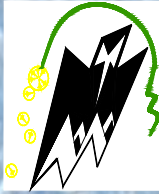




REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOU MAMMARI DE TIZI-OUZOU



Faculté du génie de la construction

Département de génie mécanique



# Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme Master  
académique en génie mécanique

Option : Génie des matériaux

FMP

## Thème

*Caractérisation d'une soudure sur  
l'acier API 5LX60M réalisée par le  
procédé SAW*

*Etudié par :*

*Mr: MAZOUZ IDIR*

*Mr: DJAFOUR ESSAID*

*Dirigé par :*

*Encadreur : Mr FILALI*

*Année 2020/2021*

# REMERCIEMENTS

*Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimernos vifs remerciements à toutes personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.*

*Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur monsieur FILALI, qui nous a encadré avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Ses conseils, Ses encouragements et sa disponibilité, notamment pour la rédaction de ce projet.*

*L'expression de notre haute reconnaissance va l'équipe de l'entreprise nationale de tubes et transformation de produits plats (anabibe) qui n'a épargné aucun effort pour mettre à notre disposition la documentation et les moyens d'investigations.*

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

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

*Je dédie cette thèse ...*

*À MES CHERS PARENTS*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être.*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.*

*Que ce travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.*

*Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.*

*A MON FRÈRE ET MA SŒUR  
À MES AMIS DE TOUJOURS :*

*En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

*À MES AMIS DE TOUJOURS :*

*Karim MEZZAGUER, Sofiane KADI, Larbi KACI, , Mahmoud BOUAKIL ;  
Hamid zanda , Manhattan , Khaled DJEMIL , BAHMANE , MUSTAPHA.*

*En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

*A LA MEMOIRE DE MON FRÈRE  
SIGRID AIT MUHOUB*

*J'aurais tant aimé que vous soyez présents.*

*Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.*

*UNE SPECIALE DEDICACE A CES PERSONNES QUI COMPTE  
ENORMEMENT POUR MOI, ET POUR QUI JE PORTE BEAUCOUP  
DE TENDRESSES ET DE RESPECTS*

*HAMID BETTAHAR; ET AGHILAS HAMICHE. SMAIL, TINA  
MAZOUZ.*

*À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ A  
L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL, À TOUS  
CEUX QUE J'AI OMIS DE CITER, ET TOUTE LA  
MAZOUZ IDIR*

*Je dédie cette thèse accompagnée d'un profond amour :*

*A 'celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs ; à la source d'amour à l'être la plus cher de ma vie ma MÈRE*

*A 'celui qui m'a fait de moi un homme,*

*MON PÈRE*

*A MES TRÈS CHERS FRÈRES ALI, KARIM , SALIM*

*A MES SŒURS RABIAA , LINA , HAKIMA*

*A MA CHÈRE ARINAS*

*A TOUS MES AMIS DE PROMOTION DE 2ÈME ANNÉE MASTER  
GDM*

*A 'TOUS LES MEMBRES DU MA FAMILLE ET TOUTE PERSONNE  
QUI PORTE LE NOM DJAFOUR*

*A TOUT LES MEMBRES DE CDGM*

*A 'TOUT MES AMIS DE OUED AISSI DA IDIR; SALIM GENIE CIVIL*

*Une spéciale dédicace à cette personne qui compte énormément pour moi, et pour qui je porte beaucoup de tendresse et de respect.*

*A LA MEMOIRE DE MON frère SIGRID AIT MUHOUB , ET MA*

*GRAND MÈRE BERRACHED TASAADITE*

*À TOUTES LES PERSONNES QUI ONT PARTICIPÉ A  
L'ÉLABORATION DE CE TRAVAIL, À TOUS CEUX QUE J'AI OMIS  
DE CITER, ET TOUTE LA  
PROMOTION 2020/2021 GENIE MECANIQUE M2-GDM.*

*DJAFOUR ESSAID*

# Sommaire

<b>Chapitre I : Généralités sur les aciers à haute limite élastique</b> .....	
I-1- Généralités sur les aciers .....	1
I-1-1- Définition de l'acier .....	1
I-1-2- Historique sur les aciers .....	1
I-1-3- Fabrication de l'acier .....	2
I-1-4- Types d'aciers .....	2
I-1-5- Composants des aciers .....	2
I-1-6- Classification des aciers .....	3
I-1-6-1- Aciers au carbone .....	3
I-1-6-2- Aciers non-alliés .....	4
I-1-6-3- Aciers alliés .....	4
I-2- Acier HLE .....	4
I-2-1- Définition .....	5
I-2-2- Structure et propriétés des aciers HLE .....	5
I-2-3- Avantage des aciers HLE .....	7
I-2-4- Normalisation .....	7
I-3- Aciers API 5L .....	9
I-3-1- Propriétés métallurgiques .....	11
I-3-2- Influence de la composition chimique sur la structure des aciers .....	12
I-3-3- Mécanismes de durcissements des aciers HLE .....	12
<b>Chapitre II : Technique de soudage des aciers HLE</b> .....	
II-1- Définition .....	13
II-2- Classification des procédés de soudage .....	13
II-3- Procédés de soudage à l'arc électrique .....	15
II-3-1- Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW) .....	17
II-3-1-1- Principe de fonctionnement .....	18
II-3-1-2- Domaines d'application du procédé SAW .....	19
II-3-1-3- Avantages et inconvénients .....	19
II-3-1-4- Influence des paramètres .....	19
II-3-1-5- Sources de puissance et équipement .....	20
II-3-1-6- Nature et utilisation des fils électrodes .....	21
II-3-1-7- Flux .....	21
II-3-2- Transformations subies lors du soudage par fusion .....	24

II-3-3- Spécification API 5L : .....	25
II-3-4- Défauts de soudage rencontré (NF EN 26250).....	26
II-3-5- Conclusion : .....	27
<b>Chapitre III : Matériel et Méthode d’investigation</b> .....	
III-Matériel et méthode d’investigation .....	28
III-1-Paramètres d’étude.....	28
III-1-1- Matériau utilisé.....	28
III-1-1- Composition chimique .....	28
III-3-Propriétés mécaniques .....	28
III-2- Examen métallographique .....	29
III-2-1- Généralités sur la métallographie .....	29
III-2-2-Prélèvement dès l’échantillons sur tube soudé.....	29
III-3- Caractérisation microstructurale.....	30
III-3-1- Polissage.....	30
III-3-1-1- Etapes de polissage .....	31
III-3-1- 2-Attaque chimique .....	31
III-4- Examen au microscope optique.....	31
III-4-1- Microscope optique .....	31
III-5-Essais mécaniques .....	32
III-5-1- Essais de traction.....	32
III-5-1-1- Principe .....	32
III-5-1-2- Critères d’acceptation .....	33
III-5-2 Essai de pliage : .....	34
III-5-2-1 Types d’essai de pliage et symbolisation .....	35
III-5-3- Essai de dureté :.....	36
III-5-3-1- Dureté.....	36
III-5-3-2- Micro-dureté.....	36
III-5-3-3- Essai de dureté Vickers (HV30).....	36
III-5-4- Essai de résilience : .....	37
III-5-4-1- Mode opératoire .....	38
III-5-4-2- Caractéristiques mécaniques déterminées par l’essai de résilience: .....	38
<b>Chapitre IV :Partie pratique</b> .....	
IV-1-Essais de contrôle destructif.....	40
IV-1-1- Analyse chimique .....	40

IV-1-2- Essai de traction ( à T=25C°).....	41
IV-1-3- Essai de pliage.....	45
IV-1-4- Résistance à la rupture fragile : Résilience .....	48
IV-1-5- Essai de dureté Vickers HV30 : .....	50
IV-2- Caractérisation microstructurale.....	51
IV-3- Prédétermination des propriétés mécaniques .....	53
IV-3-1-Algorithmes de calcul. ....	57

# Liste des Figures

<b>Chapitre I : Généralité sur les Acier HLE</b> .....	
Figure I-1: Relation entre la limite d'élasticité et la teneur en carbone équivalente (%) pour différents modes d'élaboration.....	6
<b>Chapitre II : Technique de soudage des aciers HLE</b>	
Figure II-1 : Classification des procédés de soudage [2]. .....	15
Figure II-2 : Principe de base du soudage à l'arc submergé SAW .....	17
Figure II-3 : Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW) .....	18
Figure II-3 : zones après soudage .....	18
Figure II-3 : Les différentes zones d'une soudure par fusion .....	25
<b>Chapitre III : Matériel et Méthode d'investigation</b>	
Figure III-1 : Sens de découpage des échantillons .....	30
Figure III-2 : Eprouvette de l'essai de traction selon la norme ASTM A 370 .....	33
Figure III-3 : Dimensions de l'empreinte et formule de calcul de la dureté Vickers .....	36
Figure III-4 : Eprouvette de l'essai de dureté API . .....	37
Figure III-5 : Machine de micro dureté digitale. ....	37
Figure III-6 : Représentation de l'essai de résilience.....	39
Figure III-7: Caractéristique de l'éprouvette et la machine de Résilience.....	39
<b>Chapitre IV :Partie pratique</b>	
Figure IV-1 : Courbe de traction du métal de base (essai 1).....	42
Figure IV-2 : Courbe de traction du métal de base (essai 2).....	42
Figure IV-3 : Courbe de traction du métal de base (essai 3).....	43
Figure IV-4 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée 1 .....	44
Figure IV-5 : Eprouvettes lors de pliage .....	45
Figure IV-6 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes à l'endroit.....	46
Figure IV-7 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes à l'envers.....	47
Figure IV-8 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes à l'envers.....	48
Figure IV-9 : Localisation des positions des empreintes de dureté Vickers .....	50
Figure IV-10 :Microstructure de métal de base MB*400. ....	52
Figure IV-11 :Microstructure du ZF*400. ....	52
Figure IV-18:Resultats analytique propriétés mécanique de soudage SAW. ....	57

# Liste des abréviations et symboles

**ALTUMET:** Algérienne des Tubes Métalliques.

**ANABIB:** Entreprise Nationale de Tubes et Transformation de Produits Plats

**SPA:** Société Par Action.

**API:** American Petroleum Institute.

**5L :**Spécification pour le pipeline.

**EN:** Européen Normes (normes européennes).

**ISO:** International Standard Organisation (organisation internationale des normes).

**MB:** Métal de Base.

**ZAT:** la zone affectée thermiquement.

**ZF:** Zone fondu.

**ZL:** Zone de Liaison.

**SAW:** Submerge Arc Welding ( Soudage à l'arc électrique submergé).

**SMAW :** Soudage à l'électrode enrobée

**GTAW : TIG:** Le Soudage à électrode de tungstène non fusible

**MIG, MAG, GMAW :**Le Soudage sous flux gazeux avec électrode fusible

**SAFP :** soudage à l'arc sous flux en poudre

**DIB : déchet industriel banal**

**TFBB, TRBB:** Essai du pliage transversal envers et endroit sur soudure bout à bout

**SRB :**Essai du pliage transversal de côté sur soudure bout à

**CFC:** Cubique à Face Centrée.

**CC:** Cubique Centré.

**HLE:** Haute Limite Elastique.

**X:** catégorie pour le pipeline de haute résistance .Le chiffre après le "X" correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. Par exemple

X60 a une limite d'élasticité minimale de 70 ksi (485 MPa).

**E:** Module d'élasticité longitudinale ( module de Young).

**$\sigma$ :** Contrainte. [N/mm<sup>2</sup>]

**$\epsilon$ :** Déformation.

**Re:** Limite élastique. [Mpa]

**Re0.2:** Limite élastique conventionnelle à 0,2% d'allongement

**Rm:** Résistance maximale à la rupture.

**a<sub>0</sub>** : Largeur initiale de l'éprouvette.

**b<sub>0</sub>** : Longueur initiale de l'éprouvette.

**S<sub>0</sub>** : La surface initiale de l'éprouvette

**A%** : l'allongement .

**e<sub>p</sub>** : épaisseur de transition

**e** : l'épaisseur

**$\alpha$ :** Ferrite.

**$\gamma$ :** Austenite

**P** : perlite.

**C<sub>éq</sub>:** carbone équivalent [%]

**E<sub>s</sub>:** Energie de soudage [j/cm]

**U<sub>s</sub>:** Tension de soudage [V]

**I<sub>s</sub>:** Intensité de courant [A]

**V<sub>s</sub>:** Vitesse de soudage [cm/mn]

**$\eta$ :** Rendement thermique du procédé de soudage.

# Liste des Tableaux

<b>Chapitre I : Généralité sur les Acier HLE</b> .....	
Tableau I-1 : Pipelines en acier de grade API. ....	9
Tableau I-2 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés).....	10
Tableau I-3 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL2 soudés).....	10
Tableau I-4 : Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1) .....	10
Tableau I-5 : Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2).....	11
Tableau I-6 : Caractéristiques mécanique de l'acier X60 selon l'API 5L.....	11
<b>Chapitre II : Technique de soudage des aciers HLE</b> .....	
Tableau II-1 : Spécification API 5L .....	25
<b>Chapitre III : Procédé soudage SAW</b> .....	
Tableau III-1 : Composition chimique de l'acier X60 de notre étude, en %massique.....	28
Tableau III-2 :Caractéristiques mécaniques de l'acier X60M selon l'API 5L. ....	29
Tableau III-3 : Dimensions des eprouvettes et etat de préparation . ....	33
<b>Chapitre IV : partie pratique</b> .....	
Tableau IV-1 : Composition chimique réelle de la nuance X60M.....	40
Tableau IV-2 : Paramètres des essais de traction. ....	41
Tableau IV-3 : Paramètres de soudage.....	41
Tableau IV-4 : Valeurs numériques des essais de traction.....	41
Tableau IV-5 : Valeurs moyennes d'essais de traction (métal de base).....	43
Tableau IV-6: Résultats numérique d'essais de traction soudure. ....	43
Tableau IV-7 : Paramètres des essais de pliage. ....	46
Tableau IV-8 : Valeurs numériques des essais de traction.....	46
Tableau IV-9 : Valeurs numériques des essais de traction.....	46
Tableau IV-10 : Résultats de l'essai de Résilience .....	49
Tableau IV-11 : Résultats de dureté Vickers HV30.....	50
Tableau IV-12- Comparaison entre les résultats théoriques et pratiques.....	57

# *Introduction générale*

# *Introduction générale*

L'utilisation des aciers est très répandue, ils constituent les alliages les plus utilisés dans plusieurs industries vue leurs diverses nuances et donc une grande variété de caractéristiques mécaniques et électrochimiques. Dans cette étude on a choisi la nuance API 5L X60M qui est un acier au carbone à haute limite élastique. On le retrouve en particulier dans la fabrication des tubes servant au transport des hydrocarbures et des eaux. Pour cela cet acier doit répondre à plusieurs exigences telles que la résistance mécanique, l'aptitude au formage, la résistance à la corrosion ou encore à la soudabilité. L'étude de ce dernier point est primordiale.

L'acier subit une opération de soudage ce qui conduit inévitablement aux transformations structurales intrinsèques en terme de fragilisation de la zone soudée et de la diminution de la résistance à la corrosion.

Si un acier au carbone possède de bonnes propriétés mécaniques et une soudabilité appréciable, la corrosion est son talon d'Achille. En dépit de ce défaut, l'acier reste le favori dans de nombreux domaines de construction. Tout en remédiant par des moyens de protection, tels que : les revêtements, protection cathodique et anodique.

Afin d'équilibrer la balance entre les diverses propriétés de l'acier API 5L X60M et de palier au mieux aux modifications causées par le soudage notamment le risque à la fissuration à froid, on a procédé à des traitements thermiques locaux.

Ayant expliqué le contexte général lié au matériau en question, dès son élaboration, sa transformation en produit fini et par la suite à son utilisation, le choix s'est porté sur la zone avoisinante et comportant le cordon de soudure à savoir le métal fondu ZF, la zone affectée thermiquement ZAT et le métal de base MB.

Pour cette étude, on a fait une synthèse bibliographique, nous permettant ainsi de mettre à notre disposition le maximum de données relative à notre sujet. Cette partie comporte deux chapitres :

- **Présentation des aciers à haute limite élastique (HLE) :**

Ce chapitre se pose en préambule, en mettant l'accent sur les propriétés des aciers à haute limite élastique.

- **Technique de Soudage des aciers HLE**

Cette partie, est consacrée à l'expérimentation dans laquelle on retrouve la description globale des procédés expérimentaux et les résultats auxquels on a abouti. Cette partie comporte trois chapitres :

- Le 1<sup>er</sup> chapitre présente la description des diverses techniques expérimentales de soudage ;
- Le 2<sup>ème</sup> chapitre présente les techniques et essais expérimentaux ainsi que les dispositifs de mesure utilisés dans le soudage à l'arc submergé SAW qui ont permis de mener à bien ce travail sans oublier la présentation du matériau.
- Le 3<sup>ème</sup> et le dernier chapitre, se localise sur l'interprétation des résultats expérimentaux la Prédétermination des propriétés mécaniques de la zone à gros grain de la ZAT est possible par l'utilisation des relations empiriques. A cette effet une programmation suppose. Dans cette étude on s'est servi du logiciel MATLAB.

Le tout est coonné par une conclusion générale mettant en exarque le point sur les résultats les plus significatifs qui nous ouvriraient de nouvelles perspectives à étudier et à exploiter.

# *Recherche bibliographie*

# *Chapitre I*

## *Généralité sur les Acier HLE*

**Chapitre I : Généralités sur les aciers à haute limite élastique**

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est essentiellement dû à la présence d'une vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers.

Ce chapitre donne des généralités sur le matériau « acier » ainsi que les spécificités des aciers HLE (acier à haute limite élastique).

**I-1- Généralités sur les aciers**

Différentes industries recourent à l'utilisation des aciers dans les différents processus et divers systèmes structuraux et mécaniques, et ce pour leurs caractéristiques mécaniques facilement maniables grâce à une large gamme de traitements possibles par l'ajout des éléments d'alliages des traitements mécaniques et thermo mécaniques, thermochimiques [1].

**I-1-1- Définition de l'acier**

L'acier est un alliage métallique constitué essentiellement de fer et contenant une proportion de carbone n'excédant pas généralement 2%. L'acier peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. 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. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté comparativement aux aciers de teneur plus faible. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments tel que Mn, Cr, V, Ti, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage : il est considéré alors comme un acier allié [1].

**I-1-2- Historique sur les aciers**

L'acier est extrêmement ancien et date probablement de 1000 ans avant J.C. Sa découverte semble être hasardeuse et peut-être issue des techniques de la cémentation et de l'art de la trempe. Le fer absorbant du carbone au contact des matières organiques qui servaient à le chauffer pour le marteler [1].

**I-1-3- Fabrication de l'acier**

L'acier s'élabore actuellement de deux manières [2] :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique.

**I-1-4- Types des aciers**

Les aciers ont été classés en fonction de deux critères, la composition chimique et le niveau de qualité.

Ainsi, on distingue les aciers non alliés (<1% d'alliage), peu alliés (teneur de chaque élément d'alliage < 5 %) ou très alliés  $\geq 5$  %. En fonction de la garantie donnée aux propriétés d'usage, les aciers de base, de qualité ou les aciers spéciaux sont placés dans trois familles :

- Les aciers de construction mécanique (peu ou non-alliés) ;
- Les aciers à outils (peu ou très alliés) ;
- Les aciers inoxydables.

Certaines industries, aux exigences particulières, comme l'industrie gazo-pétrolière, exigent des aciers possédant une bonne combinaison de résistance, ténacité et soudabilité. Ces critères ont conduit au développement d'aciers à bas carbone appelé HLE (acier à haute limite élastique). Ces derniers représentent un groupe d'aciers utilisant un peu d'éléments d'alliage pour atteindre des limites d'élasticité supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé [3].

**I-1-5- Composants des aciers**

Les constituants les plus importants sont le Fer et le Carbone, Les éléments chimiques présents dans l'acier peuvent être classés en trois (03) catégories [4] :

a) **Les impuretés** : Originellement présentes dans les ingrédients du haut fourneau qui permettent à produire la fonte qui servira ensuite à fabriquer l'acier. Ce sont le soufre (S) et le phosphore (P) présents dans le coke mais aussi le plomb (Pb) et l'étain (Sn) qui peuvent être présents dans les aciers de récupération ainsi que nombre d'autres éléments à bas point de fusion comme l'arsenic (As), l'antimoine (Sb).

b) **Les éléments d'additions** : Des éléments chimiques peuvent être ajoutés pour améliorer la résistance à des sollicitations mécaniques ou chimiques ou des deux. Les principaux sont le manganèse (Mn), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le molybdène (Mo).

c) **Les éléments d'accompagnements** : Utilisés en vue de maîtriser les diverses réactions physico-chimiques nécessaires pour obtenir au final un acier de qualité.

