N° Ordre...../DGM/FSI/UMBB/2020

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté de technologie

Mémoire de master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en **:**

Filière Génie Mécanique

Spécialité Génie des Matériaux

THEME

Contrôle qualité des soudures X52M réalisé par les procédés SAW et SMAW

Présenté par :

TAIBI Moustapha

AMARA Yahia

Promoteur :

Mr. H.SIGUERDJIDJENE

Promotion 2019- 2020

REMERCIEMENT

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon promoteur de mémoire, Monsieur le Dr. HAKIM SIGUERDJIDJENE et je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidés mes réflexions et ont acceptés de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur, mon frère, ma belle-sœur pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements qui m'ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je leurs présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicace

Nous dédiassions ce modeste mémoire

A nos chers parents, nos mères et nos pères

Pour leur patience, leur amours, leur soutient et leurs encouragements.

A nos frères

A nos amis et nos camarades.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur que nous remercions énormément.

TAIBI et AMARA

Table des matières

Introduction général 1
Présentation de l'entreprise 2
Chapitre IÉlaboration des aciers
I.1-Introduction 3
I.2-Extraction des métaux 3
I.3-Propriétés caractéristiques des métaux 5
I.4-Elaboration de l'acier 6
I.5-Classification et désignation de l'acier 8
I.5.1-Selon leurs emplois 8
I.5.2-Selon leur teneur en carbone 9
I.5.3-Selon la composition chimique 10
I.5.3.1-Aciers spéciaux non alliés 10
I.5.3.2-Aciers faiblement alliés 10
I.5.3.3-Aciers fortement alliés 12
I.5.3.4-Aciers rapides 13
I.5.4-Acier HLE 15
I.5.5-l'acier API 5L X52M 15
I.6-Conclusion 17
Chapitre IILe soudage
II.1-Introduction 18
II.2-le soudage 18
II.2.1-Différentes zones du joint soudé 18
II.3-Principaux procédés de soudage 19
II.3.1-Soudage à l'arc submergé (SAW) 19
II.3.1.1-Flux et matériau d'apport 22
II.3.2-Soudage à l'électrode enrobée (SMAW) 22
II.4-fabrication des tubes avec soudage 23
II.4.1-Les solutions de fabrication des tubes avec soudage : 23
II.4.1.1-Soudage hélicoïdal 23
II.4.1.2-Soudage longitudinal 23
II.4.2-Soudage hélicoïdal [6] 24
II.4.2.1-La fabrication de tubes hélicoïdaux hors ligne 24
II.4.2.2-Fabrication de tubes hélicoïdaux en ligne 24
II.4.3-Soudage hélicoïdal de tubes hors ligne 24

II.4.4-Raboutage de bandes 24
II.4.5-Station de soudage par pointage 24
II.4.5.1-Station de soudage interne 24
II.4.5.2-Station de soudage externe 25
II.4.6-Système de mise à la terre 26
II.4.7-Équipement de soudage par pointage (soudage MIG/MAG en station de formage) 27
II.5-Conclusion 30

Chapitre IIIEtude expérimentale

III.1-Introduction 31
III.2-Démarche expérimentale 31
III.3-Prélèvement et dimensionnement des échantillons 32
III.4-Contrôle destructifs 32
III.4.1-Essais de traction 32
III.4.2-Essai de dureté 33
III.4.3-Essai Vickers 33
III.4.3.1-Critère d'acceptation 34
III.4.4-Essais de résilience 34
III.4.5-Essai Charpy 35
III.4.5.1-Critère d'acceptation de la résilience 35
III.4.6-Essai de pillage 35
III.5-Essais non destructifs 36
III.5.1- Analyse chimique 36
III.5.2- Contrôle par rayon X 36
III.5.3-Examen Macrographique 38
III.5.3.1-Polissage 38
III.5.3.2-Attaque chimique 39
III.5.3.3-Examen et photographie 40
III.6-Conclusion 40
Conclusion générale 41

Référence bibliographie

Liste des figures

Figure I.1 Métallurgie générale des métaux.....4
Figure I.2 Minerais de fer 5
Figure I.3 Le haut fourneau et son fonctionnement 7
Figure I.4 Image Haut fourneau 7
Figure II.1 Différentes zones d'un joint soudé 19
Figure II.2 Soudage sous flux en poudre 21
Figure II. Principe du procédé de soudage sous flux en poudre 21
Figure II.4 Soudage à l'électrode enrobée 23
Figure II.5 Station de soudage interne 25
Figure II.6 Station de soudage externe.....25
Figure II.7 Système de mise à la terre.....26
Figure II.8 Système de courant de retour.....26
Figure II.9 Le soudage par pointage interne 27
Figure II.10 Le Soudage par pointage externe.....28
Figure II.11 Les tuyaux soudés à denture hélicoïdale SAW de grande diamètre 28
Figure III.1 Diagramme des essais effectués durant la chaine de fabrication.....31
Figure III.2 Machine à essai de traction.....32
Figure III.3 Machine de dureté Vickers ZHV10.....33
Figure III.4 Machine de l'essai résilience.....34
Figure III.5 Spectromètre de masse 35
Figure III.6 Nids de porosité ou soufflures agglomérées.....37
Figure III.7 Machine de polissage.....39
Figure III.8 Bouteille d'éthanol 39
Figure III.9Bouteillede l'acide nitrique 39
Figure III.10 éprouvette après attaque chimique 40

Liste des tableaux

I.1- Désignation des aciers selon leurs emplois 8
I.2- Caractéristiques des aciers d'usage générale 9
I.3- Classification des aciers selon la teneur en carbone 9
I.4- Caractéristiques des aciers non alliés 10
I.5- Facteur de teneurs des éléments d'alliages 11
I.6- Caractéristiques mécaniques des aciers faiblement alliés 12
I.7- Caractéristiques des aciers fortement alliés 13
I.8- Désignation et caractérisation des aciers rapides 14
I.9- Classification des différents aciers par emploi 14
I.10- Propriétés mécaniques de l'acier grande X52M selon la norme API 5L & PSL2 (fiche technique ALTUMET) 16
I.11-composition chimique de l'acier grande X52M selon la norme API 5L PSI 2 & (fiche technique ALTUMET). 16
II.1-différents types des tuyaux 29
II.2- Composition chimique et propriétés mécaniques des différents tubes 30
II.3- Fiche technique du produit(Tuyau en acier) 30
III.1- Dimension des éprouvettes de pilage selon les normes API5L 35
III.2- Interprétation et film photographique 38

Résumé

Notre travail se réalise sur les différentes méthodes de fabrications des pipelines avec soudage et le contrôle de qualité de ce dernier. On a utilisé de différents essais destructifs et non destructifs et l'examen macrographique selon la norme API 5L PSL2 de l'acier X52M. Ces résultats suggèrent la possibilité de continuer la fabrication et de qualifier le produit final pour la commercialisation selon les normes API 5L PSL2.

ملخص

يتم عملنا على طرق التصنيع المختلفة لخطوط الأنابيب مع اللحام ومراقبة الجودة لهذا الأخير. تم استخدام العديد من الاختبارات المدمرة وغير المدمرة والفحص الكلي وفقًا لمعيار API 5L PSL2 للصلب X52M. تشير هذه النتائج إلى إمكانية استمرار التصنيع وتأهيل المنتج النهائي للتسويق وفقًا لمعايير API 5L PSL2.

Abstract

Our work is carried out on the different manufacturing methods of pipelines with welding and the quality control of the latter. Various destructive and non-destructive tests and macrographic examination according to API 5L PSL2 standard of X52M steel were used. These results suggest the possibility of continuing manufacturing and qualifying the final product for commercialization according to API 5L PSL2 standards.

Introduction Générale

Introduction générale

Comme on le sait l'homme préhistorique n'utilisait que les cailloux pour satisfaire ses besoins matériels, c'était l'âge de la pierre, ensuite découvrit l'argile, matériau mou et malléable qui était transformé après cuisson en matériau indéformable et imperméable.

Vient ensuite l'âge du fer et du bronze qui forme en fait l'âge des métaux. Les métaux occupent une place importante aujourd'hui comme avant du fait qu'ils se prêtent à tous les usages (outils, armes, pièces mécaniques divers équipements …).

L'utilisation des métaux purs possède beaucoup d'inconvénients tels que faibles propriétés mécaniques, électriques, couts très élevés.

Déjà au **15éme siècle** on préparait empiriquement des alliages binaires qui sont faciles à travailler et plus résistants que leurs constituants, même on savait déjà expérimentalement comment durcir un métal en le trempant ou en le forgeant, mais l'apport scientifique à cette époque était très limité.

C'est au **20éeme siècle** que les chercheurs ont pu établir les bases essentielles et les techniques fondamentales (analyses chimiques, métallographie,…) qui ont permis de progresser efficacement dans l'élaboration de nouveaux matériaux.

Le dernier siècle est caractérisé par l'apparition de beaucoup d'alliages, des matériaux réfractaires, des matériaux de construction et surtout les composés organiques (plastique, caoutchouc, résines, colles, goudron ...), et surtout on a vu évoluer en force dans le domaine de la haute technologie, les céramiques techniques et les matériaux composites qui ont pris l'essor que l'on connait actuellement outre cela il y a amélioration de la qualité des matériaux, réduction des poids des pièces mécaniques et de leur prix de revient.

Malgré toutes ces nouveautés dans le domaine des matériaux, l'acier et la fonte demeureront les métaux les plus utilisés dans l'industrie.

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [1]..

Pour notre étude, nous avons choisis la nuance API 5L X52M utilisée pour la fabrication de tubes soudées spirale, servant au transport des hydrocarbures.

Notre matériau subit une opération de soudage ce qui conduit inévitablement aux transformations intrinsèques en termes de fragilisation de la zone soudée.

Notre étude concerne en premier la présentation des différents dispositifs mis en œuvre pour la réalisation des essais et leur méthodologie, et enfin on procèdera à l’analyse des résultats obtenus par le contrôle destructif et non destructif.

Présentation de l'entreprise

ALTUMET est une entreprise publique économique qui est une société par action, issue de la dislocation de l'entreprise mère **ANABIB** en filiales, spécialiste du tube hydraulique et hydrocarbure.

Activités de la société

- Fabrication des tubes soudés en spirales à partir de feuillards en acier.
- Prestation de revêtement.
- Recherche de développement d'autres procédés de fabrication
- Importation et l'exportation de tubes soudés spirales.
- Distribution des produits et dérivés tels que les tubes soudés destinés au transport

Des hydrocarbures, eau et autres divers usages (supports de construction, pieux battus pour forage…).

Capital social

Le capital social de la société est de 537 760 000,00 DA.

