

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

Université MOULOUD MAMMERY de Tizi-Ouzou Faculté du
Génie de la Construction Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES



**En vue de l'obtention du diplôme
de Master en Génie
Mécanique**



Option : Fabrication Mécanique et Productique.

Thème :

Étude et caractérisation de l'acier X60M utilisé pour la
fabrication des tubes d'adduction du gaz

Présenté par :

DJOUADI Mohand

HENDA Mohamed

Encadré par :

Mr. HACHOUR Kamel

Proposé par :

Mr. OUHAB Slimane

2020 /2021

Remerciement

Avant toute chose, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance, qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.

Nos remerciements nos parents qui n'ont pas cessé de nous encourager et nous soutenir tout au long du long parcours que furent nos études.

*On remercie profondément notre promoteur Monsieur **KHACHOUR** d'avoir accepté de diriger notre travail, par son soutien et ces conseils judicieuses qui nous ont données le courage et l'espoir d'être excellé dans le domaine.*

*Nous sommes également reconnaissant aux **personnelles du laboratoire des essayes mécanique de l'entreprise ALTUMET**, ainsi tous les enseignant de notre faculté dont **Mr Larbi, Mr NACHICH, Mr FILALI, Mdm BAGHNANE** qui nous ont accueillie à bras ouvert pour nous aider et accompagner toute au lent de notre recherche.*

On tient à remercier les membres de jury qui nous font l'honneur d'examiner et de critiquer ce modeste travail.

Enfin, nos remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta

bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection

A ma très chère sœur. Merci d'être toujours à mes côtés.

A ma fiancée. Merci d'être là à mes côtés.

A tous mes amis

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite.

Mohamed

Dédicace

Je dédier ce modeste travail

*A la mémoire de ma mère disparue trop tôt, et que dieux
l'accueille dans son vaste paradis*

A mon cher père que j'aime beaucoup qui m'a toujours soutenu

A mes chers frères et sœur

A mon chers oncle Karim qui a été toujours à mes cotes

A Ma chère famille

A Tous mes amis

Mohand

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
1 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	2
2. HISTOIRE DE L'ENTREPRISE	4
GENERALITES SUR LES MATERIAUX	5
CHAPITRE I Généralité sur les matériaux	
I.1 Introduction	5
I.2 Définitions d'un matériau	5
I.3 Les grandes classes de matériaux	8
I.3.1 Les métaux :	8
I.3.2 Alliages à base de fer.....	8
I.3.3 Alliages non ferreux.....	9
I.3.4 Polymères : matières plastiques.....	9
I.3.5 Céramiques.....	10
I.3.5.1 Les verres :	11
I.3.5.2 Quelques applications des céramiques	12
I. 4. Matériaux composites.....	13
I.5 Les matériaux utilisés dans l'adduction du gaz :	14
I.5.1 Canalisations en acier	14
I.5.1.1. L'obtention des aciers :	16
I.5.2 Canalisations en polyéthylène [5]	16
I.5.3 Les kits « PLT » :	16
I.5.4 Les tuyauteries en plomb :	16

Table des matières

Chapitre II : Essai de caractérisation mécanique

II.2. Essai de traction :	18
II.2.1. Principe de l'essai :	18
II.2.2. Eprouvette :	18
II.2.3. Exécution de l'essai :	20
II.2.4. Exploitation des résultats de l'essai :	20
II.2.4.1. Diagramme contrainte-déformation en traction d'une éprouvette :	20
II.3.1. Essai de compression :	23
II.3.2. Eprouvette :	24
II.4. Essai de flexion :	26
II.5. Essai de cisaillement :	26
II.6. Essai de résilience :	26
II.6.1. Principe de l'essai de résilience :	27
II.6.2 Effet de la température sur l'essai :	28
II.6.3 Relations empiriques ténacité-résilience :	29
II.7. Essais de dureté :	32
II.7.1 Epreuves :	32
II.7.2 Exécution de l'essai :	32
II.7.3. Essai Brinell :	33
II.7.4 Essai Vickers :	34
II.7.5 Essai Rockwell :	34
Conclusion :	36

Table des matières

Chapitre III : Processus de fabrication de tuyaux

III .1 Présentation de la norme API 5L :	37
III.2 Caractérisation de l'acier X60 :	37
III.2.1 Définition de l'acier :	37
III.2.2 Les aciers hauts limite élastique :	38
III.2.3 Influence de la composition chimique :	38
III.2.4 Influence des éléments de substitution :	38
III.2.5 Influence des éléments formants des précipités :	39
III.2.6 Influence de la perlite :	39
III.2.7 Avantage des aciers HLE :	40
III.3 La composition chimique de l'acier X60 :	40
III.4 Le fil de soudure :	42
III.4.1 Défauts nocifs du fil :	42
III.5 Processus de fabrication du tube :	43
III .5.1 Les étapes de production :	46
III.5.2 Les contrôles effectués sur le tube :	50
III.6 Essais mécaniques :.....	59
III.6.1 Essai de traction :	61
III.6.2 Essai de dureté VICKERS :	62
III.6.3 Essai de pliage :	63
III.6.4 Essai de résilience :	63
III.7 Examens macrographique	66
III.8 Analyse chimique	67

Table des matières

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. L'analyse chimique :	69
IV.2. Essais de traction :	70
IV.3. Essai de pliage :	76
IV.4Essais de résilience :	77
IV.5. Essai de dureté :	81
IV.6. Examen macrographique :	84
Conclusion :	85
Conclusion générale :	86

Liste des tableaux :

Tableau 01 : Quelques propriétés usuelles des grandes familles de matériaux.....	7
Tableau 02 : Influence et Rôle de l'élément chimique ajouté dans l'acier	15
Tableau 03 : Récapitulatif des canalisations autorisées pour le gaz.....	17
Tableau 04 : Formules empiriques de corrélation résilience-ténacité	31
Tableau 05 : composition chimique de l'acier X60 selon l'API 5L	41
Tableau 06 : Caractéristique mécanique de l'acier X60 selon l'API 5L	41
Tableau 07 : composition chimique du fil de soudage	42
Tableau 08 : caractéristique mécanique du fil/flux	43
Tableau 09 : paramètre de contrôle visuel	50
Tableau 10 : caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes de traction	60
Tableau 11 : Composition chimique du métal de base.	69
Tableau12 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvette 01 du métal de base	70
Tableau13 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvette 02 du métal de base	71
Tableau 14 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvette 03 du métal de base	72
Tableau 15 : Résultats d'essai de traction pour le cordon de soudure	73
Tableau 16 : Résultats d'essai de traction pour le cordon de soudure	74
Tableau 17 : Résultats d'essai de traction pour le cordon de soudure	75
Tableau18 : Résultats d'essai de pliage	76
Tableau19 : Essais de résilience à $t = -15\text{ C}^\circ$	78
Tableau 20 : Essais de résilience à $t = 0\text{ C}^\circ$	78
Tableau21 : Essais de résilience à $t = +20\text{ C}^\circ$	79
Tableau22 : Résultats de dureté de l'essai 1	81
Tableau 23 : Résultats de dureté de l'essai 2	82
Tableau 24 : Résultats de dureté de l'essai 3	82
Tableau 25 : Résultats de dureté de l'essai 4	83
Tableau 26 : dureté en fonction des zones étudié	83

Listes des figures :

Figure 1 : Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini	5
Figure 2 : classification des matériaux.....	6
Figure 3 : Les différentes possibilités d'obtention des matériaux composites.....	7
Figure 4. : Exemple de matériau composite.....	13
Figure 5 : Pipelines.....	14
Figure 6 : Dimension de l'éprouvette pour l'essai de traction	19
Figure7 : Machine de traction	20
Figure 8 : Représentation d'une courbe de traction (matériaux ductile)	20
Figure 9 : Courbe contrainte-déformation. Deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes.....	22
Figure 10 : Courbe contrainte-déformation. Ténacité = surface sous la courbe.....	23
Figure 11 : Teste de compression.....	23
Figure 12 : Diagramme contrainte-écrasement	24
Figure 13 : Caractéristique dimensionnelle des éprouvettes de compression.....	24
Figure 14 : Teste de flexion 3 point.....	25
Figure 15 : Teste de flexion 4 point.....	25
Figure 16 : Essai de cisaillement	26
Figure 17 : Caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes de résilience	27
Figure 18 : Machine et principe de l'essai Charpy.....	27
Figure 19 : Exemple de courbe de résilience	39
Figure 20 : Principe de l'essai Brinell et empreinte typique de l'essai	33
Figure 21 : Principe de l'essai Vickers.....	34
Figure 22 : Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell	34
Figure 23 : Soudage par la machine automatique	44
Figure 24 : les bobines en acier	46
Figure 25 : soudage.....	46
Figure 26 : coupage à plasma.....	47
Figure 27 : chanfreineuse.....	47
Figure 28 : procédée de revêtement.....	48
Figure 29 : le revêtement extérieur.....	48
Figure 30 : revêtement intérieur.....	49
Figure 31 : control visuel	50
Figure 32 : teste hydrostatique	51
Figure 33 : graphe montrant un tube défailant	51
Figure34 : graphe montrant un tube défailant	52
Figure 35 : graphe montrant un tube conforme	52
Figure 36 : Graphe des ondes en fonction du temps.....	53
Figure 37 : control ultrason.....	53
Figure 38 : Control radiographie.....	54
Figure 39 : Montages de base pour la radiographie sur fil	54
Figure 40 : Control radioscopie.....	55
Figure 41 : prélèvement des éprouvettes pour les examens métallurgiques	58
Figure 42 : Machine d'essai de traction	59
Figure 43 : Eprouvette d'essai de traction selon la norme AFNOR.....	59
Figure 44 : Réalisation de l'essai de dureté ; Machine de dureté Vickers.....	60
Figure 45 : Vue de dessus de l'empreinte	61
Figure 46 : Mouton pendule de type P W 30/ 15 TESTWELL.....	61
Figure 47 : machine pour refroidissement d'éprouvette.....	62

Figure 48 : Eprouvette Charpy V	63
Figure 49 : Eprouvette avant destruction	63
Figure 50 : Eprouvette apr�t destruction.....	63
Figure 51 : Eprouvette montrant le cordant de soudure apr�t traitement chimique	67
Figure 52 : Spectromètre à emission optique utilisé pour l'analyse chimique.....	67
Figure 53 : Graphe de traction pour éprouvette 01 du métal de base	71
Figure 54 : Graphe de traction pour éprouvette 02 du métal de base	71
Figure 55 : Graphe de traction pour éprouvette 03 du métal de base	72
Figure 56 : �prouvette du métal de base avant la striction.	73
Figure 57 : �prouvette du métal de base après striction	73
Figure 58 : Graphe de traction pour le cordon de soudure éprouvette 01.....	74
Figure 59 : Graphe de traction pour le cordon de soudure éprouvette 02.....	74
Figure 60 : Graphe de traction pour le cordon de soudure éprouvette 03.....	75
Figure 61 : �prouvette avec cordon de soudure avant rupture	75
Figure 62 : �prouvette avec cordon de soudure après rupture	75
Figure 63 : Graphe de pliage	76
Figure 64 : �prouvettes de pliage	77
Figure 65 : Graphe du comportement des éprouvettes a différentes températures	79
Figure 66 : la dureté en fonction des zones étudiées.....	83
Figure 62 : Microstructure du métal de base.....	84
Figure 68 : Microstructure du cordon de soudure.....	84
Figure 69 : Microstructure de ZAT.....	84

Liste des abréviations :

CaO : oxyde de calcium

ZrO2 : L'oxyde de zirconium

Al2TiO5 : titanate d'aluminium

Al2O3 : alumine

UV : ultraviolet

HNO3 : acide nitrique

CFC : Cubique à Faces Centrées

MPa : mégapascal

Fe : fer

C : carbone

AL : Aluminium

Si : Silicium

S: soufre

P: Phosphor

Ca: Calcium

V: Vanadium

Mn: Manganèse

Ti: Titane

Nb : Niobium

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

PLT : tuyaux onduleux pliables en acier inoxydable

AFNOR : Association française de normalisation

ISO : Organisation internationale de normalisation

CEN : Comité européen de normalisation

API : American Petroleum Institute

P : La charge

Fe : Charge à la limite élastique

A% : Allongement

E : est le module d'élasticité ou module de YOUNG.

ε_x : l'allongement en %.

L : Longueur finale de l'éprouvette.

L₀ : Longueur initial de l'éprouvette

Re : La limite d'élasticité

Rm : La résistance à la traction

ε_r : L'allongement a la rupture

σ : contrainte de déformation

K : résilience

K_{cu} : résilience a entaille est en U

K_{cv} : résilience a entaille est en v

m : masse du mouton-pendule ;

g : accélération de la pesanteur

h₀ : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ ;

h₁ : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée.

W : énergie absorbée

KV : énergie de rupture

CVN : énergie de rupture Charpy,

K_{IC} : ténacité statique (MPa · m^{1/2}),

K_{Id} : ténacité dynamique (MPa · m^{1/2}),

PF : probabilité de rupture,

T : température (°C),

TK_{IC} : température (°C) correspondant à K_{IC}= 100 MPa · m^{1/2},

σ_y : limite d'élasticité (MPa)

HLE : haute limite d'élasticité

FBE : fusion Bonded, Epoxy

MB : métal de base

ZAT : zone affecter thermiquement

S : soudure

SAW : soudage automatique welding

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

Les tubes soudés en acier à haute limite élasticité (HLE) laminés à chaud, trouvent leurs applications dans de nombreux domaines : transport d'hydrocarbures, transport d'eau, construction architecturale...etc.

Le développement industriel des pipes en acier HLE exige une maîtrise parfaite du processus de fabrication, par conséquent, le produit doit satisfaire les conditions techniques suivantes :

- Absence de défauts métallurgique et de défauts de procédé de soudage.
- Propriétés mécaniques (résistance, ductilité).
- Tolérance dimensionnelles (épaisseur, largeur et longueur).

Ces tubes en aciers faiblement allié ont subi le soudage en spirale.

Le soudage est une technique qui permet de réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage rigide de manière à assurer une bonne homogénéité de la matière. De point de vue performance, cet assemblage soudé doit offrir des garanties optimales de sécurité et d'endurance en service en respectant la norme demander par le constructeur.

Pour le cas des tubes, la soudure doit être faite de manière efficace. Pour mieux comprendre le comportement de ces aciers, nous avons procéder à une étude théorique et expérimentale sur l'évolution et la résistance des pipes en acier HLE de grade X60M API5L et leur tenue après le procédé de soudage.

Dans le 1ère chapitre, on présentera une vue générale sur les matériaux et ceux utiliser dans l'adduction du gaz.

Dans le 2ème chapitre, on s'étalera sur les différents essais de caractérisations mécanique en général et celle faite sur les tubes en particulier.

Dans le 3ème chapitre, on présentera l'acier étudié selon les exigences de la norme API5L 46ème édition, puis le processus de fabrication des tubes souder en spiral, en passant par les différents contrôles destructif et non destructif effectuer pour ce dernier.

Quant au 4émé et dernier chapitre de ce travail, on s'est intéressé à l'évolution mécanique, chimique et métallographique après fabrication de pipes de nuance X60M destiné au transport du gaz, ou nous allons exposer les différents résultats obtenus à partir des multiples essais mécaniques réaliser au sein du laboratoire de l'entreprise, avec interprétation de ces résultats pour chaque essai effectuer.

Introduction générale

1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE



L'unité ALTUMET entreprise Algérienne de fabrication des tubes métalliques de l'entreprise EPE ANABIB SPA dont le siège social est sis à la route de la gare B.P.131, Réghaia Wilaya d'Alger- Algérie, d'un capital social de 10.630.280.000,00 DA est spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des tubes en acier soudés spirale, ainsi que la prestation de revêtement pour les tubes en acier, destinés essentiellement aux secteurs des hydrocarbures et de l'hydraulique.

L'entreprise emploie 400 personnes qui fabrique des tubes depuis plus de 50 ans

ALTUMET est une entreprise certifiée ISO 9001 2015 et API Q1 9ème édition pour un système de management de la qualité.

L'entreprise est également certifiée selon la norme API 5L 46ème édition (AMERICAN PETROL INSTITUTE) qui est la norme de référence à l'échelle internationale en matière de qualité des tubes pour le secteur de hydrocarbures.

L'entreprise a pour fonction de :

- Fabrication des tubes spirale.
- Enrobage des tubes.

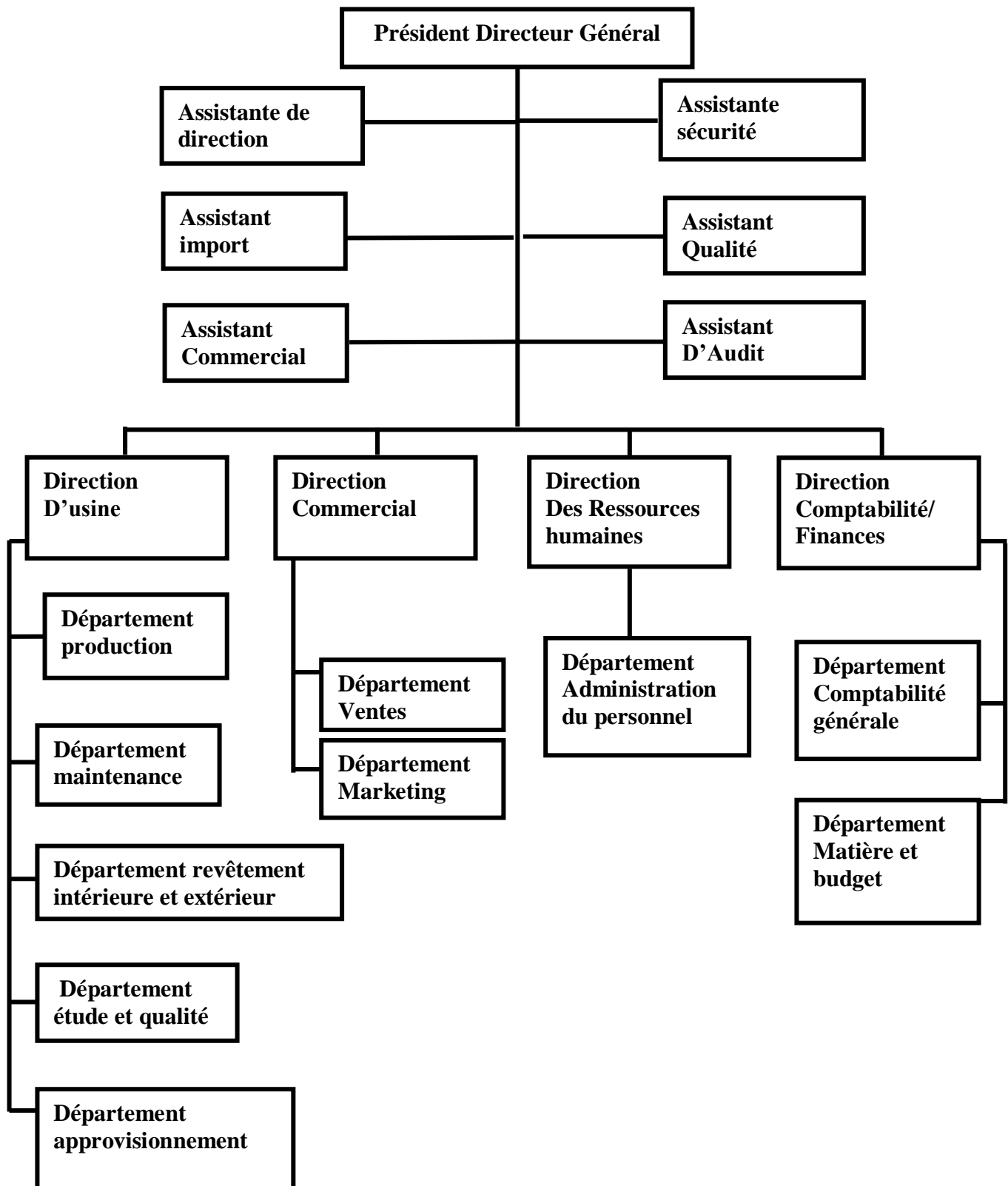
La superficie totale de l'entreprise est de 32785 m² répartie comme suit :

- La superficie couverte : 15200 m².
- La superficie non couverte : 17585 m².

Introduction générale

ORGANIGRAMME GENERAL D'ALTUMET

GENERAL D'ALTUMET



2. HISTOIRE DE L'ENTREPRISE

En 1959, le groupe français « VALLOUREC » a fondé la société Algérienne Des Tubes Mécaniques « ALTUMEC », est devenue l'unité des gros tubes de REGHAIA, par la suite nationalisé et rattaché à la division tubes et transformation des produits plats « TTPP » de l'ancienne société nationale de sidérurgie « SNS » en 1968.

En 1984, la structuration des sociétés nationales a hissé la division « TTPP » au rang des entreprises publiques économiques EPE « ENTTPP /ANABIB », dont l'unité gros tubes a gardé son statut d'unité.

En 2000, après la nouvelle politique commerciale nationale, l'unité gros tubes est devenue une filiale de ANABIB, avec une nouvelle organisation structurelle, sous le nom ; ALTUMET « Algérienne Des Tubes Métalliques ».

En 2016, l'entreprise ALTUMET est fusionnée et absorbée par le groupe industriel ANABIB, devenue une unité de production de l'entreprise ANABIB SPA et cette dernière une filiale du groupe industriel IMETAL.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES MATERIAUX

I.1 Introduction

Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous fait d'un matériau choisi pour son adaptation appropriée à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini (figure 1).

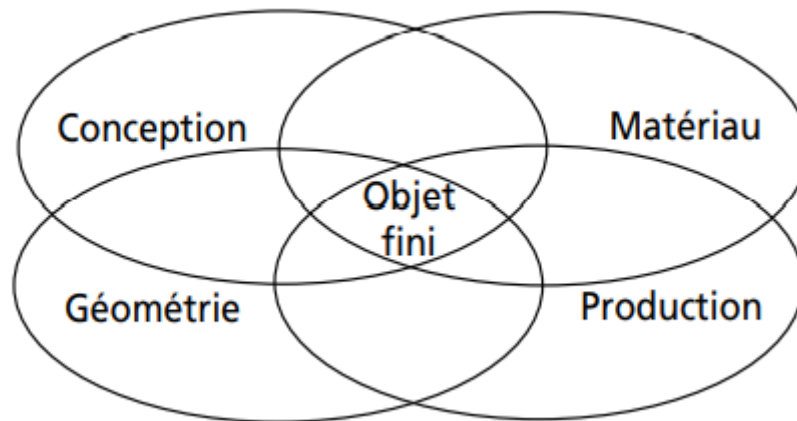


Figure 1 : Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini.

I.2 Définitions d'un matériau

De manière symbolique et résumée, un matériau est une matière dont on fait un matériel.

De manière plus précise et plus complète :

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée. Il peut être :

✓ **D'origines naturelles** comme :

- Les minéraux : ils sont extraits du sol (eau, terre, sable...)
- Les organiques d'origine végétale (bois, coton, lin...)
- Les organiques d'origine animale (laine, viande, lait, corne...)

✓ **D'origines artificielles** : ils n'existent pas dans la nature ; il faut donc un travail humain ou animal pour transformer des matériaux naturels afin de créer de nouveaux matériaux. C'est ce qu'on appelle **les matériaux de synthèse**.

- Les métaux que l'on extrait à partir des minéraux (cuivre, zinc, argent, aluminium, plomb...)
- Les alliages qui sont des mélanges de plusieurs métaux (bronze, laiton, zamac...)
- Les plastiques que l'on crée à partir d'éléments naturels comme le bois, le charbon et le pétrole... (PVC, caoutchouc, polystyrène, polyamide, Nylon...)

