

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



**Département de Métallurgie**

Projet de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en  
Génie des Matériaux

**Thème**

Etude de l'application des essais destructifs et non  
destructifs sur un acier destiné à la fabrication des pipelines  
en API 5L X60M

**Promoteur : Pr M.E. DJEGHLAL**

**Co-Promoteur : Mr A. BAOUALI**

**Etudié par :**

**Makhlouf HAMOUCHE**

**Promotion juin 2015**

ENP, 10 Avenue Hassen Badi – El Harrach, Alger

[www.enp.edu.com](http://www.enp.edu.com)

## Remerciements

*Soyons reconnaissants aux personnes qui nous donnent du bonheur ; elles sont les charmantes jardinières par qui nos âmes sont fleuries.*

**« Marcel Proust »**

Au terme de ce travail, je souhaite adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et ont permis par leurs soutiens et leurs conseils, de le mener à bien.

Je tiens dans un premier temps à remercier Monsieur le professeur M.E.DJEGHLAL, pour m'avoir confié ce travail, ainsi que pour ses précieux conseils, pour sa sympathie, sa disponibilité, ses idées, ainsi que pour son aide précieuse.

Je tiens à remercier Mr BAOUALI responsable au laboratoire d'essai mécanique à ANABIB, qui m'a donné la chance au cours de cette étude de bénéficier l'appui technique de laboratoire, ainsi que tous le personnels de ANABIB pour leur aide très précieuse.

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté de participer à mon jury de mémoire.

Je ne peux également oublier de remercier mes amis et camarades de classe pour leurs soutiens et encouragements ainsi pour leurs précieux conseils.

Enfin, qu'il me soit permis de dédier ce mémoire aux membres de ma famille, très particulièrement mes parents, qui m'ont permis de poursuivre mes études jusqu'à aujourd'hui.

M.HAMOUCHE

## Résumé

Le but de ce travail est l'étude de l'évolution des caractéristiques chimique et mécanique durant la chaîne de fabrication des pipelines, l'étude est basée sur des essais de contrôle destructif et non destructif selon la norme API 5L PSL2 de l'acier X60M. Cette étude a nécessité un examen par le spectromètre de masse pour l'analyse chimique et des essais mécaniques de traction, de dureté, de résilience et de pliage. Ces résultats suggèrent la possibilité de continuer la fabrication, et qualifier le produit final pour la commercialisation selon les normes API 5L PSL2.

**Mots clés :** Soudage des tubes sous forme spiral, acier API 5L X 60 M, soudage automatique, contrôle destructif et non destructif.

### ملخص :

الهدف من هذا العمل هو دراسة التغيرات في الخصائص الكيميائية والميكانيكية خلال خط إنتاج الأنابيب، واعتمدت الدراسة على اختبار متلف والاختبارات غير المتلفة وفقا لمقاييس API 5L PSL2 الحديد الصلب X60M. وشملت هذه الدراسة مراجعة من قبل مطياف الكتلة للتحليل الكيميائي والاختبار الميكانيكي الجبر، والصلابة والمرونة والانحناء. هذه النتائج تشير إلى إمكانية استمرار التصنيع، والتأهل لتسويق المنتج النهائي للمعايير API 5L PSL2. **كلمات البحث :** لحام أنابيب الصلب شكل حلزوني API 5L X 60 M، واللحام التلقائي، الاختبارات غير المتلفة والمتلفة.

### Abstract :

The aim of this work is the study of changes in chemical and mechanical characteristics during pipeline production line, the study is based on destructive testing and non-destructive testing according to API 5L PSL2 standard steel X60M. This study involved a review by the mass spectrometer for chemical analysis and mechanical testing of traction, hardness, resilience and bending. These results suggest the possibility of continuing manufacturing, and qualify for the final product marketing to API 5L PSL2 standards.

**Keywords :** Welding of tubes form spiral steel API 5L X 60 M, automatic welding, non-destructive and destructive testing.

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> Circuit de Soudage ALTUMET spa .....	8
<b>Figure II.1.</b> Diagramme binaire d'équilibre de phases Fer-FeC <sub>3</sub> .....	12
<b>Figure II.2.</b> Représentation schématique des microstructures pour un acier Fer-Carbone hypoeutectoïde au refroidissement à partir de la phase austénitique .....	13
<b>Figure II.3.</b> Microstructure des échantillons de l'acier API 5L X60M étudié .....	18
<b>Figure III.1.</b> Soudure longitudinale .....	22
<b>Figure III.2.</b> Soudure spiral.....	23
<b>Figure III.3.</b> Principe de soudage manuel .....	24
<b>Figure III.4.</b> Principe de soudage automatique .....	25
<b>Figure III.5.</b> Principe de soudage en tandem .....	26
<b>Figure III.6.</b> Principe de soudage sou flux gazeux .....	27
<b>Figure III.7.</b> Machine ATIS pour le soudage SAW H.....	27
<b>Figure III.8.</b> Soudage bout à bout .....	28
<b>Figure III.9.</b> Réalisation d'une soudure spirale sur tube API .....	29
<b>Figure IV.1.</b> Diagramme des essais effectué durant la chaîne de fabrication .....	34
<b>Figure IV.2.</b> Sens de découpage des échantillons pour le contrôle destructif.....	35
<b>Figure IV.3.</b> Machine de traction .....	36
<b>Figure IV.4.</b> Eprouvette transversale ASTM A370 .....	37
<b>Figure IV.5.</b> Eprouvette ASME section IX homologué au procédé de soudage SAW et SMAW .....	37
<b>Figure IV.6.</b> Diagramme effort-déformation.....	38
<b>Figure IV.7.</b> Essai de dureté Vickers .....	40
<b>Figure IV.8.</b> Caractéristiques de l'éprouvette et de sa position sur la machine d'essai .....	41
<b>Figure IV.9.</b> Eprouvettes ASME section IX pour pliage .....	42
<b>Figure IV.10.</b> Spectromètre de masse .....	44
<b>Figure IV.11.</b> Parcours des US sans défaut .....	45
<b>Figure IV.12.</b> Parcours des US avec défaut .....	45
<b>Figure IV.13.</b> Nids de Porosités ou soufflures agglomérées .....	46
<b>Figure V.1.</b> Courbe de l'essai de traction sur le métal de base (norme API 5L).....	50
<b>Figure V.2.</b> Courbe de l'essai de traction sur soudure (norme API 5L).....	51
<b>Figure V.3.</b> Courbe de l'essai de traction sur soudure (norme ASME IX) .....	51
<b>Figure V.4.</b> Les différentes zones d cordon de soudure .....	53

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1.</b> Propriétés mécaniques du métal avant soudage, d'après le certificat de réception du Fournisseur (ArcelorMittal).....	14
<b>Tableau II.2.</b> Propriétés mécanique de l'acier grade X60M selon la norme API 5L PSL2....	14
<b>Tableau II.3.</b> Composition chimique de l'acier grade X60M d'après le certificat de réception du Fournisseur (ArcelorMittal) .....	14
<b>Tableau II.4.</b> Composition chimique de l'acier grade X60M selon la norme API 5L PSL2..	15
<b>Tableau IV.1.</b> Dimensions des éprouvettes de pliage selon les normes API 5L .....	43
<b>Tableau IV.2.</b> Dimensions des éprouvettes de pliage selon les normes ASME section IX ...	43
<b>Tableau IV.3.</b> Interprétation de film photographique .....	48
<b>Tableau V.1.</b> Résultats de l'essai de résilience pour l'acier X60M .....	52
<b>Tableau V.2.</b> Résultats de l'essai de dureté .....	53
<b>Tableau V.3.</b> La composition chimique (en pourcentage %) du métal de base (acier X60M)	54

## Table des matières

Remerciement	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale .....	1

### Partie I – Etudes Bibliographiques

<b>Chapitre I – Présentation de l’entreprise .....</b>	<b>3</b>
I.1.Historique de l’entreprise .....	4
I.2.Présentation de l’entreprise .....	4
I.3.Système d’organisation .....	5
I.4.Direction d’usine .....	7
I.4.1.Responsabilités .....	7
I.4.2.Missions.....	7
I.4.3.Organisation de la direction d’usine .....	8
<b>Chapitre II – Présentation de l’acier API 5L X60M .....</b>	<b>9</b>
Introduction.....	10
II.1.Acier HLE .....	10
II.2.Les aciers API 5L X60M .....	11
II.3.Diagramme d’équilibre de phase .....	11
II.4.Caractéristiques mécaniques de l’acier API 5L X60M .....	13
II.5.Caractéristiques chimique de l’acier API 5L X60M.....	14
II.6.Influence des éléments d’alliage .....	15
II.7.Carbone équivalent.....	17
II.8.Soudabilité.....	17
II.9.Microstructure .....	18

<b>Chapitre III – Fabrication et soudage des tubes</b> .....	19
Introduction.....	20
III.1.Fabrication des tubes .....	20
III.1.1.Définition .....	20
III.1.2.Fabrication des tubes sans soudures .....	21
III.1.3.Fabrications des tubes soudés .....	22
III.1.3.1.Soudage longitudinal .....	22
III.1.3.2.Soudage spiral.....	23
III.2.Soudage des tubes .....	23
III.2.1.Procédés de soudage recommandés pour les aciers HLE .....	24
III.2.1.1.Soudage manuel à l’arc avec électrodes enrobées .....	24
III.2.1.2.Soudage automatique sous flux solde en poudre .....	25
III.2.1.3.Soudage automatique sous flux avec électrode en tandem.....	26
III.2.1.4.Soudage sous flux gazeux .....	26
III.2.2.Conditions de soudage automatique .....	27
III.2.2.1.Procédé utilisé.....	27
III.2.2.2.Spécification des paramètres soudage .....	28
III.2.3.Défauts des constructions soudés .....	29
III.2.3.1.Déformation .....	29
III.2.3.2.Caractéristiques mécaniques .....	29
III.2.3.3.Résistance à la corrosion.....	30
III.2.4.Importance de contrôle de soudures .....	30

## **Partie II – Etudes Expérimentales**

<b>Chapitre IV – Méthodes expérimentales</b> .....	33
Introduction.....	34
IV.1.Plan des essais .....	34
IV.2.Prélèvement et dimensionnement des échantillons .....	35
IV.3.Contrôle destructifs.....	35
IV.3.1.Essais de traction .....	36
IV.3.2.Essais de dureté .....	39
IV.3.3.Essais de résilience .....	40

IV.3.4.Essai de pliage .....	42
IV.4.Essais non destructifs.....	43
IV.4.1.Analyse chimique .....	44
IV.4.2.Contrôle par Ultra-Sons .....	44
IV.4.3.Contrôle par rayon X .....	46
IV.4.4.Epreuve hydraulique.....	48
<b>Chapitre V – Résultats et interprétation .....</b>	<b>49</b>
Introduction.....	50
V.1.Essais de contrôle destructif.....	50
V.1.1.Essaide traction .....	50
V.1.2.Essai de résilience .....	52
V.1.3.Essai de dureté .....	53
V.2.Essais de contrôle non destructif.....	54
V.2.1.Analyse chimique.....	54
Conclusion générale.....	55
Bibliographie	

## Introduction générale

L'utilisation des aciers à haute limite élastique est très répandue dans plusieurs industries vue leurs diverses nuances et donc une grande variété de caractéristiques mécaniques. Pour notre étude on a choisi la nuance API 5L X60M utilisée pour la fabrication de tubes soudés spirale, servant au transport des hydrocarbures et de l'eau. Pour cela notre acier doit répondre à plusieurs exigences telles que la résistance mécanique, l'aptitude au formage, la soudabilité ou encore la résistance à la corrosion.

En amont de la réalisation des tubes, l'acier en questions est élaboré en choisissant convenablement, le procédé d'élaboration et les éléments d'alliages. Par la suite la mise en forme des tôles par un laminage à chaud contribue à conférer une bonne tenue mécanique à l'acier.

Notre matériau subit une opération de soudage, ce qui conduit inévitablement aux transformations liées à cette opération qui induit des transformations intrinsèques en termes de fragilisation de la zone soudée et de la diminution de la résistance à la corrosion. En aval à l'opération de soudage, les tubes sont revêtus par des polymères leurs permettant d'être protéger de la corrosion.

Compte tenu du contexte général lié au matériau en question, dès son élaboration, sa transformation en produit fini et par la suite son utilisation, notre choix d'étude s'est porté sur la zone avoisinante et comportant le cordon de soudure à savoir le métal fondu, la zone affectée thermiquement et le métal de base adjacent à cette dernière.

Pour cette étude, on a procédé à une synthèse bibliographique représentant la partie théorique de notre travail, ainsi on a met à notre disposition le maximum de données relatifs à notre sujet, cette partie comporte trois champs d'étude :

- Présentation de l'entreprise ALTUMET ;
- Présentation de l'acier API 5L X60M ;
- Fabrication et soudage des tubes.

La deuxième partie de notre étude concerne en premier la présentation des différents dispositifs mis en œuvre pour la réalisation des essais et leurs méthodologies, et enfin on procédera à l'analyse des résultats obtenus par le contrôle destructif et non destructif, dans le but de répondre à certaines questions.

**Partie I**  
**Etude Bibliographique**

# **Chapitre I**

## **Présentation de l'entreprise**

## I.1. Historique de l'entreprise

L'unité des tubes spirale **ANABIB**, issue de la nouvelle restructuration de l'Entreprise Nationale de Tube et Transformation des Produits Plats « **ENTTPP** », est implantée à REGHAIA depuis 1959 par le groupe Français « **VALLOUREC** » sous le nom d'**ALTUMEC**.

Le 13-06-1968 est la date de la nationalisation de l'unité « **GROS TUBES** », elle est devenue une unité de la Société Nationale de Sidérurgie « **SNS** ». L'**ENTTPP** implantée à REGHAIA comprenait essentiellement les unités suivantes : **GROS TUBES, PETITS TUBES ET PROFILES A FROID**.

L'AN. 2000 notre pays a suivi une nouvelle politique commerciale, l'unité **GROS TUBES** est devenu une FILIALE de ANABIB avec une nouvelle organisation structurelle, sous le nom d'**ALTUMET** « Algérienne Tubes Métallique S.P.A. ».

## I.2. Présentation de l'entreprise

Implanté dans la zone industrielle de REGHAIA, à 25 km d'Alger, l'entreprise **ALTUMET** bénéficie d'une infrastructure et de servitudes qui contribuent à une offre de produit d'un niveau élevé. Elle a l'avantage d'être desservie par voie ferrée, de plus, la proximité du port d'Alger peut rendre de précieux services.

L'entreprise dispose de moyens propres, exploités par un personnel expérimenté, qualifié et de plus en plus jeune assurant un contrôle de conformité à tous les niveaux de fabrication, à partir de la réception de la matière première (bobines, flux, fils cuivrée) à l'expédition du produit fini.

L'entreprise a pour fonction :

- La fabrication des tubes spirale.
- L'enrobage des tubes.

La superficie totale de l'entreprise est de **32785 m<sup>2</sup>** répartie comme suit :

- La superficie couverte : **15200 m<sup>2</sup>**.
- La superficie non couverte : **17585 m<sup>2</sup>**.