Siège social

Le siège social de la société est situé en zone industrielle de reghaia, route national N° 5, réghaia – Alger.

Gamme de produits

La fabrication porte sur une gamme de tubes en acier dont le diamètre est compris entre 8'' et 36'' (219 mm à 914 mm) livrés nus ou revêtus : -Tubes pour le transport des hydrocarbures. -Tubes hydrauliques.

Capacités de production

L'usine dispose d'une capacité annuelle de production se décomposant comme suit :

Tuberie: 40 000 Tonnes.

Revêtement: 40 000 Tonnes.

Marché

Les produits fabriqués par l'entreprise sont destinés à la satisfaction des besoins en canalisations pour le transport des hydrocarbures et de l'eau.

Les clients potentiels sont constitués de

- ✓ Secteur de l'énergie.
- ✓ Secteur de l'hydraulique.

Domaines d'application.

Les tubes ainsi obtenus sont destinés à la :

- ✓ -Canalisation pour transport de fluides : Eau, Pétrole, Gaz.
- ✓ -Construction métallique.
- ✓ -Support de construction (poteaux).
- ✓ -Pieux battus pour fondations ou forage.
- ✓ -Support d'éclairage (mâte d'éclairage).

Chapitre I

Élaboration des aciers

Chapitre I : Elaboration des aciers

I.1-Introduction

On appelle aciers les produits ferreux qui sont en général aptes au façonnage à chaud. A l'exception de certains aciers à haute teneur en chrome, ils contiennent moins de 2,1% de carbone, teneur limite qui les sépare des fontes définies par le diagramme d'équilibre fer-carbone

L'acier est l'un des matériaux que l'on puisse utiliser dans la fabrication. Il attire une attention croissante des chercheurs en raison de ses applications multiples. L'acier est un alliage composé essentiellement du Fer (Fe) très majoritaire et du carbone (C). L'intérêt majeur des aciers réside dans leurs propriétés mécaniques satisfaisantes tel qu'une forte résistance à la déformation élastique, résistance au choc, néanmoins on peut leur reconnaitre quelques inconvénients, notamment leur mauvaise résistance à la corrosion, à laquelle on peut toutefois remédier, soit par divers traitements de surface (peinture, galvanisation à chaud, brunissage) soit par ajout d'autres éléments d'alliages pour obtenir un acier inoxydable [3].

I.2-Extraction des métaux

Pour extraire les métaux des minerais, on applique des opérations de traitements thermiques ou chimiques l'utilisation de l'une ou de l'autre dépend de la composition chimique du minerai et de la nature de sa gangue.

En général les traitements se font dans des fours portés à haute température. L'opération consiste à assurer d'une part la fusion du minerai et d'autre part l'élimination des éléments non désirés grâce au contact avec des agents ajoutés volontairement.

Les périodes les plus importantes lors de ses opérations sont :

a)La réduction : appliquée aux minerais du type oxydes, sous l'effet de la chaleur, le carbone et l'oxyde se combinent en libérant le métal et le gaz carbonique, par exemple dans le cas du fer :
$Fe203 + 3\ CO \longrightarrow 2Fe + 3\ C02$

b) Le grillage : consiste à chauffer à Pair les minerais de type sulfures. Par cette opération, les sulfures se transforment en oxydes.

c) La calcination : consiste à chauffer à l'abri de l'air les minerais de types carbonates. Par cette opération les carbonates se transforment en oxydes, par exemple :

$$CaCO3 \longrightarrow CaO + CO2.$$

- Les oxydes obtenus par les méthodes de grillage et de calcination sont ensuite traités par la méthode de réduction afin d'extraire le métal. Certains métaux élaborés ne sont pas pur et doivent subir des opérations de raffinage chimique ou électrochimique. Les métaux obtenus sont ensuite préparés sous diverses formes commerciales par les procédés suivants :
- déformation plastique.
- Laminage.
- Etirage.
- moulage [1].

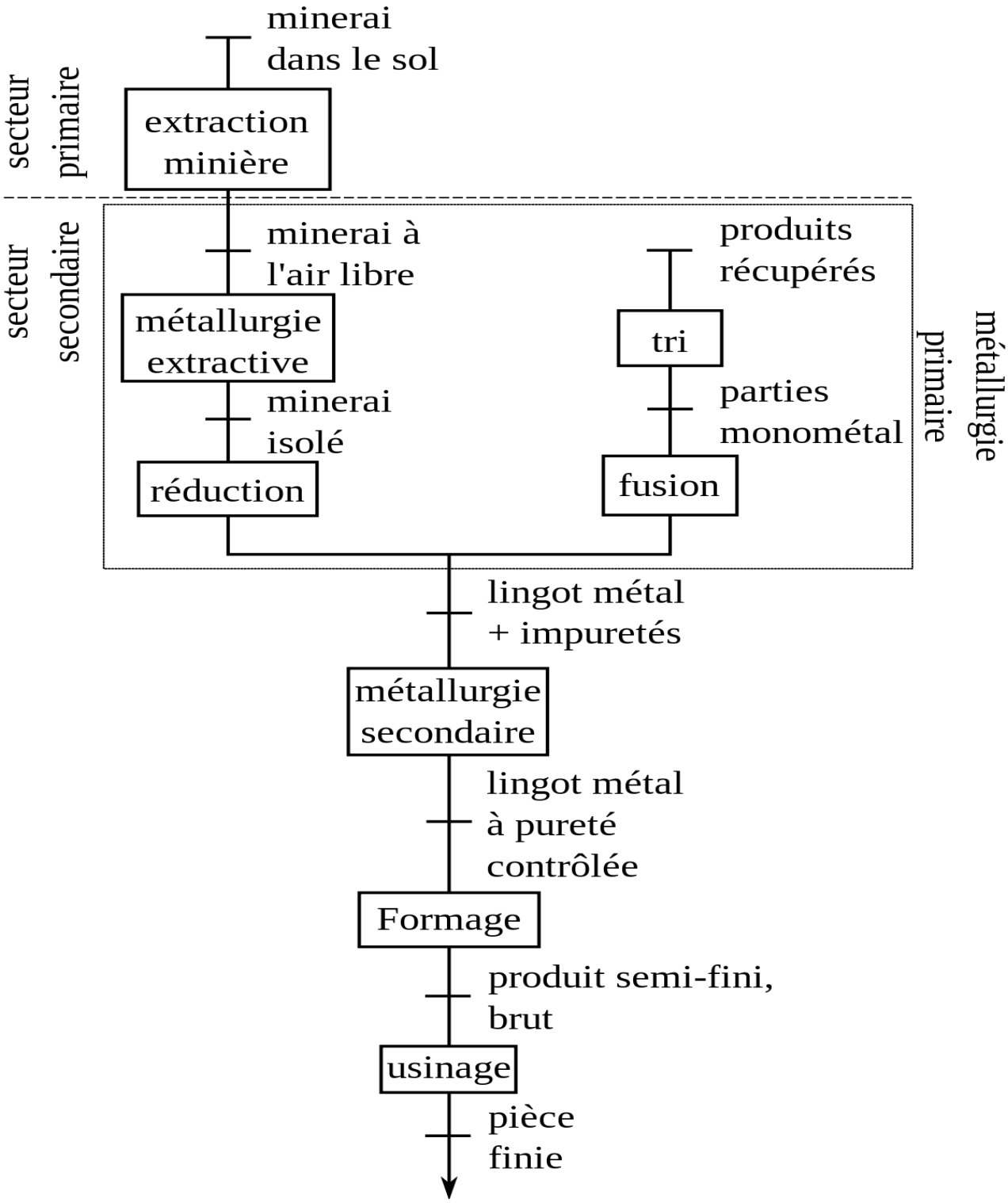

Figure I.1 : Métallurgie générale des métaux.

I.3-Propriétés caractéristiques des métaux

Parmi les 106 éléments du tableau périodique 76 sont des métaux. Les métaux se distinguent des autres éléments par plusieurs caractéristiques.

• Conductibilité thermique et électrique élevée due aux électrons libres qui se déplacent dans le champ potentiel du réseau.

• Coefficient de température de résistivité positif, cela signifie que la résistivité de métaux purs s'accroît avec l'élévation de la température ; à très basse température un grand nombre de métaux. (30) passent à l'état supraconducteur à l'approche du zéro absolu, la résistivité de ces métaux tombe par sauts jusqu'à une valeur très faible.

• Emission thermoélectrique (l'aptitude d'émettre des électrons sous l'effet de la température)

• Bonne aptitude à la réflexion ; les métaux sont opaques et ont un éclat métallique particulier. Capacité élevée à la déformation plastique, due à la périodicité de leur structure atomique, lorsque certains volumes du métal se déplacent par rapport à d'autres volumes, la liaison entre les atomes ne se rompt pas.

• Tous les métaux et alliages métalliques ont la structure cristalline, l'arrangement de leurs atomes (ions) est régulier et périodique à la différence des corps amorphes dont les atomes sont disposés d'une manière chaotique [1].

Figure I.2 : Minerais du fer.

I.4-Elaboration de l'acier

Les procédés de fabrication modernes de l'acier sont assez nombreux. Ils donnent des produits de qualités différentes. La majorité d'entre eux consiste pour affiner la fonte de première fusion à la décarburer dans un premier temps, puis de rétablir par des additions convenables les teneurs de ces éléments au niveau désiré

L'acier est obtenu dans des fours ou convertisseurs par différentes opérations métallurgiques tels que l'oxydation des différents éléments d'impuretés, décarburation de la fonte et addition d'éléments alliés nécessaire pour améliorer les différentes propriétés.

Les matières premières nécessaires pour l'élaboration de l'acier :

- Fonte liquide ou solide (selon le procédé).
- Ferraille.
- Additions.
- Ferro.
- alliages (alliages de métaux).

La masse principale de la charge (90% à 95%) se compose de la fonte et de la ferraille, la composition de la fonte doit correspondre aux exigences du procédé utilisé.

Les métaux alliés sont utilisés le plus souvent sous forme de ferro-alliages, destinés à obtenir des aciers de propriétés bien définit. Les additions sont le calcaire sous forme de CaC03 ou CaO ou CaF2 utilisé pour l'affinage électrolytique.

La ferraille, le calcaire, les ferro-alliages et CaF2 sont introduits dans les fours ou convertisseurs à l'état solide, dans certains cas sont chauffés au préalable. La fonte est introduite soit à l'état liquide (1250°C) dans le cas des procédés par soufflage d'air ou d'oxygène ce qui nécessite un préchauffage du four. La chaleur est obtenue lors de l'oxydation des éléments alliés au fer dans la charge, ce procédé ne nécessite aucun apport de chaleur extérieure pour atteindre la température de fusion de l'acier (1600°C), soit à l'état solide, dans le cas des procèdes des fours à sole, ce qui exige à fournir de la chaleur en grande quantité pour la fusion de la charge solide a atteindre la température de fusion de l'acier, la chaleur utilisée est la chaleur de combustion du combustible tels que mazout, gaz naturel ou énergie électrique.