Ces matériaux peuvent être regroupés en grandes familles selon l'organigramme

CHAPITRE I : Généralité sur matériaux

suivant :

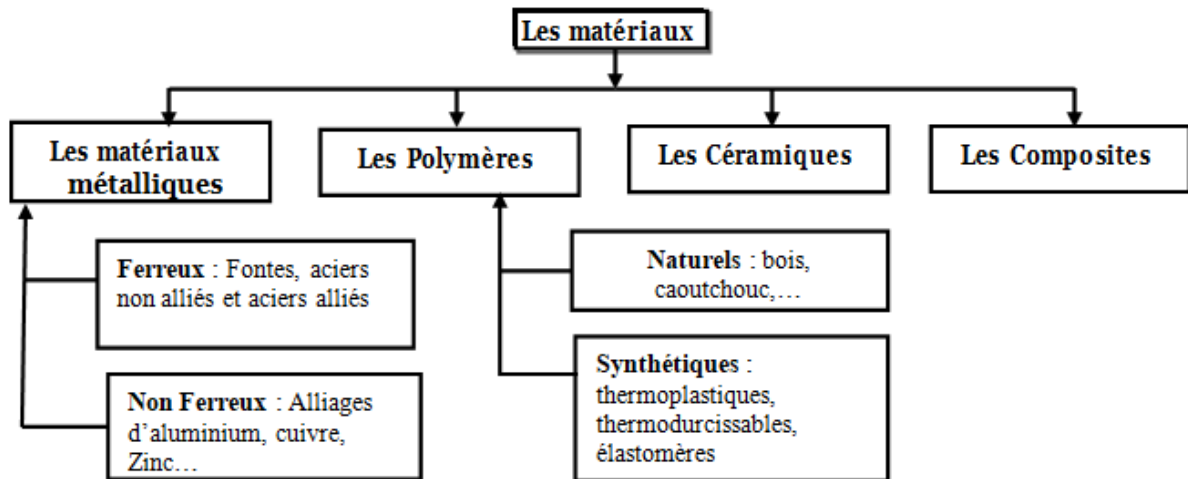


Figure 2 : classification des matériaux

Le choix d'un matériau, dans une utilisation, dépend de plusieurs critères :

- ✓ Caractéristiques mécaniques : limite élastique, dureté, résilience, ténacité, ductilité...
- ✓ Caractéristiques physico-chimiques : masse volumique, point de fusion, conductibilité électrique et conductibilité thermique, comportement à la corrosion, vieillissement...
- ✓ Caractéristiques de mise en œuvre : usinabilités, soudabilité, trempabilité...
- ✓ Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle

Le classement entre grandes familles de matériaux repose en grande partie sur le type de liaison entre les atomes. Il faut le considérer comme indicatif, le passage d'une catégorie à l'autre pouvant se faire en fonction de la composition chimique et des conditions de mise en œuvre (exemple des verres métalliques). Le *tableau 1* donne une indication des principales propriétés usuelles des polymères, des céramiques et des alliages métalliques.

CHAPITRE I : Généralité sur matériaux

Famille de matériaux	Métaux	Polymères et élastomères	Céramiques et verres
Densité	Élevée	Faible	Faible
Rigidité (Module d'Young)	Élevée	Faible	Élevée
Coefficient de dilatation thermique	Moyen	Élevé	Faible
Dureté	Élevée	Faible à élever (fibres)	Élevée
Ductilité (Déformation à la rupture)	Élevée (plasticité)	Élevée sauf à l'état vitreux	Faible et aléatoire
Conductivité électrique, thermique	Élevée	Faible (isolants)	Électrique : faible thermique : élevée
Résistance à corrosion	Faible	En général élevée	Élevée
Température max. d'utilisation	Élevée	Faible (toujours <200°C)	Très élevée
Mise en forme	Facile	Très facile (moulage)	Difficile (frittage)

Tableau 1 : Quelques propriétés usuelles des grandes familles de matériaux

Les composites réalisant généralement une combinaison de ces différentes propriétés, optimisée selon l'emploi du matériau considéré. La figure 1.3 montre quelques possibilités ou combinaisons pour l'obtention des matériaux composites.

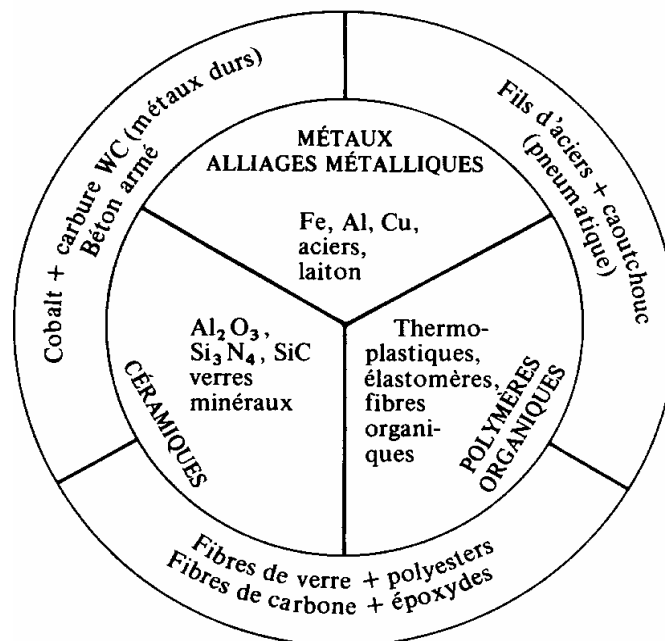


Figure 3 : Les différentes possibilités d'obtention des matériaux composites.

I.3 Les grandes classes de matériaux

Les matériaux peuvent être classés, selon leurs natures, en plusieurs classes.

I.3.1 Les métaux :

Les métaux sont des matériaux dont les éléments chimiques ont la particularité de pouvoir former des liaisons métalliques et perdre des électrons pour former des cations (exemple : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ou Fe^{3+}). Ils peuvent être caractérisés aussi bien de manière physico-chimique que de manière électronique.

Les métaux se caractérisent par plusieurs particularités physiques. Ils sont de bons conducteurs électriques, cette caractéristique se mesure soit grâce à la conductivité soit grâce à son inverse, la résistivité. Ils sont aussi de bons conducteurs thermiques et possèdent un éclat lumineux.

Ils sont généralement paramagnétiques voire ferromagnétiques. Leur température de fusion et de vaporisation sont en général élevées. Les métaux sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces et l'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermiques appropriés grâce à la précipitation de phase durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont de plus souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses ce qui est parfois un handicap.

Du point de vue mécanique, ils se caractérisent par des propriétés telles que leur module d'élasticité (généralement élevé, de l'ordre de plusieurs GPa), leur dureté, leur ductilité, etc. Sur Terre, on ne trouve quasiment les métaux que sous forme d'oxydes. Cependant, ils sont peu utilisés sous cette forme (sauf dans le domaine de la microélectronique). On préfère les utiliser purifiés (exemples du cuivre et de l'aluminium) ou sous forme d'alliages. L'aluminium est le métal le plus abondant dans la croûte terrestre, suivi du fer, qui est très souvent utilisé sous forme d'acier ou de fonte après ajout de carbone.

Du point de vue économique, on note deux secteurs extrêmement importants, celui de l'acier et celui de l'aluminium. En 2007, la production mondiale d'acier s'élevait à 1,3 milliard de tonnes soit une augmentation de 5,4 % par rapport à 2006.

En 2008, la production d'aluminium s'est élevée à 3,1 millions de tonnes soit une augmentation de 11,5 % par rapport à 2006.

Certains matériaux s'associent pour former des alliages.

I.3.2 Alliages à base de fer

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) ont un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse, ils sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition. Ils ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique. On peut distinguer :

- ✓ Les aciers d'usage général,
- ✓ Les aciers de traitement thermique,

- ✓ Les aciers à outils,
- ✓ Les aciers inoxydables,
- Les fontes.

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2,1 % de ce dernier élément. La fonte contient, quant à elle, de 2,1 à 6,69 % de carbone. Contrairement à cette dernière, l'acier est un métal ductile : il peut subir des changements de forme par compression ou extension à chaud ou à froid.

Il est caractérisé par une propriété fondamentale : il « prend la trempe », c'est-à-dire qu'il est susceptible d'acquérir une grande dureté lorsqu'il est chauffé à une température suffisamment élevée et refroidi à une vitesse assez grande.

Un des défauts majeurs des aciers ordinaires est l'altération par l'action de l'atmosphère et, plus encore, par l'action des divers produits au contact desquels ils peuvent se trouver. La rouille est la première manifestation de cette altération, mais des attaques beaucoup plus profondes peuvent se produire par l'action de gaz ou de liquides plus réactifs

I.3.3 Alliages non ferreux

Ils ne représentant que 10 % des matériaux métalliques utilisés dans l'industrie, mais ils n'en restent pas moins utilisés pour certaines de leurs propriétés spécifiques : masse volumique faible, propriétés électriques, résistance à la corrosion et à l'oxydation, facilitée de mise en œuvre. Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages.

I.3.4 Polymères : matières plastiques

Un polymère est une substance composée de macromolécules organiques (ou parfois minérales). Les macromolécules sont constituées d'un enchaînement répétitif d'au moins un type de monomère. Les monomères sont reliés entre eux par des liaisons covalentes. Les chaînes de polymères interagissent entre elles avec des forces plus faibles comme les liaisons de van der Waals.

Les propriétés des polymères dépendent notamment du type de monomère(s), de la nature de leur assemblage et du degré de polymérisation.

On distingue les polymères naturels, les modifiés (polymères artificiels) et les synthétiques. On peut aussi les classer selon leur architecture. On distingue par exemple les polymères linéaires, branchés (avec des ramifications) ou non, les dendritiques (ramifications dans les trois dimensions) et les réticulés ou tridimensionnels qui forment un réseau.

Les polymères peuvent être fabriqués de diverses façons. On peut citer :

- **Les homopolymères** : fabriqués avec le même monomère ;
- **Les copolymères** : fabriqués avec des monomères différents.

Un autre type de classification des polymères est aussi selon leurs propriétés thermomécaniques. On distingue :

- **Les polymères thermoplastiques** : ils deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en œuvre et les recycler ;

Dans ces polymères linéaires, ou ramifiés, obtenus par addition, les macromolécules ne sont liées entre elles que par des liaisons de faible intensité (liaisons de Van der Waals). Le

CHAPITRE I : Généralité sur matériaux

comportement global du matériau dépend alors de la mobilité des chaînes les unes par rapport aux autres et de la rotation autour des liaisons C-C. L'élévation de température facilite le déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres, le comportement d'abord vitreux, devient caoutchouteuse entre la température de transition vitreuse (T_g) et la température de fusion T_f . La réversibilité de comportement permet la mise en forme de ces matières à l'état fondu ou caoutchouteuse

- **Les polymères thermodurcissables** : ils durcissent à chaud et/ou par ajout d'un durcisseur en faible proportion. Ce durcissement est en général irréversible qui les rendent non recyclables ;

Ces matières plastiques obtenues par condensation de monomères sont constituées d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ce sont des matériaux amorphes et infusibles, il ne peut y avoir aucun déplacement de chaînes les unes par rapport aux autres. Lorsque la température augmente, le matériau ne devient pas visqueux, mais il conserve sa rigidité jusqu'au moment où il se dégrade. On appelle ces plastiques thermodurcissables car, en général, une élévation de température favorise la réaction de polymérisation et le degré de réticulation, donc la rigidité.

- **Les élastomères** : ils présentent en générale un allongement réversible très important et une température de transition vitreuse inférieure à l'ambiante. Ils sont des matériaux aux propriétés bien particulières. Ce sont des polymères de haute masse moléculaire et à chaînes linéaires. Le déplacement de leurs chaînes les unes par rapport aux autres n'étant limité que par une légère réticulation, on peut obtenir de grandes déformations élastiques totalement réversibles. Lorsque la contrainte est nulle, ces matériaux sont amorphes, leurs chaînes tendant toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité. Pour obtenir un tel comportement, il faut utiliser ces matériaux à une température supérieure à leur température de transition vitreuse.

Malgré un ralentissement dû aux effets des chocs pétroliers et à la récession économique qui s'en est suivie, la production mondiale de matières plastiques n'a cessé de croître. Ce domaine demeure porteur. On peut classer les polymères en deux types, en fonction de leur comportement à la chaleur et sous pression.

- **Les thermoplastiques** se trouvent à l'état fondu (état fluide ou déformable) s'ils sont portés à une température suffisante, et sont donc susceptibles de s'écouler sous l'action d'une contrainte. Cela permet leur mise en forme par les techniques d'extrusion, d'injection, de thermoformage, etc. C'est le cas des polyoléfinés (PE, PP, PMP, etc.), du PVC, du polystyrène, etc.

- **Les thermodurcissables** durcissent par réaction chimique. On peut citer les résines phénoplastes, poly époxydes, certains polyuréthanes.

Du fait de leurs propriétés intéressantes, les polymères ont peu à peu envahi les industries et la vie quotidienne en remplaçant les matériaux traditionnels.

I.3.5 Céramiques

Celles-ci sont composées d'éléments métalliques et non métalliques. Elles sont généralement des oxydes, des nitrures, ou des carbures. Le groupe des céramiques englobe

CHAPITRE I : Généralité sur matériaux

Une vaste gamme de matériaux, comme les ciments, les verres, les céramiques traditionnelles faites d'argile, etc.

La structure cristalline des céramiques est plus complexe que celle des métaux, car au moins deux éléments chimiques différents sont présents. Il existe des céramiques ioniques, composées d'un métal et d'un non-métal (par exemple : NaCl, MgO) et les céramiques covalentes, composées de deux non métaux ou d'éléments purs (diamant, carbure de silicium, etc.). La structure des joints de grain est également plus complexe car des interactions électrostatiques entraînent des contraintes d'équilibre supplémentaires. Les ions de signes contraires ne doivent donc pas se toucher. C'est pourquoi la céramique présente une certaine porosité (environ 20 % en volume).

Elles sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure. Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères.

Les céramiques ont de nombreux avantages :

- Propriétés mécaniques : elles présentent, comme les métaux, un module de Young bien défini, c'est-à-dire que le module reste constant pendant l'application d'une charge (contrairement au polymère dont l'élasticité n'est pas linéaire). De plus, elles ont la plus grande dureté de tous les matériaux, et sont d'ailleurs utilisées comme abrasifs pour couper (ou polir) les autres matériaux ;
- Résistance aux chocs thermiques en raison d'un faible coefficient de dilatation ;
- Bonne résistance chimique ;
- Résistance à la corrosion ;
- Isolations thermique et électrique.

Par contre, leur principale faiblesse est d'être prédisposée à rompre brutalement, sans déformation plastique en traction (caractère fragile) ; les porosités « affaiblissent » le matériau en entraînant des concentrations de contrainte à leur voisinage. La fragilité des céramiques rend impossible les méthodes de laminage ou de forgeage utilisées en métallurgie.

I.3.5.1 Les verres :

Ils sont essentiellement des solides obtenus par figeage de liquide surfondu. Les quatre principales méthodes de fabrication du verre sont le pressage, le soufflage, l'étirage et le fibrage.

Les verres sont des silicates non cristallins qui contiennent d'autres oxydes (CaO, par exemple) qui en modifient les propriétés. La transparence du verre est l'une de ses propriétés les plus importantes. Ceci est dû à sa structure amorphe et à l'absence de défauts de taille supérieure à la fraction de micromètre. L'indice de réfraction d'un verre est d'environ 1,5. Pour ce qui est de leurs propriétés mécaniques, les verres sont des matériaux fragiles, mais des traitements thermiques ou chimiques peuvent y remédier.

I.3.5.2 Quelques applications des céramiques

A. Céramiques dans l'automobile

Cette utilisation se réduit à des composants du moteur. Leurs buts sont d'améliorer l'isolation thermique, la résistance à l'usure par frottement, d'alléger les pièces en mouvement. L'isolation thermique est l'un des points forts des céramiques, ainsi la préchambre de combustion (moteur diesel), la tête de piston et les soupapes d'échappement sont revêtues d'écrans thermiques en céramique. Pour améliorer le rendement du turbocompresseur, certains fabricants ont envisagé la conception du conduit d'échappement ainsi que la turbine en céramique.

On utilise pour ces applications des inserts en zircon (ZrO_2) et de titanate d'aluminium (Al_2TiO_5). La résistance à l'usure par frottement est une des propriétés remarquables des céramiques. Ainsi les culbuteurs, les guides et les sièges de soupapes sont en céramique (association de zircone et de nitrure de silicium (Si_3N_4)). Par souci d'allègement des masses en mouvement, on peut utiliser du nitrure de silicium pour les axes des pistons, les soupapes.

B. Céramiques pour les outils de coupe

Dans ce cas, on utilise principalement les propriétés de dureté et de tenue à haute température. Ainsi l'usinage des fontes, des aciers et des superalliages à base de nickel et de cobalt peuvent être exécutés avec des plaquettes en céramique. Pour les premiers, on utilisera l'alumine (Al_2O_3), pour les seconds, le nitrure de silicium. Le taux d'enlèvement est nettement amélioré (2 à 5 fois par rapport aux plaquettes carbures) même si le volume enlevé reste du même ordre. Le tournage continu est résolu par l'utilisation des céramiques mais le fraisage pose le problème des chocs.

C. Céramiques en biomécanique

La chirurgie et l'art dentaire font de plus en plus appel aux nouveaux matériaux pour une bonne biocompatibilité, une bonne tenue à la fatigue et une résistance élevée à la corrosion. Les céramiques utilisées comme remplacement des tissus durs (os, dents) peuvent être classés en trois groupes selon leur réaction avec le milieu physiologique :

- Les céramiques inertes ou biodégradables (alumine)
- Les céramiques bioactives (bio verres...) qui permettent une liaison entre le tissu et l'implant,
- Les céramiques bio résorbables (phosphate de calcium) qui permettent la repousse des tissus.

D. Céramiques dans le nucléaire

Dans le nucléaire, les céramiques sont utilisées comme combustible : céramiques à base d'uranium, produits remplaçant l'uranium métallique pour les réacteurs à haute puissance. On les utilise aussi comme barre de contrôle. Matériau très absorbant neutronique, il sert à contrôler la réaction de fission nucléaire. Les céramiques servent globalement à la protection thermique et neutronique.

I. 4. Matériaux composites

Un matériau composite est un matériau qui associe deux ou plusieurs matières différentes, appartenant parfois à deux classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun. C'est aussi un mélange de deux matériaux (ou plus) de base, distincts à l'échelle macroscopique, ayant des propriétés physiques et mécaniques différentes.

Ce mélange est effectué de manière à avoir des propriétés optimales, différentes et en général supérieures à celles de chacun des constituants.

Un composite est constitué au moins d'une **matrice** (liant) et d'un **renfort**. Les constituants sélectionnés (certains sont multifonctions) peuvent améliorer les propriétés suivantes : rigidité, résistance thermomécanique, tenue à la fatigue, résistance à la corrosion, étanchéité, tenue aux chocs, au feu, isolations thermique et électrique, allègement des structures, conception de formes complexes.

- La **matrice** est un liant qui protège les fibres et transmet également les sollicitations aux fibres ;
- Le renfort ou les **fibres** apportent la tenue mécanique et supportent les sollicitations ;
- Les **charges** et **additifs** améliorent les caractéristiques du matériau. Les charges abaissent souvent le coût de la matière (effet de dilution). Exemples d'additifs : anti-UV, fongicides, antioxydants.

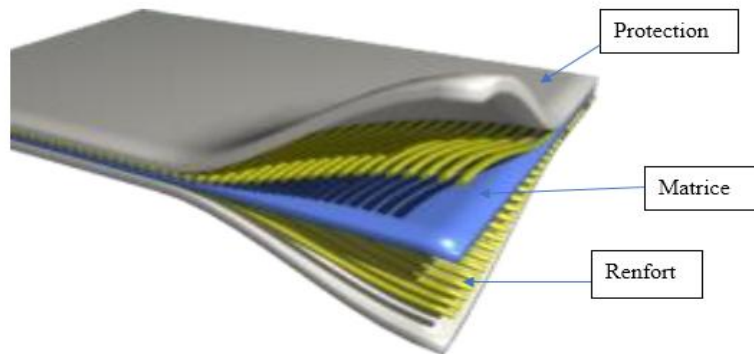


Figure 4. : Exemple de matériau composite

I.5 Les matériaux utilisés dans l'adduction du gaz :

Une canalisation, ou un pipeline (en l'anglais) est une conduite destinée à l'acheminement de matières gazeuses, liquides, solides ou polys phasiques, d'un endroit à un autre.

Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol.

Le type et le nom d'une canalisation dépendent des caractéristiques physiques et des conditions d'acheminement du produit à déplacer.

- Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc
- Pour le pétrole, on parle d'oléoduc
- Pour l'oxygène, on utilise le terme d'oxygénoduc ou d'oxyduc ...etc.

Les matériaux constitutifs d'un gazoduc dépendent de la nature et de l'état du produit qui doit acheminer. [1]

I.5.1 Canalisations en acier

Les gazoducs en acier sont constitués de tubes soudés bout à bout, recouverts d'un matériau isolant (polyéthylène, polypropylène,) contribuant à leur protection contre la corrosion. Ils peuvent être également revêtus intérieurement pour améliorer l'écoulement du fluide transporté ou pour prévenir la corrosion interne si le gaz transporté est corrosif. Selon leur nature d'usage, les gazoducs sont exploités par des industriels de l'exploration production, du transport ou de la distribution. L'exploitation d'un gazoduc consiste à maintenir l'ouvrage en bon état de service dans les conditions optimales de sécurité et de coût. Aujourd'hui, il y a des millions de Km de pipelines qui sont largement utilisés pour transporter de l'eau, du gaz et du pétrole sous ou dessous terre ou sous mer, depuis les sources originales jusqu'aux usines de traitement des liquides (filtration, raffinage, liquéfaction,).



Figure 5 : Pipelines [2]

I.5.1.1. L'obtention des aciers :

a. De la chimie, avec le dosage des éléments d'alliage :

On appelle acier un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% massique. Cette teneur limite vient de la limite de solubilité du carbone, à haute température, dans la phase Cubique à Faces Centrées (CFC) du fer, appelée austénite. Le dosage en carbone a l'effet le plus prononcé sur les caractéristiques du métal. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et les propriétés des aciers. Si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié. Si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié. Ou sa densité varie donc autour de celle du fer (7.32 à 7.86), ils ont un module de Young d'environ 210 000 MPa, indépendamment de leur composition. Les autres propriétés varient énormément en fonction de leur composition, du traitement thermomécanique et des

CHAPITRE I : Généralité sur matériaux

traitements de surface auxquels ils ont été soumis [3].

b. Influence des éléments d'additions sur la microstructure :

c. Les éléments d'alliages utilisés se répartissent selon 5 familles :

- Les éléments gamma gènes : (Ni, Mn, Cu). Élargissent le domaine de stabilité de l'austénite, abaissent les températures de transition (gamma, alpha).
- Les éléments alpha gènes : limitent ou empêchent la formation de l'austénite et élèvent les températures de transformation (Si, Cr, Mo, Ti).
- Les graphitisant : Si, Ni, Cu... (ne forment pas de carbures, ils se retrouvent en solution dans la ferrite),
- Les carburigènes : Cr, Mn, Mo, W, V, Ti, Nb... ce sont des éléments qui forment dans les alliages Fe-C des carbures particulièrement stable, étant donné que le fer lui-même forme avec le carbone un carbure (cémentite) on obtient selon la nature de l'élément d'alliage et selon la quantité ajoutée.
- Les désoxydants : Mn, Si, Al, Ti, Nb, pour fixer l'oxygène dissous dans le métal liquide.

Chaque élément d'addition a un effet spécifique que l'on résume ci-dessous [4]

Influence et Rôle de l'élément chimique ajouté dans l'acier	
Le Carbone (C)	faible teneur en carbone et en éléments d'alliage permet de garantir la bonne soudabilité de l'acier
Le Silicium (Si)	Agit principalement par effet de solution solide, il a également le rôle de désoxydant
L'Aluminium (AL)	employé comme désoxydant lors des traitements en poche de l'acier liquide, l'aluminium et le silicium sont des éléments présents de faibles teneurs.
Soufre et Phosphore (S, P)	très faible teneur en impuretés (S et P) est caractéristique d'une faible teneur inclusion aïre et d'une bonne résistance à la corrosion
Le Calcium (Ca)	L'addition de calcium est effectuée lors du traitement de l'acier liquide en poche pour contrôler la morphologie des inclusions.
Le Vanadium (V)	Fait augmenter la résistance des aciers faiblement alliés et améliore leur soudabilité
Le Manganèse (Mn)	Agit à la fois par durcissement de solution, augmentation de la qualité de perlite, affinement du grain ferrique, par conséquent, il améliore la ductilité de l'acier dans des limites déterminer
Le Titane (Ti)	Améliore la résistance de la ductilité. Comme élément de substitution.
Le Niobium (Nb)	un modificateur d'acier qui améliore le travail de l'acier durant la production et améliore la soudabilité. Les effets les plus favorables de niobium apparaissent à de faible teneur (0.02 à 0.03%).
Le Chrome (Cr)	Il augmente la résistance à la rupture des aciers faiblement alliés, sa teneur reste inférieure à 1% tout au moins dans les aciers soudables.
Le Nickel (Ni)	Il améliore les caractéristiques mécaniques des aciers travaillant à basse température 190°C avec une teneur de 3% à 9% ainsi que la résistance à la corrosion
Le Cuivre (Cu)	C'est un élément d'addition de teneur généralement inférieur à 0.5% il améliore la résistance à la corrosion dans certain milieu aqueux

Tableau 2 : Influence et Rôle de l'élément chimique ajouté dans l'acier

I.5.2 Canalisations en polyéthylène [5]

Les **tubes de polyéthylène pour gaz** sont des tubes de plastique, de couleur noire et repérables grâce à un filet jaune, contrairement au polyéthylène pour l'eau dont le filet est bleu.