## ANNEXES :

Autour des ateliers de production sont implantées les annexes d'utilités indispensables suivantes :

- Sous station électrique.
- Salle des compresseurs.
- Extension sous tension électrique
- Réservoir eau incendie.
- Bouteilles d'oxygène et d'acétylène.

### I.3. Système d'organisation générale

(Voir organigramme de l'entreprise)

Les structures centrales de l'Entreprise, dans leur mode de fonctionnement, ont un caractère bicéphale, et sont à la fois opérationnelles et fonctionnelles.

La Direction Générale de l'Entreprise est structurée de la manière suivante :

- **Le Directeur Général**, Président du Conseil d'Administration, chargé de la définition de la politique générale de l'entreprise et des stratégies de la mise en œuvre.
- **Le Président Directeur Général** dispose pour l'accomplissement de sa mission d'un staff, placé sous son autorité directe et constitué de :
  - **Trois (03) Directeurs Centraux** : sont responsable des fonctions spécifiques dans leurs domaines respectifs. Ils entretiennent entre eux et avec le Directeur de l'usine des relations fonctionnelles de coordination dans différents domaines d'activité de l'entreprise.
  - **Un (01) Directeur d'Usine** : est responsable de la totalité des actes de gestion de sa structure, ainsi que de l'application de la réglementation et des procédures en vigueur dans l'entreprise.
  - **Cinq (05) Assistants de Direction Générale** : Le Directeur Général dispose au sein de son cabinet d'assistants chargés des fonctions suivantes :
    - **Assistant de sécurité préventive** : Il a pour mission de :
      - L'élaboration et la mise en œuvre des plans de prévention et d'intervention.
      - L'animation, le contrôle, l'assistance dans le domaine de la sécurité industrielle et de protection de l'environnement et du patrimoine de l'entreprise.
      - Assurer le développement de la normalisation en matière de sécurité.

- Gérer les équipements d'intervention et de surveillance.
- Etablir les rapports périodiques portant sur les risques et les accidents de travail.
- Organiser les relations avec les organismes extérieurs (protection civile, environnement et autres).
- **Assistant d'audit** : il a pour mission de :
  - Formuler des recommandations en vue d'améliorer le contrôle interne.
  - Mener des études en matière d'audit à la demande de la Direction Général.
  - Assurer en cas de besoin les structures centrales dans les opérations d'apurement et de révision des comptes.
  - Assurer le contrôle du respect des procédures par rapport à la réglementation.
  - Formuler des recommandations visant à réduire les coûts, pour une meilleure efficacité.
- **Assistant assurance qualité / développement** : il a pour mission de :
  - Réaliser pour le compte de la Direction Générale toute étude relative à la qualité.
  - Gérer et diffuser les systèmes qualités ainsi que les Normes standard opposables aux matières produits et services de l'activité de l'Entreprise.
  - Assister à l'élaboration spécifications de matière et services de l'activité de l'Entreprise.
  - Coordonner et animer les activités de développement produit en gamme et qualité.
  - Elaborer pour le compte de la Direction Générale le tableau de bord relatif à l'activité qualité / développement.
- **Assistant achats import** : il a pour mission de :
  - L'exécution des opérations d'approvisionnements a l'import, et la recherche dans la diversification des sources d'approvisionnements.
  - Suivre l'évolution des tendances du marché international.
  - La négociation des contrats et commandes.
  - Le traitement, l'analyse et l'évolution des offres.
  - Le suivi des opérations bancaires, de transit et de dédouanement.
  - La supervision de la réception et du contrôle des marchandises importées.
  - L'ordonnancement des factures fournisseurs, de transit et de dédouanement.
  - L'établissement de tableaux de bord périodiques sur l'exécution des commandes et contrats.

- **Assistant de direction** : est responsable du secrétariat général. l'assistant est notamment chargé :
  - De la gestion du l'Ordre Général.
  - De la réalisation des travaux de secrétariat.
  - De la gestion et des travaux de Secrétariat du Conseil d'Administration
  - De la gestion des archives et dossiers de la Direction Générale.

## **I.4. Direction d'usine**

### **I.4.1. Responsabilités**

- Définition et mise en œuvre de la politique de production, et préservation de l'outil de production et sa rationalisation.
- Promotion de la qualité des produits et services selon les Normes et standard de production en vigueur au sein de l'Entreprise.
- Mise en œuvre de la politique d'Approvisionnements.
- Mise en œuvre de la politique de qualité des produits et services.

### **I.4.2. Missions**

Les missions de la Direction d'Usine sont de :

- Elaborer les programmes de production par type de produits.
- Procéder au suivi régulier de la production.
- Contrôler les différentes étapes du processus de fabrication.
- Veiller au respect des standards et Normes de productivité et de qualité.
- Elaborer et mettre en application, la politique de maintenance préventive et curative des équipements et installations de productions.
- Assurer la gestion technique de l'ensemble des moyens d'exploitation.
- Assurer la gestion physique du patrimoine industriel de l'entreprise.
- Gérer et suivre les approvisionnements en matières premières et pièces de rechange indispensables à la bonne marche de l'usine.
- Elaborer les objectifs d'approvisionnement sur la base du plan annuel de production.
- Assurer le suivi et le contrôle des périodes de couverture des stocks de matières.
- Assurer la coordination et le suivi des activités d'approvisionnement.
- Assurer le suivi et la gestion des stocks de l'usine.

### I.4.3. Organisation de la direction d'usine

La Direction d'Usine comprend quatre (05) Départements :

- A- DEPARTEMENT PRODUCTION.
- B- DEPARTEMENT CONTROLE /QUALITE.
- C- DEPARTEMENT MAINTENANCE.
- D- DEPARTEMENT APPROVISIONNEMENT
- E- DEPARTEMENT REVETEMENT

### I.5. Circuit de Soudage ALTUMET spa

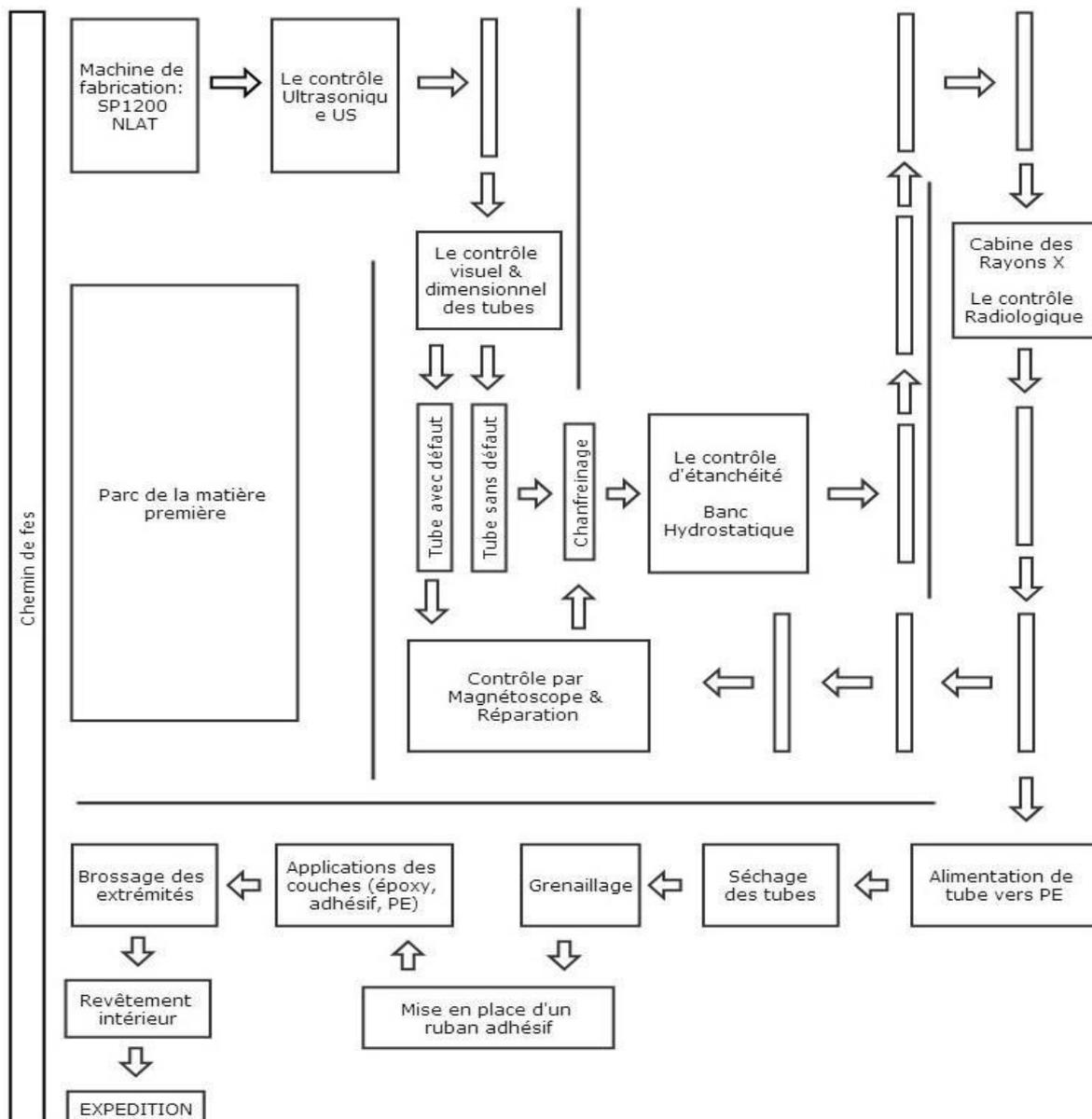


Figure I.1 Circuit de Soudage ALTUMET spa

**Chapitre II**  
**Présentation de l'acier API 5L**  
**X60M**

## Introduction

Cette partie concerne la présentation de différentes caractéristiques de l'acier API 5L X60M destiné à la fabrication des Pipelines.

Cette partie tient compte aussi de l'influence des éléments d'alliages sur les caractéristiques de l'acier, soudabilité et microstructure.

### II.1. Aciers HLE

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HLE), ou à haute résistance HR (HSLA - High Strength Low Alloy) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre les limites d'élasticité supérieures à 275 MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques 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 être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HLE est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [1].

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique incluent beaucoup de catégories standards et de propriétés industrielles conçues 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 petites additions d'éléments d'alliage.

Les aciers HLE sont classifiés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier doux laminé avec des propriétés mécaniques augmentées obtenues par (la petite) addition judicieuse des éléments de microalliage et, peut-être, des techniques de traitement spéciales.

Les aciers HLE peuvent être divisés en six catégories [1] :

- ✓ Les aciers HLE résistants à la corrosion atmosphérique.
- ✓ Les aciers microalliés ferrito-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.

## II.2. Les aciers API 5L X60M

La signification de la nuance API 5L X60M est comme suivante :

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 X60 a une limite d'élasticité minimale de 60 ksi (415 MPa) [2].

L'acier API 5L X60M est un acier au carbone à haute limite élastique, de catégorie ferrite aciculaire. Les aciers de ferrite aciculaire peuvent être obtenus par trempage ou, de préférence, par le refroidissement à l'air avec les alliages appropriés pour la trempabilité. L'avantage principal de ce type d'acier HLE est la combinaison peu commune de haute limite d'élasticité (415 à 690 MPa), de la résilience élevée, et de la bonne soudabilité [1].

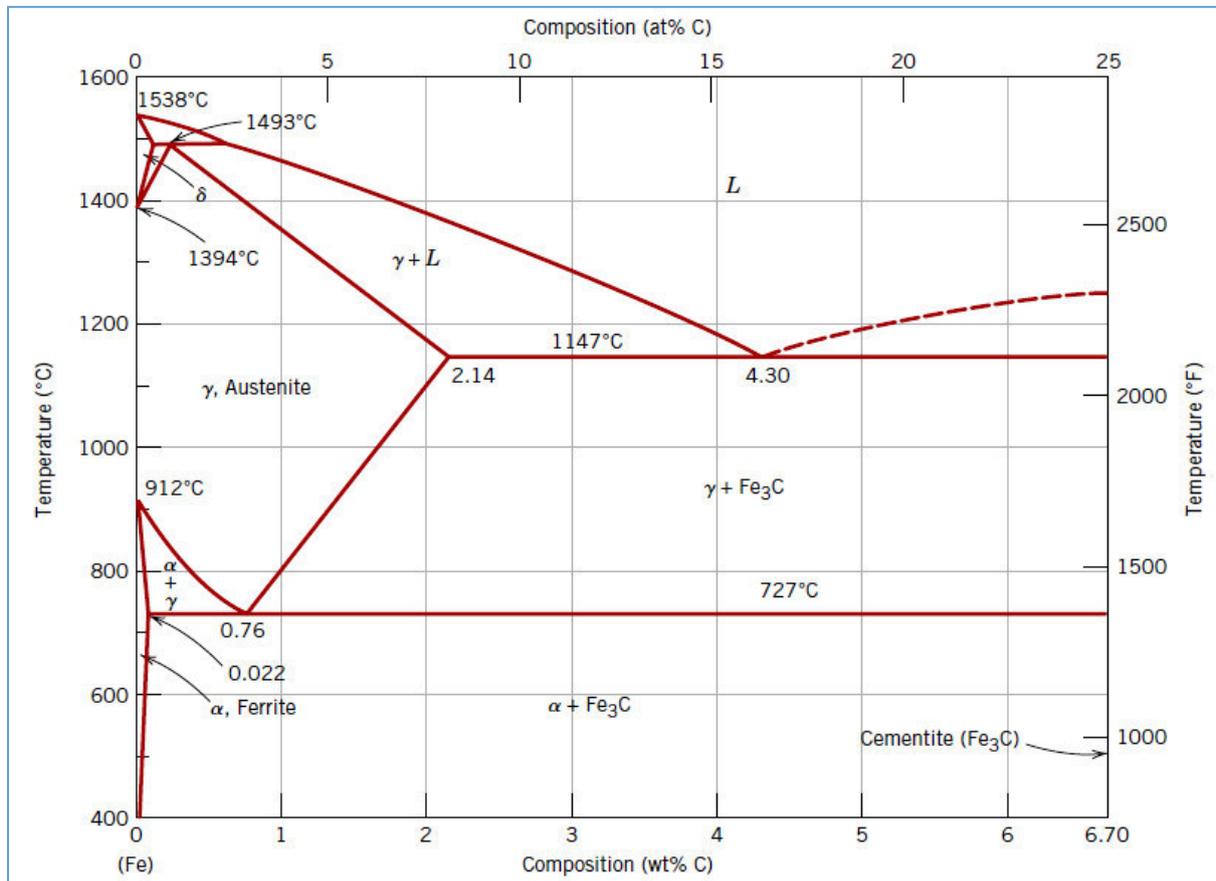
En réponse à ces besoins, les chercheurs ont développé un acier de ferrite aciculaire dur pour le pipeline par l'optimisation du contenu de carbone et de niobium, l'addition du bore, et/ou l'application du refroidissement en ligne accélérée [1].