Comme il a été déjà mentionné que l'acier est élaboré principalement à partir de la fonte liquide ou solide ou à partir de la ferraille, l'utilisation de l'un ou de l'autre procédé dépend de l'éloignement de l'aciérie du haut-fourneau. Si l'aciérie est loin du H-F, la fonte subit une seconde fusion. Si l'aciérie est près du H-F il est évidemment économique d'utiliser la fonte liquide, laquelle est coulée directement du H-F dans un vaste réservoir sur rail appelé mélangeur Le mélangeur rend donc la marche de l'aciérie indépendante de celle du H-F.**[7]**

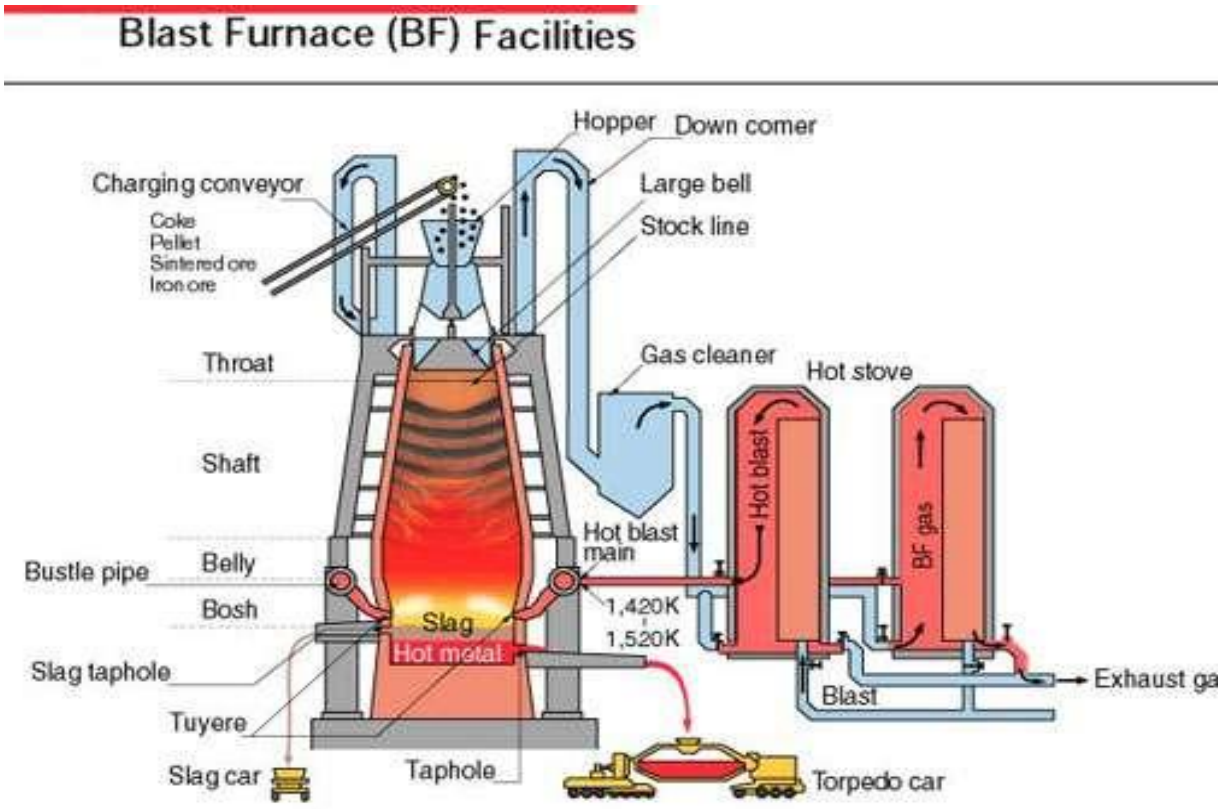

Figure I.3 : lehaut fourneau et son fonctionnement.

Figure I.4: image de hautfourneau.

I.5-Classification et désignation de l'acier

I.5.1-Selon leurs emplois

Les aciers peuvent être désignés selon leurs emplois et leurs caractéristiques mécaniques ou physiques.

Tableau I.1 : Désignation des aciers selon leur emploi [4].

Lettre	Signification de lettre	Signification du nombre
S	Acier de construction	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²
P	Acier pour appareil à pression	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²
L	Acier pour tube de conduit	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²
E	Acier de construction mécanique	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²
B	Acier à béton	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²
Y	Acier pour béton précontraint	Valeur de la résistance à la traction en N/mm²
R	Acier pour sous forme rail	Valeur de la résistance à la traction en N/mm²
H	Produit plat laminé à froid pour emboutissage à froid	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²
T	Produit plat laminé à froid pour emboutissage à froid	Valeur minimale à la limite d'élasticité en N/mm²

Exemple : Acier E 295

Cet acier pour construction mécanique (E) a une valeur minimale de limite d'élasticité de 295 Mpa. Il est Caractérisé par une faible teneur en carbone, Ils sont soudables, formables à froid et à chaud, pliables, emboutissables et laminables, On les trouve dans le domaine de Construction mécano soudée, carrosserie automobile, fers et profilés pour le bâtiment, construction navale, plates-formes pétrolières, trains, chaudronnerie, ameublement électroménager, biens de consommation.

Remarque : Ils sont livrés sous forme de laminés (profilés poutrelles barres tôles aux dimensions normalisées)

- Les aciers commençant par (S), sont les aciers d'entrée de gamme de construction générale. Ils sont en général laminés à chaud.
- Les aciers commençant par(E), sont des aciers plus solides et mieux finis (aciersétirés) et ont déjà un profil précis.
- Si l'acier est moulé, la désignation est précédée d'un (G) [4].

Tableau I.2 : Caractéristiques des aciers d'usage général.

Aciers d'usage général			
Nuance	**Rm min (MPa)**	**Re min (MPa)**	**Emplois**
S185	290	185	**Construction mécanique et métallique générales assemblées ou soudées**
S235	340	235	
S275	410	275	
S355	490	355	
E295			**Ces aciers ne conviennent pas aux traitements chimiques.**
E335			
E360			
Moulage	**GS235-GS275-GS355 GS295-GE335-GE360**		

I.5.2-Selon leur teneur en carbone

Tableau I.3 : Classification des aciers selon la teneur en carbone.

Nuance	Pourcentage de carbone	Emploi
Extra doux	C<0.15	Tôle pour carrosserie, feuillards, quincaillerie, pièces de forge.
Doux	0.15<C<0.2	Charpente métallique, profilés, construction, mécanique courante, boulons, fils ordinaires.
Demi-doux	0.2<C<0.3	Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées.
Demi dur	0.3<C<0.4	Petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission.
Dur	0.4<C<0.6	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, coutellerie, pièces moulées et traitées.
Extra dur	0.6<C	Outils d'usinage et découpe, câbles, ressorts.

I.5.3-Selon la composition chimique

I.5.3.1-Aciers spéciaux non alliés

Ces aciers sont Destinés aux traitements thermiques (trempe, cémentation) des pièces petites ou moyennes. Ils sont caractérisés par un ajustement précis de leur composition, une plus grande pureté que les aciers d'usage général et des éléments d'addition en très faible quantité).

- ✓ **Propriétés *:*** les propriétés varient selon le traitement thermique
- ✓ **Applications :** Pièces forgées, rasoirs, lames forets matrice d'outillage.
- ✓ **Désignation *:*** Ces aciers non alliés sont désignés par la lettre C suivi d'un chiffre représentant la teneur en carbone.

Exemple : C 45

Cet acier non allié (C) possède une teneur en carbone de 0,45 %.
Si l'acier est moulé, la désignation est précédée d'un G.

Exemple :
GC 25 Cet acier non allié (C) est moulé (G) et possède une teneur en carbone de 0,25 % (25).

Tableau I.4 : Caractéristiques des aciers non alliés.

Aciers non alliés			
Nuance	**R min**	**Re min**	**Emplois**
C22	410	255	Construction mécanique.
C25	460	285	
C30	510	315	Ces aciers conviennent au traitement thermique et au forgeage. Note : cette symbolisation ne s'applique pas aux aciers de décolletage.
C35	570	335	
C40	620	355	
C45	660	375	
C50	700	395	
C55	730	420	
C60	HCR>= 57		

I.5.3.2-Aciers faiblement alliés

Par acier faiblement allié, on entend les aciers dont la teneur de la somme de l'élément d'addition est inférieure à 5 % et dont la teneur en manganèse est inférieure à 1%.

- ✓ **Utilisation :** Utilisés en l'état ou avec traitement thermique (cémentation, trempe dans la masse).
- ✓ **Propriétés :** les propriétés varient selon le traitement thermique et les éléments d'addition. La résistance mécanique et la résilience sont très bonnes à exceptionnelles.
- ✓ **Applications :** Pièces mécaniques techniques qui subissent de fortes contraintes mécaniques, roulements engrenages, arbres de transmission, axes tiges et leviers, boulonnerie haute résistance, roulements, ressort, pièces de sécurités, pièces de frottement, gazoduc.

✓ **Désignation :** Ces aciers sont désignés par:

• Un chiffre représentant le centuple de la teneur en carbone.

• Les symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre décroissant de leur teneur.

• Les teneurs des éléments d'alliage séparées par un trait d'union. Les teneurs des éléments d'alliage sont multipliées par un facteur (et arrondies à la valeur entière la plus proche). Ces facteurs sont donnés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I.5 : Facteur de teneurs des éléments d'alliages [4].

Eléments	Facteurs
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr	10
Ce, N, P, S	100
B	1000

Exemple : Acier20MoCr5

La composition chimique de cet acier est donc :

- possède une teneur en carbone de 0,2 %.
- Il est allié au molybdène (Mo) et au chrome (Cr).
- La teneur en molybdène est de 0,5 %
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome.
- Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée d'un G.

AcierG18NiCrMo6 :

Cet acier faiblement allié est moulé (G) et possède une teneur en carbone de 0,18 %.

- Il est allié au nickel (Ni) et au chrome (Cr) et du molybdène (Mo).
- La teneur en Nickel est de 1,25 %.
- Il y a des traces (non quantifiées) de chrome et de molybdène

Tableau I.6 : Caractéristiques mécaniques des aciers faiblement alliés[4].