### **I-1-6- Classification des aciers**

Les aciers peuvent être classifiés selon [4]:

- La composition, chimique tels que les aciers au carbone, faiblement allié, ou inoxydables.
- Les méthodes de fabrication, telles que le four Thomas, processus de base de l'oxygène, ou méthodes de four électrique,
- La méthode de finition, tels que le laminage à chaud ou laminage à froid ;
- La forme de produit, telle que la barre, le plat, la feuille, la bande, la tuyauterie, ... ;
- L'utilisation des désoxydants, telle que l'acier calmé, semi calmé, couvert, ou bordé ;
- La microstructure, telle que de ferrite, la perlite, et la martensite ;
- Le niveau exigé de force, comme indiqué dans des normes d'ASTM ;
- Le traitement thermique, tel que le recuit, et le traitement thermomécanique ;

Des systèmes de classification mentionnés ci-dessus, la composition chimique est le plus largement utilisée internationalement comme base et sera soulignée comme suit :

#### **I-1-6-1- Aciers au carbone**

L'acier au carbone est un acier dont le principal composant d'alliage est le carbone, situant entre 0,12% et 2,00%. Les autres éléments d'alliage étant en quantité très faibles. Une teneur en carbone élevée est significative d'une augmentation de résistance de l'acier au détriment de sa ductilité.

Ainsi, nous distinguons 03 sous-catégories d'aciers au carbone :

- Aciers à faible carbone (teneur en carbone inférieure à 0,30%.
- Les aciers à moyen carbone (la teneur en carbone est de 0,30 à 0,60%).

- Les aciers à haute teneur en carbone (1,25 à 2,0%).

### **I-1-6-2- Aciers non-alliés**

C'est un type d'acier auquel aucun autre élément n'a été ajouté lors de la fusion. La teneur en carbone devrait être réduite à environ 1%. Puisqu'il n'y a pas d'autres éléments que le fer et une petite quantité de carbone, l'acier non allié a une durabilité et une flexibilité moindre, qui est un processus de chauffage de feu à haute température afin de le rendre sensible aux craquelures se produisant pendant le soudage [4].

### **I-1-6-3- Aciers alliés**

A l'opposé de l'acier non-allié, ce type d'acier contient quelques autres éléments (silicium, cuivre, chrome, etc.) qui lui confèrent des propriétés utiles telles que la dureté, la durabilité, la résistance à la corrosion, etc [4].

## **I-2- Acier HLE**

Le recours aux aciers HLE permet d'améliorer les capacités, d'optimiser les épaisseurs des ensembles mécano soudés et le cas échéant de réduire les coûts de fabrication. Ces aciers, dont les limites d'élasticité sont très élevées (jusqu'à 1300 MPa), sont produits selon différents modes d'élaboration (normalisation, trempe et revenu, laminage thermomécanique). De ce fait, les compositions chimiques sont aussi très variables et sont fonction des options prises par les aciéristes. De même, grâce aux traitements de qualité utilisés (trempe et revenu ou laminage thermomécanique sans ou avec refroidissement accéléré), les aciers HLE peuvent être moins alliés que les produits d'apport utilisés pour les assembler, transférant ainsi les risques de fissuration vers la zone fondue [5].

Ces aciers ont des caractéristiques permettant leur utilisation dans différents domaines. Parmi ces caractéristiques on retrouve :

- Des résistances à la traction allant jusqu'à 1300 MPa sans recours à un traitement ultérieur, (valeurs nettement supérieures à celles des aciers conventionnels de même teneur en carbone, d'où la qualificative haute ou très haute résistance) ;
- Une soudabilité élevée à cause, entre autre, de leurs faibles teneurs en carbone (<0.12%) ;
- Une ductilité élevée et homogène en forte section ;
- Une bonne formabilité à froid ;
- Une température de transition ductile fragile basse et un palier ductile élevé.

Les aciers à haute limite élastique (HLE) sont apparus et développés pour la première fois dans le domaine de la construction des édifices soudables à teneur en carbone inférieure ou égale à 0.2% environ ; tels que le rond à béton, barres prétraitées, aciers pour pièces forgées, tôles minces etc. Ce sont des aciers au carbone, manganèse, silicium (respectivement 0.20%, 1.6% et 0.50%) et aux éléments d'addition tels que le niobium, le vanadium ou le titane à faible teneur. Ces éléments, en raison de leur grande affinité pour le carbone et pour l'azote, peuvent précipiter sous forme de carbonitrides très finement dispersés dans la matrice ferrite [6].

### **I-2-1- Définition**

Les aciers HLE sont des aciers ayant des nuances à hautes caractéristiques et leur application essentielle est la fabrication d'oléoducs et de gazoducs. Le marché étant international, leur désignation est empruntée aux spécifications américaines API (American Petroleum Institute) dont les principales nuances sont X 52, X 60, X 65, X 70 et jusqu'à X100 [6].

Les nuances sont désignées par les grades correspondant à des unités en kpsi (1 kpsi = 6,89N/mm<sup>2</sup>). Ces valeurs correspondent à des limites d'élasticité sur tubes de 355 N/mm<sup>2</sup> à 560N/mm<sup>2</sup> et 690 N/mm<sup>2</sup>.

### **I-2-2- Structure et propriétés des aciers HLE**

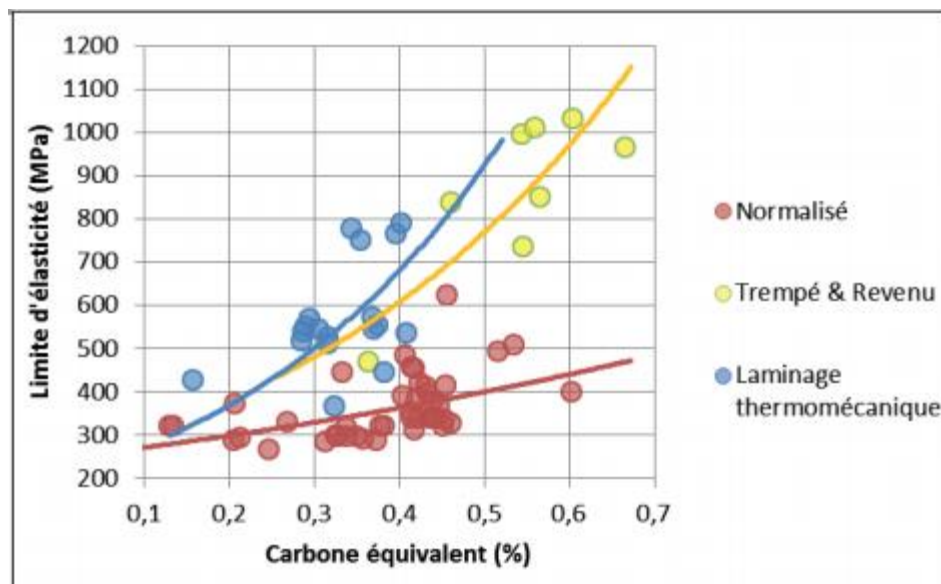
Suivant le mode d'élaboration des aciers HLE, il est possible d'atteindre une limite d'élasticité donnée pour des valeurs de carbone équivalent très différentes. Bien évidemment cette notion de carbone équivalent, telle que définie par l'Institut International de la Soudure n'a pas été déterminée pour des modes d'élaboration de types thermomécaniques ou pour certains aciers trempés et revenus micro-alliés. Par contre, elle permet d'illustrer, même improprement, la différence de recours aux éléments d'alliages pour atteindre le niveau attendu [4].

Il apparaît ainsi que les modes d'élaboration basés sur un laminage thermomécanique ou plus classiquement sur l'utilisation d'un traitement thermique de type trempé suivi d'un revenu permettent avec des teneurs modérées en éléments d'alliage de base d'obtenir des propriétés mécaniques supérieures à celles obtenues avec des aciers normalisés, et ce par l'effet d'affinage de la structure, La comparaison doit être faite en considérant les mêmes éléments d'alliages de base, car les aciers livrés.

À l'état trempé-revenu ou après laminage thermomécanique sont généralement micro-alliés avec des éléments comme le titane, le niobium ou le bore qui ne sont pas pris en compte par cette formule du carbone équivalent CE IIS développée par Déradent O'Neill dans les années 1940.

Cependant, les modes d'élaborations limitant la teneur en éléments d'alliage conduiront globalement à une meilleure soudabilité métallurgique. L'ingénieur-soudeur habitué à l'utilisation de ce carbone équivalent pour définir la soudabilité intrinsèque d'un métal de base et considère généralement comme moyenne la soudabilité d'un acier présentant un CE IIS compris entre 0,42 et 0,50, puis délicate au-delà de 0,50.

Des démarches plus complexes comme celle notamment développées par Gravis montrent que globalement, les aciers thermomécaniques se situeraient dans la zone I correspondant à un risque de fissuration à froid est très limité sauf dans des conditions de très forte teneur en hydrogène diffusible et de fortes contraintes de retrait. Les aciers trempés et revenus se situent quant à eux (à l'exception des nuances S500Q) dans la zone III correspondant à une certaine susceptibilité conduisant à mettre en œuvre une température de préchauffage minimale. La zone II regroupe des aciers pour lesquels la définition d'une énergie de soudage minimale permet d'éviter le risque de fissuration à froid.



**Figure I-1 : Relation entre la limite d'élasticité et la teneur en carbone équivalente (%) pour différents modes d'élaboration. [1]**

De ce fait, la soudabilité métallurgique d'un acier HLE sera généralement considérée comme délicate compte tenu du positionnement en zone III de la plupart des aciers trempés et revenus. Cette soudabilité métallurgique est généralement abordée, en l'absence d'essais par l'utilisation de formules mathématiques ou d'abaques proposés dans des annexes informatives des normes pour déterminer la température de préchauffage. Cette température de préchauffage est d'autant plus cruciale que la gestion du risque de fissuration à froid par l'énergie de soudage est limitée pour prendre en compte les propriétés mécaniques de la zone fondue et de la ZAT :

adoucissement en ZAT (par effet de sur-revenu pour les nuances ayant subi un revenu ou par simple grossissement de grains pour les nuances thermomécaniques), difficulté à obtenir les propriétés en traction requises en ZF, diminution de la résilience en Zone Fondue et en ZAT. De ce fait, la mise en œuvre d'un acier HLE conduit souvent à limiter l'énergie de soudage aux alentours de 1,5 kJ/ mm. [5].

### **I-2-3- Avantage des aciers HLE**

- Ils combinent 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 ( $R_e$ ) structure fine, ils sont particulièrement adaptés lorsqu'une réduction de poids est recherchée, C'est pourquoi ces aciers s'utilisent fréquemment en remplacement des aciers de construction.

### **I-2-4- Normalisation**

La presque totalité des tubes en acier couramment utilisés dans l'exploitation pétrolière répondent aux spécifications américaines API 5L et 5 LX qui définissent :

- Les modes de fabrication ;
- La composition chimique des aciers ;
- Les propriétés mécaniques requises ;
- Les conditions d'épreuve hydraulique ;
- Les poids, les dimensions et les tolérances d'usinage ;
- Les normes d'assemblage par vissage et soudure ;
- Les méthodes d'inspection et de contrôle ;
- Les marques d'indentification.

Les spécifications pour l'API 5L adhèrent à l'Organisation internationale de normalisation ISO-3183, qui uniformise les systèmes de transport par pipeline au sein du matériel, de l'équipement et des structures en mer pour le pétrole, la pétrochimie et les industries du gaz naturel. Le comité technique de rédaction des normes a reconnu qu'il existe deux niveaux de spécifications

des exigences techniques du produit de base et ont donc mis au point les niveaux PSL1 et PSL 2. [4].

Le niveau PSL 1 fournit un niveau de qualité normalisé de pipeline. Le niveau PSL 2 a des prescriptions obligatoires supplémentaires pour la composition chimique, la résistance à l'effet d'entaille, les caractéristiques de résistance et composition et des exigences en Contrôle non destructif (CND).

Pour différents environnements, il y aura des exigences différentes pour les tubes API 5L. Certains tubes sont utilisés dans un environnement ordinaire, et PSL1 est suffisant pour les exigences mécaniques ou de pression, mais pour certaines conditions sévères, il faut réglementer les exigences supplémentaires en fonction de l'environnement corrosif ou de l'environnement à haute température et etc.

Les prescriptions qui ne s'appliquent qu'au niveau PSL 1 ou qui ne s'appliquent qu'au niveau PSL2 sont ainsi désignées. Les prescriptions qui ne sont pas désignées selon une désignation PSL spécifique s'appliquent tant à PSL 1 qu'au PSL2.

Les désignations des grades pour pipelines proviennent des spécifications de l'API 5L. Les pipelines standards ont un grade désigné par les lettres A et B. Les grades supérieurs ont la désignation X suivie par la limite d'élasticité minimale spécifique de l'acier du tube, mesurée en ksi (kilo pounds per square inch), par exemple un X60 a pour limite élastique minimale 60 ksi. Voir les tableaux ci-après pour quelques extraits des grades standards disponibles.

Des symboles (M, N, Q) sont ajoutés juste après la limite élastique, qui ont la signification suivante :

- M : formage thermomécanique
- N : laminé ou laminage normalisant
- Q : trempé et revenu

Le niveau d'exigence PSL1 peut fournir des grades allant de A à X70; PSL2 peut fournir des grades allant de B jusqu'à X120.

Les applications et bénéfices de l'API 5L sont :

- Possibilité de transport de gaz, de l'eau et de pétrole ;
- Acier Pipeline très résistant à la propagation des fissures ;
- Mise en service dans des milieux acides.

## I-3- Aciers API 5L

D'après la norme American pétroleur Institute (API), pour l'acier de garde X60-C120, le Tableau I-1 montre les propriétés mécaniques requises pour les pipelines en acier :

Tableau I-1 : Pipelines en acier de garde API. [2]

Grade (>=)	Limite d'élasticité (MPa)	Rm (MPa)	Allongement (%)
API 5L- X52	448	530	24
API 5L- X70	483	566	23
API 5L- X80	551	620	22
API 5L- X100	690	770	25
API 5L – X120	951	1024	26.5

Depuis plus de 25 ans, les industries de la métallurgie et de la sidérurgie développent de nouveaux types d'aciers, appelés Aciers à Haute limite d'Elasticité (acier HLE), et ce afin de diminuer le prix de revient des pipelines. Ces métaux, qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques (Tableau I-2), permettent de diminuer l'épaisseur des pipelines, donc de minimiser la quantité de matériau nécessaire à leur élaboration. Le coût de fabrication d'un pipeline étant essentiellement déterminé par cette quantité. L'usage d'aciers HLE permet donc de réaliser de fortes économies. [7].

Les quatre tableaux suivant regroupent les compositions chimiques et les caractéristiques mécaniques de l'acier type API 5L, tubes de conduite PSL1 et PSL2.

On remarque que les valeurs de la résistance de rupture d'un même acier sont différentes, même chose pour la limite élastique, cela est dû aux résultats des essais expérimentaux (tableaux 03, 04 ,06). On donne dans ce qui suit les tableaux représentant les caractéristiques mécaniques et les compositions chimiques de ces aciers.

Tableau I-2 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés) [7].

API 5L - PSL1	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titane Ti (max)
X42	0.26	1.30	0.030	0.030	0.04
X52	0.26	1.40	0.030	0.030	0.04
X60	0.26	1.40	0.030	0.030	0.04
X65	0.26	1.45	0.030	0.030	0.06
X70	0.26	1.65	0.030	0.030	0.06

Tableau I-3 : Composition chimique % (Tubes de conduite PSL2 soudés) [7].

API 5L - PSL2	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titane Ti (max)
X42	0.22	1.30	0.025	0.015	0.04
X52	0.22	1.40	0.025	0.015	0.04
X60	0.22	1.40	0.025	0.015	0.04
X65	0.22	1.45	0.025	0.015	0.06
X70	0.22	1.65	0.025	0.015	0.06
X80	0.22	1.85	0.025	0.015	0.06
X100	0.22	1.85	0.025	0.015	0.06

Tableau I-4 : Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1) [8].

API 5L – PSL1	Résistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ] (minimum)	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ] (minimum)
X42	414	290
X52	455	359
X60	517	414
X65	531	448
X70	565	483

Tableau I-5 : Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2[8]).

API 5L - PSL2	Résistance à la rupture [N/mm <sup>2</sup> ] (min-max)	Limite élastique [N/mm <sup>2</sup> ] (min-max)
X42	414-758	290-496
X52	455-758	359-531
X60	517-758	414-565
X65	531-758	448-600
X70	565-758	483-621
X80	621-827	552-690

Les pipelines et les réservoirs, conçus pour transporter et stocker des dérivés pétroliers, souffrent de différents types d'endommagement liés aux nombreux facteurs : environnement, produit, conditions de service, etc.

Dans le cas de notre étude, nous nous intéressons à l'acier de type API 5L X60, qui représente des caractéristiques mécaniques qui résistent à la rupture et ayant une limite élastique favorable à la corrosion.

### I-3-1- Propriétés métallurgiques

- **Composition chimique**

Elle est obtenue par l'analyse par spectrométrie (mesure d'onde d'élément). L'acier X60 contient une faible teneur de carbone (0.12%).

La composition chimique est détaillée sur le tableau ci-dessous :

Tableau I-6 : Caractéristiques mécanique de l'acier X60 selon l'API 5L [9].

Élément (nuance)	% C maximal	% Mn maximal	% Si maximal	% P maximal	% S maximal	% CEpcm maximal
X60M	0.12	1.600	0.4500	0.025	0.015	0.25

$Cu \leq 0.50\%$  ;  $Ni \leq 0,30\%$  ;  $Cr \leq 0.30\%$  ;  $Mo \leq 0.15\%$  ;  $B \leq 0.001\%$  ;  $V \leq 0.100\%$

$Nb+V+Ti \leq 0.150\%$  ;  $S+P \leq 0.070\%$

$Nb+V \leq 0.140\%$  ;  $Nb \leq 0.100\%$

**Le carbone équivalent :**

$$C\ddot{a} = C \text{ eq}\% = (C) + (Mn + Si)/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5 \quad (1)$$

### **I-3-2- Influence de la composition chimique sur la structure des aciers**

Les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) de grade X60 API 5L sont des aciers micro alliés au niobium, vanadium, et titane. Les autres éléments principaux entrant dans la composition chimique de ces aciers sont : le Carbone, le Manganèse, l'Aluminium, le Silicium. [8].

Ils sont également communément connus sous le nom des aciers à dispersives 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 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. Par l'effet d'affinage du grain la limite élastique est grandement améliorée selon la norme américaine API, ils sont classés en plusieurs grades : X52, X60, X70, ...

### **I-3-3- Mécanismes de durcissements des aciers HLE**

Afin de satisfaire à toutes les exigences liées aux multiples applications de l'acier, celui-ci doit présenter un grand nombre de caractéristiques alliées à un bas prix de revient.

L'emploi d'aciers de construction ayant des caractéristiques améliorées constitue le seul moyen pour alléger les constructions, de même, le rendement des machines dépend dans une large mesure de la résistance de leurs éléments et des fortement sollicités.

Des améliorations peuvent être apportées aux caractéristiques de différentes façons :

- Par solution solide ;
- Par précipitation ;
- Par dispersion ;
- Par affinement de grain ;
- Par écrouissage ;
- Par traitement thermique ;

# *Chapitre II*

## *Technique de soudage des aciers*

*HLE*

**Chapitre II : Technique de soudage des aciers HLE**

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d'assemblages et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle, le soudage compte parmi les modes d'assemblage les plus répandus dans l'industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, son usage on le retrouve notamment dans la construction mécanique, pour fabriquer des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyauteries, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

**II-1- Définition**

Dans sa définition la plus générale, le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, en assurant la continuité de la matière des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation d'un métal d'apport répond à deux besoins : il permet d'une part de combler le jeu entre les pièces assemblées, et d'autre part de changer la composition chimique et la structure cristalline de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. De manière générale, le terme « soudage » désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation d'un assemblage, et celui de « soudure » désigne le joint formé. [ 8, 9]

Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques. Dans le cas le plus courant des matériaux métalliques, on peut distinguer le soudage autogène (assemblage de deux matériaux de base de même composition sans métal d'apport), le soudage homogène (les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature), et le soudage hétérogène (l'un au moins des trois matériaux, d'apport ou de base, est différent des autres) [10].