Ce type de canalisation est utilisé pour des parties d'installations enterrées, mais il est également possible de l'installer en élévation sous certaines conditions. Il est à noter que l'installation de tuyauteries en polyéthylène possède quelques exigences dont il faut tenir compte :

- Les tubes de polyéthylène sont sensibles aux UV et ne peuvent donc être exposés directement à la lumière
- Les températures d'exposition doivent être comprises entre -20°C et +30°C
- La pression maximale supportée par les tuyauteries en polyéthylène est de 500 mbar

I.5.3 Les kits « PLT » :

Il existe un matériel qui possède toutes les autorisations pour être utilisé comme tuyauterie de gaz, mais qui n'est pas décrit par la réglementation du DTU 61.1 : les **kits de tuyaux onduleux pliables en acier inoxydable**, également appelés les « kits PLT ».

Ce matériau est utilisé dans des installations à usage domestique, individuelles et d'alimentation de chaufferie.

Il s'agit en effet d'une canalisation en acier inoxydable avec un revêtement plastique de couleur jaune, et onduleux ce qui lui apporte une certaine souplesse. Cet aspect onduleux permet une installation complète, rapide et sûre sans brasure, ni soudure, ni outil particulier mais uniquement avec les accessoires disponibles : raccords, colliers de support, éléments de dérivation, etc. Sa pression maximale supportée est de 500 mbar.

A noter que la canalisation et les raccords doivent obligatoirement provenir du même fabricant.

I.5.4 Les tuyauteries en plomb :

Les canalisations en plomb sont aujourd'hui interdites pour réaliser de nouvelles installations.

Cependant, l'utilisation du plomb est autorisée dans le cadre d'une réparation d'une ancienne tuyauterie en plomb, mais sous quelques conditions :

- La longueur de la canalisation en plomb utilisée ne doit pas dépasser 50 centimètres.
- Si un mauvais état ou un défaut d'entretien de la canalisation est constaté, il est conseillé de changer la tuyauterie en plomb au profit d'un autre matériau.

La pression maximale d'utilisation des canalisations plomb est de 400 mbar.

Dans le tableau 3 en résumé les différents types de canalisations autorisées pour l'adduction du gaz :

CHAPITRE I : Généralité sur matériaux

Récapitulatif des canalisations autorisées pour le gaz :



Types de canalisations	Types de poses autorisées	Utilisations courantes
Cuivre 	<ul style="list-style-type: none">- Elévation- Enterrées- Incorporées	<ul style="list-style-type: none">- Installations individuelles- Installations collectives
Polyéthylène 	<ul style="list-style-type: none">- Principalement en enterrées- Elévation possible, sous conditions	<ul style="list-style-type: none">- Installations individuelles- Installations collectives
Acier 	<ul style="list-style-type: none">- Elévation- Enterrées- Incorporées	<ul style="list-style-type: none">- Installations collectives
Kits « PLT » 	<ul style="list-style-type: none">- Elévation- Enterrées- Incorporées	<ul style="list-style-type: none">- Installations individuelles
Plomb 	/ !\ Pas de nouvelles installations : uniquement en réparation d'installations existantes	<ul style="list-style-type: none">- Seulement sur l'existant

Tableau 3 : Récapitulatif des canalisations autorisées pour le gaz

Chapitre II : Essai de caractérisation mécanique

II.1 Introduction

Pour pouvoir utiliser convenablement les matériaux dans l'industrie, il est essentiel de déterminer les conditions de déformation et de rupture des matériaux.

Afin de caractériser le comportement mécanique d'un ou de plusieurs matériaux soumis à des forces extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations, on a recours à un certain nombre d'essais mécaniques.

Ces essais mécaniques doivent mettre en jeu des états de contrainte simples et connus, d'interprétation facile et non équivoque. De plus ils doivent être reproductibles. C'est pourquoi des organismes nationaux et internationaux normalisent ces essais (AFNOR, ISO, CEN).

La normalisation des essais porte sur :

- La géométrie de l'éprouvette (une éprouvette est une pièce de dimensions normalisées utilisée lors d'essais mécaniques visant à déterminer le comportement du matériau soumis à différents efforts mécaniques comme la traction, la torsion, la flexion...)
- La préparation de cette éprouvette.
- Les machines d'essai et leur étalonnage.
- Les techniques expérimentales mises en œuvre.
- Le dépouillement et la présentation des données.

II.2. Essai de traction :

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts F de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette. On mesure instantanément l'allongement Δl , correspondant [6].

II.2.1. Principe de l'essai :

Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante S_0 et longueur L_0 raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. L'essai est effectué à la température ambiante dans les limites comprises entre 10°C et 35°C. Ces essais peuvent être effectués à des différentes températures allant de la température cryogénique à celle des hautes températures inférieures à la moitié de la température de fusion pour modéliser le comportement du matériau en fonction de la température.

II.2.2. Eprouvette :

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la forme et des dimensions des produits métalliques dont on veut déterminer les caractéristiques mécaniques. L'éprouvette est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Cependant, les produits de la section constante (profilés, barres, files, etc.), ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (par exemples : fontes, alliages non ferreux) peuvent être soumises à l'essai sans être usinées.

Les éprouvettes usinées doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée lorsque celles-ci sont de dimensions différentes. Les dimensions de ce congé peuvent être importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la spécification du matériau. Les têtes de fixation peuvent être de toute forme adaptée aux dispositifs de fixation de la machine. Les éprouvettes non usinées (par exemple celles brutes fonderie) doivent comporter un congé de raccordement entre les têtes de fixation et la partie calibrée. Les dimensions de ce congé sont importantes et il est recommandé pour qu'elles soient définies dans la norme de produit.

On note :

S₀ : section initiale en mm²

S_u : section minimale après rupture

L₀ : longueur initiale entre repères

L_u : Longueur ultime après rupture

LC : longueur de la partie calibrée

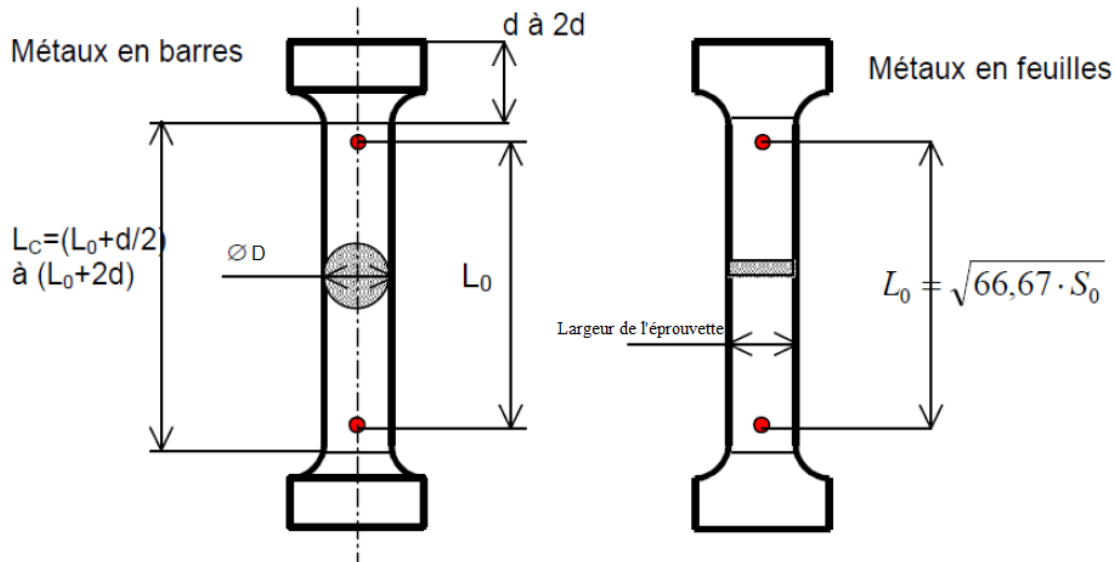


Figure 6 : Dimension de l'éprouvette pour l'essai de traction

Tous les paramètres qui sont déduits de l'essai de traction traduisent les propriétés de l'acier dans la direction de l'essai. Ces valeurs dépendent donc de la direction de prélèvement de l'éprouvette par rapport à d'éventuelles directions d'anisotropie.

II.2.3. Exécution de l'essai :

Une machine de traction est constituée d'un bâti rigide équipé d'un travers fixe à laquelle est fixée l'une des têtes de l'éprouvette ; l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre. Ceci, permettra d'aboutir à des résultats d'enregistrement de la courbe brut de traction, $F=F(\Delta l)$, caractéristique de l'échantillon et de sa géométrie.

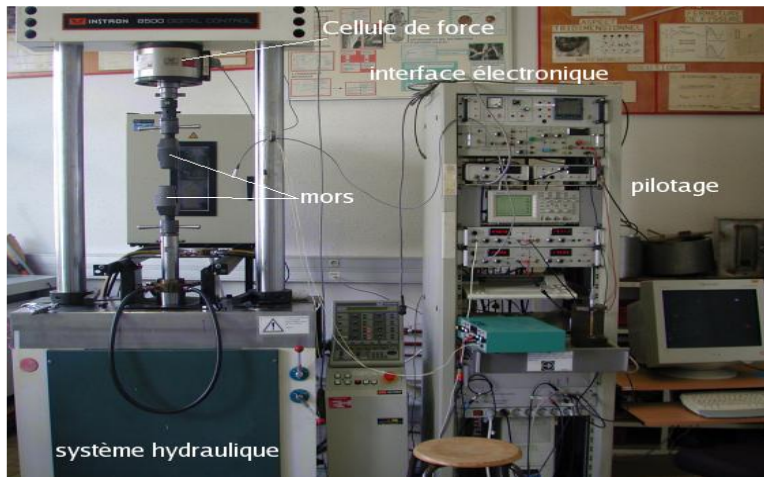


Figure7 : Machine de traction

II.2.4. Exploitation des résultats de l'essai :

L'essai de traction nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'un diagramme.

II.2.4.1. Diagramme contrainte-déformation en traction d'une éprouvette :

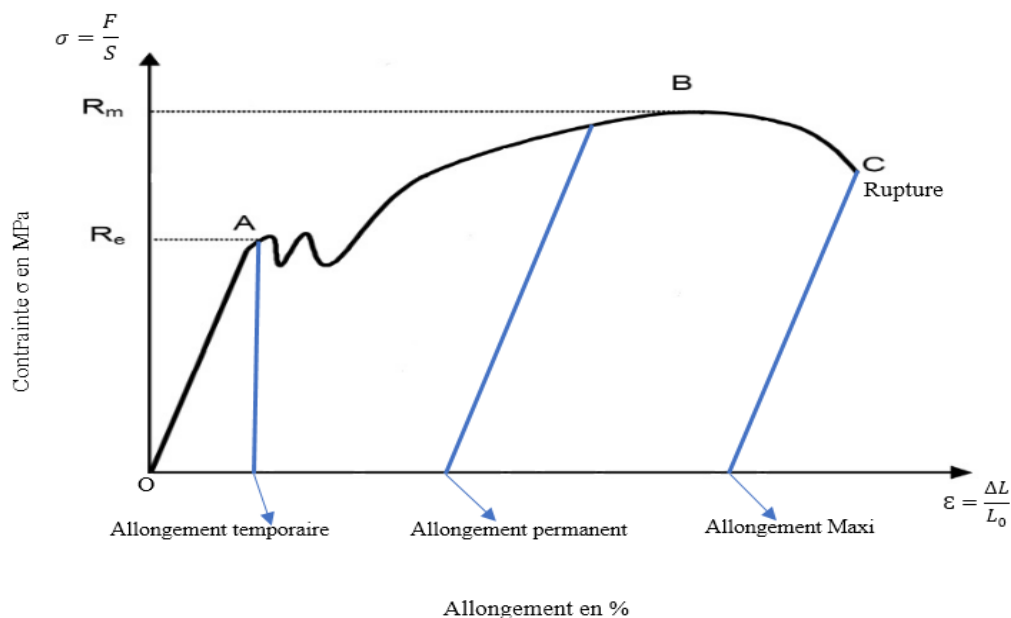


Figure 8 : Représentation d'une courbe de traction (matériaux ductile)

Chapitre II Essai de caractérisation mécanique

Sur ce diagramme contrainte-déformation, on observe les phases successives suivantes :

- **Zone OA** : c'est la partie des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.
- **Zone AB** : la déformation est irréversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène. Les allongements se croissent plus vite que les charges. L'allongement provoque une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.
- **Zone BC** : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette qui est hétérogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge.

Au cours de la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire et obéit la loi de Hooke. Théoriquement la pente de la droite est égale au module d'Young E ; en pratique, le module d'élasticité est très rarement mesuré de cette façon, car dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, et les résultats de ces mesures ne sont pas précises. La limite de ce domaine est marquée par une propriété importante. C'est la limite élastique.

Donc on remarque différents paramètres

L'éprouvette subit un allongement. Pour les petites déformations, il existe une relation linéaire entre la contrainte et la déformation :

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x = E \cdot \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

Avec :

E : est le module d'élasticité ou module de YOUNG.

ε_x : l'allongement en %.

L : Longueur finale de l'éprouvette.

L_0 : Longueur initial de l'éprouvette.

- **La limite d'élasticité R_e** : c'est la contrainte à partir de laquelle le matériau commence à se déformer plastiquement. En pratique, cette limite est difficile à apprécier car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive. La difficulté de lecture donnerait des interprétations erronées de cette limite d'un laboratoire à l'autre. Pour s'en affranchir, on a déterminé une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% ($R_{e0,2\%}$). C'est la contrainte pour laquelle on mesure une déformation plastique de 0,2%.

Avec :

F : La force appliquée (contrainte)

S_0 : Section initiale de l'éprouvette

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

- **La résistance à la traction R_m** : se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction.

Chapitre II Essai de caractérisation mécanique

Avec :

F_r : Force maxi appliqué

S_0 : Section initiale de l'éprouvette

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

- **L'allongement a la rupture ϵ_r** : que l'on peut lire sur le diagramme ou sur l'éprouvette rompue.

A partir de l'essai de traction, nous pouvons définir certaines caractéristiques :

- **la rigidité** : est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG. Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.

- **la résistance** : caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons et aussi de la forme des pièces et ses défauts.

- **la ductilité** : correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement a la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile, à l'opposé, lorsque la déformation permanente est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée.

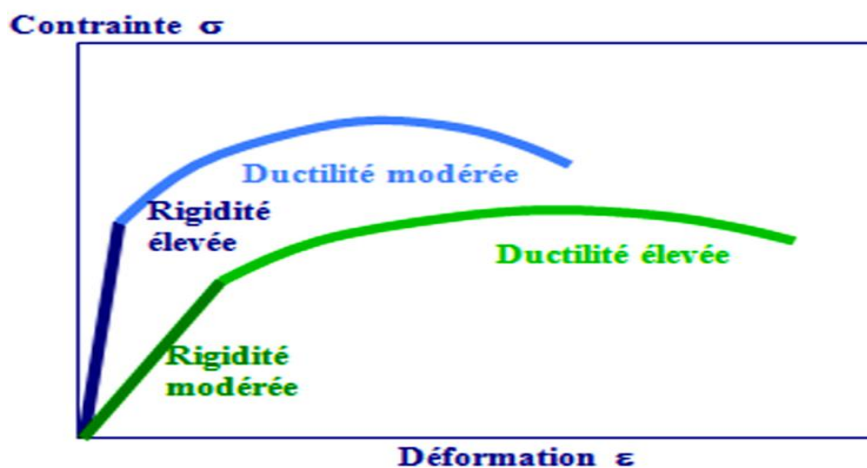


Figure 9 : Courbe contrainte-déformation. Deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes

- **la ténacité** : qui représente la quantité d'énergie absorbée à la rupture par un matériau. Elle caractérise la résistance à la propagation brutale de fissures. Sa valeur est égale à l'aire de la surface sous la courbe contrainte-déformation. Cette caractéristique est importante pour les céramiques.

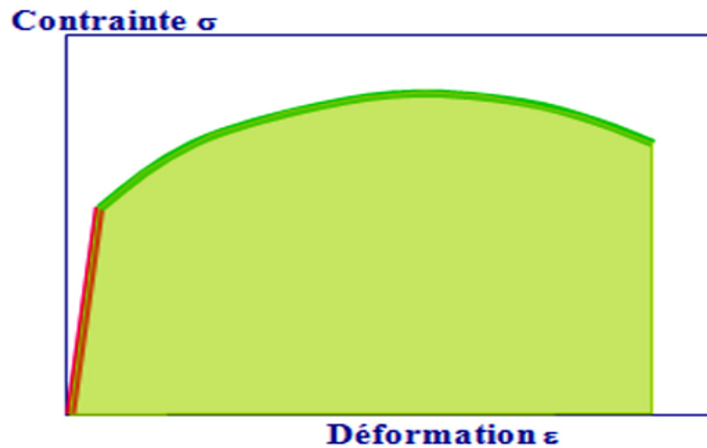


Figure 10 : Courbe contrainte-déformation. Ténacité = surface sous la courbe

II.3.1. Essai de compression :

Cet essai consiste à appliquer un effort de compression à un échantillon reposant sur une surface indéformable. Cette sollicitation provoque un écrasement de l'éprouvette.

On mesure simultanément les contraintes et déformations au cours de l'essai.

La norme définit entre autres :

- La contrainte de rupture
- La contrainte au seuil d'écoulement
- La déformation à la rupture
- La déformation au seuil d'écoulement

Pour obtenir des résultats comparatifs en compression il est nécessaire d'employer des éprouvettes de forme, de dimensions et de mode d'obtention identiques, et de les soumettre à des essais dans des conditions bien définies de traitement préalable, de température, d'humidité et de vitesse de mise en charge.

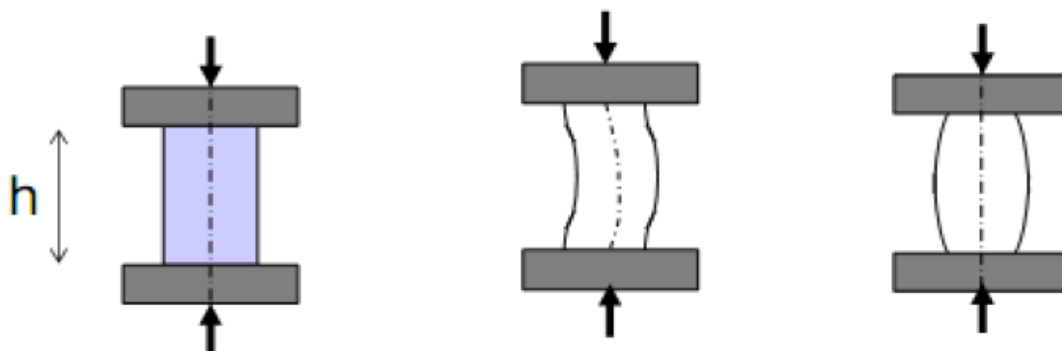


Figure 11 : Teste de compression

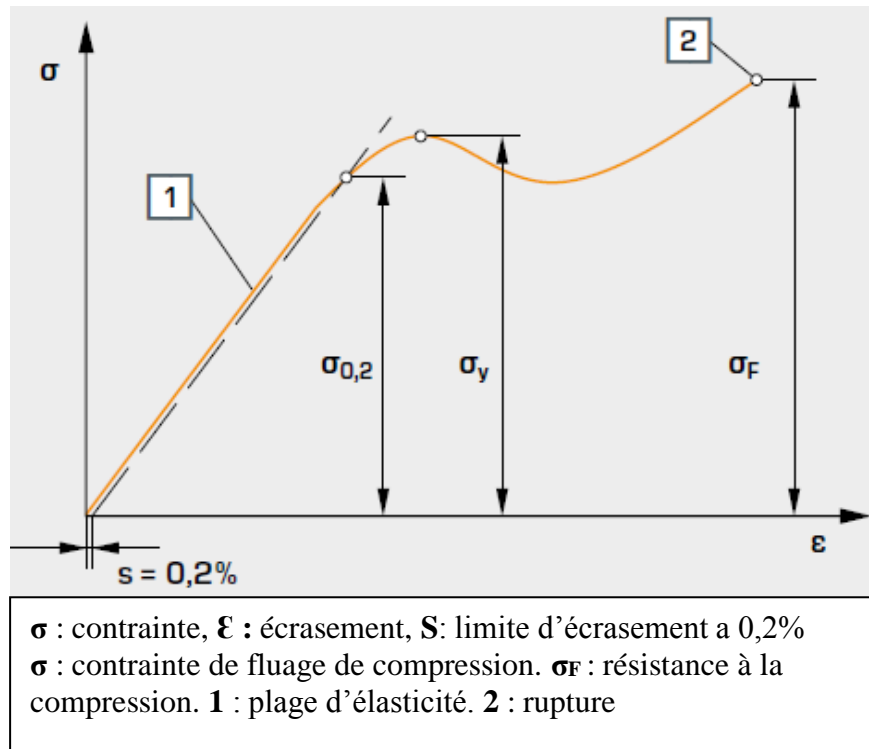


Figure 12 : Diagramme contrainte-écrasement

II.3.2. Epreuve :

L'éprouvette doit être constituée d'un cylindre droit, d'un prisme droit ou d'un tube droit. Les extrémités des éprouvettes doivent être parallèles et perpendiculaires à la direction de l'application de l'effort.

- Sauf spécification contraire, la hauteur des éprouvettes, en fonction des dimensions de leur section droite, doit être égale à h
- Dans le cas où un flambage des éprouvettes se produit au cours de l'essai le rapport d'effilement doit être réduit ce qui conduit à des éprouvettes de hauteur h_1 .

Cylindrique	Prisme carré	Prisme rectangulaire	Tube cylindrique
$h = 2,5 \cdot d$	$h = 2,9 \cdot a$	$h = 2,9 \cdot b$	$h = 2,5\sqrt{D^6 + d^2}$
$h_1 = 1,5 \cdot d$	$h_1 = 1,74 \cdot a$	$h_1 = 1,74 \cdot b$	$h_1 = 1,5\sqrt{D^6 + d^2}$

Figure 13 : Caractéristique dimensionnelle des éprouvettes de compression

II.4. Essai de flexion :

L'essai de flexion permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture. Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple. Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

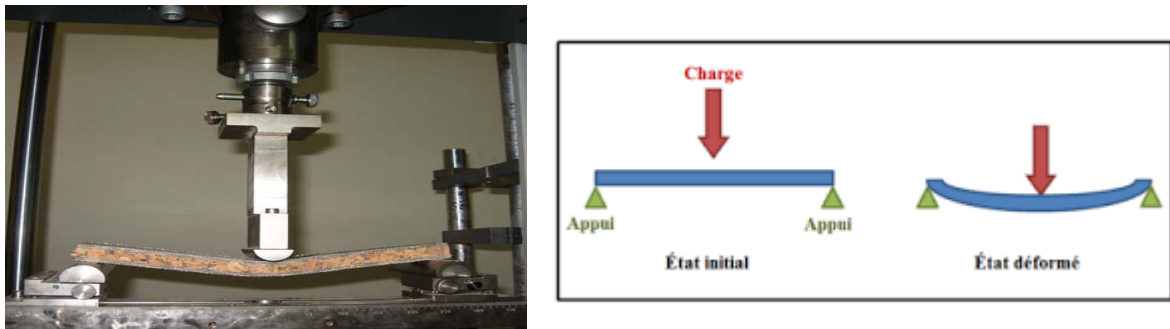


Figure 14 : Teste de flexion 3 point

Il existe d'autres types d'essais de flexion comme le test de flexion 4 points, similaire à l'essai de flexion 3 points avec l'avantage de ne pas positionner l'appui au niveau de la zone de rupture. Ceci est en effet une limitation du système à trois points ou l'appui central peut endommager l'éprouvette et fausser ainsi les résultats en entraînant une rupture précoce de celle-ci. L'essai de Charpy (essai de résilience) est également un essai de flexion ou l'éprouvette est brisée par un choc.