Aciers faiblement alliés		
Nuances usuelles	**Traitement de référence**	
	R min	**Re min**
38Cr2	800	650
34Cr4	880	660
37Cr4	930	700
41Cr4	980	740
55Cr3	1100	900
100Cr6	HRC>=62	
25CrMo4	800	700
35CrMo4	980	770
42CrMo4	1080	850
16CrNi6	800	650
17CrNiMo61	1130	880
30CrNiMo81	1030	850
51CrV4	1180	1080
16MnCr5	1080	835
20MnCr5	1220	890
36NiCrMo16	1710	1275
51Si7	1000	830
60SiCr7	1130	930

I.5.3.3-Aciers fortement alliés

Par acier fortement allié, on entend les aciers dont la teneur de la somme d'éléments d'addition est supérieure à 5 %.

Ils sont le plus courant est inoxydables.

- ✓ **Applications** : Pièces mécaniques travaillant à l'extérieur ou aux milieux marins. (Accastillage de bateau)
- ✓ **Désignation** : Ces aciers sont désignés par:

• La lettre X

• Un chiffre représentant le centuple de la teneur en carbone.

• Les symboles chimiques des éléments d'alliage dans l'ordre décroissant de leur teneur.

Exemple : X6NiCrTi17-12

- Cet acier fortement (X) allié possède une teneur en carbone de 0,06 %.

- Il est allié au Ni, au Cr et au Ti.

- La teneur au Ni est de 17 %.

- La teneur au Cr est de 12 %.

- Il y a des traces (non quantifiées) de titane. Si les aciers désignés sont moulés, leur désignation est précédée d'un G[4].

Tableau I.7 : Caractéristiques des aciers fortement alliés.

Acier fortement allié		
Nuances usuelles	**Traitement de référence**	
	Rmin	**Re min**
×4CrMoS18	400	2714
×30Cr13	HRC>=51	
×2CrNi19-11	460	175
×5CrNi18-10	510	195
×5CrNiMo17-12	510	205
×6CrNiTi18-12	490	195
×6CrNiMoTi17-12	540	215

I.5.3.4-Aciers rapides

- ✓ **Propriété** : Très grande résistance à l'usure et aux températures élevées
- ✓ **Utilisation** : Outils de coupe, forets
- ✓ **Désignation** : Ils sont désignés par:

• Les lettres HS

• des nombres indiquant la teneur des éléments d'alliages dans l'ordre suivant:

1. Tungstène (W).

3. Vanadium (V).

2. Molybdène (Mo).

4. Cobalt.

Tableau I.8 : Désignation et caractérisation des aciers rapides.

Nuance	Caractéristique
HS8, 5-3,5-3,5-11,(nuance SANDVICK C45)	Cette nuance doit toujours être associée en priorité. Il s'agit d'un acier rapide, fortement allié, capable de résister à des températures élevées.
HS6, 5-7-6, 5-10, 6, (nuance SANDVICK C60)	Cette nuance est un choix alternatif lorsqu'une haute résistance à l'usure est en critère déterminant.

Remarque : les aciers rapides peuvent être revêtus d'une couche de nitrure de titane (Ti, Ni) qui augmente leur dureté leur longévité.

Tableau I.9 : Classification des différents aciers par emploi.

Typ d'acier	Nuance
Acier doux	S185, S235, C22
Acier mi-dur	C30, C35, C40, C45, C50, C60, 37Cr4, 34CrMo4, 36NiCrMo16, 51CrV4
Acier extra dur	100Cr6
Acier ressort	51Si7, 60SiCr7, 51CrV4
Trempe	C35E, C40E, C55E, C60E
Cémentation	C22, 16MnCr5, 20MnCr5, 15CrNi6, 17CrNiMo6
Trempe superficielle	C40, 41CrMo4, 36NiCrMo16
Fromage à froid	S185, S235, S275, S355
Décolletage	S250Pb, S250Si, S300Pb, S30Si, X2CrMoTiS18-2
Nitruration	31CrMo12, 41CrAlMo7
Chocs	51CrV4
Inoxydable	X4CrMo18, X30Cr13, X2CrNi19-11, X5CrNi18-10, X5CrNiTi18-10, XCrNiMoTi17-6-12
Forte sollicitation	20MnCr5, 36NiCrMo16

I.5.4-Acier HLE

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HLE), ou à haute résistance HR (HSLA-High StrenghtLowAlloy) sont un groupe d'acier à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'élément d'alliage pour atteindre les limites d'élasticité supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécanique et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone laminés. D'ailleurs, parce que la haute limite élastique des aciers HLE peut obtenue à la basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HLE est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [9].

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique incluent beaucoup de catégories standards et de propriétés industrielles conçus pour fournir des combinaisons spécifiques désirées des propriétés telles que la limite d'élasticité, la dureté, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion atmosphérique. Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, quoique leurs propriétés désirées soient réalisées par l'utilisation de petite addition d'élément d'alliage.

Les aciers HLE sont classifiés comme une catégorie d'acier séparées, qui set semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécanique augmentées obtenus par (la petite) addition judicieuse des éléments de micro-alliage et, peut-être, des techniques de traitement spéciale.

Les aciers HLE peuvent être divisés en six catégories [4] :

- Les aciers HLE résistants à la corrosion atmosphérique.
- Les aciers micro alliésfrrito-perlitique.
- Les aciers perlitiques de construction laminés.
- Les aciers à double phase (dual phase).
- Les aciers de forme d'inclusion contrôlée.
- Les aciers de ferrite aciculaire.

I.5.5-l'acier API 5L X52M

La signification de la nuance **API 5L X52M :**

API : institut américain du pétrole.

5L : spécification pour le pipeline.

X : désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.

M : est le suffixe qui décrit l'état de livraison (**M :** traité mécaniquement)

Le chiffre après le « **x** » correspond à la valeur de la limite d'élasticité minimale. Par exemple X52 a une limite d'élasticité minimale de 52 ksi (260 MPA)[10]

L'acier **API 5L X52M** est un acier au carbone à haute limite d'élastique, de catégorie ferrite aciculaire ; les aciers de ferrite aciculaire peuvent être obtenus par trempage ou, de préférence, par refroidissement à l'air avec les alliages appropriés pour la trempabilité. L'avantage principale de ce type d'acier HLE est la combinaison peut commune de haute limite d'élasticité (360 à 530 MPa), de la résilience élevée, et de la bonne soudabilité.

En réponse à ces besoins, les chercheurs ont développé un acier de ferrite aciculaire dur pour les pipelines par l'optimisation du contenu de carbone et de niobium, l'addition du bore, et/ou l'application du refroidissement en ligne accélérée.

L'application principale de l'acier de ferrite aciculaire implique les canalisations d'hydrocarbures dans des conditions arctiques. Cette application exige une combinaison de sureté, de haut résistance, d'excellente résistance à la fissuration induit par l'hydrogène et la soudabilité de premier ordre de champ [4].

I.5.3.6.1-Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X52M

A la livraison des bobines le matériau procédé des caractéristiques mécaniques du au laminage à chaud avant de subir le formage et l'opération de soudage, ces propriétés doivent être conformes aux exigences de la dernière édition (**45 éme**) de la norme API 5L PSL2 présenté dans le tableau III-1.

Tableau I.10 :propriétés mécaniques de l'acier grande X52M selon la norme API 5L & PSL2 (fichetechnique ALTUMET).

Nuance	Limite élastique E 0.5% MPa		Résistance à la ruptureMPa		Allongement	E/R
	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini %	Maxi
X52M	360	530	480	620	22	0.88

I.5.3.6.2-Caractérisation chimique de l'acier API 5L X52M

La composition chimique doit être conforme aux exigences de dernière édition (45éme) de la norme API 5L PS12 présentées dans le tableau I.11.

Tableau I.11 : composition chimique de l'acier grande X52M selon la norme API 5L PSI 2 & (fiche technique ALTUMET).

Eléments / Nuance	%C Maxi	%Mn Maxi	%Si Maxi	%P Maxi	%S	% Cepsm
X52M	0,21	1,300	0,400	0,025	0,015	0,25

Avec :

Nb+V+Ti ≤ 0,150% ;
Cu≤0,50% ; %Ni≤0,30 % ; Cr≤0,30% ;%Mo≤0,15% ;
B≤0,001% ; nb+v≤0,140% ; NB≤0,100%
V≤0,100% ; s+p≤0,070%
CARBONE EQUIVALENT :
Cepcm=c+si/30+MN/20+CU/20+NI/60+CR/20+MO/15+V/10+5B

I.6-Conclusion

Dans ce premier chapitre qui est l'élaboration des aciers nous avons étudié la classification et désignation de l'acier selon leur emploi, leur teneur en carbone, ainsi selon la composition chimique. Cela nous a permis de bien connaitre l'acier d'une manière approfondit pour leur utilisation.

Chapitre II

Le soudage

II.1-Introduction

L'assemblage par soudage est connu depuis **19éme siècle** dans l'esprit scientifiques, il se développe rapidement dans la main des techniciens passant par le soudage oxyacétylénique puis le soudage à l'arc et le soudage par résistance et enfin le soudage laser. Il représente actuellement le principal moyen d'assemblage des structures métalliques, sans lui, de nombreuses applications industrielles n'auraient pas pu être réalisées.

En effet, la majorité des assemblages soudés soumises à des sollicitations cycliques appelées fatigue, sont susceptibles à la rupture ; ce qui représente un souci majeur pour les concepteurs, pour cela le concept de la mécanique de la rupture est devenu une obligation pour analyser le comportement des matériaux vis-à-vis la fatigue et étudier la nocivité des défauts, principalement les fissures, dans les assemblages soudé ainsi que la prédiction de la durée de vie sous des différents paramètres à titre d'exemple l'amplitude des contraintes, le rapport de charge et la géométrie du défaut.

II.2-le soudage

Le soudage est un procédé d'assemblage permettant de réaliser des joints métalliques soudés grâce à des températures élevées, à de fortes pressions ou aux deux. Dans ce chapitre, on abordera uniquement les procédés développant une chaleur intense sur les surfaces à assembler afin d'engendrer une fusion locale. Un métal d'apport est en général ajouté dans le bain de fusion permettant ainsi de relier les deux surfaces à assembler et former ainsi un joint soudé de dimensions et de formes voulues après refroidissement. Le procédé le plus couramment utilisé en construction métallique utilise un arc électrique développant une chaleur intense, entretenu entre l'extrémité du fil d'apport et les pièces à assembler.