**II-2- Classification des procédés de soudage**

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre ;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- La morphologie de la liaison ;

D'une manière globale, on classe les procédés de soudage des aciers comme suite [2] :

➤ **Le brasage**

Consiste à lier les surfaces de deux pièces métalliques dans un joint à recouvrement avec jeu contrôlé (inférieur à 0,5 mm) par capillarité d'un métal d'apport fondu. Le métal d'apport utilisé doit avoir un point de fusion inférieur à celui des métaux de base, qui ne fondent pas pendant l'opération ( $T_f < 450\text{ °C}$ ).

➤ **Le soude-brasage**

Se rapproche du soudage par son mode opératoire (le joint est réalisé en position bout à bout ou en angle), et du brasage par l'utilisation d'un métal d'apport dont la température de fusion  $T_f < 450\text{ °C}$  est plus basse que celle de l'un au moins des métaux de base. Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. La classification de ces derniers (Figure II-1), peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la jonction. Pour certains, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, sans action mécanique, en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme ou un arc électrique. Pour d'autres, la continuité métallique est obtenue par une action mécanique (frottement, pression), éventuellement associée à une fusion ou un échauffement localisé.

➤ **Soudage par pression**

Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant ainsi la continuité atomique entre les bords.

➤ **Soudage par pression et fusion**

On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l'aide d'une décharge électrique avant d'appliquer une pression de contact, et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l'application d'une pression à l'aide d'électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l'endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion.

➤ Soudage par fusion sans pression

La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés.

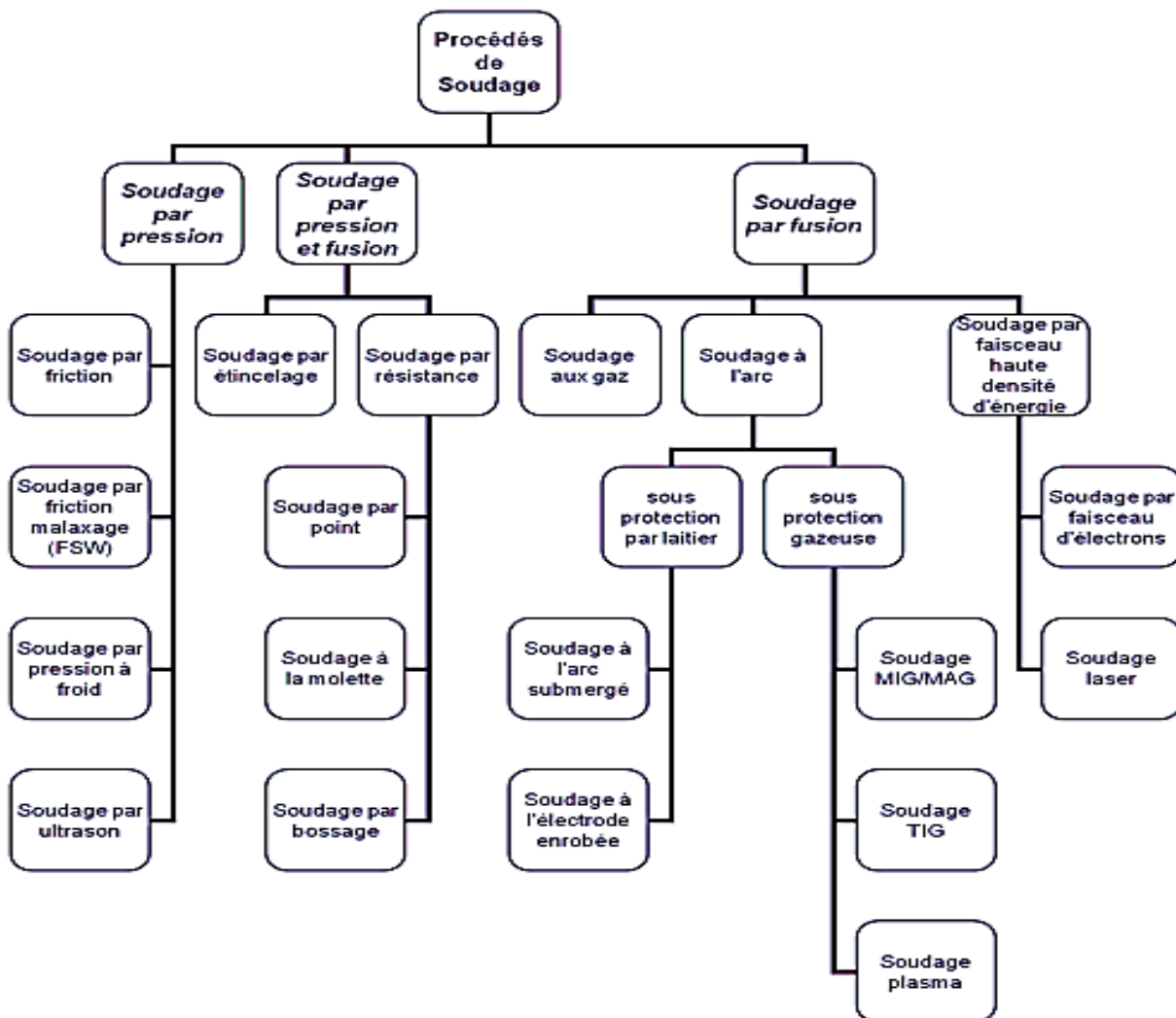


Figure II-1 : Classification des procédés de soudage [2].

### II-3- Procédés de soudage à l'arc électrique

Le soudage à l'arc est un terme générique qui caractérise l'ensemble des procédés de soudage utilisant un arc électrique comme source de chaleur pour fondre et lier les matériaux métalliques. On retrouve dans cette famille quatre principaux procédés, qui se distinguent par

des natures différentes d'électrodes (baguette ou fil fusible, électrode réfractaire) et par la nature du milieu protecteur vis-à-vis de l'atmosphère ambiante (laitier ou gaz). Soudage à l'électrode enrobée SMAW : L'électrode enrobée est formée d'une âme métallique, entourée d'un enrobage, de nature différente selon la qualité de soudure recherchée (oxydant, acide, basique, cellulosique ou rutile) constituant le métal d'apport, de composition généralement proche de celle des matériaux à souder. L'enrobage a pour but de faciliter l'amorçage de l'arc, d'empêcher le métal de la soudure de s'oxyder au contact de l'air ambiant en formant un laitier protecteur, et de stabiliser et guider l'arc grâce à l'effet réfractaire de l'enrobage de l'électrode. Soudage à l'arc submergé ou sous flux en poudre SAW: Ce procédé utilise comme électrode un fil métallique fusible se déroulant de façon continue. Un flux en poudre est amené au niveau de l'extrémité du fil électrode, et recouvre totalement l'arc électrique. Sous la chaleur de l'arc, le flux fond en partie et forme un laitier qui recouvre le cordon et le protège de l'oxydation. Le Soudage à électrode de tungstène non fusible (Tungsten Inert Gas GTAW, TIG) : Dans ce procédé, souvent utilisé dans la construction aéronautique, l'électrode, non fusible, est constituée d'un matériau réfractaire, généralement du tungstène pur ou théorié (allié à 1 ou 2 % de thorium), qui permet de maintenir un arc très stable. L'électrode est fixée au centre d'une torche de soudage dotée d'une arrivée annulaire de gaz inerte (argon ou hélium) protégeant la soudure de l'oxydation à haute température. Un métal d'apport peut être utilisé, sous la forme d'une tige métallique amenée manuellement ou automatiquement dans le bain fondu. Le Soudage sous flux gazeux avec électrode fusible (MIG/MAG, GMAW CO<sub>2</sub>) : L'arc est entretenu entre le métal à souder et un fil-électrode fusible entraîné automatiquement depuis un dévidoir, qui fournit le métal d'apport nécessaire à la réalisation de la soudure. La zone chauffée est protégée par un gaz inerte canalisé par la buse de soudage (on parle alors de soudage MIG, Metal Inert Gas). Dans le cas des aciers, on peut aussi utiliser un gaz actif (on parle alors de soudage MAG, Métal Active Gas), généralement du CO<sub>2</sub> ou un mélange argon-CO<sub>2</sub>, qui améliore la pénétration de la soudure. Le procédé récent appelé SAW utilisant un arc électrique submergé est largement utilisé dans le soudage des tubes de pipeline.

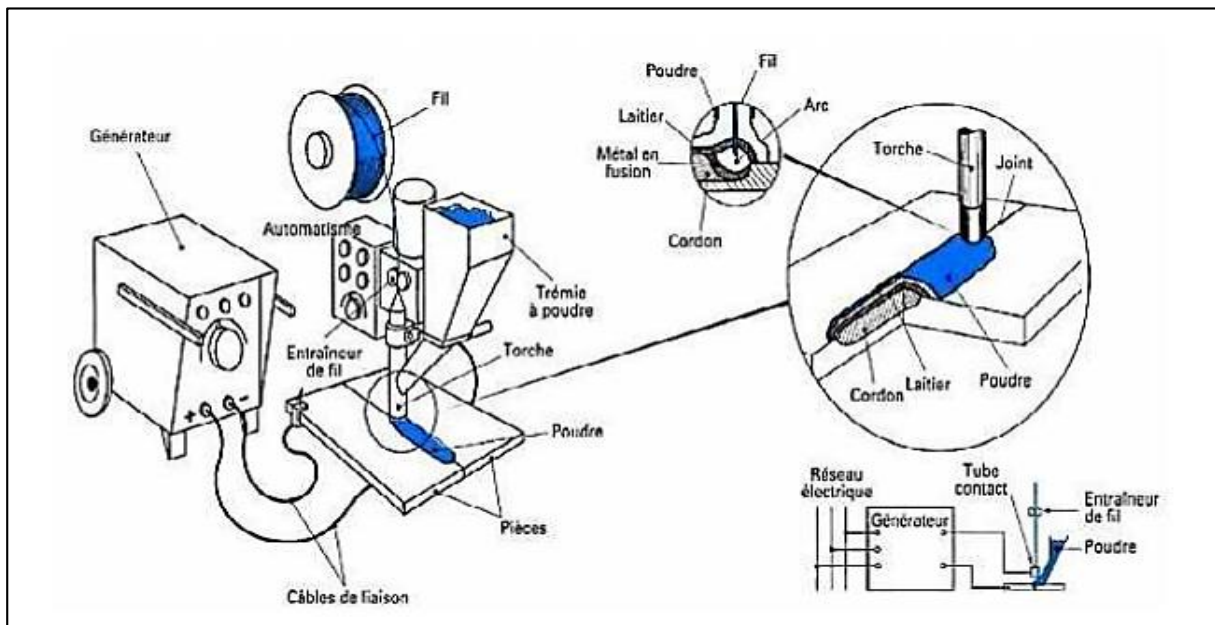


Figure II-2 : Principe de base du soudage à l'arc submergé SAW [3].

**II-3-1- Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW)**

Le procédé de soudage utilisé dans notre étude est le soudage à l'arc sous flux en poudre avec fil électrode (procédé automatique) dont le principe est le suivant :

Le soudage à l'arc sous flux en poudre utilise un ou plusieurs fils nus ou un feillard fusible, L'énergie mise en œuvre pour réaliser le joint est produite par le passage d'un courant électrique entre l'électrode et la pièce à souder, au travers d'un milieu constitué par un laitier résultant de la fusion d'un flux en poudre recouvrant l'extrémité du fil, l'arc et le bain de fusion. Ce procédé n'est utilisé qu'en automatique et en position à plat.

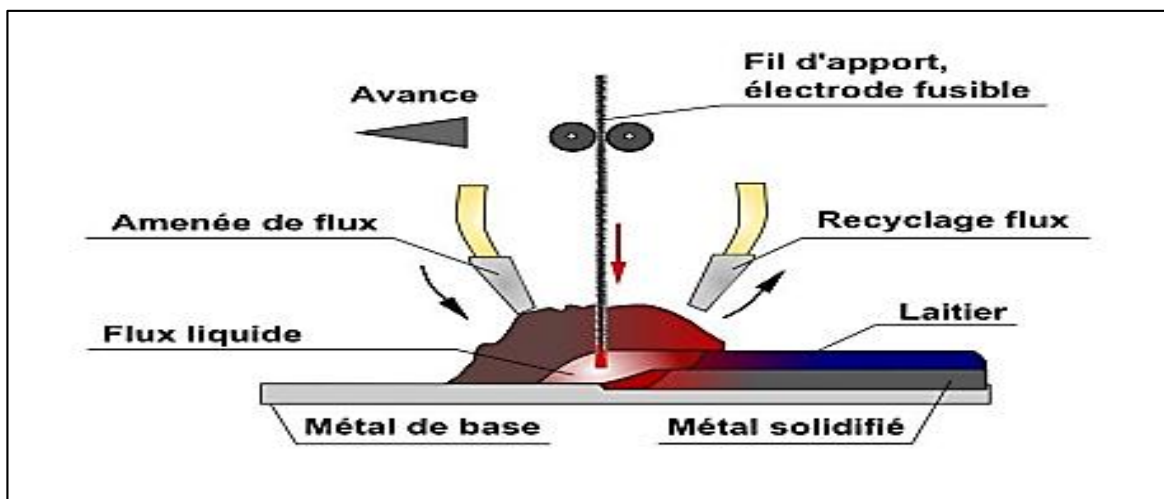
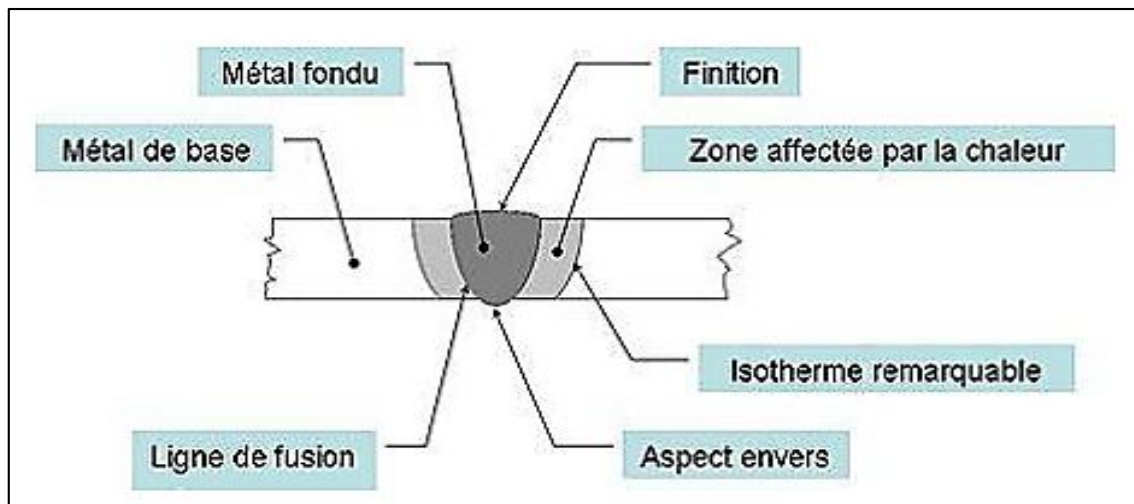


Figure II-3 : Procédé de soudage sous flux en poudre(SAW) [3].



**Figure II-4 zones après soudage [1].**

Pour caractériser un cordon de soudure (métal de base, ZAT, joint de soudure), on s'aide de plusieurs types de méthodes (observations à l'œil nu, observation au microscope, essais : mécaniques, ou autres) et ce en se basant sur certaines propriétés de ces matériaux. Dans ce chapitre nous allons définir notre acier, ainsi les méthodes de caractérisation utilisées.

### II-3-1-1- Principe de fonctionnement

En effet il associe un fil électrode fusible, dévidé d'une bobine, avec une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite comparable à l'enrobage et apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues multi horaires. Ce procédé est aussi appelé soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) ou SAW [3].

L'opération de soudage comprend les différentes phases suivantes :

- Mise en place des pièces et maintien de celles-ci dans leur position relative ;
- Mise en position de la tête sur le point de départ de la soudure, l'électrode émergeant du tube contact ;
- Appui sur le bouton de commande, ce qui déclenche le cycle proprement dit, à savoir :
  - Ouverture de la trappe de la trémie de flux, lequel se répand dans la zone d'arc ;
  - Mise sous tension du générateur en apparition de la tension à vide  $U_0$  ;
  - Avance du fil par mise en marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contact électrode ;
  - Pièce et la fusion ainsi que le dépôt de métal s'installent instantanément ;

- Commande du déplacement relatif tête /pièce pour former le cordon de soudure.

Après soudage, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi, qu'il est nécessaire d'enlever par piquage (au moyen d'un marteau) et qui est lui-même recouvert du surplus de poudre non fondue dans l'opération et récupérable, après traitement éventuel, pour un nouvel emploi. La consommation en poids de poudre est en pratique du même ordre que celle du fil lui-même. Pendant le soudage, le flux s'appauvrit en éléments essentiels et doit être retraité avant sa réutilisation. Cela peut s'effectuer en cycle fermé par filtrage, séchage puis réalimentation. [3]

### **II-3-1-2- Domaines d'application du procédé SAW**

Le soudage sous flux en poudre s'applique principalement au soudage des aciers ferritiques et austénitiques. Sa forte pénétration, sa haute productivité, son prix de revient, le destinent aux fortes épaisseurs (>5mm), par exemple, il autorise grâce aux énergies de soudages élevées l'assemblage bout à bout en une seule de 15mm d'acier sur bords jointifs chanfreinés.

Les principales applications se trouvent dans le domaine de la charpente métallique. La construction navale et de la grosse chaudronnerie.

### **II-3-1-3- Avantages et inconvénients**

Ce procédé est avantageux pour déposer des quantités importantes de métal. Les dépôts sont de bonnes qualités notamment avec l'utilisation de flux basique.

- Il est utilisé à forte intensité (250-400A en mono fils) jusqu'à 1500 A en multi fils ou en feuillard ;
- Il permet des vitesses d'avance élevées (jusqu'à 3m /mm) et le taux de dépôt est important (2.5-12kg/h en mono fils) ;
- Il a un pouvoir de pénétration élevé ce qui conduit à une simplification de la préparation

Des bords ;

- L'arc n'est pas visible et ce procédé ne génère ni projection ni fumée de soudage ;

- **Inconvénients**

- Usage limité à la préfabrication en atelier ;
- Limité aux joints à plat (angle et bout à bout) ;

### **II-3-1-4- Influence des paramètres**

La pénétration augmente lorsque l'intensité augmente, mais celle-ci a peu d'influence sur le largeur et la surépaisseur du cordon.

- **Influence de la tension d'arc (U)**

Si la tension à l'arc augmente, la largeur du cordon, la consommation de flux et le risque de caniveaux augmentent.

- **Influence de la vitesse de soudage (Vs)**

Plus la vitesse de soudage augmente, plus le cordon est étroit et plus la pénétration moins forte.

### **Influence du diamètre du fil d'argent**

Aux autres paramètres constants, la pénétration augmente quand le diamètre du fil diminue.

- **Influence de la polarité**

En courant continu, on raccorde généralement le pôle (+) au film, mais si l'on met au pôle (-)

- La pénétration diminuée ;
- La stabilité de l'arc est moins bonne ;
- La vitesse de fusion et le taux de dépôt augmente ;

### **Influence de la longueur libre de fil (stick out)**

Généralement la longueur libre de fil est égale à 5 à 7 fois le diamètre de celui-ci. Si cette longueur augmente, la pénétration diminue, l'arc est moins stable. Par contre le taux de dépôt augmente.

### **II-3-1-5- Sources de puissance et équipement**

Des sources de puissance en courant alternatif et en courant continu sont utilisées pour le SAW. Si on utilise une technique à plusieurs fils, il est souvent avantageux d'utiliser du courant alternatif pour l'ensemble des fils de manière à restreindre ou à éliminer les problèmes de soufflages de l'arc.

