

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie des Matériaux

Filière : Génie Mécanique

THEME

**Etude et caractérisation physique et mécanique des tubes à gaz
destinés aux applications industrielles**

Réalisé Par :

**AKLIL Ihcene
ALLOUCHE Nadjat**

Encadrées par :

Dr. DAOUI A.

Remerciements

En premier lieu, on tient à remercier le Bon DIEU, le tout puissant de nous avoir donné la force, la patience nécessaire pour la réalisation de ce projet de fin d'études.

On adresse nos remerciements à notre promoteur Mr. DAOUJ pour son aide et ses conseils durant la réalisation de ce projet.

On tient à remercier toutes les personnes de l'entreprise Algérienne des Tubes Métalliques ALTUMET de REGHAJA qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de notre stage de fin d'études.

On remercie Mr SAFJ et Mr ZERJZER en particulier.

Nous désirons aussi notre remerciement à Mr SELMOUN.

On voudrait également exprimer nos vifs remerciements aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour le temps et les orientations accordées.

Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département génie mécanique Faculté de Technologie Département Génie mécanique M'Hamed Bongera Boumerdes et nos responsables de la promo 2019/2020.

Dédicace

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir.

La force d'y croire. La patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

Je dédie ce modeste travail :

À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,

À cette source de tendresse, de patience et de générosité,

À ma très chère maman en signe d'amour, de reconnaissance et gratitude pour tous les soutiens et les sacrifices dont elle a fait à mon égard.

À l'homme de ma vie, mon exemple, mon soutien moral et source de joie et bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir.

Que Dieu te garde pour nous papa.

À mes sœurs Soukhla, Amina, Linda et Khawla qui m'ont toujours servi sans hésitation.

À mes très chers frères Wakid et Amine que Dieu vous garde.

À tous les membres de ma famille :

grands-parents, tantes, oncles, cousines.

À ceux que j'aime beaucoup, qui m'ont toujours soutenues et étaient toujours à mes côtés mes chères amies spécialement :

Amira, Wassila, Zoubida, Imene, Rym et Micka

Je termine avec la personne qui a partagé tout le travail,

Qui a supporté mon humeur au moment de stresser,

mabinôme.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que

Ce projet soit possible.

Je vous dis merci

Akhlil Jhcene

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de part son amour, son soutien, tous les sacrifices et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longue années de sacrifices et de privation pour m'aider à avancer dans la vie, puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

A Ma très chère grand-mère.

A Ma chers sœurs Racha et mon frère Bilal.

A mon très cher mari Brahim.

A mes amis, surtout : Louiza, Djouher qui m'ont beaucoup soutenu et encouragé.

A toute personne qui m'est cher ma famille Allouche.

A ma chère binôme Aklil Jhcene.

NADJET

TABLEAU DE MATIERE

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Introduction générale	
Chapitre I : Processus de fabrication de tube à l'entreprise ALTUMET	
I.1 Introduction :	1
I.2 Tube soudée en spirale :	1
I.3 Processus de fabrication :	1
I.4 Revêtement :	6
I.4.1 Revêtement extérieur :	6
I.4.2 Revêtement intérieur :	8
I.5 Le soudage :	9
I.5.1 Généralité sur le soudage :	9
I.5.2 Classification de procédés de soudages :	9
I.5.3 Procédés de fabrication par soudage :	9
I.5.3.1 Procédé manuelle (SMAW) :	10
I.5.3.2 Procédés automatiques et semi automatiques :	10
I.5.4 Structure d'une soudure :	12
I.6 Les principaux défauts de soudure :	13
I.6.1 Fissures :	13
A) Fissures à chaud :	13
B) Fissures à froid :	14
I.6.2 Les cavités :	14
I.6.3 Les inclusions :	15
I.6.4 Manque de pénétration :	15
I.6.5 Manque de fusion :	15

Chapitre II : Les contrôles destructifs et non destructifs des tubes soudés en spirale

II.1 Introduction :	16
II.2 Contrôle qualité :	16
II.2.1 Contrôles non destructifs (CND) :	16
II.2.1.1 Contrôles des bobines :	16
II.2.1.2 Contrôle de tube :	17
a) Contrôle visuel :	17
b) Réparation les défauts de cordon de soudure :	18
c) Test Hydrostatique :	18
d) Contrôle par ultrasons :	19
e) Contrôle radiographie :	20
f) Contrôle par magnétoscopie :	24
g) Contrôle final :	24
II.2.2 Contrôles destructifs :	24
II.2.2.1 Prélèvement et dimensionnement des échantillons :	24
II.2.2.2 Les Essai mécanique :	25
a) Essai de traction :	25
b) Essai de pliage :	26
c) Essai de dureté :	27
d) Essais de flexion par choc (résilience) :	28
e) L'examen macrographique :	30
f) Analyse chimique :	31

Chapitre III : Etude Expérimentale

III.1 Objectif de travail :.....	32
III.2 Présentation de l'organisme d'accueil :	32
III.2.1 Les produits de l'unité ALTUMET :.....	33
III.2.2 Gamme de fabrication :	33
III.3 Contrôles destructifs :.....	34
III.3.1 Prélèvement d'échantillons des plaques :.....	34
III.3.2 Composition chimique des aciers X70M et X52M utilisés dans ce travail:.....	
..... 35	III.3.2.1 Préparation de l'éprouvette
: 35
III.3.2.2 Présentation des résultats :.....	36
III.3.2.3 Analyse et interprétation des résultats :	37
III.3.3 Essai de résilience :.....	38
III.3.3.1 Préparation des éprouvettes :	38
III.3.3.2 Présentation des résultats :.....	38
III.3.4 L'essai de dureté :.....	41
III.3.4.1 Préparation des éprouvettes :.....	41
III.3.4.2 Présentation des résultats :	42
III.3.5 L'essai de traction :.....	45
III.3.5.1 Préparation des éprouvettes :	45
III.3.5.2 Présentation des résultats :	46
III.4 Contrôles non destructifs :	52
III.4.1 Les méthodes de contrôle :	52
III.4.1.1 Test hydrostatique :	52
III.4.1.2 Contrôle ultrasons :	53
III.4.1.3 Contrôle radiographique :	53
Conclusion.....	74
Reference bibliographique	76
Annax.....	77

Liste des figures

Chapitre I	
Figure I.1 : principe de fabrication des tubes soudées en spirale.....	1
Figure I.2 : Chaîne de fabrication du tube soudé en spirale.....	2
Figure I.3 : le rabotage.....	3
Figure I.4 : Cage de formage du tube.	4
Figure I.5 : soudage intérieure.....	4
Figure I.6: soudage extérieure.....	4
Figure I.7 : Oxycoupage des tubes.....	5
Figure I.8 : Zone de chanfrein des tubes.....	5
Figure I.9 : Nettoyage du tube.	6
Figure I.10 : Revêtement extérieur du tube.....	6
Figure I.11: Processus du revêtement extérieur du tube.....	7
Figure I.12 : Processus du revêtement intérieur du tube.....	8
Figure I.13 : Principe de soudage manuel.....	10
Figure I.14 : Principe de soudage automatique	11
Figure I.15 principe des soudages MIG et MAG.....	12
Figure I.16 : principe du soudage TIG	12
Figure I.17 : Structure d'une soudure	13
Chapitre II	
Figure II.1 : test hydrostatique.....	19
Figure II.2: principe du contrôle par ultrasons	20
Figure II.3 : Contrôle par ultrason.	20
Figure II.4: Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut.....	21
Figure II.5 : radiographie numérique.....	22
Figure II.6 : Développeuse de film radiographique (structurix U).....	23
Figure II.7: Négatoscope (pour observation des défauts).	23
Figure II.8 : Densitomètre.....	23
Figure II.9 : Sens de découpage des échantillons	25
Figure II.10: Éprouvette normalisée selon L'API5L	26
Figure II.11 : Machine de traction ZWICK/ROELL.	26

Figure II.12 : Essai de pliage.	27
Figure II.13 : Principe de la dureté Vickers	27
Figure II.14 : Microduromètre.....	28
Figure II.15 : La géométrie de l'éprouvette pour l'essai de résilience en V	29
Figure II.16 : Mouton pendule testwell.....	29
Figure II.17 : Les différentes zones révélées par l'attaque chimique.....	30
Figure II.18 : spectromètre de type FOUNDRY-MASTERPRO.....	31

Chapitre III

Figure III.1 : Une virole découpée à partir d'un tube.....	34
Figure III.2 : Prélèvement des plaques.....	34
Figure III.3 : (a) Plaque totalement en métal de base et (b) Plaque contenant le cordon de soudure.....	35
Figure III.4 : Eprouvette utilisée pour la composition chimique.....	35
Figure III.5 : Eprouvette pour l'essai de résilience en V.	38
Figure III.6 : Histogramme de la résistance mécanique du X52M et X70M.....	41
Figure III.7 : Eprouvette pour l'essai de dureté.....	41
Figure III.8 : La répartition des points de mesure pour la dureté.....	42
Figure III.9 : Histogramme de la dureté mécanique du X52M et X70M.....	45
Figure III.10 : Eprouvette pour l'essai de traction.....	45
Figure III.11 : Courbes d'essais de traction sur le métal de base (X70M).....	47
Figure III.12: Courbes d'essais de traction sur le métal contenant le cordon de soudure (acier X70M).....	48
Figure III.13: Courbes d'essais de traction sur le métal de base (acier X52M).....	49
Figure III.14 : Courbes d'essais de traction sur le métal contenant le cordon de soudure (acier X52M).....	51
Figure III.15 : Histogramme des propriétés mécaniques du X52M et X70M.	52
Figure III.16 : graphe de Test hydrostatique de tube 2090D.....	55
Figure III.17 : Résultat de contrôle ultrason de tube 2090D.	55
Figure III.18 : Film radiographique de tube 2090D.	56
Figure III.21 : Film radiographique de tube 412D.	58
Figure III.24: Film radiographique de tube 2004D.	60
Figure III.27 : Film radiographique de tube 2113D.	62

FigureIII.30 : Film radiographique de tube 2078D.....	64
Figure III.33: Film radiographique de tube 2025D.	67
FigureIII.36 : Film radiographique de tube 2249D.	71
FigureIII.39 : Film radiographique de tube 3082D.	73

Liste des tableaux

Chapitre II	
Tableau II.1 : paramètre de contrôle visuel.....	18
Chapitre III	
Tableau III.1: La gamme des tubes produit.....	33
Tableau III.2 : La composition chimique de l'acier X52M.....	36
Tableau III.3: La composition chimique de l'acier X70M.	36
Tableau III.4 : La norme API5L de l'analyse chimique.....	37
Tableau III.5 : Les valeurs de la résilience et l'énergie absorbée pour les différentes zones de l'acier X52M.....	39
Tableau III.6 : Les valeurs de la résilience et l'énergie absorbée pour les différentes zones de l'acier X70M.....	40
Tableau III.7 : Norme API 5L de dureté.	42
Tableau III.8 : Les valeurs de la dureté (HV 10) pour différents points de mesure de l'acier X70M	43
Tableau III.9 : Les valeurs de la dureté (HV 10) pour différents points de mesure de l'acier X52M.....	44
Tableau III.10 : Norme API5L pour les essais de traction.....	46
Tableau III.11 : Résultats des essais de traction sur le métal de base(X70M).....	47
Tableau III.12: Résultats des essais de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure (acier X70M).....	48
Tableau III.13 : Résultats des essais de traction sur le métal de base(acierX52M).....	50
Tableau III.14 : Résultats des essais de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure (acier X52M).	51
Tableau III.15: La norme API5L pour contrôle radioscope.	54
Tableau III.16 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2090D.....	56
Tableau III.17 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 412D.	57
Tableau III.18 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2004D.....	59
Tableau III.19 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2113D.....	61
Tableau III.20 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2078D.....	63
Tableau III.21 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2025D.....	65
Tableau III.22 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2249D.....	68

Tableau III.23: Les résultats de contrôle radiographie de tube 3082D.....	79
Tableau III.24 : l'examen macrographique de tube 3082D.....	79

Liste des symboles

Symboles	Signification
MIG	Soudage (Métal Inerte Gas)
MAG	Soudage (Métal Active Gas)
TIG	Soudage (tungstène inerte Gas)
MB	Métal de base
ZAT	Zone affectée thermiquement
R1	Film bon
R2	Film à refaire
R4 D0	Soufflure acceptée
R5 D0	Caniveaux accepté
R7 D0	Désaxage accepté
R4 D2	Soufflure non accepté
R3 D2	Manque de pénétration /fusion
R5 D2	Caniveaux non accepté
R6 D2	Fissures non accepté
R7 D2	Désaxage non accepté
L1	Début de tub
L2	Fin de tub
U	Indication ultrason
R/	Nom de réparateur
Re	Limite élasticité MPa
Rm	La résistance à la traction MPa
A%	Le pourcentage d'allongement après la rupture
Hv	Dureté Vickers [kg mm ⁻²]
F	Force appliquée [N]
w	L'énergie absorbe (joule)
k	La résilience au choc [J/cm ²]

ملخص:

تركز هذه الدراسة على عرض التوصيف الفيزيائي والميكانيكي للفولاذ عالي القوة API X52M و API X70M تحت تأثير عناصر الإضافة، وتستخدم هذه الدرجات في بناء خطوط أنابيب الغاز.

الكلمات الرئيسية:

.API X70M و API X52M

Abstract

This study focuses on the presentation of the physical and mechanical characterization of high yield strength steels API X52M and API X70M under the influence of addition elements, these grades are used in the construction of gas pipelines.

Keywords:

API X52 and API X70 steel.

Résumé :

Cette étude porte sur la présentation de la caractérisation physique et mécanique des aciers à hautes limite élastique API X52M et API X70M sous l'influence des éléments d'addition, ces nuances sont utilisées dans la construction des gazoducs.

Mots clefs :

Acier API X52 et API X70.

Introduction

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 les nuances API 5L X52M et X70M utilisées pour la fabrication des tubes soudés spirale, servant au transport des hydrocarbures et de l'eau. Pour cela nos aciers doivent répondre à plusieurs exigences telles que la résistance mécanique, l'aptitude au formage, la soudabilité ou encore la résistance à la corrosion.

Les essais mécaniques qui permettent de réaliser le contrôle qualité des tubes acier et soudés en spirale doivent être correctement effectués et suivant des normes précises. Ceci est fait dans le but d'assurer la sécurité des biens et des personnes et aussi d'assurer un niveau de fiabilité de la structure afin de pouvoir la garantir pour une certaine durée de service Dans ce travail, on a abordé plusieurs parties relatives à la fabrication des tubes acier et au contrôle destructif et non destructif avant la livraison aux clients.

Ce mémoire se subdivise en deux grandes parties, Parti bibliographique et une partie expérimentale.