Quand le métal fondu situé dans le bain de fusion n'est pas protégé, il peut absorber directement l'oxygène et l'azote contenus dans l'air. Cette absorption peut conduire à l'apparition de porosités et à une fragilité de ce métal après solidification. Les techniques utilisées pour éviter l'absorption de gaz par la soudure dépend des procédés de soudage. Les procédés de soudage les plus utilisés en construction métallique seront revus en détail ci-après [4].

II.2.1-Différentes zones du joint soudé

Sur la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé, on distingue les zones suivantes :

- 1 zone fondue «ZF»
- 2 zone de liaison «ZL»
- 3 zone affectée thermiquement «ZAT»
- 4 métal de base «MB»

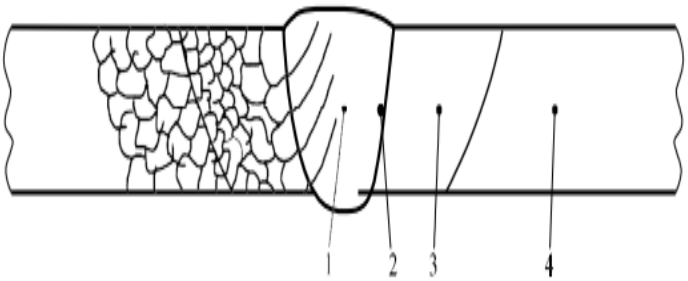

Figure II.1 : Différentes zones d'un joint soudé.

1 - Zone fondue : C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y ait eu ou non apport de métal 25

2 - Zone de liaison : C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu

3 - Zone affectée thermiquement : Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physicochimiques (natures et proportions des constituants). Pour les aciers, la ZAT est la zone du métal de base qui a été austénitisée au cours du cycle de soudage. Et constitue le domaine le plus délicat.

4 - Métal de base : Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physicochimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations. Cette zone commence à l'isotherme A1 pour le soudage d'une tôle d'acier normalisé[4].

II.3-Principaux procédés de soudage

Les procédés de soudage présentés dans ce chapitre sont des procédés de soudage à l'arc manuels, et automatiques. Un procédé de soudage implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de soudage comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné. Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité, le choix d'un gaz protecteur, la vitesse de dévidage du fil-électrode, l'élaboration de la séquence de soudage et enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.) [4].

II.3.1-Soudage à l'arc submergé (SAW)

Le soudage électrique à l'arc submergé (submerged arc welding), plus communément appelé soudage sous flux en poudre est un procédé de soudage automatique découvert aux USA en 1935 par KENNEDY.

Ce procédé, principalement utilisé en soudage à plat, trouve depuis 1950 des applications en corniche et en vertical sous laitier. On distingue les procédés monofil, bifils et multifils qui nécessitent la mise en œuvre d'un ou plusieurs fils [4].

Le soudage à l'arc sous flux en poudre (SAFP) constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe en effet 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, Cette disposition permet de réaliser des soudures ininterrompues. Le procédé est représenté sur la figure II.2 et qui comporte :

- une tête de soudage regroupant la torche proprement dite, l'entraîneur de fil, ledévidoir recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;
- un coffret d'automatisme et des accessoires.

L'opération de soudage comprend les différentes phases :

- 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'électrodeémergeant 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,
- avance du fil par mise et marche de l'entraîneur ; l'arc s'amorce au contactélectrode-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

. Le flux en poudre et le fil continuent à être alimenté d'une façon régulière et l'arc s'établit sous la poudre, dans les vapeurs et sous le laitier liquide qu'il y crée, qui constituent ainsi la protection du métal en fusion. Le comportement particulier du flux, qui le distingue de l'enrobage, réalise un certain confinement de l'arc.

L'amenée du courant à l'extrémité de l'électrode permet également de travailler à des densités de courant plus élevées que ne l'autorisent les électrodes enrobées et permet par suite d'obtenir des pénétrations, des taux de dépôts et des dilutions plus importantes (jusqu'à 70 %). Le transfert de métal s'effectue essentiellement par pulvérisation. Après soudure, le cordon est recouvert du laitier solide refroidi (figure II.4), qu'il est nécessaire d'enlever par piquage. 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 réutilisation.

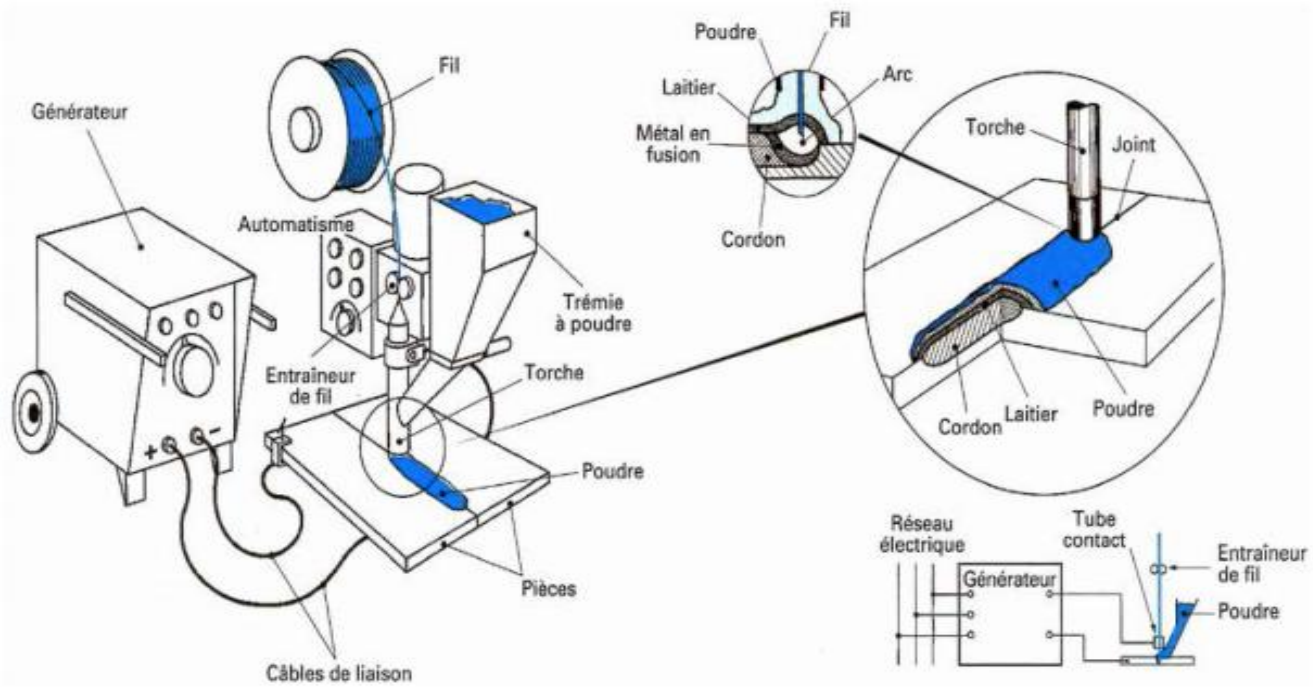

Figure II.2 : Soudage sous flux en poudre**.**

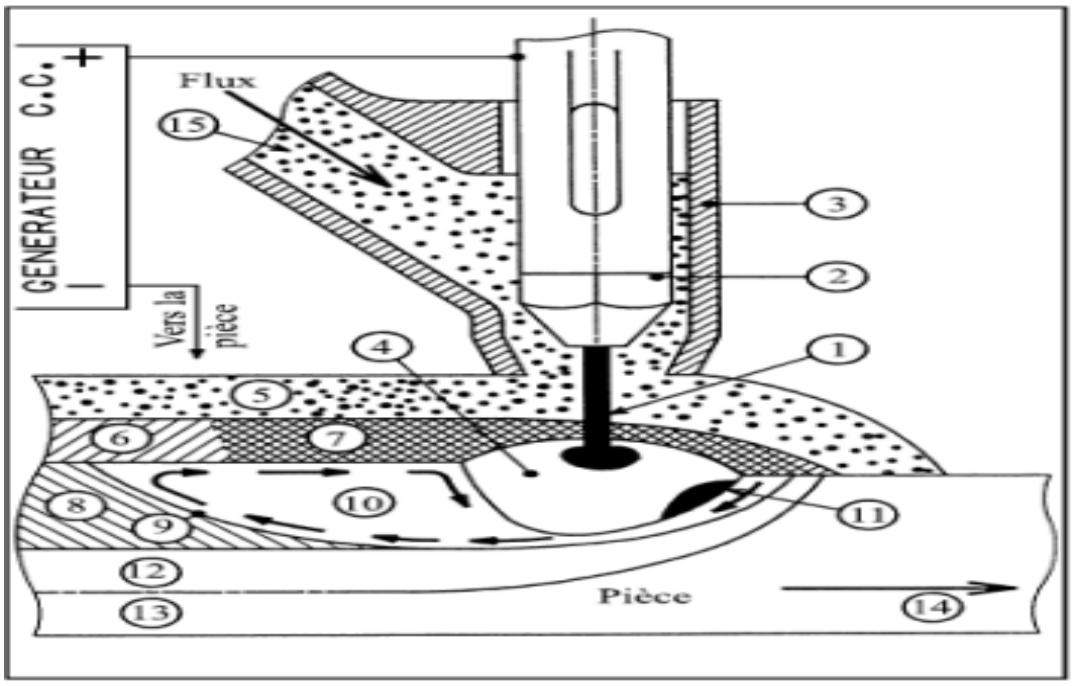

Figure II.3 : Principe du procédé de soudage sous flux en poudre.

1. Fil électrode.
2. Tube contact relié en général au pôle + du générateur.
3. Buse qui canalise l'arrivée du flux.
4. Arc électrique non visible.
5. Flux non fondu, récupérable.
6. Laitier solidifié.
7. Laitier en fusion.
8. Métal déposé solidifié.
9. Front de solidification.
10. Métal en fusion ou bain de fusion.
11. Goutte de métal détachée.
12. Zone affectée par la chaleur.
13. Métal de base non affecté par la chaleur
14. Sens de soudage.
15. Arrivée de flux.

II.3.1.1-Flux et matériau d'apport

Le fil d'apport et la composition des flux déterminent la qualité de soudure obtenue. L'objectif est d'obtenir un métal soudé dont la composition et la résistance sont identiques à celles du matériau de base. La composition du métal soudé dépend de celle du fil d'apport, qu'il faut donc choisir en conséquence en tenant compte de la possibilité de perte d'éléments d'alliage brûlés par l'arc, de fusion du métal de base et de production d'alliage sousl'effet du flux. L'utilisation d'un flux à forte capacité d'alliage en soudure multi-passes risque d'entraîner une accumulation d'éléments d'alliage d'une passe à l'autre[4].