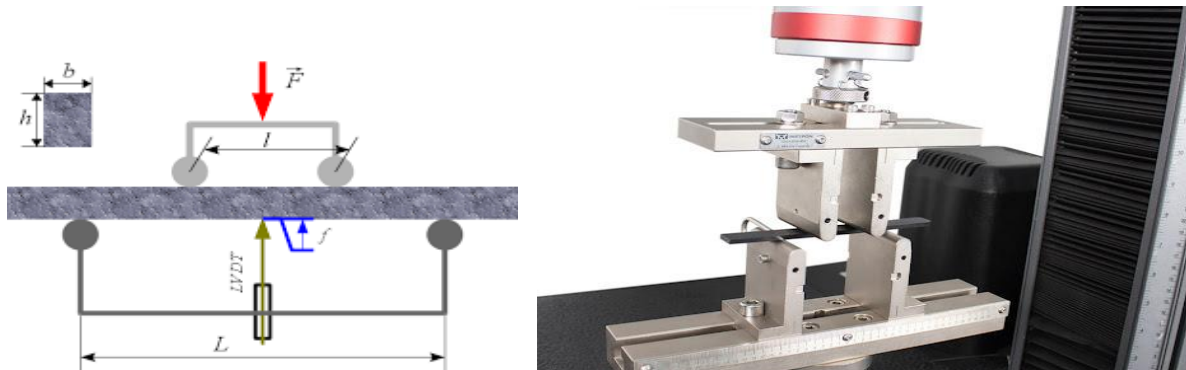


Figure 15 : Teste de flexion 4 point

II.5. Essai de cisaillement :

A la différence d'un essai de traction ou de compression, un essai de cisaillement implique que toutes les sollicitations soient tangentielles à la surface d'application et qu'elles soient parfaitement égales en tous points de cette surface. Il ne doit y avoir aucune sollicitation perpendiculaire à cette surface.

C'est un essai très intéressant pour évaluer un collage ou une liaison cérame métallique.

Un essai de cisaillement est très difficile à réaliser sans qu'il apparaisse des forces parasites qui faussent les résultats [7].

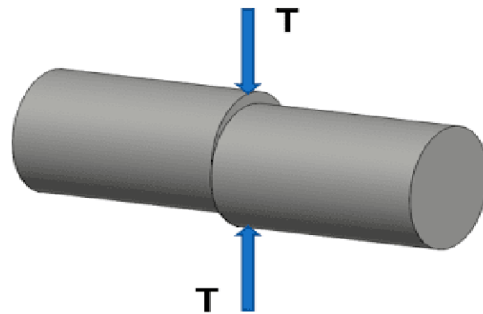


Figure 16 : Essai de cisaillement

II.6. Essai de résilience :

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite élastique dans des conditions particulières qui rendent le matériau fragile. Les facteurs fragilisant sont :

- Le tri axialité des contraintes ;
- L'abaissement de la température ;
- L'augmentation de la vitesse de déformation.
- Présence d'entailles (microfissures) résultant de défauts de fabrication ou de conception.

L'étude élémentaire de la mécanique de la rupture montre que la rupture dépend de deux grandeurs : la contrainte appliquée σ (sigma) et la dimension des microfissures. Ces deux grandeurs sont combinées dans le facteur d'intensité des contraintes K . La rupture se produit lorsque l'on atteint la valeur critique K_c .

II.6.1. Principe de l'essai de résilience :

L'essai de résilience (essai Choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture.

La résilience est définie par la lettre K (Joules/cm²). Cet essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau.

On a deux types d'éprouvettes :

- Une éprouvette en forme barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55mm. L'entaille est en U de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole K_{cu} .
- Une éprouvette en forme barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55mm. L'entaille est en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole K_{cv} l'essai de résilience en V [8].

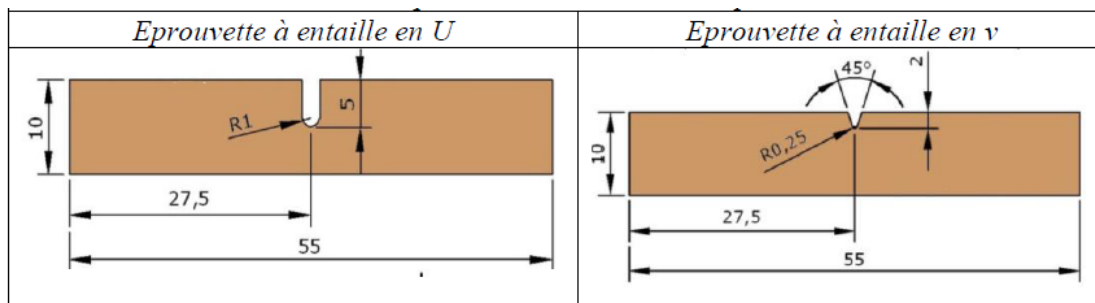


Figure 17 : Caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes de résilience

Cet essai a été élaboré pour prendre en compte ces phénomènes de rupture. Le moyen le plus classique et le plus pratiqué dans le monde, pour caractériser la fragilisation du matériau sous l'action d'un choc est cet essai de résilience ou même essai Charpy, qui est un essai de flexion par choc sur une éprouvette entaillée qui mesure la résistance d'un matériau à la rupture brutale.

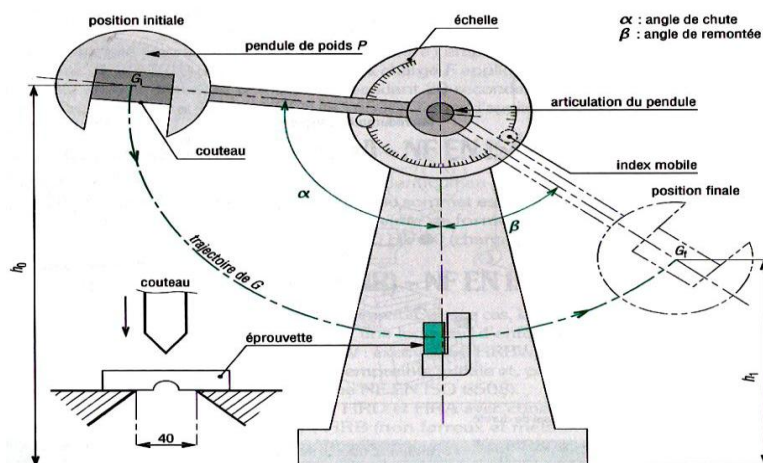


Figure 18 : Machine et principe de l'essai Charpy

Chapitre II Essai de caractérisation mécanique

L'essai consiste à imposer un choc à l'aplomb de l'entaille, l'éprouvette étant maintenue par deux appuis sur la face opposée de façon à provoquer l'ouverture de la fissure. On utilise pour cela un mouton-pendule de CHARPY.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

L'énergie obtenue est égale à :

$$W_e = mg(h_0 - h_1)$$

m : masse du mouton-pendule ;

g : accélération de la pesanteur (environ $9,81 \text{ m.s}^{-2}$) ;

h_0 : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ ;

h_1 : hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée.

Ainsi La résilience est égale au rapport de W sur l'aire de la section au droit de l'entaille :

$$K = \frac{\text{énergie absorbée } W_e}{\text{section au droit de l'entaille}} \text{ en J/cm}^2$$

Remarque : on note K_u ou K_{cu} pour les éprouvettes entaillées en U et K_v ou K_{cv} pour celles entaillées en V.

II.6.2 Effet de la température sur l'essai :

Les mesures se font souvent à diverses températures, notamment à basses températures. En revanche elle permet de classer les matériaux ou d'étudier la dépendance de la résilience à la température.

On constate que ; lorsque l'on fait varier la température d'essai :

La limite d'élasticité et la résistance à rupture évoluent en sens inverse de la température.

Les caractéristiques de ductilité (allongement à rupture et coefficient de striction) varient dans le même sens que la température. Si l'on représente sur un graphique les variations de l'énergie de rupture mesurée en fonction de la température d'essai, on obtient la courbe de transition suivante :

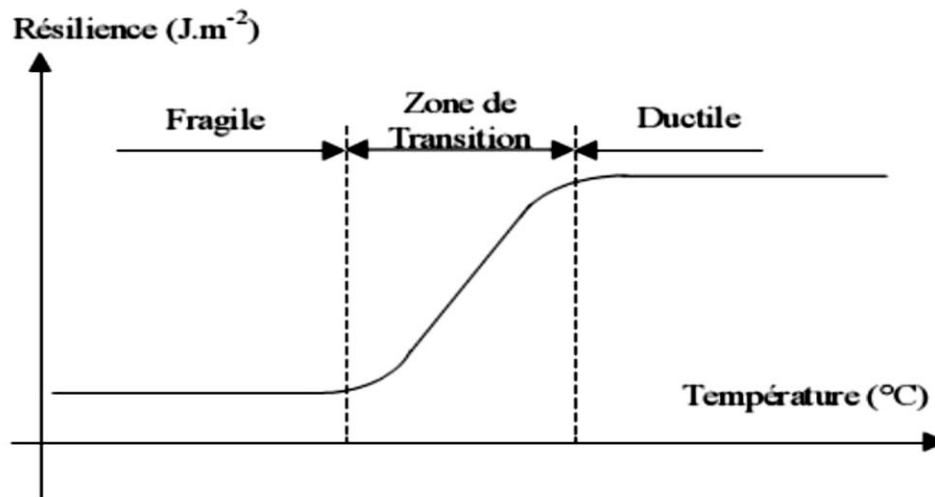


Figure 19 : Exemple de courbe de résilience

Cette courbe permet de distinguer trois zones de température :

- La zone à basse température est celle où la rupture est fragile,
- La zone à température plus élevée est celle où la rupture est ductile,
- Enfin la zone de transition est celle où la rupture est mixte.

Au-dessus de la température de transition, on dira que la rupture est de type ductile, en dessous, qu'elle est de type fragile.

Si l'on regarde l'aspect de la surface de rupture des éprouvettes essayées aux diverses températures (appelée aussi « faciès de rupture »), on constate que le faciès change avec la température :

-quand la rupture est ductile, on observe un faciès strié (nerfs) et l'on constate qu'il y a eu striction (rétrécissement de section) avant la rupture.

-quand la rupture est fragile, on observe un faciès à grains et l'on ne décèle pas de déformation plastique généralisée de l'éprouvette.

-pour une rupture mixte (fragile/ductile), on peut définir un « pourcentage de cristallinité » comme le rapport : surface à grain /surface totale.

II.6.3 Relations empiriques ténacité-résilience :

Comme rappelé précédemment, l'essai Charpy fournit une caractérisation essentiellement qualitative de la sensibilité des matériaux à la rupture brutale. Les résultats de l'essai Charpy ne sont donc pas directement utilisables pour une approche quantitative de tolérance au dommage telle qu'elle peut être développée dans le cadre de la mécanique de la rupture.

Chapitre II Essai de caractérisation mécanique

En effet, cette démarche quantitative nécessite la connaissance de la ténacité KIC du matériau, mais l'énergie de rupture KV mesurée par essai Charpy et la ténacité KIC ne peuvent pas être reliées de manière simple. Effectivement, plusieurs différences fondamentales entre ces deux mesures doivent être soulignées :

- **La ténacité KIC** correspond à la valeur du facteur d'intensité des contraintes pour laquelle une fissure devient instable. Le facteur d'intensité des contraintes est un paramètre global caractérisant aussi les champs locaux de déformation et de contrainte à la pointe d'une fissure
- **L'énergie de rupture KV** est un paramètre global non directement lié aux variables locales car cette énergie est la somme de l'énergie de déformation plastique et de l'énergie de rupture. L'éprouvette Charpy n'étant pas pré fissurée, une partie de l'énergie est consommée pour amorcer la fissuration. Ces diverses contributions ne sont pas séparables expérimentalement.

Néanmoins, de nombreuses formules empiriques ont été proposées pour évaluer la ténacité à partir de l'énergie de rupture déterminée par essai Charpy. La plupart de celles-ci, rappelées dans le tableau 1, concernent les valeurs mesurées au niveau du palier bas correspondant à un mode de rupture fragile et sont définies dans un domaine étroit de propriétés mécaniques. Deux types d'approches peuvent être distingués. Les corrélations les plus simples, comme celles proposées par Barsom et Rolfe (1970), Sailors et Corten (1972) et encore Barsom (1975) reposent sur un passage direct entre les deux grandeurs. D'autres, plus élaborées, tiennent compte du décalage des températures de transition ductile/fragile entre les mesures de ténacité et d'énergie Charpy. C'est le cas des formulations proposées par Marandet et Sanz (1976), d'une part, et Wallin (1989), d'autre part, également rappelées tableau 1. Il faut noter que le degré de conservatisme de ces formules empiriques dépend très fortement du matériau et qu'il n'existe pas de corrélation unique permettant de couvrir l'ensemble du domaine de transition [9].

Chapitre II Essai de caractérisation mécanique

Références	Formule (pour E=207GPa)	Domaine de validité	
		CVN	σ_y
		(J)	(MPa)
Barsom et Rolfe (1970)	$K_{IC} = 6,76 (CVN)^{3/4}$	4-82	270-1 700
Sailors et Corten (1972)	$K_{IC} = 14,6 (CVN)^{1/2}$	7-68	410-480
Barsom (1975)	$K_{Id} = 11,5 (CVN)^{1/2}$	2,7-61	250-345
Marandet et Sanz (1976)	$TK_{IC} = 9 + 1,37 \cdot TK28$	5-(110)	5-(110)
	$K_{IC} = 19 (CVN)^{1/2}$		
	Décalage en température (TK IC = TK28)		
Wallin (1989)	$K_{IC} = 20 + (11 + 77 \cdot \exp(0,019(T - TK28 + 18))) \cdot (25/B)^{1/4} \cdot (\ln(1/1 - P_F))^{1/4}$		

Avec l'épaisseur de l'éprouvette (mm),
 CVN énergie de rupture Charpy,
 E module de Young,
 K_{IC} ténacité statique (MPa · m^{1/2}),
 K_{Id} ténacité dynamique (MPa · m^{1/2}),
 P_F probabilité de rupture,
 T température (°C),
 TK_{IC} température (°C) correspondant à $K_{IC} = 100$ MPa · m^{1/2},
 $TK28$ température (°C) correspondant à CVN = 28 J,
 σ_y limite d'élasticité (MPa) à température ambiante.

Tableau 4 : Formules empiriques de corrélation résilience-ténacité

II.7. Essais de dureté :

Les essais dureté consistent à mesurer la pression de contact d'un indenteur (pyramidal, conique ou sphérique) pendant l'enfoncement. La dureté est calculée soit après l'essai, par mesure de la surface de l'empreinte, soit pendant l'essai, par mesure de l'enfoncement de l'indenteur, dans les deux cas en fonction de la charge appliquée. Le résultat obtenu à la dimension d'une pression, mais s'exprime dans une unité liée à la géométrie de l'indenteur qui s'écrit : H (pour hardness _ dureté en anglais) suivi d'un caractère indiquant le type d'indenteur utilisé (V pour Vickers (tête pyramidale) ou B pour Brinell (tête sphérique) et R pour Rockwell).

Ces essais sont faciles à mettre en œuvre, puisqu'ils ne nécessitent qu'un polissage et peuvent être réalisés sur des échantillons de petite taille. Les essais de dureté peuvent porter sur des échelles millimétriques à nanométriques, selon le dispositif expérimental utilisé. Les essais classiques sont peu coûteux et selon les applications ils peuvent être considérés comme non destructifs. Contrairement aux autres essais comme la traction.

Les essais de dureté sont d'une interprétation beaucoup plus délicate et ne permettent pas d'accéder directement aux paramètres de la loi de comportement d'un matériau mais nécessitent une analyse inverse. En première approximation, on peut voir toutefois le lien entre limite élastique et dureté ainsi : au fur et à mesure que s'enfonce l'indenteur, à force constante, l'aire de contact augmente et donc la contrainte appliquée diminue. Lorsque l'indenteur s'enfonce plus, c'est que la contrainte moyenne a atteint la limite d'élasticité du matériau.

II.7.1 Eprouvettes :

La surface de l'éprouvette doit être propre, plane et lisse soigneusement préparée. Plus des dimensions du pénétrateur sont petites, plus l'état de la surface doit être lisse. Une application du polissage en mode automatique est parfois obligatoire. La préparation de l'éprouvette doit être faite sans provoquer des altérations des propriétés du matériau dues, par exemple, au chauffage ou à l'écrouissage.

L'épaisseur de l'éprouvette doit être suffisante pour qu'aucune trace d'une déformation ne soit visible sur la surface opposée à celle de l'application de la charge. D'après une règle générale, l'épaisseur minimale est au moins dix fois supérieure à la profondeur de l'empreinte.

II.7.2 Exécution de l'essai :

On emploie pour l'exécution de l'essai un dispositif qui est suffisamment rigide et stable. L'essai doit être fait sans choc et sans vibrations, autrement les résultats sont erronés. L'éprouvette doit être installée sur un support rigide du dispositif pendant l'action de la charge.

Mode Opérateur :

- Préparer de la surface à tester
- Monter l'indenteur adéquat
- Régler la charge et les paramètres d'essai
- Monter l'éprouvette sur son support (de révolution ou plate)
- Appliquer la précharge de 10N (Indication lumineuse)
- Appliquer la charge de l'essai en appuyant sur la manette
- Retirer la charge
- Lire la valeur de dureté correspondante
- Pour la précision de la mesure : effectuer au moins 3 reprises pour chaque essai.

II.7.3. Essai Brinell :

Il consiste à imprimer dans la pièce à essayer une bille en acier ou en carbures de tungstène de diamètre D (mm) sous une charge $F(N)$, et à mesurer le diamètre d de l'empreinte résiduelle après retrait de la charge. La charge d'essai $F(N)$ est choisie dans une gamme normalisée adaptée au diamètre de l'indenteur et au matériau testé.

$$HB = \text{constante} \cdot \frac{\text{charge de lessai}}{\text{surface de l'empreinte}} = \frac{0,102 \times 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

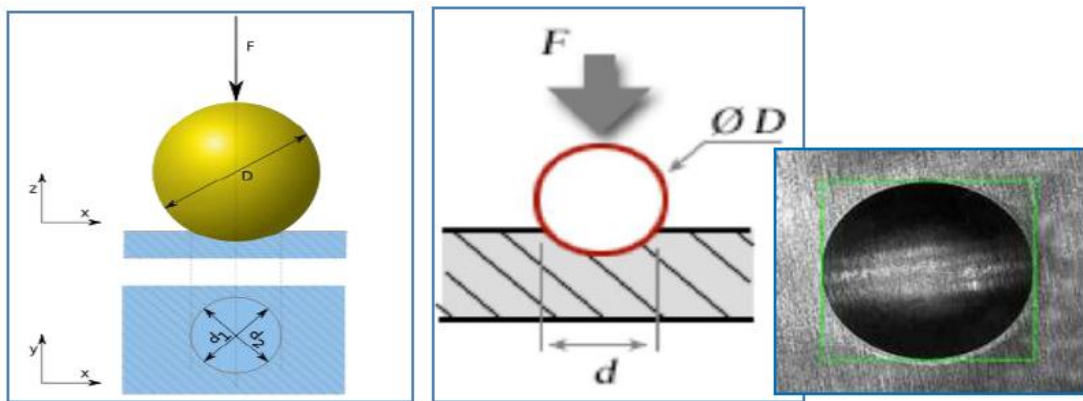


Figure 20 : Principe de l'essai Brinell et empreinte typique de l'essai

Pour éviter la déformation de la bille et la détérioration de la bille, l'usage de l'essai Brinell est limité aux matériaux tels que $HBS < 350$ ou $HBW < 650$.

II.7.4 Essai Vickers :

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'un angle au sommet entre faces opposées égales à 136° . L'empreinte est une pyramide en creux de diagonales du carré de base. Les mesures s'effectuent à l'aide d'un appareil optique approprié ou à afficheur directe.

$$HV = 0,102X \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

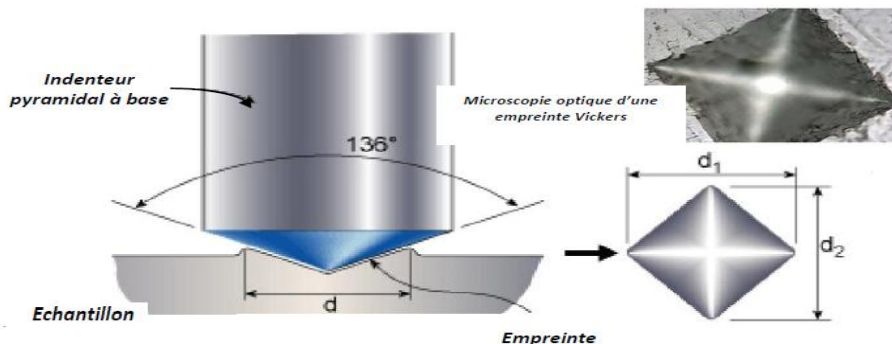


Figure 21 : Principe de l'essai Vickers

II.7.5 Essai Rockwell :

Les essais de dureté Rockwell sont des essais de pénétration. Il existe en fait plusieurs types de pénétrateurs qui sont constitués d'un cône en diamant ou d'une bille en acier trempé polie. Pour obtenir une valeur de dureté Rockwell, on mesure une pénétration rémanente du pénétrateur sur lequel on applique une faible charge.

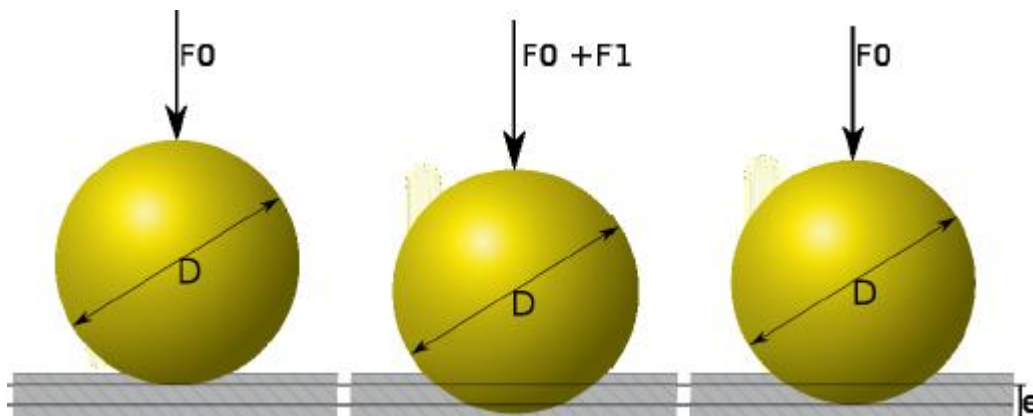


Figure 22 : Schéma de principe d'un essai de dureté Rockwell

Chapitre II Essai de caractérisation mécanique

L'essai se déroule en trois phases :

- application sur le pénétrateur d'une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l'origine qui sera utilisée pour mesurer la dureté Rockwell ;
- application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de P ;
- relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement.

La valeur de r étant l'enfoncement rémanent obtenu en appliquant puis en relâchant la force F_1 .

La valeur de dureté est alors donnée par la formule suivante :

- **échelle B, E et F**

$$\text{HRB} = 130 - r$$

- **échelle C**

$$\text{HRC} = 100 - r$$

Une unité de dureté Rockwell correspondant à une pénétration de 0,002 mm.

Conclusion :

Les propriétés mécaniques des métaux et alliages présente un grand intérêt puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux mais aussi leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées. Le choix du matériau d'une pièce industrielle dépendra des propriétés et caractéristiques mécaniques. Il est donc nécessaire de mesurer ces grandeurs physiques par différentes essais mécaniques.

Pour définir ces caractéristiques, on réalise des essais mécaniques sur des éprouvettes normalisé. Le but de ces essais est d'obtenir des valeurs et des propriétés qui définissent le comportement d'un matériau en service. Les corrélations sont entièrement empiriques et sont intéressantes du point de vue économique dans le cas où la mesure directe est difficile à effectuer.

Chapitre III : Processus de fabrication de tuyaux

Dans ce chapitre nous décrivons le processus de fabrication des tuyaux pour pipeline et les différentes techniques de contrôle et de caractérisations mécanique selon la norme API 5L :

III.1 Présentation de la norme API 5L :

La norme de spécification API 5L de l'American Petroleum Institute couvre les tuyaux de canalisation soudés et sans soudure. Ce tuyau d'acier est utilisé pour les systèmes de transport par pipeline dans les industries du pétrole et du gaz naturel.

Spécification technique :

La différence entre les acières (X42, X46, X52, X56, X60, X70) c'est la composition chimique, qui affecte leurs caractéristiques mécaniques (dureté, ténacité...)

Exemple :

X52 : (C : 0.16, Si : 0.45, Mn : 1.65, P : 0.020, S : 0.010, V : 0.07, Nb : 0.05, Ti : 0.04).

X70 : (C : 0.17, Si : 0.45, Mn : 1.75, P : 0.020, S : 0.010, V : 0.10, Nb : 0.05, Ti : 0.06).

On utilise ce matériau dans deux domaines :

- Canalisation pour transport de fluides (Pétrole, Gaz, Eau).
- Construction métallique (poteaux, pieux pour fondation).