- La première partie relative à une synthèse bibliographique est constituée comme suite :

Chapitre I : une bibliographie sur le processus de fabrication des tubes soudés en spirale. Ensuite, on aborde la soudure autant qu'élément essentiel dans la fabrication. Aussi, les différents défauts rencontrés sont exposés et les revêtements de tubes. Un second Chapitre traitera les différents stades de contrôle de qualité des tubes.

- La deuxième partie de ce travail, est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux. Les résultats des essais destructifs et non destructifs réalisés sur les tubes ; sont présentés dans cette partie.

Enfin, une conclusion générale clôtura ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus par notre travail.

Chapitre I

Processus de fabrication de tube à l'entreprise ALTUMET

I.1 Introduction :

Les pipes tiennent une place importante dans les industries, gazières et pétrolière, celles-ci sont le plus souvent en acier. Bien que le cuivre et aluminium soient parfois utilisés pour les réseaux de distribution de gaz naturel[1].

Dans ce chapitre on donne une bibliographie sur le processus de fabrication des tubes soudés en spirale. Ensuite, on aborde la soudure en tant qu'élément essentiel dans la fabrication. Aussi, les différents défauts rencontrés sont exposés et les procédés de revêtement de tubes.

I.2 Tube soudée en spirale :

La fabrication des tubes soudés en spirale est réalisée en continu sur des machines à souder, après déroulement de la bobine en bande par un train d'entraînement, la tôle est poussée dans la cage de formage ou elle subit une déformation de cintrage sous l'action d'un vérin.

Les tubes soudés en spirale sont faits avec inclinaison de l'angle d'introduction d'une bande de métal en forme de spirale, puis les bords sont joints puis soudés, ce qui forme un cordon de soudure spirale.

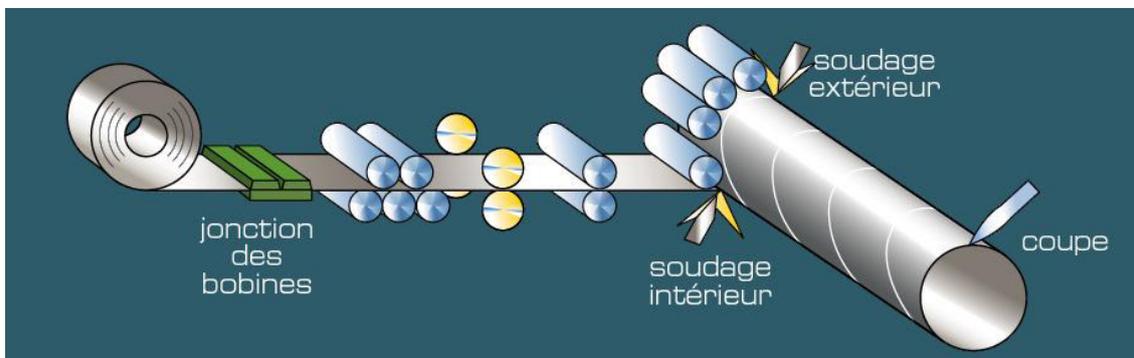


Figure I.1 : principe de fabrication des tubes soudés en spirale [2].

I.3 Processus de fabrication:

La figure suivante montre la chaîne de fabrication du tube soudé en spirale.

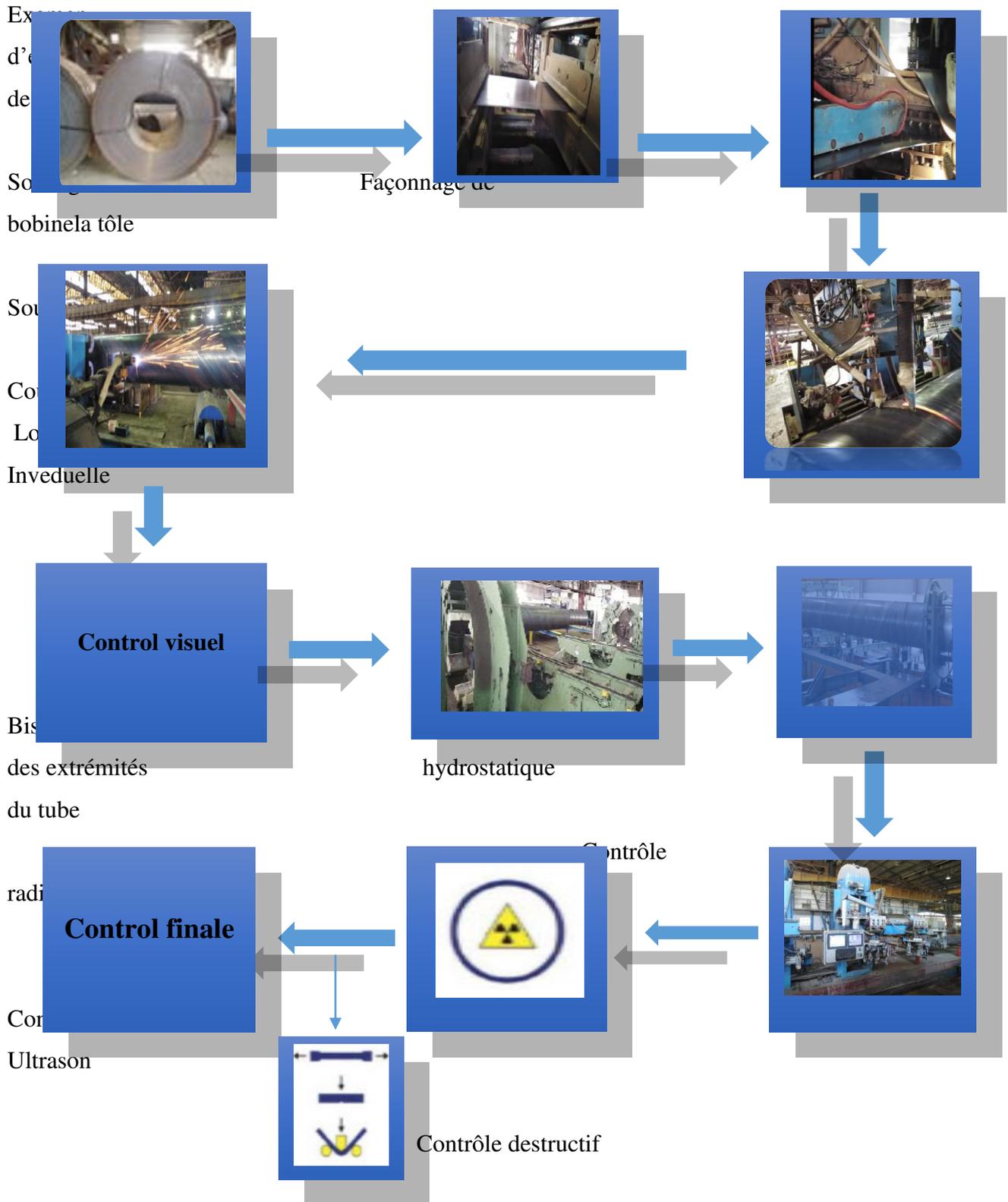


Figure I.2 : Chaîne de fabrication du tube soudé en spirale.

✚ Les opérations principales pour la fabrication des tubes en spirale :

La fabrication de tube est réalisée sur une seule machine multifonctions, cette dernière est gérée par quatre opérateurs, qui assurent le fonctionnement des quatre parties de la machine.

On distingue les étapes suivantes :

- **Contrôle des bobines :**

Contrôle (diamètre - largeur – épaisseur) poids (30t-40t) Mesure des épaisseurs par appareil (échométrie).

Les bobines de tôle arrivant à axe verticale sont mises à axe horizontal sur cette installation pour pouvoir être préparées.

- **Dévidoir :**

Déroulement de la bobine, le rouleau est ainsi tiré par deux cylindres situés dans la deuxième partie de la machine, ils sont réglés en fonction de l'épaisseur de la bobine, puis il sera conditionné vers une planeuse qui assurera la planéité de l'acier.

- **Planeuse :**

Consiste à aplatir la surface de la bande, la tôle subit une flexion uniforme, sous l'action des rouleaux pousseurs.

- **Soudage de rabotage :**

Avant l'écoulement total de la bobine, une autre sera éventuellement mise en place, le rabotage permet le soudage de la bobine en cours avec la bobine engagée, c'est un soudage en forme X ou Y.



Figure I.3 : le rabotage.

- **La cage de formage :**

C'est le lieu de formage du tube. La tôle, étant plane va être courbée à l'aide de plusieurs moteurs qui exercent une pression par le biais de plusieurs rouleaux spéciaux sur cette dernière afin d'avoir la forme d'un tube.



Figure I.4: Cage de formage du tube.

▪ **Soudage extérieur et intérieur :**

Après le formage, la plaque enroulée va être soudée, en deux étapes, en commençant par l'intérieur, puis à l'extérieur. Le procédé de soudage utilisé est un soudage automatique avec un flux en poudre à arc submergé.



Figure I.5 : soudage intérieure.



Figure I.6: soudage extérieure.

- **Oxycoupage automatique :**

Après le soudage, le tube va être découpé quand il atteint une longueur de 12,20m, sa longueur est détectée à l'aide d'un capteur de mouvement, pour qu'il soit directement découpé par une découpeuse plasma. Le déplacement de cette dernière se concorde avec celui du pipe (avec la même vitesse) pour que le découpage soit établi sans faire arrêter le déplacement du tube. Le découpage est effectué à froid pour éviter d'affecter le tube thermiquement, ce qui peut causer un changement de la structure du matériau aux extrémités du tube.



Figure I.7: Oxycoupage des tubes.

- **Chanfreinage :**

Pour permettre l'opération de soudage manuel le tube est chanfreiné à l'aide de deux machines chanfreineuses suivant la norme de travail, l'angle obtenu est en général de 30° à 35° avec un talon de 1.5 mm (Figure I.8).



Figure I.8: Zone de chanfrein des tubes.

▪ Nettoyage du tube :

Le tube ainsi mis en longueur est nettoyé sur une machine qui le débarrasse de tous les déchets (résidus, laitier, etc.). (Figure I.9)



Figure I.9: Nettoyage du tube.

I.4 Revêtement :

I.4.1 Revêtement extérieur [3] :

L'environnement d'une conduite est souvent agressif, pour résister à ces agressions, ALTUMET utilise le procédé du revêtement polyéthylène tri-couches selon la norme **NF A 49-710**.

Le revêtement extérieur est constitué de :

- **Couche 1** : une couche de résine époxydiques poudre ou liquide d'épaisseur minimale en tout point.
- **Couche 2** : en copolymère destiné à assurer l'adhérence entre les couches 1 et 3.
- **Couche 3** : Une couche de polyéthylène extrudé.

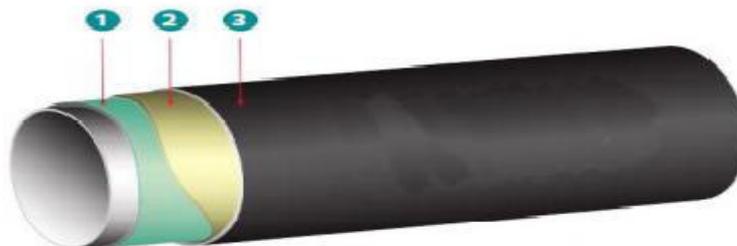


Figure I.10 : Revêtement extérieur du tube [2].

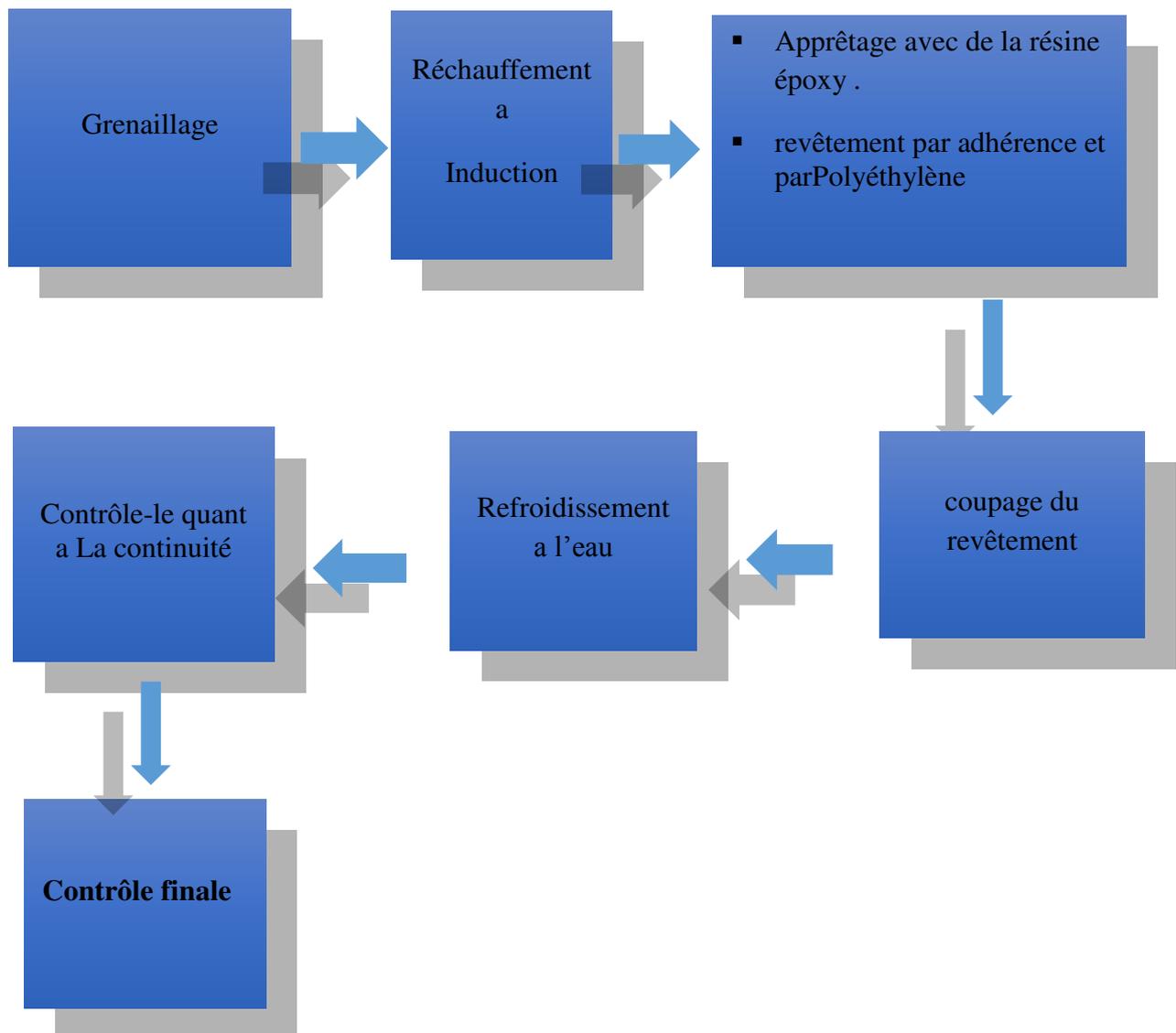


Figure I.11: Processus du revêtement extérieur du tube.

