

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UN IVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT  
DEPARTEMENT DE METALLURGIE

## MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE	SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE	MÉTALLURGIE
OPTION	GENIE METALLURGIQUE

### Thème

**Etude de l'influence des interruptions répétées  
des traitements thermiques sur les  
caractéristiques mécaniques du matériau des  
tubes laminés à chaud.**

**Présenté par:**

Mr. MABROUK Ghoulam

**Dirigé par:**

Dr. BOUDEBANE Azzedine

**Jury de soutenance:**

Pr, FARES Mohamed lamins  
Dr, BOUDEBANE Azzedine  
Dr, MEBAREK Abdelmalek  
Mr, GRAINI Said  
Dr, ZAAF Mohamed

Président,  
Rapporteur,  
Examineur,  
Examineur,  
Examineur

Univ. BADJI Mokhtar- Annaba  
Univ. BADJI Mokhtar- Annaba  
Univ. BADJI Mokhtar- Annaba  
Univ. BADJI Mokhtar- Annaba  
Univ. BADJI Mokhtar-Annaba

**Promotion : Juin 2018**

## **Remerciement**

*Mes remerciements s'adressent en premier lieu à ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

*Je souhaite tout d'abord remercier mon encadreur Dr :**BOUDEBANE Azzedine**, pour sa grande disponibilité, ses conseils avisés et son aide tout au long du projet.*

*Mes remerciements s'adressent également à tous les professeurs membres de jury qui nous ont honoré et qui ont accepté de juger ce modeste travail.*

*Je remercie aussi MDM TOURQUI Hamida chef de service Qualité SIDER TSS et RAHIM ingénieur de laboratoire central (TSS).*

*Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département de métallurgie qui ont assurés notre formation.*

*Un grande merci à LAAMARI Sihem.*

*Enfin, merci à ma familles , ma fiancée et enfin mes amis sans oublier les étudiants de ma promo pour leurs encouragement et leur soutien durant ces longues années.*

*Ghoulam mabrouk*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma mère*

*A mes sœurs*

*A tous mes amis et mes collègues*

*et*

*A tous ceux que j'aime*

***GHOLAM.M***

## SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>CHAPITER 1 Présentation de l'entreprise et processus technologie de la TSS</b>	
1.1. Présentation de l'entreprise et processus technologie de la TSS .....	2
1.1.1 Présentation de l'entreprise.....	2
1.1.2 Organigramme de l'entreprise .....	2
1.1.3. Principaux ateliers de fabrication de tubes .....	3
1.1.4 Clients potentiels .....	3
1.2. Processus technologie de la TSS.....	4
1.2.1 Processus du laminoir à tube .....	4
1.2.2 Processus du parachèvement .....	4
1.2.3. Contrôle qualité.....	5
A. Gamme de produit Casing 5 CT.....	6
B. Gamme de produit Line pipe 5L .....	7
C. Exigences API 5CT & 5L .....	7
1.3 Les équipements de productions TSS .....	8
1.3.1 Description du laminoir à tube (LAT).....	9
1.3.1.1 Parc Lingots .....	9
1.3.1.2 Four à sol tournante .....	9
1.3.1.3 La presse à percer.....	11
1.3.1.4 Presse à centrer .....	12
1.3.1.5 Four à plateau .....	12
1.3.1.6 Laminoir oblique .....	12
1.3.1.6 1.Technologie .....	12
1.3.1.7 Laminoir à pas de pèlerin (zone laminage ) .....	13
1.3.1.7.1. Technologie .....	13

1.3.1.8 Scie à chaud .....	15
1.3.1.9 Four de normalisation (Four à Longerons).....	15
1.3.1.10 Le calibreur .....	16
1.3.1.13 Atelier de Finissage .....	16
1.3.1.13.1. Refroidissement .....	16
1.3.1.13.2. Dresseuse rotative .....	16
• Dépoussiérage .....	17
• Tuboscope (Contrôle CND) .....	17
• Installation du conditionnement .....	17
• Groupe de tronçonneuses « BARDONS ».....	17
• Banc d'épreuve hydrostatique .....	18
• Installation de pesage et métrage .....	18
1.3.2 Description du parachèvement des tubes.....	19
1.3.2.1 Four de trempe.....	19
1.3.2.2 Four de Revenu .....	19
1.3.2.3 Opérations de Contrôle .....	20
1.3.2.3. Atelier des manchons .....	21

## **CHAPITER 2 Analyse bibliographie.**

2.1. matériau de l'étude .....	23
2.1.1. Caractérisations des aciers API.....	23
2.2. Aciers à haute limite élastique (HLE) .....	24
2.2.1 Introduction .....	24
2.2.2 Les d.ifférentes classes des aciers HLE .....	24
2.2.3 Influence de la composition chimique.....	25

2.3. Traitements thermiques .....	25
2.3.1. Introduction .....	25
2.3.2. Définitions et procédés des traitements thermiques .....	25
2.3.2.1. La Trempe .....	25
2.3.2.1.1 Trempe à l'eau .....	26
2.3.2.1.2. Trempe à l'huile .....	26
2.3.2.1.3. Trempe à l'air .....	26
2.3.2.2. Le Revenu.....	27
2.3.3. les transformations .....	29
2.3.3.1. la transformation de l'austénite .....	29
2.3.3.2. Transformation perlitique.....	29
2.3.3.3.1. La martensite $\alpha'$ (M) .....	31
2.3.3.3.2. La transformation martensitique .....	31
2.3.3.4. Transformation intermédiaire (bainitique) .....	31
2.3.3.4.1 Bainite .....	31
2.3.3.4.2 la transformation bainitique .....	31

## **CHAPITER 3 Procédures expérimentales**

3. Procédures expérimentales .....	33
3.1. Traitements thermiques.....	33
3.1.1. La trempe .....	34
3.1.2. Le revenu.....	35
3.2. Mode de découpage des éprouvettes.....	35
3.3. Préparation des échantillons pour observation microscopique.....	36
3.4. Observations microstructurales.....	37

3.5. Caractérisations mécaniques.....	38
3.5.1. Essai de traction.....	38
3.5.1. Principe de l'essai de traction.....	41
3.5.2 Essai de résilience.....	42
3.5.3. Essai de dureté Vickers HV.....	45
3.5.4. Microdureté Vickers.....	45

## **CHAPITER 4 résultats et discussions.**

4.1 Résultats des essais de traction .....	47
4.2 Résultat d'essai de résilience.....	50
4.3. Evolution de l'épaisseur du tube.....	51
4.4. Profils de dureté.....	52
4.5. Observations microscopiques.....	55
CONCLUSION GENERALE .....	56

# Liste des figures

## CHAPITRE 1

Figure 1.1. Vue générale TSS.

Figure 1.2. Organisation TSS.

Figure 1.3. Principaux ateliers.

Figure 1.4. Laminoir à tube.

Figure 1.5. Le parachèvement à tube.

Figure 1.6. Contrôle Non destructif.

Figure 1.7. Parc à lingots.

Figure 1.8. Intérieur four à sole.

Figure 1.9. Opération de l'Enfournement.

Figure 1.10 Opération de défournement.

Figure 1.11. Presse à perce.

Figure 1.12. Four à plateau.

Figure 1.13. Laminoir oblique.

Figure 1.14. Laminoir à pas de pèlerin.

Figure 1.15. Four de normalisation.

Figure 1.16. Calibreur.

Figure 1.17. Dresseuse rotative.

Figure 1.18. Contrôle CND.

Figure 1.17. Dresseuse rotative.

Figure 1.18. Contrôle CND.

Figure 1.19. Tronçonneuse Bardons.

Figure 1.20. Banc d'épreuve .hydraustatique.

Figure 1.21. Fours de trempe et revenu .

## **CHAPITRE 2**

Figure 2.1. Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme.

Figure 2.2. Courbe TRC après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.

Figure 2.3. Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6.

Évolution des propriétés en fonction de la de revenu(température de trempe 840°C).

Figure 2.4. Début de la transformation perlitique d'un acier eutectoïde, la croissance lamellaire à partir des germes et la formation simultanée de ferrite et de carbure.

Figure 2.5. Transformation perlitique après la décomposition complète.

## **CHAPITRE 3**

Figure 3.1. Fours de trempe et revenu.

Figure 3.2. Régime de traitement par trempe.

Figure 3.3. Régime de traitement de revenu.

Figure 3.4. Machines à découper les éprouvettes ou les échantillons.

Figure 3.5. Echantillon utilisé pour la métallographie et la micro dureté.

Figure 3.6. Polisseuse à vitesse variable.

Figure 3.7. Microscope optique avec caméra piloté par ordinateur de type Nikon Eclipse-LV 150.

Figure 3.8. Diagramme conventionnel de traction.

Figure 3.9. Machine de traction utilisée de type Zwick BP1-F1200N.F11.

Figure 3.10. Eprouvettes de traction avant et après rupture.

Figure 3.11. Caractéristique techniques de la Machine de traction.

Figure 3.12. Machine de résilience utilisée (laboratoire TSS).

Figure 3.13. Représentation schéma de l'essai de résilience Charpy.

Figure 3.14. Dimensions standardises de l'éprouvette de résilience Charpy-V dimension en (mm).

Figure 3.15. Éprouvette de résilience KCV avant et après choc.

Figure 3.16. Indenteur et l'empreinte d'indentation.

Figure. 3.17. Micro-duromètre type Digital Micro Vickers Hardiness Tester.

Model : HVS-1000Z.

## **CHAPITRE 4**

Figure 4.1. Courbe de traction de l'acier X52Q brut.

Figure 4.2. Courbe de traction de l'acier X52Q traité correctement.

Figure 4.3. Courbe de traction de l'acier X52Q (2<sup>ème</sup> passage).

Figure 4.4. Courbe de traction de l'acier X52Q (3<sup>ème</sup> passage).

Figure 4.5. Mode de prise des mesures d'épaisseur.

Figure 4.6. Profil de dureté. Traitement correct bon.

Figure 4.7. Profil de dureté après deux traitements thermiques interrompus.

Figure 4.8. Profil de dureté après deux traitements thermiques interrompus suivis d'un traitement correct.

Figure 4.9. Comparaison entre les trois profils de dureté

Figures 4.10. Microstructure du matériau du tube laminé non traité. Structure ferrito-perlitique, (a) X200, (b) X600.

Figure 4.11. Bainite formée d'un agrégat de ferrite et de particules de cémentite.

Figures 4.12. Microstructure du matériau tube traité correctement. Structure ferrito-perlitique, (a)X200, (b)X600.

Figures 4.13. Microstructure du matériau du tube ; traitement interrompu deux fois de suite. Structure ferrito-perlitique, (a) X200, (b) X600.

Figures 4.14. Microstructure du matériau du tube traité correctement après deux traitements interrompus au cours du revenu. Structure ferrito-perlitique, (a) X200, (b) X 600.

# Liste des tableaux

## CHAPITER 1

Tableau 1.1. Gamme de produit Casing.

Tableau 1.3. Exigences produits.

Tableau 1.2. Gamme de produit Line pipe 5L.

Tableau 1.4. Données techniques du Four de Trempe

Tableau 1.5. Données techniques du Four de Revenu

## CHAPITRE 2

Tableau 2.1. caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API.

## CHAPITER 3

Tableau 3.1. Composition chimique de l'acier X52Q.

Tableau 3.2 Données techniques du four de trempe.

Tableau 3.3. Données techniques du four de revenu.

Tableau 3.4. Symbole et désignation.

Tableau 3.5. Conversion des énergies *KCU* et *KCV*

Tableau 3.6. Dimensions des échantillons utilisés pour l'essai de résilience sont d'entaille *V* et *U*.

## CHAPITER 4

Tableau 4.1. Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q brut.

Tableau 4.2. Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q traité correctement.

Tableau 4.3. Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q (2<sup>ème</sup> passage

Tableau 4.4. Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q (3<sup>ème</sup> passage)

Tableau 4.5. Désignation et dimensions des éprouvettes de résilience.

Tableau 4.6. Résultats des essais de résilience pour les quatre états du matériau.

Tableau 4.7. Résultats des prises de mesure d'épaisseur.

Tableau 4.7. Résultats de micro

***INTRODUCTION***  
***GÉNÉRALE***

## Introduction générale

Le laminage est un procédé de mise en forme courant de fabrication de tubes sans soudure de différentes nuances d'aciers, largement utilisés dans les industries de l'agroalimentaire, l'aéronautique, la pétrochimique ...

Parmi la gamme de tubes laminés par la TSS, il y a les tubes caising de 14 pouces en acier de nuance X52 Q destinés au forage des puits de pétrole. Les conditions de travail de ces tubes sont sévères (milieu corrosif, haute pression ect...). Ils exigent l'utilisation de matériaux avec des caractéristiques mécaniques spécifiques (acier à haute limite élastique...) et des tolérances dimensionnelles serrées.

Le sujet qui nous a été proposé par l'unité TSS de Annaba est l'étude de l'influence des interruptions répétées du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques du matériau et les paramètres géométriques du tube laminé.

Ce mémoire de fin d'études, dans lequel nous allons essayer d'apporter quelques éléments de réponse aux questions posées, comprend :

- Technologie de laminage à chaud de tubes (TSS).
- Analyse bibliographique sur le matériaux de l'étude et les traitements thermiques (trempe et revenu).
- La présentation des études à réaliser des techniques expérimentales utilisées.
- Les résultats et les discussions.

# **CHAPITRE 1**

Technologie de  
laminage à chaud de  
tubes (TSS).

## 1.1 Présentation de l'entreprise et processus technologie de la TSS

### 1.1.1 Présentation de l'entreprise

La Tuberie sans soudure (TSS) : est une compagnie de droit algérien située dans le site du complexe Sidérurgique d'el Hadjar au Nord – Est de l'Algérie et seul fabricant de tube sans soudure au Maghreb. Sa mission principale est de satisfaire l'industrie du pétrole et du Gaz en Tubes de haute qualité, Line Pipe et Casing du 6 à 14 pouces. Sa capacité annuelle est de 90 000 Tonnes. La Tuberie fut construite en 1976 de façon à donner un débouché supplémentaire à l'acier produit sur le site d'El Hadjar, en fabriquant un produit à forte valeur ajoutée et répondre au besoin du marché Algérien [1].



Figure 1.1. Vue générale TSS.

### 1.1.2 Organigramme de l'entreprise

La TSS est structurée telle que l'organisation ci –dessous (Figure 1.2). Une direction générale appuyée sur plusieurs directions et départements qui constituent les principaux processus pour l'atteinte des objectifs [2].

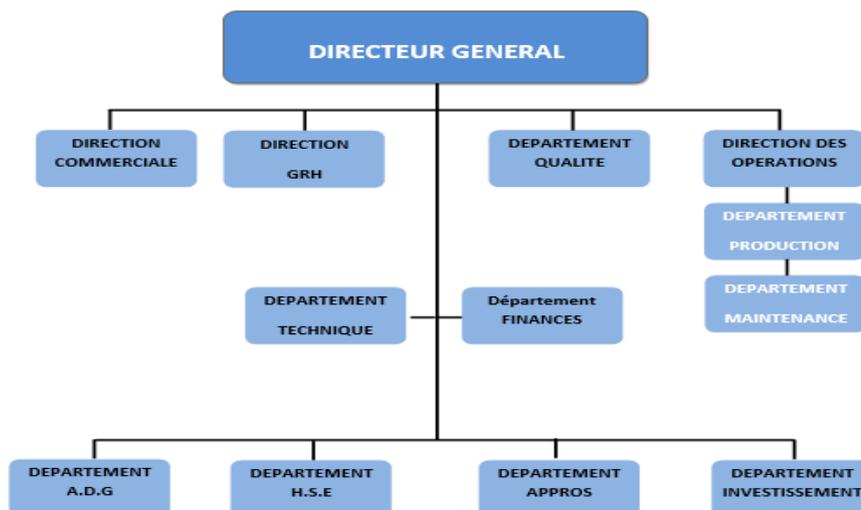


Figure 1.2. Organisation de la TSS.

### 1.1.3 Principaux ateliers de fabrication de tubes

Les types de produits que l'entreprise fabrique sont liés essentiellement à un important programme de recherche et d'exploitation de gisement d'hydrocarbures liquide et gazeux.

La réalisation des puits correspondant nécessite : voir (Figure1.3).

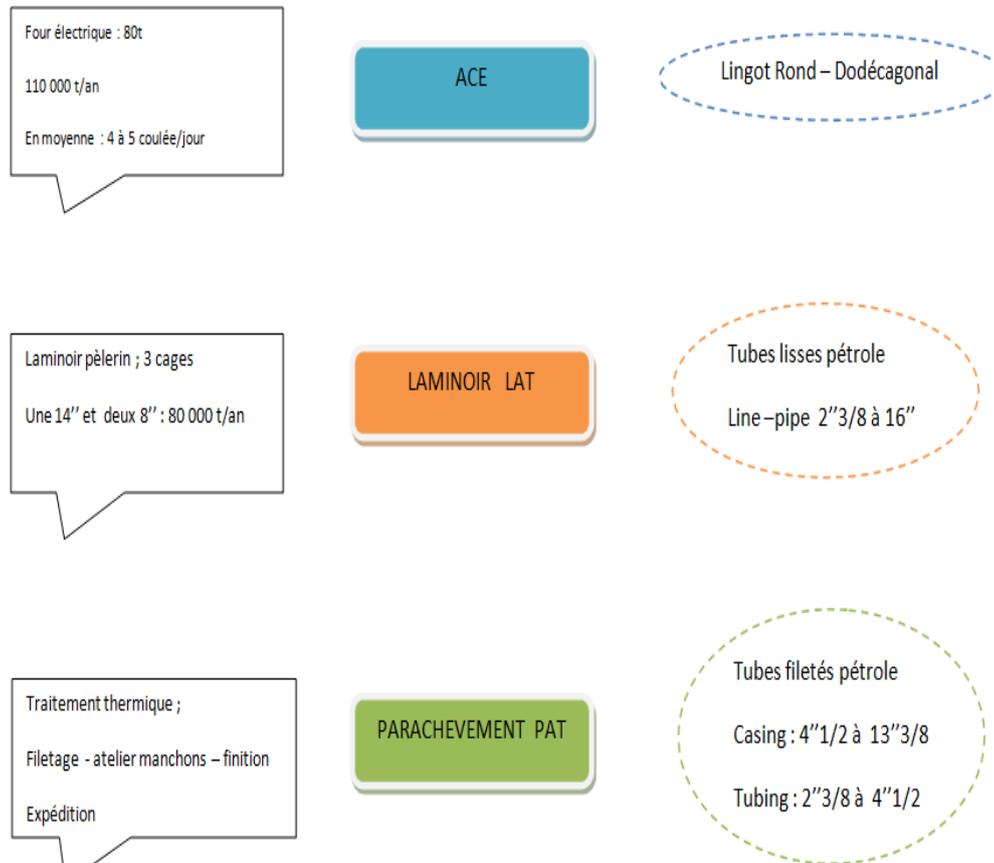


Figure 1.3. Principaux ateliers.

