendamment de la forme de l'objet sollicité, ou la performance d'un assemblage mécanique. Comme tout essai mécanique, l'essai de traction reproduit une sollicitation simple, donc éloignée des sollicitations réelles, mais facilement maîtrisables et reproductibles.

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. Une variante moderne des essais de traction consiste à utiliser la force centrifuge sur un assemblage pour générer une contrainte de traction. Lorsque la valeur limite de résistance à la

Partie expérimentale

traction (exprimée en MPA ou N/mm^2) d'un assemblage ou d'un collage est égale à la force centrifuge appliquée, on génère la rupture de ceux-ci et enregistre la limite de rupture. L'avantage consiste à réaliser des tests en batterie sur plusieurs éprouvettes soumises à une contrainte strictement identique lors de l'essai.

L'essai de traction un axial macroscopique utilise des éprouvettes de traction de section rectangulaire, dont les dimensions respectent la norme ASTM E8

Ces dimensions correspondent à une homothétie des éprouvettes de traction communément utilisées dans l'industrie sidérurgique.

Les éprouvettes sont usinées par électroérosion pour limiter toute déformation plastique lors de l'usinage.

L'épaisseur de l'éprouvette est celle des échantillons et varie de 4 à 4,5 mm. Les essais sont réalisés à température ambiante.

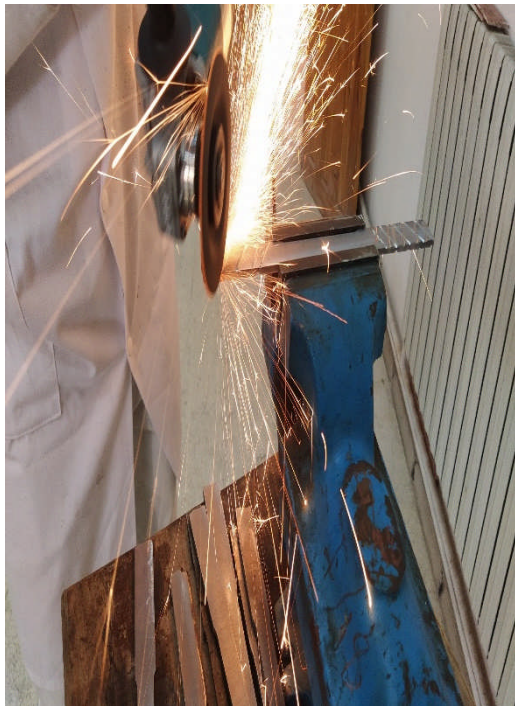


Figure III.20: Préparation des échantillons pour la traction.

La technique de corrélation d'images permet de mesurer la déformation macroscopique dans le plan. Ceci est possible grâce à l'utilisation d'extensomètres numériques. Afin

Partie expérimentale

d'utiliser cette technique, deux éléments sont nécessaires : préparation de la surface de l'éprouvette et le logiciel de corrélation.

La préparation consiste à déposer un mouchetis sur la surface de l'échantillon. Pour cela, on dépose une couche uniforme de peinture blanche sur la surface suivie de peinture noire sous forme de tâches. La distribution des tâches noires doit être à la fois homogène et dense. Ceci permet d'identifier les points homologues entre les images lors du post-traitement de corrélation. La Figure 17 présente les images de la surface de l'échantillon après le dépôt de mouchetis et lors du post-traitement. Le logiciel utilisé pour traiter les images prises pendant l'essai de traction est « GOM Correlate 2.0.1 ».

Figure 17 : Exemple de mouchetis déposé à la surface d'une éprouvette de traction : a) mouchetis déposé sur l'éprouvette, b) la qualité du maillage de la surface de l'éprouvette lors du post traitement.

Le dispositif expérimental est présenté dans la Figure 2-24. Il est constitué de la machine de traction Zwick, une ou deux caméras CCD pointant sur la zone à observer. L'essai de traction se fait à une vitesse de déplacement de traverse de $2,47 \cdot 10^{-3} \text{ (s}^{-1}\text{)}$ et avec une fréquence de prise d'images de (). La mesure de l'allongement a été effectuée en utilisant deux points du mouchetis comme extensomètre virtuel.

L'essai de traction in situ est la technique utilisée pour déterminer le champ de déformation des phases constituantes de l'acier c52 à l'échelle microscopique. La technique consiste à réaliser un essai de traction classique dans un microscopique électronique à balayage à effet de champ (MEB – FEG). Les dimensions de l'éprouvette de traction, adaptée à cet essai mécanique, sont illustrées dans la Figure 9 où l'épaisseur varie entre 4 mm Jusqu'à 4,5 mm.