✚ Ce revêtement présente les avantages suivants :

- ✓ Protection anti-corrosion.
- ✓ Haute résistance d'isolement électrique.
- ✓ Aptitude au cintrage.
- ✓ Protection cathodique allégée.
- ✓ Excellente résistance aux chocs.
- ✓ Étanchéité à l'eau et à la vapeur.
- ✓ Insensibilité aux bactéries.
- ✓ Très grande stabilité dans le temps.

I.4.2 Revêtement intérieur[4] :

Qu'elle soit intérieure ou extérieure, la corrosion est l'ennemi d'une canalisation, pour lutter efficacement contre la corrosion interne, **ALTUMET** utilise le revêtement intérieur en résine époxy.

Le principe de protection par une couche de résine époxydique est de créer une barrière étanche, parfaitement adhérente entre le métal et le fluide véhiculé.

Après préparation de la surface par grenailage, la peinture époxydique à deux composants (résine et durcisseur) est appliquée par pistolet air-less.

ALTUMET réalise le revêtement intérieur époxy en conformité avec la norme **NF A 49-709**.

Le revêtement intérieur est constitué de :

- Revêtement en époxy alimentaire pour les tubes à usage hydraulique.
- Revêtement en époxy gaz pour les tubes à usage hydrocarbures.

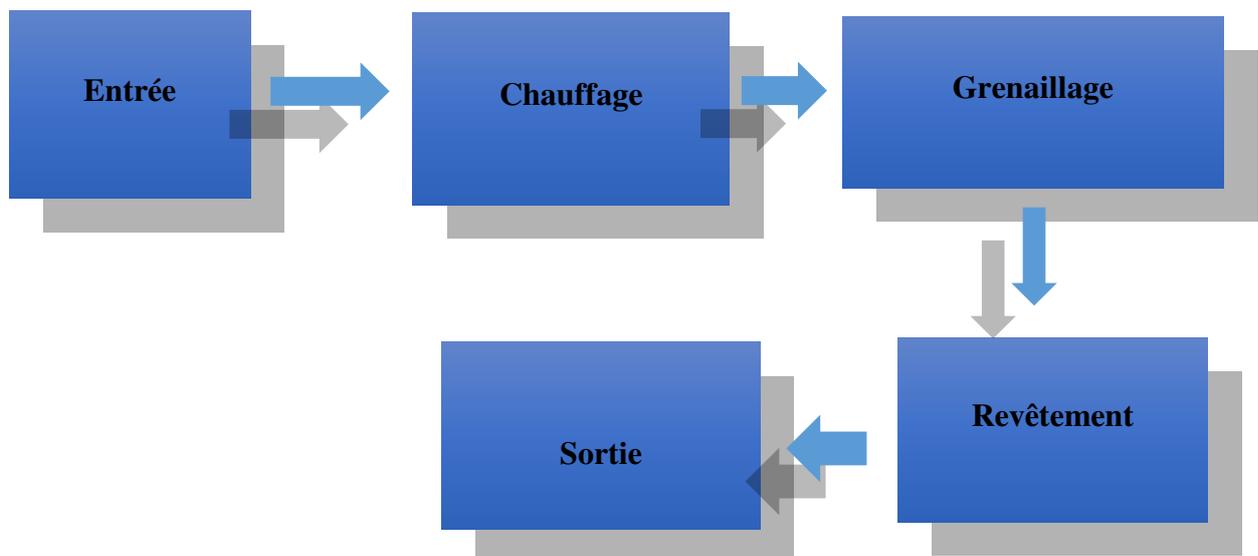


Figure I.12 : Processus du revêtement intérieur du tube.

✚ Ce revêtement présente les avantages suivants :

- ✓ Excellente adhérence.
- ✓ Protection anti-corrosion.
- ✓ Réduction des pertes de charges.
- ✓ Ecoulement des fluides favorisés.
- ✓ Garantie la Potabilité de L'eau.

I.5 Le soudage [5] :

I.5.1 Généralité sur le soudage :

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les parties à souder est réalisée en portant les métaux à la température de fusion, par l'intermédiaire d'une source d'énergie.

Il y a Deux cas :

- La soudure Autogène : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- La soudure Hétérogène : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

I.5.2 Classification de procédés de soudages :

On peut classer les procédés de soudages selon différents tel que :

- Le mode de transfert d'énergie utilisée.
- Sans ou avec un métal d'apport.
- La manuelle ou l'automatique.
- La nature de matériaux.
- La destination des éléments soudés.

I.5.3 Procédés de fabrication par soudage :

Les procédés de soudage utilisés en construction métallique peuvent être classés en trois catégories :

- **Soudage manuel** : reste le seul moyen possible pour réaliser des soudures d'accès difficile ou des soudures de petite longueur.
- **Soudage semi-automatique** qui procède par avancement automatique de l'électrode avec une torche tenue à la main. Ce procédé de soudage est le plus couramment utilisé.
- **Soudage automatique**, pour lequel la tête de soudage est montée, soit sur un chariot dont l'avancement est automatique, soit sur un robot de soudage. Il permet notamment de réaliser des soudures continues d'une certaine longueur.

I.5.3.1 Procédé manuelle (SMAW) :

Le soudage manuel avec électrode enrobée constitue l'un des modes opératoires de soudage à l'arc le plus répandu. Il nécessite un personnel très qualifié pour que les soudures ainsi réalisées soient de bonne qualité.

Ce procédé, désigné aussi en anglais par l'acronyme (SMAW), est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. 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.

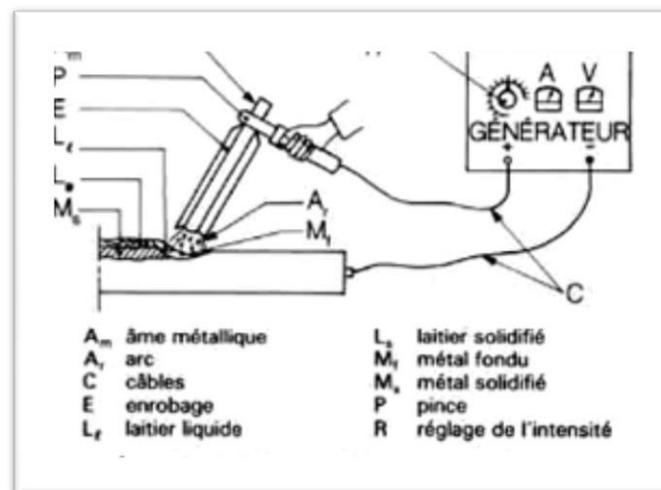


Figure I.13 : Principe de soudage manuel [5].

I.5.3.2 Procédés automatiques et semi automatiques :

On distingue dans le soudage automatique ou semi-automatique deux types de procédés qui sont le soudage sous flux solide en poudre et le soudage sous flux gazeux.

Ces procédés sont particulièrement intéressants 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.

I.5.3.2.1 Soudage automatique sous flux solide en poudre (SAW) :

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint (figure I.2). 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.

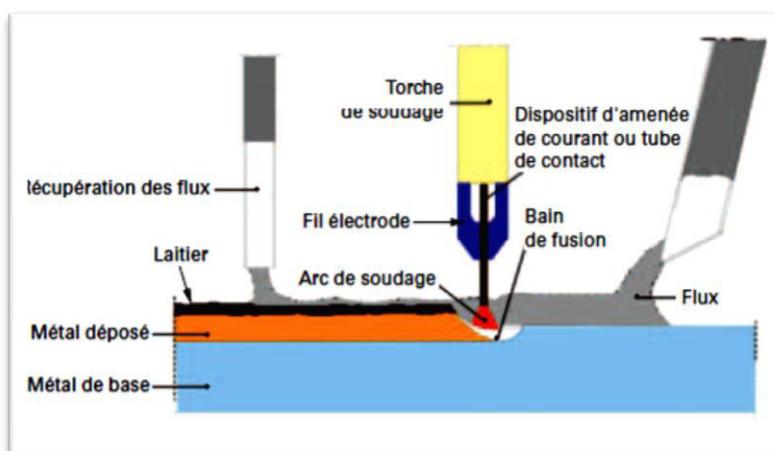


Figure I.14 : Principe de soudage automatique[5].

I.5.3.2.2 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 insufflé dans une buse concentrique au fil de l'électrode.

- Le procédé MIG (abréviation de « Métal Inerte 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 « Métal Active Gas ») utilise un gaz actif, du dioxyde de carbone ou un mélange argon/dioxyde de carbone.

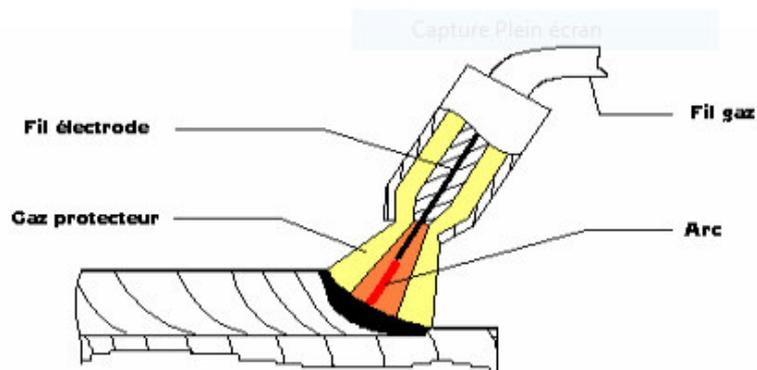


Figure I.15 principe des soudages MIG et MAG[5].

- Le procédé TIG (Tungstène Inerte Gas) utilise une électrode en tungstène et donc inconsommable ; le métal d'apport est assuré par un fil indépendant.

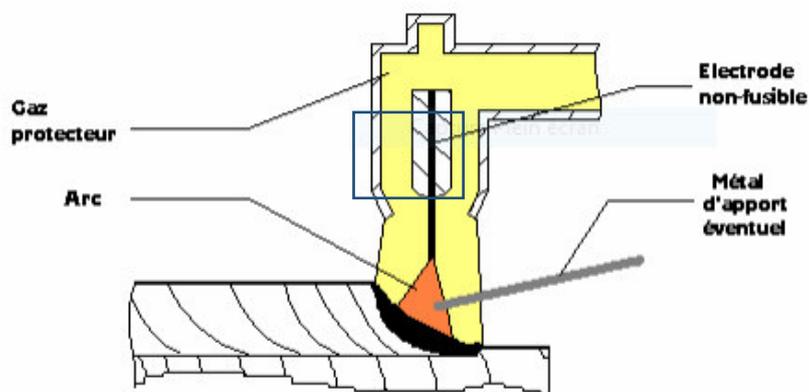


Figure I.16 : principe du soudage TIG[5].

I.5.4 Structured'unesoudure :

L'opération de soudage est assimilable à une opération locale d'élaboration métallurgique. L'effet local du cycle thermique (fusion des métaux de base et d'apport) provoque une modification de la structure cristalline qui dépend à la fois de la composition chimique (pourcentage de carbone, de chrome, de silicium, ...) et de la vitesse de refroidissement. La soudure ainsi réalisée comporte plusieurs zones.

- **La zone du métal de base**, Le métal n'a pas été porté à une température suffisante pour subir une quelconque transformation de structure. L'opération de soudage n'a aucune conséquence métallurgique sur cette zone.
- **La zone affectée thermiquement ZAT**, ($T^{\circ} > Ac3$) se trouve en bordure de la zone fondue, sur une largeur plus ou moins importante. La ZAT a été soumise à l'élévation

de température sans être portée à fusion. La vitesse de refroidissement conditionne la structure cristalline de cette zone.

▪ **Zones fondues :**

- La zone de liaison : Partie du métal de base participant à la réalisation du joint. Son volume détermine le taux de dilution.
- La zone fondue : Zone de remplissage dont la section dépend directement de la nature du chanfrein et de l'épaisseur à souder.

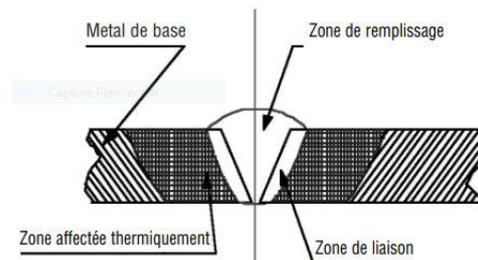


Figure I.17 : Structure d'une soudure[5].

I.6 Les principaux défauts de soudure [6] :

L'inspection des soudures peut être effectuée pour un bon nombre de raisons. Le motif le plus important est sans doute pour déterminer si la qualité de la soudure convient à l'application prévue. Afin d'évaluer la qualité d'une soudure, il faut d'abord identifier et différencier les défauts de soudage.

Dans la norme internationale EN ISO 6520-1 de classification des défauts géométriques dans les soudures des matériaux métalliques, les défauts sont divisés dans les cinq groupes suivants :

- ✚ Fissures.
- ✚ Cavités.
- ✚ Inclusions solides.
- ✚ Manque de fusion et de pénétration.
- ✚ Défauts de forme.

I.6.1 Fissures :

Du point de vue métallurgique, les fissures qui prennent naissance lors du soudage peuvent être regroupées dans deux catégories à savoir la fissuration à froide et la fissuration à chaude.

A) Fissures à chaud :

- ✓ Joints trop étroits.
- ✓ Présence d'impuretés dans la soudure (soufre, phosphore).
- ✓ Métal d'apport incompatible avec le métal de base.

- ✓ Cordon trop petite.
- ✓ TROP de retrait durant ou après le soudage.

B) Fissures à froid :

- ✓ Hydrogéné coincé dans la soudure.
- ✓ Tension interne résiduelles importantes.

Les fissures sont des ruptures du matériau. Elles sont orientées selon le type de défaut. Ces fissures peuvent se trouver aussi bien dans le métal de base que dans le cordon de soudure, dans la zone affectée thermiquement ou la zone de liaison.

Les types de fissures fréquentes :

- Fissure longitudinale : fissure dont la direction est parallèle à l'axe du cordon de soudure.
- Fissure transversale : fissure dont la direction est perpendiculaire à l'axe du cordon de soudure.
- Fissure rayonnante : groupe de fissures issues d'un même point.
- Fissure cratère : fissure se produisant dans un cratère (longitudinale, transversale ou étoile).
- Fissure marbrée : groupe de fissures séparées, d'orientation quelconque.
- Fissure ramifiée : ensemble de fissure reliée entre elles et se présentant sous forme d'arborescence.