### 1.1.4 Clients potentiels

Comme toutes les entreprises, la TSS a ses clients potentiels, et qui sont au centre de ses priorités et leur satisfaction demeure un indicateur pertinent.

- SONATRACH
- SONELGAZ
- ALTUMET
- NAFTAL

## 1.2 Processus technologie de la TSS

### 1.2.1 Processus du laminoir à tube

Le laminoir à tube : c'est un atelier qui dispose de plusieurs installations de chauffage et de transformation, sa mission principale est de transformer à chaud un lingot en tube (Figure 1.4)

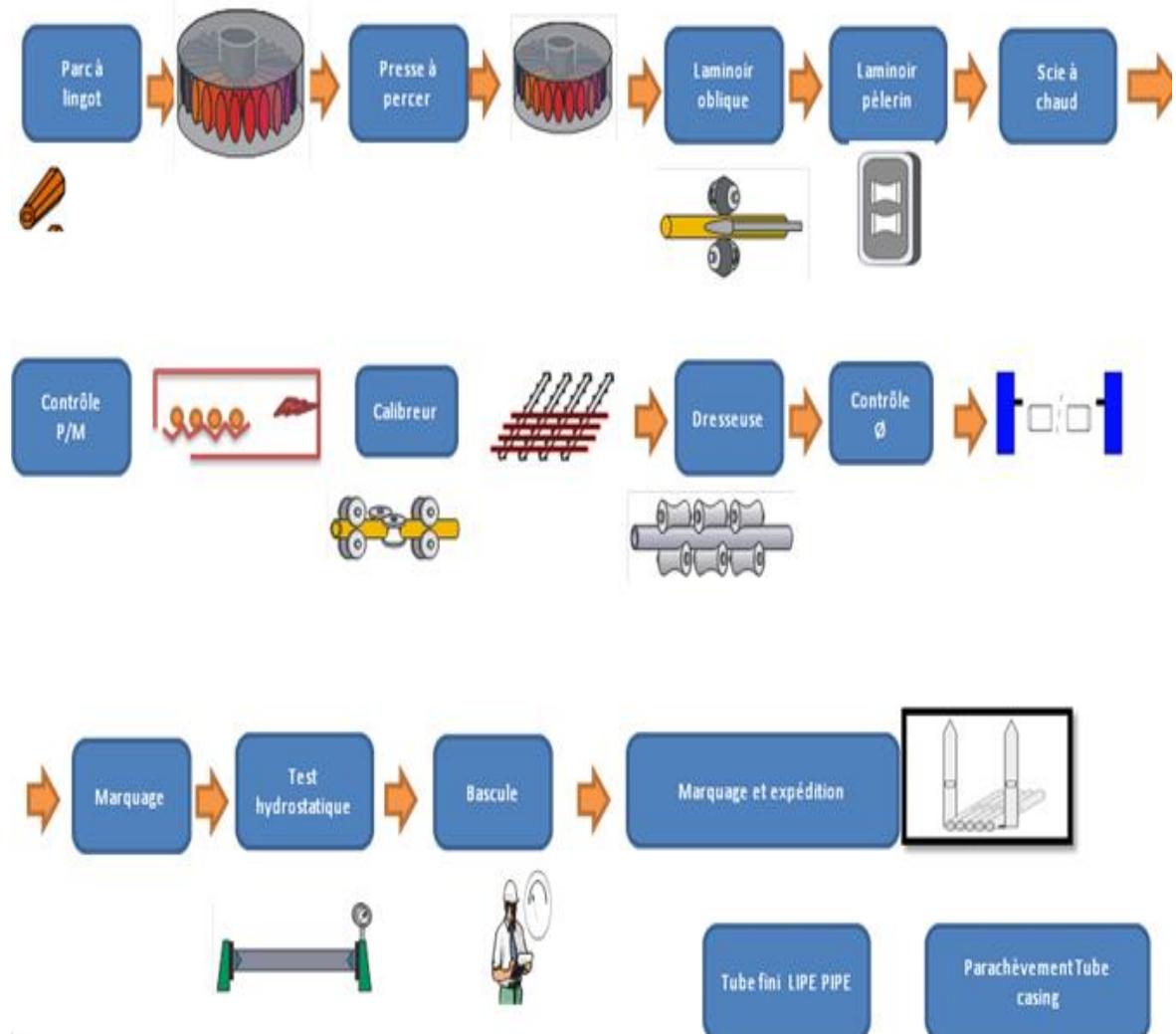


Figure 1.4. Laminoir à tube.

### 1.2.2 Processus du parachèvement

Les Tubes nécessitent un traitement thermique et une finition aux extrémités passent dans l'atelier en aval qui est l'atelier de parachèvement. Pour cela, l'atelier dispose de deux fours permettant d'effectuer toutes les opérations de traitements thermiques tels que trempe, revenu,. Le parachèvement possède quatre groupes de machines permettant de réaliser les différents filetages API, et connexion noble. Il dispose aussi d'une installation de contrôle importante « NDT Ultrason » pour satisfaire les exigences des clients. (Figure.1.5) [1].

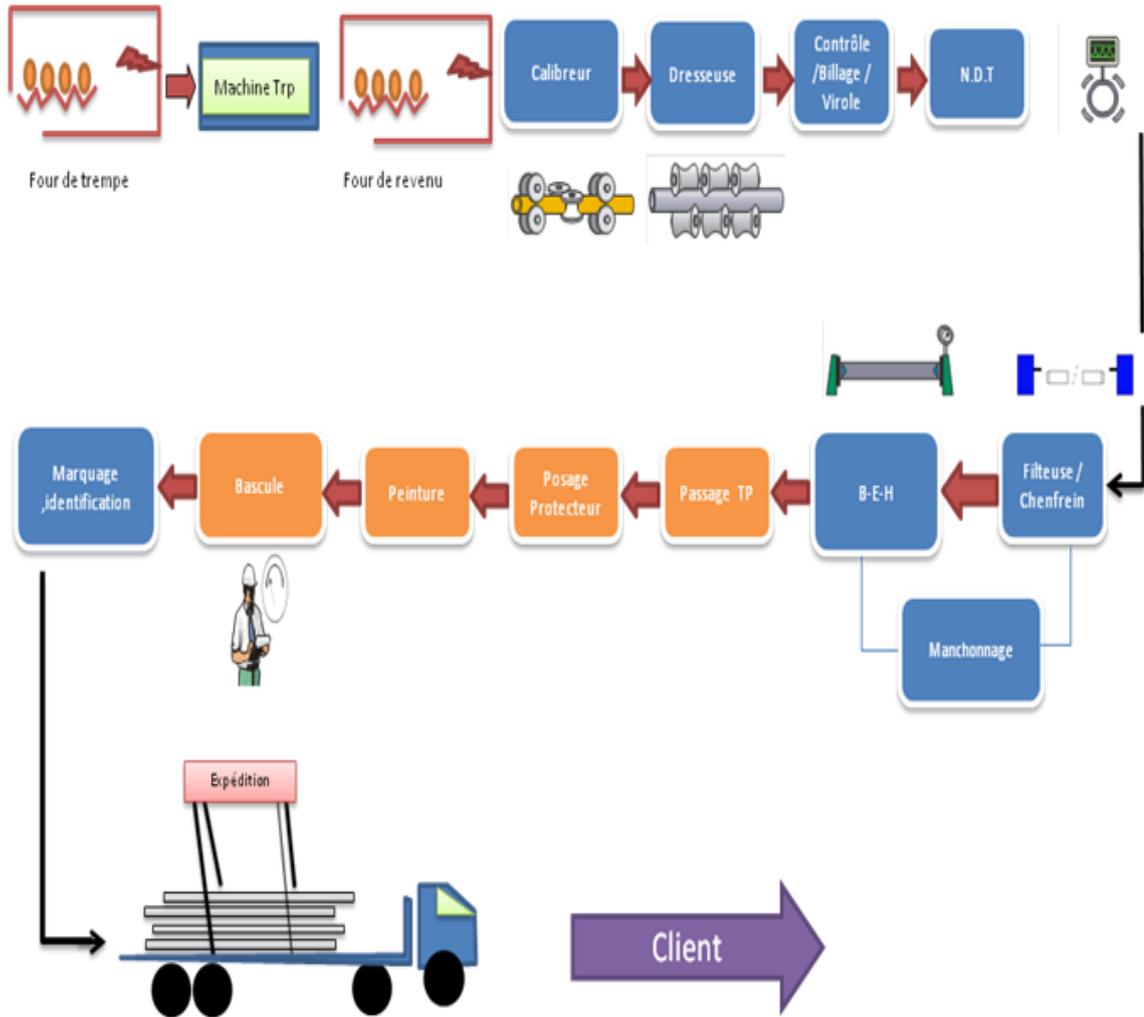


Figure 1.5. Le parachèvement à tube.

### 1.2.3 Contrôle qualité

Dans le domaine de la qualité, TSS a mis en place une solide organisation d'assurance qualité. La Tuberie est certifiée en ISO 9001 et API 5CT & API 51 et Q1. La maîtrise de la qualité repose en effet autant sur les hommes que sur le système de management de qualité mis en œuvre.

Pour le contrôle du produit pendant et après la fabrication, TSS est dotée des équipements les plus modernes pour mener à bien l'inspection et le contrôle des produits (Figure 1.6).

Contrôles non destructifs, faisant appel aux ultrasons, pertes de flux magnétiques et MPI, et destructif avec une machine de traction assistée par un ordinateur.

Les activités du contrôle qualité commencent réellement de l'élaboration de la coulée et se poursuivent au laminage, au traitement thermique, à la finition, au conditionnement et à la livraison.

Les différentes phases de production et de contrôle correspondantes sont réalisées conformément au programme d'assurance qualité décrit dans le plan d'assurance qualité [1].



Figure 1.6. Contrôle Non destructif.

**A. Gamme de produit Casing 5 CT**

Le tableau 1.1 ci-dessous montre la variété du produit fabriqué selon la spécification API 5CT (diamètre, Epaisseur, et poids au mètre).

**Tableau 1.1.** Gamme de produit Casing.

Out side diameter		Wall thickness	Weight	Type of threading
Diamètre nominal		Epaisseur	P/M	Type de filetage
En pouce	En mm	mm	LB/FT	
6 5/8	168,3	8,94	24	SELON SPECIFICATION API
		10,59	28	
		120,6	32	
7	177,8	6,91	20	
		8,05	23	
		9,19	26	
		10,36	29	
		11,51	32	
7 5/8	193,7	12,65	35	
		13,72	38	
		9,52	29,7	
		10,92	33,7	
		12,7	39	
8 5/8	219,1	14,27	42,8	
		15,11	45,3	
		15,88	47,1	
		8,94	32	
8 5/8	219,1	10,16	36	
		14,15	49	
		9,65	54,5	
9 5/8	244,5	7,92	32,3	
		8,94	36	
		10,03	40	
9 5/8	244,5	11,05	43,5	
		11,99	47	
		13,84	53,5	
		15,11	58,4	
		8,89	40,5	
10 3/4	273,1	10,16	45,5	
		11,43	51	
		12,57	55,5	
		13,84	60,7	
		15,11	65,7	
13 3/8	339,7	9,65	54,5	
		10,92	61	
		12,19	68	
13 3/8	339,7	13,06	72	

**B. Gamme de produit Line pipe 5L**

Le tableau 1.2 ci-dessous montre la gamme du produit fabriqué selon la spécification API 5 L (Diamètre, Epaisseur, et poids au mètre)

**tableau 1.2.** Gamme de produit Line pipe 5L.

Diamètre nominal		Epaisseur mm	P/M LB/FT		
En pouce	En mm				
6"5/8	168,3	6,4	17,04		
		7,1	18,99		
		7,9	21,06		
		8,7	23,1		
		9,5	25,05		
		11	28,6		
		12,7	32,74		
		14,3	36,43		
		15,9	40,09		
		18,3	47,39		
		19,1	47,1		
		21,9	53,21		
		8"5/8	219,1	6,4	22,38
				7	24,72
7,9	27,73				
8,2	28,58				
8,7	30,45				
9,5	33,07				
11,1	38,33				
12,7	43,43				
14,3	48,44				
15,9	53,45				
18,3	60,77				
19,3	63,14				
22,2	72,49				

10"3/4	273,1	7,1	31,23
		7,8	34,27
		8,7	38,27
		9,3	40,52
		11,1	48,28
		12,7	54,79
		14,3	61,21
		15,9	67,65
		18,3	77,1
		20,6	86,26
12"3/4	323,8	8,7	45,62
		9,5	49,61
		10,3	53,57
		11,1	57,65
		12,7	65,48
		14,3	73,22
		15,9	81,01
		17,5	88,71
14"	355,6	19,1	96,21
		20,6	103,63
		9,5	54,62
		10,3	59
		11,1	63,5
		11,9	67,84
		12,7	72,16
		14,3	80,73
		15,9	89,36
		17,5	97,91
19,1	106,23		

**C. Exigences API 5CT & 5L**

La TSS fabrique des tubes qui obéissent à certains nombres d'exigences telles que les propriétés mécaniques (E, R) et la composition chimique ainsi que les tolérances par rapport aux dimensions et le type du produit (tableau 1.3) [1].

**Tableau 1.3.** Exigences produits.

Exigences	API Casing				API Line - Pipe		
Grade	H40 - J55 - K55 - N80Q - L80 - P110				GrB - X60		
Dimensions	Diamètre 6"5/8 - 13"3/8				Diamètre 6"5/8 - 14"		
	Epaisseur 6,91mm - 15,88mm				Epaisseur 7,04 mm - 22,20 mm		
Comp - chimique	Selon API SCT - et exigences client				Selon API 5L et exigences client		
Propriétés mécaniques	Grade	E min	E max	R min	Grade	E ( Mpa )	R ( Mpa )
	J55	379	552	517	GrB	245 - 450	415 - 760
	K55	379	552	655	X42	290 - 495	415 - 760
	N80Q	552	758	689	X46	320 - 525	435 - 760
	L80	552	655	655	X52	360 - 530	460 - 760
	P110	758	965	862	X56	390 - 545	490 - 760
				X60	415 - 565	520 - 760	
Pression d'épreuve	1200 Bars max				207 Bars max		
Tolérances Diamètre	Diamètre $\approx 4''1/2$ ( + 1% - 0,5% du $\varnothing$ )				Corps de tube :		
					$\approx 60,3\text{mm} \approx 610\text{mm}$ ( $\pm 0,75\%$ )		
					Extrémités		
					$\approx 60,3\text{mm} \approx 168,3\text{mm}$ ( - 0,4/ +1,6 )		
					$\approx 168,3\text{mm} \approx 610\text{mm}$ ( $\pm 0,5 \varnothing$ )		
Dimensions Tampon	Diamètre Nominal $\approx 9''5/8$ , ( d - 1/8" )				Pas spécifié		
	$9''5/8 \approx \text{Dia Nom} \approx 13''3/8$ ( d - 5/32" )						
	d = diamètre Intérieur						
Tolérance Epaisseur	-12,50%				4" $\approx$ Diamètre $\approx$ 18"		
					( + 15% - 12,5 % )		
Ovalisation	Pas spécifié				$\approx 60,3\text{mm} \approx 610\text{mm}$		
					( 2%D corps de tube )		
					( 1,5%D extrémité de tube )		
Tolérances Poids	( + 6,5% / - 3,5 % )				( + 10% / - 3,5 % )		
Range	Range 1 : 16 to 25 ft ( 4,88m - 7,62m )				Longueur moyenne 35 ft ( 10,67 m ) et selon exigences client		
	Range 2 : 25 to 34 ft ( 7,62m - 10,36 m )						
	Range 3 : 34 to 48 ft ( 10,36m - 14,63m )						
Profondeur de défaut	5 % de l'épaisseur spécifiée				12,5 % de l'épaisseur spécifiée		
Etat de surface	Absence de défauts sur une profondeur supérieure à 5% de l'épaisseur spécifiée				Absence de défaut sur une profondeur supérieure à 12% de l'épaisseur spécifiée		

### 1.3 Les équipements de productions TSS

Les équipements de productions TSS sont répartis dans les ateliers suivants :

- Le laminoir à tubes.
- Le parachèvement des tubes.
- Atelier de fabrication des manchons.

Ces ateliers sont desservis par les principales installations annexes suivantes :

- Station de pompage.
- Station de traitement des eaux.
- Sous stations électrique.

### 1.3.1 Description du laminoir à tube (LAT)

#### 1.3.1.1 Parc à Lingots

Deux types de Lingots en provenance de l'aciérie sont stockés dans ce parc

- ✓ Lingots rond  $\Phi$  (190, 225, 270,345).
- ✓ Lingots Dodécagonaux  $\Phi$  (300, 350, 410, 500) [ 3 ].

Les lingots qui viennent de l'aciérie électrique sont stockés dans un parc à lingots par coulée en ordre pour pouvoir les identifier dans les différentes phases de fabrication et sert aussi à faire un stock tampon entre l'aciérie et le laminoir.

Les lingots sont transportés du parc vers la table d'enfournement par l'intermédiaire d'un engin (hyster), ensuite dirigés vers la voie d'enfournement et chargés dans le four à l'aide d'une enfourneuse [3].



Figure 1.7. Parc à lingots.

#### 1.3.1.2 Four à sole tournante

Le four à sole tournante est appelé ainsi car seule la sole supportant les lingots, tourne ; L'ossature et Les parois du four restant fixes.

Le four à sole est d'une capacité de 45T/h comporte 3 Zones :

- Préchauffage
- Chauffage
- Homogénéisation

La température de défournement des lingots est 1300°C environ, et le temps moyen de séjour des lingots dans le four est de 4 heures. Ce four est tout à fait moderne, doté de moyens de contrôle perfectionné, c'est-à-dire indication des températures sur enregistreurs à bandes et régulation automatique des températures (Figure 1.8).