II.3.2-Soudage à l'électrode enrobée (SMAW)

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la figure II.4.

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse. L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

- La technologie des électrodes
- L'habileté de l'opérateur

L'électrode enrobée constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée. Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes

les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre[4].

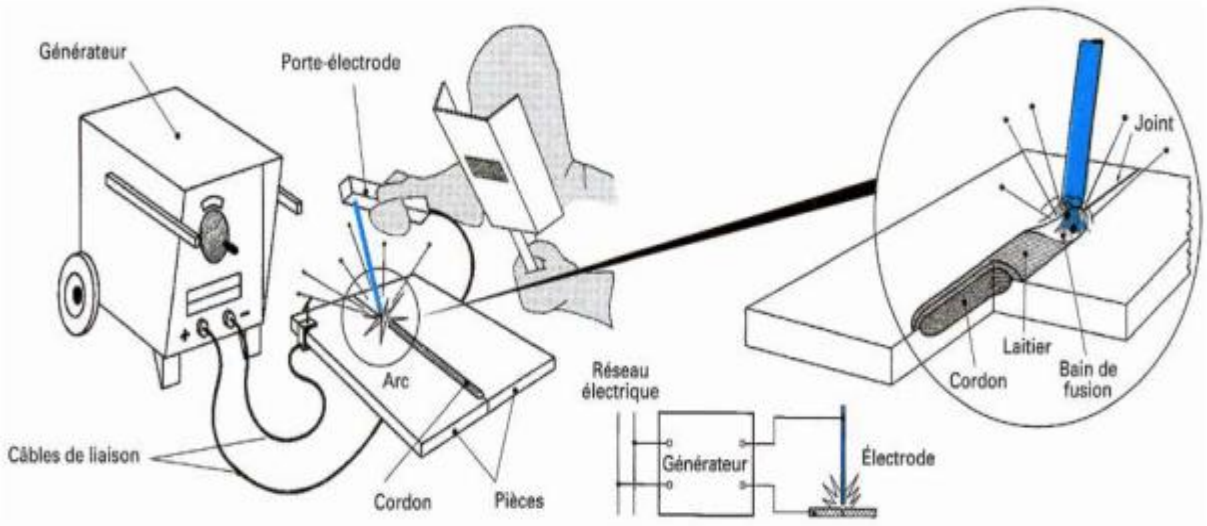

Figure II.4 : Soudage à l'électrode enrobée.

II.4-fabrication des tubes avec soudage

II.4.1-Les solutions de fabricationdes tubes avec soudage :

Les solutions complètes proposées pour la fabrication de tubes pour :

- Le soudage longitudinal, y compris le soudage par pointage, le soudage interne ou externe.
- Soudage hélicoïdal.
- Soudage circulaire.
- Soudage transversal[6].

II.4.1.1-Soudage hélicoïdal

Les équipements de soudage pour la fabrication de tubes hélicoïdaux en ligne et hors ligne.

II.4.1.2-Soudage longitudinal

Les solutions complètes proposées pour la fabrication des tubes longitudinaux y compris le soudage par pointage, le soudage interne ou externe[6].

II.4.2-Soudage hélicoïdal [6]

II.4.2.1-La fabrication de tubes hélicoïdaux hors ligne

- Raboutage de feuillard bande (soudage de bobine à bobine)
- Soudage par pointage (MAG)
- Soudage interne SAW
- Soudage externe SAW

II.4.2.2-Fabrication de tubes hélicoïdaux en ligne

- Soudage interne SAW
- Soudage externe SAW

II.4.3-Soudage hélicoïdal de tubes hors ligne

Dans une fabrication de tubes hors ligne, la station de formage est équipée de soudage par pointage, et alimente trois stations de soudage hors ligne distinctes, chacune avec des têtes de soudage SAW en interne et externe [6].

II.4.4-Raboutage de bandes

La station de jonction des bandasses compose d'un chariot sur poutre avec une torche de découpe au plasma, une torche de soudage par pointage MIG/MAG, et une tête de soudage SAW en tandem. Son mode opératoire est le suivant : après avoir laissé les bords des découpes propres, ceux-ci sont préparés par fraisage pour être unis. Les bandes sont ensuite rapprochées, soudées par pointage et achevées par soudage SAW en tandem[6].

II.4.5-Station de soudage par pointage

Le soudage par pointage utilise le procédé MIG/MAG, et des vitesses de soudage (V) pouvant atteindre 8 m/min. La torche du soudage par pointage est montée sur une glissière (pour effectuer le suivi des joints) le long du bras de formage de la station de formage. L'objectif du soudage par pointage est simplement de maintenir le tube ensemble avant le soudage SAW interne ou externe. **[6]**

II.4.5.1-Station de soudage interne

La station de soudage interne se compose d'un bras de 16 à 18 m de long avec une tête de soudage à 3 fils à son extrémité. L'angle de la tête de soudage est réglable afin de correspondre avec l'angle d'hélice du joint de soudure du tube. La tête de soudage est montée sur une glissière se déplaçant en sens axial pour effectuer le suivi des joints.

Avant de procéder au soudage, le bras de soudage est inséré sur toute sa longueur dans le tube. Le soudage se fait tout en roulant ou vissant le tube hors du bras interne. Il s'agit principalement d'éviter que le bras interne et tout son câblage ne soient affectés par le tube chauffé [6].

Figure II.5 : Station de soudage interne

II.4.5.2-Station de soudage externe

La station de soudage externe est intégrée à une potence semi stationnaire pouvant tenir une tête de soudage à 4 fils. L'espace réservé à la tête de soudage sur la station externe n'étant pas trop limité, les dévidoirs de fil sont montés selon une configuration en « arc-en-ciel » qui permet de placer les porte-filsen position droite entre les buses de contact et les moteurs de dévidage [6].

Figure II.6 : Station de soudage externe.

II.4.6-Système de mise à la terre

Les différents types de systèmes de mise à la terre pour la production de tubes. Le plus commun est de disposer d'un ensemble de balais montés sur un bâti, un devant et un derrière la tête de soudage externe. La tête de soudage interne utilise le même type de balais[6].

Figure II.7 : Système de mise à la terre.

Egalement des systèmes de courant de retour où les balais se déplacent sur un chariot près du tube.

Figure II.8 : Système de courant de retour**.**

Le chariot contenant les balais commence tout d'abord à un emplacement de la tête de soudage interne. Lors du soudage, le tube se dirige vers la tête de soudage externe et le chariot avec les balais de retour suit le tube jusqu'à la position de la tête de soudage externe où il s'arrête. L'avantage de ce système est que le point de contact du courant de retour ne change pas d'un point à un autre : c'est le même point, qui change de position [6].

II.4.7-Équipement de soudage par pointage (soudage MIG/MAG en station de formage)

L'équipement de soudage par pointage se compose d'une torche de soudage résistante pour soudage MIG/MAG équipée d'une buse à gaz pour la protection des gaz à haut débit. Le dévidage du fil de soudage fonctionne à l'aide d'un système en push-pull, équipé des moteurs éprouvés A6-VEC. Les sources d'alimentation utilisées sont deux redresseurs de soudage de 1 600 A, connectés en parallèle.

La station de soudage pour diamètre intérieur possède un bras interne de 18,5 m de long pour réaliser des opérations verticales sur des tubes de 50,8cmde diamètre. Une tête de soudage à 4 fils est installée sur la pointe du bras. La tête possède un système laser de suivi des joints qui active une glissière transversale sur une course de 60 x 60 mm. Elle est également dotée d'une roue de support permettant de stabiliser le bras interne contre le tube. Le système de dévidage du fil est de type « push-pull » (tiré-poussé), les moteurs sont montés sur la tête de soudage et à l'arrière du bras[6].

Figure II.9 : le soudage par pointage interne.

La station de soudage externe est intégrée à une potence semi stationnaire pouvant prendre en charge une tête de soudage à 5 fils. L'espace réservé à la tête de soudage sur la station externe n'étant pas trop limité, les dévidoirs de fil sont montés selon une configuration en « arc-en-ciel » qui permet de placer les porte-filsen position droite entre les buses de contact et les moteurs de dévidage.

Le système de mise à la terre des stations de soudage interne et externe est un système de porte-balais. Chaque bâti possède 12 balais maintenus contre le tube au moyen d'une potence pneumatique. À la fin de chaque soudure, le bâti et ses balais sont relevés pour que le tube puisse être éloigné de la station de soudage[6].

Figure II.10 : le soudage par pointage externe.

Figure II.11 : Les tuyaux soudés à denture hélicoidale SAW de grande diamètre.

Description de Produit

Info de Base :

- N° de Modèle: Q195, Q215, Q235, SS400,
- Type :Tour.
- Standard : ASTM, JIS, GB.
- Composition : Ferraille d'acier.
- Technique : Soudé.
- Traitement de surface : Galvanisé.
- utilisation spéciale : Haute résistance tôles d'acier, Porter acier résistant, Frappe à froid de l'acier, Moule en acier.
- Demande : Outil de bar en acier.

Les tuyaux de soudage est un des plus simples et plus durable des moyens de se joindre à la tuyauterie ensemble et de tuyaux en acier peuvent simplement être soudés avec MIG (Métal Inerte Gaz), TIG (tungstène gaz inerte ou SMAW (stick de soudage arc métallique). Avant de souder deux tuyaux ensemble, d'éviter les écarts entre les deux tuyaux. Pendant le soudage, de prendre des mesures pour assurer l'alignement continu des deux tuyaux**[6].**

Tableau II.1 : différents types des tuyaux [6]**.**

OD mm	WT mm	OD mm	WT mm	OD mm	WT mm	OD mm	WT mm	OD mm	WT mm
20×20	1.0-3.0	130×30	2.5-12	20×30	1.0-3.0	50×80	1.5-6.0	100×150	2.5-12.0
25×25	1.0-3.0	140×140	2.5-12	20×40	1.0-3.0	50×90	1.5-6.0	100×200	2.5-12.0
30×30	1.0-3.0	150×150	2.5-12	25×40	1.0-3.0	50×100	1.5-6.0	100×250	2.5-12.0
40×40	1.0-5.0	160×160	2.5-12	30×40	1.0-3.0	50×120	1.5-6.0	100×300	2.5-12.0
50×50	1.0-5.0	180×180	2.5-12	30×50	1.0-3.0	60×80	1.5-6.0	100×400	2.5-12.0
60×60	1.0-5.0	200×200	3.0-12	30×60	1.0-3.0	60×90	1.5-6.0	150×200	2.5-12.0
70×70	1.0-5.0	220×220	3.5-12	40×50	1.0-3.0	60×100	1.5-6.0	150×250	3.0-12.0
80×80	1.0-5.0	250×250	4.0-12	40×60	1.0-3.0	60×120	1.5-6.0	150×300	3.0-12.0
90×90	1.0-6.0	300×300	1.5-12	40×80	1.0-3.0	75×125	1.5-6.0	200×300	4.5-12.0
100×100	1.0-6.0	400×400	6.0-12	40×100	1.0-6.0	80×100	1.5-6.0	200×400	4.5-12.0
120×220	1.0-6.0	500×500	6.0-12	50×70	1.0-6.0	80×120	1.5-6.0	300×400	4.5-12.0

OD : diamétre extérieur.