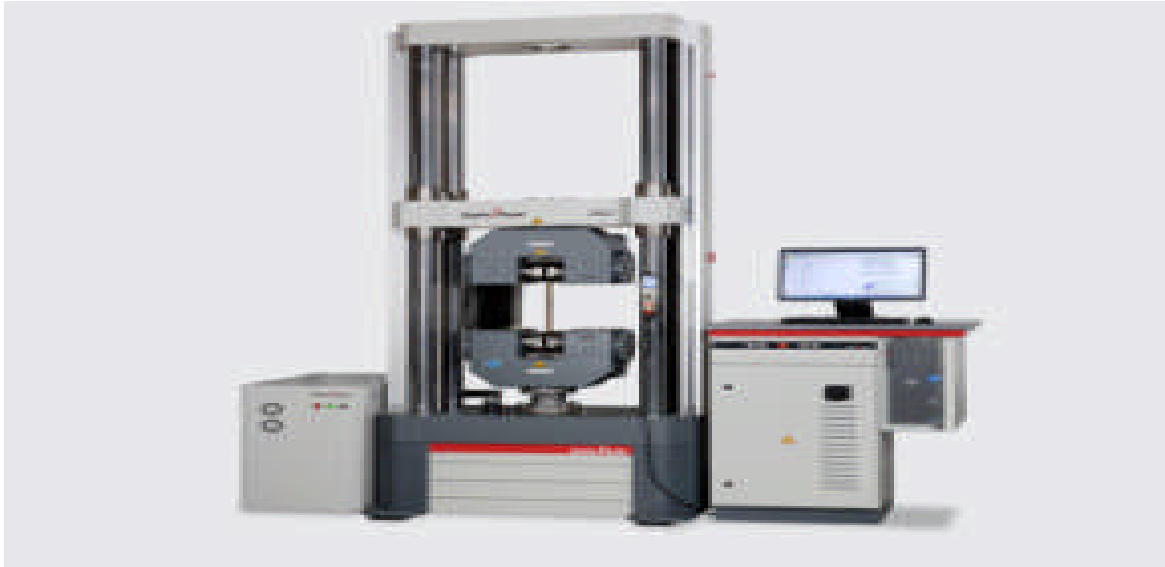


Figure III.21: Machine de traction

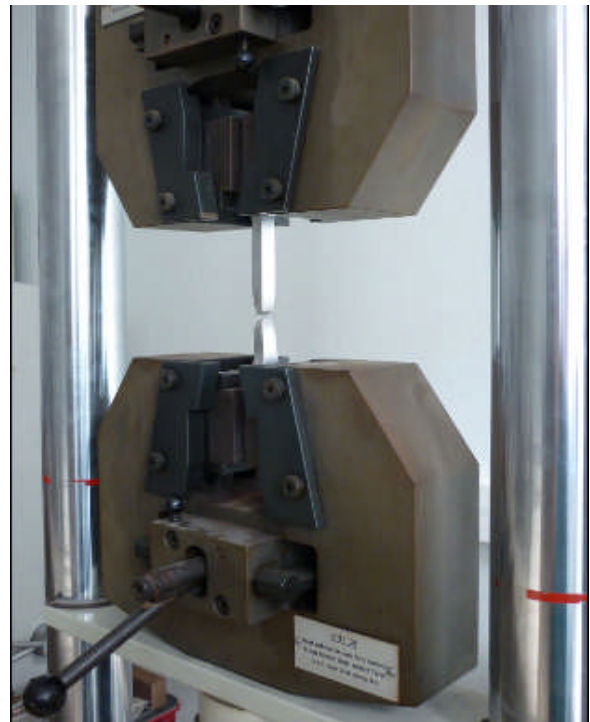
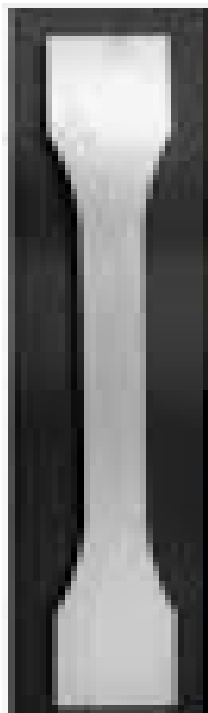
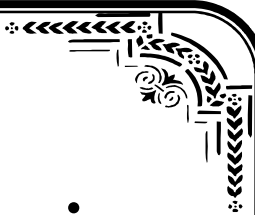


Figure III.22: L'opération de traction



Chapitre IV : Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Ce chapitre couvre les résultats obtenus avec la résistance à la traction et la dureté de l'acier C52 à différentes températures.

IV.2. Résultats de dureté

HV	1000	950	870	00
1	147	163	164	134
2	150	161	165	132
3	149	161	166	130
4	148	162	164	134
5	149	165	165	132
moy	148.6	162	164.8	132.4

La valeur moyenne a été prise en considération comme montrer sur le tableau suivant :

Température C°	0	950	870	1000
Micro dureté HV	132.4	162	164.8	148.6

Tableau IV. 8 : Résultats de dureté.

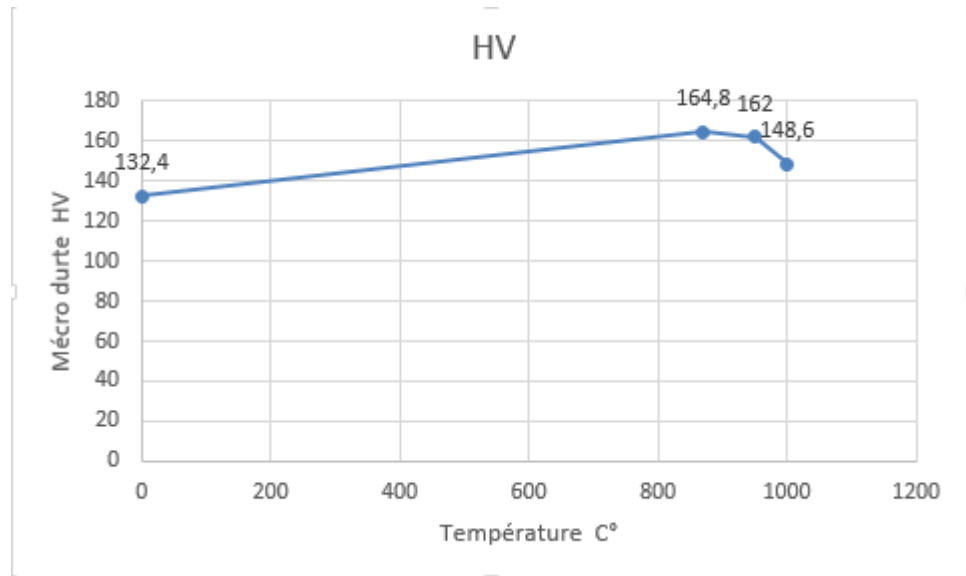


Figure IV.1 : Dureté en fonction de la température.