**Figure 1.8.** Intérieur four à sole.

L'enfournement des lingots se fait avec une tenaille (baptisées pinces à sucre), ou autrement dit enfourneuse, on prépare le lingot sur une chaîne d'alimentation après avoir enregistré toutes les caractéristiques du lingot, une opération de pesage qui précède l'opération d'enfournement, la température d'enfournement égale à la température ambiante (Figure 1.9).



**Figure 1.9.** Opération de l'Enfournement.

Le défournement se fait par une autre pince à tenaille, après avoir chauffé le lingot à 1300°C on l'envoie vers la chaîne de production pour subir les différentes étapes de transformations (Figure 1.10) [3].

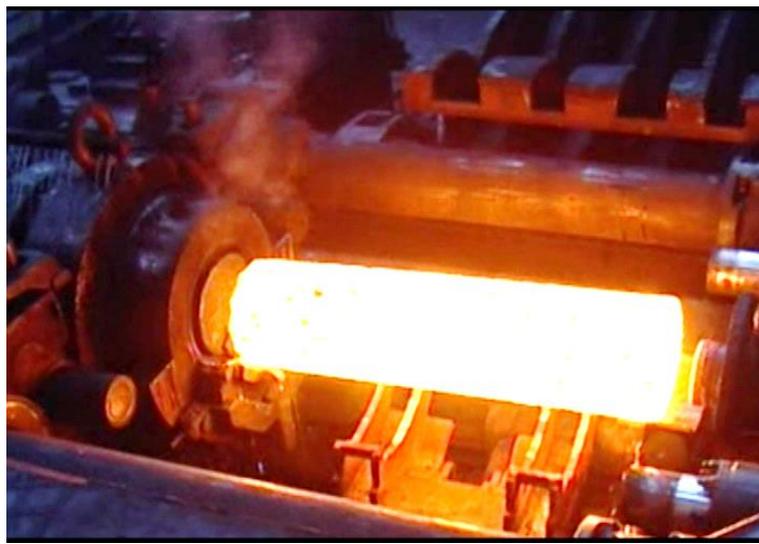


**Figure 1.10.** Opération de défournement.

### 1.3.1.3 La presse à percer

Elle est utilisée que pour les lingots dodécagonaux de la section 410-500. C'est une presse horizontale, réglable de 400-1200 tonnes (force de perçage). Elle utilise comme fluide de l'eau sous pression à 200 kg/cm<sup>2</sup>, qui est fournie par une centrale hydropneumatique (Figure 1.11)

- Perçage des lingots en doigts de gants.
- Capacité de diamètre entre 214-500 mm.
- Longueur lingot 800-1800 mm.
- Coefficient d'allongement 1.15.
- Température mini 1200°C.



**Figure 1.11.** Presse à percer.

#### 1.3.1.4 Presse à centrer

Les lingots ronds de 190-345 mm de diamètre passent par presse à centrer, et vont directement au laminoir oblique pour perçage (c'est-à-dire ne nécessitent pas le passage par la presse à percer). La presse à centrer réalise un avant trou sur la face avant des lingots ronds, qui facilite le centrage pendant l'opération de laminage au niveau laminoir oblique [3].

#### 1.3.1.5 Four à plateau

L'opération de réchauffage est nécessaire du fait, du refroidissement des lingots dans la matrice de la presse à percer, pour cela un petit four à plateau tournant dans les 2 sens ; compte tenu qu'une seule pince assume l'opération d'enfournement et de défournement des lingots. Son rôle est d'élever la température des lingots de 1100°C à 1300°C. Le temps de séjour dépend de la cadence normale de laminage (Figure 1.12).

L'ébauche-presse est chargée et déchargée par un seul appareil du même type que ceux du four à sole. Il est également nécessaire pour fonctionner comme volant d'alimentation du laminoir oblique afin de permettre le changement des parties travaillantes de la presse sans entraver le rythme de la production[3].



Figure 1.12. Four à plateau.

#### 1.3.1.6 Laminoir oblique

Transformation des lingots ronds ou ébauches creuses produites par la presse en ébauches percées (Figure 1.13)

- ✓ Longueur max sortie : 3700 mm
- ✓ Allongement max : 1.75.
- ✓ Taux de réduction : 23%

##### 1.3.1.6.1 Technologie

L'ébauche est poussée par un vérin pneumatique dans le cône d'entrée formé par les deux cylindres tournant dans le même sens.

Elle prend un mouvement de rotation en sens inverse et progresse en raison de l'inclinaison des deux cylindres dans sa progression en avant, l'ébauche est laminée transversalement et longitudinalement.

Elle prend alors un effort de traction de compression alternée considérable lors de la rotation et de la déformation qui en résulte. C'est l'effet de décohésion au centre ou effet Mannesmann.

Limitation longueur maxi : 3,750 m.

Cadence maxi : 72 pièces / heure.



Figure 1.13. Laminoir oblique.

#### 1.3.1.7 Laminoir à pas de pèlerin (zone laminage )

La TTS dispose de deux trains 8" et un train 14". Chaque laminoir est composé de trois parties :

- ❖ Cage pèlerin : avec sa chaîne cinématique ;
- ❖ Appareil de présentation avec son chariot ;
- ❖ Circuit mandrin ou pré-enfilement.

Son rôle est de transformer les ébauches LO en tube à une température environ 1050°C (Figure 1.14).

##### 1.3.1.7.1 Technologie

###### A) Cage pèlerin

Comporte deux cylindres à profil variable qui sont introduits au préalable dans une cassette et divisée en 4 secteurs,

- Un secteur à développement conique constituant la zone d'attaque

- Un secteur à développement cylindrique constituant la zone lissante
- Un secteur ou la cannelure s'élargit progressivement et qui constitue la zone de sortie.
- Un secteur ou le  $\emptyset$  de la cannelure est supérieur à celui de l'ébauche de l'oblique qui constitue la fausse cannelure ;
  - Un dispositif de serrage des cylindres
  - Un dispositif de changement rapide des cassettes
  - Un circuit de refroidissement des cylindres.

### **B) Appareil de présentation avec son chariot**

Permet de ramener l'ébauche après chaque phase de laminage dans sa position initiale par une translation horizontale afin de permettre une nouvelle phase de laminage et opérer une rotation de  $90^0$  entre deux phases de laminage.

Le chariot donne à l'appareil le mouvement d'avance.

Le laminage proprement dit consiste en une phase transitoire ou appointage caractéristique par la recherche du synchronisme entre la vitesse de rotation des cylindres et le mouvement de va et vient de l'appareil. Après un mouvement avant de l'ébauche dans les cylindres, la partie travaillante saisit un morceau de métal qui l'allonge dans la zone d'attaque pendant que les cylindres fait tourner l'ébauche vers l'arrière tant que la partie travaillante est en action. Dès que le tube arrive dans la zone de fausse cannelure, elle revient en avant par commande pneumatique en ayant opéré un quart de tour. Etant donné que le chariot qui porte l'appareil a poursuivi son avance, la partie travaillante des cylindres saisit un morceau de métal adjacent au précédent qui s'allonge à son tour dans la zone d'attaque.

### **C) Circuit mandrin ou pré-enfilement**

Le fait de pré-enfiler un mandrin dans chaque ébauche juste avant le début de laminage nécessite un circuit spécial pour mandrin ou sont réalisées les opérations suivantes : [3]

- Evacuation de l'axe de laminage après démandrage ;
- Séparation mandrin et bague ;
- Refroidissement à l'air
- Refroidissement à l'eau
- Graphite du mandrin
- Pré-enfilement du mandrin dans l'ébauche ;
- Transport de l'ébauche + mandrin vers l'axe de laminage ;
- Mandrin en circulation  $8 \div 10$  ;
- Coefficient d'allongement = 13 : Line-pipe
- Coefficient d'allongement= 10 : Casing



**Figure 1.14** laminoir à pas de pèlerin.

### 1.3.1.8 Scie à chaud

On effectue la découpe des bouts des tubes après la phase de laminage avant de les envoyer au four à longerons.

### 1.3.1.9 Four de normalisation (Four à Longerons)

- Longueur maxi : 15 m.
- Capacité : 45 T /h.

Permet le réchauffage des tubes à haute cadence 110 tubes/heures maxi avec une bonne homogénéité de la température, un système de longerons fixes et un système de longerons mobiles. Ce dernier permet à la charge des tubes en cours de réchauffage de progresser d'un pas ou plusieurs suivant le mode de chargement. Le four est doté de brûleurs installés sur la paroi de défournement. Figure (1.15) [3].

- Température de défournement =  $850^{\circ} \div 875^{\circ} \text{C}$
- Poids au mètre maxi = 171,9 Kg/m
- 10 longerons fixes
- 9 longerons mobiles assurant l'avance et le mouvement de rotation des tubes

La voie d'enfournement est composée de rouleaux automoteurs inclinés.



**Figure 1.15.** Four de normalisation.

### 1.3.1.10 Le calibreur

Obtenir un diamètre à chaud dans les tolérances, ceci s'effectue par réduction successive dans une série de cages calibreuses alternées de 90°C une par rapport à l'autre (Figure 1.16).

La température de calibrage est comprise entre 850°C et 900°C.



Figure 1.16. Calibreur.

### 1.3.1.13 Atelier de Finissage

#### 1.3.1.13.1 Refroidissement

Il est constitué de deux parties, ou lits de refroidissement. Chaque lit est composé d'un ensemble de rails et de chaînes munies de taquets. Les chaînes entraînent les tubes en les faisant rouler sur les rails, afin que le refroidissement des tubes soit homogène et la température du tube baisse de 850° à 80°C. En cas de forte épaisseur, le tube > une température de 150° à 200°C est placé dans un bac à eau [3].

#### 1.3.1.13.2 Dresseuse rotative

Constitué par un galet dresseur, quatre galets de maintien et deux galets moteurs servant d'appui et entraînant le tube dans son mouvement hélicoïdale. Présenté

Ce type de machine caractérisé par sa meilleure enveloppe de circonférence des tubes permet le dressage des gros tubes de faible épaisseur. On applique au tube une flèche pour le ramener à sa limite élastique à l'aide du galet du dresseur effort maxi = 140 tonnes. (Figure 1.17) [3].



Figure 1.17. Dresseuse rotative.

### **-Dépoussiérage**

Permet le contrôle visuel à l'intérieur du tube en éliminant le maxi de calamine. Le dépoussiérage s'effectue manuellement par soufflage d'un jet d'air comprimé à l'extrémité d'un tube. A l'autre extrémité une boîte aspirante qui permet d'aspirer la calamine et l'envoyer dans le canal à battitures.

### **-Tuboscope (Contrôle CND)**

Permet de détecter les défauts de discontinuité qui consiste dans la paroi du tube par contrôle électromagnétique non destructif entièrement automatique. Ce contrôle est basé sur la mesure en amplitude et en fréquence du flux de fuite, crée par la présence d'une discontinuité dans le métal traversé par un flux électromagnétique longitudinal (sonoscope pour les défauts transversaux-amalog pour défauts longitudinaux)

L'analyse de l'importance des défauts en fonction de leur fréquence et leur amplitude.

- Défauts extérieurs = 250 ÷ 600 HZ
- Défauts intérieurs = 50 ÷ 250 HZ

Marquage à la peinture des points en zones défectueuses. (Figure 1.18).



**Figure 1.18.** Contrôle CND.

### **-Installation du conditionnement :**

Elle assure l'application d'un enduit protecteur anticorrosion sur la surface extérieure du tube en le protégeant contre la corrosion durant son stockage et le transport sur le lieu d'utilisation

Elle se compose d'une enceinte de pulvérisation équipée d'anneaux de pulvérisation ouverte aux deux extrémités pour permettre le passage du tube 1m/s

### **-Groupe de tronçonneuses « BARDONS ».**

Sert à tronçonner les extrémités des tubes brutes de laminage et à chanfreiner le Ø extérieur. Cette opération est nécessaire pour faciliter le passage de la bague et du tampon de contrôle. (Figure 1.19)

- Mise en longueur ;
- Contrôle dimensionnel.



Figure 1.19. Tronçonneuse Bardons.

### **-Banc d'épreuve hydrostatique**

C'est le test final que doit subir le tube avant la recette finale et qui consiste de le mettre dans un banc hydrostatique entre deux têtes d'épreuve fixe et mobile, afin de s'assurer de son comportement physique pendant le cycle d'épreuve et à des éventuelles fuites(Figure 1.20).

- ✓ Un pour petits tubes (60,3 à 114,3 mm) : 25Tonnes
- ✓ Un pour gros tubes (114,3 à 372 mm) : 225 Tonnes



Figure 1.20. banc d'épreuve .hydraustatique.

### **-Installation de pesage et métrage**

Le pesage s'effectue par une bascule du type mécanique et une installation de mesure de longueur par curseur mobile. Le poids est donné à  $\pm 1$  Kg et la longueur à  $\pm 1$  cm. Capacité de production : 106 t/h.

- Recette par le client
- Installation de conditionnement (huilage)
- Expédition

En bout de chaîne sortie finissage le produit ainsi arrive à sa destination finale soit vers le parachèvement lorsqu'il s'agit du Casing ou bien vers le client lorsqu'il s'agit du line pipe [3].

### 1.3.2 Description du parachèvement des tubes

Dans l'atelier du parachèvement sont exécutées toutes les opérations nécessaires pour parachever les tubes (casings, line pipe) et les ébauches manchons :

#### 1.3.2.1 Four de trempe

Le four de trempe assure le chauffage et le maintien de la température du tube de (900 à 930)°C.

A la sortie du four, le tube subit une trempe à l'eau (un refroidissement brusque à l'eau, d'une pression P=4 bars, à partir de l'Installation de Trempe).

Ce refroidissement rend le tube dur, fragile et diminue l'allongement A%.

L'Installation de Trempe sert aussi à décalaminer les tubes, à une pression P=110bars.

Alimenté en tubes par la grille extérieure ; avant traitement on soude une casserole à l'extrémité du tube. Après un temps de chauffage et un temps de maintien en température, les tubes sont évacués du four de trempe pour subir une opération de décalaminage puis une opération de trempe dans des jupes de trempe. Les tubes sont ensuite, après passage sur une grille tampon, dirigés vers le four de revenu [3].

**Tableau 1.4.** Données techniques du Four de Trempe.

<b>Four de Trempe</b>	
<b>Type :</b>	Four à longerons mobiles: les longerons assurent le déplacement des tubes à l'intérieur du four.
<b>Capacité :</b>	24 Tonnes/heure
<b>Energie :</b>	Gaz naturel
<b>Température (t) :</b>	t <sub>max</sub> =950°C. non disponibilité des tubes:t= 800°C .

#### 1.3.2.2 Four de Revenu

Son rôle est d'améliorer les effets de trempe en amenant le métal à un équilibre mécanique (disparition des tensions internes) (Tableau 1.5).

Après un temps de chauffage et un temps de maintien en température, les tubes sont évacués du four pour subir une opération de calibrage dans un calibre à 3 cages et puis un refroidissement sur le refroidisseur numéro 5. Après dressage dans la dresseuse rotative, il est réalisé sur grille de contrôle tous les contrôles habituels (dimensionnels des extrémités, dureté, aspect extérieur et intérieur) les tubes non conformes en dureté subissent un deuxième

traitement. Ils sont ensuite tronçonnés sur une installation de tronçonnages, des prélèvements des viroles sont effectués pour les essais mécaniques [3].

**Tableau 1.5.** Données techniques du Four de Revenu.

<b>Four de Revenu</b>	
<b>Type :</b>	Four à longerons mobiles
<b>Capacité :</b>	30 Tonnes/heure
<b>Energie :</b>	Gaz naturel
<b>Température (t) :</b>	(580 à 750)°C en fonction de la matière et de recyclage. non disponibilité des tubes: t= 500°C.



**Figure 2.21.** Fours de trempe et revenu.

### 1.3.2.3 Opérations de Contrôle

Après tronçonnage et contrôle des extrémités, les tubes sont dirigés vers la zone Billage, contrôle par bague du diamètre du tube puis vers la zone MPI (contrôle des défauts par magnapoudre) ensuite le passage par l'installation de contrôle non destructif (CND) « US PAT ». Les tubes bons sont envoyés vers l'installation PT5 pour Fileter ou bien chanfreiner les extrémités des tubes.les tubes sont ensuite acheminés vers la grille de recette-usine pour subir les différents contrôles des extrémités soit vers la recoupe. Les tubes recettés sont ensuite dirigés vers la monchoneuse (casings) pour vissage des monchons [3].

Les tubes sont envoyés ensuite vers le banc d'épreuve 500 tonnes pour subir l'épreuve hydrostatique.

Après cette opération d'épreuve hydraulique, les tubes (Casings) sont acheminés vers l'installation de passage tampon pour le contrôle du  $\varnothing$  intérieur (installation mécanique).

1. Brossage
  2. Dégraissage
  3. Peinture
  4. Pesage-métrage
  5. Poinçonnage
  6. Marquage
  7. expédition
- } zones 1,2 e 3

### 1.3.2.3 Atelier des manchons

Dans cet atelier indépendant sont usinés, traité et stockés :

- Les manchons (raccordement des casings et tubing) ;
- Les protecteurs bagues et niples.

Ces manchons et protecteurs sont produits à partir des tubes ébauches. L'atelier peut se subdiviser en trois (03) zones.(1,2 et 3)

# **CHAPITRE 2**

## **Analyse bibliographique.**

## 2.1 matériau de l'étude

Le matériau de l'étude est un acier au carbone faiblement allié utilisé pour la production des tubes sans soudure destiné au transport des hydrocarbures, de dénomination API-X52Q.

Il a été produit par l'entreprise sider el hadjar-annaba (T.S.S : tube sans soudure ; et répond à la norme API 5L.

Le matériau initial sont des tubes de la même coulée fabriqués par laminage à chaud.

### 2.1.1 Caractérisations 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

- 5L pour les qualités normales (Line Pipe)
- 5 CT, pour les qualités à haute résistance (Casings et Tubings)

Les aciers API sont généralement laminés à chaud et s'emploient à l'état brut de laminage ou à l'état amélioré pour les constructions soudées et les pipelines. ils sont classés en plusieurs grades: X52, X60, X70...etc. [4]. Le tableau 1.1 rassemble les propriétés mécaniques minimales requises pour les pipelines en acier. Un gazoduc est une structure dont l'intégrité doit être granitier. En particulier, pour éviter tout amorçage de rupture, le dimensionnement de la structure est effectué, pour travailler dans le domaine élastique avec un coefficient de sécurité adéquat, ce qui autorise une taille critique de défaut.