L'application principale de l'acier de ferrite aciculaire implique les canalisations d'hydrocarbures dans des conditions arctiques. Cette application exige une combinaison de dureté, de haute résistance, d'excellente résistance à la fissuration induite par l'hydrogène et la soudabilité de premier ordre de champ [1].

## II.3. Diagramme d'équilibre de phase

Un diagramme d'équilibre est une représentation des transformations solide –liquide ou solide –solide d'un alliage. La partie haute température est formée par le diagramme fusion –solidification, et la partie basse température est constituée des lignes de transformation. (Figure II-1). On distingue les différentes variétés allotropiques du fer :

- ✓ Fe  $\alpha$  : stable de  $T_{\text{ambiante}}$  à 906°C. Il ne dissout pratiquement pas le C (0,025% à 723°C).
- ✓ Fe  $\gamma$  : stable de 906°C à 1400°C. Il dissout facilement le C (2% à 1150°C).
- ✓ Fe  $\delta$  : stable de 1400°C à 1540°C.

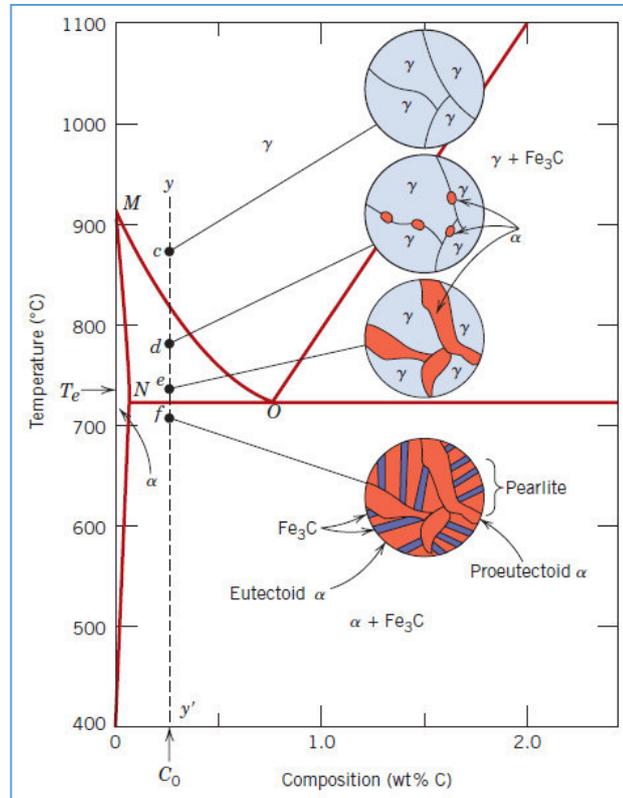


**Figure II.1.** Diagramme binaire d'équilibre de phases Fer-Fe<sub>3</sub>C [3].

Un acier hypoeutectoïde est un acier avec un pourcentage de carbone inférieur à 0,76%. Il est constitué de ferrite ( $\alpha$ ) et de perlite ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). La perlite se présente sous forme d'îlots aux joints de grains de la ferrite.

Considérons une composition à la gauche de l'eutectoïde, entre 0,022 et 0,76% en C; c'est ce qu'on appelle un acier hypoeutectoïde. Le refroidissement d'un alliage de la présente composition est représenté par le déplacement vers le bas de la ligne verticale sur la figure I.2. En refroidissement jusqu'au point d, environ, qui est dans la région biphasique, ces deux phases vont coexister comme dans la microstructure schématisée. La plupart des petites particules alpha se forment le long des joints de grains initiaux comme représenté au point e. Les compositions des deux phases correspondent, respectivement, à environ 0,02% et 0,76% en Carbone.

En continuant le refroidissement jusqu'au point f, on retrouvera toujours les grains alpha déjà formés en point c par contre pour les grains gamma en remarque la formation de la perlite qui elle-même est composée de fines lamelles ferrite de 0,022% de C et de de perlite de 076% de Carbone [4].



**Figure II.2.** Représentation schématique des microstructures pour un acier Fer-Carbone hypoeutectoïde au refroidissement à partir de la phase austénitique [4].

Dans la plupart des cas, ces taux de refroidissement sont démesurément lents et vraiment inutile; en fait, souvent les conditions hors équilibre sont désirables. Deux importances pratique sont à considérer : la survenance de modifications ou transformations de phase à des températures autres que celles prédites par les lignes de séparation de phases dans le diagramme de phase, et l'existence à la température ambiante de phases hors d'équilibre qui ne figurent pas sur le diagramme de phase [5].

#### II.4. Caractéristiques mécaniques de l'acier API 5L X60M

A la livraison des bobines le matériau procède des caractéristiques mécaniques du au laminage à chaud avant de subir le formage et l'opération de soudage, ces caractéristique sont présentées dans le tableau II.1. Ces propriétés doivent être conformes aux exigences de la dernière édition (45<sup>ème</sup>) de la norme API 5L PSL2 présentées dans le tableau II.2.

**Tableau II.1.** Propriétés mécaniques du métal avant soudage, d'après le certificat de réception du Fournisseur (ArcelorMittal).

Traction	$R_e = 514Mpa$
	$R_m = 577Mpa$
	$A\% = 34,6$
	$\frac{E}{R} = 0,89$
Résilience à 10°C	263 Joule
Dureté Vickers	192

**Tableau II.2.** Propriétés mécanique de l'acier grade X60M selon la norme API 5L PSL2. [10]

Nuance	Limite élastique E 0,5% Mpa		Résistance à la rupture Mpa		Allongement Mini%	E/R Maxi
	Mini	Maxi	Mini	Maxi		
X60M	415	565	520	760	27	0,90

## II.5. Caractéristiques chimique de l'acier API 5L X60M

La composition chimique de l'acier des bobines est donnée par le fournisseur sous forme de certificat de réception (tableau II.3). Cette composition chimique doit être conforme aux exigences de la dernière édition (45<sup>ème</sup>) de la norme API 5L PSL2 présentées dans le tableau II.4.

**Tableau II.3.** Composition chimique de l'acier grade X60M d'après le certificat de réception du Fournisseur (ArcelorMittal).

C%	Mn%	P%	S%	Si%	Al%
0,06	1,31	0,016	0,002	0,22	0,031
B%	Ca%	Cr%	Cu%	Mo%	N%
0,0002	0,002	0,02	0,01	0,01	0,003
Nb%	Ni%	Sn%	Ti%	V%	
0,031	0,01	0,000	0,014	0,001	

**Tableau II.4.** Composition chimique de l'acier grade X60M selon la norme API 5L PSL2. [10]

Elément Nuance	%C Maxi	%Mn Maxi	%Si Maxi	%P Maxi	%S Maxi	%CE <sub>pcm</sub> Maxi
X60M	0.12	1.600	0.450	0.025	0.015	0.20

Avec :

$$\text{Nb} + \text{V} + \text{Ti} \leq 0,150$$

$$\% \text{Cu} \leq 0,250 \text{ max}; \% \text{Ni} \leq 0,30 \text{ max}; \% \text{Cr} \leq 0,30 \text{ max}; \% \text{Mo} \leq 0,10 \text{ max};$$

$$\% \text{Ca} \leq 0,06; \% \text{B} \leq 0,0005; \% \text{Ti} \leq 0,060; \% \text{Nb} \leq 0,050; \% \text{N} \leq 0,012;$$

$$\% \text{V} \leq 0,08; \% \text{Ti} \leq 0,010$$

$$0,015 \leq \text{Al}_\alpha \leq 0,5; \frac{\text{Al}}{\text{N}} \geq 2.$$

## II.6. Influence des éléments d'alliage

Les éléments d'alliages confère des propriétés mécaniques (à froid ou à chaud), ou chimiques (résistance à la corrosion), particulières et bien précises.

Il n'est pas superflu de définir, rapidement, le rôle des principaux éléments d'addition et impuretés des aciers.

### - Carbone (C)

C'est l'élément le plus influent en soudage. En fait, nécessaire pour accroître la résistance à la rupture et la dureté des aciers, il joue un rôle actif mais très défavorable : il favorise, en effet, la trempe de l'acier de base dans les zones de transformation. [6]

### - Manganèse (Mn)

Élément très intéressant en soudage pour de multiples raisons. Non seulement il augmente harmonieusement les propriétés mécaniques des aciers laminés et du métal déposé avec une électrode par son rôle désoxydant, mais, à forte dose (13% Mn) il confère à l'acier une forte résistance à l'usure et aux chocs. [6]

### - Chrome (Cr)

Élément trempant très actif, il augmente la résistance à la rupture des aciers faiblement alliés. Utilisé isolément – avec le carbone et le manganèse, éléments toujours présents – sa teneur reste inférieure à 1% ; tout au moins dans les aciers dits soudables. Au-delà, les aciers deviennent très trempant, surtout quand le carbone augmente : des précautions sont à prendre lors de soudage. [6]

**- Nickel (Ni)**

Élément améliorant les propriétés générales des aciers, sans leur conférer un pouvoir trempant exagéré. [6]

Il est utilisé :

- Dans les aciers autotrepants conjointement avec le chrome et le carbone (aciers de soudabilité très difficile),
- Dans les aciers à teneur en Ni de 3 à 9% pour emploi à très basses températures,
- Dans les aciers inoxydables avec le chrome.

**- Molybdène (Mo)**

Élément noble, dans le rôle trempant est très actif. Toutefois, dans les aciers de construction, sa teneur, généralement inférieure à 0,5 – 1,5%, est surtout génératrice, soit d'accroissement de la résistance à chaud, soit d'une diminution de la fragilité des aciers. Dans les aciers inoxydables, une teneur exceptionnelle de 2 à 3% améliore la tenue à la corrosion. [6]

**- Cuivre (Cu)**

Élément de teneur généralement inférieure à 0,5%. Il améliore la résistance à la corrosion dans certains milieux aqueux (eau de mer). Allié au Cr, au Mo, il constitue les aciers dits (semi-inoxydables) classiques ou à haute limite élastique. [6]

**- Silicium et Aluminium**

Suivant sa teneur, le silicium (Si) peut être considéré :

- Soit comme agent désoxydation ; dans les aciers calmé ou semi-calmés, sa teneur varie de 0,04 à 0,25% ;
- Soit comme élément d'alliage dans les aciers à haute limite élastique, le maximum admissible, pour des raisons de soudabilité est de 0,50/0,55%.

L'aluminium (Al) permet un affinage du grain.

Le rôle de titane (Ti), du niobium ou colombium sera défini lors de l'étude du soudage des aciers inoxydables et réfractaires. [6]

**- Soufre (S)**

C'est un élément très défavorable, tant par son influence sur les caractéristiques mécaniques (notamment abaissement des résiliences), que sur la soudabilité métallurgique (soufflures, criques). Un acier soudable doit, classiquement, avoir une teneur en soufre

inférieure à 0,04%. Toute teneur supérieure, surtout sur pièces épaisses ou trempantes, implique des précautions lors de soudage. [6]

### - Phosphore (P)

Quoique de nature très différente de celle du soufre, son rôle en soudage, peut être considéré comme identique en tant qu'impureté. [6]

Dans un acier soudable classique :

$$S + P \leq 0,07\%$$

$$S \leq 0,04\%$$

$$P \leq 0,04\%$$

## II.7. Carbone équivalent

L'aptitude à la trempe d'un acier est reflétée par la position, dans l'échelle des temps, de sa loi critique martensitique au refroidissement. Pratiquement, dans le cas du soudage, la trempabilité dans la zone affectée thermiquement peut s'apprécier par la valeur du temps critique de refroidissement, lui-même fonction, pour une épaisseur donnée de l'énergie mise en jeu et de la température initiale.

Le carbone et les éléments d'addition sont groupés pour calculer un nombre qui rend compte du comportement de l'acier du point de vue de la trempe en soudage. Ce nombre appelé carbone équivalent, est obtenu en ajoutant à la teneur en carbone les teneurs en éléments d'alliage, chacune étant affectée d'un coefficient rendant compte du rôle que joue l'élément.

Une formule d'essence japonaise s'appliquerait à un large éventail de nuance d'acier à haute limite d'élasticité à plus bas carbone (cas des aciers pour tubes) [7].

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

En soudage, la teneur en carbone équivalent permet de déterminer comment les différents éléments d'alliage agissent sur l'acier. Plus la valeur du carbone équivalent est faible, plus la soudabilité est bonne [8].

## II.8. Soudabilité

La soudabilité est une propriété complexe qui dépend beaucoup de la composition chimique de la nuance et, en particulier, de la teneur en carbone qui détermine la dureté de la martensite, qui se forme dans certaines conditions de soudage, et sa sensibilité à la fragilisation

par l'hydrogène. Il est donc très intéressant de pouvoir changer les caractéristiques grâce au microalliage, car cela permet d'abaisser la teneur en carbone et dans certains cas aussi les éléments d'alliage qui figurent dans les formules de carbone équivalent caractérisant la trempabilité des aciers en conditions de soudage.

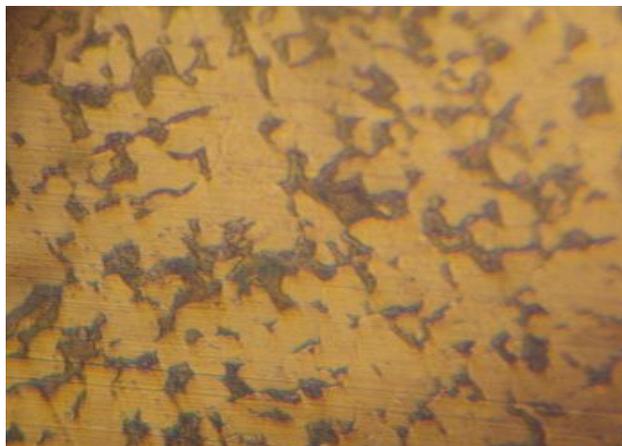
L'effet durcissant des éléments de microalliage est sans commune mesure avec leur faible effet sur la trempabilité des aciers (seul le vanadium figure dans certaines formules de carbone équivalent) : les aciers microalliés ont ainsi pris une grande place dans les aciers soudables. Cet abaissement de la teneur en carbone est très favorable pour la sensibilité à la fissuration à froid, mais aussi pour l'amélioration de la ténacité du métal de base ainsi que des zones affectées.

Néanmoins, l'effet durcissant et fragilisant des précipités peut se faire sentir dans les zones qui subissent des cycles thermiques à haute température telles que les zones affectées par la chaleur et le métal fondu [9].

Dans le métal fondu, la teneur en élément dépend de la dilution avec le métal d'apport, ce qui dépend de l'énergie de soudage ; il se produit ensuite une reprecipitation si la vitesse de refroidissement le permet. La variation de ténacité est encore plus complexe quand il s'agit de soudures multi passes avec superposition de cycles thermiques. Dans ce cas, les températures atteintes à une certaine distance provoquent la précipitation. Des modèles permettent la prévision des durcissements et de là les variations de ténacité [9].