Remarque :

Dans la Figure **IV.1** sont reportés les résultats de mesure des duretés obtenus en fonction des températures d'austénitisation réalisées dans une gamme variant de 0 à 1000°C .

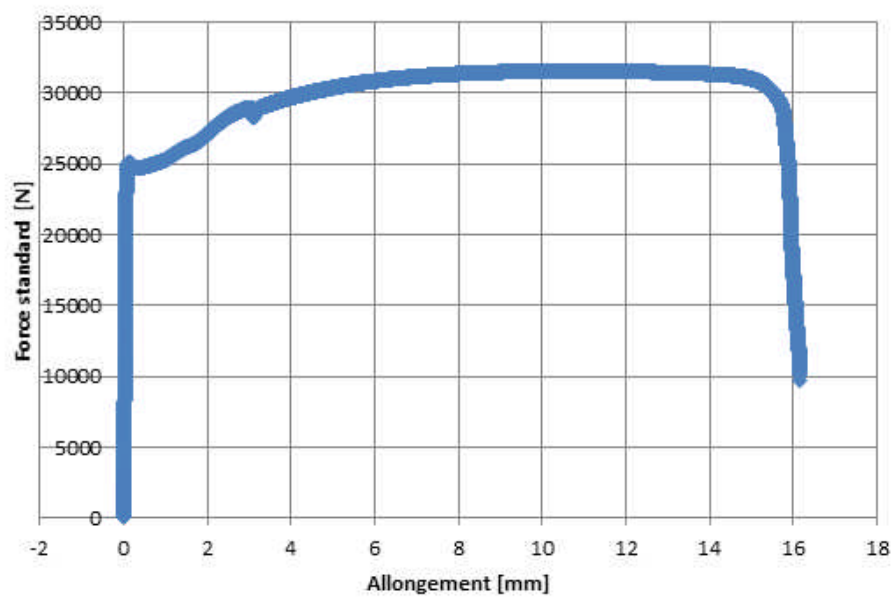
On constate à travers ces résultats que la température de 870 c° donne une dureté de 164,8, alors que la dureté du fer à l'état normal est inférieure à 132,4. Tandis que le fer exposé à une température de 1000 c° a une dureté de 48,6.

Il est bien observable, qu'aux températures inférieures à 870 °C, le niveau de dureté est faible.

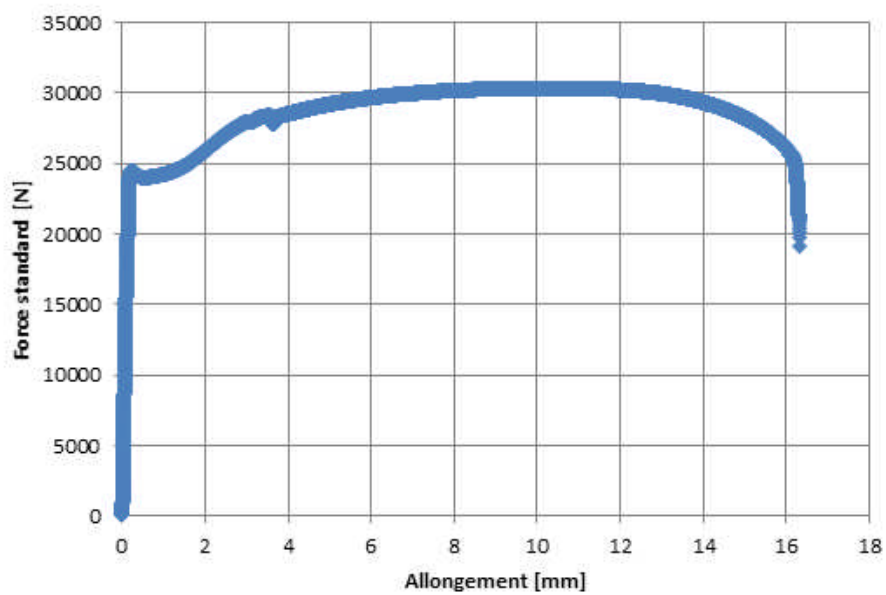
IV.3. Résultats de traction

La machine de traction utilisée est de type: **ZWick/Roell Z050**.qui se trouve au niveau du laboratoire RDM du département de métallurgie de l'université d'Annaba.