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 tableau 1.1 [5]

**Tableau 2.1.** caractéristiques mécaniques requises des pipelines en acier de grade API.

	Direction	Epaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A50 (%)	KV 0°C (j)	DWTT 10°C (%)
Grade B AFCS	T	5-20	241-448	414-758	≥ 28,8	≥ 27	≥ 100
X42 AFCS	T	5-20	290-496	414-758	> 28,8	> 27	> 100
X46 AFCS	T	5-20	317-524	434-758	≥ 27,5	≥ 27	≥ 100
X52 AFCS	T	5-20	359-531	455-758	≥ 26,4	≥ 40	≥ 85
X56 AFCS	T	5-20	386-511	490-758	≥ 24,1	≥ 40	≥ 85
X60 AFCS	T	5-20	414-565	517-758	≥ 23,5	≥ 40	≥ 85
X65 AFCS	T	5-20	448-600	531-758	≥ 23	≥ 40	≥ 85
X70 AFCS	T	5-20	483-621	565-758	≥ 21,7	≥ 40	≥ 85
X80 AFCS	L	5-14	-	-	-	≥ 40	-

## 2.2 Aciers à haute limite élastique (HLE)

### 2.2.1 Introduction

L'acier de par ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques occupe une place importante dans l'industrie des métaux ferreux, d'où son utilisation dans divers domaines comme dans le transport par canalisation des hydrocarbures (pétrole et gaz naturel). Il est utilisé pour la fabrication des pipelines (gazoducs et oléoducs) pour acheminer des quantités importantes d'hydrocarbures sur de grandes distances depuis leurs gisements vers les zones de consommation et de transformation. A nos jours il existe plus d'un million de Km de réseau de pipelines en exploitation dans le monde.

Le réseau en Algérie est évalué à plus de 16.000 Km pour des diamètres allant de 8 à 48 pouces. Pour leur efficacité ces canalisations doivent répondre à des impératifs de rentabilité et de sécurité. Plus de 95% des aciers utilisés pour les gazoducs sont des aciers micro alliés à haute résistance. Ils sont obtenus par des schémas métallurgiques de plus en plus performants en augmentant la vitesse de refroidissement après laminage contrôlé, comme les tôles TMCP (thermo-mechanical controlled process) obtenues par laminage à température contrôlée suivi d'un refroidissement accéléré.

Les canalisations enterrées dans le sol sont soumises à des contraintes importantes et un environnement corrosif. Pour cela le développement de nouveaux aciers HSLA a été orienté vers une modification des propriétés mécaniques afin d'éviter une augmentation trop importante de l'épaisseur des tubes. On est arrivé à obtenir un compromis entre une haute limite d'élasticité pour supporter les grandes pressions et une bonne ténacité afin de résister à la propagation de fissures grâce au développement des tôles TMCP. Les aciers sont passés du grade X52 au grade X70 employés de nos jours avec des microstructures ferrito perlitique. Le passage à des grades supérieurs X80, X100 passe par le développement d'aciers de structures ferrito bainitiques

### 2.2.2 Les différentes classes des aciers HLE

Les aciers HLE incluent un grand nombre de nuances standards et sont conçus pour fournir des combinaisons spécifiques de propriétés telles que la résistance, la soudabilité, la formabilité, la ténacité, et la résistance à la corrosion atmosphérique.

Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, bien que leurs propriétés désirées soient accomplies par l'usage de petites additions d'alliages tels que : Ti, Nb, Cr...

Les aciers HSLA sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques élevées obtenues par de petites additions d'alliages et des techniques de traitement spéciales tel que le laminage contrôlé [6].

Les aciers HSLA peuvent être divisés en six catégories :

- Aciers résistants à la corrosion.
- Aciers micro-alliés ferrito-perlitique .
- Aciers laminés à structure perlitique.
- Aciers à ferrite aciculaire (bainite à bas carbone).
- Aciers à double phase (dual-phase).
- Aciers à forme d'inclusion contrôlés.

### 2.2.3 Influence de la composition chimique

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) sont des aciers micro alliés au Niobium, au Vanadium et au Titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium et le Molybdène. Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersoïdes relativement aux éléments formant des phases d'insertion stables (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont: la ferrite, la perlite et les phases secondaires qui sont des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersoïdes.

## 2.3 Traitements thermiques

### 2.3.1 Introduction

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :

- Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A\%$  en donnant une meilleure tenue de l'élément.
- Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.

- De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.

- De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, 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.

Les traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage. [7]

### 2.3.2 Définitions et procédés des traitements thermiques

#### 2.3.2.1 La Trempe

La trempe consiste en un refroidissement rapide d'un acier austénitisé et a pour but de donner à l'acier la plus grande dureté possible par formation de la martensite ou de la perlite fine.

La température d'austénitisation, aussi appelée "température de trempe", dépend de la teneur en carbone de l'acier; elle doit être située dans le domaine austénitique du diagramme Fe-C.

La trempe s'effectue en général soit [8]

### 2.3.2.1.1 Trempe à l'eau

L'eau constitue le milieu de refroidissement le moins cher qui permette, dans la pratique de tous les jours, de réaliser les refroidissements les plus énergiques. Toutefois, il faut noter qu'au cours d'une trempe à l'eau la vitesse de refroidissement n'est pas constante. L'eau a l'avantage de faire éclater la calamine au début du refroidissement et donc de nettoyer la surface et d'améliorer l'échange thermique. Lorsque la géométrie de la pièce le permet, l'eau peut former facilement des bulles de vapeur prisonnières qui ralentissent localement le refroidissement du métal et donnent naissance à des points doux ; la circulation de l'eau, l'agitation de la pièce ainsi que sa présentation doivent donc être adaptées. Si la température de l'eau s'élève, son pouvoir refroidissant diminue très sensiblement (la période de caléfaction est prolongée).

Ainsi donc, l'exécution d'une bonne trempe à l'eau exige le contrôle permanent :

- de la température de l'eau ;
- de l'agitation des pièces ;
- de la circulation de l'eau et de son renouvellement éventuel. Par ailleurs, il est nécessaire d'éviter toute contamination de l'eau par des produits étrangers (sels notamment), qui changerait sa sévérité de trempe et empêcherait d'obtenir des résultats constants [9].

### 2.3.2.1.2 Trempe à l'huile

Il existe une très grande variété d'huiles de trempe qui peuvent différer :

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

Lors d'une trempe à l'huile, la vitesse de refroidissement n'est pas constante; elle est maximale lorsque la température de surface de la pièce est encore assez élevée et généralement comprise, suivant les propriétés de l'huile considérée, entre 400 et 600 °C, soit à un niveau bien supérieur à celui correspondant à la trempe à l'eau. La viscosité de l'huile diminue quand sa température augmente [9].

### 2.3.2.1.3 Trempe à l'air

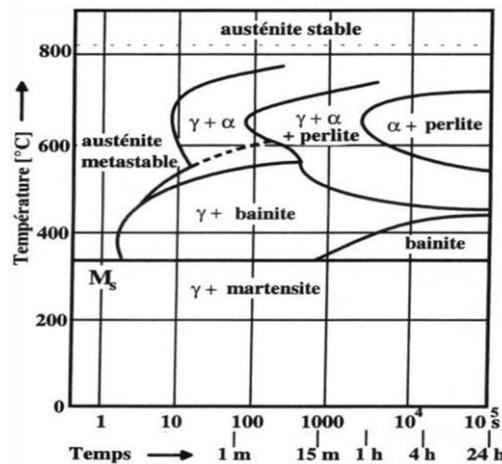
Est le cas le plus simple à mettre en oeuvre et il doit être choisi en priorité dans le cas des aciers à outils de bonne trempabilité, car les risques de déformations sont d'autant plus grandes que le milieu de refroidissement est plus rapide [9].

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 20-40°C. En ajoutant environ 10 % de chlorure de sodium à l'eau, on obtient une trempe plus efficace qu'avec de l'eau pure. Il est évident que les couches d'oxyde adhérent à la pièce et les bulles de vapeur qui se sont

formées à la surface diminuent le transfert de chaleur, donc la vitesse de refroidissement. Par contre, une forte agitation (convection forcée) du milieu de trempe l'augmente.

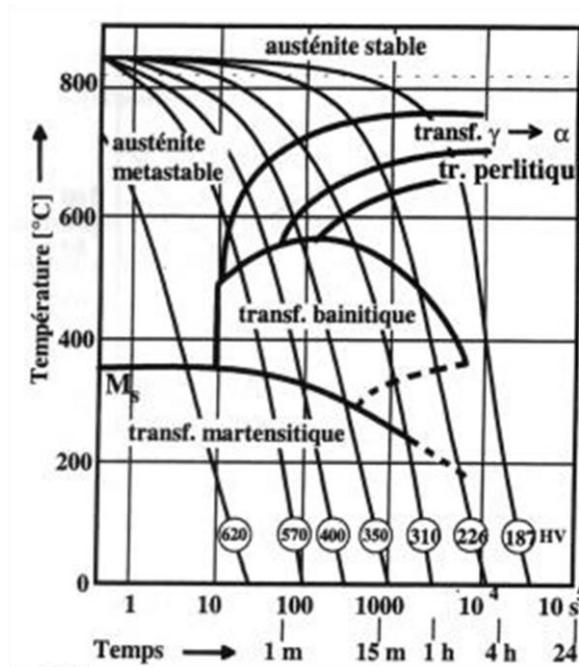
L'effet d'une trempe sur un acier se laisse très fortement influencer par sa teneur en carbone et le pourcentage des éléments d'alliages. Les éléments ajoutés au Fe modifient profondément la cinétique de la transformation  $\alpha - \gamma$ . Pour mettre en évidence cette cinétique, on se sert des diagrammes TTT (diagramme de transformation de l'austénite en conditions isothermes, Température - Temps - taux de Transformation, Figure 2.1) et surtout des TRC (diagramme de Transformation en Refroidissement Continu, voir Figure 2.2) dans le cas des trempes.



**Figure 2.1.** Courbe TTT (acier faiblement allié 0,35 % C) : Ce diagramme se lit en suivant une isotherme.

### 2.3.2.2 Le Revenu

Un acier trempé est dur, mais généralement beaucoup trop fragile pour être utilisé directement. Le revenu consiste à chauffer une pièce qui vient d'être trempée à une température inférieure au point de transformation, à la maintenir à cette température, puis à la refroidir généralement à l'air, parfois à l'eau. Le revenu a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles provenant de la trempe et d'augmenter la ténacité. L'augmentation de la ténacité s'obtient malheureusement toujours plus ou moins au se forment en raison des grandes différences de température entre le cœur et la surface de la pièce lors de la trempe. La dilatation thermique provoque des contraintes qui dépassent la limite d'écoulement plastique et parfois même la résistance à la rupture (fissures de trempe).

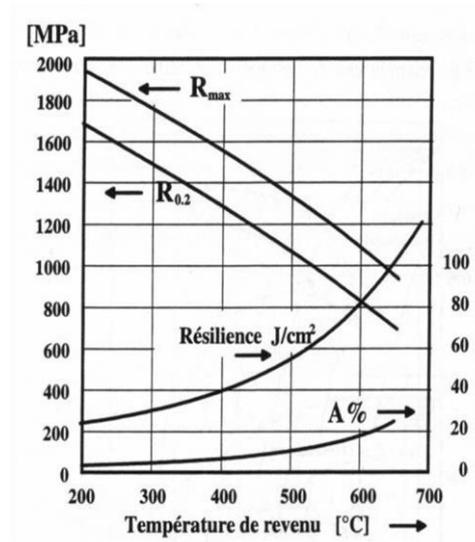


**Figure 2.2.** Courbe TRC après trempe. Le diagramme TRC se lit en suivant les courbes de refroidissement.

Le revenu permet de transformer graduellement l'état martensitique - métastable - vers un état d'équilibre, caractérisé par la coexistence de ferrite et de cémentite. L'augmentation de la température permet la germination et la croissance de la cémentite et, le cas échéant, des carbures. La martensite s'appauvrit ainsi en carbone et sa maille cristalline se transforme continuellement dans la maille cc de la ferrite. Les distorsions du réseau cristallin, caractéristiques pour les microstructures martensitiques, et avec eux les contraintes résiduelles, à l'origine de la fragilité, sont relâchées. Les propriétés mécaniques que l'on obtient après un revenu de 30 min sont représentées dans le diagramme de revenu et qui est normalement fourni par le fabricant de l'acier.

Le diagramme montré en Figure 2.3 correspond à celui d'un acier d'amélioration que l'on utilise pour la réalisation des pièces de construction fortement sollicitées (arbres, engrenages).

En particulier il s'agit de l'acier 40NiCrMo6 qui a la composition : 0.4% C, 1.4% Ni, 0.8% Cr et 0.4% Mo.



**Figure 2.3.** Diagramme de revenu de l'acier 40NiCrMo6. Évolution des propriétés en fonction de la de revenu (température de trempe 840°C)[8].

### 2.3.3 les transformations de phases à l'état solide des aciers

#### 2.3.3.1 la transformation de l'austénite

Le traitement thermique de l'acier commence lorsqu'il est porté à haute température dans un état complètement ou très largement austénitique. L'austénite possède alors deux caractéristiques intéressantes :

- 1) Composition et l'homogénéité de la composition ;
- 2) La grosseur du grain.

Au refroidissement, l'austénite se transforme en ferrite et carbure. En ajustant les conditions de refroidissement, en particulier la vitesse, il est possible de contrôler la structure microscopique, autrement dit le mode de répartition du carbure dur dans la matrice ferritique douce. L'une des vitesses de refroidissement de l'acier à partir du domaine austénitique est la vitesse de refroidissement des produits laminés ou forgés après la dernière passe à chaud. Ce refroidissement n'est pas techniquement, un traitement thermique. Il s'agit pourtant, d'un point de vue métallurgique, d'un véritable traitement, reproductible pour une section donnée.

La décomposition de l'austénite ne commence pas instantanément lorsque la température atteint celle qui, au bout d'un temps de maintien suffisant, entraîne sa décomposition isotherme [10].

#### 2.3.3.2 Transformation perlitique

Au cours d'un refroidissement lent, à la vitesse de 2 à 3 °C / mn, l'austénite se transforme en ferrite et en carbure lamellaire [11].

A haute température, l'austénite homogène présente une distribution embryonnaire caractéristique. Le franchissement de la température de transformation entraîne une évolution de cette distribution pendant laquelle on n'observe aucune transformation [12], le temps

nécessaire pour atteindre ce nouvel état est appelé temps d'incubation.

A température  $\theta_{iso}$ , légèrement au dessous de  $A_1$  (pour un acier proche de la composition eutectoïde), l'énergie motrice de la transformation est négligeable et il s'ensuit une faible vitesse de réaction que l'on observe après temps d'incubation important.

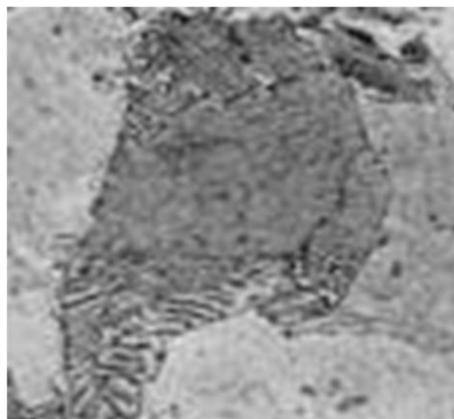
A température  $\theta_{iso}$ , c'est-à-dire vers  $500^\circ\text{C}$ , l'énergie motrice de la transformation devient très importante, mais l'abaissement de la température ralentit considérablement, la vitesse de diffusion du carbone qui apparaît

Comme le facteur contrôlant la transformation et expliquant l'importance du temps d'incubation.

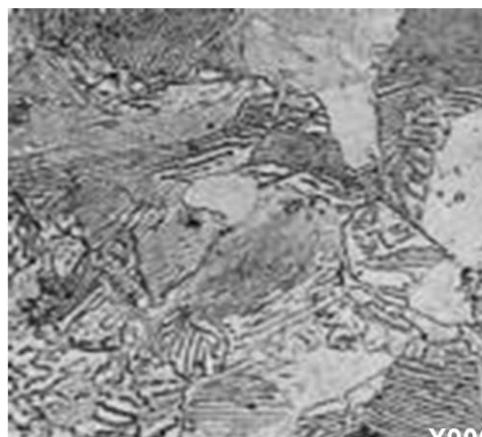
Vers  $600^\circ\text{C}$ , l'énergie motrice et la vitesse de diffusion ont des valeurs telles que la formation de la perlite se manifeste après un très court temps d'incubation.

Pour un acier hypoeutectoïdes, la transformation commence par l'apparition de la ferrite aux joints des grains austénitiques ; simultanément, l'austénite restante s'enrichit en carbone jusqu'à atteindre la composition eutectoïde.

La perlite apparaît sous forme de colonies ou l'agrégat ferrite –cémentite progresse, sans relation d'orientation cristallographique avec le grain d'austénite mère [13].



**Figure 2.4.** Début de la transformation perlitique d'un acier eutectoïde, la croissance lamellaire à partir des germes et la formation simultanée de ferrite et de carbure [14].



**2.3 Figure 2.5.** transformation perlitique après la décomposition complète [14].

### 2.3.3.3.1 La martensite $\alpha'$ (M)

Cette phase cristallise dans le système quadratique. On peut la considérer comme une solution solide de carbone dans le réseau distordu de la ferrite. Cette distorsion est la caractéristique d'un acier refroidi rapidement depuis la température de l'austénitisation, et elle coexiste souvent avec la bainite et la troostite.

La martensite possède une grande dureté ( $HV = 700$  à  $900$ ), mais présente l'inconvénient d'être très fragile. Elle est ferromagnétique comme la ferrite. (Figure 2.11)

La martensite peut se présenter sous différentes morphologies : massive ou aciculaire. Cette dernière forme est de loin la plus répandue dans le cas des aciers faiblement alliés. [15]

### 2.3.3.3.2 La transformation martensitique

Est une transformation sans diffusion. (Par glissement) Du point de vue de la cinétique, la martensite apparaît dès que l'on atteint, par un refroidissement rapide, une certaine température dite de début de la transformation martensitique ( $M_s$ ), mais elle ne se poursuit pas en condition isotherme.

Du point de vue structural, la transformation martensitique correspond à un basculement coopératif des atomes qui participent à la formation d'une plaquette de martensite. La martensite a une structure proche celle de la ferrite.