Cependant pour des raisons de pénétration, il peut être indiqué courant continu positif pour le fil d'électrode fusible. Certaines procédures de soudage peuvent admettre l'utilisation d'un fil d'apport sans devoir ajouter de flux de courant dans le bain de soudure.

L'amplitude du courant utilisé dépend considérablement du diamètre du fil, de la forme de courant. Il est classique d'utiliser pour le soudage de soudure en continu de tubes une intensité comprise entre 600 et 1500A.

Les sources de puissance autorégulatrices utilisant une technique à fils multiples avec du courant continu et de courant alternatif sont susceptibles d'être utilisées pour les soudures continues sur le tube.

**II-3-1-6-Nature et utilisation des fils électrodes**

Le choix du fil électrode est fait en fonction :

- Du matériau à souder (nuance ou qualité) ;
- De l'épaisseur ;
- Du mode opératoire ;

Il y a différents diamètres possibles (mm) :1.2-1.6-2.0-3.2-4.0.

Celle-ci mesure la vitesse de fusion, elle est principalement fonction :

- Du diamètre de fil.
- De la nature du courant (continu ou alternatif) ;
- De la nature de fil ;
- De l'intensité appliquée,
- De la polarité ;

Sa composition chimique peut être comme suit :

C0.10% ; Mn1% ; Si0.10% ; Mo0.05% ; Fe98%.

Ce produit incombustible doit être stocké dans des containers pour éviter la reprise d'humidité

Taille de grains 0.05à2mm.

Non soluble dans l'eau. La densité 1.0g/cm<sup>3</sup>.

**II-3-1-7- Flux**

Les flux agglomérés ont un aspect mat par rapport aux flux fondus. Pour fabriquer ce type de flux, les constituants sont mélangés à sec puis liés avec du potassium ou du silicate de sodium. Le flux est ensuite chauffé à une température inférieure au point de fusion et reste ainsi à l'état d'une poudre ensuite triée au tamis et emballée.

Le flux aggloméré de soudage utilise dans la soudure des tubes en ALFAPIPE est de type P223, sa composition est :

Magnésie 20%, Fluorures20%, Silice20%, Alumine20%

➤ Caractéristiques :

- Produit incombustible.
- Doit être tenu à l'abri de l'humidité pour éviter la rouille.
- Non soluble dans l'eau.
- Densité 7.8g/cm<sup>3</sup>.
- Ce produit peut être éliminé comme un DIB ou être recyclé, conformément à la réglementation locale.

**a) Types de flux en poudre utilisés :**

- **Flux fondu** : les ingrédients sont mélangés et traités dans un four électrique à l'arc. Le produit obtenu est parfaitement homogène.
- **Flux aggloméré** : les ingrédients constitués de poudres métalliques et de produits minéraux sont agglomérés avec un liant (silicate de sodium) dans un four à basse température.

Le flux en poudre à trois rôles principaux :

- **Electrique** : le flux est isolant à froid et est conducteur (à chaud) du courant électrique.
- **Métallurgique** : le flux protège le bain de fusion de l'air ambiant. Il assure un refroidissement lent du bain de fusion en créant un matelas d'isolation. Il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires.
- **Physique** : le flux fondu maintient le bain de fusion jusqu'à son refroidissement en créant un moule à la surface du bain. Il protège l'opérateur des rayonnements U.V en masquant l'arc électrique.

La valeur de la tension de soudage a une influence importante sur le pouvoir de détachement du laitier déposé en surface du cordon de soudure. Le laitier se détache difficilement si :

- La tension est trop élevée (formation de caniveaux en rive de chanfrein) ;
- La tension est trop faible (cordon bombé, mouillage insuffisant).

**b) Domaines d'applications du flux**

Le soudage sous flux se place, par rapport au soudage à électrode enrobée, avec pratiquement les mêmes avantages quant à son adaptabilité métallurgique, mais il résout le problème de la productivité par :

- Son fonctionnement continu grâce au fil-électrode.
- Son taux de dépôt supérieur.

Cela le cantonne dans le domaine de la chaudronnerie moyenne et lourde et, de façon générale, dans les applications dans lesquelles :

- Les épaisseurs sont élevées (> 30 à 50 mm) et, par suite, les chanfreins importants ;
- Les soudures sont longues (plusieurs mètres) et uniformes (absence d'angle).

Ce procédé n'est pratiquement pas utilisé manuellement à cause des amenées de flux et de fil qui forment, au niveau de la torche, un appareillage lourd et difficilement manœuvrable. Il se prête, par contre et naturellement, car c'est pour cela qu'il a été développé, à la mécanisation

du soudage pour laquelle la position à plat, nécessaire à la retenue du flux, est facile à observer. C'est ainsi que se sont développés des moyens appropriés tels que les vireurs, les positionneurs, les potences et autres chariots automoteurs, appropriés à la manipulation de la tête ou de pièces lourdes. Il n'est pas utilisé en extérieur sur chantiers.

**c) Avantage**

- a) Addition de désoxydants et de ferroalliages.
- b) Peuvent être codés par couleur.
- c) La profondeur du flux est moins importante.

**d) Inconvénients**

- a) Le flux est hygroscopique c.à.d. que le flux a tendance à absorber l'humidité ;
- b) Le processus de séchage du flux est plus important ;
- c) Les laitiers en fusion risquent davantage de provoquer des porosités ;
- d) Le recyclage est plus difficile à réussir car il est plus difficile d'éliminer les impuretés et de tamiser.

**e) Influence de l'épaisseur de la couche du flux**

Elle doit être suffisante pour assurer une bonne protection du bain de fusion liquide pour éviter les projections, les arcs visibles... pratiquement on fera en sorte que le lit de flux arrive un peu au-dessus du tube contact.

**f) Etuvage des flux :**

Pour les soudures risquant la fissuration à froid, on utilise des flux agglomérés dits « bas hydrogène », c.à.d. qu'ils ne sont pas susceptibles de produire un taux d'hydrogène diffusible supérieure à 5 ml/100g de métal fondu. Avant utilisation, ces flux doivent être étuvés dans des conditions proches de ce que l'on pratique pour les électrodes basiques.

Exemple :

- 200°C pendant 2heurs ;
- 400°C pendant 1heure.

### g) Recyclage de flux

Le flux non consommé, collecté après la fin du soudage, devra être épuré de tout contaminant (laitier, métal...etc.). Un ajout de 10à40% de flux neuf recommandé pour maintenir la granulométrie initiale du flux.

### h) Couple flux/fil

En soudage (et en rechargement) on fait une association d'un fil et d'un flux. Les caractéristiques d'un joint ne sont toutefois pas seulement fonction du fil et du flux employé, mais en fait du trinôme : **Métal de base \*fil\*flux**

### i) Choix du couple fil/flux :

Il dépend :

- ♣ La nuance de la tôle.
- ♣ Du nombre de passes.
- ♣ De la préparation des bords à souder.
- ♣ Du procédé de soudage (énergie de soudage, mon, ou bi fil.
- ♣ De la nécessité ou non de faire un post chauffage

### II-3-2- Transformations subies lors du soudage par fusion

L'apport de chaleur étant très localisé avec la plupart des procédés de soudage par fusion, des gradients de température importants sont observés, et la température maximale atteinte diminue lorsque l'on s'éloigne de la zone centrale de la soudure. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure typique d'une soudure est composée de quatre zones principales (Figure II.3) ci-dessous :

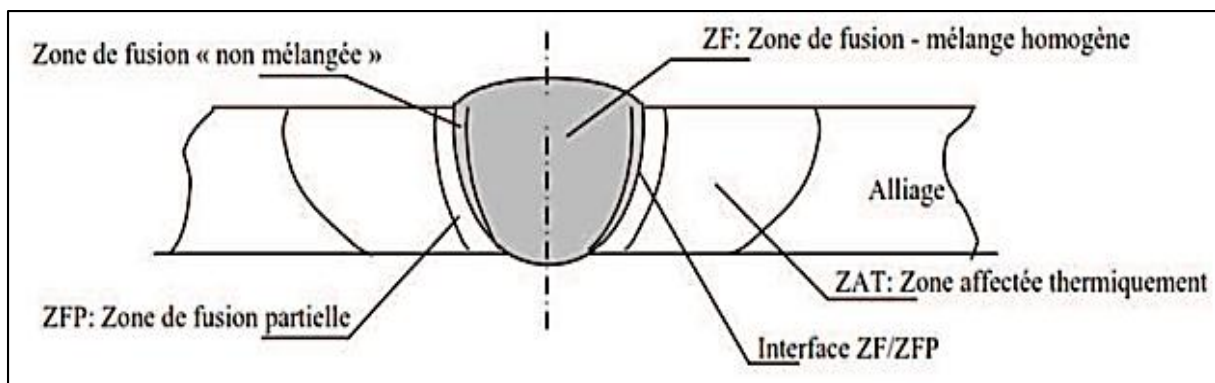


Figure II-5 : Les différentes zones d'une soudure par fusion [4].

a) **Zone fondue (ZF)**

La région centrale de l'assemblage, qui a été portée au-dessus de la température de liquidus du matériau, passe à l'état liquide puis se solidifie en refroidissant. Sa composition chimique après solidification dépend principalement des compositions des métaux de base et d'apport et du cycle thermique subit, qui favorise plus ou moins la fusion des matériaux de base. Du fait de cinétiques de solidification et de refroidissement, généralement très rapides, la composition n'est pas homogène dans cette zone, à cause notamment des phénomènes de ségrégation à la solidification. On peut parfois observer une zone "non mélangée" au bord de la zone fondue, dans laquelle les mouvements de convection plus lents dans le métal liquide ont limité la dilution entre le métal déposé et le métal de base.

b) **Zone de liaison ou zone de fusion partielle (ZFP)**

Cette zone directement adjacente à la zone fondue a été chauffée jusqu'à une température comprise entre le liquidus et le solidus du matériau, et est donc partiellement fondue. En raison des forts gradients thermiques, elle est généralement très étroite.

c) **Zone affectée thermiquement (ZAT) (largeur > 8mm)**

Cette zone, de largeur très variable selon les matériaux et les conditions de soudage, a été portée à une température inférieure au solidus du matériau, mais suffisante pour produire un changement de structure ou de taille de grain. Le métal de base en dessous d'une certaine température ne subit aucune modification microstructurale, est n'est donc pas affecté par l'opération de soudage.

**II-3-3- Spécification API 5L :**

**42ème édition – janvier 2000 composition chimique (en %) sur coulée et sur produit :**

Nuances	Carbone maxi	Manganèse maxi	Phosphore maxi	Soufre maxi	Autres
A	0.22	0,90	0,030		0,030
B	0.26	1,20	0,030		0,030
X42	0.26	1,30	0,030		0,030
X46.X52.X56	0.26	1,40	0,030		0,030
X60	0.26	1,40	0,030		0,030
X65	0.26	1,45	0,030		0,030
X70	0.26	1,65	0,030		0,030

**Tableau II-2 : Spécification API 5L [13]**

- Pour chaque réduction de 0,01 % de la teneur maximale en carbone, la teneur maximale en manganèse peut être augmentée de 0,05 %, jusqu'à un maximum de 1,50

% pour les nuances X42 à X52, et 1,65 % pour les nuances au-dessus de X52 mais inférieures à X70, et 2,00 % pour les nuances X70 et plus.

- Du niobium, du vanadium, du titane ou une combinaison de ces trois éléments peuvent être utilisés, après accord entre le client et le fabricant.
- La somme des dosages de niobium, vanadium et titane ne peut excéder 0,15 %.
- D'autres compositions chimiques peuvent être fournies par accord entre l'acheteur et le fabricant, sous réserve que les limitations de la note d et celles des tableaux pour le phosphore et le soufre soient satisfaites.

**II-3-4- Défauts de soudage rencontré (NF EN 26250).**

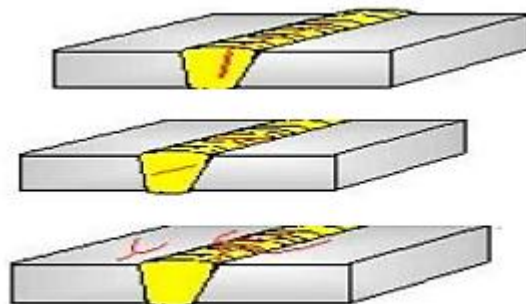
La classification des défauts de soudure conformément à la norme NF EN 26250.

- j) Groupe 1 : Fissures ;
- k) Groupe 2 : Cavités ;
- l) Groupe 3 : Inclusion solide ;
- m) Groupe 4 : Manque de fusion / Manque de pénétration ;
- n) Groupe 5 : Défauts de forme.

**o)**

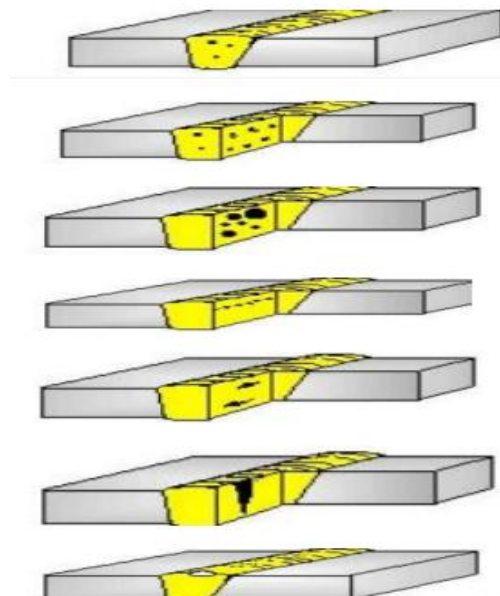
**a) GROUPE N°1 : FISSURES :**

- Fissures longitudinales
- Fissures transversales
- Fissures rayonnantes



**b) GROUPE N°2 : CAVITES :**

- Soufflures sphéroïdales
- Soufflures uniformément
- Nids de soufflures
- Soufflures alignées
- Soufflures allongées
- Soufflures vermiculaires
- Piqures

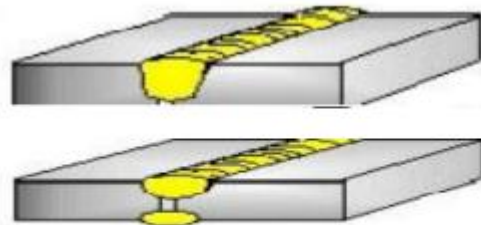


c) **GROUPE N°3 : INCLUSIONS SOLIDES :**

- Inclusions de laitier
- Inclusions de flux
- Inclusions d'oxydes
- Inclusions métalliques

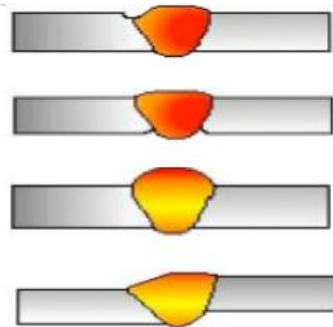
d) **GROUPE N°4 : MANQUE DE PENETRATION :**

- Manques de fusion des bords
- Manques d'interpénétration



e) **GROUPE N° 5 DEFAUTS DE FORME :**

- Caniveaux
- Caniveaux à la racine
- Surépaisseurs excessives
- Défauts d'allonge



**II-3-5- Conclusion :**

Les paramètres opératoires du procédé de soudage SAW utilisé à ALFAPIPE sont optimisés en fonctions de plusieurs facteurs, la norme API 5L définit les modalités d'application. Parmi les facteurs déterminants on cite :

- Les paramètres métallurgiques MB : L'épaisseur MB,
- Les paramètres métallurgiques du métal d'apport ;
- La vitesse de déplacement (soudage)
- Les paramètres électriques : Tension et courant de l'arc Plusieurs facteurs contribuent à la variabilité de la qualité de la soudure, si certains paramètres sont constants et prédéfinis à l'avance conformément aux procédures et aux normes API en vigueur, les paramètres variant dans le temps et au cours du procédé de soudage tel que les grandeurs électriques de l'arc (U, I, R) méritent d'être étudiés en détails : Le projet de la nouvelle version de la norme API en tiendra compte. Cet aspect fera l'objet d'un éventuel travail futur.

*Chapitre III*  
*Matériel et Méthodes*  
*d'investigations*

### Chapitre III : Matériel et Méthode d'investigation

#### III-Matériel et méthode d'investigation

##### III-1-Paramètres d'étude

##### III-1-1- Matériau utilisé

Acier à haute résistance laminé à chaud désigné sous le vocable : **API 5L X60M PSL2**.

Désigné sous la norme **API 5L X60M** où :

- **API** : Institut Américain du Pétrole.
- **5L** : Spécification pour le pipeline.
- **X** : Désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.
- Le chiffre après le "X" correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. Dans notre cas X60 a une limite d'élasticité minimale de 60ksi (415MPa).
- **M** : laminage thermomécanique.
- **PSL2** : Spécification pour la composition chimique.

##### III-1-1- Composition chimique

L'analyse chimique sur le métal X60M fut effectuée au niveau de l'entreprise **ALTUMET Spa Réghaia** sur un spectromètre de masse. L'analyse de la composition chimique se fait sur le métal de base à l'aide d'un spectromètre de masse. Cet essai est effectué afin de comparer les résultats des analyses à chaque coulée avec celle du fournisseur et aux exigences du client. Tout cela permet de définir les critères de base pour l'acceptation du produit selon sa composition chimique. La composition chimique de l'acier soudé spirale, présentée dans le tableau II-1 :

**Tableau III-1 : Composition chimique de l'acier X60 de notre étude, en %massique[16].**

Fr :98.2	C :0.0347	Si :0.273	Mn :1.13	P :0.0203	S :0.0032
Cr :0.0792	Mo :0.0065	Ni :0.0286	Al :0.0180	Co <0.0005	Cu :0.0211
V : 0.0019	Nb :0.0388	Ti :0.0036	Sn :0.0104	B :0.0001	N<0.0020

##### III-3-Propriétés mécaniques

Les principales caractéristiques mécaniques de notre acier sont regroupées dans le tableau suivant :

**Tableau III-2 :Caractéristiques mécaniques de l'acier X60M selon l'API 5L[16].**

Nuance	La limite élastique (E0.5) (Mpa)		Résistance à la rupture		Allongement	E/R
	MINI	MAX	MINI	MAX	Mini%	MAXI
X60M	415	565	520	760	22	0,88

### III-2- Examen métallographique

#### III-2-1- Généralités sur la métallographie

La Métallographie étudie la structure cristalline des métaux et des alliages et les relations entre cette structure et les propriétés physiques des métaux.

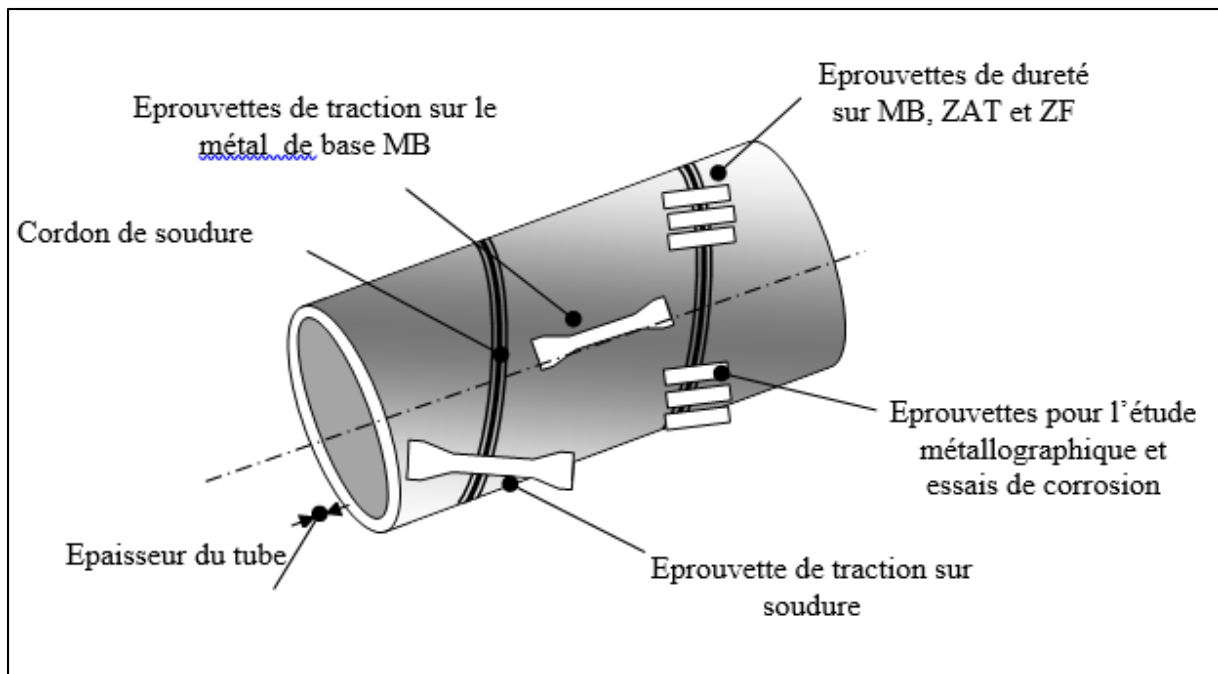
Les principaux outils utilisés en métallographie sont le microscope et le générateur de rayons (X). L'observation au microscope, d'échantillons convenablement préparés, permet de déterminer la taille, la structure et l'orientation des cristaux du métal.