brut 10



brut 11



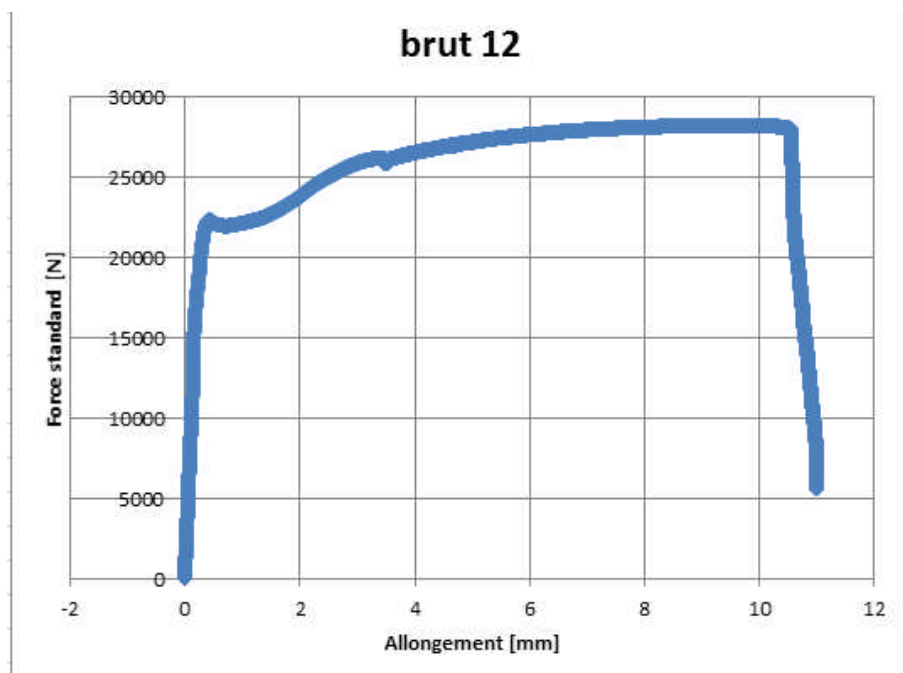
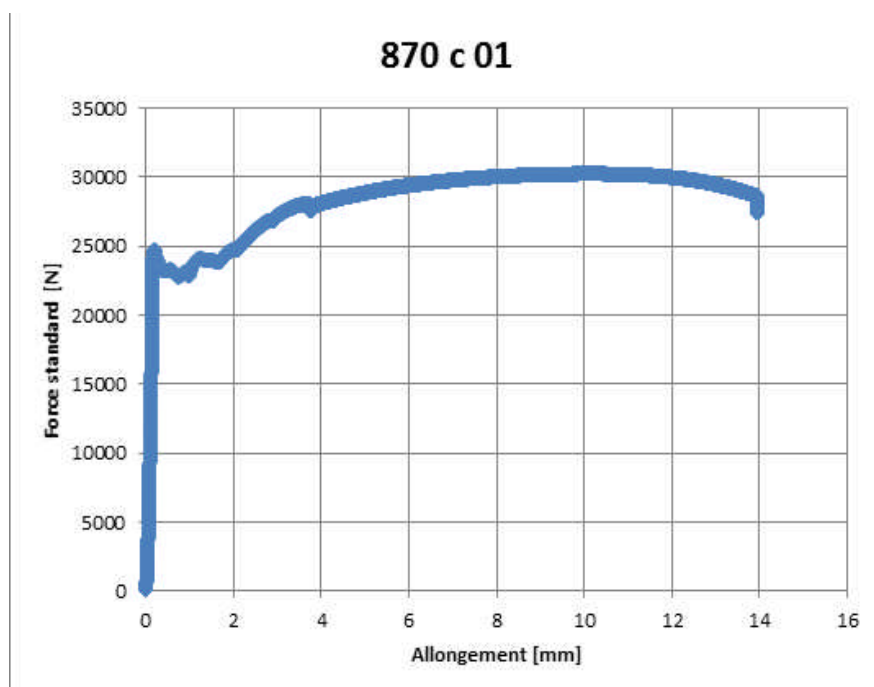