La présence en sursaturation du carbone retenu dans la martensite, confère à la maille une légère déformation et le réseau devient quadratique centré, les atomes de carbone se trouvant dans les sites octaédriques. (Figure 2.8)

Les paramètres  $a$  et  $c$  de la maille quadratique de martensite dépendent de la teneur en carbone de l'acier. D'une manière générale, la martensite présente plusieurs morphologies selon cette teneur en carbone [11]. A faible teneur ( $c < 0.6\%$ ), on observe une martensite aciculaire fortement maclée [16, 17].

Le changement de forme, engendré par le cisaillement du volume initial d'austénite se traduit par un gonflement volumique qui donne naissance à des contraintes internes considérables. Ces contraintes, d'autant plus importantes que le carbone est abondant, confèrent à l'acier une forte dureté, mais aussi une grande fragilité que l'on peut atténuer par un traitement thermique ultérieur appelé « Revenu ».

### 2.3.3.4 Transformation intermédiaire (bainitique)

#### 2.3.3.4.1 Bainite

Mélange de fines plaquettes de carbures  $Fe_3C$  et  $\square$  ( $Fe_2 ; 4 C$ ) dans une matrice de ferrite. Accompagne souvent la martensite dans les aciers trempés. moins dur, mais moins fragile que la martensite. [18]

#### 2.3.3.4.2 la transformation bainitique

La transformation perlitique est contrôlée par un mécanisme de diffusion, alors que la transformation martensitique procède par cisaillement et en absence de diffusion.

La transformation bainitique est intermédiaire entre les deux précédentes, puisque le mécanisme mis en jeu est mixte : on observe simultanément un phénomène de cisaillement de l'austénite en ferrite, et une diffusion à courte distance du carbone.

La bainite qui apparaît à haute température, dite bainite supérieure, présente la forme de lattes, les aiguilles de ferrite bainitique étant séparées par de petites plaquettes de cémentite. Aux températures plus basses, le carbone dont la vitesse de diffusion est de plus faible, précipite sous forme de très fins carbures de type cémentite ou epsilon ( $\text{Fe}_2 ; 4 \text{C}$ ) à l'intérieur même des aiguilles de ferrite bainitique.

# **CHAPITRE 3**

*Procédures  
expérimentales.*

### 3 Procédures expérimentales

Les tubes laminés en X52 Q, dont la composition chimique est présentée dans le tableau 3.1, doivent subir un traitement thermique, une trempe à 920 °C et un revenu à 740 °C.

Un incident est survenu au cours du revenu, l'opérateur chargé du traitement thermique a interrompu le processus et a décidé de refaire le traitement thermique (trempe + revenu). Au cours du revenu, le même incident s'est reproduit pour la deuxième fois. Les mêmes tubes ont subis un troisième passage de traitement thermique, cette fois-ci sans incident.

Des essais mécaniques, un traçage de profils de microdureté et une étude microstructurale à l'aide des microscopes optique ont été réalisés.

**Tableau 3.1.** Composition chimique de l'acier X52 Q.

Analyse	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V	Nb	Al	Cu	Sn	Ni	Ti	Céq
Coulée	0,15	1,33	0,25	0,008	0,007	0,037	0,032	0,00	0,004	0,016	0,008	0,002	0,002	0,002	0,38
produit	0,15	0,31	0,28	0,005	0,004	0,025	0,025	0,001	0,001	0,012	0,016	0,003	0,004	0,002	0,37
	0,15	0,29	0,27	0,005	0,006	0,024	0,025	0,001	0,001	0,012	0,016	0,003	0,002	0,002	0,37

#### 3.1 Traitements thermiques

Afin d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques, les tubes provenant de l'atelier de laminage doivent subir un traitement thermique par trempe et revenu. La figure 3.1 montre la zone de traitement thermique constituée d'un four de trempe et un autre de revenu.



**Figure 3.1.** Fours de trempe et revenu.

### 3.1.1 La trempe

Il est à noter que notre idée est l'analyse d'échantillons découpés à partir de tubes traités (trempe + revenu) dans les conditions de l'usine.

Les tubes sont d'abord chauffés jusqu'à la température de trempe, qui est comprise entre  $900 \div 930$  °C, pour un temps de chauffage de 40 minutes et un temps de maintien de 20 minutes dont le but d'égaliser la température et permettre la dissolution des carbures (fig. 3.2). Les caractéristiques du four de trempe sont présentées dans le tableau 3.2.

A la sortie du four, les tubes subissent une trempe à l'eau (un refroidissement brusque à l'eau sous une pression de 4 bars, à l'aide d'une installation spéciale de trempe).

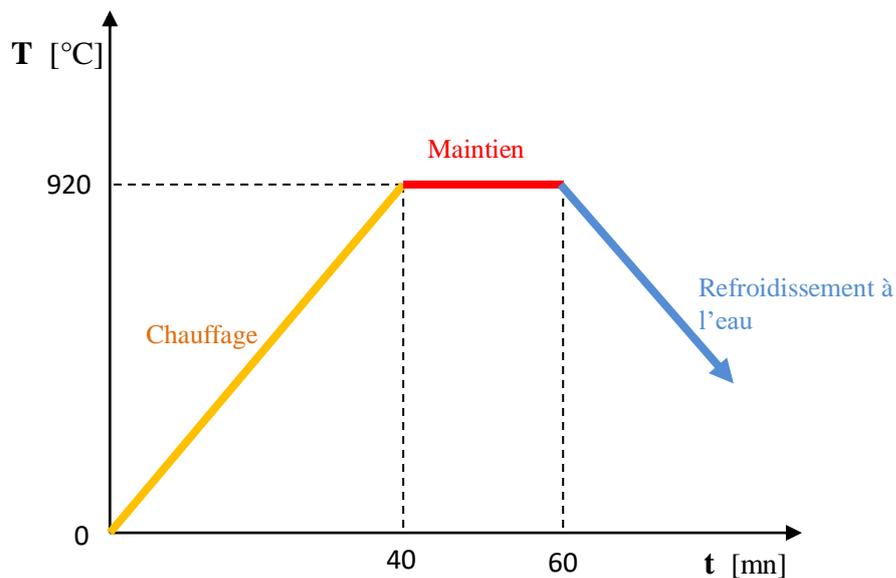


Figure 3.2. Régime de traitement par trempe

Tableau 3.2 Données techniques du four de trempe.

Four de Trempe	
Type :	Four à longerons mobiles: les longerons assurent le déplacement des tubes à l'intérieur du four.
Capacité :	24 Tonnes/heure
Energie :	Gaz naturel
Température (t)	$t_{\max} = 950^{\circ}\text{C}$ . non disponibilité des tubes : $t = 800^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1.2 Le revenu

Les tubes ainsi trempés sont placés pendant 15 minutes dans un autre four chauffé à la température de 740 °C (temps de chauffage + temps maintien = 40 minutes) (fig. 3.3), puis refroidis par à l'eau tiède. Son rôle est d'améliorer les effets de trempe en amenant le métal à un équilibre mécanique (disparition des tensions internes).

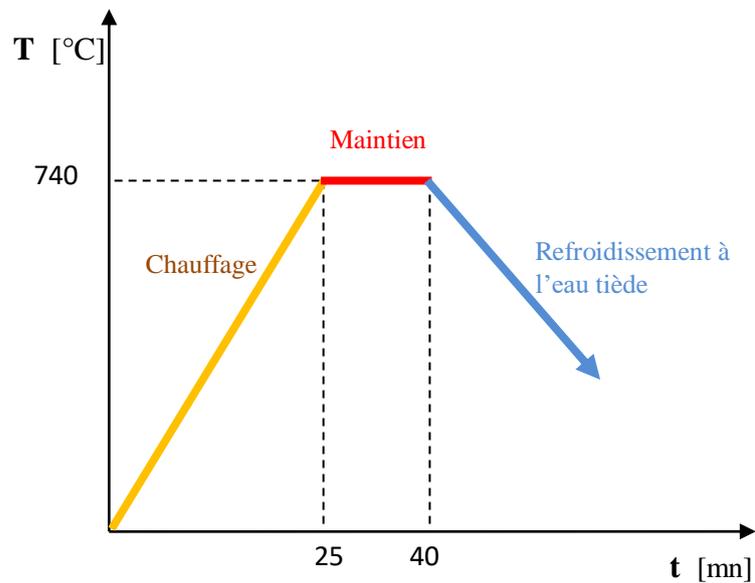


Figure 3.3. Régime de traitement de revenu.

Tableau 3.3. Données techniques du four de revenu.

Four de Revenu	
Type	Four à longerons mobiles
Capacité	30 Tonnes/heure
Energie	Gaz naturel
Température	(580 à 750)°C en fonction du matériau. non disponibilité des tubes : t = 500°C.

### 3.2 Mode de découpage des éprouvettes

L'étude concerne quatre états du matériau du tube :

- Eprouvettes prélevées à partir d'un tube non traité.

- Eprouvettes prélevées à partir d'un tube traité correctement.
- Eprouvettes prélevées à partir d'un tube dont le traitement de revenu a été interrompu 2 fois de suite (2<sup>ème</sup> passage).
- Eprouvettes prélevées d'un tube traité correctement après deux traitements interrompus au cours du revenu (3<sup>ème</sup> passage).

L'éprouvette est constituée soit par un tronçon de tube soit par une bande longitudinale ou transversale découpée dans le tube ayant l'épaisseur totale de la paroi du tube (fig. 3.4) soit par une éprouvette de section circulaire usinée dans la paroi du tube.

Pour chaque état du matériau il y a :

- Des éprouvettes pour étude microstructurale à l'aide de la microscopie optique.
- Des éprouvettes pour tracer les profils de micro-dureté.
- Des éprouvettes pour essai de résilience.
- Des éprouvettes pour essai de traction.

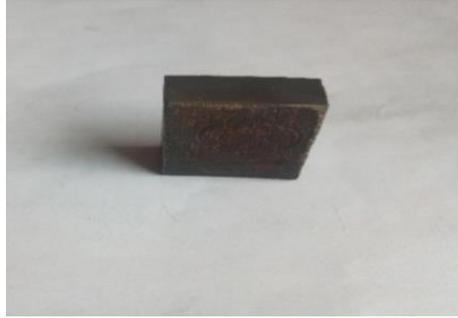


**Figure 3.4.** Machines à découper les éprouvettes ou les échantillons.

### 3.3 Préparation des échantillons pour observation microscopique

Une série d'échantillons (fig. 3.5) destinée aux observations microscopiques et à la détermination des microduretés, numérotés selon le mode de prélèvement sur les tubes cité ci-dessus, ont été préliminairement polis mécaniquement à l'aide du papier abrasifs (SiC), de différentes granulométrie (120, 240, 320, 600, 800, 1200 et 4200), collés sur le disque d'une polisseuse (fig. 3.6). Un polissage de finition a été réalisé en utilisant un feutre imprégné d'une pate diamantée (0,32  $\mu\text{m}$ ) jusqu'à l'obtention d'une surface miroir. Le polissage a été effectué simultanément au niveau des laboratoires de Département de Métallurgie (Annaba).

Les échantillons destinés à l'observation métallographique ont subi une attaque chimique au nital à 3% composé de 3% acide nitrique et 97% alcool éthylique pour révéler leur microstructure.



**Figure 3.5.** échantillon utilisé pour la métallographie et la micro dureté.



**Figure 3.6.** Polisseuse à vitesse variable.

### 3.4 Observations microstructurales

L'observation des surfaces polies et attaquées des échantillons traités a été réalisée au moyen d'un microscope optique de type Nikon Eclipse-LV 150 doté d'une caméra SD-Fi2 avec un logiciel d'acquisition NIS-ELEMENT D (fig. 3.7). Ce dernier est constitué de quatre objectifs avec grossissement allant de 60 à 600 fois qui donnent une première image réelle qui sera agrandie par un oculaire pour l'obtention de l'image définitive. Un dispositif photographique solidaire du microscope permet la prise des micrographies.



**Figure 3.7.** Microscope optique avec caméra piloté par ordinateur de type Nikon Eclipse-LV 150.

### 3.5. Caractérisations mécaniques

#### 3.5.1 Essai de traction

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer les caractéristiques mécaniques du métal. Soumise à un effort croissant et régulier de traction, l'éprouvette s'allonge uniformément jusqu'à une certaine valeur caractéristique. Cette valeur où la charge appliquée demeure stationnaire est le point de limite élastique. Si la charge est supprimée, l'éprouvette revient approximativement à sa longueur primitive. Si la charge continue de s'accroître, l'allongement augmente et devient permanent, la rupture intervient alors ; c'est le point de rupture. [19]

D'après la figure 3.8, les caractéristiques mécaniques de la traction sont :

- **La charge de rupture ( $R_m$ )** : C'est la caractéristique qui exprime la plus ou moins grande résistance d'un matériau à se rompre.

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

- **Limite élastique ( $R_e$ )** : C'est la caractéristique mécanique qui exprime la plus ou moins grande facilité d'un matériau à s'allonger dans la phase élastique.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

Section initiale :

$$S_0 = e_0 \cdot l_0$$

- **L'allongement ( $A$ )** : C'est la valeur de l'allongement d'un matériau ramenée en % et mesurée après rupture d'une éprouvette de traction.

$$\Delta L = L_f - L_0$$

$$\varepsilon(\%) = A(\%) = \frac{\Delta l}{L_0} 100$$

- **La striction (Z)** : La striction est le phénomène d'étranglement de la partie calibrée de l'éprouvette. La striction de la partie calibrée s'amorce lorsque la charge maximale de rupture est atteinte ( $F_m$  sur la courbe ci-dessus). L'allongement de l'éprouvette augmente très rapidement à ce moment jusqu'à la rupture de l'éprouvette de traction.

$$Z(\%) = \frac{\Delta S}{S_0} 100$$

Section finale :

$$S_f = e_f \cdot l_f$$

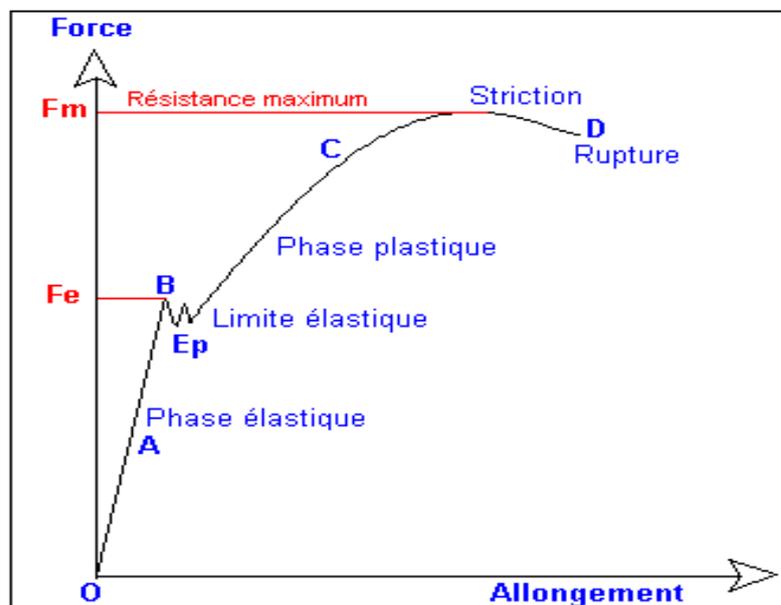


Figure 3.8. Diagramme conventionnel de traction[19].

Toujours d'après la figure 3.8, on distingue généralement deux domaines ; un domaine élastique, et un domaine plastique : [19]

- **Domaine élastique** : est représentée par la ligne  $OB$ , Il s'agit de la zone dans laquelle la déformation est proportionnelle à la contrainte suivant la loi de Hooke. Dans ce domaine, on peut admettre que le diagramme est linéaire sous forme d'une droite. La limite d'élasticité  $R_e$  correspond à la contrainte maximale qu'il est possible d'atteindre pour un comportement uniquement élastique de l'éprouvette. La déformation spécifique correspondant à la limite d'élasticité est notée  $\varepsilon_e$ ; (les déformations sont réversibles; c'est-à-dire que l'éprouvette reprend sa longueur initiale lorsque la force

appliquée est supprimée ( $\sigma = 0$  et  $\varepsilon = 0$ ). Les déformations maximales pour lesquelles existe un comportement élastique sont généralement faibles (pas plus de 1%).

- **Domaine plastique** : est représentée par la ligne *BC*, ce n'est plus le cas, et cela permet de définir la limite entre domaine élastique et domaine plastique, appelée limite d'élasticité, ou encore seuil d'écoulement.
- **Palier d'écoulement** : Le palier d'écoulement, qui est une caractéristique propre aux matériaux métallique, surtout visible pour les aciers non alliés à faible limite d'élasticité, correspond à la zone dans laquelle le matériau se déforme sans augmentation de la contrainte. Cette zone se situe juste après le domaine élastique. Si on relâche la force, la décharge se fait élastiquement et le matériau, bien que revenant partiellement en place, conserve une déformation permanente.
- **Domaine d'écrouissage** : Après le palier d'écoulement, il faut à nouveau augmenter la sollicitation pour accroître la déformation. La limite supérieure de la zone d'écrouissage est on tire de cet essai des caractéristiques mécaniques très importantes surtout:
  - La résistance à la rupture *R<sub>m</sub>*; C'est la contrainte maximale obtenue avant d'atteindre la rupture.
  - La phase de striction est représentée par la courbe entre *F<sub>m</sub>* et *D*. La rupture de l'éprouvette est représentée par la lettre *D*. [19]

Les symboles de désignation sont présentés dans le tableau 3.4.