## II.9. Microstructure

Les surfaces des échantillons d'acier préalablement préparées par polissage et attaque chimique ont fait l'objet d'observation au microscope optique. Les aciers ont révélé une microstructure type ferrito-perlitique à prédominance ferritique avec des amas de perlite, la taille des grains varie entre 5 et 10 microns. (Figure II.3)



**Figure II.3.** Microstructure des échantillons de l'acier API 5L X60M étudié.

# **Chapitre III**

## **Fabrication et soudage des tubes**

## Introduction

Ce chapitre ne fait que rappeler les méthodes de soudage des tubes (pipeline), procédé de soudage utilisé avec ses paramètres au sein de l'entreprise national ALTUMET, et l'importance du contrôle des soudures durant la chaîne de production.

### III.1. Fabrication des tubes

La multiplicité des diamètres et des épaisseurs de tubes et le développement avec le temps de leurs techniques de fabrication, constituent les raisons de la diversité du réseau de transport gazier. On retrouve :

- Les tubes non soudés,
- Les tubes soudés en spirale,
- Les tubes soudés longitudinalement.

On se limitera dans le cadre de cette étude à la présentation du mode de fabrication des tubes dits de moyens diamètres et utilisés dans le transport. Cette appellation est réservée aux tubes de diamètre extérieur compris entre 228.6mm et 406.4mm (9"à16"). Ils sont obtenus par formage suivi de l'opération de soudage en long (longitudinal) ou en spirale de tôles laminée à chaud. [12]

#### III.1.1. Définition

Un pipeline est une canalisation enterrée ou aérienne transportant des biens, qu'ils soient sous forme liquide ou gazeuse. Les pipelines sont le plus souvent construits à partir de tubes d'acier soudés bout à bout, revêtus extérieurement voire intérieurement et généralement enfouis dans le sol. Ces pipelines s'avèrent coûteux et parfois difficiles à mettre en œuvre selon les caractéristiques des terrains traversés, en zone de risque sismique ou politiquement instable. Au contraire de leur investissement initial ; leur utilisation est relativement peu coûteuse par rapport à d'autres formes de transport concurrentes, au moins sur de petites et moyennes distances.

C'est vers les années 20 qu'on a commencé à faire sortir les premiers tubes soudés en acier à partir de feuillard chauffé. Dans cette technique, le soudage se fait par rapprochement des bords en fusion. Par la suite, l'invention de la soudure électrique permet, par effet de joule, de fondre le métal a conduit au développement de l'industrie des petites soudures par résistances puis par induction.

Enfin, depuis les années 40, le développement de la sidérurgie s'étant concentré sur les produits plats, et vu l'importance prise par le secteur de construction mécanique l'industrie des tubes soudés a dû, répondre à la demande sans cesse croissante, par l'invention de nouveaux procédés tel le soudage automatique sous flux avec apport de métal. Ce flux étant constitué, soit d'un gaz rare, soit de poudre composée d'éléments favorables à l'homogénéité du métal déposé par un fil métallique ayant des caractéristiques mécaniques et une composition chimique voisine de celle des tubes à souder.

Ce n'est qu'à partir de ces nouveaux procédés de soudage que la fabrication des tubes soudés connaît son véritable essor.

Il existe trois grandes familles des tubes :

- Les petits tubes soudés dont le diamètre ne dépasse pas  $219\text{mm} \approx 8''$ .
- Les moyens tubes soudés dont le diamètre est compris entre  $228.6\text{mm}$  et  $406.4\text{mm}$  ( $9''$  à  $16''$ ).

Les gros tubes soudés dont le diamètre est supérieur à  $16''$  ( $406.4\text{mm}$ ). [11]

### III.1.2. Fabrication des tubes sans soudures

Le laminage est un procédé de déformation plastique continue, obtenue par les cylindres du laminoir. Cette déformation est caractérisée par un amincissement et un allongement (la pièce laminée ne s'élargit presque pas). Le laminage en passes successives peut produire une forte réduction d'épaisseur. Le coefficient de corroyage (toujours supérieur à l'unité) est le rapport entre la section du produit avant et après laminage. Le laminage modifie la structure cristalline primaire du lingot, affine le grain, homogénéise la composition, surtout dans le sens longitudinal, en raison de l'orientation donnée aux structures cristallines.

Dans le laminage à chaud, la température du matériau est choisie de façon à obtenir les caractéristiques plastiques optimales. Le laminage à froid se fait à la température ambiante et nécessite une abondante lubrification. L'importance de la variation de section à chaque passe est limitée (V. écrouissage).

Les tubes laminés sans soudure sont obtenus par laminage à chaud ; utilisés pour les faibles diamètres jusqu'à un maximum de  $16''$  à  $24''$  ( $406.4\text{mm}$  à  $609.6\text{mm}$ ), selon les pays. [13]

### III.1.3. Fabrications des tubes soudés

#### III.1.3.1. Soudage longitudinal

Les tubes soudés longitudinalement sont obtenus par cintrage d'une tôle et souder le long de la génératrice ; deux procédés de soudure sont employés, soit la soudure à l'arc immergé, comportant un apport de métal, soit la soudure par rapprochement et fusions obtenue par action de courants de forte intensité ; les diamètres maximaux obtenus dans cette catégorie de fabrication sont actuellement de 56"(1422.4mm). Selon cette dernière méthode, l'acier feuillard est transformé progressivement en tube ou en profilé avec fente par un laminoir continu. Une installation haute fréquence permet de chauffer les bords du feuillard de manière inductive - c'est-à-dire sans contact - qui atteignent très rapidement la température de soudage et sont ensuite pressés ensemble (soudage par pression) par des cylindres de compression. L'opération de soudage s'effectue sans le moindre matériel supplémentaire. La soudure présente donc la même composition chimique que le matériau de base. La bavure de soudage qui se crée au cours de la compression est éliminée - sur l'extérieur du tuyau toujours et à l'intérieur selon l'usage réservé au tuyau. Une tronçonneuse rotative découpe le tube continu en morceaux de la longueur souhaitée. [13]

#### Méthode de soudage longitudinal

À partir de tôles d'acier formées à froid en U puis en O, le soudage est effectué en faisant fondre les deux bords de la tôle, évitant ainsi l'apport de métal extérieur. La soudure ainsi réalisée par fusion est intégralement contrôlée par ultrasons.

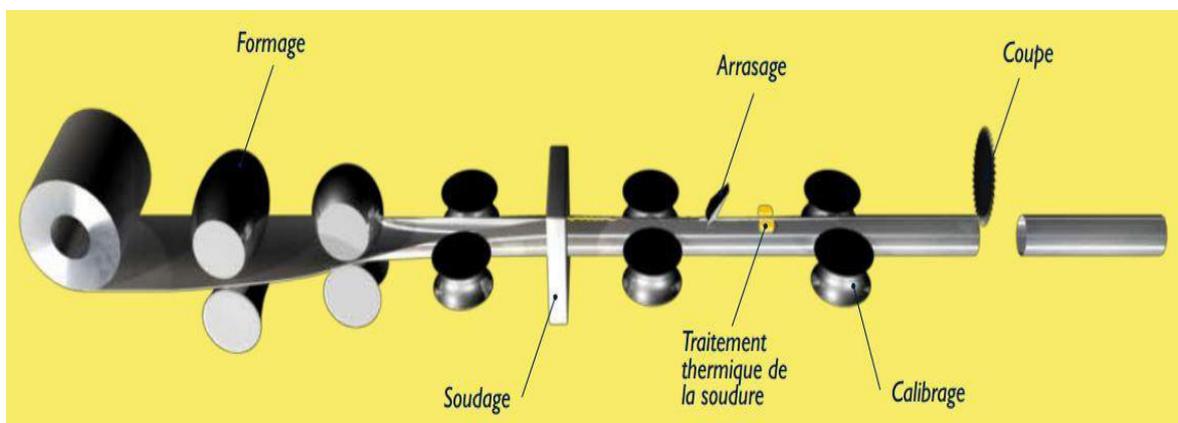


Figure III.1. Soudure longitudinale

### III.1.3.2. Soudage spiral

Les tubes soudés en spirale sont obtenus par enroulement et soudure hélicoïdale d'un ruban de tôle approvisionné sous forme de bobines; ce procédé exige un contrôle très sévère de la soudure en usine, en raison des nombreuses reprises qu'il entraîne, et impose un appareillage très étudié et une très bonne qualité des tôles, pour garantir une bonne fiabilité de la fabrication. Les précautions nécessaires étant prises, ce procédé est appelé à se développer en raison des économies de transport qu'il autorise (tôles en bobine) et de la simplicité relative des usines de fabrication. Il permet d'ailleurs d'atteindre de très gros diamètres, très largement supérieurs aux diamètres obtenus industriellement par soudure longitudinale puisque l'on a fabriqué jusqu'à des diamètres de 100"(2540mm) avec une épaisseur de 1"(25.4mm). [13]

#### Méthode de soudage spiral

À partir de tôles d'acier formées à froid hélicoïdalement, le soudage s'opère intérieurement et extérieurement à l'arc électrique immergé sous flux avec apport de métal. Le cordon de soudure fait l'objet d'un contrôle intégral par ultrasons.

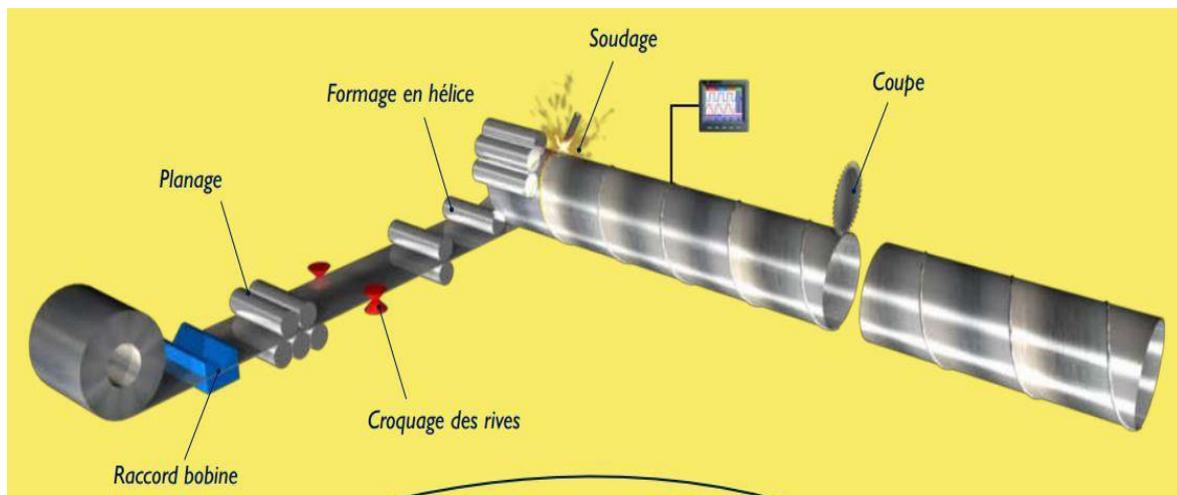


Figure III.2. Soudure spiral

### III.2. Soudage des tubes

Le soudage est l'opération qui consiste à assembler deux ou plusieurs pièces en assurant la continuité de la matière sous l'action d'une source de chaleur et d'un apport. La soudure est le résultat de cette opération. Le profil des pièces peut être modifié par la fusion locale cette zone est dite zone fondue. Celle-ci est suivie d'une solidification et d'une évolution microstructurale au voisinage du cordon de soudage dans la zone dite zone affectée thermiquement [15].

### III.2.1. Procédés de soudage recommandés pour les aciers HLE

#### III.2.1.1. Soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder (figure III.3). L'énergie calorifique de l'arc fait fondre simultanément et très localement la pièce à assembler, l'âme métallique de l'électrode et l'enrobage pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur qui se détache plus ou moins facilement. L'enrobage de l'électrode fond avec un léger retard par rapport à l'âme métallique. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler [16].

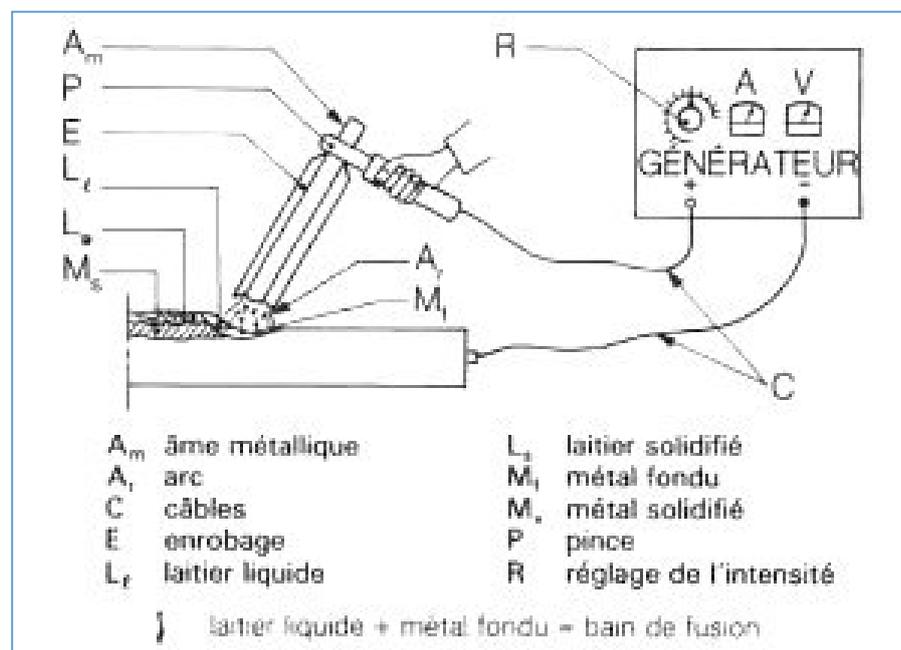


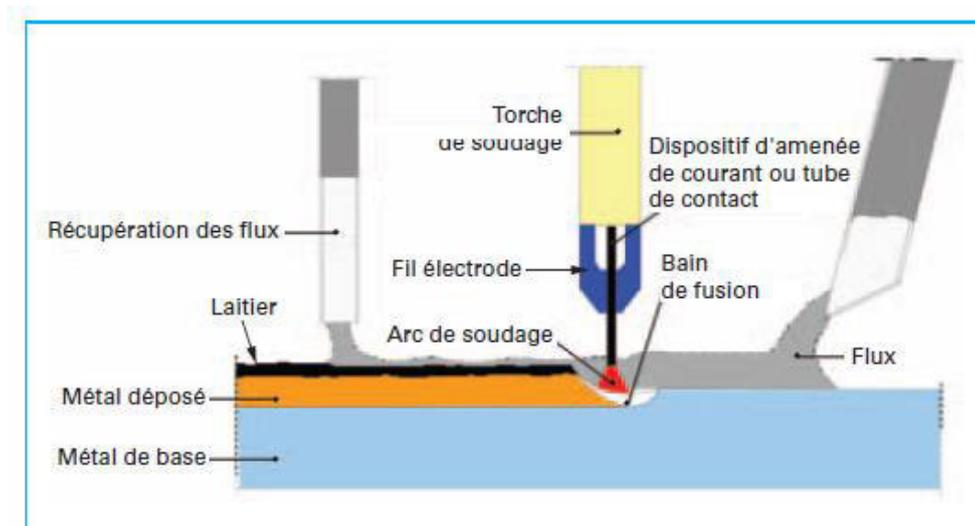
Figure III.3. Principe de soudage manuel [14].