Figure IV.2 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes brutes



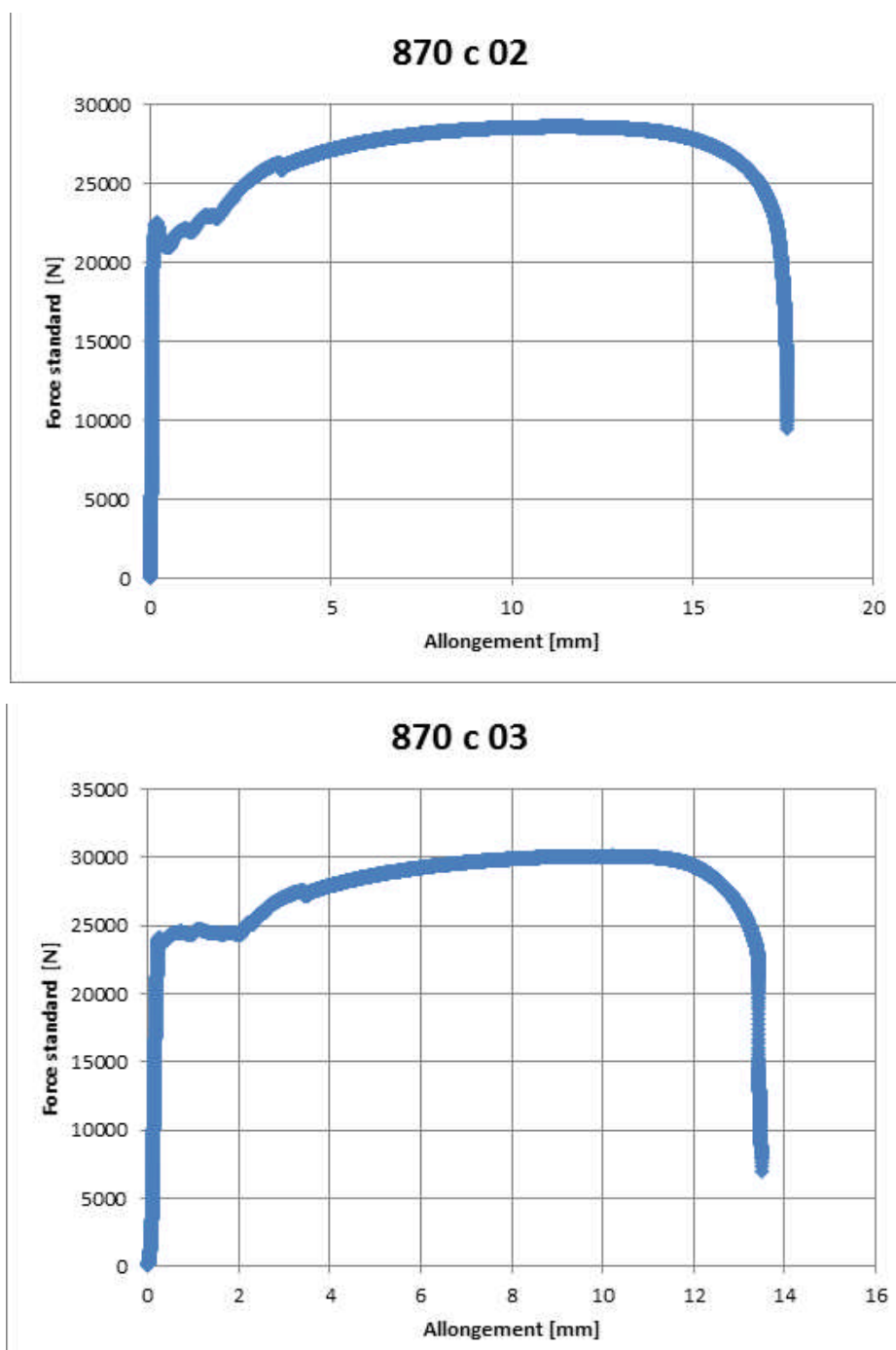
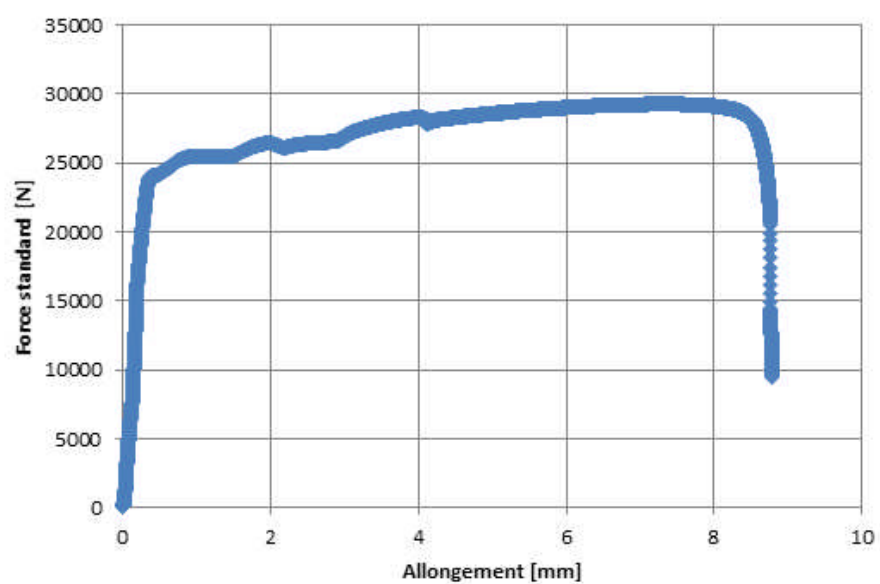
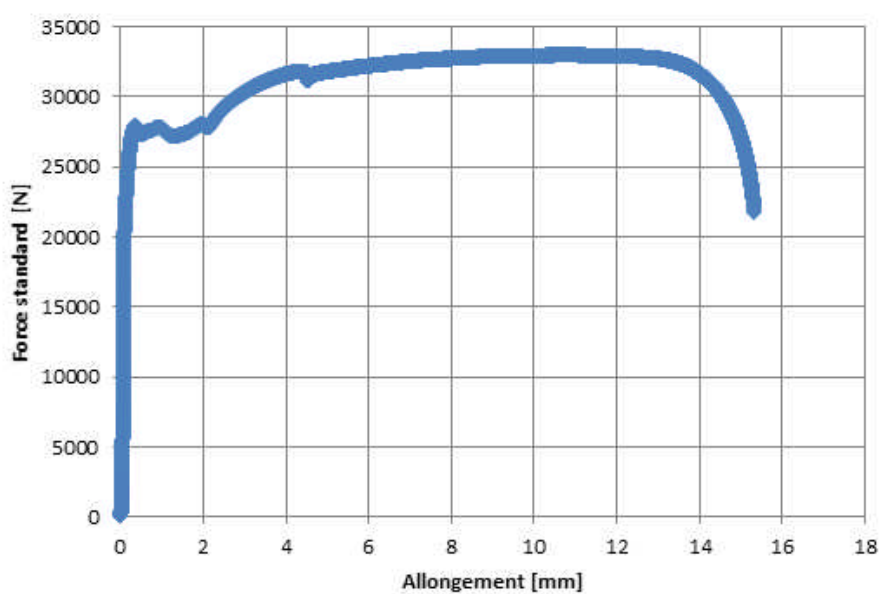