**Tableau 3.4.** Symbole et désignation. [19]

Repère	Symbole	Désignation	Unité
1	$L_i$	Longueur initial	mm
2	$L_f$	Longueur final	mm
3	$L_i$	Largeur initial	mm
4	$l_f$	Largeur final	mm
5	$e_i$	Epaisseur initial	mm
6	$e_f$	Epaisseur final	mm
7	$S_i$	Aire de la section initiale	mm <sup>2</sup>
8	$S_f$	Aire de la section finale	mm <sup>2</sup>

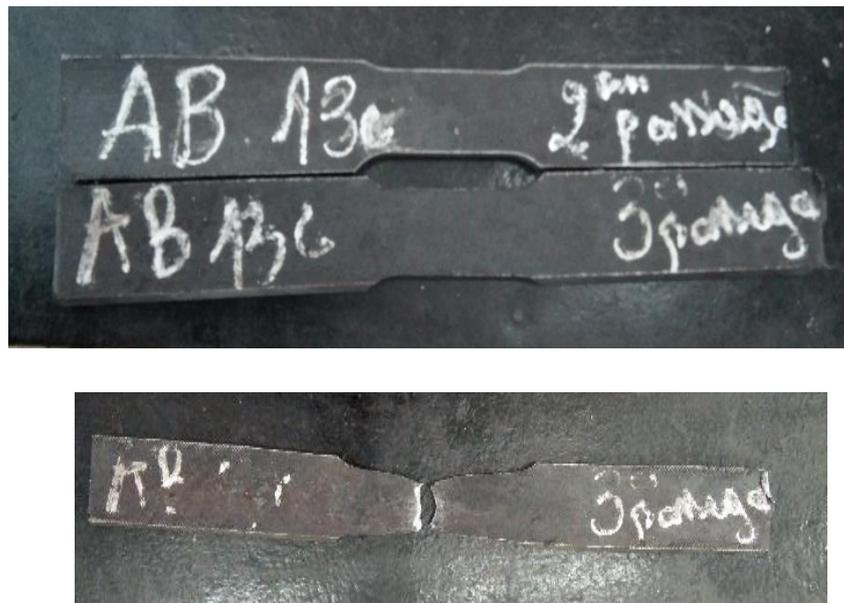
### 3.5.1.1 Principe de l'essai de traction

L'essai de traction étant le plus simple parmi les essais mécaniques consiste à exercer deux forces égales (et opposées) sur une éprouvette normalisée (plate ou cylindrique). Pour les essais mécaniques classiques la traction est réalisée à froid. Ainsi, on va imposer à l'éprouvette une déformation notée  $\epsilon$  et on enregistre la contrainte  $\sigma$  jusqu'à la rupture. A partir de la courbe conventionnelle de traction donnée par la machine (fig. 3.9) présentée par la contrainte en fonction de la déformation  $\sigma = f(\epsilon)$ , on mesure instantanément l'allongement  $A$ . Les éprouvettes de traction utilisées de forme plate (fig.3.10), norme API 5L avec des dimensions ( $323,9 \times 9,5$ ) mm.

La machine de traction utilisée est de type Zwick BP1-F1200N.F11 connectée sur ordinateur (fig.3.9) et dont les caractéristiques sont présentées dans la figure 3.11. Les éprouvettes ont été encastrées entre les deux mors dont l'un est fixe et relié à un capteur de force de 1200 KN et l'autre mobile, relié à un système d'entraînement ayant une vitesse de déplacement de 1mm/min à 300mm/min. Ainsi, les paramètres  $E_r$ ,  $\sigma_r$ ,  $\epsilon_r$  qui sont respectivement le module de Young, la contrainte à la rupture et la déformation à la rupture sont donnés par l'ordinateur pour chaque éprouvette testée. Les résultats sont enregistrés puis imprimés. Enfin pour pouvoir traiter sur micro les courbes qui nous ont été remises sur papier, on a procédé à une digitalisation qui consiste à retracer les courbes point par point avec le logiciel Curve Un scan et qui permet d'obtenir des courbes moyennes des différents courbes obtenues.



**Figure 3.9.** Machine de traction utilisée de type Zwick BP1-F1200N.F11.



**Figure 3.10.** Eprouvettes de traction avant et après rupture.

Type de mâchoires .....	SKK 1200
Capacité maximale .....	1200 kN
Principe de serrage .....	coins
Action du serrage .....	hydraulique
Capacité maximale .....	env. 2500 kN
Dimensions des mâchoires	
Largeur .....	670 mm
Hauteur .....	630 mm
Poids par mâchoire .....	825 kg
Plage de serrage (selon les jeux de mors)	
Eprouvettes plages .....	0 -60 mm
Eprouvettes rondes .....	Ø 5 à 65 mm
Longueur maximale de serrage .....	100 mm
Largeur maximale de serrage .....	80 mm
Surface des pistons .....	50,2 cm <sup>2</sup>
Pression de serrage sélectionnable .....	20-50 bar

**Figure 3.11.** Caractéristique techniques de la Machine de traction.

### 3.5.2 Essai de résilience

L'essai de résilience, effectué sur un appareil appelé mouton pendule ou mouton de Charpy, mesure l'énergie consommée lors de la rupture forcée d'une éprouvette avec entaille. Ceci se fait typiquement en mesurant l'aperte d'énergie d'un pendule qui est lâché en chute libre et qui, sur son chemin, casse une éprouvette, cette perte d'énergie s'appelle « résilience » d'un matériau. Elle est définie par :

$$Kcv = \frac{W}{S_0}$$

La machine d'essai utilisée a une capacité de 300J (fig. 3.12). L'énergie de rupture en joule, de l'éprouvette testée est lue directement sur le cardan de la machine. Ils sont réalisés à température ambiante.

Il s'agit d'un essai de flexion par choc sur une éprouvette entaillée standardisée .Cet essai est également appelé essai Charpy ; l'éprouvette dans cet essai, est rompue en seul coup par le mouton- pendule : la différence des hauteurs entre position initiale du mouton pendulaire et sa position finale détermine le travail qui est égal à l'énergie nécessaire à la rupture de l'éprouvette ; cette énergie est ainsi appelée résilience du matériau.

La figure 3 .13 montre une représentation schématique de cet essai de Charpy : la hauteur initiale du mouton est indiquée par  $h_1$  et la hauteur finale par  $h_2$ . Les dimensions standardisées de l'éprouvette de résilience Charpy, sont indiquées sur la figure 3.14.



Figure 3.12. Machine de résilience utilisée (laboratoire TSS).

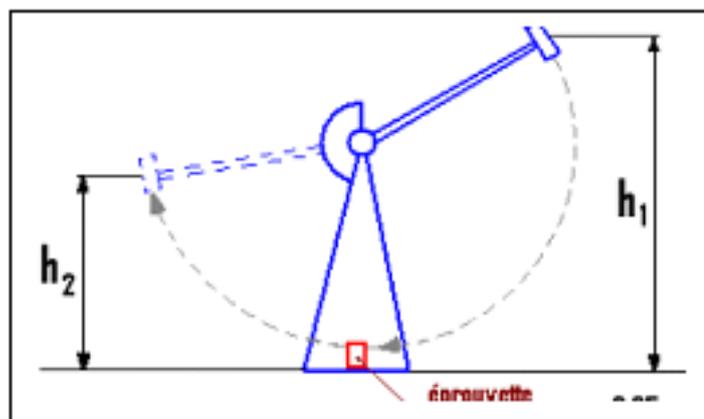


Figure 3.13. Représentation schéma de l'essai de résilience Charpy.

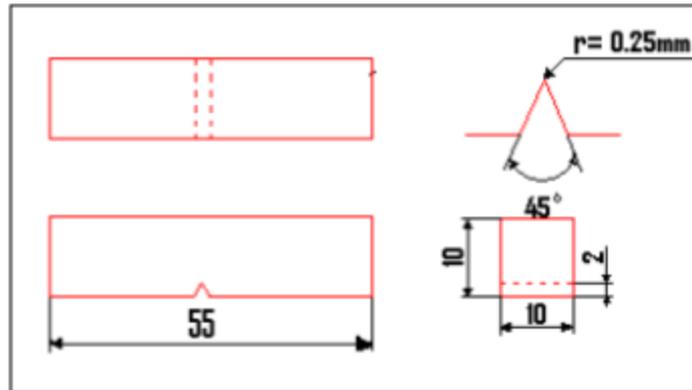


Figure 3.14. Dimensions standardisées de l'éprouvette de résilience Charpy-V dimension en (mm).

La résilience d'un matériau est mesurée suivant un essai de tenue au choc permettant d'en apprécier le caractère de fragilité. La figure 3.15 montre les éprouvettes de résilience avant et après choc[19].

- **Résilience en U** : Barreau unifié français (KCU). Epreuve normalisée dont l'amorce de rupture est en forme de U.
- **Résilience en V** : Barreau suivant la méthode Charpy (KCV). Epreuve normalisée dont l'amorce de rupture est en forme de V.

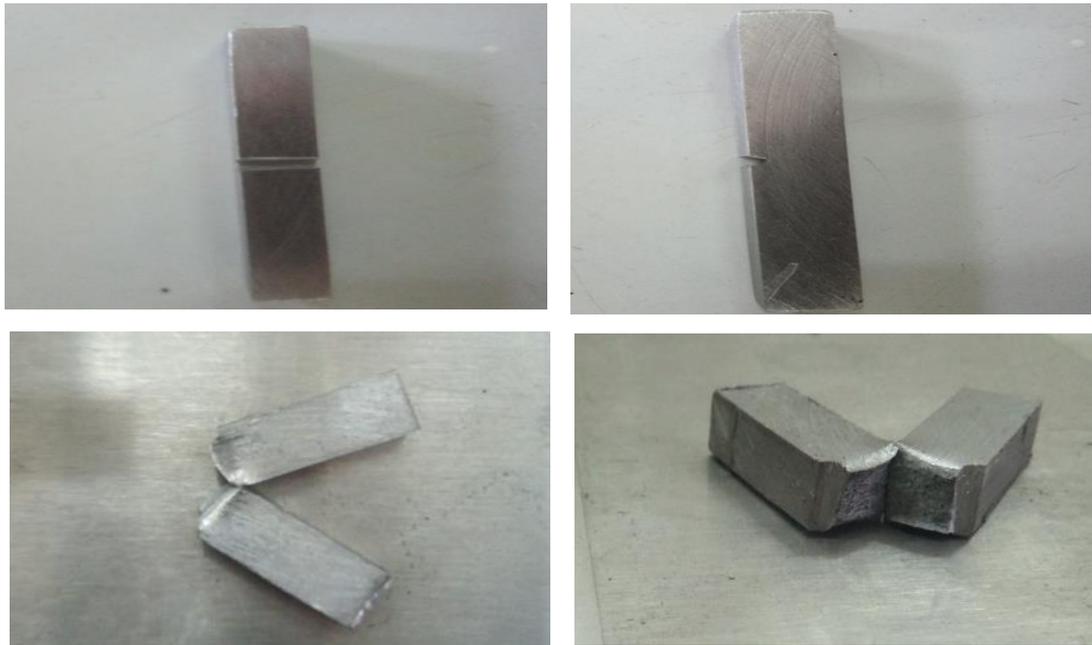
Les dimensions des échantillons utilisés (entaille V et U) et la conversion des énergies KCU et KCV de l'ancienne à la nouvelle unité sont présentées dans les tableaux 3.5 et 3.6.

Tableau 3.5. Conversion des énergies KCU et KCV [19] .

Caractéristique mesurées	Anciennes unités	Nouvelles unités	Conversion
KCU	Kgf/cm <sup>2</sup>	J/cm <sup>2</sup>	1J/cm <sup>2</sup> = 0,0102Kgf/cm <sup>2</sup>
KCV	Kgf/cm <sup>2</sup>	J/cm <sup>2</sup>	1J/cm <sup>2</sup> = 0,0102Kgf/cm <sup>2</sup>

Tableau 3.6. Dimensions des échantillons utilisés pour l'essai de résilience sont d'entaille V et U [19].

Entaille en V =2mm	Entaille en U =5mm
10x10 =0.80 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>	10x10 =0.50 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>
10x7.5=0.60 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>	10x7.5 =0.375 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>
10x6.7 =0.536 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>	10x6.7 =0.335cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>
10x5 =0.40 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>	10x5 =0.25 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>
10x3.3 =0.264 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>	10x3.3=0.163 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>
10x2.5 =0.20 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>	10x2.5 =0.125 cm <sup>2</sup> =S <sub>0</sub>



**Figure 3.15.** Éprouvette de résilience *KCV* avant et après choc.

### 3.5.3 Essai de dureté Vickers HV

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise. La dureté Vickers est caractérisée par l'empreinte faite par un indenteur sous une charge donnée durant 10 secondes. L'indenteur est formé d'une pyramide en diamant à base carrée dont les faces opposées font un angle de  $136^\circ$  (fig. 3.16). La charge appliquée est comprise entre 1 et 120 kgf. Le côté de l'empreinte est de l'ordre de 0,5 mm, la mesure s'effectuant à l'aide d'un microscope. La dureté Vickers HV est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$HV = \frac{1,854 F}{D^2}$$

### 3.5.4 Microdureté Vickers

Par Analogie à un essai Vickers, l'échelle microscopique de l'essai s'effectue sous une charge de quelques grammes à quelques centaines de grammes. L'appareil utilisé comporte une colonne de microscope optique en réflexion, qui permet de viser la zone souhaitée sur un échantillon poli (fig. 3.17).

Le pénétrateur Vickers est ensuite placé dans l'axe optique pour effectuer l'essai, puis le microscope permet de mesurer les diagonales de l'empreinte: de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques

dizaines de  $\mu\text{m}$ . On peut ainsi mesurer par exemple la dureté des différentes phases d'un matériau ou le profil de dureté obtenu sur une surface traitée ou usinée.

Le but de cette prise de mesures est de tracer un profil de microdureté, qui va de la surface à une profondeur de 3mm. Le pas choisi entre deux empreintes est de 200  $\mu\text{m}$  (fig. 3.1).

Les mesures de la micro dureté sont effectuées avec (Digital Micro Vickers Hardiness Tester) Model : HVS-1000Z à pénétration Vickers, avec une charge de 2.942 N (300 g).

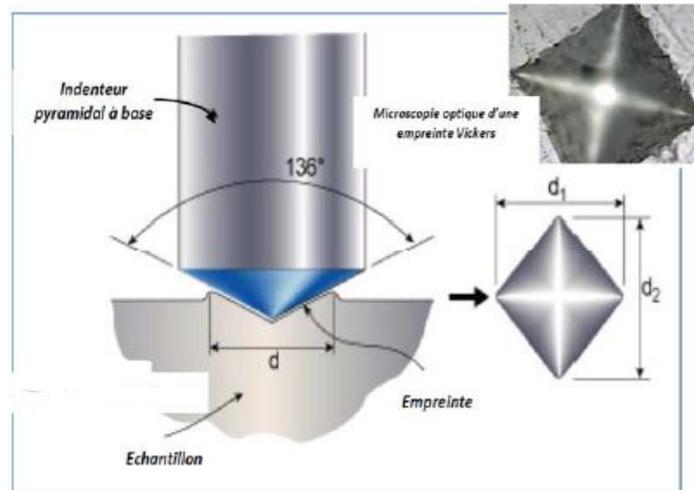


Figure 3.16. Indenteur et l'empreinte d'indentation.



Figure. 3.17. Micro-duromètre type Digital Micro Vickers Hardiness Tester. Model : HVS-1000Z.



# **CHAPITRE 4**

## **Résultats et discussions.**

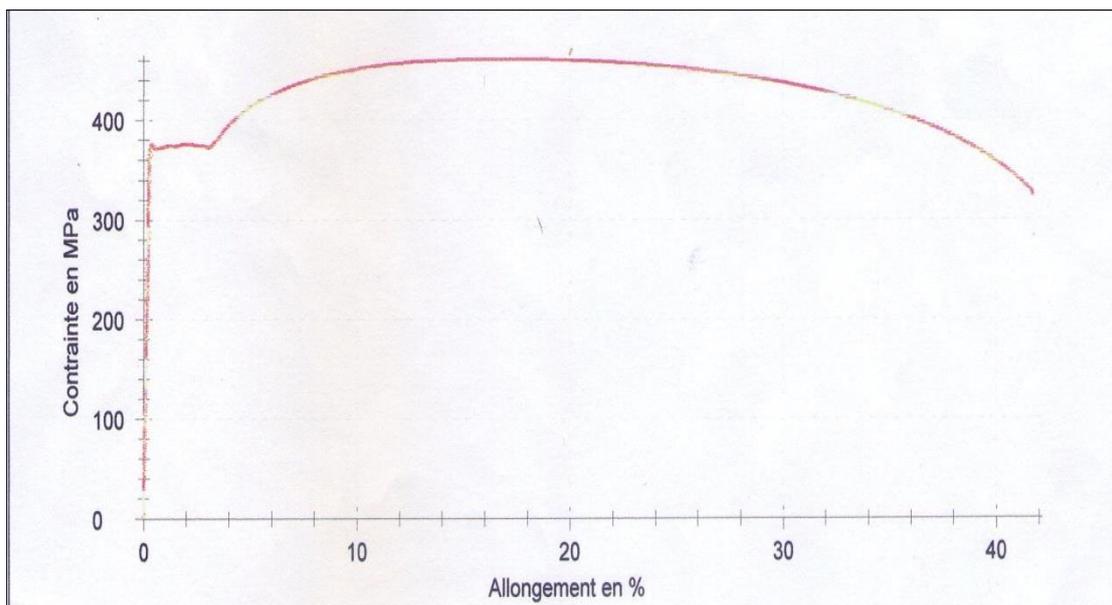
#### 4.1 Résultats des essais de traction

Ces tubes sont utilisés surtout pour le forage des puits de pétrole. Ils sont soumis à la fois à une pression interne et à une traction. Ces chargements engendrent des contraintes qui ne devraient en aucun cas dépasser la limite élastique. Pour écarter ce risque on doit utiliser un matériau à haute limite élastique. L'essai de traction est indispensable pour contrôler ses caractéristiques mécaniques.

Ces essais ont été effectués sur des éprouvettes prélevées sur les tubes, concernant les quatre états de la matière : état brut, état traité correctement, états après deux traitements interrompus (après 2<sup>ème</sup> passage) et état après deux traitements interrompus plus un traitement correct (après 3<sup>ème</sup> passage).

Les données relatives aux 4 courbes obtenues par le biais de la machine ont été exploitées à l'aide du logiciel *CurveUnscan* afin d'obtenir les courbes conventionnelles de traction présentées dans les figures 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4.