### III.2.1.2. Soudage automatique sous flux solide en poudre

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint (figure III.4). L'électrode est constituée d'un fil nu, disponible en bobine, dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le flux, qui se présente sous forme de fines particules, est déposé en continu à la surface du joint, juste en avant de la torche de soudage. L'arc électrique est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un laitier qui se solidifie immédiatement après, assurant ainsi la protection de la soudure vis-à-vis de l'air ambiant. Le flux non fondu est récupéré dans le but d'être réutilisé.

Le soudage à l'arc sous flux en poudre nécessite généralement des intensités de courant électrique comprises entre 400 et 1000A.

Ce procédé est particulièrement intéressant pour réaliser des joints soudés longs (supérieurs à 1 m de longueur). Les vitesses de soudage élevées et l'opération en continu autorisent une productivité élevée. Toutefois, la première exigence est d'avoir un bon accostage des pièces à assembler.



**Figure III.4.** Principe de soudage automatique.

### III.2.1.3. Soudage automatique sous flux avec électrode en tandem

Ce procédé est le même que le précédent à la seule différence sauf que celui-ci nécessite l'utilisation de deux électrode au lieu d'une seule (figure III.5); la première électrode est relié au générateur de courant continue, il constitue la partie qu'on retrouve dans le procédé de base, la deuxième est relié à un générateur à courant alternatif. Cette méthode a pour but d'accroître la quantité de matière déposée [14].

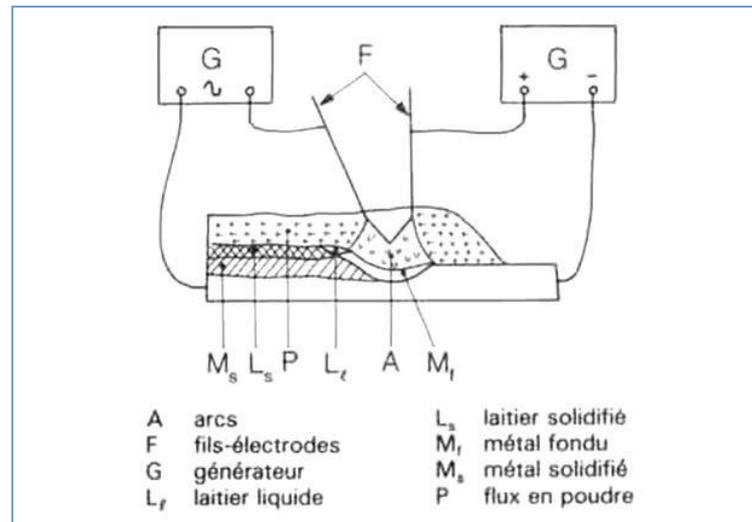


Figure III.5. Principe de soudage en tandem.

### III.2.1.4. Soudage sous flux gazeux

Pour le soudage sous flux gazeux (procédés MIG, MAG et TIG), la protection vis-à-vis de l'atmosphère ambiante est obtenue par un gaz insufflée dans une buse concentrique au fil d'électrode.

- Le procédé MIG (abréviation de « Metal Inert Gas ») utilise un gaz inerte, c'est-à-dire une atmosphère protectrice chimiquement inerte, généralement de l'argon ou de l'hélium.
- Le procédé MAG (pour « Metal Active Gas ») utilise un gaz actif, du dioxyde de carbone ou un mélange argon/dioxyde de carbone.

Pour certains métaux contenant beaucoup de nickel, il existe un procédé sous flux de gaz inerte mais pour lequel l'électrode non consommable en tungstène et ne constitue donc pas le métal d'apport ; ce dernier se présente sous forme de fil indépendant de l'électrode. Il s'agit du procédé TIG (« Tungsten Inert Gas ») [17].

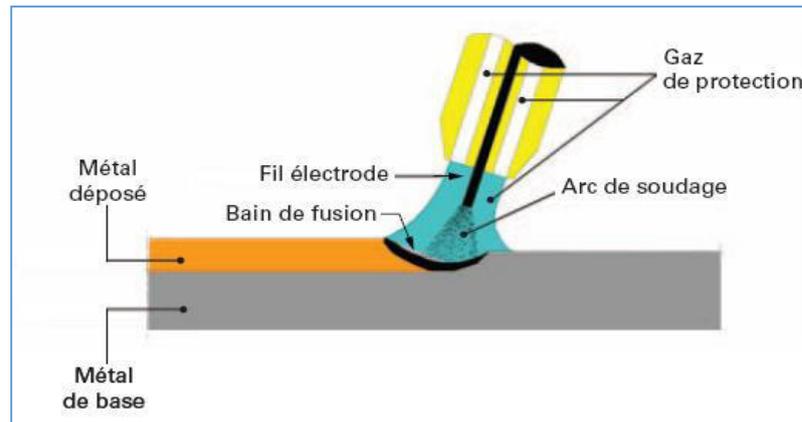


Figure III.6. Principe de soudage sous flux gazeux [17].

## III.2.2. Conditions de soudage automatique

### III.2.2.1. Procédé utilisé

Le Soudage se fait par un procédé automatique SAW H (hélicoïdal) sur une machine N/LAT de marque ATIS, comme illustré sur la figure III.7, mise en marche en 2007 au niveau de l'entreprise.

La machine est constituée d'un compartiment réservé à recevoir les bobines ou se fait l'ouverture et l'étalement de ces dernières qui juste après leurs ouverture sont chanfreinées par des fraiseuses afin de réaliser un chanfrein de forme X (figure III.8) pour une meilleure pénétration de la soudure mais aussi crevant à dimensionner la largeur de la tôle pour un formage de celle-ci hélicoïdalement.

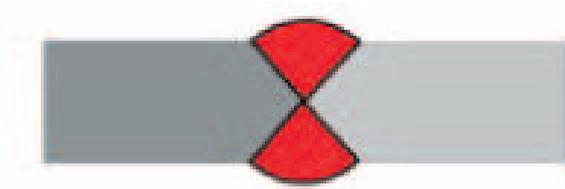


Figure III.7. Machine ATIS pour le soudage SAW H.

Le type de soudage opéré est un soudage bout à bout pour lequel on distingue :

- La soudure bout à bout à pleine pénétration pour laquelle la pénétration et la fusion de la soudure et du métal de base sont complètes sur l'épaisseur des pièces assemblées ;
- La soudure bout à bout à pénétration partielle pour laquelle la pénétration de la soudure ne s'étend pas à l'épaisseur totale des pièces assemblées.

Une soudure bout à bout est réalisée sur l'épaisseur des plats aboutés dans un assemblage bout à bout. En règle générale, les bords des plats doivent être préparés (chanfreinage) avant soudage. Dans certains cas, lorsque l'épaisseur des plats est inférieure à 5 mm, on peut se dispenser de cette préparation.



**Figure III.8.** Soudage bout à bout.

### III.2.2.2. Spécification des paramètres de soudage

Le soudage est un moyen d'assemblage de deux ou plusieurs pièces qui doivent résister aux conditions de leurs fonctionnements, pour cela le soudage opéré sur les tubes doit se faire selon des paramètres bien précis tel que la forme du cordon et le sens du soudage ou même l'angle de formage, la figure III.9, prise lors du stage effectué au sein de l'entreprise ALTUMET, montre certains de ces détails. Les autres paramètres sont résumés ci-dessous avec leurs valeurs utilisées dans notre cas.

Paramètres de Soudage sur N/LAT

- Procédé : SAW H à une tête
- Forme du cordon : hélicoïdal
- Gamme du tube parent :  $\text{Æ } 406 \times 10,30 \text{ mm}$
- Angle de formage :  $47^{\circ} 54'$
- Sens du soudage : descendante rotative
- Vitesse de soudage : 1,30 m/min.



**Figure III.9.** Réalisation d'une soudure spirale sur tube API.

### **III.2.3. Défauts des constructions soudées**

Le soudage peut, dans certains cas, affecter la qualité des ensembles soudés et leur aptitude à répondre aux conditions de service. Il convient donc de s'assurer avant mise en service d'une construction soudée que les défauts inhérents au soudage ne dépassent pas les limites de tolérances admissibles. Ces vérifications devront porter sur [18] :

- Les déformations,
- Les caractéristiques mécaniques,
- La résistance à la corrosion.

#### **III.2.3.1. Déformation**

Par suite des déformations provenant des dilatations et retraites en cours de soudage, la construction soudée n'est pas rigoureusement conforme aux dessins. L'origine de ces déformations, les moyens d'en éviter l'apparition ou de les corriger si elles se produisent, font l'objet d'ouvrages spécialisés. [18]

#### **III.2.3.2. Caractéristiques mécaniques**

La plupart des codes et spécifications pour constructions soudées définissent des coefficients de joints pour les divers cas d'assemblages. Ces coefficients tiennent compte du degré de sécurité exigée et des facilités de contrôle de la qualité des joints considérés.

La vérification de la résistance du joint est nécessairement un contrôle destructif. Dans le

cas de fabrication de série, on l'effectue par prélèvement d'un ou plusieurs ensembles, au stade d'achèvement convenable, sur lesquels on découpe des éprouvettes, ou sur des éprouvettes soudées dans les mêmes conditions que le joint à vérifier. Ces éprouvettes sont soumises aux essais mécaniques habituels (traction, pliage, dureté, résilience) et les résultats sont comparés aux calculs de résistance effectués au stade de la conception.

Généralement, le constructeur s'ingénie à placer les joints soudés dans les zones les moins sollicitées ou les moins déformables. [18]

### **III.2.3.3. Résistance à la corrosion**

Les transformations de structure provoquées par la chaleur de l'arc dans la zone fondue et dans les zones adjacentes, peuvent amoindrir la résistance à la corrosion d'un joint soudé, ce que l'on vérifie au moyen des essais de corrosion classiques sur des éprouvettes soudées séparément, mais dans des conditions identiques à celle du joint à contrôler.

Les tolérances admissibles et les moyens remédiés aux défauts constatés varient selon la nature du métal de base. [18]

### **III.2.4. Importance du contrôle des soudures**

Pour que la soudure puisse résister aux sollicitations pour lesquelles elle a été calculée, dans les conditions de service prévues, elle doit, sinon être exempte de défauts, du moins exempte de défauts importants ou susceptibles de s'aggraver, et qui rendraient la structure dont elle fait partie impropre à l'usage auquel elle est destinée.

Le contrôle des soudures a pour but la prévention, la détection et l'appréciation du degré de gravité des défauts de soudures. C'est donc une opération toujours utile et souvent indispensable, d'autant plus que les conditions d'exécution des soudures, les méthodes de contrôle, etc...sont souvent fixées par des textes légaux ou réglementaires, les règles des organismes de surveillance ou les spécifications et cahiers des charges stipulés lors des commandes. La responsabilité financière et parfois pénale du fabricant peut donc être engagée.

Le contrôle des soudures s'exerce en cours de fabrication, après l'exécution et parfois en service à l'occasion d'examen périodique. Il comprend :

- La prévention des défauts par le contrôle des métaux, la surveillance de la préparation des bords, l'adoption de techniques correctes de soudage ;
- La détection et la localisation des défauts, ainsi que la détermination de leur importance ;

- L'interprétation des résultats précédents afin de prononcer la recette ou le rebut des pièces soudées, le contrôleur peut aussi décider la réparation des défauts lorsque la chose est possible. Il fixe alors la façon de procéder à cette retouche ;
- La rédaction d'un rapport auquel il sera possible de se reporter lors d'examens ultérieurs ou en cas d'incidents survenus en service.

Le contrôle est plus ou moins sévère selon la destination des structures soudées qui y sont soumises, et il existe un certain nombre de classes de constructions soudées en fonction des exigences d'utilisation et de contrôles. Ces classes sont définies par les différents règlements des organismes de contrôle. **[18]**

**Partie II**  
**Etude Expérimentale**

# **Chapitre IV**

## **Méthodes expérimentales**

## Introduction

Ce chapitre concerne la présentation des différents dispositifs mis en œuvre pour la réalisation des essais, ce chapitre tient compte aussi de la méthodologie des essais de contrôle destructif et non destructif effectués sur la coulée et sur la soudure.

Il est nécessaire et de la plus haute importance de vérifier par des essais de contrôle l'état des soudures sur les tubes. Ces essais sont réalisés selon des normes bien définies :

- Les essais de fabrication selon les normes API 5L PSL2 45<sup>ème</sup> édition.
- Les essais de qualification selon les normes ASME section IX.

Si l'on constate des anomalies, on doit comparer leur nombre et leur taille aux tolérances des normes et suivant les cas effectuer une correction des soudures. Naturellement on doit aussi vérifier les réparations qui peuvent encore contenir des défauts. On s'est attaché aussi à expliquer les choix concernant la configuration des éprouvettes.

### IV.1. Plan des essais

Tous les essais effectués durant la chaîne de fabrication des tubes en acier API 5L X60 M à l'entreprise ALTUMET sont schématisés dans le diagramme ci-dessous (figure IV.1) :

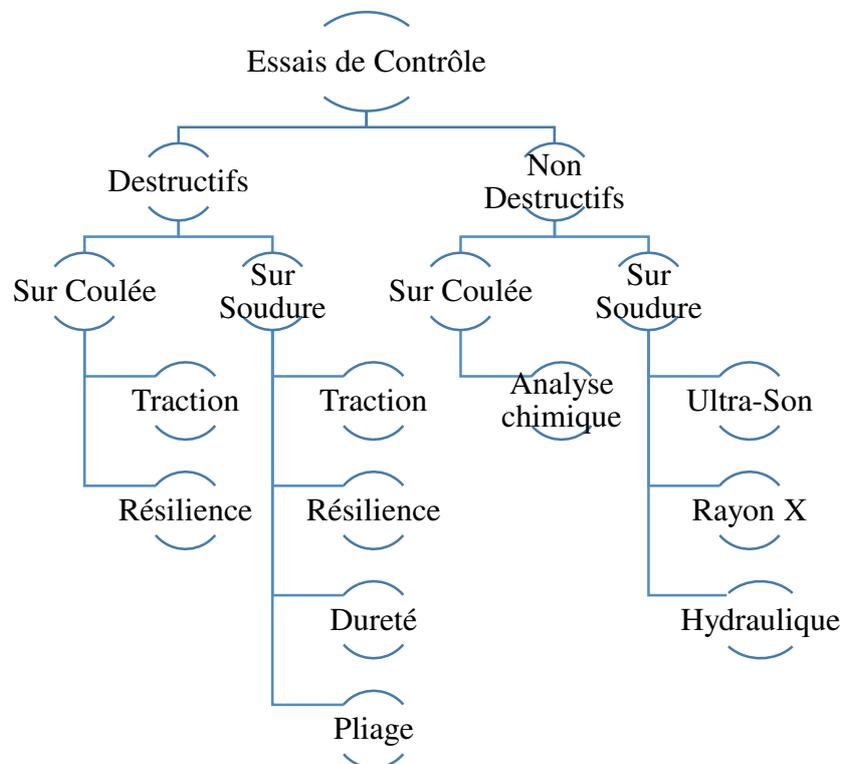


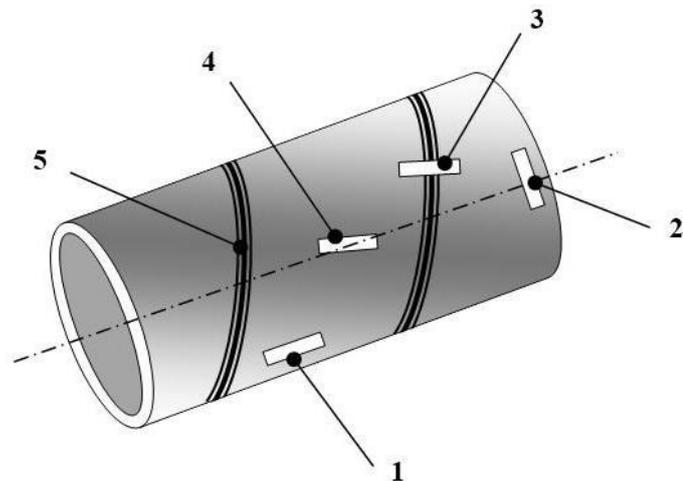
Figure IV.1. Diagramme des essais effectués durant la chaîne de fabrication.