WT : épaisseur de paroi

Tableau II.2 : compositionchimique et propreités mécaniques des défférents tubes [6]**.**

éléments	Composition chimique %					Propriétés mécaniques		
Matériel	**C%**	**Mn%**	**S %**	**P%**	**Si%**	**Point de rendement (Mpa)**	**Résistance à la traction (Mpa)**	**L'élongation %**
Q 195	0.06-0.12	0.25-0.50	<0.05	<0.045	<0.3	>195	315-430	32-33
Q 235	0.12-0.2	0.30-0.70	<0.045	<0.045	<0.3	>235	375-500	24-26
Q 345	<0.20	1.0-1.6	<0.04	<0.04	<0.55	>345	470-630	21-22

Tableau II.3 : fiche technique du produit (Tuyau en acier)[6].

Description rapide			
Standar	API, ASTM,bs,API SDP,ASTM,A53-2007,ASTM A53M	Categorie	10#45#,10Cr9Mo 1VNb 15NCuMoNb5,16mm
Epaisseur (M)	8-120 mm	Forme de section	Rond
Diamétre extérieur	355 6-3800 mm	Point d'origine	Tiangin,China
Application	Conduit d'huile	Technique	SAW
Certification	API	Traitement exterieur	3pe
Pipe spéciale	Tuyau API	Alliage ou pas	Non allié
Secondaire ou pas	Non secondaire	Nom du produit	Tuyau d&#33, acier astm et Api
Type	Tuyau en acier L SAW	Nom	Tuyau d&#39, acier acier astm et APi
Mot clé	Tuyau d&#39, acier acier astm et APi	Produit	Tuyau d&#39, acier soudé à 1&#39,arc submergé longitudinal
Mots clés	Tuyau en acier Lsaw de haute qualité	Materiel	Q235
Longueur	Longueur de joint simple jusqu'à #39à 12m longueur de joint	Utilisation	Pétrol, gaz, structure en acier, construction de centrales…ect

II.5-Conclusion

Dans ce deuxiéme chapitre, l'etude du soudage a eu sa part largement,vu son importance dans notre travail présenté, on a définie les principaux procédés de soudage et la fabrication des tubes soudés.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1-Introduction

Le principal concept de ce chapitre se résume en une présentation bien définie des différents dispositifs mis en œuvre pour la réalisation des essais, ainsi que la méthodologie des essais de contrôle destructif et non destructif effectués sur la coulée et sur la soudure.

Il est important de vérifier l'état des soudures sur les tubes par des essais de contrôle réalisés selon des normes bien définies. Parmi eux on a choisi celle d'API 5 L PSL2 45 ème édition.

III.2-Démarche expérimentale

Les essais effectués durant la chaine de fabrication des tubes en acier API 5 L X52M au sein de l'entreprise ALTUMET illustrés dans le diagramme ci-dessous [5].

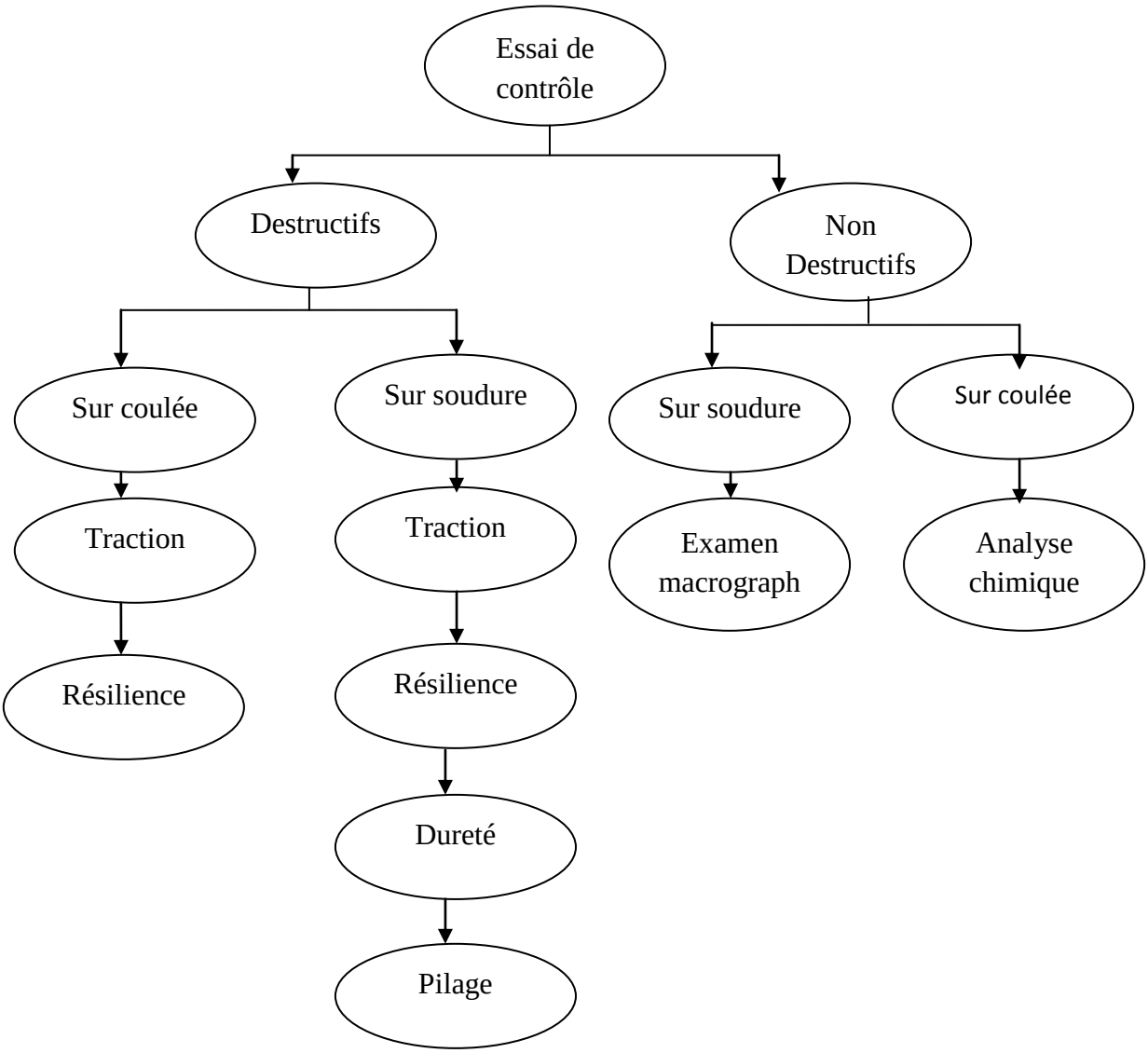

Figure III.1 : Diagramme des essais effectués durant la chaine de fabrication [4].

III.3-Prélèvement et dimensionnement des échantillons

Le prélèvement des échantillons 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 [4].

III.4-Contrôle destructifs

Les essais destructifs sont utilisés pour déterminer les caractéristiques physicomécaniques du métal de basse ou d'une soudure. Ces essais rendent l'échantillon impropre à une utilisation ultérieure. Ces essais comprennent :

- ✓ Essais de traction ;
- ✓ Essai de dureté ;
- ✓ Essai de résilience ;
- ✓ Essai de pilage ; [4].

III.4.1-Essais de traction

Un essai de traction est une expérience de mécanique qui permet d'aller jusqu'à la rupture des matériauxaprès avoir dépasséla limite maximale élastique.

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

Cette essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. On enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte [4].

Figure III.2 : Machine à essai de traction.

III.4.2-Essai de dureté

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 [4].
L'essai consiste à créer une empreinte avec un objet sous une certaine charge.

Figure III.3 : Machine de dureté Vickers ZHV10

Il existe plusieurs essais normalisés :

- 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 une couche d'oxyde.

Cela nécessite au moins un décapage au papier de verre [4].

III.4.3-Essai Vickers

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

$$\mathrm{HV} = \frac{2\mathrm{F}\sin\frac{136}{2}}{\mathrm{da}^2} \quad \boldsymbol{HV = 1,854\frac{F}{d^2}}$$

$$\boldsymbol{HV = \frac{F}{S}}$$

- D : diagonale de l'empreinte
- F : charge de l'essai (daN)
- S : aire de l'empreinte (mm^2

$\frac{\mathbf{HV}}{\mathbf{10}}$: Charge cruciale 9,8 daN appliquée pendant 10à 15 secondes.

III.4.3.1-Critère d'acceptation

Pour les aciers HLE résultats de dureté individuelle elle est ≤ 250 HV et la différence de la dureté moyenne entre le métal de base et le cordon de soudure elle est ≤ 60 HV [4].

III.4.4-Essais de résilience

La résilience est la capacité d'un matériau à l'énergie quand il se déforme sous l'effet d'un choc (déformation rapide). Il est utile de distinguer les matériaux métalliques, ou fragile, des matériaux de type élastomères.

Dans le cas des matériaux cassants (aciers par exemple), la résilience est caractérisée par l'énergie nécessaire pour déformer et rompre le matériau lors d'un choc par un objet percuteur. Dans le cas des matériaux de type élastomères, l'éprouvette n'est pas rompu, la résilience est caractérisée par la proportion d'énergie restitué à l'objet percuteur qui rebondit à la suite du choc [4].

Figure III.4 : Machine de l'essai résilience

III.4.5-Essai Charpy

Cet essai consiste à déterminer la résistance au choix des métaux, ou résilience KCV. Il s'agit dans cet essai de rompre avec un mouton pendule une éprouvette entaillée et de mesurer l'énergie absorbée W.L'énergie de flexion par chocs permet de caractériser la ductilité de l'acier et sa sensibilité à la rupture fragile en fonction de la température ; elle sert de référence pour définir des qualités d'acier normalisés [4].

III.4.5.1-Critère d'acceptation de la résilience

Pour les résultats de l'essai de résilience individuelle l'énergie elle est supérieure à $40j/cm^2$.