Figure IV.3 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes 870 c°

950 c 04



950 c 05



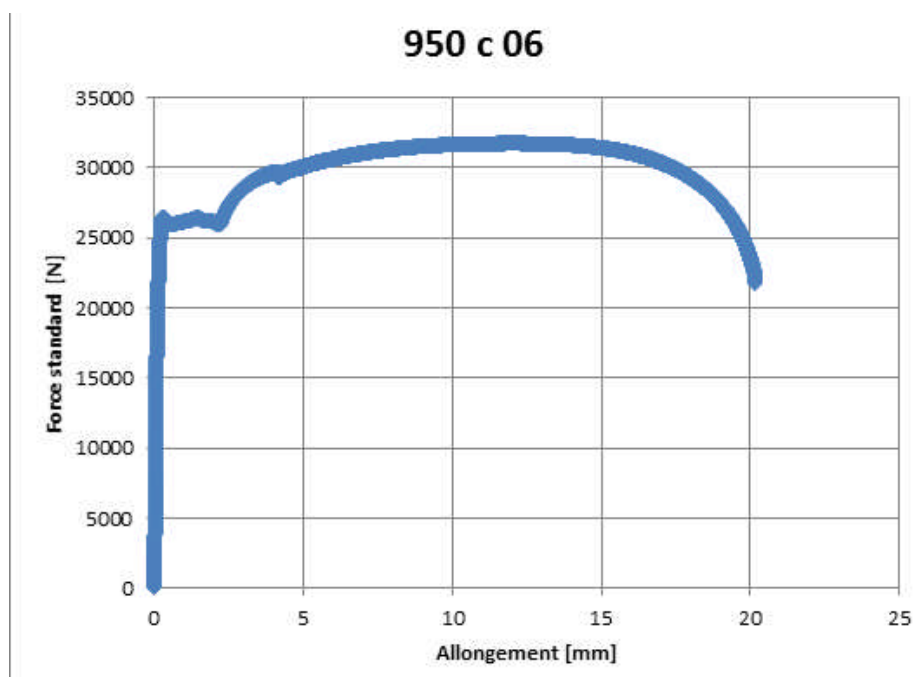
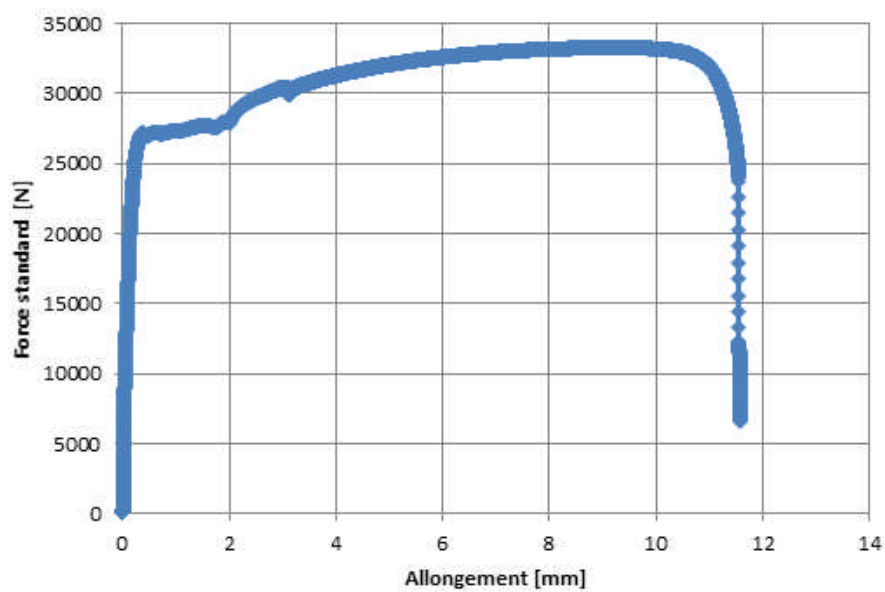
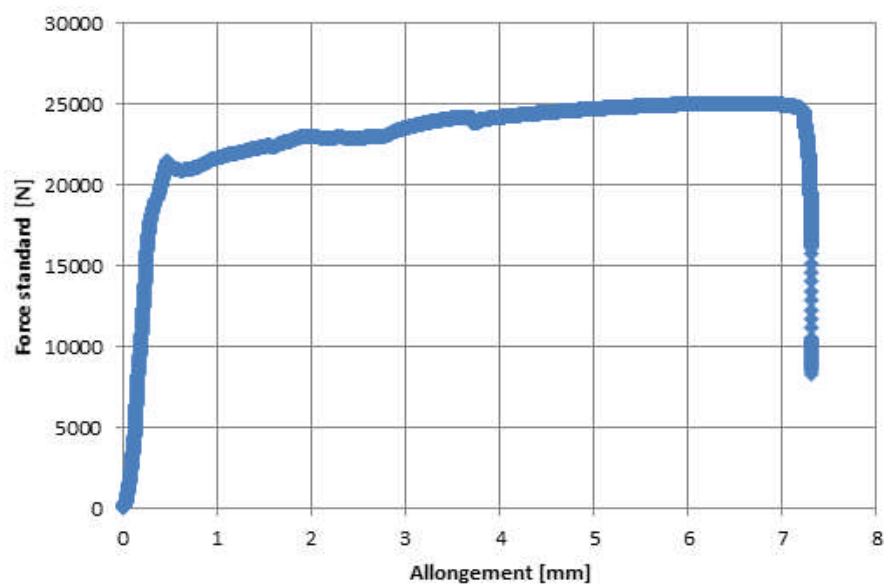


Figure IV.4: Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes 950 c°.

1000 c 07



1000 c 08



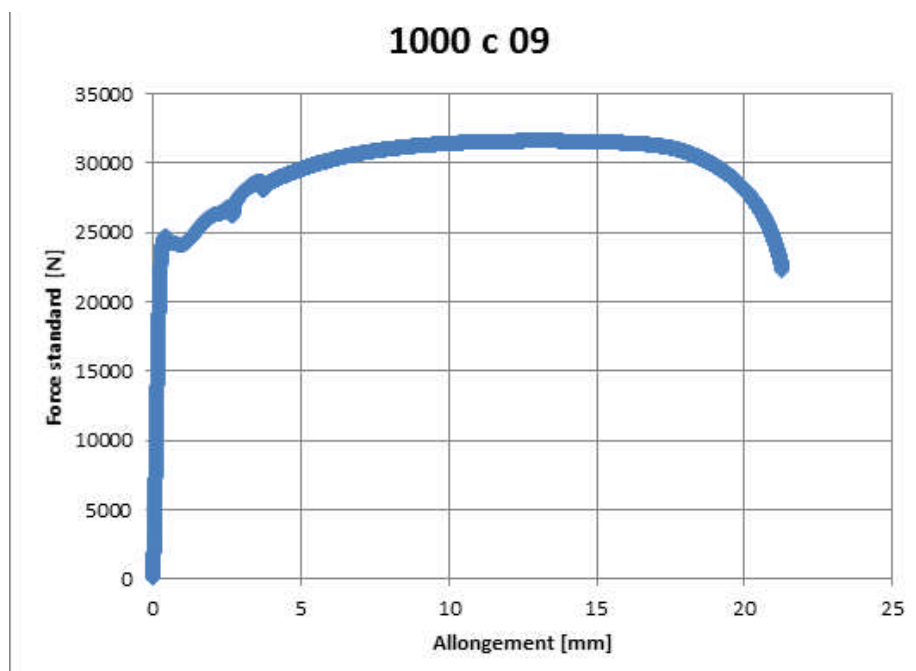


Figure IV.5 : Diagrammes effort-allongement d'essai de traction des éprouvettes 1000 c°.