I.6.2 Les cavités :

Les cavités (soufflures) sont des défauts fréquents en soudage. Ce sont souvent des bulles de gaz enfermées dans le cordon de soudure. Les piqures sont des soufflures débouchâtes, donc visible en surface.

Les type de soufflures fréquentes :

- Nid de soufflures : groupe de soufflures.
- Soufflure sphéroïdale : souffleur de forme sensiblement sphérique.
- Soufflure uniformément répartie : soufflures sphéroïdales régulièrement distribuées dans le métal fondu.
- Soufflures alignées ou en Chaplet : soufflures distribuées suivant une ligne parallèle a l'axe de la soudure.
- Soufflure allongée : soufflure non sphéroïdale importante dont la dimension principale est approximativement parallèle à l'axe du cordon.
- Piqure : soufflure de petite dimension débouchant en surface.

I.6.3 Les inclusions :

En soudage, les inclusions désignent des corps étrangers présents au cœur du cordon.

Les types d'inclusions fréquentes :

- Inclusion de laitier : résidu de laitier emprisonné dans la soudure.
- Inclusion de flux : résidu de flux emprisonné dans la soudure.
- Inclusion d'oxyde : oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification.
- Inclusion métallique : particule métallique de composition différente au cordon emprisonnée.

I.6.4 Manque de pénétration :

Absence partielle de fusion des bords à souder, laissant subsister un interstice (espace) entre ces bords.

Causes possibles :

- ✓ Energie de soudage trop faible (courant).
- ✓ Vitesse de soudage élevée.
- ✓ Ecartement étroit.
- ✓ Diamètre de l'électrode inapproprié (non-respect de l'écartement et le diamètre de l'électrodes).

I.6.5 Manque de fusion :

Concernant le manque de fusion, il s'agit d'une mauvaise continuité métallurgique entre les matériaux à assembler. Il peut aussi s'agir de manque de fusion des passes les unes avec les autres.

Cause possible :

- ✓ Energie de soudage trop faible (courant).
- ✓ Vitesse de soudage élevée.
- ✓ Pièce humide.
- ✓ Saleté sur la pièce.
- ✓ Non préchauffage de la pièce.
- ✓ Non-respect du temps entre passes.

Chapitre II

Les contrôles destructifs et non destructifs des tubes
soudés en spirale

II.1 Introduction :

Durant toute la phase de production, des contrôles rigoureux et des essais sont effectués à tous les stades de fabrication assurant au final, un produit aux performances élevées, conforme aux normes internationales. La matière première (acier) et les tubes sont soumis à différents contrôles répartis en deux types contrôles destructifs et contrôle non destructifs.

Tous les essais sont effectués en conformité avec les normes API 5 L et avec les spécifications du client.

II.2 Contrôle qualité :

II.2.1 Contrôles nondestructifs (CND) :

Le contrôle non destructif représente un ensemble de méthodes permettant de caractériser l'état d'intégrité des structures ou des matériaux, sans les dégrader.

II.2.1.1 Contrôles des bobines :

Un contrôle à la réception des bobines est effectué sur la base des spécifications techniques (forme, dimensions, défauts de surface tels que les empreintes et les griffures), de la liste de colisage et la spécification des bobines dans le but de s'assurer la conformité des bobines reçues avec les documents d'accompagnement Un second contrôle des documents d'accompagnement (certificats d'analyse chimique et mécaniques) établis par le fournisseur. Les bobines conformes sont saisies sur une liste de réception, et sont identifiées par un marquage indélébile comportant:

- ✓ Numéro de la bobine,
- ✓ Numéro de la coulée
- ✓ La nuance de l'acier,
- ✓ Poids de la bobine,
- ✓ Dimensions,
- ✓ Nom du fournisseur,
- ✓ Identification du projet.

Cette identification permet d'assurer la traçabilité du produit réceptionné. Les bobines non conformes sont isolées avec un marquage spécifique.

II.2.1.2 Contrôle de tube :

Au cours de la fabrication du tube, il est suivi par des contrôles non destructifs pour assurer un bon produit qui répond aux critères du client, Les contrôles non destructifs permettent de détecter aux stades, de la réception de la matière première et du produit fabriquer les défauts susceptibles de modifier les propriétés mécaniques par rapport à celles prévues. Ces contrôles sont :

A) Contrôle visuel :

Il sert à contrôler visuellement l'aspect du tube au cours de la fabrication. Ce contrôle pourra être effectué par l'inspecteur et permettra de mettre en évidence les défauts de formes et dimensionnels selon des critères d'acceptation. En cas d'existence d'un défaut, les contrôleurs signalent au chef par une demande de rectification pour cesser la fabrication.

- **La préparation du chanfrein est contrôlée pour vérifier que :**
 - ✓ La forme et les dimensions du joint sont conformes à la fiche de soudage ;
 - ✓ Les bords et la surface adjacente sont nettoyés ;
 - ✓ Le pointage ou le système de fixation est conforme aux prescriptions techniques.

- **La soudure est contrôlée en cours de réalisation pour vérifier :**
 - ✓ L'absence de défauts visibles et débouchant ;
 - ✓ La fusion des passes est satisfaisante ;
 - ✓ Le nettoyage des passes est correctement réalisé.

- **La soudure est contrôlée en final à l'état brut pour vérifier :**
 - ✓ L'absence de défauts visibles et débouchant ;
 - ✓ La hauteur de la surépaisseur du cordon externe et de la pénétration est conforme ;
 - ✓ La surface de la soudure est saine et régulière ;
 - ✓ La largeur de la soudure est constante ;
 - ✓ La dénivellation ou le désalignement est dans les tolérances de la norme ;
 - ✓ La dissymétrie d'un cordon de soudure d'angle.

Tableau II.1 : paramètre de contrôle visuel.

Paramètre	Unité	Méthode de mesure
Diamètre	mm	Micromètre (ruban gradué)
Épaisseur de la paroi	mm	DM2 (micromètre)
Longueur	mm	Double décimètre
Effet de toit	mm	Comparateur
Dénivellation (décalage de soudure)	mm	Comparateur
Hauteur du cordon de soudure	mm	Calibre d'élévation
Largeur de cordon de soudure	mm	Règle
Angle de chanfrein	mm	Compas de chanfrein réglable
Talon de chanfrein	mm	Règle
Enfoncement	mm	Règle
Masse de tube	kg	Balance

B) Réparation les défauts de cordon de soudure :

Equipée de deux (02) poste son soudage manuel pour réaliser toutes les réparations de défauts préjudiciables de la soudure, signalés en amont par le contrôle visuel.

C) Test Hydrostatique :

Chaque tube est soumis à une épreuve hydraulique le tube est bloqué entre deux tête remplis d'eau et soumis à l'aide de pompe haute pression à la pression prescrite, qui correspond à une sollicitation qui voisine la limite élastique. Elle est maintenue pendant un temps fixé. Cette opération a pour but de vérifier d'une part l'étanchéité du tube, et d'autre part le comportement du tube lors de la montée en pression (résistance de la tôle et du cordon de soudure).



FigureII.1 : test hydrostatique.

D) Contrôle par ultrasons [7] :

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques qui se propagent dans la matière, Le principe consiste à émettre une onde ultrasonore (par un transducteur) qui se propage dans la pièce à contrôler et se réfléchit, à la manière d'un écho, sur les obstacles qu'elle rencontre (défauts, limites de la pièce).

Le contrôle par ultrasons est une méthode permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau, Le principal élément du contrôle ultrasonique est le palpeur.

Le contrôle non destructif ultrasonique est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasonore, ces ondes sont des vibrations élastiques d'origine mécanique qui se propagent dans les milieux matériels, fluides ou solides, très difficilement dans certain gaz mais jamais dans le vide.

L'onde ultrasonore est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec le tube ou par immersion (le tube et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et le tube pour assurer la transmission des ondes. Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes, il y a réflexion. Les ultrasons réfléchis sont captés par un palpeur (qui peut être le même que l'émetteur).

Il y a création d'un « écho » (Les échos sont représentés par des pics), la figure suivante montrent l'écho de fond dans une pièce sans défaut et l'écho de défaut dans une pièce avec défaut.

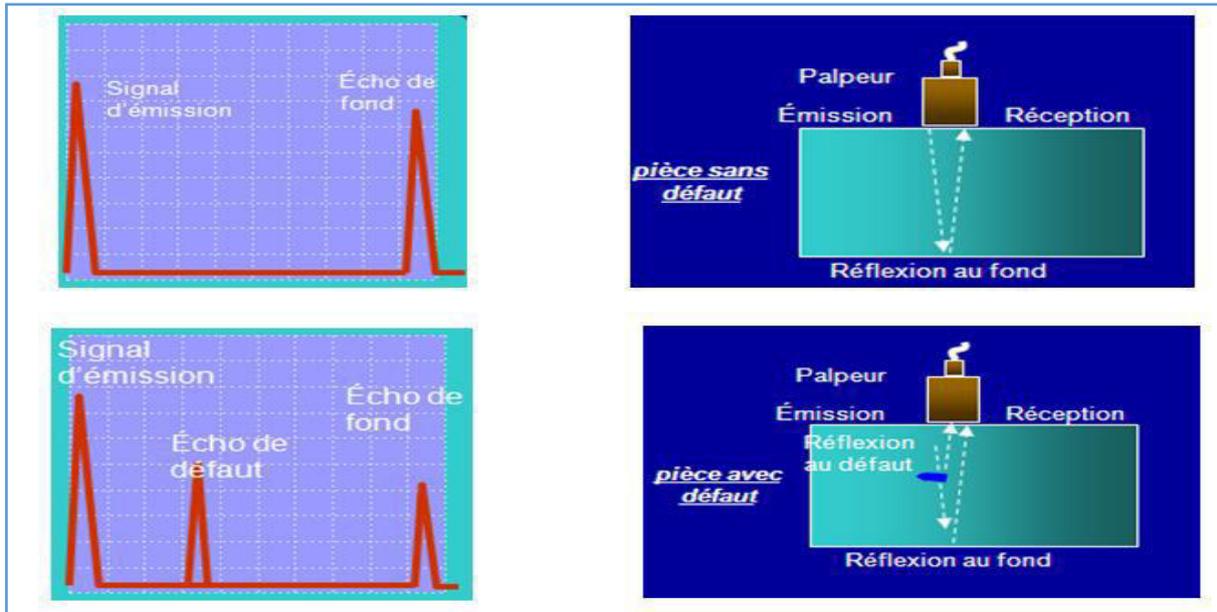


Figure II.2: principe du contrôle par ultrasons [7].



Figure II.3 : Contrôle par ultrason.

E) Contrôle radiographie[8]:

La radiologie industrielle est une méthode du contrôle non destructif utilisée pour examiner la structure interne ou l'intégrité d'échantillons au moyen de rayons x ou un accélérateur de particules ou moyen de rayons gamma générés par une source radioactive.

Les rayons x sont produits par un tube à rayons x leur énergie et leur intensité sont réglable

Donc les rayons émis par un tube radiogène seront caractérisés par trois grandeurs :

- La tension au tube : exprimée en KILOVOLT (détermination leur pouvoir de pénétration).
- Le débit électronique de tube exprimé en milli ampère (indiquant la qualité de rayonnementémis).
- Le temps d'exposition : c'est le temps au cours duquel l'appareil émet des rayons x.

L'intensité d'un faisceau de rayon x s'affaiblit localement en traversant un objet hétérogène cet affaiblissement résulte de l'absorption et de la diffusion de rayonnement par l'objet à examiner, il en résulte que le faisceau émergent forme à la surface du film des zones d'intensité différente dont l'ensemble constitue « l'image radiante ».

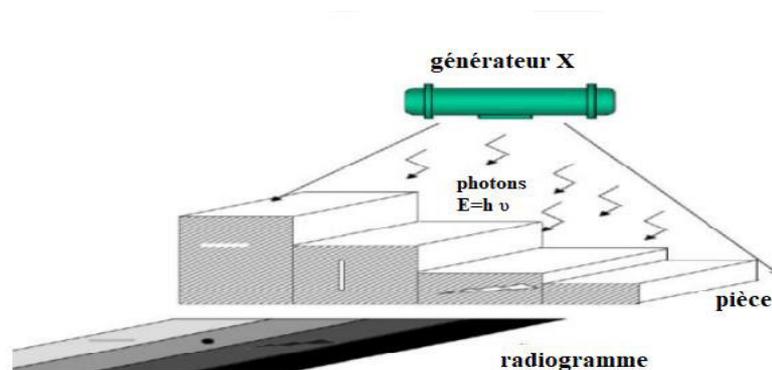
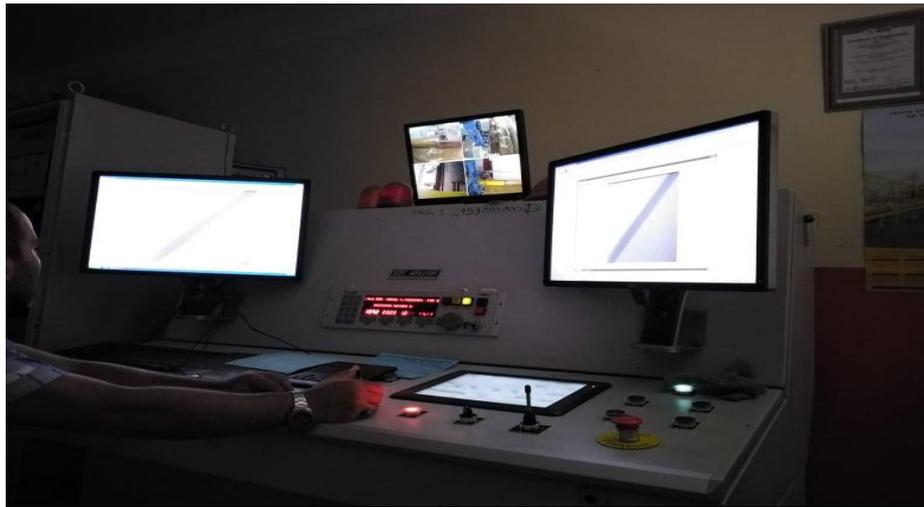


Figure II.4: Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut [8].

- Détecteur numérique :

En utilisant des détecteurs directement sensibles au rayon x. en radioscopie la numérisation se fait en temps réel par transformation d'une image optique en image électronique sans traitement chimique.



FigureII.5 : radiographie numérique.

▪ Film radiographique :

Récepteur d'image constitué d'un support souple tenté ; recouvert sur une ou deux faces d'une émulsion photosensible dont la sensibilité est adaptée au rayonnement, donc le film radiographique comporte trois éléments essentiels :

- Un support.
- Une émulsion.
- Des couches (protectrice et d'adhérence).

L'image obtenue après développement du film (traitement chimique) est la reproduction en négatif de l'image radiante.