III.2 Caractérisation de l'acier X60 :

III.2.1 Définition de l'acier :

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

C'est essentiellement la teneur en carbone qui confère à l'alliage les propriétés du métal qu'on appelle « acier ». Il existe d'autres métaux à base de fer qui ne sont pas des aciers comme les fontes et les ferroalliages par exemple.

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau à 1 200 °C, production de fonte à partir du minerai de fer naturel trouvé dans le sol en présence du coke utilisé comme réducteur ; un convertisseur à oxygène permet la conversion de la fonte en acier ; cet acier dit sauvage est affiné et sa composition chimique ajustée par décarburation et addition d'éléments chimiques (mise à nuance).
- Dans un four électrique puissant avec production d'acier liquide à partir de ferrailles récupérées et fondues, cette technique est plus économique.

Après mise en nuance, l'acier liquide est solidifié par moulage en coulée en lingots, ou en coulée continue. Ce dernier procédé, le plus usité actuellement, permet l'obtention directe des demi-produits (brames, blooms, billettes), ébauches des formes finales attendues, sans nécessité d'un passage au laminoir dégrossisseur.

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

Ensuite, d'autres étapes de laminage à chaud, puis à froid, transforment les demi-produits en produits finis. L'acier est alors exploitable et disponible à la géométrie souhaitée et sous une épaisseur très fine. [11]

III.2.2 Les aciers hauts limite élastique :

Le développement de nouveaux grades d'acier a toujours été influencé par la demande des utilisateurs, qui souhaitent des produits présentant à la fois de bonnes caractéristiques mécaniques, tels que la limite d'élasticité et la résilience, mais aussi d'excellentes propriétés de mise en œuvre assurant une fabrication en atelier et un montage de la structure efficaces. Parmi les différentes possibilités existantes pour augmenter la limite d'élasticité d'un acier, il y a deux techniques majeures :

- L'ajout d'éléments d'alliage : avec des éléments d'alliage tels que le carbone ou le manganèse, la résistance mécanique des aciers peut être aisément augmenté. Mais il est bien connu aussi que l'addition d'alliages détériore dans bien des cas les propriétés de mise en œuvre des produits en acier, en particulier leur soudabilité.
- Les traitements thermiques : ils ont un effet sur la microstructure et la taille de grain. Le principal avantage de ces processus réside dans l'obtention d'une structure à grains fins qui amène à une limite d'élasticité élevée et une meilleure résilience qu'un acier à grains grossiers (relation de Hall – Petch). [12]

III.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 stable (Nb, V, Ti). Les principaux constituants structuraux de ces aciers sont : la ferrite, la perlite, et les phases secondaires qui des carbures, des nitrures et des carbonitrures des éléments dispersifs.

Les aciers HLE 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. Selon la norme américaine API ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70,

III.2.4 Influence des éléments de substitution :

- **Le manganèse** : Le manganèse est un élément d'ajout classique dans les aciers. Il est couramment employé pour son influence sur le comportement mécanique mais également pour ses capacités à piéger le soufre sous forme de sulfure de manganèse MnS. Le soufre est nocif puisqu'il fragilise les aciers par un mécanisme de ségrégation intergranulaire.
- **Le silicium** : Il se rencontre à faible teneur dans les aciers, il est alors utilisé comme désoxydant.

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

A plus forte teneur, il augmente la résistance à l'oxydation et confère certaines propriétés particulières (perméabilité meilleure). Il durcit l'acier, mais l'empêche de souder. Les aciers contenant le Si et le Mn sont appelés mangano-siliceux, ils ont la faculté de présenter après traitement thermique un taux élevé d'allongement élastique.

Leur résilience est bien meilleure que celle des aciers au carbone, ils supportent une trempe énergétique sans risque d'éclatement moléculaire. L'effet durcissant du silicium en solution solide est aussi fort que celui du manganèse.

- **Molybdène** : C'est un élément alpha gêne qui tend à former des carbures et qui augmente largement la capacité de trempe des aciers. Il repousse vers la droite le domaine perlitique en affectant peu la position du domaine bainitique, le molybdène est donc particulièrement favorable à l'obtention des structures bainitique. A teneur équivalente, sa contribution est supérieure à celle du chrome.

III.2.5 Influence des éléments formants des précipités :

- **L'aluminium** : C'est surtout un désoxydant, le rôle du nitrure d'aluminium, qui inhibe le grossissement du grain austénitique, est bien connu. L'aluminium comme le chrome, augmente la résistance à l'oxydation des aciers, il peut intervenir dans certains processus de durcissement.

- **Le vanadium** : est un élément d'addition important : il forme avec le carbone un carbure très stable beaucoup plus dur que les autres carbures, ce qui procure à l'acier une très grande résistance à l'usure. Il n'agit pas sur la ténacité. La teneur du vanadium varie de 1 à 5%.

- **Le niobium** : Ce métal résiste à la plupart des aciers, il est ajouté sous forme d'alliages ferreux appelés Ferro-niobium, plus faciles à introduire à la fusion. Il a été révélé qu'en ajoutant dans des aciers à bas taux de carbone une faible proportion (0.1%) de niobium, on élève avantageusement la limite d'élasticité, cette amélioration est due au fait que le métal présente un grain plus fin que l'acier de carbone de même nuance, et que ce résultat a été obtenu, dans des produits laminés beaucoup plus économiquement avec le niobium que tout autre méthode. La résistance de ces produits permet une réduction du poids et une économie de 20 à 30%. Ils sont livrés sous forme des tôles, barres et peuvent être améliorés davantage par traitement thermique et ils présentent une bonne soudabilité.

- **Le titane** : Il forme des carbonitrides (carbures), il permet de fixer l'azote. Il se combine avec le soufre en donnant naissance des sulfures non déformés. L'emploi de cet élément demande des précautions car il a tendance à former gros précipités de nitrures qui ne se dissolvent pas, d'où la difficulté d'éviter la fragilisation. Il a un effet durcissant à l'état brut de laminage ; il freine la recristallisation dans l'austénite ou dans la ferrite ; il sert à affiner les grains lors d'une normalisation. [13]

III.2.6 Influence de la perlite :

La présence du carbone confère aux aciers leurs propriétés. Le carbone n'a pas besoin d'être ajouté comme addition, mais il doit être réglé à la valeur désirée. Le carbone en solution a un effet durcissant important :

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

- La quantité de perlite est proportionnelles à la teneur en carbone et dépend des éléments d'alliage en solution solide ; elle augmente fortement la résistance de l'acier, mais son effet est bien moindre sur la limite d'élasticité, environ deux à trois fois moins.
- Le rôle du carbone sur la résistance à la rupture fragile est très important car les lamelles de cémentite servent à la fois de défauts d'amorçage et pour la propagation des clivages.

III.2.7 Avantage des aciers HLE :

- Ils combinent la soudabilité améliorée due au très faible niveau de carbone et bonne formabilité, leurs caractéristiques mécaniques facilitent le formage sur presses et sur lignes automatisées.
- Ils se caractérisent de plus par une bonne tenue à la fatigue et à la résistance au choc.
- Grâce à leur limite élastique élevée (R_e), ils ont particulièrement adapté lorsqu'une réduction de poids est recherchée, c'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction.

III.3 La composition chimique de l'acier X60 :

Le matériau d'étude est l'acier micro allié de norme API 5L X60 destinée pour la fabrication des tubes hélicoïdaux, pour le transport du gaz. Cet acier présente une fine microstructure de type ferrito-perlitique. Sa composition chimique a été déterminée après prise d'éprouvette sur la machine spectro (analyse chimique). Est donné dans le tableau 5.

Ces propriétés mécaniques sont données dans le tableau 6 (limite élastique $E_{0,5}$ MPA, résistance à la traction MPA, Allongement A%, résilience j/cm^2).

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

ÉLÉMENT / NUANCE	% C Maxi	% Mn Maxi	% Si Maxi	% P Maxi	% S Maxi	%CEpcm Maxi
X 60M	0.1 2	1.600	0.450 0	0.025	0.015	0. 25
<p>Cu ≤ 0,50 %, Ni ≤ 0,30 %, Cr ≤ 0,30 %, Mo ≤ 0,15 %, B ≤ 0,001 %, V ≤ 0.100 %</p> <p>Nb + V + Ti ≤ 0.150 %. S + P ≤ 0,070 %</p> <p>Nb + V ≤ 0.140 %. Nb ≤ 0.100 %</p> <p>Carbone équivalent :</p> <p>$CE_{pcm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B,$</p> <p>Le carbone équivalent CE_{PCM} sera calculé conformément aux termes de l'API 5L.</p> <p>Fréquence d'analyse :</p> <p>Deux (02) analyses par coulée d'acier (sur 02 tubes de bobines différentes).</p>						

Tableau 5 : composition chimique de l'acier X60 selon l'API 5L

Limite élastique E 0,5 (MPA)		Résistance de Traction (MPA)		A % Mini	Résilience (j/cm ²) à -10° C Mini	
Mini	Maxi	Min i	Maxi			
415	565	52 0	760	27	Métal de base	Individuelle : 68 Moyenne 90
					Soudure et ZAT	Individuelle : 50 Moyenne 62

Tableau 6 : Caractéristique mécanique de l'acier X60 selon l'API 5L

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

III.4 Le fil de soudure :

Le couple fil et flux de soudage, objet de cette spécification technique pour consultation est destiné au soudage des tubes soudés en hélicoïdal à l'arc sous flux solide (arc submergé) des nuances API 5L en vigueur, X42M, X52M et X60M.

Ce couple doit donner des résultats satisfaisants de soudabilité et de caractéristiques mécaniques et doit être essentiellement approprié au soudage du métal de base X60M API 5L PSL2 dont les propriétés mécaniques et compositions chimiques sont citées dans les tableaux précédents.

Le fil plein pour soudage sous flux solide utilisé auparavant à la classification :

AWS A5.23/A5.23M: EA2

ISO 14171-A: S2Mo

Sa composition chimique est donnée dans le tableau 7 :

Désignation	C	Si	Mn	P Max	S Max	Mo	Ni max	Cr m ax
S2Mo	0.07 0.12	0.05 0.25	0.80 1.20	0.02	0.015	0.45 0.65	0.15	0.15

Tableau 7 : composition chimique du fil de soudage

Il se présente comme suit :

Forme : Fil en couronne.

Dimensions : Diamètre du fil : 3 et 4.0 mm (+0.01/-0.05mm).

Poids : couronnes en fut de poids : 350Kg minimum.

III.4.1 Défauts nocifs du fil :

- Les rabouages de fil (soudage des fils bout à bout) ne sont pas tolérés.
- L'oxydation n'est pas admise.
- Les spires entremêlées ne sont pas tolérées.
- L'hétérogénéité du cuivrage du fil n'est pas tolérée.
- Les brisures de fil (déformations) à angle vif ne sont pas tolérées.
- Les écorchures (arrachements de métal) ne sont pas tolérées

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

C'est flux aggloméré (Aluminate-Basique), dont la classification est :

AWS A5.17/A5.23: F8A4-EA2-A2

Sa limite élastique et sa résistance à la traction sont données dans le tableau 8 :

Désignation	Limite élastique, mini (N/mm ²)	Résistance à la traction, mini (N/mm ²)
Fil/Flux	480	550

Tableau 8 : caractéristique mécanique du fil/flux

Il se présente comme suit :

Forme : FLUX en sac plastifié. Dimensions : Granulométrie : 2-20 mm. Poids : sacs plastifiés de 25Kg mini.

Remarque :

- Un essai de lot devra être fait pour chaque livraison de fil de soudage.
- Une analyse de lot devra être faite pour chaque livraison de fil de soudage.
- Le fournisseur est tenu de transmettre à l'acheteur toutes les informations nécessaires ainsi que les paramètres de soudage pouvant aider le client à réussir son procédé de soudage.

III.5 Processus de fabrication du tube :

L'atelier de fabrication des tubes est composé d'une machine de ceintrage, soudage, une chanfreineuse des extrémités des tubes, d'un pont hydraulique pour contrôler la résistance et la pression des divers équipements de contrôle comme ultrason et en rayon X.

Les tubes en acier sont fabriqués sous la responsabilité du département de production au niveau de l'atelier, au début l'entreprise réceptionne la matière première sous forme des bobines en acier importés chez des fournisseurs étrangère (France, allemand, ...) ou fournisseur local (El-Hadjar) selon des critères de qualité de la norme API 5L en matière de composition chimique de caractéristique de résilience, mécanique de durabilité et bonne soudabilité.

Ces bobines seront placées dans une chaîne de fabrication, qui est constituée de plusieurs machines où les tubes prendront leurs formes, pour assurer la production des tubes l'entreprise (atelier) il faut passer par ces différentes étapes pour obtenir un produit final :

- Formage et soudage.
- Coupage.
- Chanfrein
- Contrôle hydraulique.

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

- Contrôle ultra-son.
- Contrôle rayon-x.
- Revêtement.

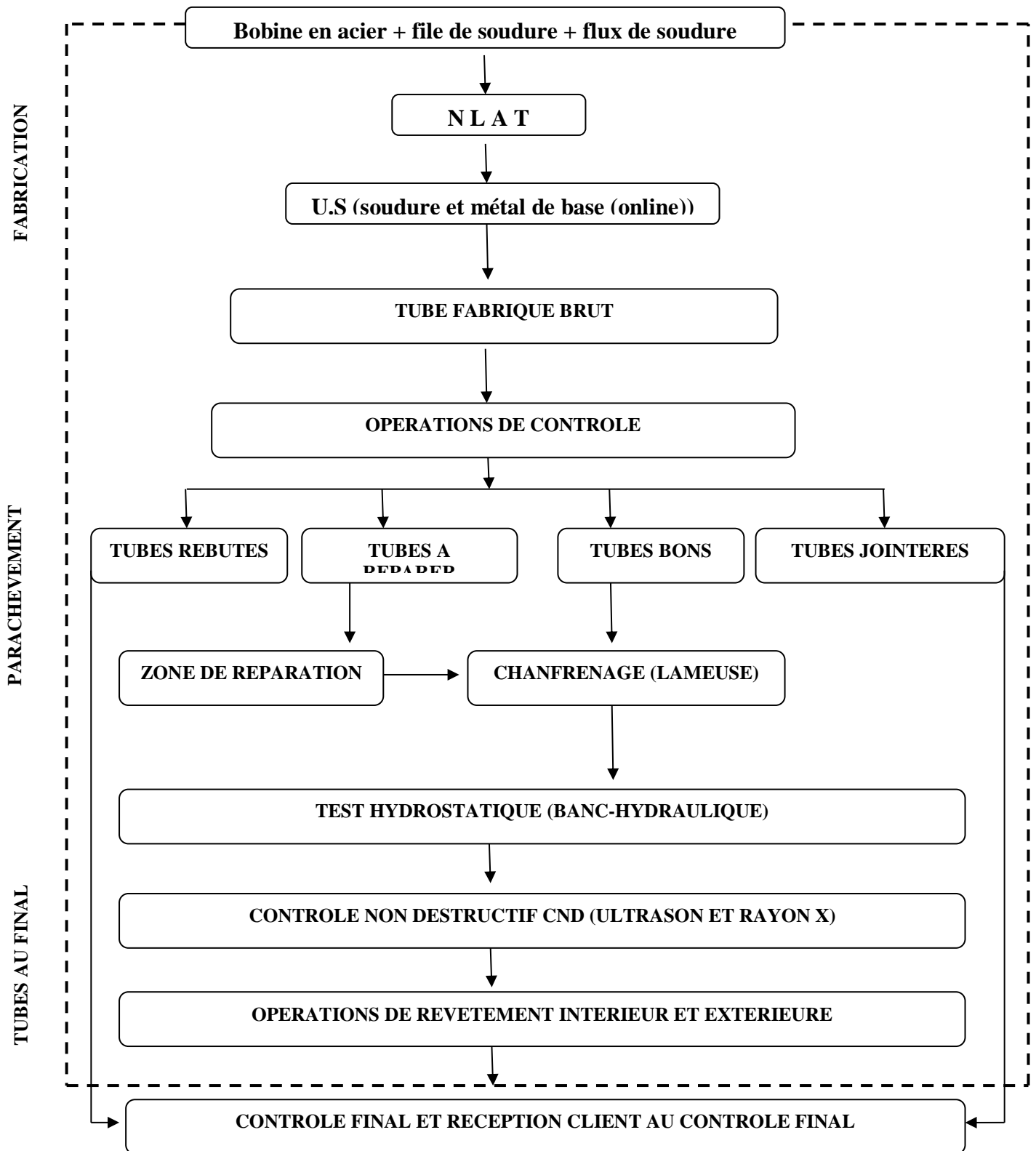


Figure 23 : Soudage par la machine automatique

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

PROCESSUS DE PRODUCTION DES TUBES EN SPIRAL :

La fabrication des tubes soudés en spirales passe par différentes étapes, elles seront résumées dans l'organigramme suivant :



Processus de production des tubes en spirale

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

III .5.1 Les étapes de production :

a) Réception de la Matière première :

La matière première qui est l'acier feuilleté sous forme de grosses bobines pesant de **13** à 25 tonnes importés chez des fournisseurs étrangère (France, allemand, ...) ou fournisseur local (El-Hadjar. Elles seront contrôlées en mesurant ça longueur, son épaisseur, son tonnage, et détecter les défauts surfaciques.



Figure 24 : les bobines en acier

b) Formage et Soudage :

Ces bobines seront placées dans une des machines citées ci-dessous, La tôle entraînée par des rouleaux pousseurs, dans ce trajet subi l'étape de fraisage pour nettoyer ces rives de bande de la rouille et la poussière, ainsi que le brossage pour enlever les bavures de rives et préparer la tôle. Elle continue son parcours vers la cage de formage où les tubes prendront leurs formes.

Les tubes passeront par le procédé de soudage intérieur et extérieur avec la Soudure à l'arc submergé. Les deux opérations passent au même temps En utilisant ces deux machines



Figure 25 : soudage

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

c) Coupage :

Après une certaine longueur (exigé par le client) les tubes seront coupés soit par la méthode appelée oxycoupage (traditionnelle) ou coupage à plasma.



Figure 26 : coupage à plasma

d) Chanfreine :

Après le coupage les tubes passeront vers la chanfreineuse. Cette machine crée des Chanfreins dans les deux extrémités des tubes c'est-à-dire d'une inclinaison (Un méplat) bien



définis, exigées par le client. Ceci afin de faciliter la soudure sur chantier entre deux tubes consécutifs.

Figure 27 : chanfreineuse



Avant chanfrein



après chanfrein

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

e) Revêtement :

Comme les tubes sont susceptibles d'être attaqués par le phénomène de corrosion interne et externe. On utilise généralement la technique classique des trois couches et fusion Bonded, Epoxy (FBE) pour l'isolation extérieure, nous utilisons aussi bien du polyéthylène (PE) afin de protéger les tubes à l'intérieur et l'extérieur. (Figure)

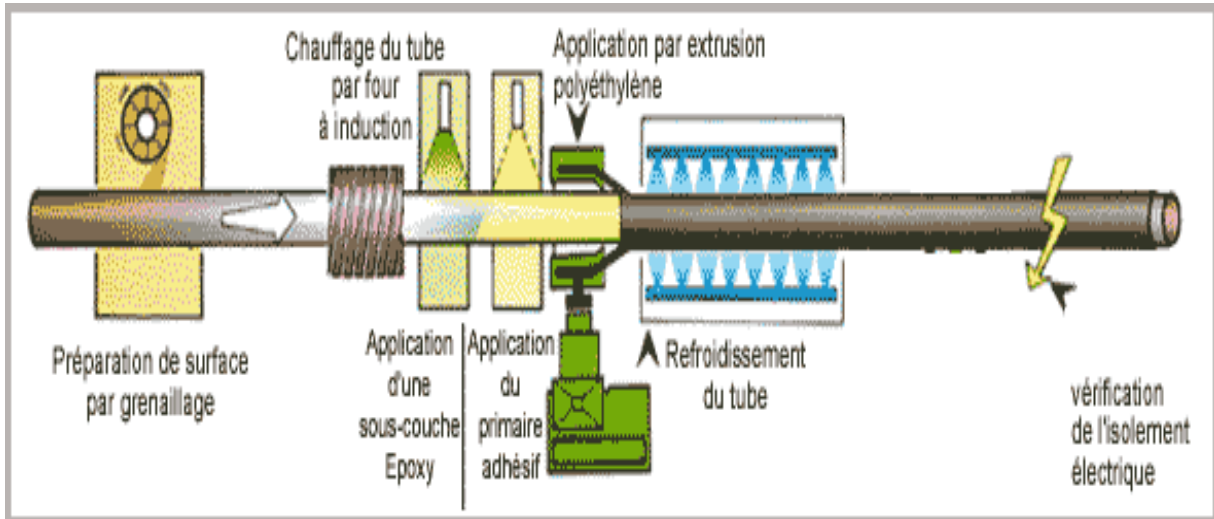


Figure 28 : procédé de revêtement

i- Revêtement Extérieure :

Il s'applique sur les tubes destinés au transport de l'eau, gaz du pétrole et tout autre fluide dont les températures n'excédant pas les limites de 70° et ce dernier est utilisé pour :

- La canalisation externe.
- La canalisation immergée en eau douce ou salée.

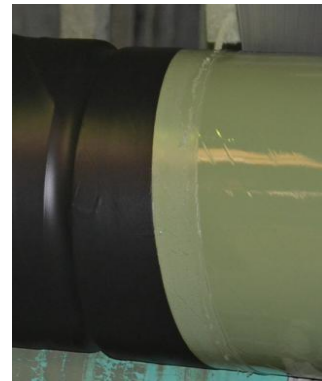


Figure 29 : le revêtement extérieur

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

ii Revêtement intérieure :

Pour lutter efficacement contre la corrosion interne, ALTUMET utilise le revêtement intérieur en résine époxy. Le principe de protection par une couche de résine époxydique a créé une barrière étanche parfaitement adhérente entre fluide véhiculé et le métal.



Figure 30 : revêtement intérieur

III.5.2 Les contrôles effectués sur le tube :

Pour pouvoir certifier la bonne qualité du produit final selon l'exigence de la norme API5L et le client, le tube doit subir et réussir un ensemble de tests à la fois sur le métal de base et sur le cordon de soudure, ces derniers qui sont répartis en deux catégories (non destructive TND et destructive TD).

Les tests non destructifs : c'est un ensemble de tests appliqués sur les tubes (MB et CS) pour vérifier la conformité des tubes, et soustraire d'éventuels défauts qui ne sont pas visibles à l'œil nu, et qui sont répartis comme suit :

- **Contrôles Visuels** : c'est le premier contrôle effectué sur le tube parmi une série de tests successifs après sa sortie de la machine de formage et soudage puis son découpage à la longueur voulue, le tube sera contrôlé visuellement, pour détecter d'éventuels défauts de fabrication par un opérateur contrôle qualité, sous une lumière de 350 lux au minimum, les contrôleurs doivent vérifier les paramètres suivants :

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

PARAMETRE	METHODE DE MESURE
Diamètre (mm)	Micromètre (ruban gradué)
Épaisseur de la paroi (mm)	DM2 (micromètre)
Longueur (mm)	Double décimètre
Rectitude (mm)	Fil à plomb et règle
Equerrage des extrémités de tube (mm)	Equerre
Effet de toit (mm)	Comparateur
Déniellation (décalage de soudure) (mm)	Comparateur
Hauteur du cordon de soudure (mm)	Calibre d'élévation
Largeur de cordon de soudure (mm)	Règle
Angle de chanfrein (mm)	Compas de chanfrein réglable
Talon de chanfrein (mm)	Règle
Enfoncement (mm)	Règle

Tableau 9 : paramètre de contrôle visuel

Si le tube est conforme l'opérateur lui met une bonde bleue et sera prêt au test suivants, si ce n'est pas le cas l'opérateur lui met une bonde rouge et le tube sera transféré vers la réparation.



Figure 31 : control visuel

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

- **Contrôle par Hydrostatique :**

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique). Les tubes sont testés à 90% de leur limité élastique selon API 5L et la spécification du client, Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai à 123 bars pendant 18 secondes. Les Étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes.