## IV.2. Prélèvement et dimensionnement des échantillons

Afin de mener notre étude à bon port il est nécessaire de préciser certains détails relatifs aux prélèvements des échantillons et aux abréviations destinés aux contrôles destructifs. 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.

- 1- Eprouvette longitudinal sur métal de base
- 2- Eprouvette transversal sur métal de base
- 3- Eprouvette inclinée ( $\perp$  au cordon de soudure) sur soudure
- 4- Eprouvette inclinée ( $\perp$  au cordon de soudure) sur métal de base
- 5- Cordon de soudure



**Figure IV.2.** Sens de découpage des échantillons pour le contrôle destructif.

## IV.3. Contrôle destructifs

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

- Essai de traction ;
- Essai de dureté ;
- Essai de résilience.
- Essai de pliage

### IV.3.1. Essais de traction

Un essai de traction est une expérience de physique qui permet de mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau.

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

Cet essai ou expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction (figure IV.3) 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.

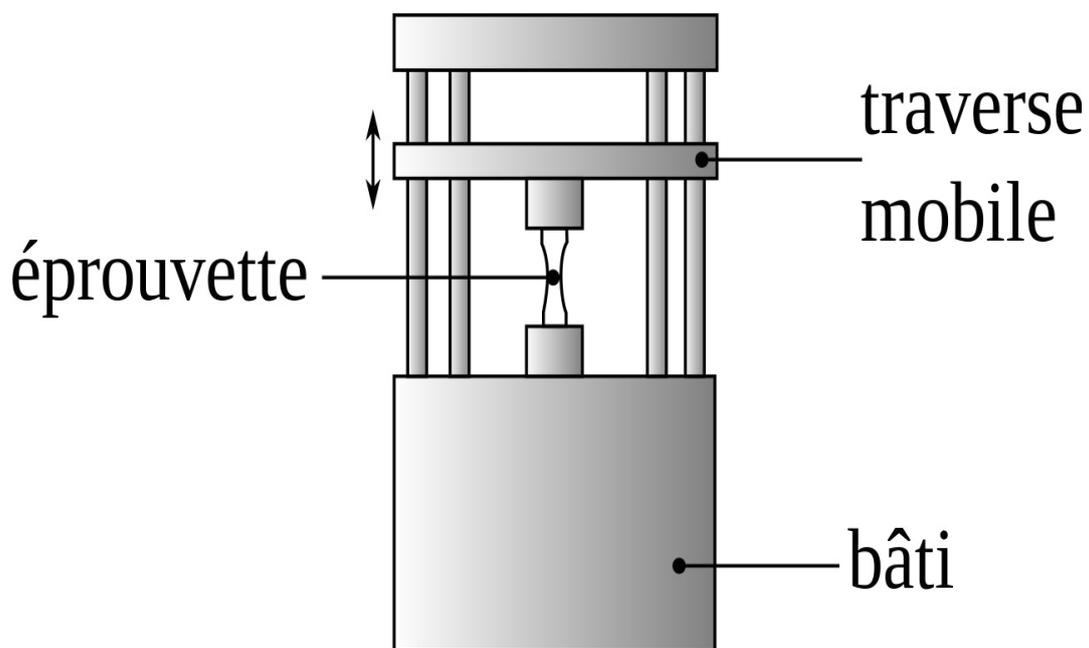


Figure IV.3. Machine de traction.

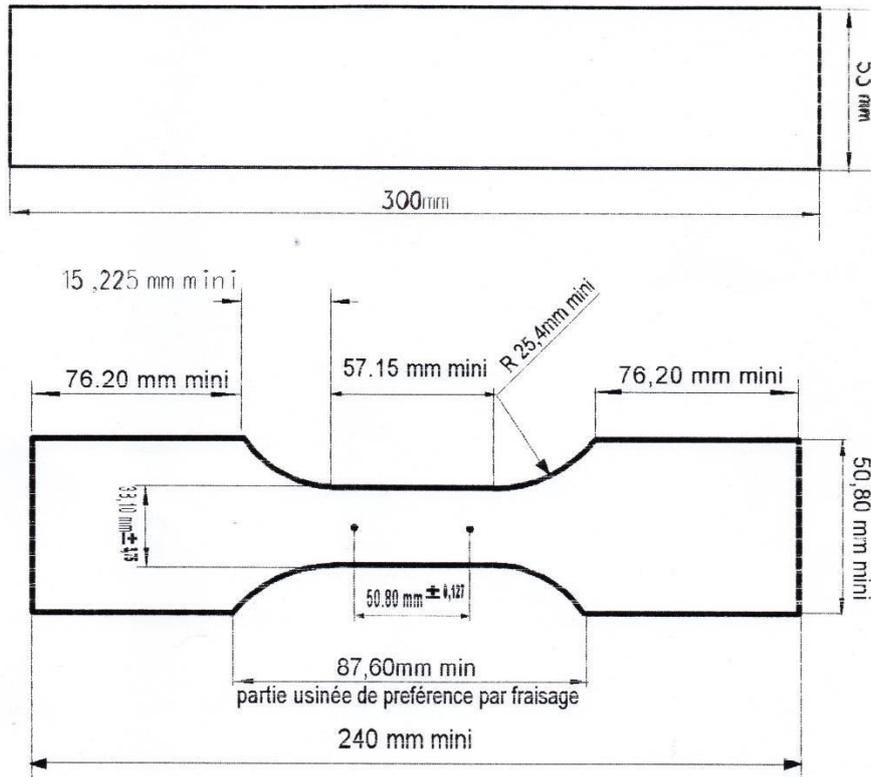


Figure IV.4. Epreuve transversale ASTM A370.

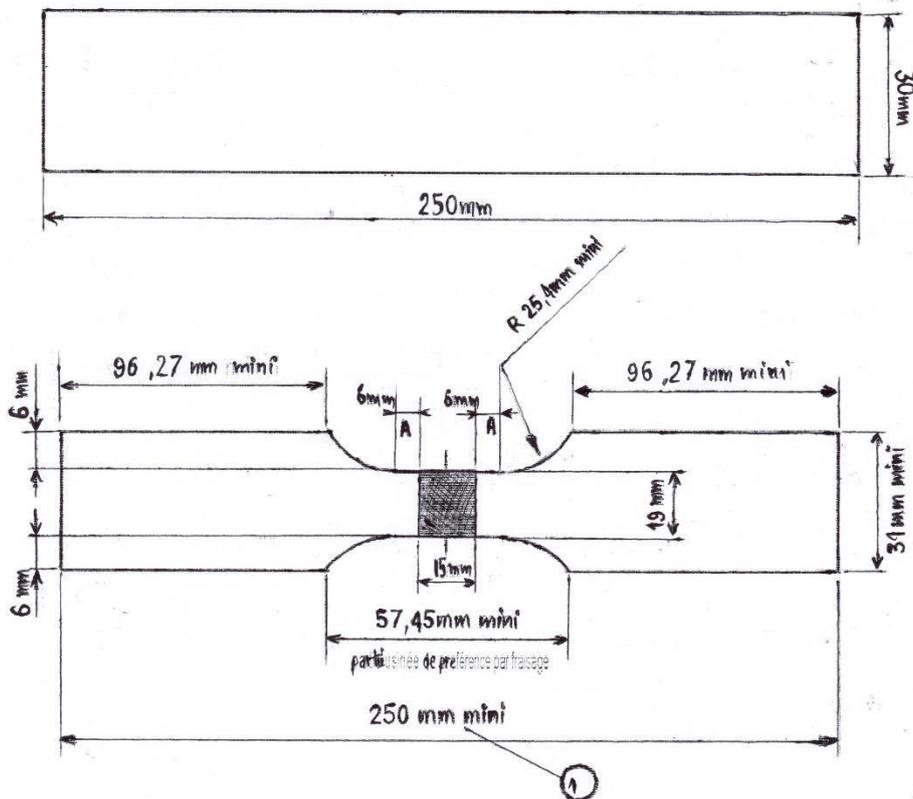


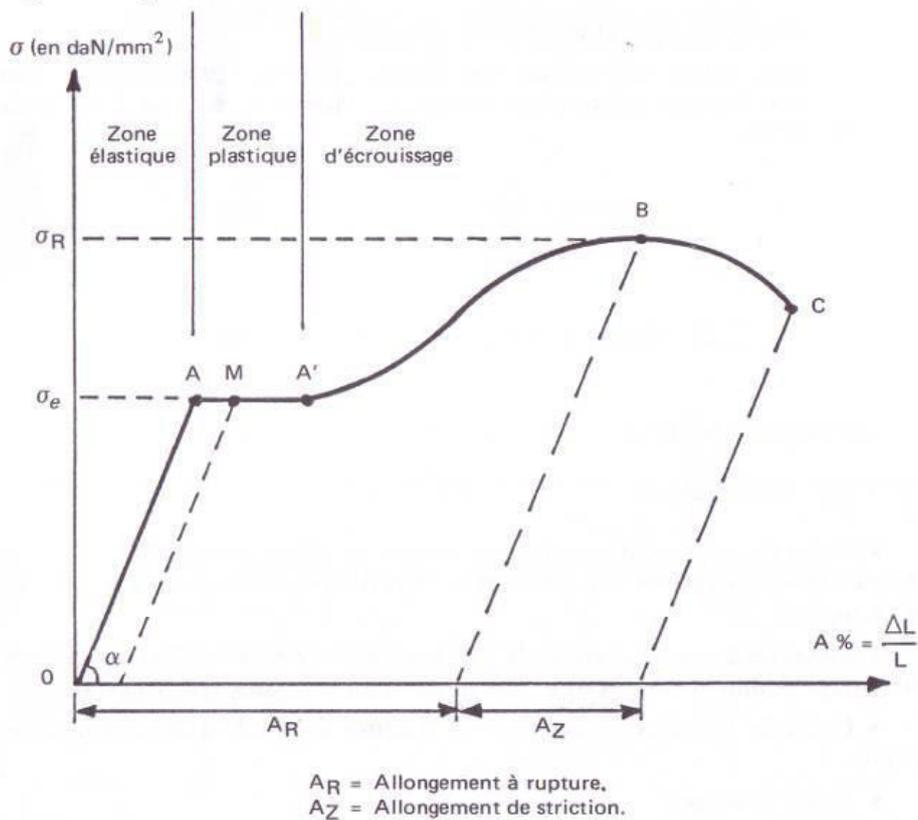
Figure IV.5. Epreuve ASME section IX homologué au procédé de soudage SAW et SMAW.

① : la longueur peut varier en fonction de la machine d'essai.

$A = 6 \text{ mm}$

Longueur de cordon de soudure = 15 mm

On obtient un diagramme effort-déformation :



**Figure IV.6.** Diagramme effort-déformation.

- OA: zone rectiligne pour laquelle il y a proportionnalité entre la déformation et l'effort appliqué. C'est une zone élastique réversible.
- AA': palier horizontal, traduisant un allongement sous charge constante. Il y a écoulement du matériau, c'est la zone plastique.
- A'B: la charge croît de nouveau avec les allongements jusqu'au point B. si l'on décharge l'éprouvette dans la zone plastique A'B on constate un allongement rémanent; si on la recharge, on constate un comportement élastique jusqu'à la charge précédente: on a augmenté la limite d'élasticité, le métal a été écroué.
- BC: l'allongement continue, bien que la charge soit décroissante, jusqu'au point C où il y a rupture. Dans cette phase il y a striction: la déformation plastique est localisée dans une faible portion de l'éprouvette et n'est donc plus homogène.

On mesure ainsi :

- $R_e$  limite d'élasticité, point A. conventionnellement cette limite élastique est définie comme la contrainte correspondant à un allongement rémanent de 0.5%.
- $R_m$  résistance ultime à la traction, point B
- E module d'élasticité longitudinale de l'acier (pente de OA)
- G module d'élasticité transversale
- $A_r\%$  allongement à la rupture, correspondant à la déformation mesurée entre l'état initial et l'état final de rupture.

Le palier de ductilité AA' représente une réserve de sécurité, grâce au phénomène d'adaptation plastique, si une pièce est sollicitée au-delà de la limite élastique, elle dispose de ce palier pour se décharger dans les zones avoisinantes. Plus la teneur en carbone augmente, et plus le palier de ductilité se raccourcit et plus l'allongement à la rupture diminue, diminuant ainsi la sécurité, car les tubes risquent de périr par rupture brutale, sans aucun signe prémonitoire (grandes déformations). Voilà pourquoi seuls les aciers doux (à faible taux de carbone) sont autorisés en fabrication des tubes.

### IV.3.2. Essais 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.

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 une couche d'oxyde.

Cela nécessite en général au moins un décapage au papier de verre.

#### 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 :

$d$  = diagonale de l'empreinte

$$HV = \frac{F}{S} \rightarrow \text{charge de l'essai (daN)} \quad HV = \frac{2 F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d\alpha^2}$$

$S$  → aire de l'empreinte (mm<sup>2</sup>)

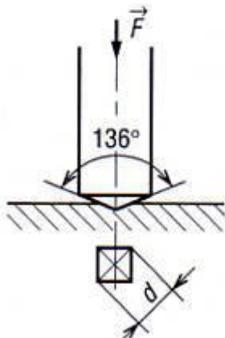
$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

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

On remarque que HV est homogène à une contrainte  $\sigma$  (force divisée par une surface), HV est donc corrélé à la contrainte nécessaire pour déformer le matériau, c'est-à-dire à  $R_e$ .