L'utilisation de machines automatiques pour le traitement des radiogrammes pris de ces dernières années avec de telles machines : la durée de traitement est de 7 à 14 minutes ; ce qui est remarquablement plus rapide que le traitement manuel avec un produit chimique spécial et des températures de bains plus élevées ; des durées de traitement plus courtes.



Figure II.6 : Développeuse de film radiographique (structurix U).

Matériels d'interprétation :

- Négatoscope.
- Densitomètre.
- Règle.



Figure II.7: Négatoscope (pour observation des défauts).



Figure II.8 : Densitomètre.

- Contrôle de la qualité d'image :

Pour apprécier la qualité de l'image radiographie il faut traduire cette valeur numérique et avoir recours à ce que l'on appelle « indicateur de qualité d'image » (IQI). Les indicateurs de qualité consistent en une série de fils minces de diamètres différents ; on place « IQI » de côté de la source de rayons et en contact immédiat avec l'objet sous examen la sensibilité d'une radiographie est indiquée par le numéro fil visible.

F) Contrôle par magnétoscopie :

La magnétoscopie permet de déceler les défauts débouchant à la surface du cordon de soudure, voire même légèrement sous-jacents. Elle est utilisée particulièrement pour la réparation du cordon de soudure.

Le contrôle magnétoscopique par contraste est effectué pour s'assurer de l'élimination totale du défaut signalé par contrôle visuel et contrôle radiographique.

G) Contrôle final :

C'est un contrôle visuel dimensionnel qui consiste en un contrôle interne et externe de chaque tube en contrôlant les renseignements mentionnés sur la carte tube. Le tube est alors réceptionné ou classé, un numéro séquentiel lui sera attribué. Le contrôleur final veille au marquage des tubes selon la procédure en cours.

II.2.2 Contrôles destructifs :

Les contrôles destructifs des tubes soudés en spirale viennent consolider la qualité du produit fabriqué par ALTUMET. Son laboratoire d'essais mécaniques dispose d'équipements fiables étalonnés périodiquement. Les différents essais destructifs réalisés sur un anneau de tube sont des essais mécaniques (traction, dureté, pliage, résilience), des analyses chimiques et des observations macrographiques.

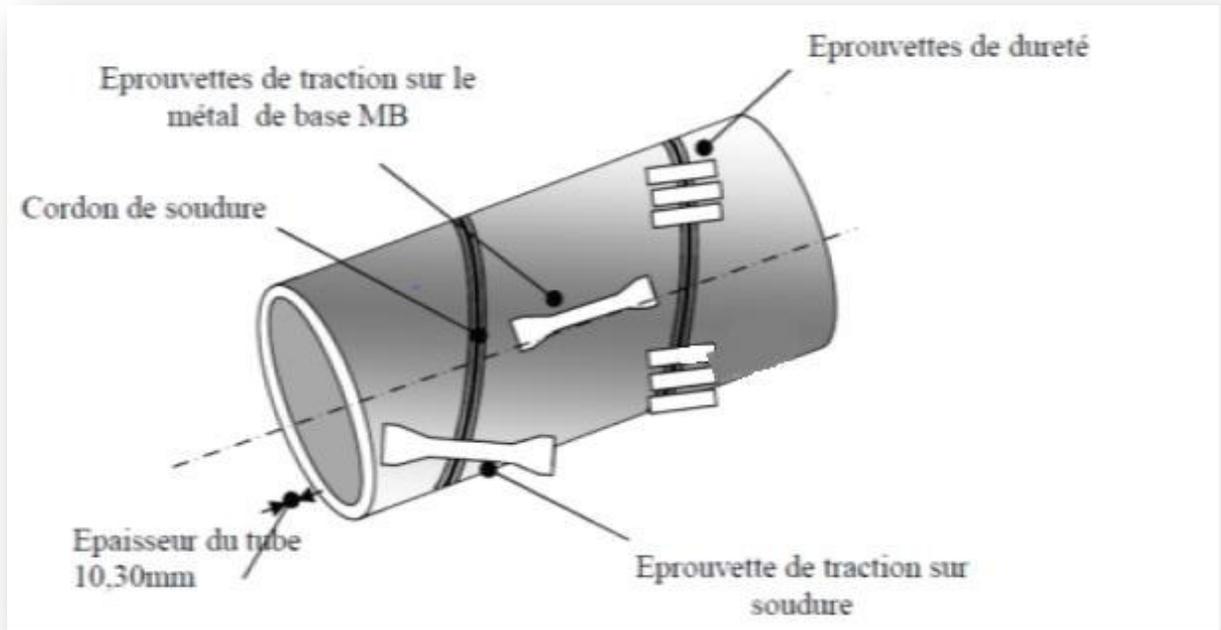
II.2.2.1 Prélèvement et dimensionnement des échantillons [9] :

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 analyses métallographiques. L'essai de dureté et de résilience ainsi que les éprouvettes normalisées en vue des différents essais montrés sur la Figure II.9.

Le prélèvement des échantillons et des éprouvettes se fait selon deux types :

- sur le cordon de soudure afin de caractériser cette dernière.

- hors soudure afin de caractériser le métal de base.



FigureII.9: Sens de découpage des échantillons [9].

II.2.2.2 Les Essai mécanique :

Les essais mécaniques correspondent à des méthodes d'évaluation des propriétés des matériaux susceptibles d'intervenir dans la tenue en service d'une pièce ou d'une construction.

A) Essai de traction :

L'essai de traction consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques :

- ✓ La limite d'élasticité (R_e) : MPa ;
- ✓ La résistance à la traction (R_m) : MPa ;
- ✓ Le pourcentage d'allongement après rupture (A%).

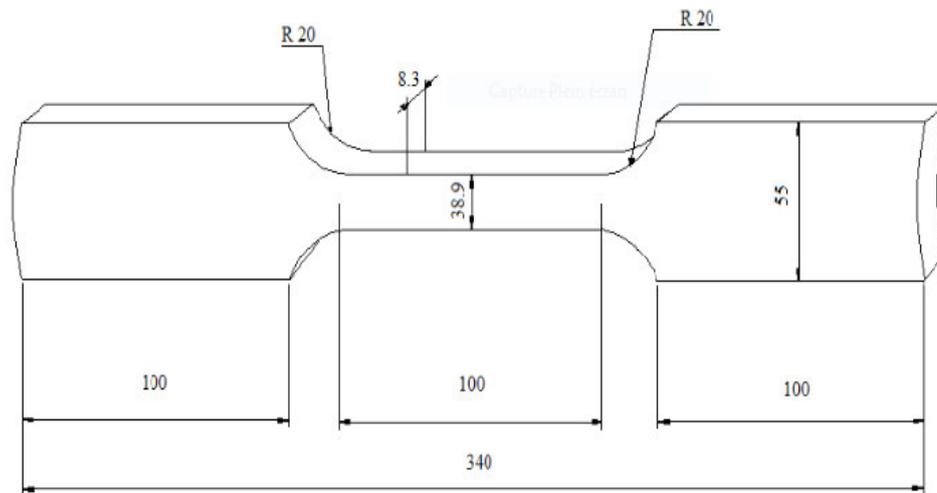


Figure II.10: Éprouvette normalisée selon L'API5L [9].



FigureII.11 : Machine de traction ZWICK/ROELL.

La norme API5L exige deux éprouvettes dans l'essai de traction

- Traction en métal de base.
- Traction sur soudure.

B) Essai de pliage :

Deux essais de pliage en droit et en vers sont réalisés afin de rechercher toutes les imperfections de tension dans la soudure ou prouver sa bonne qualité. Après ces essais, le

cordons de soudure est soumis à un contrôle visuel pour la détection d'éventuels défauts débouchant à la surface. Pour but d'évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc d'un vérifier la ductilité. Ses résultats sont :

- ✓ L'éprouvette ne doit se rompre au pliage.
- ✓ Après pliage la surface tendue de l'éprouvette ne doit pas être fissurée.



FigureII.12 : Essai de pliage.

C) Essai de dureté :

Caractérise la résistance qu'oppose le matériau à la pénétration d'un autre corps plus dur qui lui, S'il y résiste bien, il est dit dur, Sinon il est dit mou. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau considéré.

Pour notre étude en utilisant la dureté **VICKERS Hv**.

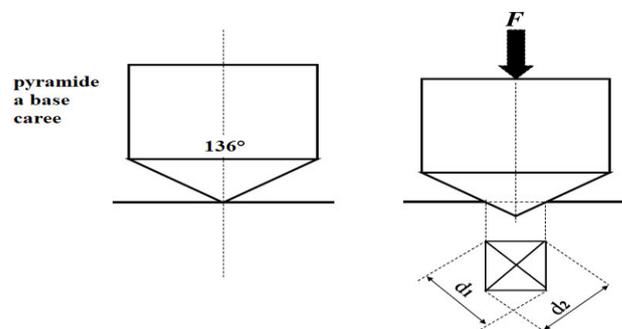


Figure II.13 : Principe de la dureté Vickers [9].

Le nombre H_V de dureté **VICKERS** est donnée par :

$$H_V = 0.189 \frac{F}{d^2} \dots (1)$$

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \dots (2)$$

- H_V : Dureté Vickers [kgmm^{-2}].
- F : Force appliquée [N].
- d : Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm].



Figure II.14 :Microduromètre.

D) Essais de flexion par choc (résilience) :

L'essai de résilience consiste à rompre par un seul choc sur éprouvette préalablement entaillée en son milieu a pour but de mesurer la résistance d'un matériau à la rupture brutale. Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre. On utilise un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc.

L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est égale à :

$$W = m \times g \times h - m \times g \times h' \Rightarrow W = m \times g \times (h - h') \dots (3)$$

W : l'énergie absorbée (joule).

M : masse du mouton-pendule [kg].

g : Accélération terrestre [m s^{-2}] (9.80665).

h : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ [m].

h': hauteur du mouton-pendule à sa position d'arrivée [m].

La résilience au choc :

$$K = \frac{W}{S} \quad \dots(4)$$

K : La résilience au choc [J/cm²].

S : Surface de la section ou surface de rupture [cm²].

A partir du reste des deux plaques, nous avons découpé trois parties au niveau des zones suivantes :

- ✓ Métal de base ;
- ✓ Cordon de Soudure ;
- ✓ ZAT.

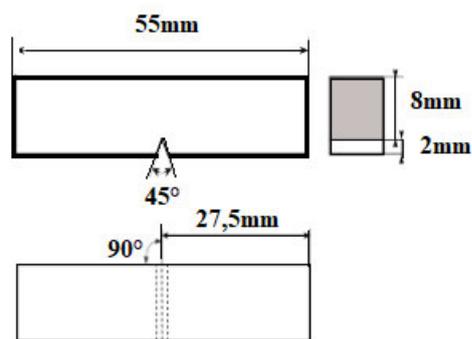


Figure II.15 : La géométrie de l'éprouvette pour l'essai de résilience en V [9].



Figure II.16 : Mouton pendule testwell.

Les caractérisations mécaniques déduites de l'essai de traction peuvent être insuffisante car des ruptures peuvent être obtenues en dessous de la limite d'élasticité dans des conditions particulières rendant le matériau à l'état fragile. L'essai de résilience est un complément essentiel de l'essai de traction.

E) L'examen macrographique :

L'examen macrographique est un examen d'ensemble ; il met en évidence les hétérogénéités qui existent dans le métal ; il est donc particulièrement bien appliqué en soudage car cette opération entraîne, dans l'espace métallique, de nombreuses modifications structurales.

La préparation d'un échantillon pour un examen macrographique comprend :

- ✓ Un sciage ;
- ✓ Un dégrossissage à la meule ;
- ✓ Un polissage ;
- ✓ Une attaque chimique ;
- ✓ Une appareille photo.

Les coupes sont faites par une scie mécanique munie d'un système de refroidissement évitant ainsi les phénomènes d'écrouissage et l'échauffement des pièces. Le polissage est poussé jusqu'à l'obtention d'une surface aux qualités de réflexion du miroir, L'attaque chimique permettra enfin de révéler les différentes zones.

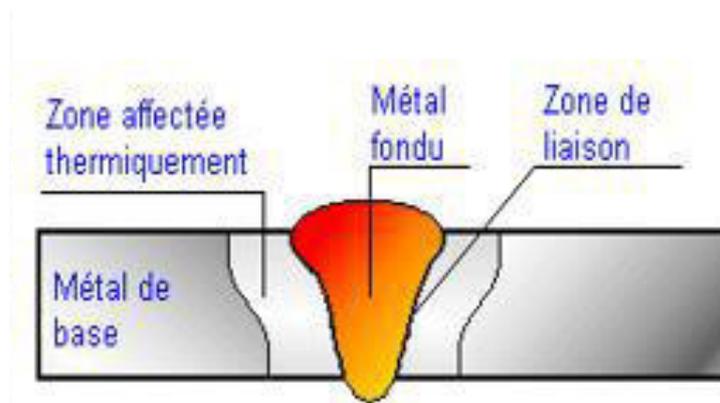


Figure II.17: Les différentes zones révélées par l'attaque chimique.

F) Analyse chimique :

La composition chimique du matériau à été faite par analyse spectrale par un spectromètre de type FOUNDRY-MASTER PRO disponible au niveau du laboratoire de métallurgie de ALTUMET.

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyses sont comparés avec celle du fournisseur et les exigences du client.



Figure II.18 :spectromètre de type FOUNDRY-MASTER PRO.

Chapitre III

Étude expérimentale

III.1 Objectif de travail :

Principe de ce travail est de présenter la caractérisation physique et mécanique des tubes à gaz destinés aux applications industrielles par des méthodes destructives et non-destructives.

Dans ce chapitre, on va étudier toutes les expériences réalisées durant notre stage. Les aciers API 5L X70M PSL2 SAW et X52M utilisés par L'entreprise Algérienne des Tubes Métalliques ALTUMET de REGHAIA pour la fabrication des tubes, on a pris des échantillons en aciers X70M et X 52M à partir de tube.

- Aciers X70M l'épaisseur nominale du tube étudié est 9,59 mm et de diamètre 711 mm avec une longueur variable.
- Aciers X52M l'épaisseur nominale du tube étudié est 10,30 mm et de diamètre 406 mm avec une longueur variable.

III.2 Présentation de l'organisme d'accueil :

L'unité de ANABIB, issue de la nouvelle restructuration de l'Entreprise Nationale de Tube et Transformation des Produits Plats « ENTTPP », est implantée à la Zone Industrielle de REGHAIA, depuis 1959, par le groupe Français « VALLOUREC » sous le nom d'ALTUMEC. Suite à la politique commerciale introduite en l'an 2000, l'unité GROS TUBES est devenue une FILIALE de ANABIB avec une nouvelle organisation structurelle, sous le nom d'ALTUMET « Algérienne Tubes Métallique ».