#### III-2-2-Prélèvement dès l'échantillons sur tube soudé

On prélève des échantillons perpendiculaires à la ligne du soudage des tuyaux. Les échantillons prennent des formes d'un arc et afin d'appliquer nos essais on va les platier et on obtient des plaques de dimensions de (10x55mm 5mm), après on les met en forme et chaque essai à ces procédés de mise en forme.

Un mode de prélèvement spécifique est adopté. Le schéma de (la figure. III. 3) résume tous les modes de prélèvements. Le prélèvement des échantillons et des éprouvettes se fait selon deux types :

- Sur soudure afin de caractériser cette dernière ;
- Hors soudure afin de caractériser le matériau en question sans l'effet de soudure.



**Figure III-1 : Sens de découpage des échantillons [1].**

Les échantillons pour nos essais ont été prélevés d'un tube désigné par l'ingénieur pour faire les tests.

-Le résultat observé ne sera pas le même si l'échantillon vient du cœur ou de la périphérie d'un même lingot.

- Le prélèvement se pratique le plus souvent à la scie et on obtient généralement un cube de 10 à 15mm d'arrête ou de millimètres carrés de surface. Ce mode de prélèvement ne doit pas provoquer une grande élévation de température, sinon il pourrait y avoir une modification de la constitution du métal.

### III-3- Caractérisation microstructurale

#### III-3-1- Polissage

Le polissage consiste à rendre la surface de l'échantillon plane, brillante et sans rayures, pour pouvoir observer les détails microscopiques. Dans le but de réaliser un bon polissage, on a procédé d'abord, à un pré polissage des surfaces à examiner, qu'on a réalisé avec un touret sous eau et des abrasifs de plus en plus fins de granulométrie 180,400, 600, 800, 1200,2000 et 2500, puis par une finition réalisée à l'aide d'une pâte diamantée répartie à l'aide d'un diluant sur un disque de feutre.

• Les facteurs influent sur la qualité de la finition de surface :

- ✓ Le type d'abrasif et la taille de grain ;
- ✓ La texture du drap de polissage ;
- ✓ La durée de polissage ;

- ✓ La charge exercée sur l'échantillon ;
- ✓ Le sens de rotation ;
- ✓ La vitesse de rotation.

Chaque nuance a ses propres facteurs. On utilise des papiers avec des particules abrasives, sorte de toile émeri, de papier de verre, mais avec une taille de particules plus fine et maîtrisée, en général en carbure de silicium (SiC) ou en alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

### **III-3-1-1- Etapes de polissage**

Dans notre cas (acier X60M), on a utilisé un papier de carbure de silicium (SiC) et l'eau comme un lubrifiant. On frotte le métal sur le papier de plus en plus fin dans deux sens et on prolonge l'action de chacun d'eux jusqu'à ce que les raies créées par le produit précédent aient disparu et les grades utilisés pour les papiers (180-240-400-600-800-1000-1200-2000-2200-4000) à l'eau.

### **III-3-1- 2-Attaque chimique**

L'attaque chimique, réalisée après l'étape de polissage de finition et juste avant l'observation au microscope, permet d'enlever la fine couche superficielle écrouie et de révéler la microstructure de chaque échantillon et les rendre plus évidentes à observer au microscope. On a attaqué la face à observer avec un réactif chimique composé de « 3% NITAL + 97% ALCOOL », le temps d'attaque est de (3 s) à peu près, après ça les échantillons sont lavés à l'eau et séchés.

### **III-4- Examen au microscope optique**

L'examen se fait soit au microscope optique soit au microscope électronique.

#### **III-4-1- Microscope optique**

Pour caractériser le type, la microstructure, la santé (continuité du matériau), les propriétés d'un acier, on utilise le microscope optique. Les échantillons ont été observés au microscope optique type Nikon Eclipse LV100ND. Son principe repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons métalliques et l'agrandissement des images effectué par un jeu de lentilles disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille objective.

**III-5-Essais mécaniques**

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportement des matériaux. La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression =force /surface) et les déformations.

**III-5-1- Essais de traction**

L'essai de traction constitue un des essais les plus utilisés pour la caractérisation mécanique des matériaux. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement à la rupture et le coefficient de striction. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts « F » de tension de sens opposés et de même valeurs absolues.

**III-5-1-1- Principe**

L'essai consiste à soumettre une éprouvette bien normalisée à une déformation dû à une force de traction jusqu'à la rupture. Ces essais ont été effectués à température ambiante avec une vitesse de déformation constante.

**➤ Eprouvette**

- La norme API5L (ASTM A 370) exige deux éprouvettes dans l'essai de traction.
- TN traction normale.
- TS traction sur soudure

Dimension Ø 16

EP 7.10 mm

Nuance X60M Référence API5L 46 édition PSI2

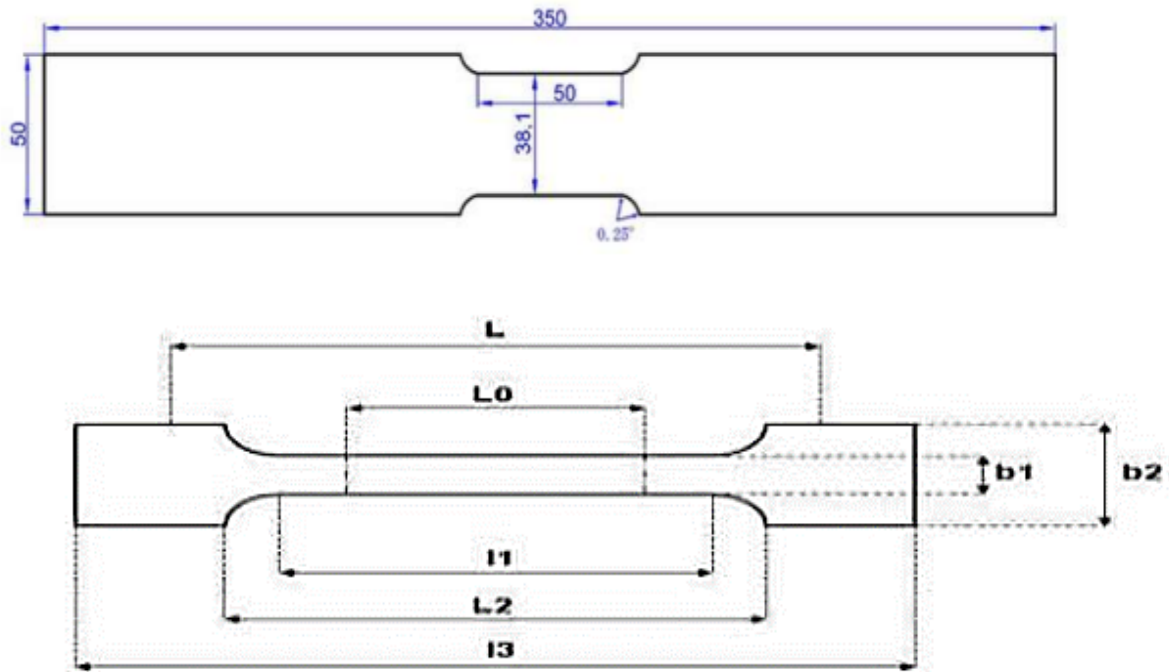


Figure III-2 : Eprouvette de l'essai de traction selon la norme ASTM A 370 [1].

Tableau III-3 : Dimensions des eprouvettes et etat de préparation [1]..

Type d'essai	Désignation	Exigence nominale (mm)	Tolérance( mm)
Traction	Longueur de l'éprouvette (L)	350	.....
	Largeur de la partie calibre (W)	40	+3,-6
	Longueur de L <sub>0</sub>	50,8	±0,10
	Largeur de l'éprouvette (C)	50	.....

➤ **Caractéristiques mécaniques déterminées par la traction**

- ✓ Limite élastique  $\sigma_{e0.2}$  ;
- ✓ Résistance à la rupture  $\sigma_m$  ;
- ✓ Allongement à la rupture A% ;
- ✓ Rapport E/R.

**III-5-1-2- Critères d'acceptation**

Les essais de traction ont pour but de vérifier le comportement de résistance des matériaux

- ✓ La limite élastique  $\sigma_{e0.2}$  % ;

- ✓ La charge à la rupture  $R_m$  ;
- ✓ L'allongement en pourcent A%.

Qui seront effectués suivant les prescriptions de la norme API 5L. On a effectué un essai de traction sur trois éprouvettes.

**La soudure**

- ✓ Analyse de soudure devra être faite pour chaque LOT d'acier employé ;
- ✓ Les résultats de ces analyses devront être conformes au PV d'essai de traction soudure.

Notre essai de traction a été réalisé à l'aide d'une machine de traction, équipée d'un extensomètre permettant l'enregistrement de divers paramètres en parallèle au cours de l'essai dont le but de déterminer certaines propriétés. Nous avons effectué cet essai sur 3 éprouvettes de métal de base et 3 autres dans le cordon de soudure.

**III-5-2 Essai de pliage :**

Le test de pliage consiste à appliquer une déformation plastique en pliant une éprouvette à température ambiante. L'échantillon est plié à un angle spécifique. Le test de flexion est spécifique aux composants soudés. Ils peuvent mettre en évidence la présence de défauts superficiels ou proches de la surface et dans certains cas, évaluer les changements de ductilité dans la zone fondue ou la zone affectée par la température après l'opération de soudage. Il existe de nombreux types d'essais de flexion pour les éprouvettes de soudage bout à bout, principalement :

- ✓ Essai de pliage transversal endroit ;
- ✓ Essai de pliage transversal envers ;
- ✓ Essai de pliage transversal de côté ;
- ✓ Essai de pliage longitudinal endroit ;
- ✓ Essai de pliage longitudinal envers.

**➤ Domaine d'application**

La présente partie de ISO 5173 spécifie la méthode d'essai de pliage transversal envers, endroit sur soudure bout à bout, afin d'évaluer la ductilité et l'absence d'imperfection sur la surface ou près de la surface de l'éprouvette.

➤ **Eprouvette (dimensions)**

Type d'essai	Désignation	Exigence	Norme
Pliage	Larguer de l'éprouvette	38.1	API5L

**III-5-2-1 Types d'essai de pliage et symbolisation**

- ✓ Essai du pliage transversal envers et endroit sur soudure bout à bout (TFBB et TRBB) ;
- ✓ Essai du pliage transversal de côté sur soudure bout à bout (SRB) ;
- ✓ Essai du pliage longitudinal sur soudure bout à bout (LFBB et LRBB).

➤ **Essai avec poinçon**

L'essai doit être effectué en plaçant l'éprouvette sur deux supports constitués de deux rouleaux parallèles ou dans un gabarit en U. La soudure doit se trouver à mi-distance des rouleaux en appliquant une charge perpendiculairement à la surface du pliage en 3 trois points.

➤ **Dimension des dispositifs de serrage gabarit en U**

Epaisseur de l'éprouvette	Rayon du piston	Rayon de la matrice
10	20	32
Ts	2t	rp+ts+2

Pour l'écartement (la distance entre les appuis) :

$$(Agb+2ts+3.2)/2$$

$$\text{Diamètre du poinçon : } Agb=(1.15(D-2t))/(\xi(D/t)-2\xi-1)-t$$

$$\text{ØD}=406.4 \quad t= 7.1$$

$$\xi= \text{pour X60M} = 0.1125$$

Angle de pliage : Toute dépend de la norme appliquée.

➤ **Identification de l'éprouvette ;**

✓ **Marquage ;**

Chaque éprouvette doit être marquée de manière qu'après son prélèvement qu'il soit possible de repérer sa position exacte. Traitement thermique et / ou vieillissement : Aucun traitement thermique ne doit être appliqué à l'assemblage soudé ou à l'éprouvette.

✓ **Résultat d'essai**

Si l'examen de pliage n'a relevé aucun défaut, aucun amorçage de la fissure, l'essai est confirmé.

### III-5-3- Essai de dureté :

#### III-5-3-1- Dureté

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur, par exemple la bille ou la pointe d'un duromètre.

#### III-5-3-2- Micro-dureté

Les essais de micro-dureté correspondent à des charges plus faibles. Le pénétrateur est en général de type Vickers. La mesure de la diagonale de l'empreinte est réalisée à l'aide d'un microscope optique. Pour avoir des résultats satisfaisants, il convient de préciser la vitesse de mise en charge, la charge maximum appliquée et la préparation de l'échantillon testé (polissage, traitement thermique). L'épaisseur de l'échantillon doit être 1,5 fois supérieure à la diagonale « d » de l'empreinte et pour des essais successifs on choisira une distance entre empreintes d'environ 2.5 fois supérieure à la diagonale « d » pour les aciers et 6 fois la diagonale pour les matériaux comme l'aluminium et le cuivre ainsi que leurs alliages.

#### III-5-3-3- Essai de dureté Vickers (HV30)

L'exécution des mesures sur chaque profil commence du métal de base, en allant vers la ZAT puis le centre de cordon de soudure (la zone fondue) et le métal de base de l'autre côté (Figure. III. 6). Le pénétrateur est en forme de pyramide droite à base carrée, la valeur de la dureté consiste à mesurer les deux diagonales de l'empreinte reliés à la charge appliquée par la relation montre sur la (Figure.III-5).

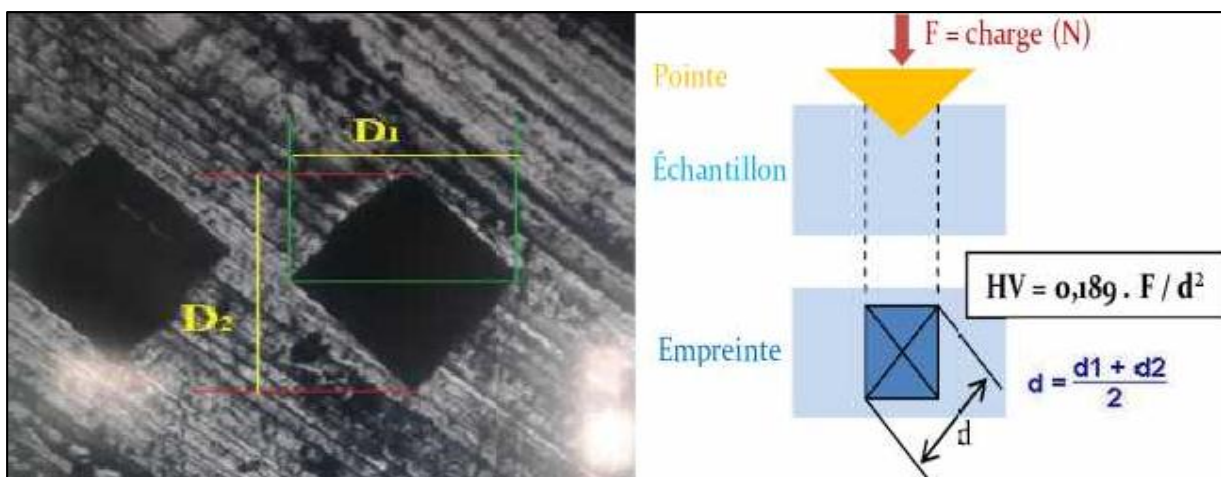


Figure III-3 : Dimensions de l'empreinte et formule de calcul de la dureté Vickers [1].

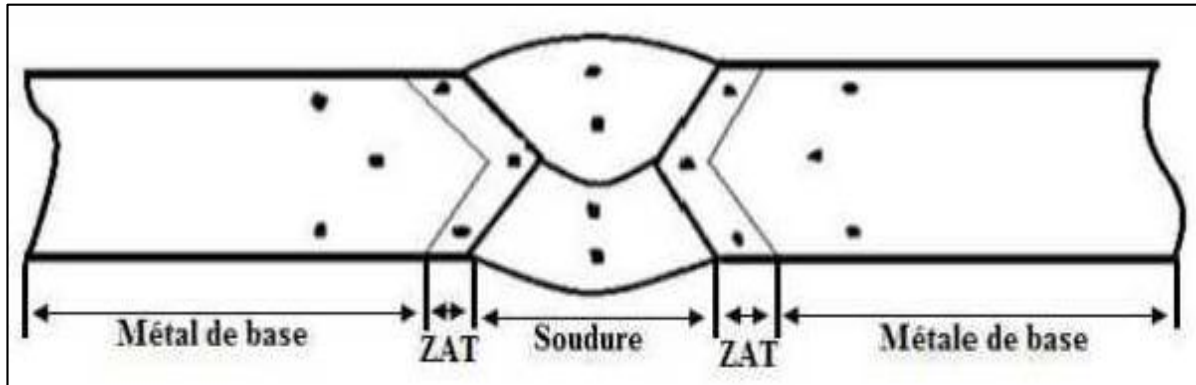


Figure III-4 : Epreuve de l'essai de dureté API [1].



Figure III-5 : Machine de micro dureté digitale.

#### III-5-4- Essai de résilience :

La résilience d'un matériau est une propriété mécanique qui traduit l'aptitude du matériau à garder sa forme après un "choc" mécanique subi. Nous pouvons définir la résilience comme étant le rapport de l'énergie cinétique absorbée nécessaire pour provoquer la rupture d'un matériau à la surface de la section brisée. La résilience qui s'exprime en joules par  $\text{cm}^2$ , caractérise la résistance au choc. Pour cela, une éprouvette entaillée est posée sur deux appuis

et est rompue sous l'action du marteau d'un pendule qui vient la solliciter en son centre sur la face opposée.

➤ **Principe de l'essai**

L'essai consiste à rompre une éprouvette entaillée en un seul coup d'un mouton pendule oscillant.

➤ **Eprouvette**

Type d'essai	Designation	Exigence (mm)	Tolérance (mm)
Résilience	Longueur de l'éprouvette	55	+0,-2.5
	Largeur de l'éprouvette	10	±0.075
	Epaisseur de l'éprouvette	6,70/5,00	±0.1
	Exigence de finition	4um	-----

**III-5-4-1- Mode opératoire**

**Phase 1 :**

Préparation des éprouvettes de la résilience Entaille en V doit avoir un angle rentrant de 45 une profondeur de 2mm et un rayon à fond d'entaille de 0.25.

**Phase 2 :**

Refroidissement des éprouvettes de la résilience. L'éprouvette doit être placée dans une chambre froide, la température du milieu liquide doit être maintenue à la température spécifiée à 0 C° pendant 5 min.

**Phase 3 :**

Exécution d'essai de résilience Les essais doivent être réalisés à 23 ±5 C° température ambiante.

**III-5-4-2- Caractéristiques mécaniques déterminées par l'essai de résilience:**

KV: Energie absorbée pour une éprouvette avec entaille V entre le départ et l'arrivée.