Discussion des résultats :

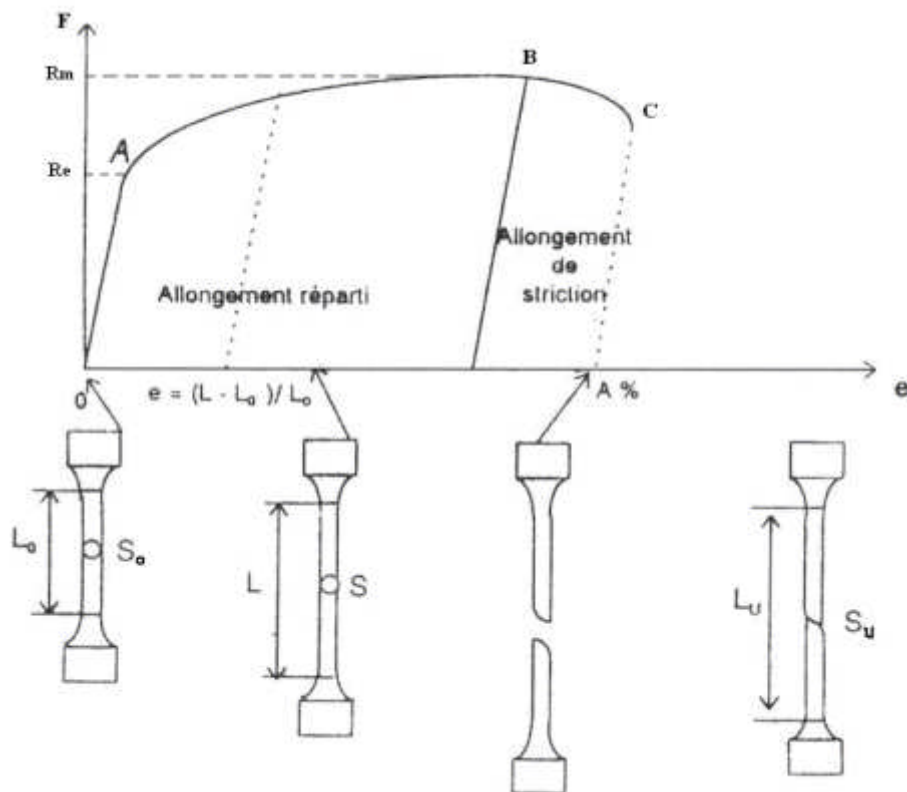


Figure IV .7: Diagramme effort-allongement d'essai de traction

Le linge OA :

Elle est pratiquement droite.

Il y a proportionnalité entre les efforts (**F**) et les allongements correspondants (**ΔL**).

Ces allongements sont temporaires, donc les allongements sont élastiques (ils sont uniformément répartis dans la longueur), la limite d'élasticité se situe dans cette région.

Zone AB :

Les allongements ne sont plus proportionnels aux efforts appliqués à l'éprouvette.

Résultats et discussion

Les allongements croissent plus vite que les efforts qui les provoquent et ils sont permanents.

L'effort maximal enregistré au cours de l'essai est **Fm**.

Quelquefois, on trouve une zone entre **A** et **B** correspondant à des glissements internes.

C'est une phase de transition entre les déformations élastiques et les déformations permanentes.

Zone BC :

A partir de cet instant, l'éprouvette s'étrangle, l'allongement se répartit donc sur une section inférieure à celle de l'éprouvette initiale. Il y a striction puis rupture.

Nr	L ₀ [m]	S ₀ [mm ²]	E [GPa]	Rm [MPa]
870	50	80	58	378
950	50	80	98	412
1000	50	80	401	416
brut	50	80	107	394

Tableau IV. 9 : Les résultats de traction à différent température.

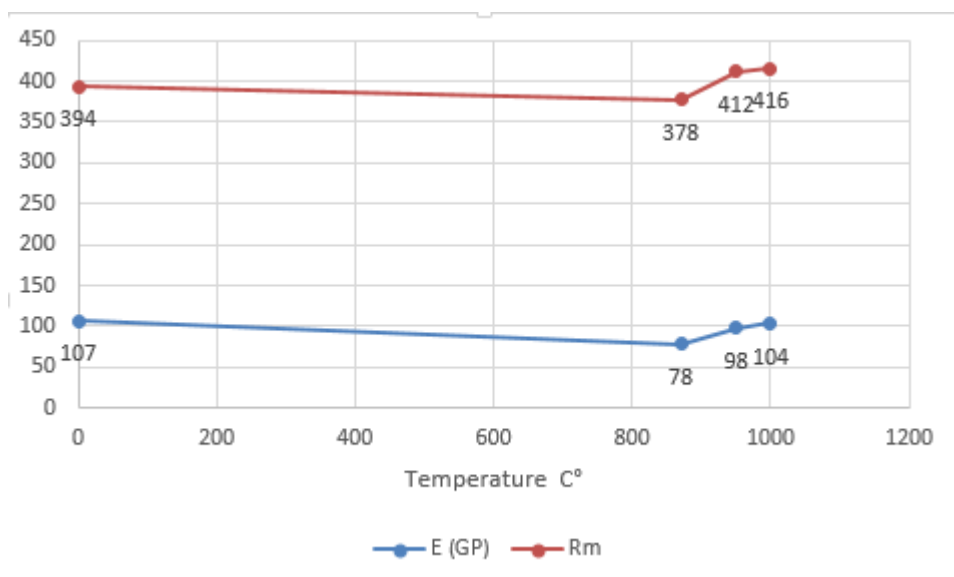


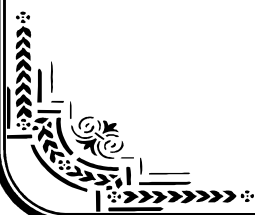
Figure IV .8: Diagramme des résultats de R_m et E en fonction de T ($^{\circ}C$).