- Avantages : l'essai est reproductible, on obtient des résultats proches pour un même matériau ;
- inconvénients : il est long à mettre en œuvre : polissage miroir d'une face (les rayures résiduelles ne doivent pas gêner la mesure des dimensions), temps de lecture (mesure des dimensions à la loupe graduée et vis micrométrique).

Il est donc principalement utilisé en laboratoire.



La charge normale d'essai  $\vec{F} = 29,4$  daN est appliquée pendant 10 à 15 secondes.

On peut également employer l'une des charges suivantes :

4,9 - 9,8 - 19,6 - 49 - 78,4 - 98 daN.

Avec des charges inférieures à 4,9 daN on se trouve dans le domaine des microduretés.

Les charges supérieures à 98 daN sont parfois utilisées avec une pyramide en acier trempé sur des matériaux de faible dureté.

**Figure IV.7.** Essai de dureté Vickers

### IV.3.3. Essais de résilience

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

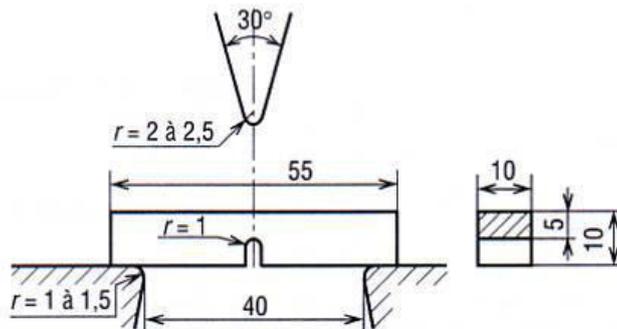
Dans le cas des matériaux "cassants" (aciers par exemple), la résilience est caractérisée par l'énergie nécessaire pour déformer et rompre le matériau lors d'un choc par un objet percuteur. Dans le cas des matériaux de type élastomères, l'éprouvette n'est pas rompue, la résilience est caractérisée par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

## Essai Charpy

Il consiste à déterminer la résistance aux chocs des métaux, ou résilience KCU ou 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'aciers normalisés.

Une éprouvette entaillée est placée sur deux appuis. Le pendule est lâché d'une hauteur déterminée de façon à frapper l'éprouvette avec une vitesse entre 1 et 4 m/s. La hauteur de remontée du pendule après le choc permet de déterminer l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette (figure IV.8).

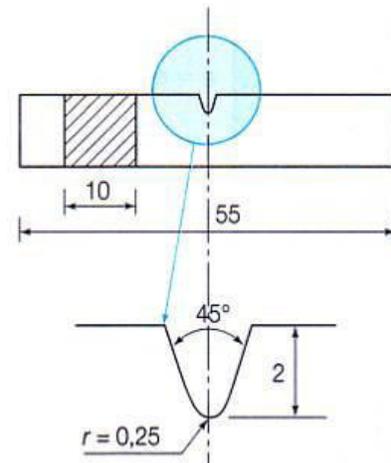
### • KCU



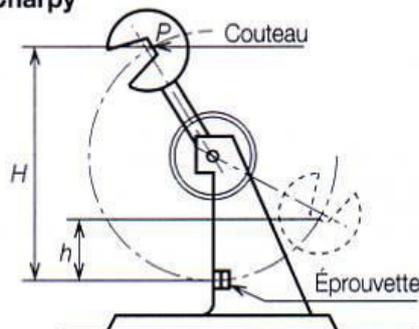
- Éprouvette carrée 10 × 10, longueur 55 cm.
- Écartement des appuis 40 mm.
- Profondeur de l'entaille 5 mm.
- Section rompue 0,5 cm<sup>2</sup>.

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

### • KCV



### Mouton Charpy



- Énergie initiale  
 $W_i = Mg \times H = 294 \text{ joules}$   
 (normalisée)
- Énergie résiduelle  
 $W_r = Mg \times h$
- Énergie absorbée  
 $W = W_i - W_r$   
 $= (Mg \times H) - (Mg \times h)$   
 $= Mg (H - h)$

Figure IV.8. Caractéristiques de l'éprouvette et de sa position sur la machine d'essai.

### IV.3.4. Essai de pliage

Cet essai permet de déterminer l'aptitude à la déformation par pliage du joint soudé. Il est décrit 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 pliage 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 côté.

Les avantages de l'essai de pliage 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 n'exigent 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.

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 règle générale, l'essai de pliage requiert un pliage endroit et un autre envers.

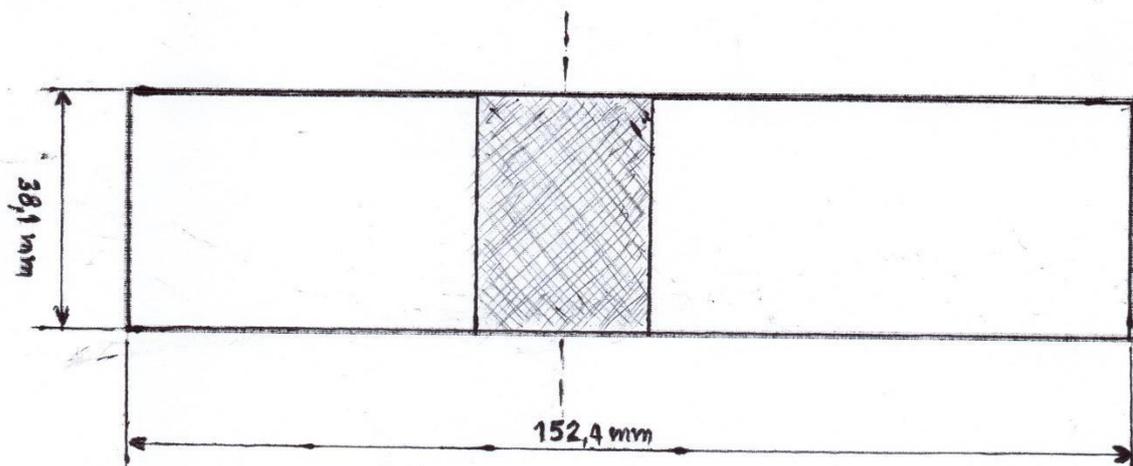


Figure IV.9. Eprouvettes ASME section IX pour pliage.

**Tableau IV.1.** Dimensions des éprouvettes de pliage selon les normes API 5L.

Diamètre de tube x Epaisseur	Mandrin	Ecartement
406 x 12,7	147	175
406 x 10,3	110	134
406,4 x 6,35	69	85
406,4 x 8,74	103	124

**Tableau IV.2.** Dimensions des éprouvettes de pliage selon les normes ASME section IX.

Epaisseur (mm)	12,7	11	10,3	10	9	8,74	8,5	8	7	6,35
$\Phi$ Mandrin A	50,8	44	41	40	36	34,96	34	32	28	25,4
Ecartement C	79,4	69	65,0	63,2	57,2	55,64	54,2	0	45,2	41,3

#### IV.4. Essais non destructifs

Les essais non destructifs est un ensemble de méthodes 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, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi de contrôle non destructif (CND).

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

- Analyse chimique ;
- Contrôle par Ultra-Son (US) ;
- Contrôle par rayon X (RX) ;
- Epreuve hydraulique.

### IV.4.1. Analyse chimique

L'analyse chimique sur l'acier X60M fut effectuée au niveau de l'entreprise ALTUMET sur un spectromètre de masse (figure IV.10),



Figure IV.10. Spectromètre de masse.

### IV.4.2. Contrôle par Ultra-Sons

#### Généralités

Ce sont des vibrations analogues à celles du son, mais de fréquence élevée ne pouvant être perçues par l'oreille humaine. Elles se propagent dans un corps solide en ligne droite et en se réfléchissant successivement sur les faces du solide. Si la soudure n'est pas homogène et comporte des discontinuités telles que inclusions de laitier ou porosité, le faisceau d'ultrason subit en totalité ou en partie une réflexion supplémentaire sur le défaut ou, plus généralement, sur la surface de séparation. Cette propriété permet le contrôle des soudures. Le phénomène de piézo électricité étant réversible, un même quartz peut servir comme émetteur et comme récepteur. Les ondes ultrasonores subissent les mêmes lois générales de réflexion et de réfraction que les rayons lumineux. [18]

## Génération des ultrasons

Les ultrasons sont engendrés par un phénomène piézo électrique ; vibrations engendrées dans un cristal ou une céramique par une tension électrique alternative ; cette vibration est transmise par contact à la pièce à contrôler. Les ultrasons sont émis par impulsions suffisamment espacées l'une de l'autre pour que chacune d'elles puisse complètement s'amortir. Chaque impulsion donne un signal d'entrée et un signal de sortie que l'on compare au moyen d'un oscilloscope cathodique. [18]

La propagation des ultrasons se fait très mal si une lame d'air, même très mince, est interposée. C'est pourquoi on interpose entre chaque palpeur et le tube, un liquide visqueux.

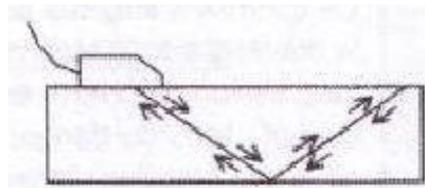
La méthode par ultrasons permet de détecter avec une bonne certitude les défauts suivants :

- Manques de fusion ou de liaison importants ;
- Inclusions de laitier (si elles sont importantes) ;
- Soufflures ;
- Fissures longitudinales.

## Méthode de contrôle

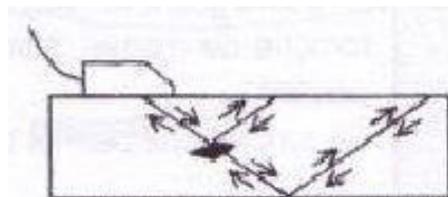
La méthode consiste à émettre un signal ultrasonore, émis par un palpeur, sous un angle d'incidence, dans un tube perméable aux ultrasons et d'en recueillir l'onde réfléchie.

Si les US ne rencontrent aucun obstacle, ils atteindront la face inférieure de tube et se réfléchiront suivant un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence (figure IV.11). [18]



**Figure IV.11.** Parcours des US sans défaut.

Si les US rencontrent un défaut sur leur parcours, celui-ci constituera une surface réfléchissante et le palpeur recueillera deux ondes réfléchies (figure IV.12). [18]



**Figure IV.12.** Parcours des US avec défaut.

Tous les palpeurs sont émetteurs-récepteurs. Il en existe différents types dont la particularité essentielle est l'angle d'incidence d'émission des US.

Il est indispensable avant l'opération :

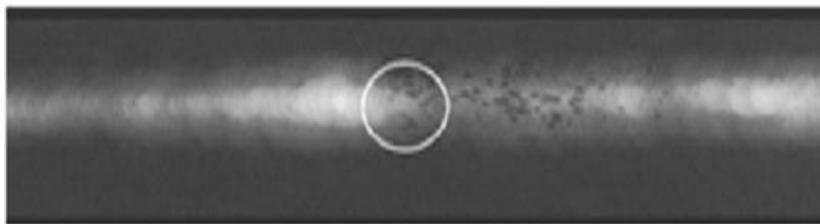
- D'étalonner l'oscilloscope et le palpeur à l'aide de la cale étalon.
- De constituer l'interface d'émission des US en lubrifiant la surface de tube sur laquelle glissera le palpeur.

Tous les tubes subissent l'essai de contrôle par US, chaque défaut repérer, sa position sera marqué par une peinture, les défauts détecter par le contrôle ultra-son seront examinés par les rayons X.

### IV.4.3. 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 émerge sur la face opposée à la face d'entrée 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 place un film photographique sensible aux rayons X sous le rayonnement émergent, les défauts apparaîtront sous forme de taches foncées ou claires (figure IV.13) selon que la densité est plus forte que celle du métal environnant. [18]



**Figure IV.13.** Nids de Porosités 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 rayons 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 pose adopté.

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

La netteté de l'image 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'obscurité dont l'éclairage doit pouvoir être réglé en fonction de la densité du film, et son interprétation est largement facilitée par l'atlas des radiographies de référence établi par l'Institut International de la Soudure qui donne des radiographies types telles que par exemple :

- *Sur acier* : soufflures, inclusions de laitier, manque de fusion, manque de pénétration, fissurations (transversales, longitudinales, de cratère), caniveaux et morsures d'arc ;
- *Sur alliages légers* : 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. [18]

**Tableau IV.3.** Interprétation de film photographique.

Désignation	Type de défaut	Apparence radiographique
Inclusions gazeuses	Cavités sphériques ou longiformes	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 le métal d'apport	Lignes sombres continues ou intermittentes, au milieu de la soudure
Fissures longitudinales ou transversales	Fractures 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

#### IV.4.4. Epreuve hydraulique

Cette épreuve, réglementée par divers décrets et arrêtés, sert à vérifier à la fois l'étanchéité et la résistance de l'ensemble aux sollicitations de service lorsque le tube doit contenir un liquide ou un gaz sous pression. La pression d'épreuve est fixée par les normes de fabrications des tubes.

Les tubes sont remplis d'eau à la température ordinaire et totalement purgés d'eau grâce à des robinets placés sur les deux extrémités. Deux manomètres, dont un étalon, sont disposés pour mesurer la pression intérieure ; si leur aiguille vibre, c'est un indice qu'il reste des poches d'air.

La pression est maintenue pendant un temps déterminé afin que les défauts, notamment les fissurations, aient le temps de s'accroître sous l'effet de la pression. Pour accélérer ce phénomène, on procède parfois à un martelage des soudures après avoir abaissé la pression à une valeur fixée, par exemple 1,25 fois la pression de service. [18]

# **Chapitre V**

## **Résultats et interprétation**

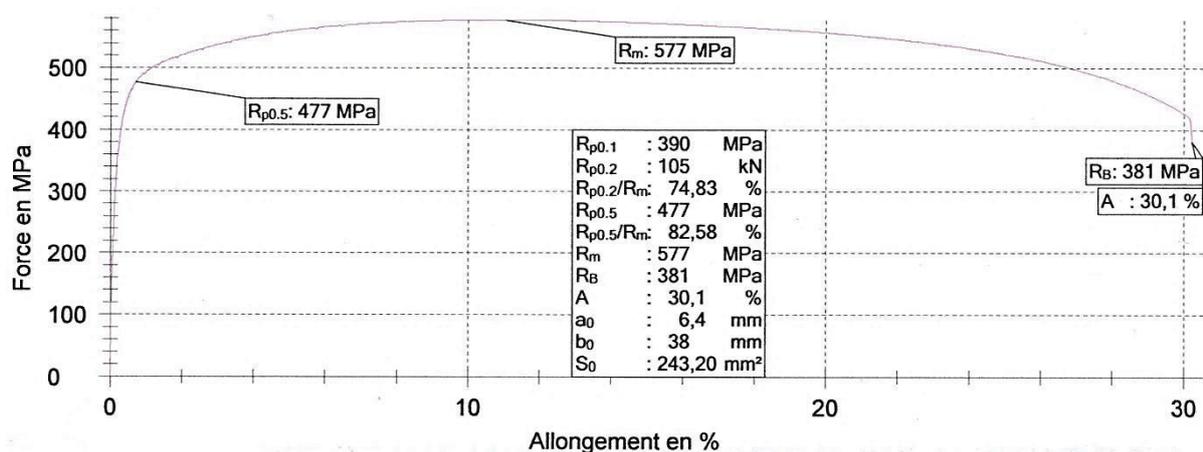
## Introduction

Cette partie concerne la présentation et l'interprétation des différents résultats obtenus après l'étude expérimentale de l'acier API 5L X60M au laboratoire des essais mécaniques de l'entreprise ALTUMET, ces essais sont effectués durant la chaîne de fabrication des tubes métalliques (pipeline).