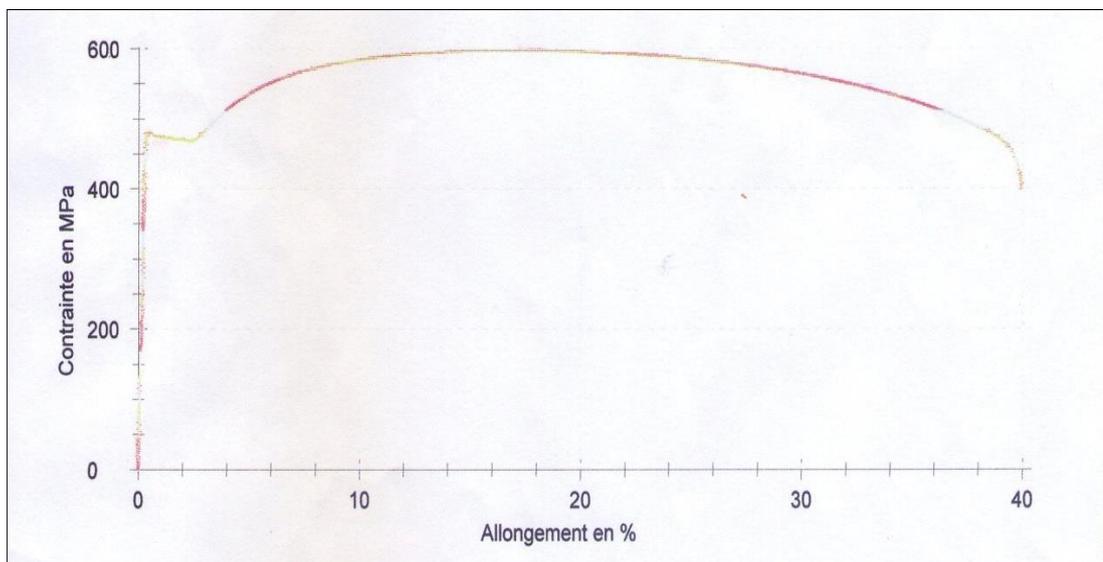
Pour le matériau brut de laminage, d'après la figure 4.1 et le tableau 4.1, les valeurs des essais, ( $R_{p0,5}$ ,  $R_m$  et  $A_t$ ) sont acceptables, elles sont comprises dans l'intervalle des valeurs admissibles (fig. 4.1) et (tab 4.1). On remarque que le traitement thermique, fait correctement améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques du matériau (fig. 4.2) et (tab. 4.2). Aussi, les interruptions du processus de traitement thermique semblent ne pas avoir une influence sur les caractéristiques mécaniques du matériau du tube, comme le montrent les résultats des essais de traction (fig. 4.3 et 4.4), (tab 4.3 et 4.4) par comparaison à ceux du matériau traité correctement. Cela s'explique par le fait qu'à chaque fois on reprend le traitement thermique du début à la fin (trempe et revenu) : chauffage jusqu'à la température d'austénitisation, trempe à l'eau puis revenu.



**Figure 4.1.** Courbe de traction de l'acier X52Q brut.

**Tableau 4.1.** Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q brut.

Légende	Nr	Date	Repère	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.5</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0.5</sub> /R <sub>m</sub> %	A <sub>t (corr.)</sub> %
	max				530	760	85	---
	min				360	460	---	26,00
	2	30/01/2018	AB	463,30	371,8	461,3	80,6	41,72



**Figure 4.2.** Courbe de traction de l'acier X52Q traité correctement.

**Tableau 4.2.** Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q traité correctement.

Légende	Nr	Date	N° Tube	Repère	Prèlèv	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.5</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0.5</sub> /R <sub>m</sub> %	A <sub>t (corr.)</sub> %
	max						530	760	85	---
	min						360	460	---	26,00
	1	17/01/2018	20	AB 12B	AV	373,23	475,2	597,4	79,53	39,99

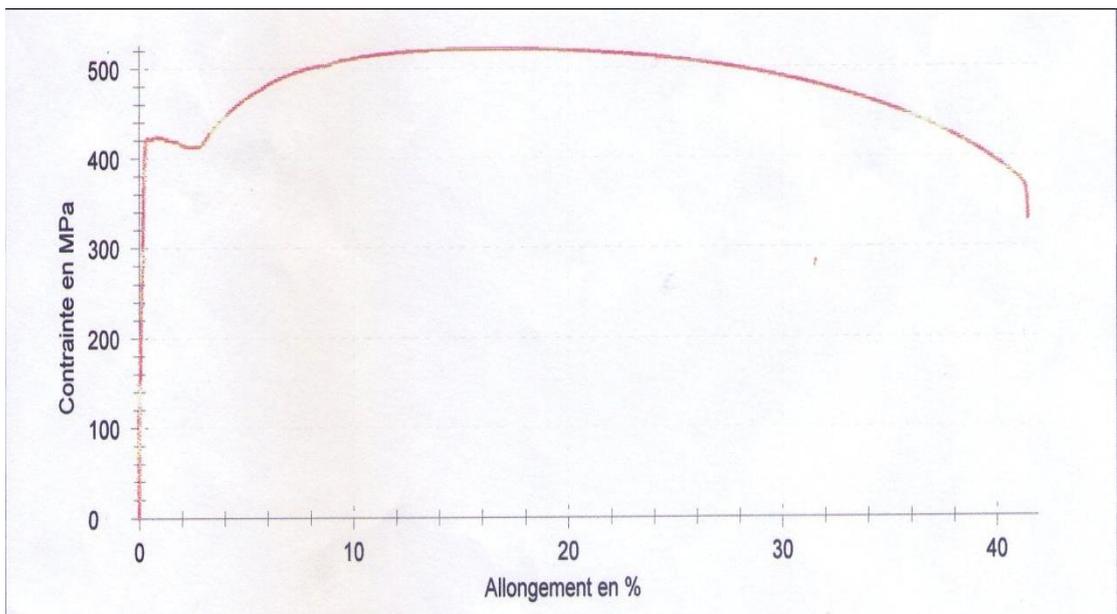


Figure 4.3. Courbe de traction de l'acier X52Q (2<sup>ème</sup> passage).

Tableau 4.3. Caractéristiques mécaniques de l'acier X52Q (2<sup>ème</sup> passage).

Légende	Nr	Date	N° Tube	Repère	Heure	Prèlèv	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.5</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0.5</sub> /R <sub>m</sub> %	A <sub>t (corr.)</sub> %
	max							530	760	85	---
	min							360	460	---	26,00
	1	16/04/2018	03	AB 13C	12:18:04	AV	421,80	422,6	521	81,12	41,52

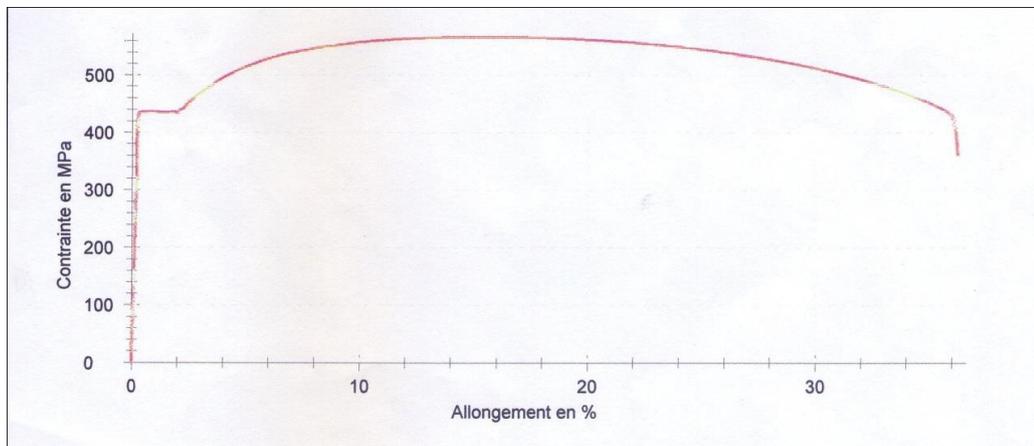


Figure 4.4. Courbe de traction de l'acier X52Q (3<sup>ème</sup> passage).

**Tableau 4.4.** Caractéristiques mécaniques de l’acier X52Q (3<sup>ème</sup> passage).

Légende	Nr	Date	N° Tube	Repère	Heure	Prélèv	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	R <sub>p0.5</sub> MPa	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>p0.5</sub> /R <sub>m</sub> %	A <sub>t</sub> (corr.) %
	max							530	760	85	---
	min							360	460	---	26,00
	1	16/04/2018	03	AB 13C	12:22:45	AV	419,65	436,7	566,7	77,06	36,24

**4.2 Résultat d’essai de résilience**

Les essais de résiliences sont nécessaires pour les tubes caising qui sont soumis à des conditions de travail assez sévères occasionnant des contraintes de traction, une pression interne plus ou moins élevée et souvent soumis à des chocs.

Les éprouvettes utilisées pour la résilience sont des éprouvettes normalisées (voir chapitre et tableau 4.5). Elles sont prélevées à partir de virole découpée des tubes au laboratoire central (T.T.S) du complexe sidérurgique d’HADJAR -ANNABA.

Quatre types d’éprouvettes sont considérés par cet essai :

- Eprouvettes prélevées à partir d’un tube non traité.
- Eprouvettes prélevées à partir d’un tube traité correctement.
- Eprouvettes prélevées à partir d’un tube dont le traitement de revenu a été interrompu 2 fois de suite (2<sup>ème</sup> passage).
- Eprouvettes prélevées d’un tube traité correctement après deux traitements interrompus au cours du revenu (3<sup>ème</sup> passage).

Ces essais ont été exécutés au niveau du laboratoire central (T.T.S) du complexe sidérurgique d’HADJAR -ANNABA.

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 4.5. Les valeurs obtenues sont supérieurs à la valeur minimale requise qui de 27 j / cm<sup>2</sup>, donc acceptables.

**Tableau 4.5.** Désignation et dimensions des éprouvettes de résilience.

Numéro	Désignation	Valeur	Unité
1	Longueur	55	Mm
2	Largeur	10	Mm
3	Epaisseur	7,5	Mm
4	profondeur d’entaille	2	Mm
5	Angle d’entaille	≈45	°
6	Type d’éprouvette	Charpy- V	-
7	section	0,60	Cm <sup>2</sup>

**Tableau 4.6.** Résultats des essais de résilience pour les quatre états du matériau.

Type d'éprouvette	W(J)	KCV (joule/cm2)	KCV moyenne
tube non traité	1	12	196,20
	2	12	
	3	12	
tube traité correctement.	1	9,2	150,41
	2	9,0	
	3	9,4	
tube (2 <sup>ème</sup> passage).	1	9,4	159,95
	2	9,6	
	3	9,8	
tube (3 <sup>ème</sup> passage).	1	7,8	127,53
	2	7,8	
	3	7,8	

### 4.3 Evolution de l'épaisseur du tube

D'abord, d'après le tableau 4.7, on remarque que l'épaisseur de la paroi du tube est irrégulière. Cette irrégularité est due en premier lieu à un mauvais centrage du poinçon de perçage des lingots sur presse horizontale. Après laminage, ce défaut se manifeste par une irrégularité de l'épaisseur. Les prises de mesures sont effectuées selon le mode de la figure 4.5, justement pour détecter ce défaut.

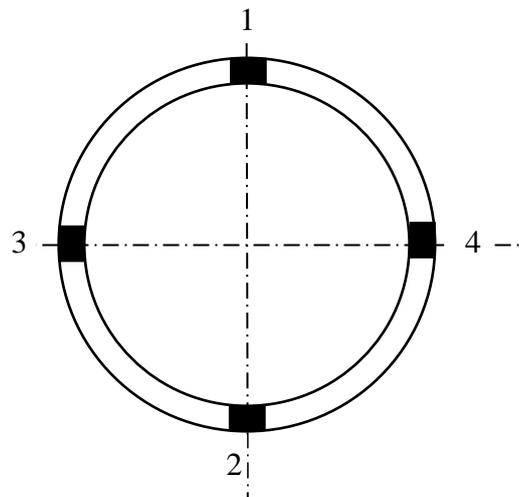


Figure 4.5. Mode de prise des mesures d'épaisseur.

Toujours d'après le tableau 4.7, l'épaisseur du tube diminue sensiblement, surtout après le 3<sup>ème</sup> passage. Au point de mesure 4, elle passe de 12,0 mm à 9,4 mm, proche de la valeur minimale acceptable qui est de 8,5 mm.

Cette diminution de l'épaisseur est due à une oxydation excessive du matériau après des traitements thermiques par trempe et revenu répétés. Même si ces valeurs restent dans l'intervalle des valeurs acceptables, il y a un risque pour qu'ils ne le soient pas, à cause du perçage excentrique.

**Tableau 4.7.** Résultats des prises de mesure d'épaisseur.

	Tube non traité (mm)	Tube traité correctement (mm)	Tube après 2 <sup>ème</sup> passage (mm)	Tube après 3 <sup>ème</sup> passage (mm)
1	11,4	11,0	10,5	10,3
2	11,4	10,5	10,3	10
3	11,4	10,7	10,4	10,0
4	12,0	11,0	10,1	9,4

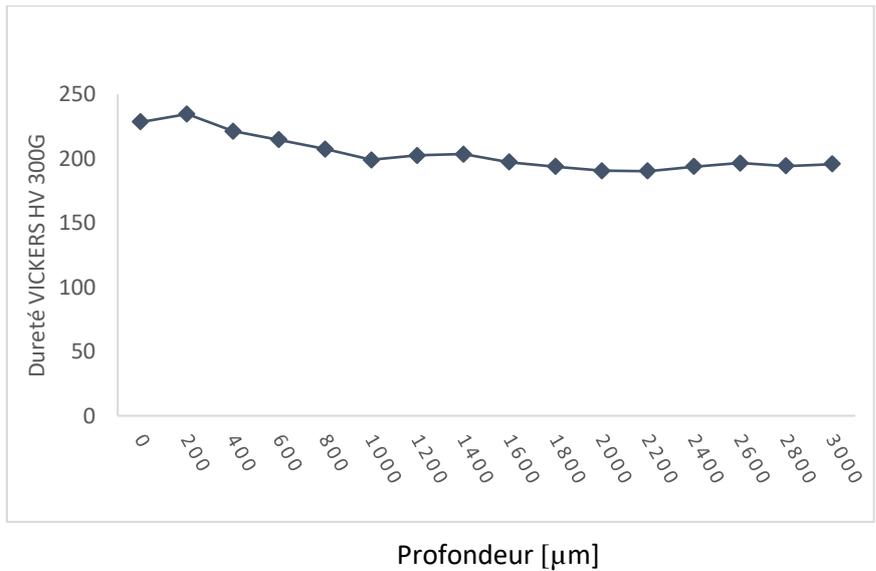
#### 4.4 Profils de dureté

Les profils de dureté ont une importance primordiale, ils s'imposent à nous lorsqu'il s'agit d'étudier l'oxydation de la surface du matériau et la pénétration de la trempe. A première vue, on constate que l'allure des profils est la même pour tous les états du matériau (fig. 4.9). Il y a une légère diminution de la dureté en surface, cela est dû à la décarburation du matériau dans l'atmosphère oxydante du four.

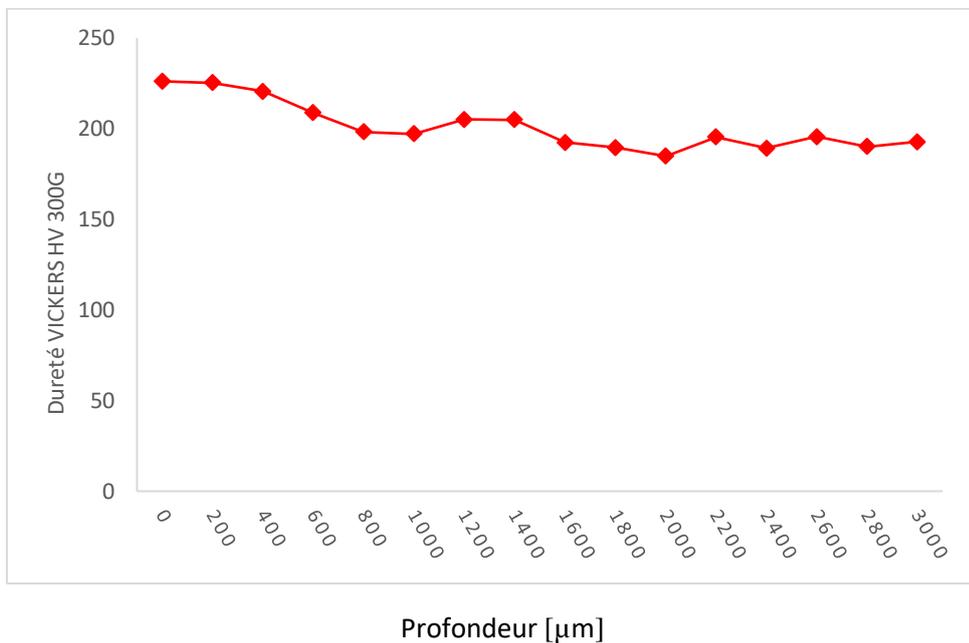
On remarque aussi, pour tous les profils, une diminution de la dureté jusqu'à une profondeur de 1,8 mm, puis constante jusqu'à une profondeur de 3 mm (fig. 4.6, 4.7, 4.8).

D'après la figure 4.9, les interruptions répétées des traitements thermiques n'ont presque aucune influence sur l'allure du profil de dureté. En effet, les valeurs des duretés sont comprises entre 225 et 228 HV en surface et entre 192,8 et 196,5 à une profondeur de 3mm (tab. 4.7). Cela est dû à une diminution de la pénétration de la trempe, c'est l'effet JOMINY.

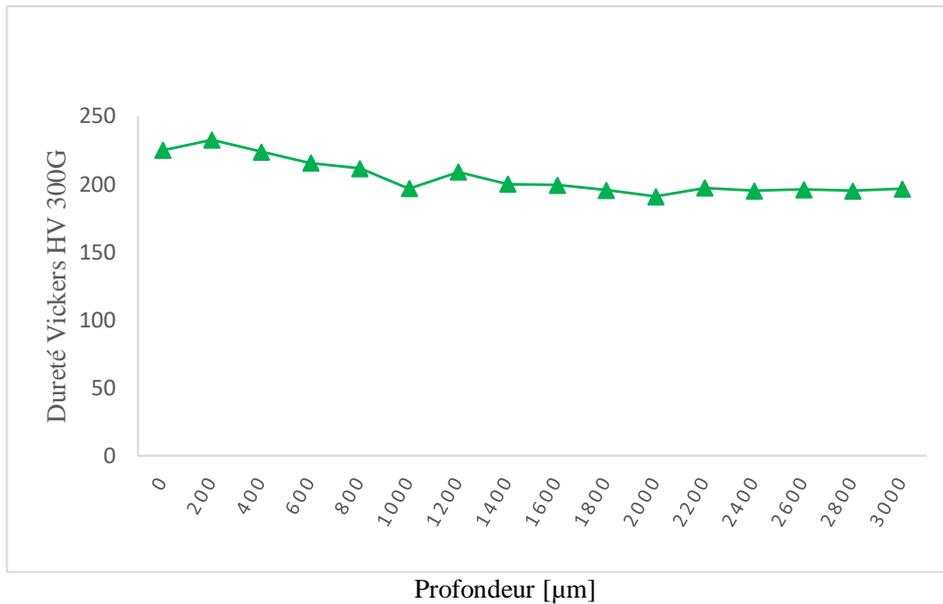
Les légères fluctuations constatées sur profils s'expliquent par une différence de dureté des phases constituant le matériau.