L'unité ALTUMET spécialisée dans la fabrication et la commercialisation des tubes en acier soudés spirale, ainsi que la prestation de revêtement pour les tubes en acier, destinés essentiellement aux secteurs des hydrocarbures et de l'hydraulique.

Pour assurer la production et le contrôle des tubes l'entreprise est dotée d'une machine de soudage NLAT automatisée qui réalise la préparation des bouts par chanfreinage et le soudage SAW spirale.

Les clients de l'unité sont principalement les donneurs d'ordre potentiels comme SONATRACH, NAFTAL, SONELGAZ...etc. aussi de quelque particulier (petite et moyenne entreprise privés).

Les concurrents de l'unité nationale : ALFAPIPES, unités Ghardaïa et Annaba,

Privés : ETRHB HADDAD SPA, MAGHREB TUBES SPA.

III.2.1 Les produits de l'unité ALTUMET :

La fonction principale de l'entreprise ALTUMET (Algérienne des Tubes Métalliques) est la fabrication des tubes métalliques, destinés aux canalisations de fluides (eau, gaz, pétrole...etc.) et constructions métalliques (poteau, supports ...).

ALTUMET peut fabriquer des tubes en conformité avec les normes internationales :

- ✚ NF EN 10224 (Normes Européenne, Norme Française).
- ✚ API 5L (American Petroleum Institute).

III.2.2 Gamme de fabrication :

✚ Tubes pour transport hydraulique :

ALTUMET propose une gamme de tubes produits selon la norme européenne, norme française ;NF EN 10224 pour les aciers au carbone et faiblement alliés à haute limite d'élasticité, longueur de 6 à 12,20 m.

✚ Tubes pour transport hydrocarbures et gaz :

ALTUMET peut produire des tubes strictement adaptés aux pressions de fonctionnement de chaque projet en utilisant une nuance d'acier supérieure, de nuance Grade B, A, X 70 selon la norme API 5L.

Tableau III.1: La gamme des tubes produit.

Type de machine	Largeur de bande	Diamètre fabriqué	Acier utilisé (nuance)
NLAT	$400 \leq L \leq 1200$	$406 \leq \varnothing \leq 914$	A 37 – X 42- X52- X70

III.3 Contrôles destructifs :

III.3.1 Prélèvement d'échantillons des plaques :

A partir d'un tube on va découper une virole comme illustre la figure III.1. Ensuite on va prélever deux plaques à partir de cette virole, l'une transversale par rapport à la virole, qui contient seulement le métal de base, et l'autre transversale au cordon de soudure.

Les deux plaques obtenues sont illustrées par la figure III.3.



Figure III.1 : Une virole découpée à partir d'un tube.



Figure III.2 : Prélèvement des plaques.



(a)

(b)

Figure III.3 : (a) Plaque totalement en métal de base et (b) Plaque contenant le cordon de soudure.

III.3.2 Composition chimique des aciers X70M et X52M utilisés dans ce travail :

Le contrôle de la composition chimique se fait sur le métal de base. Les résultats d'analyses sont comparés avec ceux du fournisseur et les exigences du client, ce qui permet de définir les premiers critères d'acceptation d'une commande.

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.

III.3.2.1 Préparation de l'éprouvette :

A partir de la plaque du métal de base on va découper une éprouvette de dimensions $L \times L = 30\text{mm} \times 30\text{mm}$ (Figure III.4). L'éprouvette est soumise à un polissage mécanique avec le ruban afin d'obtenir une surface lisse.



Figure III.4 : Eprouvette utilisée pour la composition chimique.

III.3.2.2 Présentation des résultats :

À l'aide d'un spectromètre de type FOUNDRY-MASTER PRO, la composition chimique de cet acier a été déterminée. Le tableau III.2 représente la composition chimique de l'acier X52M et le tableau III.3 représente la composition chimique de l'acier X70M utilisé.

Tableau III.2 : La composition chimique de l'acier X52M.

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
L'acier grade API X52M	0,0476	0,274	1,17	0,0038	0,0028	0,0268	0,0044	0,0226	0,0213

Co	Cu	V	Nb	Ti	Pb	Sn	B	Ca
0,008	0,0164	0,0033	0,0395	0,0041	<0,0010	0,0030	0,0002	0,0006

Zr	Zn	As	CE	SO	Ci
0,0013	0,0017	0,0023	0,111	0,047	0,252

Tableau III.3: La composition chimique de l'acier X70M.

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
L'acier grade API X70M	0,0441	0,350	1,78	0,0026	0,0011	0,0429	0,0048	0,0244	0,0250

Co	Cu	V	Nb	Ti	Pb	Sn	B	Ca
<0,0005	0,0274	0,0037	0,0606	0,0220	0,0031	0,0041	<0,0001	0,0010

Zr	Zn	As	CE	SO	Ci
<0,0010	0,0034	0,0015	0,138	0,086	0,355

Tableau III.4 : La norme API5L de l'analyse chimique.

Nuance d'acier	Fraction massique, basée sur les analyses sur coulée et sur produit % maximum									Carbone équivalent % maximum	
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Autres	CEII W	CEPc m
X70M	0,12 ^f	0,45 ^f	1,70 ^f	0,025	0,015	g	g	g	h,l	0,43	0,25
X52M	0,22	0,45	1,40	0,025	0,015	d	d	d	e,l	0,43	0,25

f :Sauf accord contraire.

g : Sauf accord contraire, Nb + V + Ti ≤ 0.15%.

d : Nb = V = Ti ≤ 0.15 %.

h :Sauf accord contraire, Cu ≤ 0.50% Ni ≤ 0.50% Cr ≤ 0.50% et MO ≤ 0.50%.

e : Sauf accord contraire, Cu ≤ 0.50 %, Ni ≤ 0.30% Cr ≤ 0.30% et Mo ≤ 0.15%.

l : Aucune addition volontaire de bore n'est permise, et le bore résiduel doit être d 0,001 %.

III.3.2.3 Analyse et interprétation des résultats :

D'après le tableau III.2 et III.3, on constate que l'acier X70M et l'acier X52M ont une faible teneur en carbone. La faible teneur en carbone est nécessaire pour améliorer la soudabilité et la résilience de l'acier.

Le carbone équivalent (CE) mesuré est ci-dessus de la valeur maximale (0,25 %) indiquée par la norme API. Ceci est exigé pour augmenter la soudabilité.

Les éléments niobium, le titane et le vanadium contribuent à l'amélioration de la limite d'élasticité, la micro dureté, la résilience et la soudabilité.

III.3.3 Essai de résilience:

III.3.3.1 Préparation des éprouvettes :

A partir du reste des deux plaques, on va découper trois parties au niveau des zones suivantes :

- ✓ MB : Métal de base.
- ✓ Cordon de Soudure.
- ✓ ZAT : la zone affectée thermiquement.

Le découpage des éprouvettes de dimensions : 55mm × 10 mm × 10mm (Figure III.5).



Figure III.5 : Epreuve pour l'essai de résilience en V.

III.3.3.2 Présentation des résultats :

À l'aide d'une machine de résilience Charpy type, voici les résultats de l'énergie absorbée et de la résilience pour chaque type d'éprouvette sont présentés respectivement dans les tableaux.

➤ **Les Résultats de l'acier X52M :**

Sur les tableaux ci-dessous la résilience de l'acier X52M est plus élevée dans la ZAT par rapport à Soudure qui est d'autant plus élevée que dans le métal de base, comme on peut le voir sur le tableau III.5.

Tableau III.5 : Les valeurs de la résilience et l'énergie absorbée pour les différentes zones de l'acier X52M.

Position Entaille	Dimension éprouvette (mm)			Surface Entaille (cm ²)	Energie (Joules)		Résilience (joules/cm ²)
	L	I	EP		Individuelle	Moyenne	Moyenne
MB	55	10	7,5	0,66	180	170,00	283,33
	55	10	7,5	0,66	146		
	55	10	7,5	0,66	184		
ZAT	55	10	7,5	0,66	204	206,33	343,89
	55	10	7,5	0,66	209		
	55	10	7,5	0,66	206		
S	55	10	7,5	0,66	204	204,67	341,11
	55	10	7,5	0,66	216		
	55	10	7,5	0,66	194		

La résilience de la ZAT est supérieure à celle de la soudure qui est supérieur à la résilience du MB. Ce phénomène s'explique par le fait que la ZAT subit un traitement thermique à partir de soudage, cette zone est donc plus détendue que le MB.

➤ **Les Résultats de l'acier X70M :**

On a noté que la résilience de l'acier X52M est globalement plus élevée que X70M. Comparer les résultats des tableaux III.6.

Tableau III.6 : Les valeurs de la résilience et l'énergie absorbée pour les différentes zones de l'acier X70M.

Position Entaille	Dimension éprouvette (mm)			Surface Entaille (cm ²)	Energie (Joule)		Résilience (joules/cm ²)
	L	l	EP		Individuelle	Moyenne	Moyenne
MB	55	9,5	7,8	0,74	210	213,33	291,97
	55	9,3	8,2	0,76	220		
	55	9,5	7,5	0,71	206		
	55	9,3	7,7	0,72	224		
	55	9,4	7,7	0,72	212		
	55	9,6	7,6	0,73	208		
ZAT	55	9,4	6,8	0,64	144	136,16	217,48
	55	9,4	6,6	0,62	142		
	55	9,4	6,5	0,61	132		
	55	9,3	6,9	0,64	150		
	55	9,5	6,7	0,64	117		
	55	9,5	6,4	0,61	132		
S	55	9,4	6,7	0,63	153	166,5	241,66
	55	9,4	6,7	0,63	156		
	55	9,3	6,7	0,62	144		
	55	9,5	8	0,76	200		
	55	9,3	8	0,74	192		
	55	9,3	8	0,74	154		

On note que ces essais de résilience ont été faits à une température de 0°C, cette température est ainsi choisie afin d'approcher au mieux les températures de travail de nos aciers. La figure suivante donne les résultats sous forme d'histogramme (figure III.6).

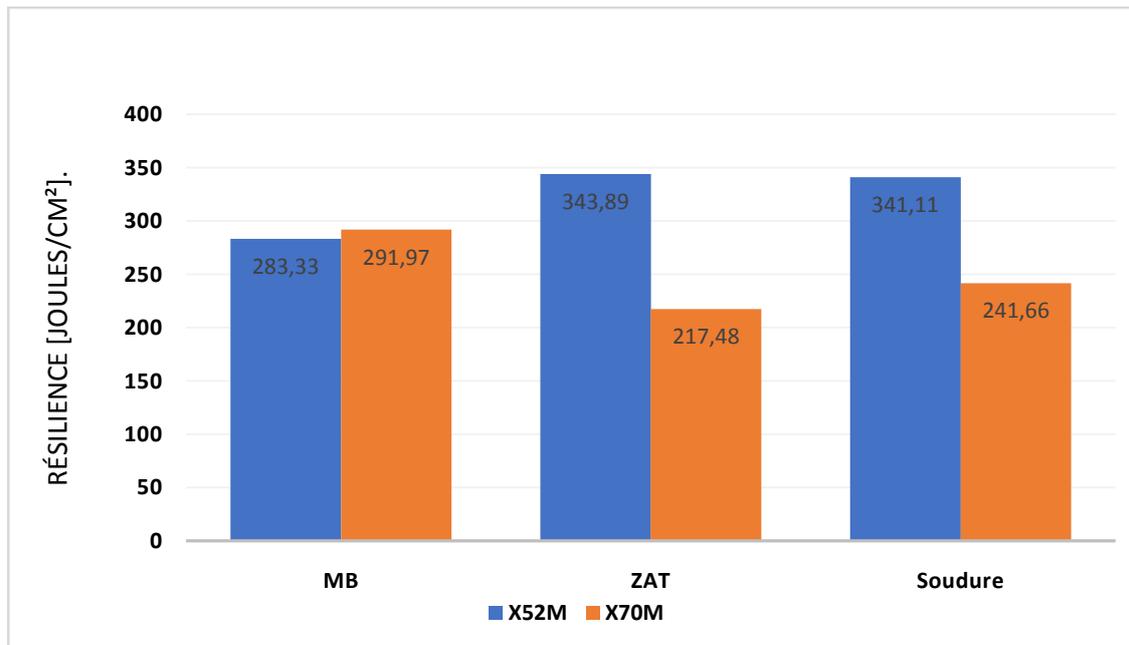


Figure III.6 : Histogramme de la résistance mécanique du X52M et X70M.

On remarque que la résilience du X52 est relativement plus élevée que celle du X70, cependant elle est très faible au niveau du métal de base.

III.3.4 L'essai de dureté :

III.3.4.1 Préparation des éprouvettes :

En utilisant plaque qui contient le cordon de soudure, on va découper une éprouvette de dimension 50mm × 30mm (Figures III.7). Ensuite, on va effectuer un polissage mécanique aux papiers abrasifs de carbure de silicium jusqu'à l'obtention d'une surface lisse. Afin de faire apparaître les différentes zones (métal de base, ZAT, cordon de soudure).



Figure III.7 : Eprouvette pour l'essai de dureté.

Tableau III.7 : Norme API 5L de dureté.

Les zones	Les points	La dureté
Métal de base (Mb)	6 Points	250HV10
Zone affectée thermiquement (ZAT)	6 points	250HV10
Cordon de soudure (ZF)	4 Points	250HV10
La ligne de liaison.	6 Points	250HV10

III.3.4.2 Présentation des résultats :

Les résultats obtenus en faisant des mesures sur différentes zones sont récapitulés dans les tableau III.8 et tableau III.9, en utilisant les notations suivantes pour différencier entre les différentes zones :

Les points (1,8,9,15,16,22) sont appliqués sur le métal de base MB.

- Les points (4,5,12,19) sont appliqués sur la soudeur interne et externe.
- Les points (2,7,10,14,17,21) sont appliqués sur la zone affectée thermiquement.
- Les points (3,6,11,13,18,20) sont appliqués sur la ligne de liaison.

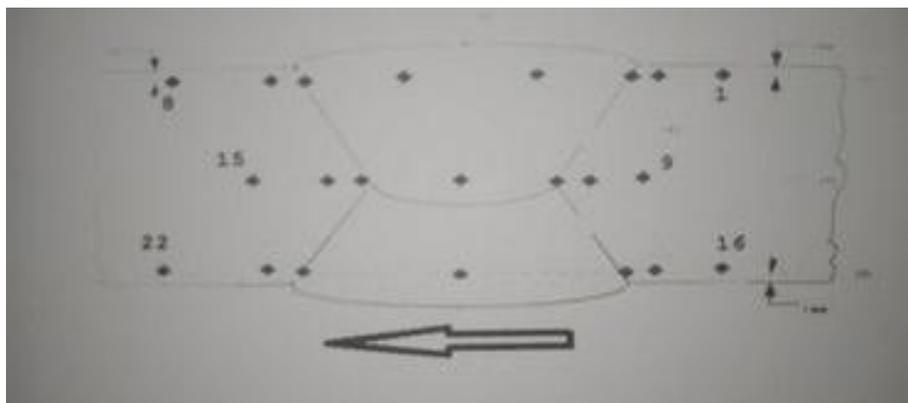


Figure III.8 : La répartition des points de mesure pour la dureté.