Figure 32 : teste hydrostatique



Figure 33 : graphe montrant un tube défailant

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux



Figure34 : graphe montrant un tube défaillant

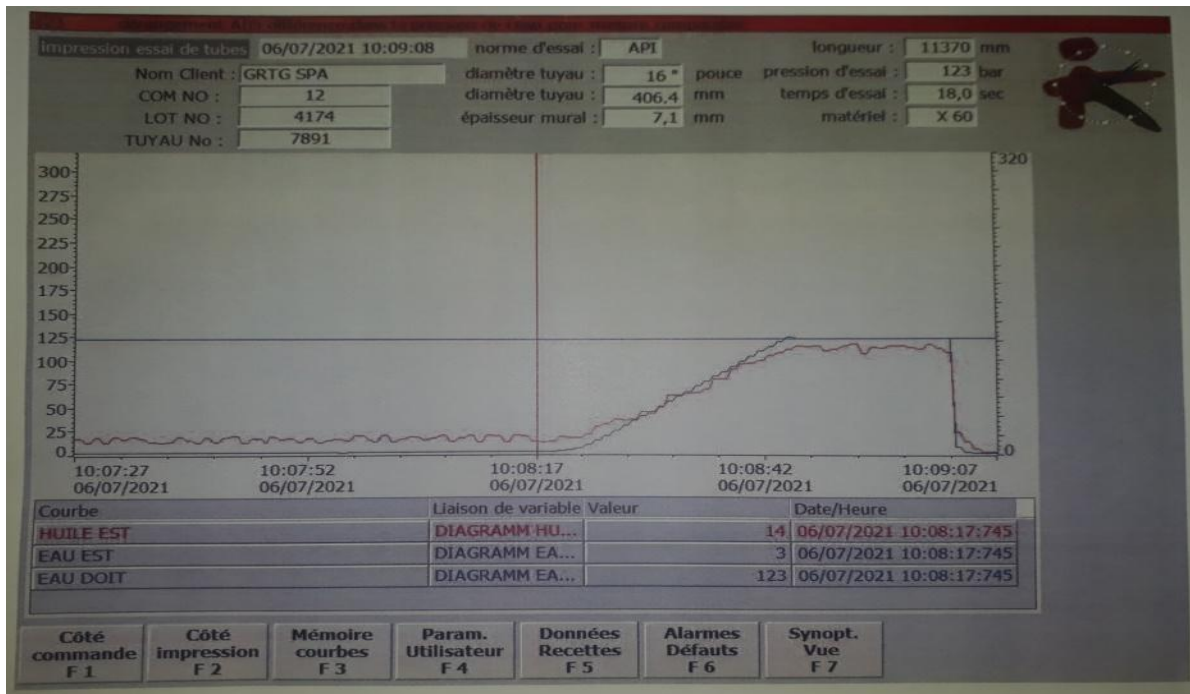


Figure 35 : graphe montrant un tube conforme

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

- **Contrôle par ultrasons :**

Le contrôle par ultrasons est une étape cruciale dans ce processus, les tubes seront envoyés vers la machine du contrôle Ultra Sonore NDT qui contient des palpeurs qui émettent des ondes ultras sonores qui permettent de détecter n'importe quel défaut sur le cordon de soudure ou bien le métal de base (Si une anomalie est détectée un petit jet de colorant est injecté instantanément dans la zone qui présente le défaut). Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur PC puis imprimé sur papier (rapport Ultrason ou numéro du tube y est reporté).



Figure 36 : Graphe des ondes en fonction du temps

Pour contrôler la fiabilité de l'installation ultrasonique, un tube étalon est passé périodiquement en contrôle début et fin de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tous les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle



Figure 37 : control ultrason

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

- **Contrôle radiographie (RX) :**

C'est le dernier contrôle effectuée sur l'ensemble des tubes fabrique, selon les spécifications de l'API 5L 46^{eme} édition, la radiographie X est effectuée seulement sur le cordon de soudure situe aux extrémités detube, d'où le repérage de défaut se fait par une prise de clichés qui seront interprété par le négatoscope.



Figure 38 : Control radiographie

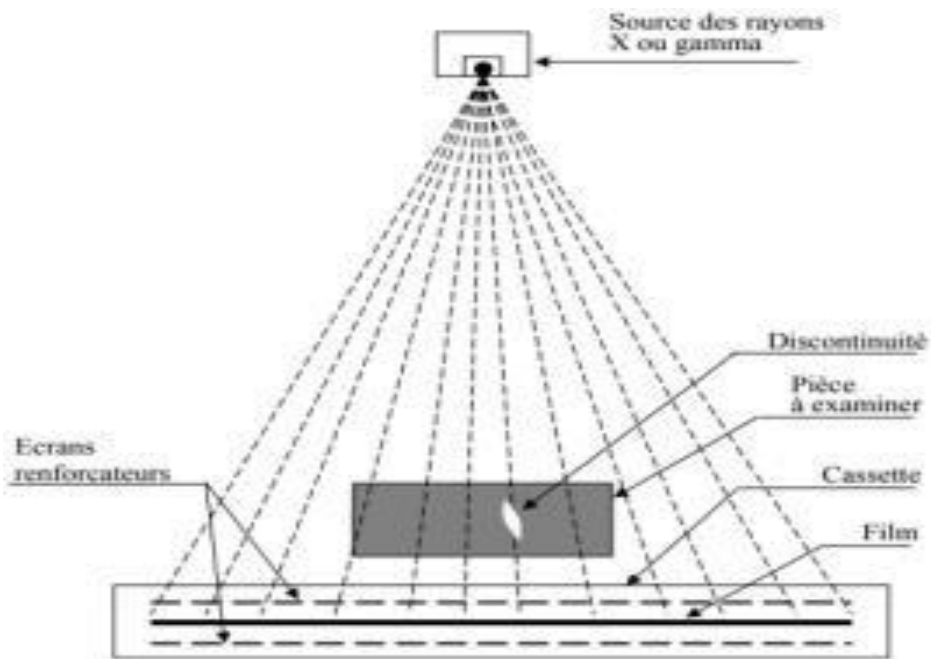


Figure 39 : Montages de base pour la radiographie sur fil

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

- **Contrôle Radioscopie :**

La radioscopie est un procédé dans lequel les rayons obtenus sont numérisés et traités. La radioscopie est basée sur le même principe que la radiographie, mais le film est remplacé par un amplificateur de brillance suivi par une chaîne de télévision en circuit fermé à très haute définition. L'examen radioscopique permet de visualiser en temps réel le cordon de soudure et ça tout au long du tube.

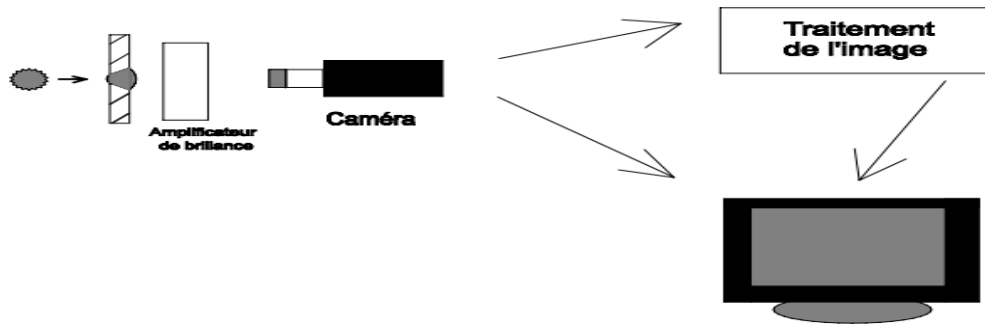
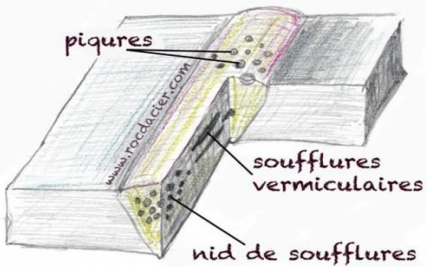

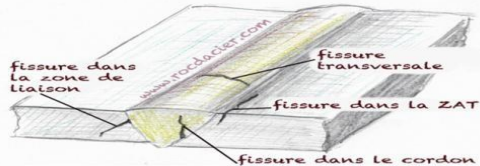
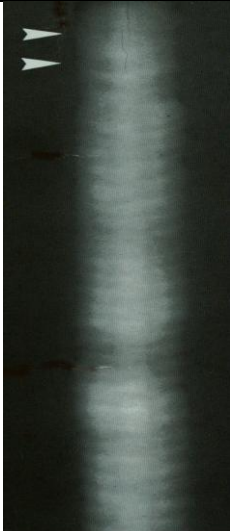
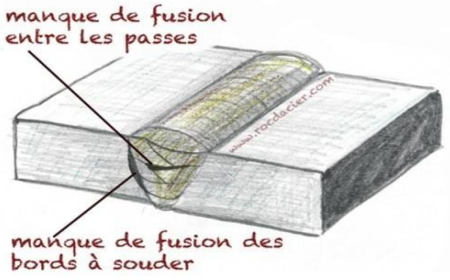

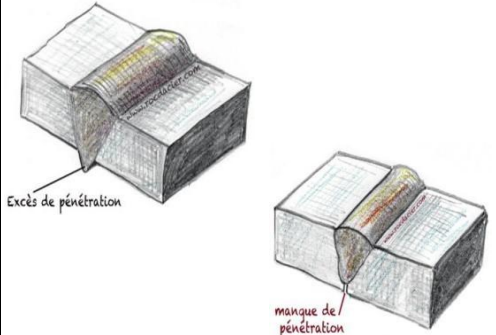
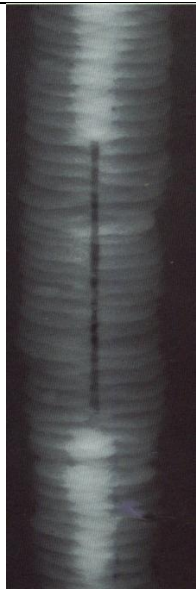


Figure 40 : Control radioscopie

Quelques exemples sur les défauts du cordon de soudure :

Défaut	Définition	Apparition sur l'écran	Causes	Solution
<p>Défauts de soufflures ou cavités</p>	<p>Les soufflures (cavités) sont des défauts fréquents en soudage. Ce sont souvent des bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure. Les piqûres sont des soufflures débouchantes, donc visibles en surface</p> 		<p>Les soufflures peuvent être dues :</p> <ul style="list-style-type: none"> - à des courants d'air - Un manque de gaz de protection - Un débit de ce gaz trop faible - La présence de graisse ou de métal d'apport, - Une buse encrassée - Un mauvais angle de soudage qui entraîne une mauvaise protection gazeuse, - Des impuretés dans le joint à souder. 	<p>Pour limiter le risque des soufflures :</p> <ul style="list-style-type: none"> - S'assurer que la surface du métal de base et d'apport est propre et non grasse. - Vérifier la protection gazeuse - Une intensité de courant trop faible et une vitesse de soudage trop élevée peut entraîner ce défaut - Les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base.
<p>Défauts de fissures</p>	<p>Les fissures sont des ruptures du matériau. Elles sont orientées selon le type de défaut.</p> <p>Ces fissures peuvent se trouver aussi bien dans le métal de base que dans le cordon de soudure, dans la zone affectée thermiquement ou la zone de liaison</p> 		<p>Les fissures peuvent être dues :</p> <ul style="list-style-type: none"> - à des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté...) - Volume de cordon trop faible (préparation des bords trop étroite...) - Arrêt trop brutal de la soudure - Arrêt prématuré de la protection gazeuse en TIG. 	<p>Pour éviter les fissures :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Choisir un métal d'apport approprié - Adopter un préchauffage approprié - Effectuer une bonne préparation des joints

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

<p>Manque de fusion (collage)</p>	<p>il s'agit d'une mauvaise continuité métallurgique entre les métaux à assembler. Il peut aussi s'agir de manque de fusion des passes les unes avec les autres.</p>  <p>manque de fusion entre les passes</p> <p>manque de fusion des bords à souder</p>		<p>Ces défauts sont fréquents en soudage MAG et surviennent généralement quand :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Angle du chanfrein trop étroit - Mauvaise orientation des électrodes - Intensité trop faible 	<p>Mettre en œuvre un DMOS (descriptif du mode opératoire de soudage) adapté.</p>
<p>Pénétration</p>	<p>Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration.</p> <p>L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente.</p>  <p>Excès de pénétration</p> <p>manque de pénétration</p>		<p>Causes d'excès de pénétration :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jeu de soudage trop grand - Vitesse d'avance trop lente - Intensité trop élevée - Distance électrode/pièce trop courte. <p>Causes de manques de pénétration :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Jeu de soudage trop petit (pièces trop rapprochées) - Vitesse d'avance trop élevée - Intensité trop faible - Métal de base trop froid 	<p>Excès de pénétration :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réduire le jeu de soudage - Souder plus vite - Réduire l'intensité - Rapprocher la torche de la pièce pendant le soudage. <p>Manque de pénétration :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Agrandir l'écart des pièces à souder - Souder plus doucement - Augmenter l'intensité - Préchauffer les pièces

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

III.6 Essais mécaniques :

Dans cette partie on présente les différents types d'essais mécaniques utilisés pour la caractérisation des tubes, c'est un contrôle destructif :

Les contrôles destructifs sont des tests infligés directement sur le métal de base ou le cordon de soudure ou les deux à la fois, ces des tests qui sont réalisé à partir de différentes éprouvettes avec des dimensions précisé par la norme API 5L et qui se font régulièrement (la prise d'échantillon s'effectue pour chaque lot qui est constitué de 50 tubes).

Ces contrôles sont effectués dans un laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement, afin de consolider la qualité du produit fabriqué par ALTUMET.

- Limite élastique par traction.
- Résistance a la rupture.
- Allongement.
- Résistance aux chocs.
- Dureté du métal de base.
- Résistance au pliage.

Les éprouvettes pour chaque type d'essai, sont prélevées d'un tube soudé en spirale, dans le métal de base (MB), dans la soudure (S) et dans la zone affectée thermiquement (ZAT) comme montrée dans la figure 41

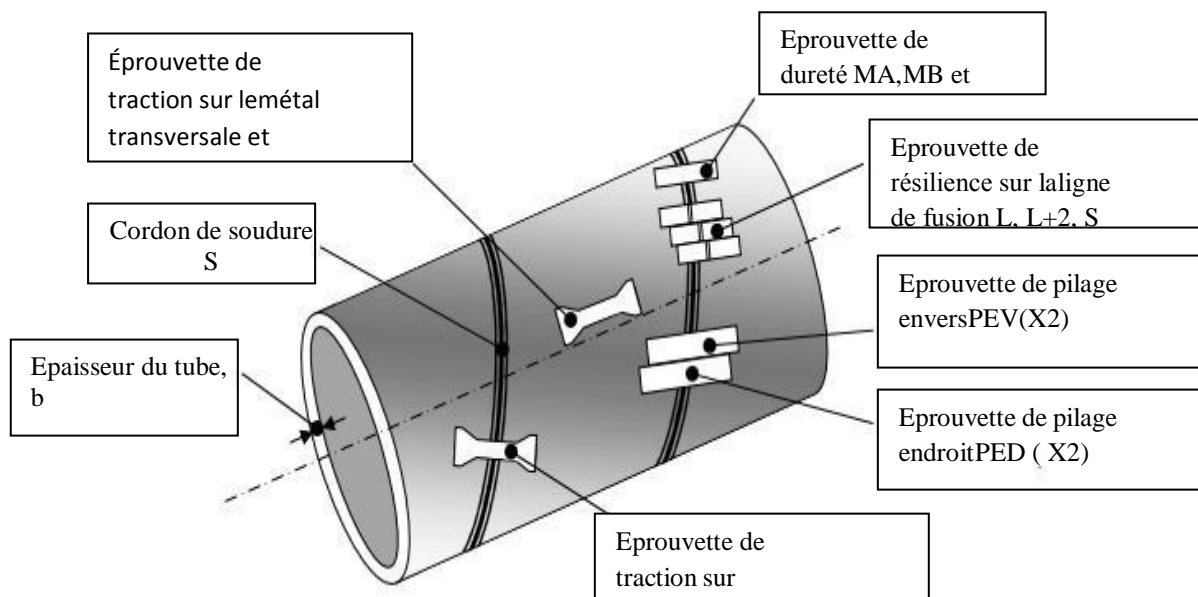


Figure 41 : prélèvement des éprouvettes pour les examens métallurgiques.

Sur la base des résultats obtenus, deux cas peuvent se présentée :

- **Résultat conforme** : le laboratoire donne l'accord de poursuivre la production.
- **Résultat non conforme** : dans ce cas le laboratoire effectue un deuxième teste sur un

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

autre tube du même lot, en cas d'anomalie (résultats non conforme) en procèdera a un teste sur un tube de la même bobine de la même coulée.

III.6.1 Essai de traction :

Nous avons réalisé l'essai de traction à l'aide d'une machine de traction de marque « ZWICK ROELL » ; qui consiste à soumettre une éprouvette à un effort progressif d'extension. Cette machine est équipée d'un extensomètre permettant l'enregistrement de diverses mesures en parallèle au cours d'essai dont le but de déterminer certaines propriétés du métal constituant l'éprouvette. L'essai est réalisé à la température ambiante avec une précharge de 2 MPa. (Figure 42)

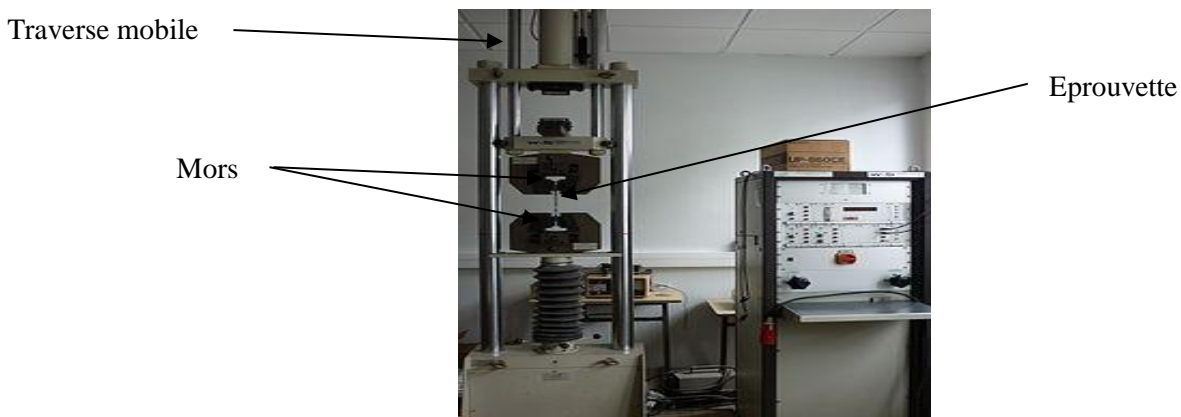


Figure 42 : Machine d'essai de traction

Les éprouvettes que nous avons utilisées sont prélevées sur le métal de base et sur la soudure. Obtenues par usinage. Avant l'essai, on met les repères sur l'éprouvette avec une longueur entre repères (L_0). (Figure 43)

Les caractéristiques dimensionnelles sont résumées dans le tableau 6

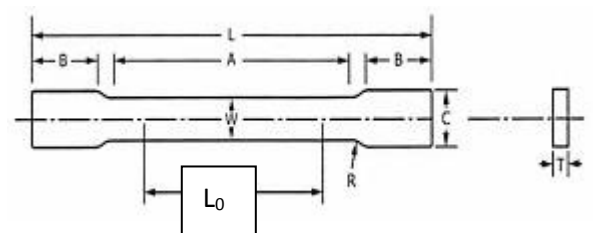


Figure 43 : Eprouvette d'essai de traction selon la norme AFNOR.

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

Type d'essai	Désignation	Exigence nominale (mm)	Tolérance (mm)	Norme de preparation
Traction	Longueur de l'éprouvette (L)	350	-----	ASTMA 370
	Largeur de la partie calibré (W)	40	+3,-6	
	Longueur de L ₀	50.8	±0.10	
	Largeur de l'éprouvette (C)	50	-----	

Tableau 10 : caractéristiques dimensionnelles des éprouvettes de traction

L'essai de traction permet de déterminer les propriétés mécaniques suivantes :

σ : Limite élastique	Avec	E= Fe / S ₀ (Kg / mm ²) ;
R : Résistance à la rupture	Avec	R x Fe / S ₀ = Fr / S ₀ (Kg / mm ²);
A% : Allongement	Avec	A%= (L _f - L ₀ / L ₀) x 100 ;
Rapport	Avec	E / R ;
E : Module de YOUNG		E= (P / Δ L) x (L ₀ / S ₀).

Avec

P : La charge

S₀ : Section de l'éprouvette

Fe : Charge à la limite élastique

Fr : Charge à la rupture

III.6.2 Essai de dureté VICKERS :

Nous avons réalisé l'essai de dureté à l'aide d'une machine de dureté de marque «ZWICK Roell ZHV 10 » (figure 45). Qui a pour but la caractérisation de la capacité d'un matériau à résister à la pénétration, de vérifier la dureté globale d'un matériau et de contrôler l'homogénéité entre la dureté du métal d'apport (soudure) et celle de métal de base.

Les conditions de cet essai sont :

- La charge 10 kgf ;
- Le pénétrateur Vickers est pyramidal à base carré (figure 20), en diamant ; Appelant P la charge et d la longueur de la diagonale de l'empreinte carrée obtenue. La valeur de dureté HV est déterminée par : $HV = (2 \times P \sin 136^\circ / 2) / d^2$

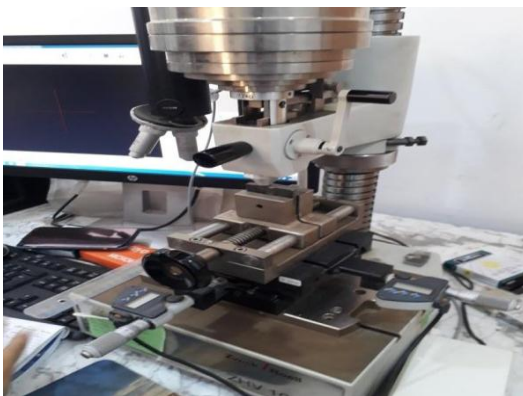


Figure 44 : Réalisation de l'essai de dureté ; Machine de dureté Vickers

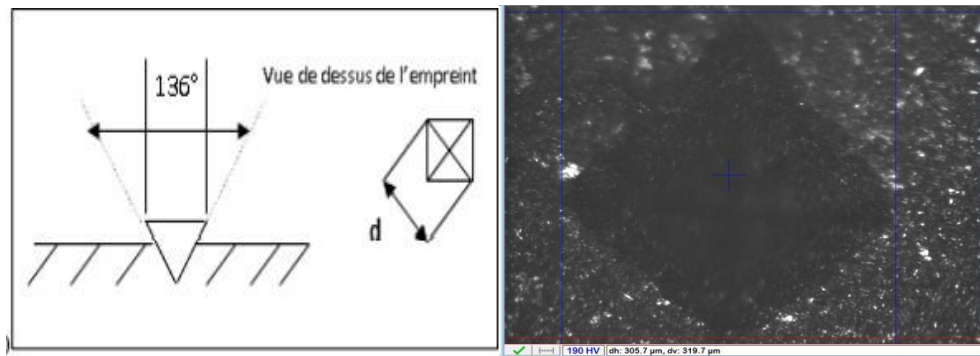


Figure 45 : Vue de dessus de l'empreinte.

III.6.3 Essai de pliage :

Après avoir prélever une éprouvette sur le cordon de soudure et l'amener à l'atelier de tournage pour qu'elle soit redressé à froid et araser sur les deux cotés à l'aide d'une fraiseuse, puis arrondir ces arrêtes à un ongle égal à 1/10 de l'éprouvette, nous avons placé cette dernière sur la même machine de traction qui peut être utiliser aussi pour l'essai de pliage avec un outil qui s'adapte sur elle, d'où on a fait subir une force de 2 kgf sur les deux facettes.

Les éprouvettes seront pliées à froids à **180°** dans un gabarit, par poinçonnage entre deux rouleaux par un élément mâle, la soudure étant placé dans la zone de pliage maximale, et cela afin de vérifier qu'il ne se produit aucune amorce de rupture tant dans la soudure que dans la zone de transition.

Remarque : cette éprouvette ne doit en aucun cas contenir des soudures de réparation

III.6.4 Essai de résilience :

L'essai de résilience par définition ; est la résistance au choc d'un matériau. L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule ; une éprouvette entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie absorbée pour détruire l'échantillon dans le but d'apprécier la qualité du métal, l'essai est effectué sur 9 éprouvettes différentes (Figure 46)

- 3 éprouvettes du métal de base ;
- 3 éprouvettes de la ZAT (zone affectée thermiquement) ;
- 3 éprouvettes du cordon de soudure



Figure 46 : Mouton pendule de type P W 30/ 15 TESTWELL

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

Les caractéristiques du mouton pendule utilise dans ce travail sont :

- Mouton pendule de type **P W 30/ 15 TESTWELL**
- Force maximale 30 **daN/m**
- Dispositif mécanique pour l'usinage des entailles.
- Deux types de broches à entailles **U et V (2, 3, 5 mm)**.
- Un dispositif de refroidissement d'éprouvette.