Remarque :

Les courbes de la Figure IV.8 montrent l'effet de la température sur la résistance et l'élasticité, la ductilité du c52 et sa résistance augmentant avec l'augmentation de la température.

On constate à travers ces résultats que la température de $1000^{\circ}C$ donne une résistance de 416 MPa, alors que la résistance du fer à l'état normal est inférieure à 394 MPa. Tandis que le fer exposé à une température de $870^{\circ}C$ a une dureté de 378 MPa.

A basse température l'acier c52 devient fragile. A l'inverse, il reste ductile.



CONCLUSION GENERALE

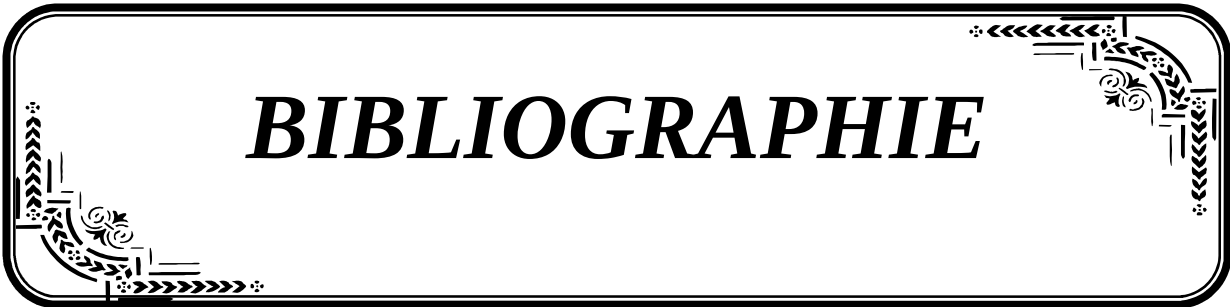
Conclusion générale

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés à étudier la dureté et la résistance de l'acier X52 pratiquement sous l'influence de la température du traitement de normalisation, en comparant entre 3 températures (870 - 950 - 1000°C).

Pour avoir des meilleurs résultats d'essais, nous avons utilisé les machines suivantes :

L'appareil de microdureté Indentec ZHV et la machine de traction de type zwick roelle pour la mesure de la résistance mécanique.

Après avoir terminé cette étude, nous avons constaté que les traitements thermiques ont un effet important sur la dureté et la résistance de l'acier XC52, car pour que cet acier résiste à la fissuration au sulfure il doit avoir une importante résistance mécanique qui ne peut être acquise que si notre acier a subi à un traitement thermique de type : température de 870°C avec un maintien de 40 minutes trempé à l'eau suivi d'un revenu à 600°C pendant 2heures.



BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

[1]DESIGNATION NORMALISEE DES ACIERS ET DES FONTES.

[2]..... FNIDES Mohamed. Magistère, contribution à l'étude expérimentale et à la simulation

Numérique de la loi de frottement entre deux matériaux par des essais de torsion

2012. Université 8 mai 1945 Guelma.

[3].....Yaping Lu, Bevis Hutchinson, Dmitri A. Molodov, Günter Gottstein, "Effect of deformation and annealing on the formation and reversion of e-martensite in an Fe–Mn–C alloy". Acta Materialia: 58, 3079–3.

[4]..... OUSSADANE Nassim," Etude de l'influence des traitements thermique sur la résistance à l'usure des aciers à outils de type X155CrVMo12.1",

[5].....See discussions, stats, and author profiles for this publication at:

<https://www.researchgate.net/publication/337155344>

[6]..... AOUI Belkacem, « Comportement à la fatigue d'un acier au carbone après traitement thermique », mémoire de Master. 2017, Université Mohamed BOUDHIAF M'SILA.

[7]..... Matériaux Métalliques ISET Kasserine

[8]<https://www.usinenouvelle.com/expo/guides-d-achat/sablage-grenaillage-191>

[9]..... <https://plazmax.co.nz/cnc-plasma-cutting-systems/>.

[10]..... <https://prototechasia.com/usinage-plastique-cnc/histoire-usinage-cnc>.

Résumé

Pour résoudre le problème de la résistance de l'acier XC52 utilisé dans les pipelines pour le transport de gaz naturel à la fissuration aux sulfures (CSC Sulfide Stress Corrosion Cracking) nous avons trouvé via notre recherche bibliographique qu'il existe plusieurs températures de normalisation dans le cas de cet acier à 870°C, 950°C et 1000°C l'un d'eux peut donner une meilleure résistance mécanique.

Une importante résistance mécanique qui ne peut être acquise que si notre acier a subi à un traitement thermique de type : température de 870°C avec un maintien de 40 minutes trempé à l'eau suivi d'un revenu à 600°C pendant 2heurs est la solution a ce problème.

Abstract

To solve the problem of resistance of X52 steel used in gas transport pipelines to sulphide cracking (CSC Sulfide Stress Corrosion Cracking). According to our bibliographic study we found that there are several normalization temperatures in the case of this steel at 870°C, 950°C and 1000°C one of them can give a high strength.

A significant mechanical resistance which can only be acquired if our steel has undergone a heat treatment of the type: temperature of 870°C with a hold of 40 minutes soaked in water followed by tempering at 600°C for 2 hours is the solution to this problem.