Hv=W/So Critères d'acceptation

Essai	Nombre Eprouvette	Valeur Eng J/cm <sup>2</sup>
<b>MA</b>	3	Moy ≥ 40
<b>La ZAT</b>	3	
<b>MB</b>	3	

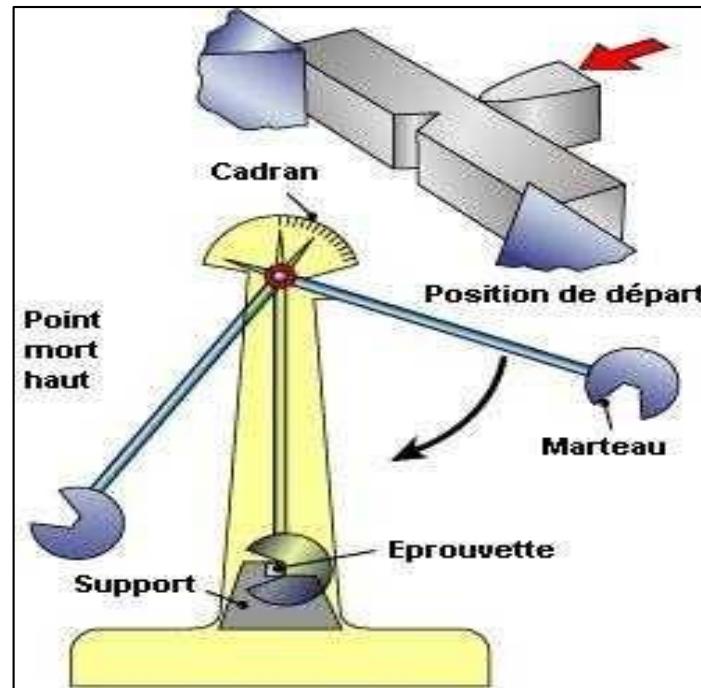


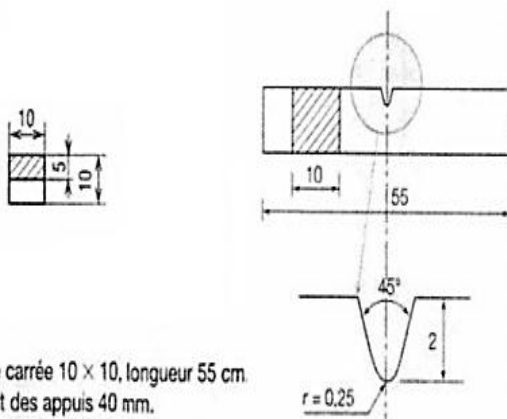
Figure III-6 : Représentation de l'essai de résilience[2].

L'énergie absorbée par l'éprouvette ( $W$ ) est égale à la différence des énergies potentielles du pendule entre le début ( $W_0 = P \cdot h_0$ ) et l'arrivée ( $W_i = P \cdot h_i$ ) :

$$W = W_0 - W_i = P \cdot h_0 - P \cdot h_i = P \cdot (h_0 - h_i)$$

La résilience est égale au rapport de  $W$  sur l'aire de la section au droit de l'entaille. Pour l'essai de **Résilience** on a choisi de prendre deux éprouvettes dans la zone soudée. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures et tableaux suivants.

• KCV



- Éprouvette carrée 10 × 10, longueur 55 cm
- Écartement des appuis 40 mm.
- Profondeur de l'entaille 5 mm.
- Section rompue 0,5 cm<sup>2</sup>.

Les modifications des conditions d'essai donnent des résultats différents qui ne peuvent en aucun cas être comparés.



Figure III-7: Caractéristique de l'éprouvette et la machine de Résilience[16].

*Chapitre V*

*Partie pratique*

### Chapitre IV : Partie pratique

Cette partie concerne la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus après l'étude expérimentale de l'acier X60M au laboratoire des essais mécaniques de l'entreprise ANABIB SAP UNITE ALTUMET, ces essais sont effectués durant la chaîne de fabrication des tubes métalliques (pipeline).

#### IV-1- Essais de contrôle destructif

##### IV-1-1- Analyse chimique

Cette analyse nous a permis de connaître la composition chimique réelle de la nuance X60M. Les résultats obtenus sont regroupés dans le (Tab IV.1). Tous les résultats sont conformes aux exigences de la norme API. On remarque qu'il y a un faible pourcentage de Soufre (S %) et de Phosphore (P %) avec une teneur de (0,0051) et (0,0175). La présence de ces deux éléments est néfaste pour l'acier X60M car ils provoquent la fragilisation de l'acier. Le Fer (Fe) se trouve en grande quantité avec un taux de 97.7 % est l'élément principal de base, il est accompagné d'éléments d'alliages sous forme d'inclusion, en proportion très faibles. Il s'agit du silicium (Si :0,228 %) et du manganèse (Mn :1.27 %). Les propriétés de soudabilité de l'acier seront meilleures si la teneur en carbone est très faible (dans notre étude C :0,0554 %). Le rôle des autres éléments est traduit par  $C_{eq}$ . Pour ce faire on a utilisé la formule suivante pour calculer le CEPCM :

$$CEPCM \% = C + (Si)/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + (Ni)/60 + (Mo)/15 + (V)/10 + 5(B)$$

Le CEPCM est une formule métallurgique qui permet d'évaluer le risque de fissuration après soudage, dans la zone affectée par la chaleur (ZAT). Le CEPCM est le « facteur de susceptibilité aux fissures », après le soudage l'acier X60M s'y prête bien à la soudabilité sans risque de fissuration du fait que  $CEPCM < 0.25\%$ , Il faut aussi calculer le  $C_{eq}$  selon la relation suivante :

$$C_{eq}\% = (C) + (Mn + Si)/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5 \quad (1)$$

**Tableau IV-1 : Composition chimique réelle de la nuance X60M.**

<b>C</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>	<b>P%</b>	<b>S%</b>	<b>Cr%</b>
<b>0,0671%</b>	<b>0,230%</b>	<b>1,29%</b>	<b>0,0175%</b>	<b>0,0051%</b>	<b>0,0253%</b>
<b>Mo%</b>	<b>Ni%</b>	<b>Al%</b>	<b>Co%</b>	<b>Cu%</b>	<b>V%</b>
<b>0,0014%</b>	<b>0,0110%</b>	<b>0,0337%</b>	<b>0,0005%</b>	<b>0,0143%</b>	<b>0,0016%</b>

### IV-1-2- Essai de traction à T=25C°

Pour l'essai de Traction on a choisi de prendre trois éprouvettes de métal de base et une autre éprouvette dans la zone soudée. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures et tableaux suivants.

#### a) Donnes de la machine de l'essai de traction

**Tableau IV-2 : Paramètres des essais de traction.**

<b>Machine universelle de marque ZWICK ROELL.</b>	
Capacité	600KN
Pré charge	2 MPa
Vitesse du module	30 MPa/s
Vitesse de la limite d'élasticité	30 MPa/s
Vitesse dans la plage de fluage	30 mm/min
Vitesse d'essai	0.5 mm/s

#### b) Paramètres de soudage

**Tableau IV-3 : Paramètres de soudage.**

<b>Vitesse 1,30m/min</b>	
<b>U INT/ 31 V</b>	<b>U EXT :32V</b>
<b>I INT : 531V</b>	<b>I EXT : 730V</b>
<b>ØDU FIL INT : S2mo(3,2mm).</b>	<b>Ø DU FIL EXT S2mo(4mm).</b>
<b>FLUX/ FLUX 200 145</b>	

#### c) Résultats des éprouvettes de traction

##### ➤ Métal de base

**Tableau IV-4 : Valeurs numériques des essais de traction.**

<b>Essai</b>	<b>Re 0.2 Mpa</b>	<b>Rm Mpa</b>	<b>R<sub>b</sub> Mpa</b>	<b>a<sub>0</sub> mm</b>	<b>b<sub>0</sub> mm</b>	<b>S<sub>0</sub> mm<sup>2</sup></b>	<b>m<sub>E</sub> Gpa</b>
<b>1</b>	460	536	374	7,1	38	269,80	108
<b>2</b>	457	536	382	7,1	38	269,80	65,1
<b>3</b>	457	538	283	7,1	38	269,80	49,8

Avec :

- **Re 0.2** : Limite élastique conventionnelle.(Mpa)
- **Rb** : Résistance à la traction. (Mpa) ;
- **Rm** : Résistance à la rupture.(Mpa) ;
- **a0**: Largeur initiale de l'éprouvette ;
- **b0**: Longueur initiale de l'éprouvette ;
- **S0** : La surface initiale de l'éprouvette ;
- **A %** : L'allongement.

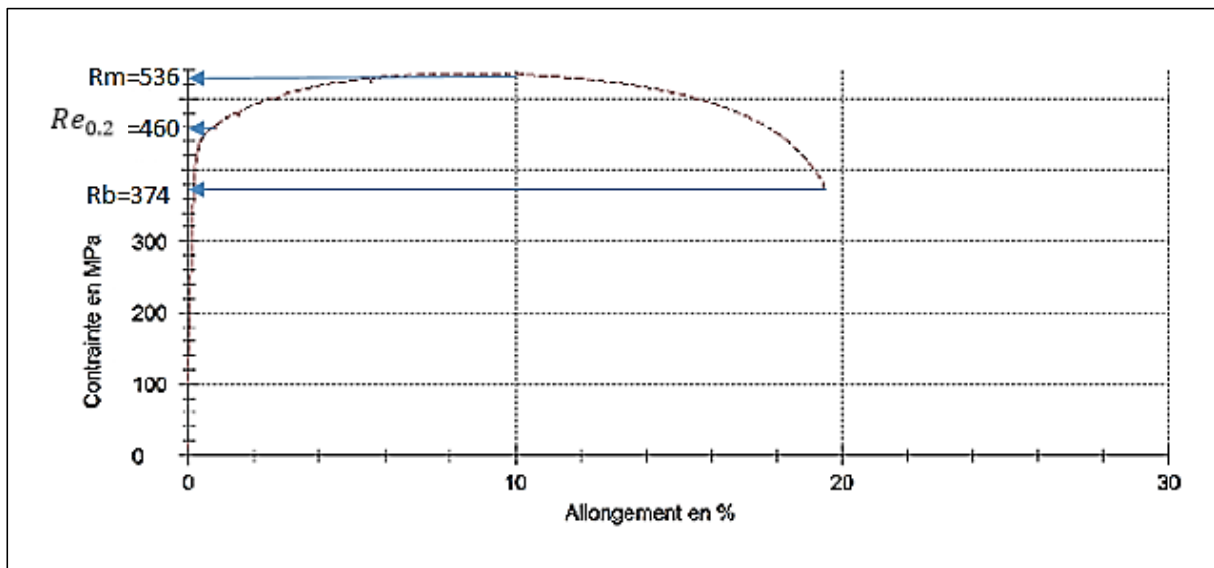


Figure IV-1 : Courbe de traction du métal de base (essai 1).

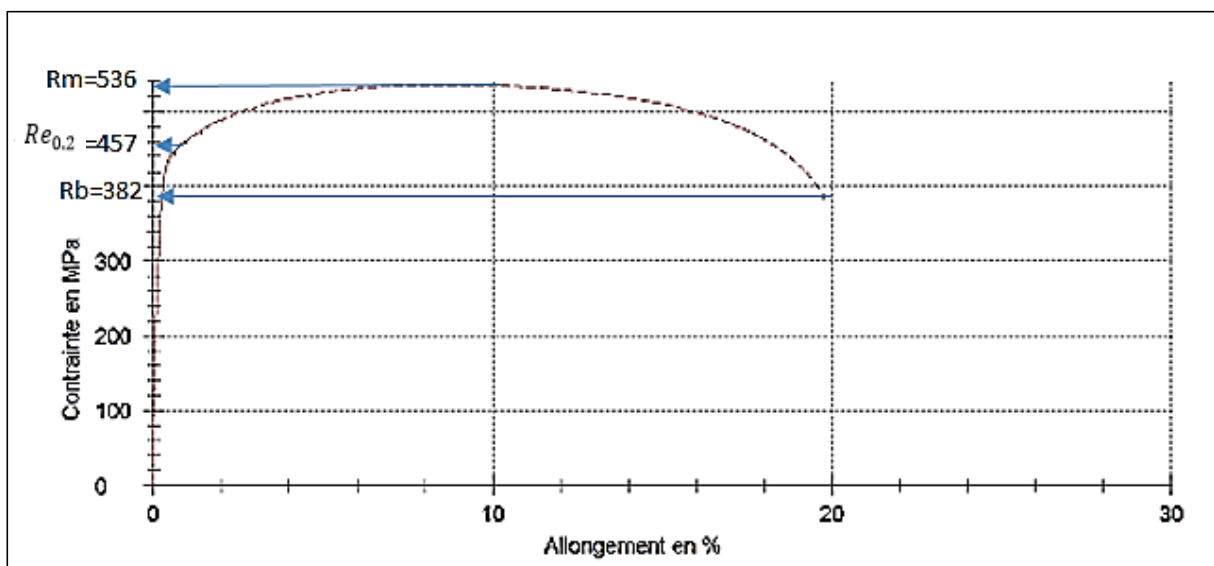


Figure IV-2 : Courbe de traction du métal de base (essai 2).

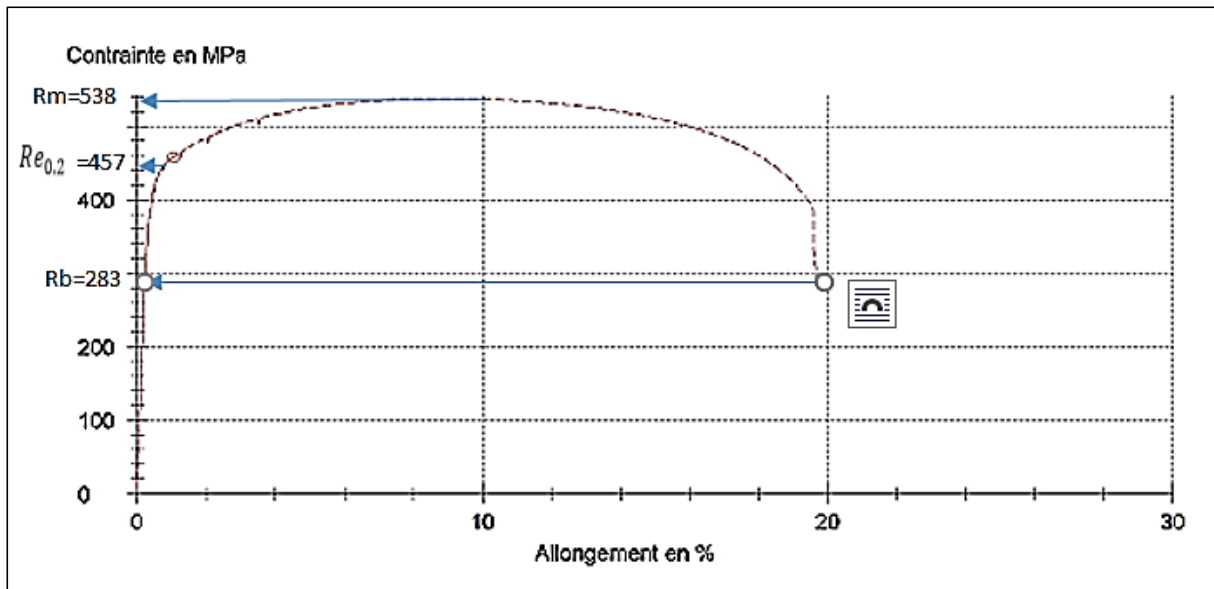


Figure IV-3 : Courbe de traction du métal de base (essai 3).

D’après les résultats illustrés sur les figures : **Figure V-1** **Figure V-2** **Figure V-3**, les valeurs moyennes des trois diagrammes de traction sont montrées dans le **Tableau V-4** :

Tableau IV-5 : Valeurs moyennes d’essais de traction (métal de base).

Essai	Re 0.2(Mpa)	Rm (Mpa)
Moyenne	458	536,67

➤ **Éprouvettes soudées**

Tableau IV-6 : Valeurs numériques d’essais de traction soudure.

Re 0.2(Mpa)	Rm (Mpa)	Re 0.2/Rm %
480	582	82%

**Remarque**

Les valeurs du  $\sigma$  de la soudure supérieure aux valeurs des  $\sigma$  du MB : formation d’une structure favorable présentant des constituants tel que : B , M ,C

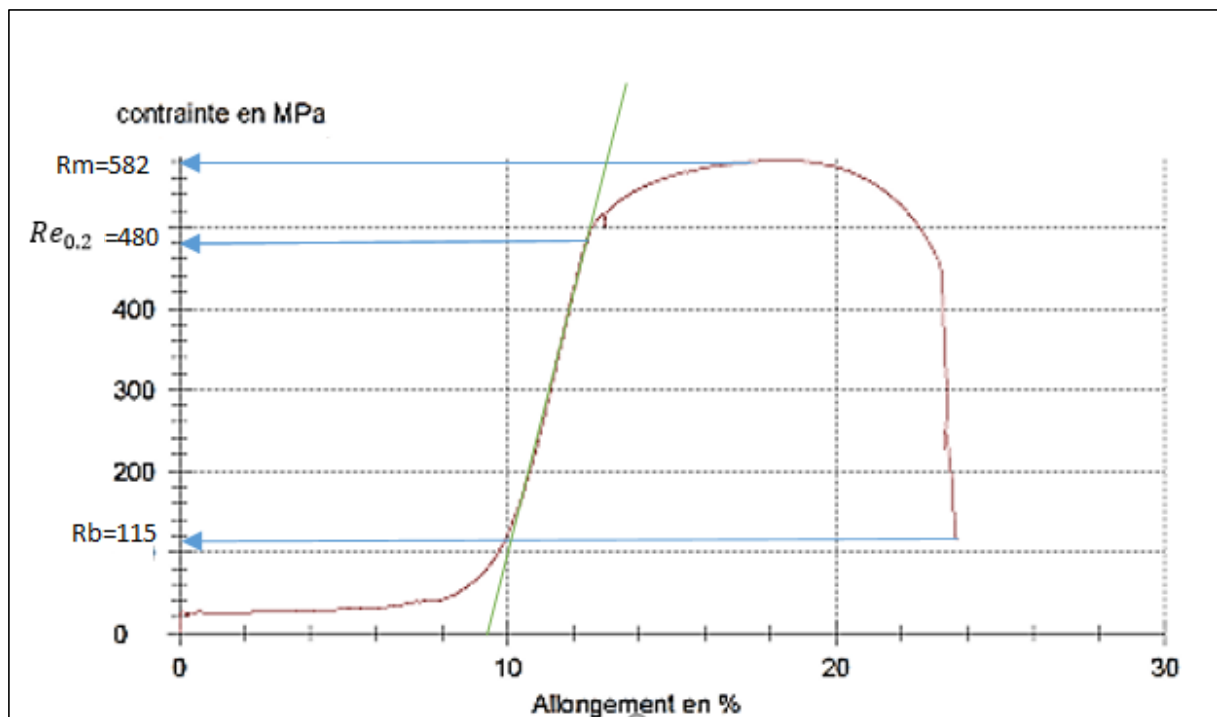


Figure IV-4 : Courbe de traction pour l'éprouvette soudée 1

#### d) Interprétations :

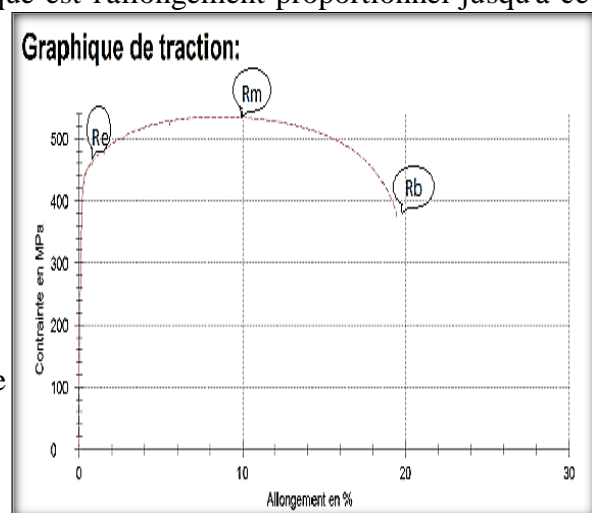
La force de traction exercée par la machine sur l'éprouvette; à tout moment, provoquera la contrainte normale  $\sigma$  égale au quotient de la charge divisée par  $S_0$ , et elle augmente avec l'augmentation de la charge. Le domaine élastique est l'allongement proportionnel jusqu'à ce

que la charge atteigne une certaine valeur correspondant à la limite élastique " $R_{e0.2}$ "; L'éprouvette s'allonge d'une certaine quantité. Si la limite élastique " $R_e$ " n'est pas dépassée, l'éprouvette reprend sa longueur initiale après l'arrêt de l'extension.