Figure 47 : machine pour refroidissement d'éprouvette

Le type d'éprouvette utilisée est éprouvette a entaille en V (figure 17)

L'essai de résilience permet de recueillir plusieurs informations :

a) Energie absorbée :

Cette valeur est obtenue par lecture directe sur le cadran et on retient sur trois éprouvettes la valeur moyenne.

$$W = P \times (h_1 - h_2) \text{ kg. m}$$

Avec : **P** : force appliquée

h₁ : hauteur du pendule à l'état initial.

h₂ : hauteur du pendule à l'état final

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

b) Résilience :

C'est l'énergie absorbée ramenée à l'unité de section et s'exprime en J/cm^2 .

$$K = W / S$$

Avec : **W** : énergie absorbée.

S : section de l'éprouvette.

Formes et dimensions des éprouvettes de résilience (selon la norme NF E 10045. 1) :

Les éprouvettes ont la forme d'un parallélépipède rectangulaire ; leur orientation est parallèle à l'axe longitudinal du tube.

Eprouvette Charpy V

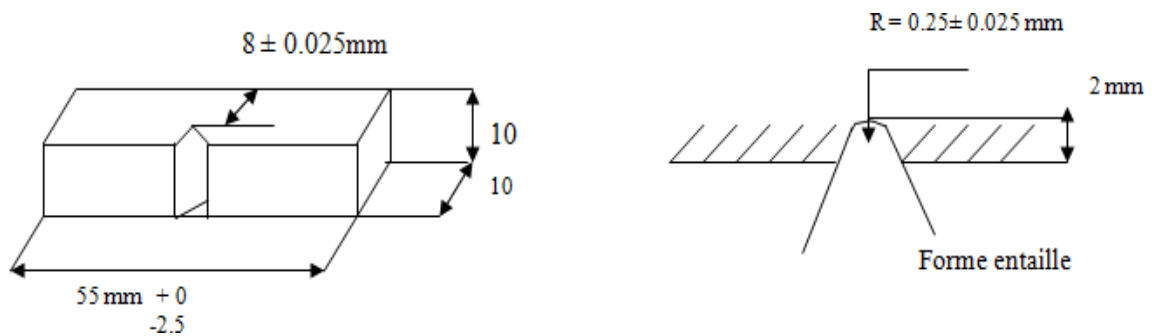


Figure 48 : Eprouvette Charpy V



Figure 49 : Eprouvette avant destruction



Figure 50 : Eprouvette après destruction

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

Plusieurs propriétés du matériau sont mises en évidence par cet essai à savoir :

- La fragilité du matériau à une T° donnée.
- L'aptitude à la rupture ductile.
- Capacité de déformation.
- Résistance à la décohésion.

III.7 Examens macrographique

C'est un examen avec cliché, effectuer couramment en cours de fabrication dans le but de révéler la géométrie du cordon de soudure, de contrôler la bonne inter-pénétrabilité des deux passes intérieur et extérieur et l'axage des cordons de soudure.

- La surface à examiner doit être nette.
- Il faut éviter tout effet de trempe ou échauffement qui pourrait modifier la structure de l'échantillon.

Appareils utilisés :

- a-** Polisseuse de modèle **GRIPO 2M** équipé de deux moteurs indépendants ayant deux vitesses fixes de **150, 300 tr /min**. Permet le pré polissage et le polissage des échantillons.
- b-** Alimentation **380 V**.
- c-** **MICRO CAM de POLAROID** permet de réaliser des photographies instantanées.

Le polissage se fait généralement en deux étapes :

1) Pré polissage :

Il se fait par frottement de l'échantillon sur du papiers abrasifs de granulométrie de plus en plus fine. Le polissage se fait habituellement sous eau.

Granulométrie utilisée :

- d-** Echantillon brut : 120 – 180 – 320 – 400 – 600
- e-** Echantillon passé à la bande abrasive : 180 – 320 – 400 – 600.
- f-** Echantillon rectifié : 320 – 400 – 600.

Après la finition de polissage ; l'échantillon est nettoyé à l'alcool, puis soumis à l'attaque d'un produit chimique

(Acide nitrique HNO₃).

Lorsque la macrostructure est bien visible l'échantillon est lavé à l'eau ; rincé à l'alcool et séché.



Figure 51 : Epreuve montrant le cordant de soudure apprêttraitement chimique

L'examen macrographique permet d'avoir les renseignements suivants :

- Largeur des cordons supérieur et inférieur.
- Pénétration et l'interpénétration des cordons supérieur et inférieur.
- Hauteur de surépaisseur des cordons supérieur et inférieur.
- L'épaisseur réelle.
- Le désaxage.

III.8 Analyse chimique :

Nous avons effectué une analyse chimique à l'aide d'un spectromètre à émission optique de marque « Oxford Instruments /FOUNDRY-MASTER Pro » disposé au niveau de l'entreprise ALTUMET Spa, dans le but de confirmer la composition chimique des bobines (métal de base).



Figure 52 : Spectromètre à émission optique utilisé pour l'analyse chimique

CHAPITRE III Processus de fabrication des tuyaux

L'importance de la composition chimique apparait par son influence sur la soudabilité et la résistance à la corrosion, ainsi que les caractéristiques mécaniques. Il est donc indispensable de vérifier ce paramètre afin de satisfaire toutes les exigences.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. L'analyse chimique :

On a réalisé une analyse chimique sur le métal de base, afin de déterminer sa composition. Un échantillon du métal de base de dimension 30X30 cm, est mis sur le spectromètre à émission optique de marque « Oxford Instruments /FOUNDRY-MASTER Pro »
 Les résultats obtenus par cette machine du laboratoire de l'entreprise ALTUMET Spa Réghaia sont classés dans le tableau suivant :

Eléments	L'indice	Valeurs max (%)
Carbone	C	0,0626
Manganèse	Mn	1,31
Silicium	Si	0,240
Aluminium	Al	0,0312
Niobium	Nb	0,0355
Vanadium	V	0,0021
Titane	Ti	0,0127
Nickel	Ni	0,0145
Cuivre	Cu	0, 0218
Chrome	Cr	0,0277
Molybdène	Mo	0,0019
Soufre	S	0,0037
Phosphore	P	0,0213
Calcium	Ca	0,0014
Cobalt	Co	0,0005
Plomb	Pb	0,0023
Étain	Sn	0,0037
Bore	B	0,0004
Zirconium	Zr	0,0039
Zinc	Zn	0,002
Arsenic	As	0,0022

Tableau 11 : Composition chimique du métal de base.

Carbone équivalent :

$$CE_{pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$CE_{pcm} = 0,160 \% < 0,25$$

Chapitre IV : Résultat et discussions

Après avoir effectué l'analyse chimique sur le métal de base. On a déduit certaines caractéristiques :

- Cet acier est un acier hypoeutectoïdes faiblement allié comme on peut l'appeler acier au carbone-Manganèse, qui présente une faible teneur en carbone, ce qui permet d'avoir une bonne soudabilité.
- Les résultats obtenus sont comparés avec ceux du fournisseur et de l'API et aussi les exigences du client, ce qui nous permet de définir les premiers critères d'acceptation d'une commande et aussi certaines caractéristiques du matériau.

IV.2. Essais de traction :

Un protocole d'essais de traction sur le métal de base et sur cordon de soudure ont été réalisé selon la norme API 5L. Les résultats sont exposés sous forme de tableaux et de graphes, obtenus par la machine d'essais de laboratoire (ALTUMET).

L'essai nous a permis de montrer la ténacité du cordon de soudure, et de déterminer les caractéristiques mécaniques du métal de basse suivant :

- Le module de Young E (MPa).
- La limite élastique R_e (MPa).
- La résistance à la traction R_m (MPa).
- L'allongement A%.

L'essai de traction a été effectué sur la machine Zwick Roell d'une capacité maximale de 600 KN a une température ambiante, sous une vitesse de 0,5 mm/s.

On utilise deux types éprouvette normalisé selon la norme API 5L : une éprouvette pour le métal de basse, et l'autre pour le cordon de soudure, comme montre la **figure 43**. Les résultats sont donnés par le logiciel test expert sous forme de graphe et tableau.

Trois teste ont été effectué pour vérifier la reproductibilité des résultats, sur des éprouvettes halter plates découpées du tube.

Les résultats obtenus sont dans le tableau suivant :

Eprouvette	$R_{e 0,5}$ (MPa)	R_m (MPa)	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	L mm	A %	E (MPa)
01	462	558	7,1	38	269,80	50,8	69,2	36	51300

Tableau12 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvette 01 du métal de base

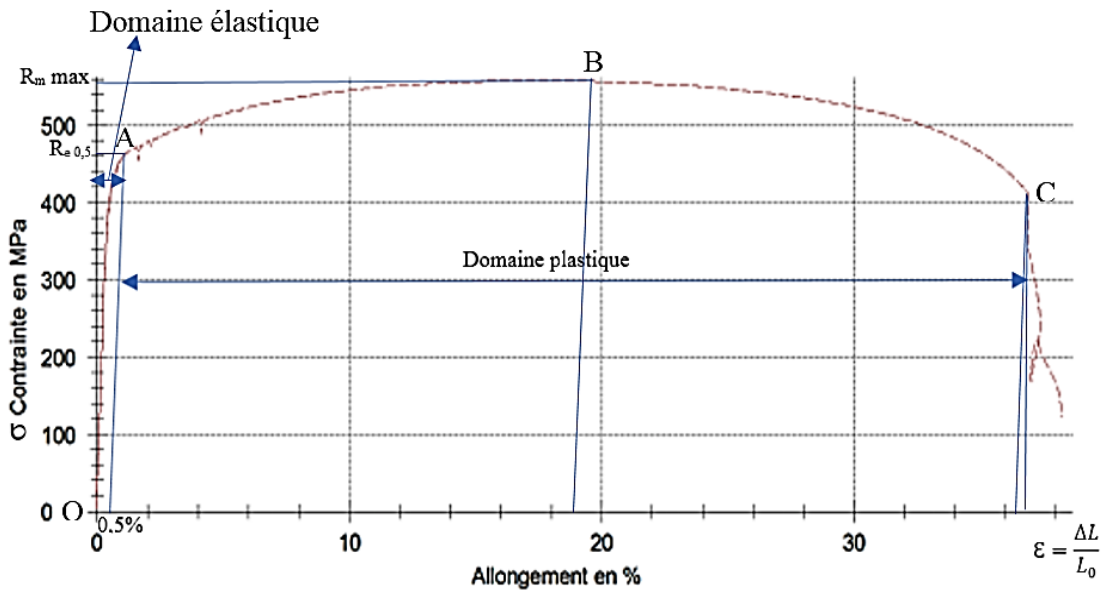


Figure 53 : Graphe de traction pour éprouvette 01 du métal de base

Eprouvette	$R_{e 0,5}$ (MPa)	R_m (MPa)	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	L mm	A %	E (MPa)
02	467	548	7,1	38	269,80	50,8	70,22	38,23	53300

Tableau13 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvette 02 du métal de base

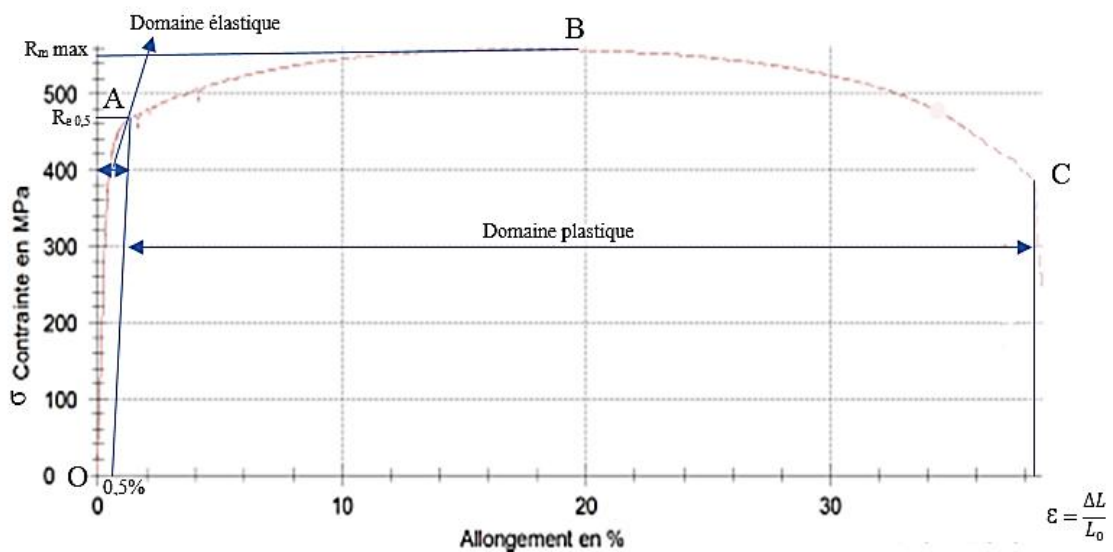


Figure 54 : Graphe de traction pour éprouvette 02 du métal de base

Chapitre IV : Résultat et discussions

Eprouvette	$R_{e0,5}$ (MPa)	R_m (MPa)	a_0 mm	b_0 mm	S_0 mm ²	L_0 mm	L mm	A %	E (MPa)
03	459	537	7,1	38	269,80	50,8	69.59	37,79	52100

Tableau 14 : Résultats de l'essai de traction pour éprouvette 03 du métal de base

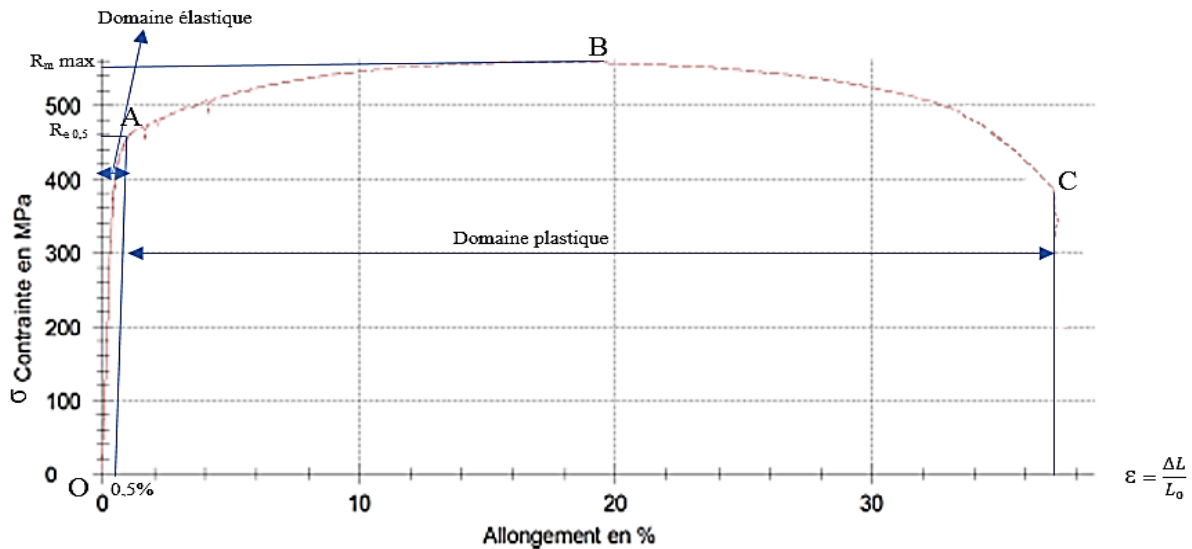


Figure 55 : Graphe de traction pour éprouvette 03 du métal de base

Sur le diagramme Contrainte-Déformation, on observe les phases successives suivantes comme les montre les **figures 53-55** :

- Zone OA : c'est phase élastique où la déformation est réversible (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.
- Zone AB : une déformation permanente homogène appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements se croissent plus vite que les charges
L'allongement provoque une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette. Le point B correspond à la charge maximale et correspond à la résistance mécanique du matériau.
- Zone BC : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette qui est hétérogène, c'est la striction on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge, cette striction est observable sur l'éprouvette après rupture

Figure (57).



Figure (56) : éprouvette du métal de base avant la striction.



Figure (57) : éprouvette du métal de base après striction.

Les caractéristiques du métal de base (l'acier X60M) montrent une grande rigidité et une grande limite élastique, ce qui nous a permis de le classer parmi les aciers HLE.

Par mesure de sécurité et conformément aux normes exigées, un essai de traction sur éprouvette contenant le cordon est réalisé avec le même protocole que l'essai précédent, le but est de vérifier que la rupture se fait à l'extérieur du cordon. On mesure dans ce cas aussi la résistance à la rupture ;

Les Résultats obtenus pour le cordon de soudure sont présentés dans les tableaux 15-17.

Les courbes contraintes sont représentées dans les figures 57-59.

Eprouvette	Rm (MPa)	Rb (MPa)	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)
01	606	430	7,1	38	269,80

Tableau 15 : Résultats d'essai de traction pour le cordon de soudure

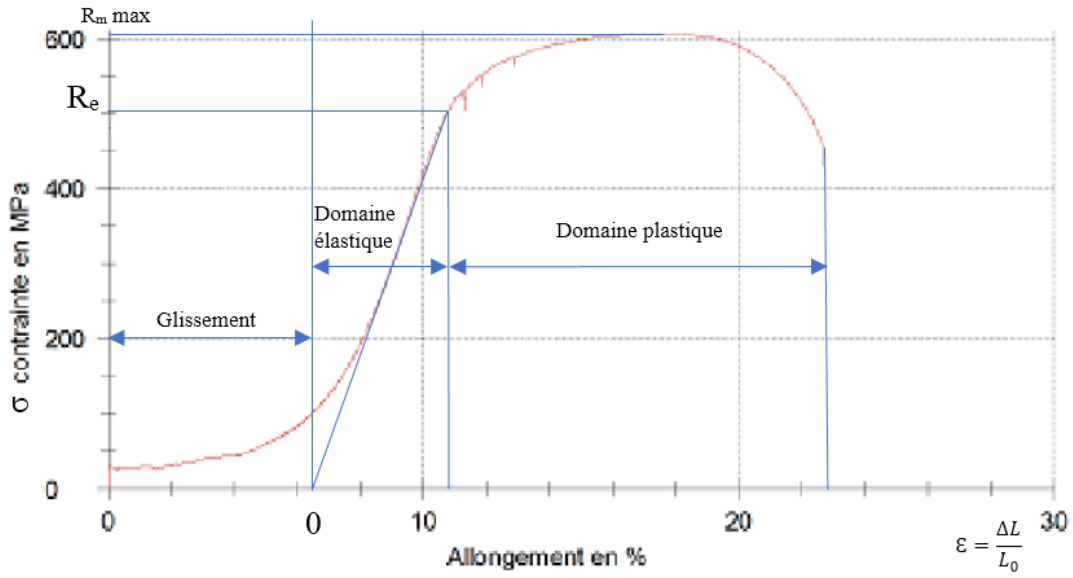


Figure 58 : Graphe de traction pour le cordon de soudure éprouvette 01

Eprouvette	Rm (MPa)	Rb (MPa)	a ₀ (mm)	b ₀ (mm)	S ₀ (mm ²)
02	611	374	7,1	38	269,80

Tableau 16: Résultats d'essai de traction pour le cordon de soudure

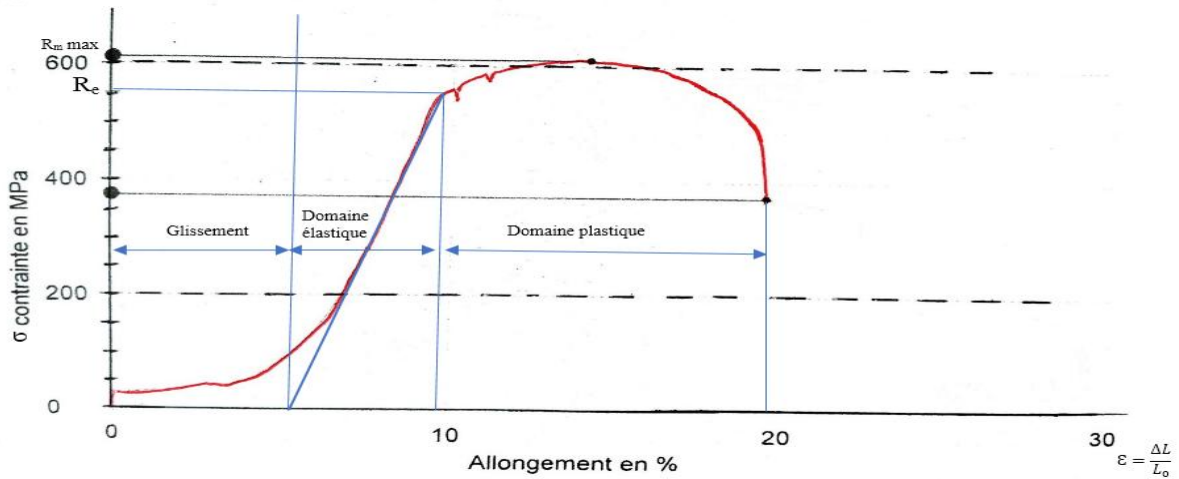


Figure 59 : Graphe de traction pour le cordon de soudure éprouvette 02

Chapitre IV : Résultat et discussions

Eprouvette	Rm (MPa)	Rb (MPa)	a ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
02	644	477	7,1	38	262,20

Tableau 17 : Résultats d'essai de traction pour le cordon de soudure

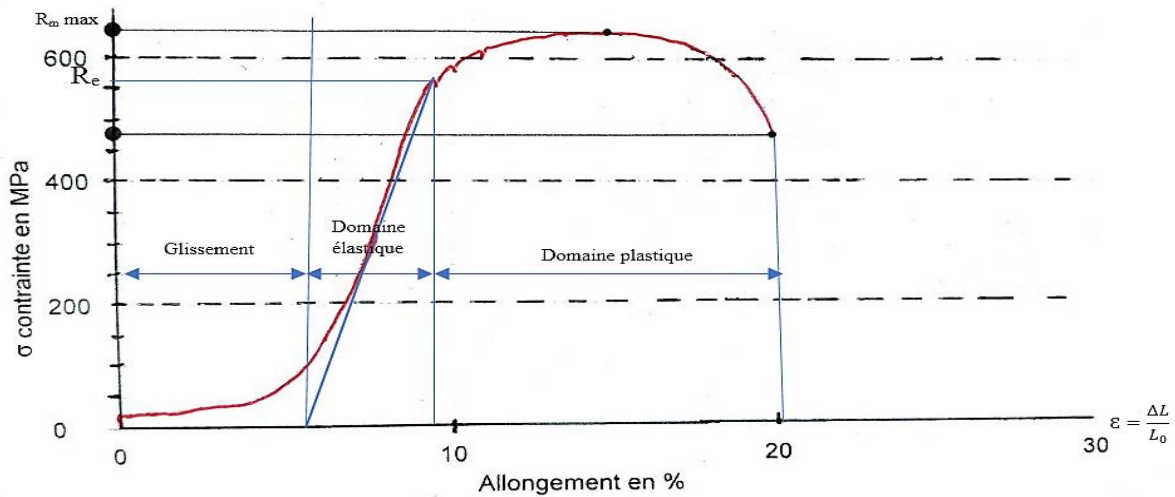


Figure 60 : Graphe de traction pour le cordon de soudure éprouvette 03

Les valeurs de Re et Rm obtenues de cet essai sont supérieures à celles obtenues dans l'essai de traction sur les éprouvettes du métal de base ce qui montre que la rupture se fait effectivement hors cordon de soudure.

Ce résultat est confirmé par la visualisation des éprouvettes du cordon de soudure après rupture **Figure 60**



Figure 61 : éprouvette avec cordon de soudure avant rupture

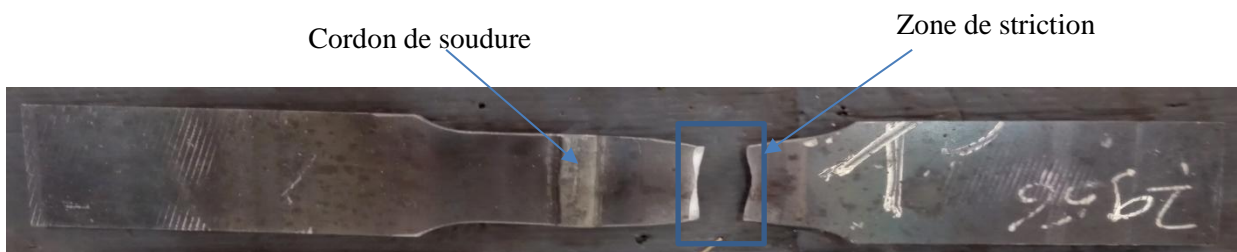


Figure 62 : éprouvette avec cordon de soudure après rupture

IV.3. Essai de pliage :

Un protocole d'essais de pliage sur une éprouvette qui contient un cordon de soudure a été réalisé selon la norme API 5L. Les résultats sont exposés dans le tableau 18 et dans la **figure 61** sous forme de tableaux et de graphes, obtenus par la machine d'essais de laboratoire (ALTUMET).