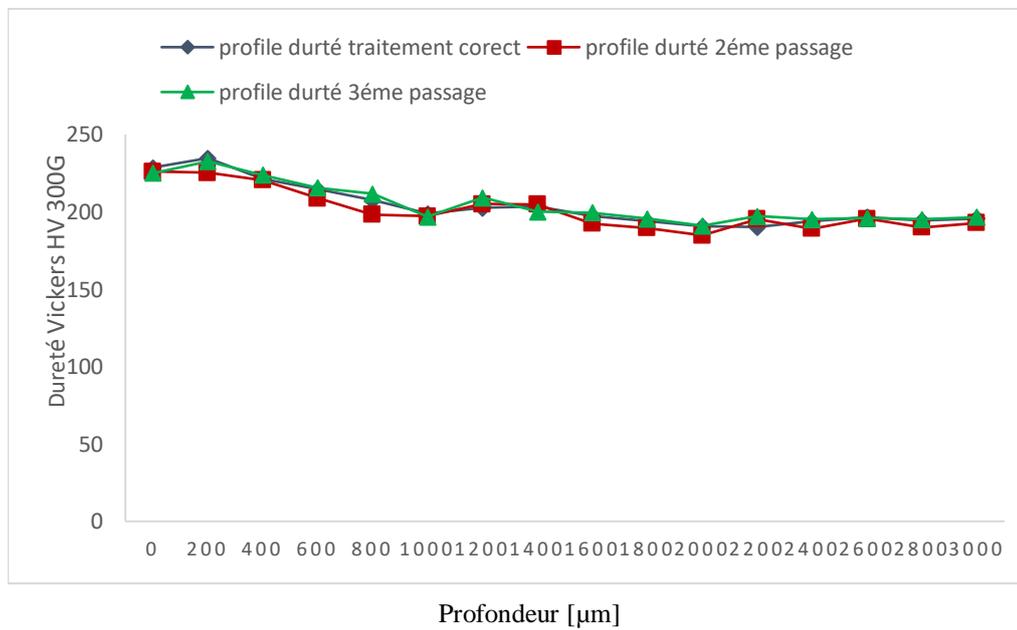
**Figure 4.6.** Profil de dureté. Traitement correct bon.



**Figure 4.7.** Profil de dureté après deux traitements thermiques interrompus.



**Figure 4.8.** Profil de dureté après deux traitements thermiques interrompus suivis d'un traitement correct.



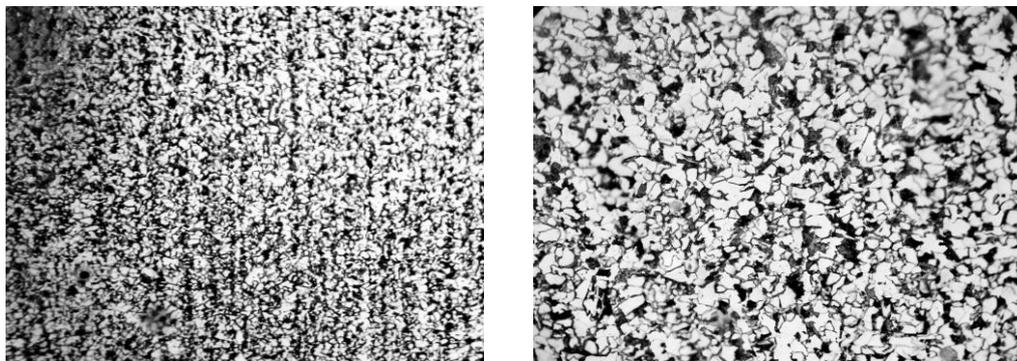
**Figure 4.9.** Comparaison entre les trois profils de dureté.

**Tableau 4.7.** Résultats de micro dureté Vickers de la surface à une profondeur de 3mm.

Profondeur en mm	Traitement correct	2 <sup>ème</sup> passage	3 <sup>ème</sup> passage
0	228,6	226,1	225
0,2	234,7	225,3	232,6
0,4	221,4	220,5	223,8
0,6	214,6	208,7	215,6
0,8	207,4	198,2	211,6
1	198,9	197,2	196,8
1,2	202,6	205	209,1
1,4	203,6	204,8	200,1
1,6	197,4	192,4	199,4
1,8	193,8	189,6	195,6
2	190,6	184,8	191
2,2	190,2	195,3	197,2
2,4	193,8	189,2	195,2
2,6	196,6	195,5	196
2,8	194,2	190	195,1
3	195,8	192,8	196,5

#### 4.5 Observations microscopiques

L'observation microscopique des microstructures révélées après attaque au nital à 3%, sont grossies 200 fois et 600 fois. La microstructure du matériau du tube non traité est ferrito-perlitique, caractéristique d'un acier HLE de nuance X52Q (fig. 4.10b). La figure (fig. 4.10a) montre une structure fibreuse grossie 200 fois, caractéristique d'un matériau corroyé ou laminé.



**Figures 4.10.** Microstructure du matériau du tube laminé non traité. Structure ferrito-perlitique, (a) X200, (b) X600.

Les tubes laminés subissent d'abord un traitement thermique par trempe, dont le régime est présenté dans le chapitre 3. D'après l'acier de nuance X52Q dont la composition chimique

est présenté dans le tableau 3.1. La teneur en carbone est assez faible (0,15% de carbone), avec cette teneur l'acier n'est pas trempable ou très peu. La courbe TRC est déplacée vers la gauche.

Les éléments d'alliages qui le constituent jouent un rôle important dans la formation de la martensite, et ce, à trois niveaux. Ils influent en effet sur la vitesse critique de trempe nécessaire pour former cette phase, sur la température de début de la transformation martensitique  $M_s$ , mais également sur la morphologie de la martensite obtenue. Les éléments d'additions altèrent la cinétique des transformations de phases en modifiant la stabilité de l'austénite pour des températures inférieures à son domaine d'existence. De manière générale, ces derniers stabilisent l'austénite instable et les courbes TRC sont ainsi décalées vers la droite : les vitesses de transformations sont diminuées. Dans certains cas, les éléments d'alliage peuvent également modifier la forme des courbes de transformation. Cela a une conséquence pratique sur la vitesse critique de trempe qui sera moins élevée, les transformations bainitique et ferrito-perlitique se produisant pour des vitesses plus faibles que dans le cas d'un acier non allié. La trempabilité des aciers s'en trouve donc améliorée [20].

Ceci dit, pour une teneur en carbone de 0,15 %, même si la courbe TRC qui est déplacée vers la droite, ne peut pas donner une structure martensitique ; elle est plutôt composée d'un mélange de bainite de ferrite, si on se réfère à la courbe TRC d'un acier de même teneur en carbone. La dureté de la bainite avoisine les 350 HV.

La transformation bainitique est une transition entre perlite et martensite. Le refroidissement doit être rapide pour éviter la perlite mais pas trop pour rester à la limite de la zone bainitique du diagramme. Le mécanisme de germination de la bainite se fait par le fer  $\alpha$  : un cisaillement du réseau de l'austénite accompagné d'une diffusion à courte distance permet une redistribution du carbone. Les cristaux de ferrite se développent dans les directions des plans octaédriques du réseau CFC. Les structures bainitiques présentent une bonne résistance mécanique et une bonne ductilité. C'est le but recherché pour les tubes caising destinés au forage [21].

Ce constituant se présente sous la forme d'un agrégat de plaquettes (ou lattes) de ferrite et de particules de cémentite (fig. 4.11). Il se forme lorsque le refroidissement de l'acier est trop rapide pour obtenir la formation de perlite mais trop lent pour obtenir la formation de martensite. C'est un constituant qui présente les mêmes phases que la perlite (la ferrite et la cémentite), mais possède une structure particulièrement fine, souvent en aiguilles, ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques [21].

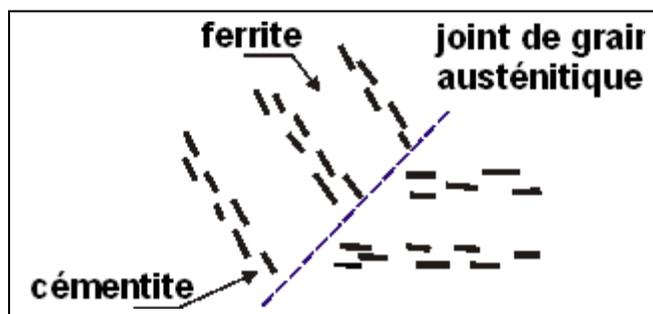


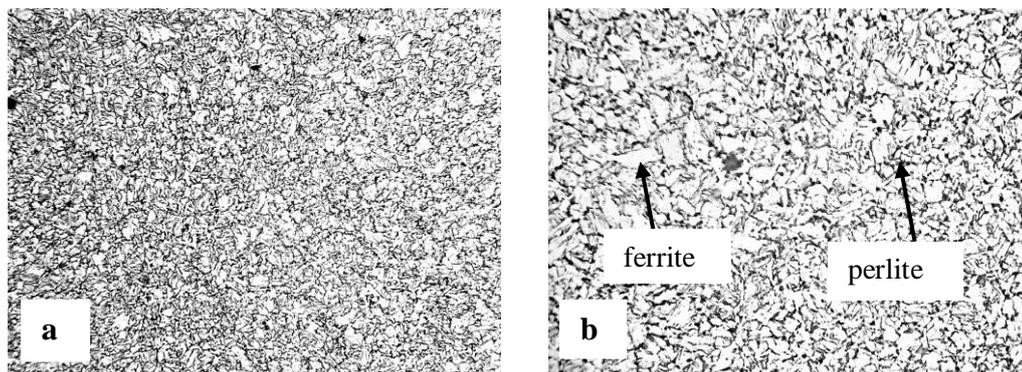
Figure 4.11. Bainite formée d'un agrégat de ferrite et de particules de cémentite.

Les tubes subissent ensuite un traitement de revenu à 740 °C pour un maintien de 15 minutes avec un refroidissement à l'air. A cette température, ce traitement s'apparente à un traitement de recuit, car à 740 °C on est au-dessus de la ligne AC<sub>1</sub> (723 °C). Ce traitement produit certains effets qui conditionnent l'acier après traitement.

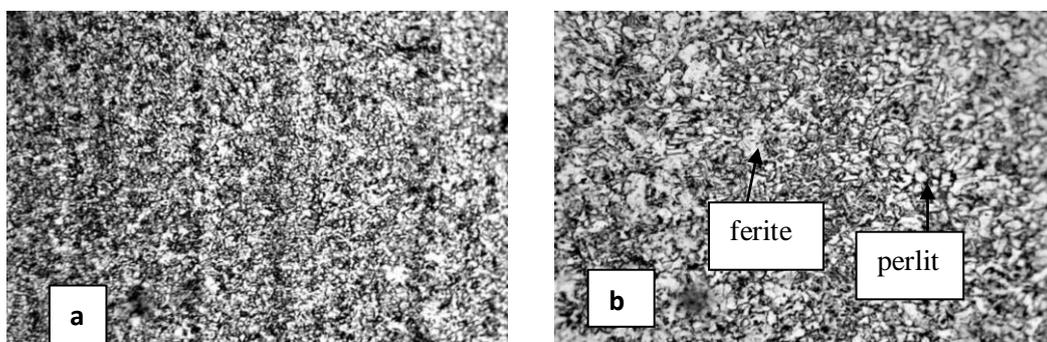
- Le traitement thermomécanique par laminage, favorise la formation d'une structure fine homogène avec de meilleures caractéristiques.
- Il confère aux matériaux un équilibre physico-chimique, mécanique et structural de par un refroidissement plus lent.
- Il confère également aux matériaux de meilleures caractéristiques mécaniques (R<sub>e</sub>, R<sub>m</sub>, A %), ceci est conforté par les valeurs des essais mécaniques.

La structure obtenue est formée de perlite et de ferrite fine avec une probable précipitation de carbures surtout du (Fe,Cr)<sub>3</sub> (fig. 4. 12, 4.13 et 4.14). Ces carbures ne peuvent pas être vues au microscope optique, une analyse au MEB et alors indispensables, chose qu'on pas pu faire. A 740°C, on est dans le domaine (γ +α). La dureté moyenne après revenu est de 220 HV.

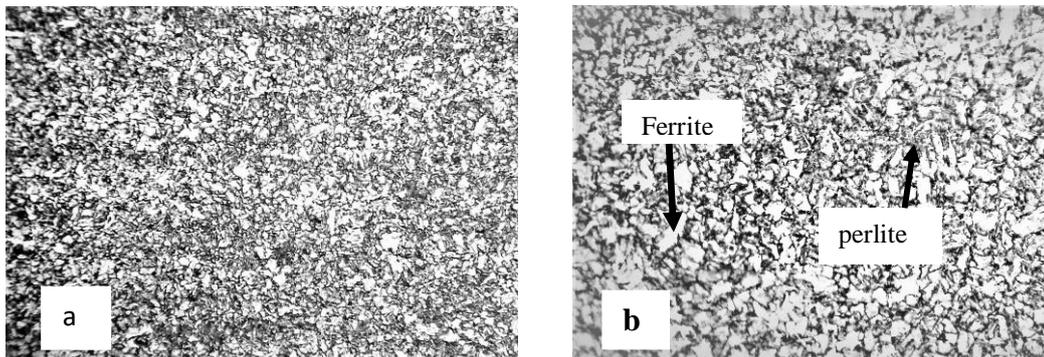
L'interruption répétée du traitement thermique ne semble altérer la microstructure finale du matériau, cela est conforté par les résultats des essais mécaniques.



**Figures 4.12.** Microstructure du matériau tube traité correctement. Structure ferrite –perlitique, (a)X200, (b)X600.



**Figures 4.13.** Microstructure du matériau du tube ; traitement interrompu deux fois de suite. Structure ferrite-perlitique, (a) X200, (b) X600.



**Figures 4.14.** Microstructure du matériau du tube traité correctement après deux traitements interrompus au cours du revenu. Structure ferrito-perlitique, (a) X200, (b) X 600.



***CONCLUSION  
GÉNÉRALE***

## Conclusion

Ce travail nous a été proposé par l'unité TSS de SIDER – ANNABA, dont le but est d'étudier l'influence des interruptions répétées des traitements thermiques (trempe et revenu) sur les caractéristiques mécaniques du matériau des tubes laminés à chaud.

De par l'analyse des résultats des essais mécaniques réalisés selon un planning qui englobe tous les états du matériau, et les observations microstructurales nous constatons :

- Le traitement thermique améliore les caractéristiques mécaniques du matériau ( $R_e$ ,  $R_m$ ,  $A\%$  et la dureté) on lui conférant une structure ferrito-perlitique fine et homogène.
- Les interruptions répétées de traitements thermiques n'influent pas sur un traitement thermique ultérieur s'il est fait correctement.
- Les caractéristiques mécaniques obtenues sont dans l'intervalle des valeurs acceptables.
- Les interruptions répétées des traitements n'influent pas sur la microstructure finale après trempe et revenu.

Néanmoins, il est à noter qu'un temps de chauffage excessive augmente les pertes au feu par oxydation de la matière, et c'est ce que l'on a constaté, l'épaisseur du tube a diminuée de 21 %. Par conséquent, il y a un risque à ce que l'épaisseur du tube soit inférieure à l'épaisseur minimale admissible qui est de 8,5 mm. Surtout s'il y a en plus une irrégularité d'épaisseur due à un problème de laminage.

### Références bibliographiques

[1] Prospectus TSS Année 2010

[2] Revue de direction Année 2011

[3] Sofersid (Descriptif-technique 1974)

[4] B. ZOUIDJA, Caractérisation mécanique et microstructurale d'un cordon soudeure pour un acier X60 destiné à l'installation des hydrocarbures, Université Amar Thelidji-Laghouat ,2012.

[5] François Rivalin. Développement d'acier pour gazoduc a haute limite d'élasticité et ténacité élevée : mécanique et mécanisme de la rupture ductile a grande vitesse. Thèse de doctorat Ecole nationale supérieure des mines de paris, 1988.

[6] M. GRUMBACH "Aciers d'usage général", techniques de l'ingénieur

[7] Cours Traitements thermiques, Classification et Désignation des aciers et fontes, Pr. Bensaada Said Professeur Chef d'équipe de recherche, Laboratoire LARRHYS, Faculté des sciences et de la technologie, Univ. de Biskra.

[8] M. Massin, Métallurgie Pratique pour Mécaniciens, tome 1, Pyc édition 1982.

[9] Guy Murry, Traitements thermiques dans la masse des aciers. Partie 1, Techniques de l'ingénieur, traité Matériaux métalliques M 1 126, Centre français d'exploitation 2002.

[10] R.F. MEHL et C.WELLS, Constitution of High Purity Iron-Carbon Alloys, Technical Publication n° 798, A.I.M.E. Iron and Steel Division, 125 (1937); Metals Technology, join 1937.

[11] P. KOISTINEN et R.E. MARBURGER, Acta Met, (1959)

[12] A.CHALA, thèse de magistère, Constantine (1994)

[13] C.Bouchy et F.Gobin « Métallurgie »,1-Métallurgie structurale, Armond Collin(1971)

[14] M.Aouragh thèse de magister à université d'Annaba (2007).

[15] Guy Murry, Aide-mémoire Métallurgie, Métaux • Alliages • Propriétés, DUNOD, Paris 2<sup>e</sup> édition, 2010

[16] J.BENARD, A.MICHEL, J.PHILIBERT et J.TALBOT, « Métallurgie générale » p231-239, (1984).

[17] I.Lakhtine (métallurgie et traitements thermiques des métaux) Edition Mir, Moscou 1982.

[18] Michel Dupeux, Aide-mémoire science des matériaux, DUNOD, Paris 2004.

[19] Mémoire de fin d'étude du diplôme de MASTER Thème : Analyse de l'étirage à chaud des tubes soudés FETHALLAH Rogaia et RABAH Amna ; Université de Tébessa.

## *Références bibliographiques*

[20] Muriel HANTCHERLI, Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés, Thèse de Doctorat, Saint Etienne 15 Avril 2010.

[21] Gilles Regheere, Les aciers micro-alliés à traitement thermique intercritique, Publié le 4 décembre 2017.