Une fois que la contrainte dépasse " $R_e$ ", on entre dans la zone dite de fort allongement de formation plastique permanente, donc le rapport

charge/allongement augmente, le domaine plastique dit irréversible représente la limite entre deux déformations élastiques/plastiques, la déformation subséquente sera permanente et le rapport charge/allongement augmente fortement, du fait de la consolidation du matériau.

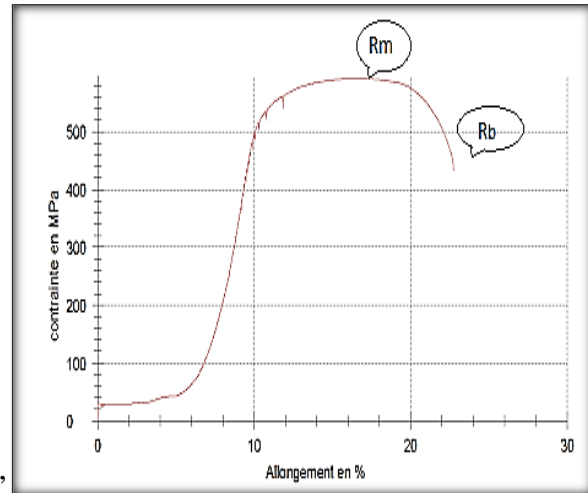
Pour les éprouvettes du métal de base la norme utilisée par l'entreprise n'exige que la limite élastique conventionnelle soit  $R_{e0.2}$ . De ce fait on peut déjà dire que nos essais sur le



métal de base sont conformes aux normes et aux données du fournisseur et que le métal de base est fiable techniquement et industriellement.

Au niveau des éprouvettes soudées, la résistance à la rupture est de 595 MPa. et on remarque que la rupture se fait sur le métal de base ce qui confirme la rigidité du cordon de soudure.

La forme de la courbe de traction sur l'éprouvette soudée, est due aux hétérogénéités que représentent le MB, la ZAT et le CS(ZF). D'après les résultats, la limite élastique de l'acier X60M est relativement haute, la résistance à la rupture est acceptable et l'allongement maximal est considérable, ce qui nous permet de dire que cet acier est ductile, rigide et résistant à la rupture.



#### IV-1-3- Essai de pliage

Pour cet essai on a choisi quatre éprouvettes, deux d'entre elles ont été pliées à l'endroit et les deux autres à l'envers.



Figure IV-5 : Eprouvettes lors de pliage.

## a) Paramètres des essais de pliage

➤ Données de la machine de l'essai de pliage :

Tableau IV-7 : Paramètres des essais de pliage.

Pré charge	2 MPa
Vitesse du module	30 MPa/s
Vitesse de la limite d'élasticité	30 MPa/s
Vitesse dans la plage de fluage	30 mm/min
Vitesse d'essai	0.5 mm/s

b) Résultats des éprouvettes de traction

## ➤ Essai de pliage à l'endroit

Tableau IV-8 : Résultats numériques des essais de traction.

Rm (Mpa)
59,7
61,8

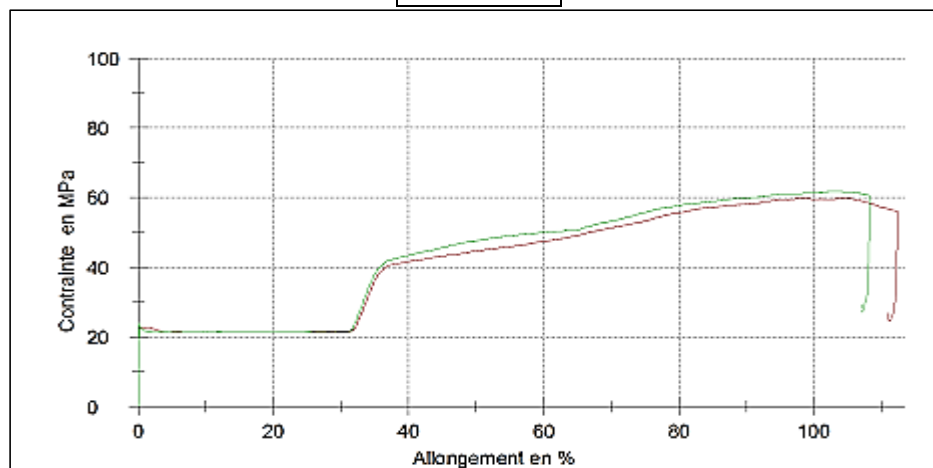


Figure IV-6 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes à l'endroit.

## ➤ Essai de pliage à l'envers

Tableau IV-9 : Résultats numériques des essais de traction.

Rm (Mpa)
59,5
56,3

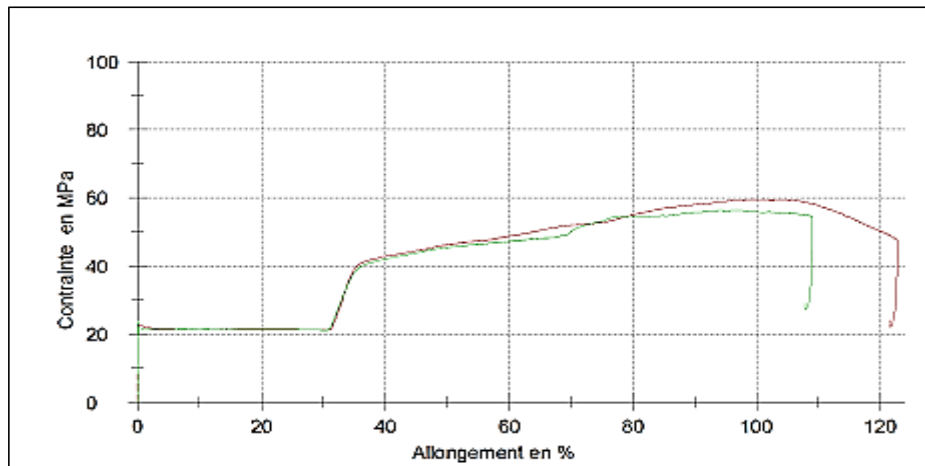


Figure IV-7 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes à l'envers.

**c) Interprétations :**

Le test de pliage met la structure matérielle dans des conditions sévères, c'est pourquoi la rencontre de fissures est très courante, et les mesurer déterminera la conformité par rapport aux normes. Les éprouvettes de pliage ne doivent révéler aucune discontinuité supérieure ou égale à 3mm quelle que soit son orientation. Les discontinuités apparaissant sur les arêtes d'une éprouvette de pliage pendant l'essai ne doivent pas être prises en compte dans l'évaluation, sauf qu'il s'avère que la fissuration est due à une pénétration incomplète, à la présence de laitier, ou à une autre discontinuité.

En générale les essais de pliages de deux cas (envers et endroit) sont des examens visuels, Dans notre contrôle, on observe qu'il n'y a aucune fissure dans les 3 zones des éprouvettes : métal de base, ZAT et la ZF comme indique dans les figures suivantes :



**Figure IV-8 : Courbe de l'essai de pliage pour les éprouvettes à l'envers.**

#### **IV-1-4- Résistance à la rupture fragile (Résilience)**

Les essais de résilience ont pour but de déterminer la résistance du matériau aux chocs sans se rompre, ce risque est amplifié aux basses températures. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette dur deux appuis) et cela se fait selon une méthode normalisée permettant ainsi la possibilité de comparer les résultats avec les données de fournisseur. L'essai mesure l'énergie qu'il faut fournir à un pendule pesant pour briser une éprouvette entaillée du l'acier X60M à tester.

Pour l'essai de résilience, on a utilisé des éprouvettes dont les dimensions sont normalisées, selon la norme API. On a pris neuf éprouvettes entaillés en V. L'essai était réalisé 0 C°.

- Trois éprouvettes pour le métal de base.
- Trois éprouvettes pour la ZAT.
- Trois éprouvettes pour la zone fondue.

	Nuance		X 60 M	Machine		NLAT	
	Dia x Ep		406 x 7,10	Température d'essai :		0 °C	
	Spécifications :		API 5L PSL 2				
Température d'essai	Position	Dimensions	Surface entaille ( cm <sup>2</sup> )	Energie ( J )		Résilience (J/cm <sup>2</sup> )	
	Entaille	Éprouvette( mm)		Individuelle	Moyenne	moyenne(J/cm <sup>2</sup> )	Observation
0 °C	MB	55x10x5	0,40	110	107,33	268,33	Conforme
		55x10x5		108			
		55x10x5		104			
	ZAT	55x10x5	0,40	98	89,33	223,33	Conforme
		55x10x5		92			
		55x10x5		78			
	ZF	55x10x5	0,40	70	76,67	191,67	Conforme
		55x10x5		78			
		55x10x5		82			
0 °C	MB	55x10x5	0,40	112	104,67	261,67	Conforme
		55x10x5		102			
		55x10x5		100			
	ZAT	55x10x5	0,40	100	98,67	246,67	Conforme
		55x10x5		100			
		55x10x5		96			
	ZF	55x10x5	0,40	82	87,67	219,17	Conforme
		55x10x5		89			
		55x10x5		92			

Tableau IV-10 : les résultats de l'essai de Résilience

### Interprétations :

L'essai est réalisé à une température de (0°C) afin de simuler les conditions d'utilisation des pipelines. Aussi, des températures basses réduisent l'allongement à la rupture ce qui conduit à la fragilisation du métal. Pour concentrer les contraintes et donner un sens de propagation de la fissure, on a opté à l'entaille en V afin d'optimiser nos résultats. On remarque que l'absorption **de l'énergie par le métal de base est relativement élevée par rapport à la ZAT**, ce qui reflète un changement structural de cette dernière par rapport au métal de base, On remarque aussi une dégradation dans la résistance au choc pour la zone fondue ce qui reflète la présence des phases dures et d'impuretés concentrées dans cette zone.

#### IV-1-5- Essai de dureté Vickers :

L'essai de dureté est un essai qui caractérise la surface du matériau. C'est un essai simple et rapide à mettre en œuvre, y compris dans des conditions de production. Il ne permet pas de déterminer des caractéristiques fondamentales du matériau, mais il permet de comparer plusieurs matériaux entre eux, et de suivre l'évolution d'un matériau en cours de traitement.

L'essai consiste à créer une empreinte avec un objet sous une certaine charge. Le degré de dureté obtenu est corrélé avec la limite élastique  $R_e$  et la limite à la rupture  $R_m$ .

Il existe plusieurs essais normalisés. Dans tous les cas :

- L'objet doit être stable, la direction de pénétration doit être perpendiculaire à la surface
- La surface doit être plane sur la partie mesurée, et débarrassée de matériaux étrangers, comme par exemple les oxydes.

#### ➤ Essais Vickers

L'essai Vickers consiste à mesurer les dimensions  $d$  de l'empreinte laissée par un pénétrateur pyramidal. La dureté Vickers est notée HV30.

La charge utilisée est de 30 Kgf avec une pénétration de 20 secondes. Les résultats de l'essai sont représentés sur le tableau suivant

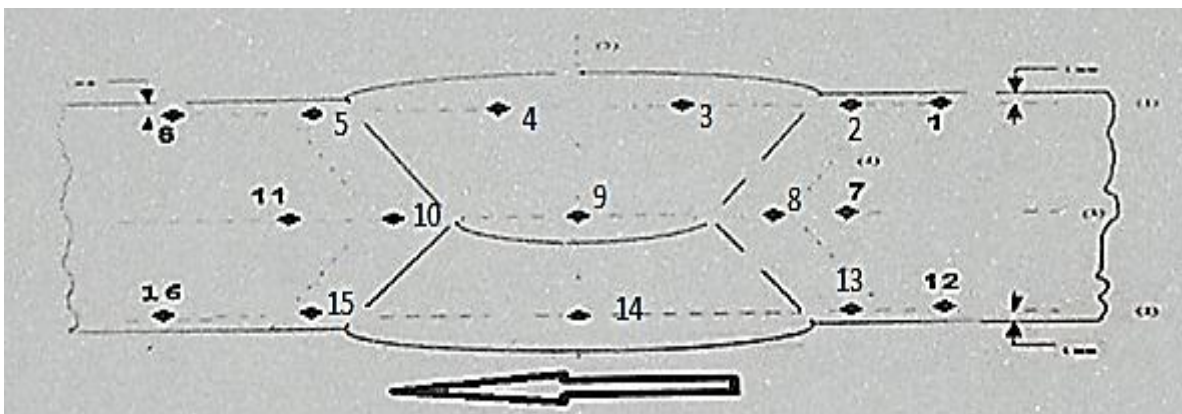


Figure IV-9 : Localisation des positions des empreintes de dureté Vickers HV30

## IV-11 : Résultats de dureté Vickers HV30.

Zone	Nr	Sous série	$d_h$ ( $\mu\text{m}$ )	$d_v$ ( $\mu\text{m}$ )	D ( $\mu\text{m}$ )	HV30
MB	12		299.8	311.5	305.7	198
ZAT	15		311.2	316.3	313.8	197
ZF	14		306.1	297.3	301.7	204

➤ **Interprétations :**

On constate une variation légère de la dureté dans les différentes zones (Zone fondue ZF, Zone affectée thermiquement ZAT et métal de base MB). Ceci peut être expliqué par les conditions favorables de soudage,

La dureté dans la ZAT par rapport à celle M.B il y a une légère variation émanant de la transformation des phases qui se produisent pendant le soudage. (Notamment dans la zone à gros grains).

## IV -2- Caractérisation microstructurale

## • L'examen micrographique

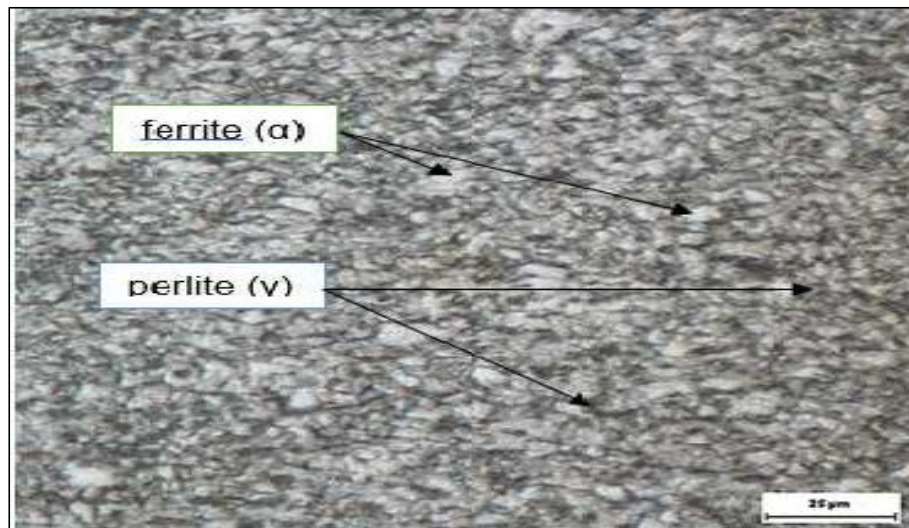
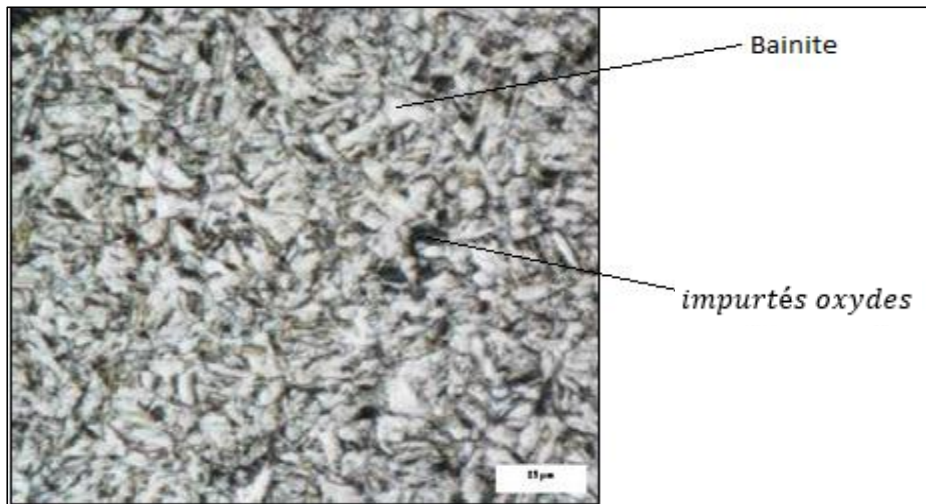
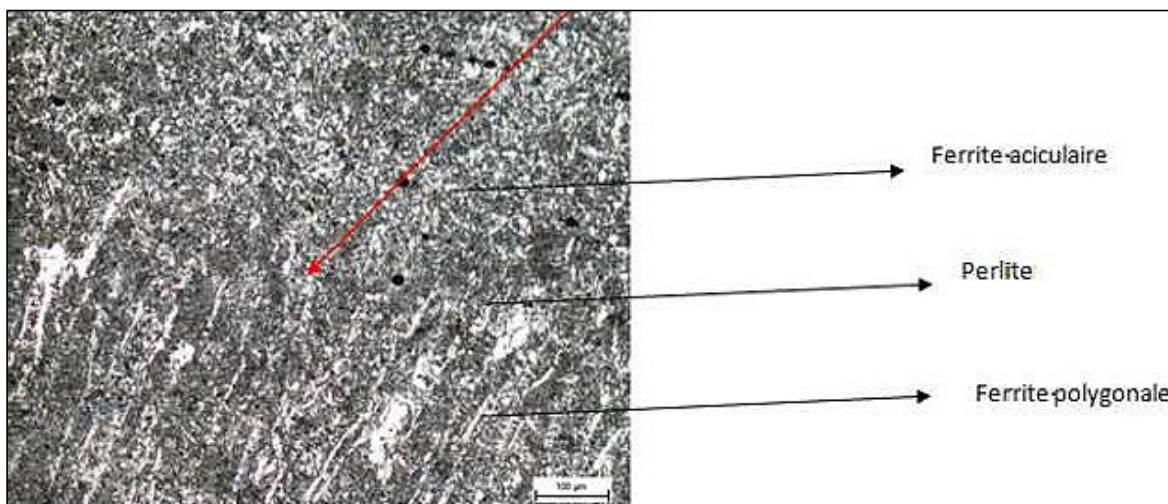


Figure IV-10 : Microstructure de métal de base MB\*400.



**Figure IV-11 :** Microstructure de la ZF\*400.



**Figure IV-12 :** Microstructure d'interface cordon /ZAT\*400.

➤ **Interprétation :**

Les figures précédentes montrent l'existence de trois zones différentes ; la zone fondue (ZF), la zone affectée thermiquement (ZAT) et le métal de base (MB).

On remarque une nette différence morphologie entre le métal de base et la zone fondue, En effet, le métal de base est obtenu par laminage de tôles contrairement au métal d'apport qui est obtenu par fusion directe dans le cordon de soudure.

On peut voir clairement que la structure ne présente pas de défauts pouvant générer une rupture ou une fissuration au niveau du joint soudé ainsi qu'une homogénéité du cordon de soudure, du métal de base au métal d'apport.

L'examen métallographique a révélé :

- Au niveau du métal de base, une microstructure ferrito-perlitique ; la formation de la perlite est due à une vitesse de refroidissement faible pendant le procédé de soudage.

Une microstructure, très fine de métal de base, présentant des grains allongés dans le sens de laminage, (cette microstructure particulière est due principalement à l'effet de niobium qui empêche la croissance et le grossissement des grains austénitiques). Après l'attaque chimique, la ferrite ( $\alpha$ ) se présente au microscope optique, elle est blanche et la perlite ( $\gamma$ ) est plus foncée. La taille des grains n'est pas uniforme. Cette partie de l'échantillon ne subit aucun changement.