Cet essai a pour le but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc de vérifier la ductilité. Le pliage se fait endroit (ED) et envers (EV), et les résultats sont un jugement visuel sur l'aspect de la surface pliée.

Le cordon de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts.

Les résultats obtenus se présentent comme suit :



Légende	Nr	Rm (MPa)	a ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²
	1	67,8	7,1	38	269,80
	2	65,1	7,1	38	269,80

Tableau18 : Résultats d'essai de pliage

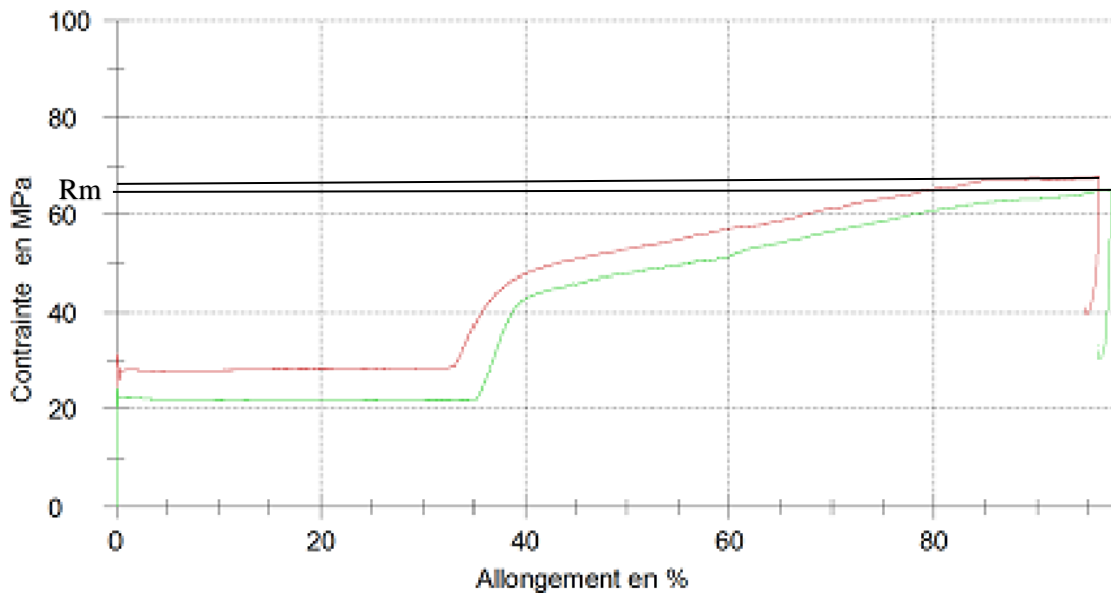


Figure 63 : Graphe de pliage



Figure 64 : éprouvettes de pliage

A la fin de l'essai on observe les deux éprouvettes et on confirme la non présence des fissures sur la partie soumise au pliage.

IV.4 Essais de résilience :

La résilience est un essai complémentaire à l'essai de traction. Cet essai permet de caractériser le phénomène de rupture sous choc et le résultat est donné par l'énergie absorbée suite au choc.

Procédure :

On a réalisé des essais de résilience sur une machine (mouton pendule de Charpy), le coteau est écarté de la verticale d'une hauteur H_0 correspondon à une énergie de départ $W_0=300$ joules à température T° ambiante, sur des éprouvettes de résilience a entaille en v dont les dimensions sont données dans la **figure 48**.

Neuf essais en été effectué (3 sur le métal de base, 3 sur la zone affecter thermiquement, 3 sur le cordon de soudure), a différentes températures (-15° , 0° , $+20^\circ$), et ça pour vérifier la reproductibilité des résultats obtenus.

Les résultats des essais sont résumés respectivement pour les températures -15° , 0° ; $+20^\circ$ dans les tableaux 19-21.

Chapitre IV : Résultat et discussions

N° de L'éprouvette	Température De l'échantillon (°c)	Position	Dimensions Éprouvette (mm)	Surface Entaille (cm²)	Energie (Joules)		Résilience KCV
		Entaille			Individuelle	Moyenne	Moyenne (J/cm²)
1	-15	MB	55x10x5	0,40	86	89	222.5
2			55x10x5		88		
3			55x10x5		93		
4		ZAT	55x10x5	0,40	100	101.33	253.33
5			55x10x5		104		
6			55x10x5		100		
7		S	55x10x5	0,40	90	83.33	208.33
8			55x10x5		80		
9			55x10x5		80		

Tableau19 : Essais de résilience à t = - 15 C°

N° de L'éprouvette	Température De l'échantillon (°c)	Position	Dimensions Éprouvette (mm)	Surface Entaille (cm²)	Energie (Joules)		Résilience KCV
		Entaille			Individuelle	Moyenne	Moyenne (J/cm²)
1	0	MB	55x10x5	0,40	102	96.67	241.67
2			55x10x5		98		
3			55x10x5		90		
4		ZAT	55x10x5	0,40	102	101.00	252.50
5			55x10x5		102		
6			55x10x5		98		
7		S	55x10x5	0,40	86	87,67	219,17
8			55x10x5		87		
9			55x10x5		90		

Tableau 20 : Essais de résilience à t = 0 C°

Chapitre IV : Résultat et discussions

N° de L'éprouvette	Température De l'échantillon (°c)	Position	Dimensions Éprouvette (mm)	Surface Entaille (cm²)	Energie (Joules)		KCV
		Entaille			Individuelle	Moyenne	Moyenne (J/cm²)
1	+20	MB	55x10x5	0,40	96	90	225.00
2			55x10x5		84		
3			55x10x5		90		
4		ZAT	55x10x5	0,40	104	97.33	243.33
5			55x10x5		90		
6			55x10x5		98		
7		S	55x10x5	0,40	80	90.66	226.65
8			55x10x5		92		
9			55x10x5		100		

Tableau21 : Essais de résilience à $t = +20\text{ C}^\circ$

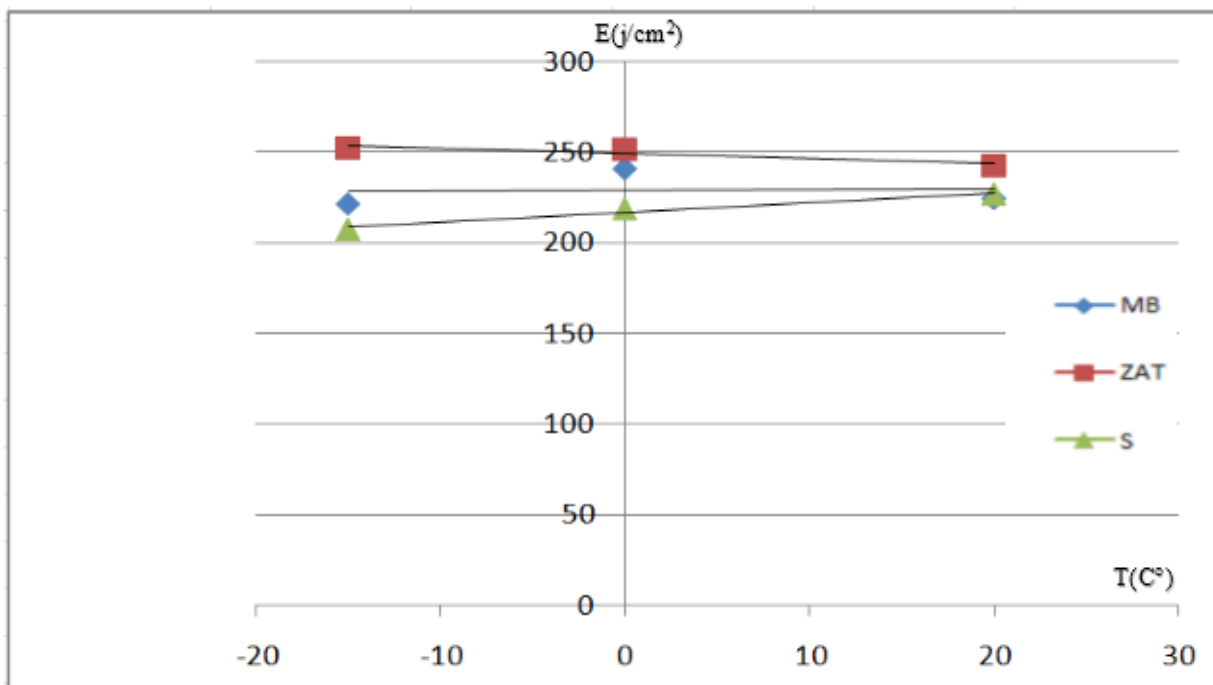


Figure 65 : Graphe du comportement des éprouvettes a différentes températures

Chapitre IV : Résultat et discussions

La **figure 65** montre le comportement des éprouvettes de résilience en fonction de la température lors de l'essai de choque.

L'effet de la température sur la résilience du cordon de soudure (S), et sur la zone affectée thermiquement (ZAT) est faible. En effet les pentes des droites représentatives du comportement des éprouvettes sont petites, cependant, pour la zone affectée thermiquement, on a une fragilisation alors que pour la soudure, le matériau devient plus résilient.

De même, on a constaté que le comportement du métal de base (MB) au choc n'est plus sensible à la température. En effet, la pente de la droite décrivant ce comportement est presque nul.

Chapitre IV : Résultat et discussions

IV.5. Essai de dureté :

La dureté est un essai majeur dans la caractérisation mécanique de notre acier. Ce dernier nous a permis de caractériser le phénomène de dureté, les résultats sont obtenus en fonction de la profondeur de la pénétration de l'indenteur.

Pour la mesure de dureté, nous avons exploité 4 essais comportant chacun 16 mesures normalisées sur une machine zwick Roell HV10, à une température ambiante $T^{\circ}=23$, sur des éprouvettes contenant les trois zones étudiées qu'on a découpé sur des tubes soudés bout à bout, puis polie avec du papier abrasif contenant des grosseurs de grains allant de 80 jusqu'à 1200 (pour obtenir un meilleur état de surface). Après cette étape nous avons exposé les surfaces obtenues en NIKEL afin de distinguer les différentes zones à étudier.

Les valeurs obtenues sont données dans les **tableaux 22_26**

N°	Dh mm	Dv mm	D mm	HV10
1	294.6	325.7	310.1	193
2	303.3	318.5	310.9	192
3	312.7	304.2	308.5	195
4	324.3	326.4	325.4	175
5	310.5	310.4	310.4	192
6	302.3	319.4	310.9	192
7	326.5	322.9	324.7	176
8	319.1	322.0	320.6	180
9	311.2	315.5	313.3	189
10	325.7	325.7	325.7	175
11	312.9	309.2	311.0	192
12	306.0	313.7	309.8	193
13	306.5	317.3	311.9	191
14	320.9	312.6	316.8	184
15	317.2	322.3	319.7	181
16	307.2	313.9	310.6	192

Tableau22 : Résultats de dureté de l'essai 1

Chapitre IV : Résultat et discussions

N°	Dh mm	Dv mm	D mm	HV10
1	308.2	330.4	319.3	182
2	316.0	325.4	320.7	180
3	307.8	306.7	307.2	196
4	310.4	295.8	303.1	202
5	320.2	330.5	325.3	175
6	306.2	328.2	317.2	184
7	304.5	324.2	314.4	188
8	323.1	327.5	324.4	176
9	306.2	292.3	299.2	207
10	315.9	323.1	319.5	182
11	299.5	319.0	309.3	194
12	299.8	316.3	306.5	197
13	321.0	302.5	311.8	191
14	309.4	311.5	310.5	192
15	319.0	311.0	315.0	187
16	292.4	307.9	300.1	206

Tableau 23 : Résultats de dureté de l'essai 2

N°	Dh mm	Dv mm	D mm	HV10
1	306.3	303.1	304.7	200
2	305.3	314.2	309.7	193
3	315.9	395.6	305.8	198
4	321.4	314.6	318.0	183
5	305.7	313.2	309.5	194
6	316.8	324.1	320.5	181
7	311.9	315.7	313.8	188
8	304.7	316.2	310.4	192
9	307.8	303.6	305.7	198
10	320.1	322.7	321.4	179
11	313.6	319.8	316.7	185
12	303.6	310.8	307.2	196
13	318.9	321.0	319.9	181
14	318.9	306.9	312.9	189
15	320.6	318.0	319.3	182
16	308.5	319.8	314.1	188

Tableau 24 : Résultats de dureté de l'essai 3

Chapitre IV : Résultat et discussions

N°	Dh mm	Dv mm	D mm	HV10
1	294.6	325.7	310.1	193
2	303.3	318.5	310.9	192
3	312.7	304.2	308.5	195
4	324.3	326.4	325.4	175
5	310.5	310.4	310.4	192
6	302.3	319.4	310.9	192
7	326.5	322.9	324.6	176
8	319.1	322.0	320.7	180
9	311.2	315.5	313.3	189
10	325.7	325.7	325.7	175
11	312.9	309.2	311.0	192
12	306.0	313.7	309.8	193
13	306.5	317.3	311.9	191
14	320.9	312.6	316.8	185
15	317.2	322.3	319.7	181
16	307.2	313.9	310.6	192

Tableau 25 : Résultats de dureté de l'essai 4

Propriété	Position	Nombre de Mesures	Moyenne
Dureté HV 10	Métal de base (MB)	24	190.20
	Cordon de soudure (S)	16	188.35
	Zone affectée thermiquement (ZAT)	24	185.89

Tableau 26 : dureté en fonction des zones étudié

On a tracé les valeurs de la dureté en fonction des zones étudiées sur une éprouvette d'essais dans la figure 64, on a constaté que ces valeurs sont proches pour les trois zones.

Ainsi, on peut conclure que la soudure des tubes en X60M n'affecte pas la dureté du matériau dans les différentes zones de tube, cela est expliqué par l'énergie de soudage qui est élevée, et un temps de refroidissement qui est beaucoup plus lent.

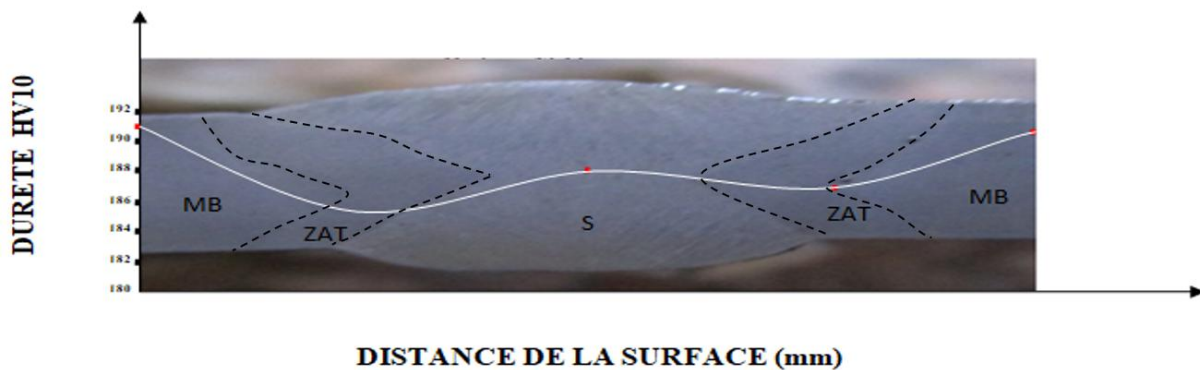


Figure 66 : la dureté en fonction des zones étudiées

IV.6. Examen macrographique :

Afin de vérifier la structure du matériau dans les zones ZAT, S et MB on a effectué une analyse métallographique sur une éprouvette de notre acier (X60M) qui contient un cordon de soudure à l'aide d'un microscope optique. Cette éprouvette a été polie avec papier abrasif jusqu'au grade 4000. La microstructure a été révélée par une attaque chimique (Nital) à froid pendant 45s. Cet examen nous a permis d'avoir un premier aperçu sur l'état structural de ce matériau.

L'observation au microscope optique de chaque zone de l'éprouvette a donné les macrographies suivantes :

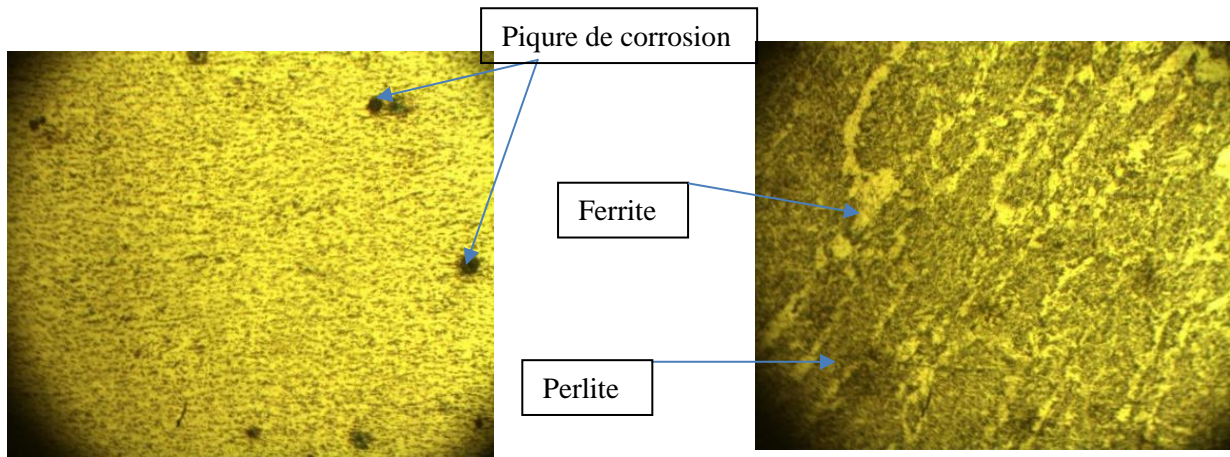


Figure 67 : Microstructure du métal de base

Figure 68 : Microstructure du cordon de soudure

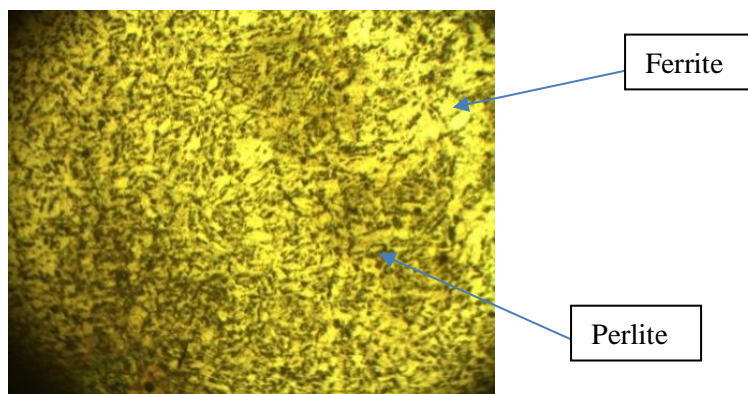


Figure 69 : Microstructure de ZAT

Chapitre IV : Résultat et discussions

Nous observons sur les **figures 67_69** des bandes de perlite colorée en noir alternées avec des bandes de ferrite en blanc, signe d'un laminage, cependant les traces de ce laminage tend à se dissiper vu que le laminage est fait à chaud, ce qui va provoquer une recristallisation, et c'est sous l'effet de cette recristallisation que le grain s'affine conduisant ainsi à l'augmentation de sa résistance.

On remarque que la ferrite est majoritaire dans le métal de base et aussi dans la zone affectée thermiquement (ZAT), et les grains qui se trouvent dans cette zone sont plus gros que ce qui se trouve dans le métal de base.

Quant à la zone fondue (cordon de soudure), on remarque l'apparition des grains basaltique, la micro structure de cette zone montre des grains allongés sous forme de lamelle composés de ferrite, entourés avec une grande quantité de perlite, contrairement au métal de base et la ZAT. Cet examen nous a permis de déduire ces résultats suivants :

Une section de soudure de l'acier X60M, soudée au SAW présente trois zones différentes :

- 1) Le métal de base se compose des grains de ferrite et de perlite sur tous les échantillons de notre étude.
- 2) La zone affectée thermiquement (ZAT) produite par les températures maximales et les taux de refroidissement à montrer une structure hétérogène située près de la ligne de fusion. Elle se compose de grains affinés de ferrite et de perlite. La ferrite a grain grossier aciculaire de couleur blanche, et de petites colonies de perlite de couleur noir.
- 3) La structure de la zone fondue est hétérogène, elle est constituée d'une micro structure laminaire due au cycle thermique de la soudure. Ceci se compose de grands grains colonnaires de ferrite orientés en direction de la ligne de soudure, mélange des phases de Perlite et de ferrite.

Conclusion :

Dans ce chapitre, on a caractérisé le matériau X60M dans les trois zones d'un tube soudé, la zone du métal de base MB, la soudure S et la zone affectée thermiquement ZAT.

Les résultats obtenus lors des essais de caractérisation, ont montré que, cet acier est faiblement allié classé dans la famille des aciers HLE hypoeutectoïdes, et présente une R_e (limite élastique) et R_m (la résistance à la traction) élevées, ce qui le rend tenace.

De même, il présente une bonne résilience et ductilité.

Concernant le cordon de soudure, il a été montré que : le soudage n'affecte pas vraiment les caractéristiques du matériau, et que le cordon de soudure ne subit pas de dégradation lors des essais mécaniques.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Ce travail s'est focalisé sur l'étude et la caractérisation de l'acier X60M utilisé pour la fabrication des tuyaux destinés pour le transport du gaz.

Cette étude nous a permis de découvrir une partie importante sur le contrôle qualité lors de la fabrication des tubes de cet acier dans l'entreprise Altumet. Le stage et le mémoire réalisés au sein de cette entreprise nous ont permis de donner les conclusions suivantes :

- 1) Le procédé de fabrication des tubes soudé en spirale est complexe et nécessite plusieurs connaissances dans différents domaines (soudage, essais destructif, essais non destructif...etc.).
- 2) L'analyse chimique, nous a permis de déduire que cet acier est faiblement allié, qu'on peut appeler hypoeutectoïdes, qui présente une bonne soudabilité vu la quantité de Carbone équivalent contenu de cet acier.
- 3) Dans l'essai de traction on remarque que notre acier présente une haute limite élastique et un allongement important.
- 4) Le pliage est utilisé uniquement sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure. A l'aide d'un contrôle visuel, aucun défaut de surface n'a été détecté.
- 5) La résilience est un essai complémentaire à la traction, d'où on remarque le métal de base qui est plus résilient que les autres zones, avec un éventuel changement de résultats qui est lié au changement de température.
- 6) Pour la mesure de dureté, nous avons exploité 4 essais comportant chacun 16 mesures normalisées. Les valeurs élevées sont enregistrées dans le métal de base (MB) et les plus faibles sont dans la zone affectée thermiquement (ZAT), cela est dû au traitement thermique de la soudure. Ce pendant la différence de la dureté à travers les trois zones est légèrement faible.
- 7) L'examen macrographique, nous a permis de déterminer la structure de chaque zone du matériau (MB, ZAT, S), où on remarque des différences importantes au niveau des formes, des tailles et le taux de présence de la ferrite et de perlite présentes dans chaque une de ces dernières.

Bibliographie

Recherche bibliographique :

- [1] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Canalisation.html>
- [2] <http://www.imetal.dz/imetal/entreprise/entreprise-b2/> visite 27/06/2021
- [3] Membre de L'ACPRE entre 1995 à 2015 (Association des pipelines de ressources énergétiques).
- [4] API.90 American Petroleum Institute 34eme édition pour tubes de conduites 5L.
- [5] <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/canalisations-gaz>.
- [6] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.
- [7] B. JACQUOT, Societe Francophone de Biomateriaux Dentaires, 2009-2010.
- [8] Mécanique H. Abdelmoumen, Cours de Caractérisation des Matériaux- Licence appliquée en Génie, 2018.
- [9] Clotilde BERDIN, Claude PRIOUL, Issu des Techniques de l'ingénieur. Relation résilience – ténacité- Apports de la modélisation numérique,10 sept. 2007.
- [10] <http://www.wa-produr.com/aciers-anti-abrasion-et-hle/aciers-de-construction/aciershle/?gclid=CK20gouqmM0CFRG3GwodhoINLA> .
- [11] <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/acier>.
- [12] Falko Schrüter / Michel Muller, Chefs de Produits CONSTRUCTION METALLIQUE DILLINGER HOTTE – GTS, Les Ouvrages d'Art Métalliques et Mixtes de la LGV Est Européenne, 21 octobre 2004.
- [13] BOUCHELLIGA HOCINE, Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l'acier X70 D'ALFAPIPE, PFE Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016.