➤ **Teste : HV10, matériau nuance X70M.**

Force d'essai (d'après norme) :98,07N.

Tableau III.8 : Les valeurs de la dureté (HV 10) pour différents points de mesure de l'acier X70M

Nr	dh (μm)	dv (μm)	D (μm)	HV10	
MB	1	289,5	294,3	291,9	218
	8	288,4	300,3	294,3	214
	9	286,1	297,9	292,0	217
	15	284,3	297,2	290,7	219
	16	287,2	298,0	292,6	217
	22	288,7	296,2	292,5	217
ZAT	2	296,6	297,4	297,0	210
	7	295,2	302,9	299,0	207
	10	306,1	307,8	306,9	197
	14	301,8	301,8	301,8	204
	17	299,3	305,7	302,5	203
	21	294,1	291,8	292,9	216
Ligne de liaison	3	289,2	291,9	290,6	220
	6	290,0	295,9	292,9	216
	11	299,9	296,2	298,1	209
	13	300,6	301,9	301,2	204
	18	281,0	286,5	283,7	230
	20	277,3	282,2	279,8	237
Soudeur	4	302,7	297,6	300,2	206
	5	295,7	289,5	292,6	217
	12	292,6	286,2	289,4	221
	19	282,3	274,7	278,5	239

➤ **Teste : HV10, matériau nuance X52M.**

Tableau III.9 :Les valeurs de la dureté (HV 10) pour différents points de mesure de l'acier X52M.

Nr	dh (μm)	dv (μm)	D (μm)	HV10	
MB	1	317,5	324,3	320,9	180
	8	307,1	321,7	314,4	188
	9	305,4	315,0	310,2	193
	15	329,5	324,1	326,8	174
	16	316,7	313,3	315,0	187
	22	313,8	322,8	318,3	183
ZAT	2	297,5	308,2	302,9	202
	7	306,6	311,6	309,1	194
	10	310,8	324,2	317,5	184
	14	328,2	325,7	326,9	173
	17	309,5	325,5	317,5	184
	21	322,8	306,5	314,7	187
Ligne de liaison	3	292,9	325,7	309,3	194
	6	293,6	324,7	309,2	194
	11	306,3	302,2	304,2	200
	13	297,8	311,6	304,7	200
	18	299,0	287,5	293,3	216
	20	282,9	313,9	298,4	208
Soudeur	4	293,1	304,3	298,7	208
	5	297,8	316,9	307,3	196
	12	316,3	310,8	313,6	189
	19	293,8	290,4	292,1	217

La figure suivante donne les résultats de dureté sous forme d'histogramme (figure III.9).

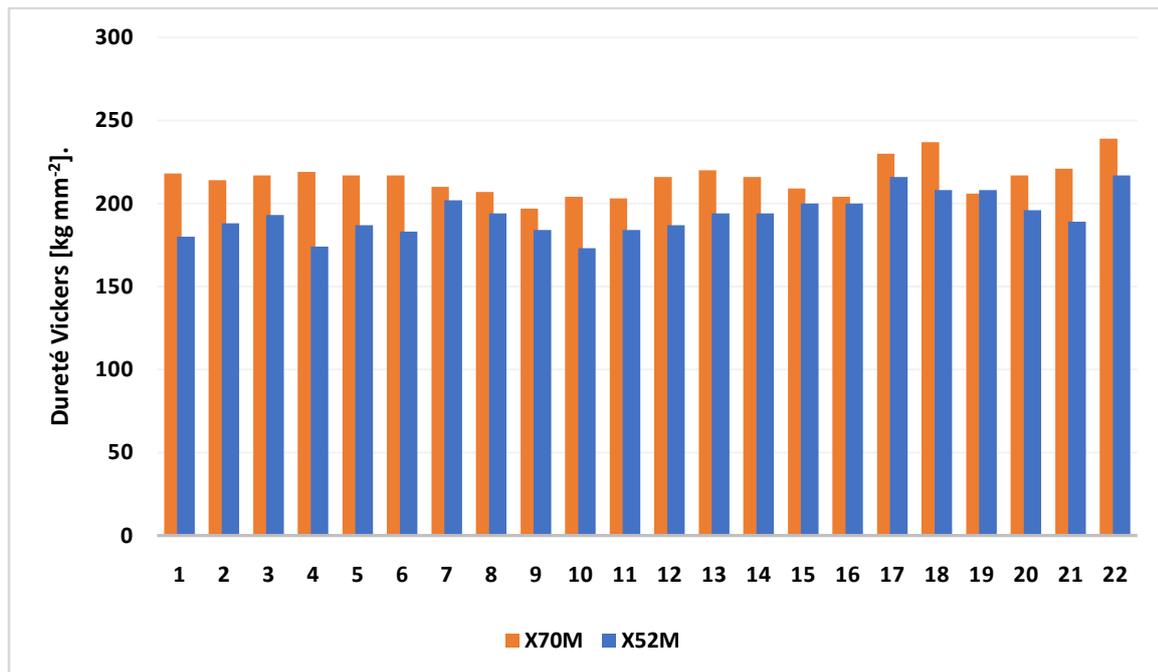


Figure III.9 : Histogramme de la dureté mécanique du X52M et X70M.

On remarque que la dureté du X70M est relativement plus élevée que celle du X52M.

III.3.5 L'essai de traction :

Dans le but de déterminer les courbes charge– déformation et les propriétés mécaniques de l'acier X70M et acier X52M.

III.3.5.1 Préparation des éprouvettes :

A partir des plaques a et b, on va découper des éprouvettes de largeur 50 mm de chacune. La forme ultime d'une éprouvette d'un essai de traction (Figure III.10).



Figure III.10 : Eprouvette pour l'essai de traction.

III.3.5.2 Présentation des résultats :

Les essais de traction ont été effectués à l'aide d'une machine de traction type BZ1-MH A25.ST01.3A capacité de 600KN qui est reliée directement avec un système informatisé pour l'acquisition des données expérimentales.

Tableau III.10 : Norme API5L pour les essais de traction.

Essai de traction							
Nuance du tube	Métal de base						Cordon de soudure
	Limite d'élasticité $R_{t\frac{1}{2}}$ MPA (psi)		Résistance à la traction MPA (psi)		Rapport $R_{t0,5}/R_m$	Allongement A%	Résistance à la traction Rm MPA (psi)
	Min	Max	Min	Max	Max	Min	Min
X52M	360 (52200)	530 (76900)	460 (66700)	760 (110200)	0,93	22	460 (66700)
X70M	485 (70300)	635 (92100)	570 (82700)	760 (110200)	0,93	22	570 (82700)

➤ **Teste : essai de traction, matériau nuance X70M.**

▪ **Sur des éprouvettes en métal de base :**

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal de base sont illustrés par la figure III.11 et le tableau III.11. On peut remarquer qu'il existe une bonne concordance entre les résultats obtenus par les cinq tests. Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des cinq courbes ou bien utiliser directement les résultats obtenus par le premier test, on peut remarquer aussi qu'il existe trois différentes zones des courbes obtenues :

- La première zone : domaine des déformations élastiques ou réversibles.
- La deuxième zone : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique.
- La troisième zone : la déformation plastique non répartie. Il y a striction de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

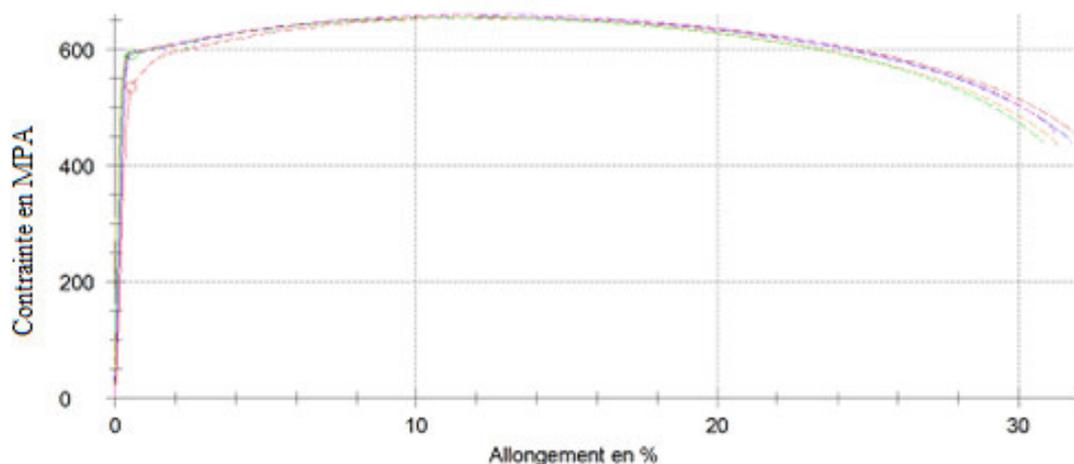


Figure III.11 : Courbes d'essais de traction sur le métal de base (X70M).

Tableau III.11 : Résultats des essais de traction sur le métal de base (X70M).

Légende	Nr	Rp0,5 MPa	Rm MPa	Rp0,5/Rm %	R _B MPa	a ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²	A _t %
	1	562	656	85,68	447	9,2	38	349,60	30,4
	2	595	655	90,76	439	9,2	39,1	359,72	30,8
	3	598	657	90,98	439	9,2	39,1	359,72	31,2
	4	599	657	91,05	430	9,2	38	349,60	31,5
	5	597	660	90,41	454	9,2	37,9	348,68	31,2

▪ **Sur des éprouvettes contenant le cordon de soudure :**

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal contenant le cordon de soudure sont illustrés par la figure III.12 et le tableau III.12. On peut remarquer qu'il existe un bon accord entre les résultats obtenus par les tests 1, 3 et 4 à l'exception du test 2 où une différence assez remarquable a été constatée. Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des trois courbes des tests 1, 3 et 4 ou bien utiliser directement les résultats obtenus par l'un des trois tests (test 1, test 3 et 4). On peut remarquer aussi qu'il existe quatre différentes zones des courbes obtenues :

- La première zone : la charge.

- La deuxième zone : domaine des déformations élastiques ou réversibles.
- La troisième zone : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique.
- La quatrième zone : la déformation plastique non répartie. Il y a striction de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

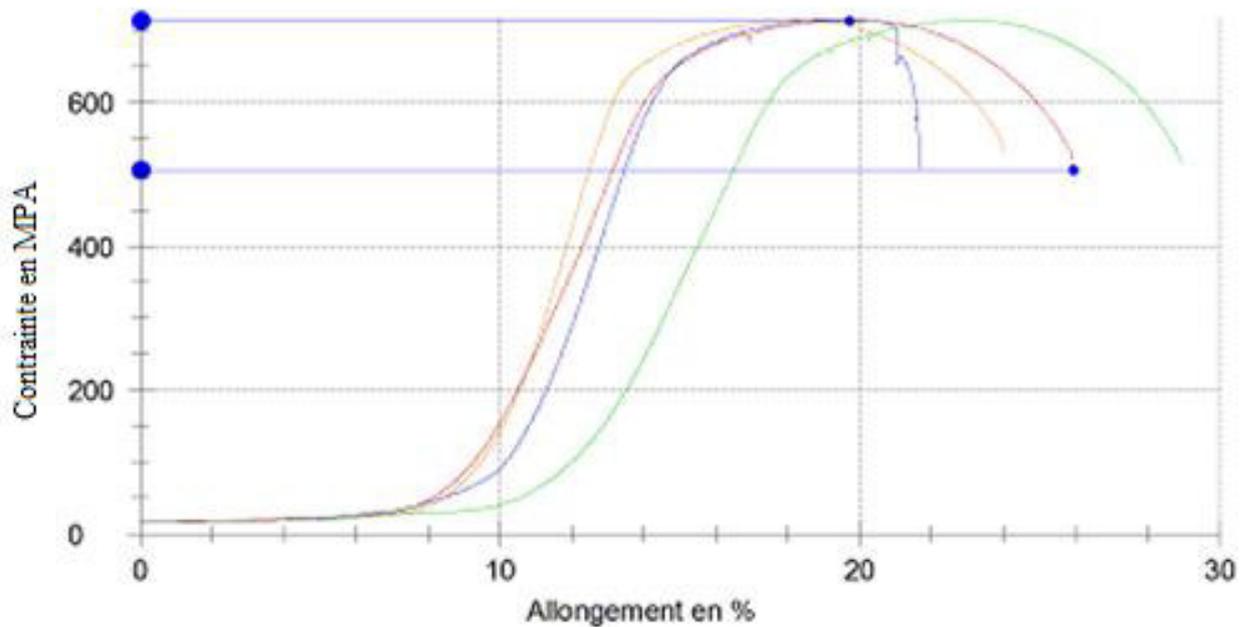


Figure III.12: Courbes d'essais de traction sur le métal contenant le cordon de soudure (acier X70M).

Tableau III.12: Résultats des essais de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure (acier X70M).

Légende	Nr	R _m MPa	R _B MPa	a ₀ mm	b ₀ mm	s ₀ mm ²
	1	714	505	9,1	39,2	356,72
	2	714	514	9,1	37,9	344,89
	3	715	508	9,1	37,9	344,89
	4	714	530	9,1	37,9	344,89

➤ **Teste : essai de traction, matériau nuance X52M.**

▪ **Sur des éprouvettes en métal de base :**

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal de base sont illustrés par la figure III.13 et le tableau III.13. On peut remarquer qu'il existe une bonne concordance entre les résultats obtenus par les quatre tests. Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des quatre courbes ou bien utiliser directement les résultats obtenus par le premier test. On peut remarquer aussi qu'il existe trois différentes zones des courbes obtenues :

- La première zone : domaine des déformations élastiques ou réversibles.
- La deuxième zone : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique.
- La troisième zone : la déformation plastique non répartie. Il y a striction de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

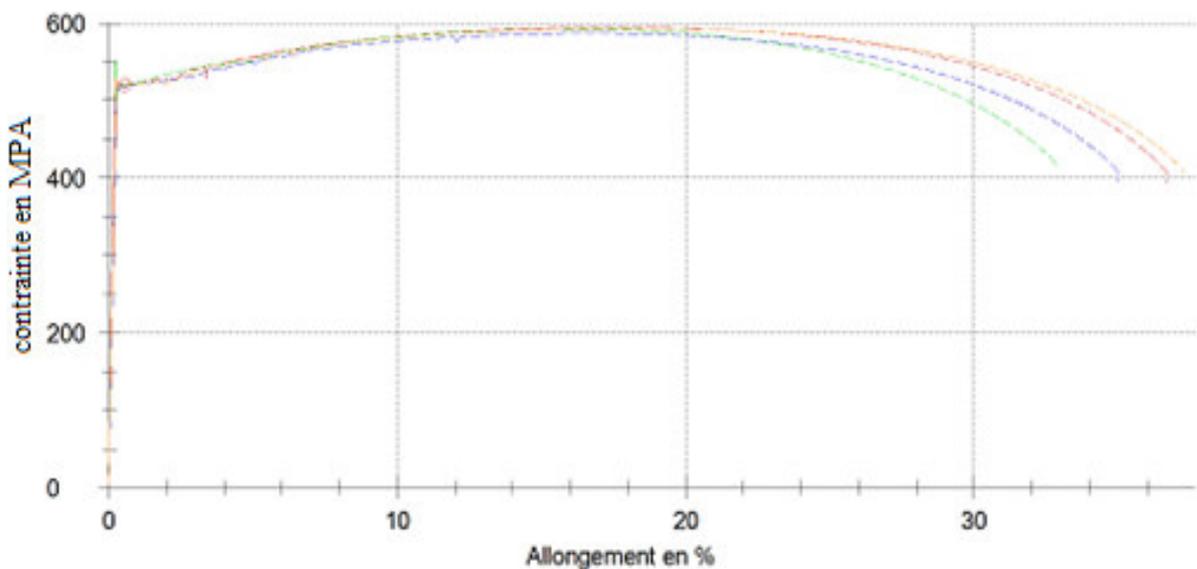


Figure III.13: Courbes d'essais de traction sur le métal de base (acier X52M).