### V.1. Essais de contrôle destructif

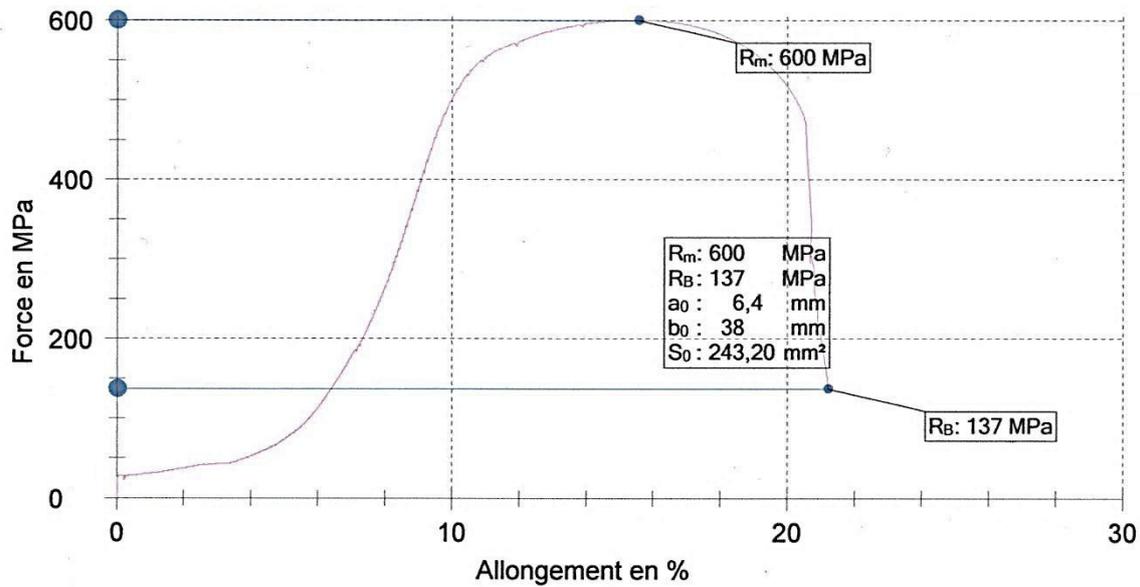
#### V.1.1. Essai de traction

Les résultats des essais de traction pour les différents états (métal de base, cordon de soudure) sont présentés dans les figures ci-dessous.

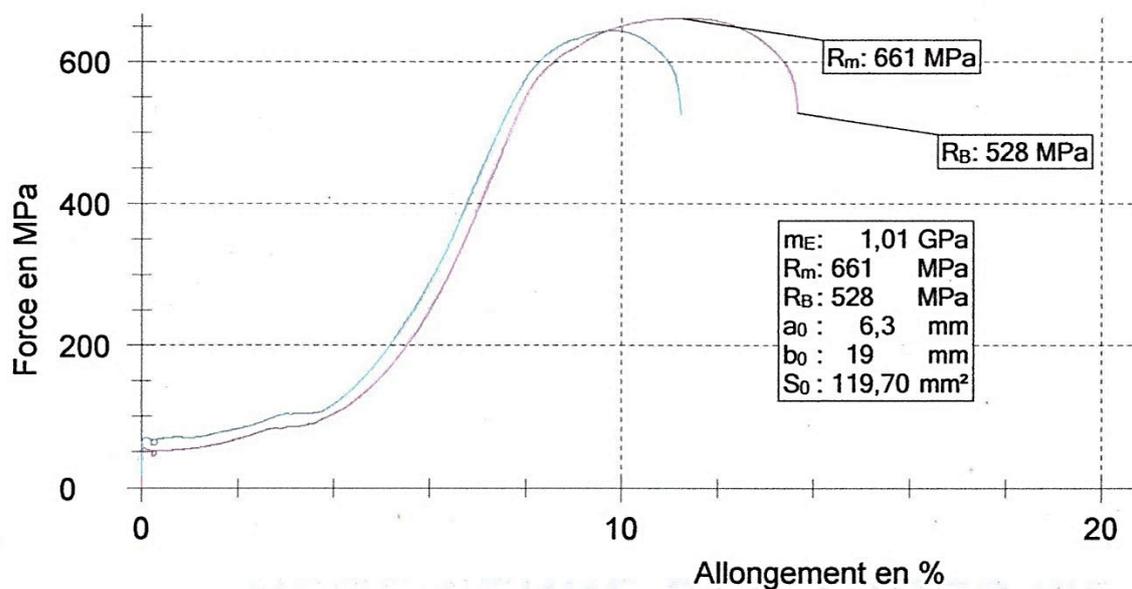


**Figure V.1.** Courbe de l'essai de traction sur le métal de base (norme API 5L).

Les figures V.2 et V.3 illustrent l'essai de traction sur une éprouvette soudée cette forme est due aux hétérogénéités que représentent le MB, la ZAT et la ZF. La résistance à la rupture est de 600 MPa pour la norme API 5L, et 661 MPa pour la norme ASME section IX. On note que la rupture se fait hors cordon.



**Figure V.2.** Courbe de l'essai de traction sur soudure (norme API 5L).



**Figure V.3.** Courbe de l'essai de traction sur soudure (norme ASME IX).

Les valeurs de la limite d'élasticité et de la résistance maximale à la traction pour le métal de base la soudure sont supérieures aux valeurs minimales ( $R_e > 415$  MPa,  $R_m > 520$  MPa) indiquées par la norme API 5L PSL2.

Les valeurs élevées de la limite d'élasticité et de la résistance à la traction dans le métal de base et le cordon de soudure sont dues à l'existence des éléments de microalliage qui empêchent

le grossissement de la taille de grain austénitique par la formation des obstacles au niveau du joint de gain sous forme de précipitation finement dispersés.

### V.1.2.Essai de 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 sur 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.

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 ( $W_1 = P \cdot h_1$ ) :

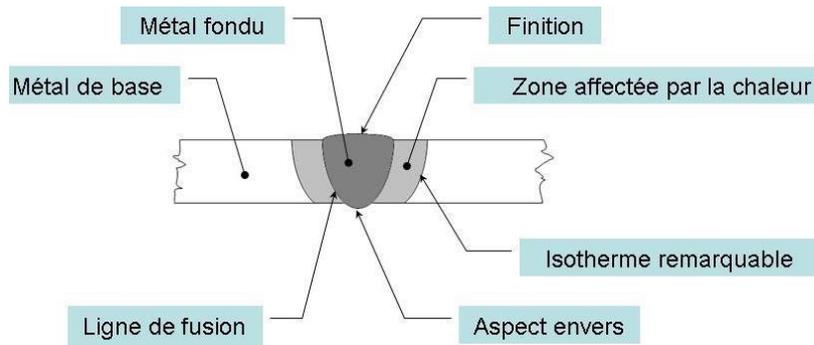
$$W = W_0 - W_1 = P \cdot h_0 - P \cdot h_1 = P \cdot (h_0 - h_1)$$

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

**Tableau V.1.** Résultats de l'essai de résilience pour l'acier X60M.

Position de l'entaille	Surface de l'entaille [cm <sup>2</sup> ]	Travail W [J]	Résilience [J/cm <sup>2</sup> ]	Résilience moyenne [J/cm <sup>2</sup> ]
MA	0,40	95	237,5	231,67
	0,40	92	230	
	0,40	91	227,5	
MB	0,40	118	295	287,5
	0,40	105	262,5	
	0,40	122	305	
ZAT	0,40	95	237,5	235
	0,40	90	225	
	0,40	97	242,5	

Pour l'acier X60M la résilience de la ZAT est inférieure à celle du MB compte tenu des éléments d'alliage présents qui au contact de la chaleur dégagée lors du soudage vont se précipiter en durcissant la ZAT et par l'occasion va se fragiliser. De la même façon on pourra expliquer la fragilisation notable du MA.



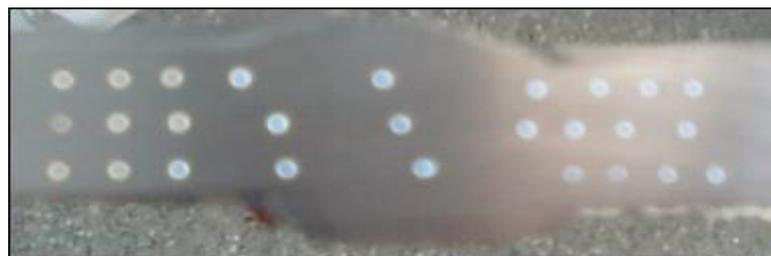
**Figure V.4.** Les différentes zones d cordon de soudure.

### V.1.3.Essai de dureté

On observe que la dureté du métal de base est plus importante que celle de cordon de soudure.

**Tableau V.2.** Résultats de l'essai de dureté.

N° de point	Position 01		Position 02		Position 03	
	La diagonale (μm)	HV	La diagonale (μm)	HV	La diagonale (μm)	HV
01	0.5	223	0.5	223	0.5	223
02	0.5	223	0.5	223	0.5	223
03	0.5	223	0.5	223	0.51	223
04	0.52	206	0.51	214	0.5	214
<b>05</b>	<b>0.52</b>	<b>206</b>	<b>0.5</b>	<b>223</b>	<b>0.51</b>	<b>214</b>
06	0.52	206	0.5	223	0.52	206
07	0.5	223	0.5	223	0.5	223
08	0.5	223	0.5	223	0.5	223
09	0.5	223	0.5	223	0.5	223



**Figure V.5.** Eprouvette de l'essai de dureté.

## V.2. Essais de contrôle non destructif

### V.2.1. Analyse chimique

La composition chimique de l'acier soudé spirale, présentée dans les tableaux V.3, doit être conforme aux exigences de la dernière édition (45<sup>ème</sup>) de la norme API 5L PSL2. L'analyse chimique sur le métal X60M fut effectuée au niveau de l'entreprise ALTUMET sur un spectromètre de masse.

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

Les aciers à haute limite élastique sont caractérisés par leurs teneur en Mn ce qui leurs confère un durcissement de la ferrite, une augmentation de trempabilité, l'affinement du grain, la désoxydation et la fixation du soufre sous forme de sulfure. L'intérêt des autres éléments qu'on voie dans le tableau V.3 est suffisamment décrit dans le premier chapitre.

**Tableau V.3.** La composition chimique (en pourcentage %) du métal de base (acier X60M)

	<b>Fe</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
<b>Ave</b>	98,1	0,109	0,233	1,32	0,0192	0,0041
	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Al</b>	<b>Co</b>	<b>Cu</b>
<b>Ave</b>	0,0242	0,0026	0,0128	0,0293 <	0,0005	0,0124
	<b>V</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>W</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>
<b>Ave</b>	0,0020	0,0289	0,0127	0,0023	0,0014	0,0016
	<b>B</b>	<b>Ca</b>	<b>Zr</b>	<b>Zn</b>	<b>Bi</b>	<b>As</b>
<b>Ave</b>	0,0001	0,0068	0,0018	0,0021	0,0012	0,0020
	<b>N</b>	<b>Se</b>	<b>Sb</b>	<b>Ta</b>	<b>CE</b>	
<b>Ave</b>	0,0193	0,0025 <	0,0010 <	0,0050	0,179	

## Conclusion générale

L'évolution de la composition chimique et les propriétés mécaniques de métal de base et le cordon de soudure en fonction des conditions de fabrication a été étudiée en utilisant des essais de contrôle destructifs et non destructifs. Le procédé utilisé est le soudage automatique (SAW). On peut conclure à partir de ce travail expérimental les remarques suivantes :

La composition chimique mesurée de l'acier API 5L X60M est conforme à la norme API 5L PSL2.

La variation enregistrée dans l'énergie de rupture peut varier sous l'action de facteurs liés aux conditions de soudage tels que :

- l'énergie linéaire de soudage déposée;
- la vitesse de refroidissement;
- la position de l'entaille dans la ZAT;

Notre étude s'est penchée sur la caractérisation des propriétés de la nuance d'acier API X60 M.

Finalement, d'après les résultats obtenus, on peut conclure que les propriétés mécaniques de cordon de soudure restent conformes aux exigences de la norme API 5L PSL2, ainsi qu'aux exigences des normes ASME section IX.

## **Bibliographie :**

- [1] Metals handbook Vol.1 «Properties and Selection: Irons, Steels, and High
- [2] «Welding pressure pipelines & piping systems», ed. THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY
- [3] Adapté du Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd edition, Vol. 1, T. B. Massalski (Editor-in-Chief), 1990.
- [4] William D. Callister Jr, Materials Science and Engineering, John Wiley & Sons, 2007.
- [5] Marc Grumbach, Techniques de l'Ingénieur, Métallurgie M 305.
- [6] La Soudure Autogène française (SAF), Guide de l'utilisateur du soudage manuel, 4<sup>ème</sup> édition 1978.
- [7] Chunming Wang, Xingfang W. jie lie, Transmission electron microscopy of martensite, austenite, islands in pipeline steel X70. Materials Science and Engineering, 2006.
- [8] J-P MUZEAU, Constructions métalliques – Assemblages par soudage, Article dans Techniques de l'Ingénieur, Réf C2522, 10 août 2012.
- [9] Marc GRUMBACH, Technique de l'ingénieur, «Aciers microalliés», M4 525.
- [10] American Petroleum Industry, API Specification 5L, 45<sup>ème</sup> Edition, 2013.
- [11] J.C.SCULLY, "The Fundamentals of corrosion Engineering (McGraw Hill), 1967.
- [12] Sedrini Abdelkader, Etude sur le comportement en endommagements des aciers API 5X65 du model weibull, Ingénieur Mécanique, Université Tlemcen, 2007.
- [13] Bouziane Abdelkader, contribution à la détermination des critères de qualité des tubes soudés soumis à une pression intérieure, magister en génie mécanique, Université M'hamed Bouguera Boumerdes, 2008.
- [14] M. Colombié et all, Matériaux Métalliques, 2<sup>ème</sup> édition, DUNOD 2008.
- [15] S. BELAKOWSKY. « Soudage et collage ». DUNOD. Paris. 1990.
- [16] J. BINARD, Réservoirs, Soudage en chaudronnerie, Article dans Techniques de l'Ingénieur, Réf a683, 10 novembre 1985.
- [17] J-P MUZEAU, Constructions métalliques – Assemblages par soudage, Article dans Techniques de l'Ingénieur, Réf c2522, 10 aout 2012.
- [18] Bertrand LE BOURGEOIS, SOUDAGE A L'ARC - Tome 2 : Procédé avec électrodes enrobées. Édition PSA / CILF 1987.