III.4.6-Essai de pillage

Cet essai permet de déterminer l'aptitude de la déformation par pilage du joint soudé. Il est d écrit dans des normes, des codes de construction ou les cahiers des charges des donneurs d'ordre.

Le prélèvement des éprouvettes est le plus souvent effectué dans le sens travers (perpendiculairement à la soudure) pour tester l'aptitude au pilage en droit ou en vers du joint soudé mais, lorsque l'épaisseur du matériau est trop importante, ils sont parfois remplacés par des essais de pliage coté[4].

Les avantages de l'essai de pillage sont que tant l'éprouvette que l'appareillage nécessaire à l'essai sont simples et faciles à mettre en œuvre.

Les éprouvettes sont faciles à réaliser mais nécessitent d'être grossièrement polies afin de mettre en évidence la soudure et d'arrondir les arrêtes pour éviter les amorces de rupture. L'essai peut être réalisé à l'atelier. Le résultat peut parfois être utile pour prononcer la qualification d'une soudure [4].

Le résultat est fonction de l'apparition de déchirures ou arrachements provoqués par d'éventuels défauts préexistants dans la soudure (ou dans le métal de base), le critère d'acceptation étant souvent associé à une longueur de défaut préétablie à ne pas dépasser.

En générale, l'essai de pilage requière un pilage endroit et un autre envers [4].

Tableau III.1 : Dimension des éprouvettes de pilage selon les normes API 5L**.**

Diamètre de tubes × Epaisseur	Mandrin	Ecartement
406×12,7	147	175
406×10,3	110	134
406×6,35	69	85
406×8,74	103	124

III.5-Essais non destructifs

Les essais non destructifs sont un ensemble de méthode qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, ou bien dans le cadre de maintenance. On parle aussi de contrôle non destructif (CND) [4].

Les méthodes de contrôle non destructif utilisées durant la chaine de fabrication des pipelines au sein de l'entreprise ALTUMET sont :

- Analyse chimique ;
- Contrôle par ultra-son ;
- Contrôle par rayon ;
- Epreuves hydraulique.

III.5.1- Analyse chimique

L'analyse chimique sur l'acier X52M fut effectuée au niveau de l'entreprise ALTUMET sur spectromètre de masse.

Figure III.5 : spectromètre de masse.

III.5.2- Contrôle par rayon X

On sait que les rayons X traversent tous les corps, mais d'autant plus difficilement que la densité de ceux-ci est élevée ; c'est pourquoi le plomb ou les métaux lourds sont généralement utilisés pour arrêter les rayonnements de cette nature. Lorsque les rayons X traversent un corps, une certaine partie émergée sur la face opposée à lace d'entré et une autre partie est diffusée. Le rayonnement direct est utilisé pour la radiographie, mais le rayonnement diffusé est gênant et on cherche à l'éliminer.

Si le tube comporte un défaut, celui-ci a généralement une densité différente de celle du métal environnant. Par suite, le rayonnement qui traverse toute l'épaisseur est plus ou moins absorbé au droit du défaut et si on lace un film photographique sensible aux rayons X sous le rayonnement émergent,

les défauts apparaitront sous forme de taches foncées ou claires **(figure III.6)** selon que la densité est plus forte que celle du métal environnant

Figure III.6 : Nids de porosité ou soufflures agglomérées.

La qualité de l'image obtenue dépend du contraste et de la définition, elle est d'autant plus grande que :

- Le rayonnement secondaire aura pu être arrêté ou limité par des cônes et diaphragmes limitant l'angle d'ouverture du faisceau de rayon X, et par des écrans en plomb limitant les zones frappées directement en absorbant le rayonnement secondaire,
- La distance foyer-film sera plus grande,
- Les dimensions du foyer sont plus faibles,
- La longueur d'onde est plus courte (donc la tension plus élevée) compte tenu de l'épaisseur de la pièce et du temps de posé adopté.

Le temps de pose dépend de l'intensité du rayonnement et de la sensibilité de l'émulsion du film.

La netteté augmente avec la distance focale, mais le temps de pose aussi, et encore plus vite, il est donc nécessaire d'accepter un compromis pour fixer cette distance focale

La qualité des images peut être déterminée au moyen de dispositifs appelés indicateurs de qualité d'image (en abrégé IQI)

L'examen des films négatifs se fait avec un négatoscope en salle d'obscure dont l'éclairement doit pouvoir être réglé en fonction de la densité du film, et son interprétation est largement facilitée par l'atlas des radiographies types telles que par exemple :

- Sur acier : soufflures, inclusions de laitier, manque de fusion, manque de pénétration, fissuration (transversales, longitudinales, de cratère), caniveaux et morsures d'arc,
- Sur alliage léger : inclusion de flux, inclusions de métaux lourds, inclusions d'oxydes.

Les applications du contrôle radiographique des soudures sont très nombreuses, non seulement pour prononcer la recette de certaines constructions soudées, mais pour examiner les tubes à réparer et localiser leurs défauts.

Tableau III.2 : Interprétation de film photographique.

	Type de défaut	Apparence radiographique
Inclusion gazeuses	Cavités sphériques ou longe forme	Taches sombres nettement définies
Inclusion de laitier ou autres matières étrangères	Cavités allongées contenant le laitier ou l'élément étranger	Taches sombres à contours irréguliers souvent parallèles à la soudure
Mauvaise reprise au chargement d'électrode	Brusque variation, de section du cordon de soudure	Taches sombres isolées à la reprise d'une soudure
Manque de pénétration	Fusion incorrecte entre le métal de base et métal d'apport	Lignes sombres continues ou intermittentes, au milieu de la soudure
Fissures longitudinales ou transversales	Facture dans le métal arrachement lamellaire	Fines lignes sombres rectilignes ou non
Caniveaux	Rainures ou gorges à la surface de la tôle parallèles à la soudure	Lignes sombres, parfois larges et diffuses, le long du bord de la soudure

III.5.3-Examen Macrographique

Comme son nom l'indique, la macrographique est un moyen permettant de réaliser une première observation des objets de la surface de l'échantillon discernables à l'œil nu.

Cet examen passe par trois étapes :

- Polissage
- Attaque chimique
- Examen et photographie

III.5.3.1-Polissage

Le polissage est l'étape principale de la métallographie (La méthode d'observation de la structure du métal) ; C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable et celui d'un miroir. Dans cette opération on utilise une polisseuse de type (FORCIPOL 2V) (Figure III.7), et collé les papiers abrasifs sur les disques tournants pour éviter le frottement d'échantillons sur le papier abrasif qu'il provoque l'échauffement local on jette l'eau. Ce polissage s'effectue par l'utilisation des papiers abrasifs de différentes granulométries (120, 180, 240, 320, 600, 800, 1000, et 1 200). La dureté de polissage à chaque granulométrie est 6-8 minutes. Si le polissage est terminé une finition est pratiquée par un papier tissu diamantée, et à chaque fois un nettoyage des échantillons par l'éthanol est nécessaire.

Figure III.7 : machine de polissage

III.5.3.2-Attaque chimique

Pour relever la structure de nos échantillons, nous avons attaqué chimiquement la surface polie par le Nital 4% (solution alcoolique-nitrique) de composition 4 ml d'acide nitrique HNO3. 96ml d'éthanol C2H5OH. La durée d'attaque est 12 secondes. Les échantillons ont ensuite lavé par l'eau distillée et bien séchée pour l'observation.

Figure III.8: Ethanol

Figure III.9 : Acide nitrique

III.5.3.3-Examen et photographie

Après l'attaque chimique on a obtenu cet aspect **(figure III.10)**

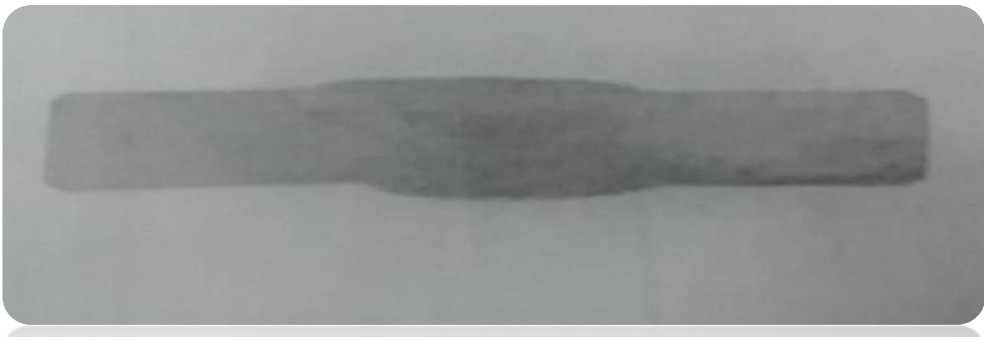

Figure III.10 : éprouvette après attaque chimique

III.6-Conclusion

Le troisième chapitre nous a permis de réussir nos démarches expérimentales concernant les différents essais et examens réalisés pour obtenir des résultats qu'on puisse interpréter.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L’intention de la réalisation de ce travail est de nous permettre d’obtenir des résultats pour mieux connaitre les deux procédés utilisés par l’usine ANABIB et déduire la qualité et le risque de fissuration de chaque procédé, mais à défaut de stage qui permet d’avoir des résultats pratiques, on s’est contenté d’étudier théoriquement la caractérisation de ces matériaux pour compléter notre travail et pour qu’il aura une valeur d’interprétation des résultats, ceci est du aux conditions défavorables à cause de la pandémie du COVIDE -19, de ce fait, il nous a était interdit de continuer notre stage au sein de la société ANABIB par précautions.

Références bibliographiques

[1] : BENSAADA S., université de BISKRA

[2] : BELABED Abdelmadjid, Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles, Université Abou BEKR BELKAID – Tlemcen, Faculté de TECHNOLOGIE, Génie mécanique, 06/06/2017

[3] : Mr. GADRI Hamid, Mr. OUALMI Lounis, étude et conception d'un verticalisateurmedical de type motilo, université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU, faculté du génie de la construction, département de génie mécanique, option : fabrication mécanique et productique, 2015 /2016.

[4] : MESSAOUDI Khaled, CHOUIA Hamza, BEZZAZI Boudjama, Caractérisation physique et mécanique de l'acier X52 M avant et après soudage selon la norme API 5L, Université de BOUMERDES, Génie des matériaux, 2019

[5] : Mr. HAMAIDI Amar, Mr. MADJOUR Younes, Contrôle qualité des soudures X52M réalisées par les procédés SAW et SMAW, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté du Génie de génie de la construction, Département de génie mécanique, 2014.

[6] : Dr. HAKIM SIGUERDJIDJENE (documentation de la part du prof)

[7] : BENSAADA S., ELABORATION DES METAUX FER