- Au niveau de la ZAT, une microstructure non homogène ; une ferrite aciculaire sous forme

D'aiguille orientée aléatoirement au voisinage de la zone fondue et une microstructure formée

- Principalement de ferrite polygonale avec un taux très faible de ferrite aciculaire dispersée dans la matrice perlitique à proximité du métal de base . Cette diversification est du principalement à la différence en terme d'énergie apportée dans les deux régions, ainsi qu'à la composition chimique (faible taux de carbone dans cet acier 0.06%, et l'effet des éléments d'addition).
- La formation de ferrite aciculaire est liée à la quantité d'énergie d'apport apportée lors de procédé de soudage. Plus l'apport d'énergie augmente plus la taille des grains austénitiques est important créant ainsi des sites de germination intra granulaire de la ferrite aciculaire. Le pourcentage de cette phase est en relation étroite avec la taille, la densité et la nature chimique des inclusions non métalliques.
- La zone fondue est constituée de perlite, ferrite proeutectoïde et de ferrite aciculaire dispersée dans la matrice ; la température atteint 1600°C dans cette zone et la vitesse de refroidissement est relativement basse, ce qui favorise la formation de la ferrite proeutectoïde, ainsi les sites de germination de la ferrite aciculaire sont inhibés par la création d'allotriomorphe de ferrite proeutectoïde, d'où le taux relativement faible de cette dernière. Cette zone est caractérisée par un grossissement des grains.

Suivant les teneurs en éléments d'alliage, notamment en carbone et manganèse, et la taille des grains austénitiques, la ferrite se développe et se répartit de manière variée.

### IV-3- Prédétermination des propriétés mécanique

Les propriétés mécaniques de soudage sont importantes pour déterminer la soudabilité matériaux et les performances de service. De plus en plus, les codes de fabrication fixent une limite maximale autorisée dans la soudure. Ces dernières années un certain nombre de formules

empiriques d'estimation des propriétés mécaniques de soudage, tels que HV 30,  $\sigma_{e0.2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta_5$  ont été développées pour prédire l'efficacité de la zone de soudage.

Un outil informatique (MATLAB) à été développé pour déduire les propriétés mécaniques de soudage afin de cibler une combinaison optionale entre les matériaux et les paramètres de soudage pour répondre aux exigences des codes de fabrication et de conception.

Les propriétés des matériaux pour les aciers de pipeline couramment utilisées (X60) sont reportées dans le programme :

Composition Chimique						
C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	V%	B%
0.0671	0,230	1,29	0,0253	0,0110	0,016	0,0003
Paramètres de soudage						
I (A)	U(V)	Vs(cm/min)	Es(J/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (mm)	$\eta$	$T_0$
32	730	130	9703	7,10	0,9	25 C°
$\rho$ (Kg/cm <sup>3</sup> )	C(J/g.K)		$\pi$		$F_3$	
7,85	C=0,4		3,14		0,9	

Après avoir injecté les différents paramètres de soudage et les indications du substrat, on saisit les différentes formules empiriques, Ces derniers ont été développées sur la base des résultats expérimentaux, les principales équations sont écrites comme suit :

a) Energie de soudage (J/cm)

$$E = \eta_{eff} \frac{U \cdot I}{V} * 60 \tag{2}$$

b) Epaisseur

$$d\dot{U} = \sqrt{\frac{\eta \cdot E}{2 \cdot \rho \cdot C} \cdot \left( \frac{1}{500 - T_0} + \frac{1}{800 - T_0} \right)} \tag{3}$$

$\eta$  : Rendement effectif thermique du procédé SAW,  $\eta = 0,9$ .

$E$  : Energie de soudage (J/cm),  $E = 9703$  J/cm

$\rho$  : Masse volumique (g/cm<sup>3</sup>),  $\rho = 7,85$  g/cm<sup>3</sup>

$C$  : Capacité calorifique (J/g.K),  $C = 0,4$  J/g.K

$T_0$  : Température de fonctionnement

(C°),  $T_0 = 25$  C°.

Lorsque :  $d\dot{U} \leq ep$  d'ordre 3D

$d\dot{U} \geq ep$  d'ordre 2D

Dans notre cas :  $d\ddot{U} = 2,17 < ep = 7,10 \text{ mm}$  dimension d'ordre 3. 3D.

**c) Dissipation Thermique Tridimensionnelle (Valeurs Constantes Insérées)**

Ou bien la température de refroidissement  $tr_{850/500}$ . Dans notre cas Dans notre cas :

$d\ddot{U} = 2,17 < ep = 7,10 \text{ mm}$  Dimension d'ordre 3D. Dissipation Thermique égale à :

$$t=tr_{850/500} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,27} \cdot \eta \cdot E_3 \cdot \left( \frac{1}{500-T_0} + \frac{1}{800-T_0} \right) \cdot F_3 \quad (4)$$

$$Tr_{850/500} = 0,00078\eta \cdot E_3 \cdot F_3$$

$$Tr_{850/500} = 6,13$$

**d) Carbonne équivalent**

$$C_{\ddot{a}} = C \text{ eq\%} = (C) + (Mn + Si)/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5 \quad (1)$$

$$P_c = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{Cr}{20} + \frac{V}{10} + 5B \quad (5)$$

**e) La dureté HV30**

$$HV30 = 323,6 - 114,6 \ln(t) + 11,33(\ln t)^2 + 123,7 \ln(t) \cdot C_{\ddot{a}} - 15,58(\ln(t))^2 \cdot C_{\ddot{a}} - 1299C - 79,11Si - 120,7Mn - 539Cr + 79,22Ni + 2830Cr \cdot C + 620,8C_{\ddot{a}} + 875,4P_c \quad (6)$$

**f) Contrainte élastique  $\sigma_{0,2}$  (MPa)**

$$\sigma_{0,2} = 877,9 - 397,6 \cdot \ln(t) + 46,37(\ln(t))^2 + 551,1 \cdot C_{\ddot{a}} \cdot \ln(t) - 75,43 \cdot C_{\ddot{a}} \cdot (\ln(t))^2 - 3466C - 168,3Si - 608,4Mn - 1983 Cr + 155,4Ni + 9364C \cdot Cr + 3602 \cdot C_{\ddot{a}} \text{ (MPa)} \quad (7)$$

**g) Contrainte de rupture  $\sigma_b$  (MPa)**

$$\sigma_b = 978,9 - 350,6 \cdot \ln(t) + 34,32(\ln(t))^2 + 461,7 \cdot C_{\ddot{a}} \cdot \ln(t) - 56,10 \cdot C_{\ddot{a}} \cdot (\ln(t))^2 - 4504 \cdot C - 278,4Si - 477,6 \cdot Mn - 1704 \cdot Cr + 159,4 \cdot Ni + 7858 \cdot Cr \cdot C + 2526 \cdot C_{\ddot{a}} + 2409 \cdot P_c \text{ (MPa)} \quad (8)$$

**h) Allongement  $\delta_5$  %**

$$\delta_5 = -10,88 + 22,76 \cdot \ln(t) - 2,242 \cdot (\ln(t))^2 - 42,63 \cdot C_{\ddot{a}} \cdot \ln(t) + 4,701 \cdot C_{\ddot{a}} \cdot (\ln(t))^2 + 10,68 \cdot Mn + 33,71 \cdot Cr - 4,531 \cdot Ni - 125,3 \cdot Cr \cdot C \quad \% \quad (9)$$

• RESULTATS THEORIQUES

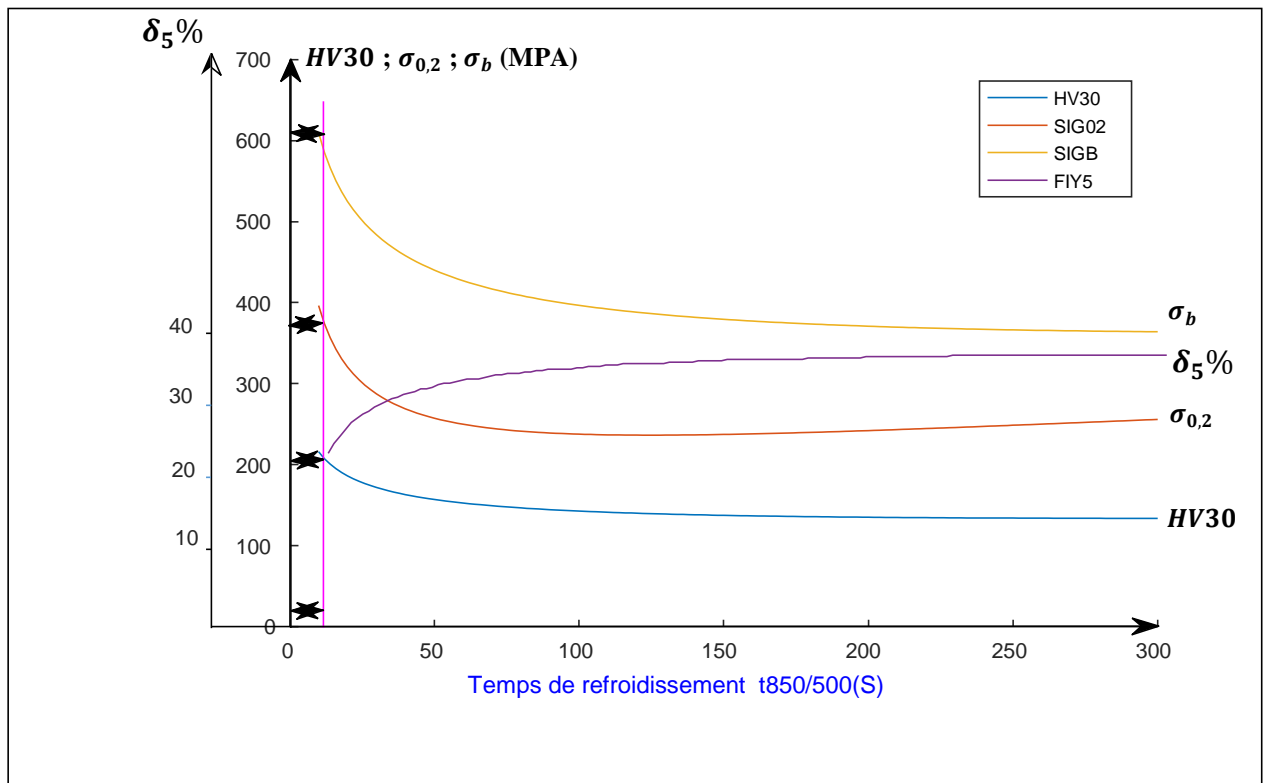


Figure IV-18 : Résultats analytique propriétés mécanique de soudage SAW.

➤ Interprétation

La Figure IV-18 ; Montre que la dureté HV30 et les contraintes SIG02, SIGB, diminue en fonction de temps de refroidissements  $T_{r850/500}$  ; contrairement à l’allongements en AL% qui est en croissance en fonction de  $T_{r850/500}$  qui est une valeur maximale de 40%.

Quant à l’allongement on observe son accroissement au fur et à mesure que le temps  $T_{r850/500}$  augmente. Il atteint une valeur de 40% pour  $T_{r850/500} = 250$ s

Remarque

Ces propriétés mécaniques déterminées théoriquement concernent exclusivement la sous zone (zone a gros grain) de la ZAT,

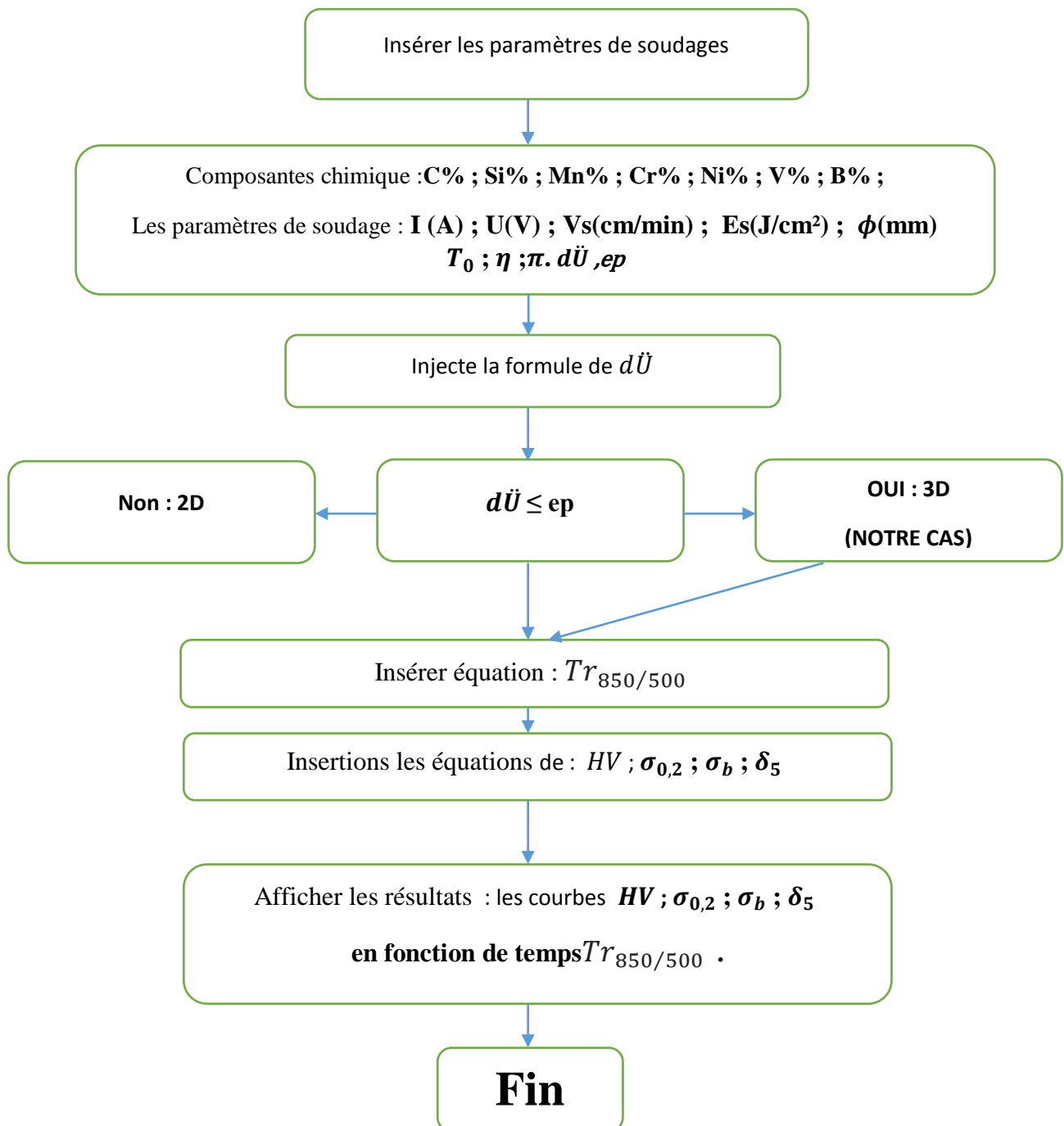
Tableau IV-12- Comparaison entre les résultats théoriques et pratiques

	$T_{r850/500}$	HV30	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_m$
THEORIQUE	6,13 s	200	400	560
PRATIQUE		203-205	450	530

Remarque

L’écart (en%) les valeurs pratiques et les valeurs théoriques n’étant pas important. Ce qui indique que l’utilisation des relations empiriques dans cette étude sont bien adorable (pour les aciers faiblement alliés).

## IV-3-1- ALGORITHME DE CALCUL



# *Conclusion générale*

## ***Conclusion générale***

Le travail réalisé a été très bénéfique, il nous a permis d'acquérir et d'enrichir nos connaissances sur le soudage en général. Il a aussi été une occasion de nous familiariser avec les techniques expérimentales et les équipements utilisés dans la recherche (essais de traction, dureté, pliage, résilience) et de prendre part de la manipulation informatique par la conception d'un programme Matlab qui a été l'outil principal dans le traitement de ce thème ;

La composition chimique est conforme aux exigences de la norme API, et ne dépasse pas les maximums spécifiés. Le taux de carbone équivalent et la teneur en élément d'inclusion est très faible, ce qui traduit une bonne soudabilité ;

Aucune fissuration notable n'est rencontrée après l'essai de pliage ;

La limite élastique de l'acier X60M est relativement haute, la résistance à la rupture est acceptable et l'allongement maximal est considérable, ce qui nous permet de dire que cet acier est ductile, rigide et résistant à la rupture ;

L'essai de résilience à (20°C) a révélé, un bon comportement à la rupture au choc suite à un affinage de la microstructure, provoqué par le mécanisme thermomécanique ;

Une variation légère de la dureté dans les trois zones étudiées (MB, ZAT, ZF) a été observée, suite à une diversification de la microstructure et de présence d'impureté ;

Le métal de base présente une microstructure ferrito-perlitique très fine, présentant des grains allongés dans le sens de laminage ;

La zone affectée thermiquement, présente une structure composée essentiellement de ferrite aciculaire sous forme d'aiguille (Martensite) orienté aléatoirement au voisinage de la zone fondue et une microstructure formée principalement de ferrite polygonale avec un taux

très faible de ferrite aciculaire dispersée dans la matrice ferritique à proximité du métal de base ;

La zone fondue est constituée de perlite, ferrite proeutectoïde et de ferrite aciculaire dispersée dans la matrice ; la température atteint 1600°C dans cette zone et la vitesse de refroidissement est relativement basse, ce qui favorise la formation de la ferrite proeutectoïde, ainsi les sites de germination de la ferrite aciculaire sont inhibés par la création d'allotriomorphe de ferrite proeutectoïde, d'où le taux relativement faible de cette dernière.

Cette zone est caractérisée par un grossissement de grains.

En conclusion on peut dire que les paramètres de soudage utilisés sont optimaux du fait qu'ils ne causent pas de fissuration à froid. Car celle-ci se manifeste quand  $Hv_{30} > 350$ .

Pour étoffer cette étude, il serait recommandé de réaliser d'autres soudures avec des paramètres sévères et ce pour observer le comportement de ce matériau en soudage, notamment du point d'une fissuration.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Michael F. Ashby et David R.H. Jones-matériaux ,propriétés et applications-Edition DUNDO ,paris (1998)pages(115-117).
- [2] N. HICHER, «Étude des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2)soudé », mémoire de master, université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [3] Des matériaux (Jean-Paul Bailon).
- [4] A. Debabi, ‘ ‘ Etude des caractéristiques mécaniques d'un joint de soudure après application d'un traitement thermique ‘ ‘, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'SILA, 2018.
- [5] K. Hulka, ‘ ‘HSLA large diameter pipe plate from standard production to X80/X100, Niobium Information 13/39, 1997.
- [6] American society for metals ASM Ohio, USA 1985 p. 259 et suiv.
- [7] Gérard BERANGER , GUY HENRY et Germain SANZ-le livre de l'acier-Edition LAVOISIER paris (1994).pages 888,889 et 890.
- [8] Y. BOUGUERRA, S. BOURAHLA, « Thème analyse structurale de l'acier XC42 du point de vue fissuration à froid en soudage », mémoire de master, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.
- [9] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Teste, p. 329-377, Internatl. Student Edition McGraw-Hill, 1976.
- [10] MOUSSAI A. Toufik "Influence des traitements thermiques sur la rupture fragile des cordons de soudure", Université de M'sila, Mémoire Magister 2004.
- [11] P.GROSTABUSSIAT Sophie, "Conséquences mécaniques des transformations structurales dans les alliages ferreux", INSA Lyon, Décembre 2000
- [12] Guy MURRY Soudage et soudabilité métallurgique des métaux Techniques de l'ingénieur,
- [13] LP.Léon de LEPERVANCHE. Le soudage.
- [14] S.BENSAADA.D.FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ».Office de publication universitaires.2e Edition.01-2009

[15] R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.

[16] V.RYBARCOV, « le soudage et le coupage des métaux ». 2<sup>e</sup> EDITION. 1983. EDITION MIR. MOSCOU

[17] R.BAUS. W, CHAPRAU, Application de soudage aux constructions ,1979.

[18] Site Internet :

<http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+soudage.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a> Fichier pratique de scruté ED83 3E Edition. Septembre 2099.

[19] Site Internet :

<http://www.google.dz/search?q=Page+1+OBJECTIF+Donner+une+vue+globale+des+cons%C3%A9quences+de+la+r%C3%A9alisation+des+assemblages+par+soudage.+RESUME+Cette+le%C3%A7on+d%C3%A9crit+les+principes+de+base&ie=utf-8&oe=utf-8&aq=t&rls=org.mozilla:fr:official&client=firefox-a> Fichier pratique de scruté ED83 3E Edition. Septembre 2099 .