Tableau III.13 : Résultats des essais de traction sur le métal de base(acierX52M).

Légende	Nr	Rp0,5 MPa	Rm MPa	Rp0,5/Rm %	RB MPa	a ₀ mm	b ₀ mm	S ₀ mm ²	Af%
	1	521	594	87,64	393	10,3	38	391,40	35,8
	2	521	592	87,97	414	10,3	38	391,40	31,8
	3	518	587	88,36	395	10,3	38	391,40	37,80
	4	518	587	88,36	395	10,3	38	391,40	37,79

▪ **Sur des éprouvettes contenant le cordon de soudure :**

Les résultats contrainte-déformation obtenus sur le métal contenant le cordon de soudure sont illustrés par la figure III.14 et le tableau III.14. On peut remarquer qu'il existe un bon accord entre les résultats obtenus par les tests 1, 2 et 4 à l'exception du test 3 où une différence assez remarquable a été constatée. Par conséquent, il est préférable de travailler avec la moyenne des trois courbes des test 1, 2 et 4 ou bien utiliser directement les résultats obtenus par l'un des trois test (test 1, test 2 et 4). On peut remarquer aussi qu'il existe quatre différentes zones des courbes obtenues :

- La première zone : la charge.
- La deuxième zone : domaine des déformations élastiques ou réversibles.
- La troisième zone : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique.
- La quatrième zone : la déformation plastique non répartie. Il y a striction de l'éprouvette jusqu'à la rupture.

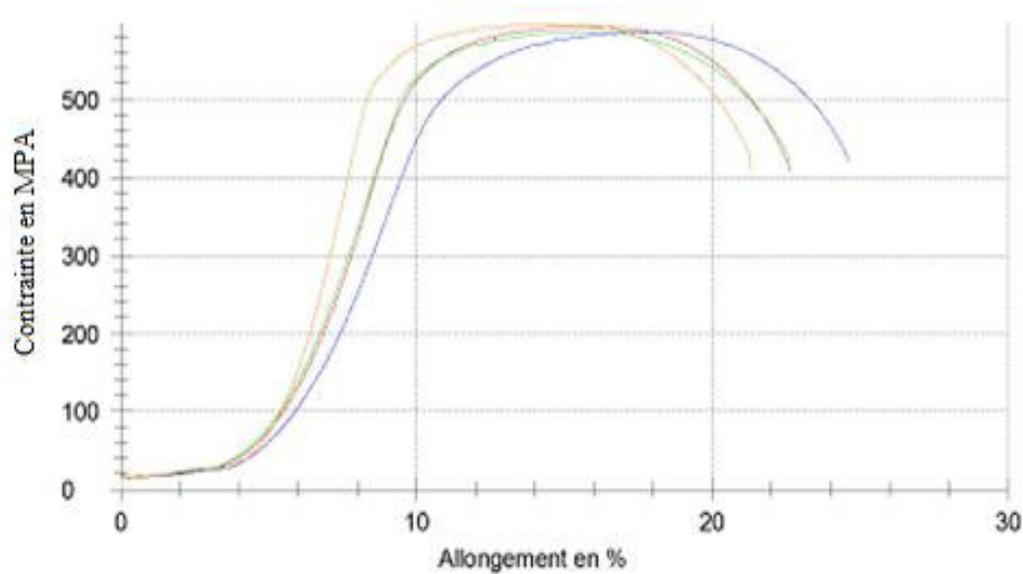


Figure III.14 : Courbes d'essais de traction sur le métal contenant le cordon de soudure (acier X52M).

Tableau III.14 : Résultats des essais de traction sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure (acier X52M).

Légende	Nr	R_m MPa	R_B MPa	a_0 mm	b_0 mm	s_0 mm ²
	1	592	407	10,3	38	391,40
	2	586	418	10,3	38	391,40
	3	586	419	10,3	38	391,40
	4	596	409	10,3	38	391,40

Remarque : Zone de rupture localisée dans le métal de base sur les éprouvettes contenant le cordon de soudure.

L'histogramme figurant sur la figure III.15 résume l'essentielle des caractéristiques des deux nuances étudiées, le but est de comparer ces dernières.

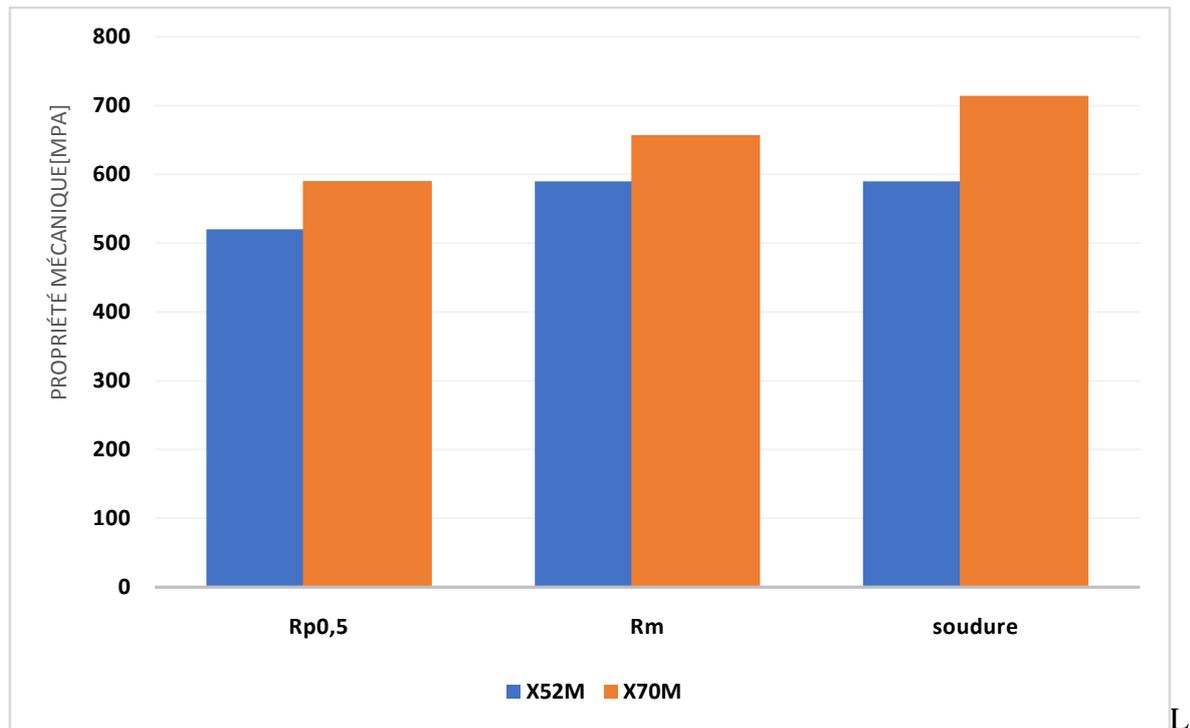


Figure III.15 : Histogramme des propriétés mécaniques du X52M et X70M.

On remarque aisément que la propriété mécanique du X70M est relativement supérieure à celle du X52M, cela s'explique par l'influence des éléments d'addition.

III.4 Contrôles non destructifs :

Dans cette partie on a appliqué le contrôle non-destructif sur les tubes suivants 2090D, 412D, 2004D, 2113D, 2078D, 2025D, 2249D, 3082D qui sont fabriqués pour la commande gaz, client SADAG et nuance X52M d'épaisseur nominale du tube étudié est 10,30 mm et de diamètre 406mm.

III.4.1 Les méthodes de contrôle :

III.4.1.1 Test hydrostatique :

Les tubes sont testés à 90% de leur limite élastique selon API 5L et la spécification du client. Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai pendant au moins 15 secondes et pression de test 117 bars.

Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement à l'aide des courbes.

III.4.1.2 Contrôle ultrasons :

Le contrôle aux ultrasons est réalisé sur le cordon de soudure et métal de base est contrôlé par une machine électrique de modèle KRUTKRAMEUR, équipé de :

- End 1 pour contrôler de début de tube,
- Tête 1 on trouve quatre transmetteurs avec un angle de 70° et sont disposées de quatre palpeurs,
- Tête 2 qui contient six palpeurs plats,
- Tête 3 pour contrôler le métal de base à 100%,
- End 2 pour contrôler la fin de tube.

Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur PC et imprimés sur papier (rapport Ultrason ou le numéro de tube y est reporté ; les indications des défauts sont affichées d'une manière acoustique et optique). Pour contrôler la fiabilité de l'installation ultrasonique, un tube étalon est passé périodiquement en début et fin contrôle de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tous les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle.

III.4.1.3 Contrôle radiographique :

a) Contrôle radiographique classique :

La technique est basée sur la pénétration de rayonnement X par le générateur de rayons X, YXLON SMART, disponible aux niveaux de l'entreprise ALTUMET. Après irradiation de tube, ces rayons, après leurs trajets à travers le tube à contrôler, viennent impressionner un film avec différentes intensités de rayonnement qui participent à la formation de l'image radiographique avec la développeuse STRUCTURIX U. A l'issue d'un cycle chimique de développement (émulsion), les clichés obtenus sont visionnés avec un Négatoscope afin de détecter d'éventuelles présence de défauts et leurs localisations.

b) Contrôle radiographique numérique :

Et cette technique est basée aussi sur la pénétration de rayonnement X par le générateur de rayons X, en radioscopie la numérisation se fait en temps réel par transformation d'une image optique en image électronique sans traitement chimique.

c) Enregistrement et classification :

✚ Préparation de l'interprétation :

- Vérifier les défauts de film.

- Vérifier le repéré de radiogramme.
- Vérifier le repérage.
- Mesurer la qualité d'image.

 Relève des indicateurs :

- Noter toutes les indicateurs volumique et non volumique.
- Relevé (position ; longueur ; diamètre) de toutes les indications.
- Relevé toutes les indications localisées en dehors de la zone contrôlée.

Tableau III.15: La norme API5L pour contrôle radioscope.

Dimension mm	Dimension adjacente mm	Distance entre défauts, Minimum mm	Sur une longueur de 150 mm de soudure	
			Nbre de défaut	Total
3.2	3.2	50	2	6.4
3.2	1.6	25	Variées	6.4
3.2	0.8	13	Variées	6.4
3.2	0.4	9.5	Variées	6.4
1.6	1.6	13	4	6.4
1.6	0.8	9.5	Variées	6.4
1.6	0.4	6.4	Variées	6.4
0.8	0.8	6.4	8	6.4
0.8	0.4	4.8	Variées	6.4
0.4	0.4	3.2	16	6.4

- Les fesseurs, les manques des pénétrations et les manques de la fusion ne sont pas acceptables.
- Aucun défaut d'aspect et structure ne sera admis aux extrémités des tubes et des soudures sur une longueur de 50 mm.
- Les caniveaux détectés par examen visuel doivent faire l'objet d'un examen et doivent être classés et traités de la manière suivante :
 - a. Les caniveaux qui ont une profondeur $\leq 0,4\text{mm}$ sont acceptables, quelle que soit leur longueur.
 - b. Les caniveaux ayant une profondeur $> 0,4\text{mm}$ mais $\leq 0,8\text{mm}$ sont acceptables à condition :
 - que leurs longueurs individuelles soient $\leq 0.5t$.
 - que leurs profondeurs individuelles soient $\leq 0.1t$.
- Qu'il n'y ait pas plus de deux caniveaux sur n'importe quelle longueur de 300mm de soudure.

III.5 Présentation des résultats :

Le résultat du contrôle de tube 2090D :

➤ Teste Hydrostatique :

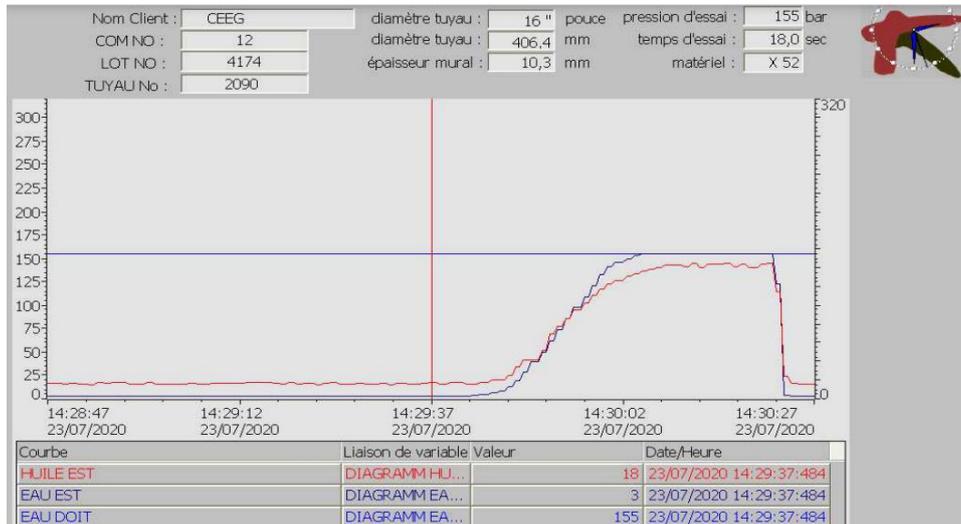


Figure III.16 : graphe de Teste hydrostatique de tube 2090D.

Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 2090D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :

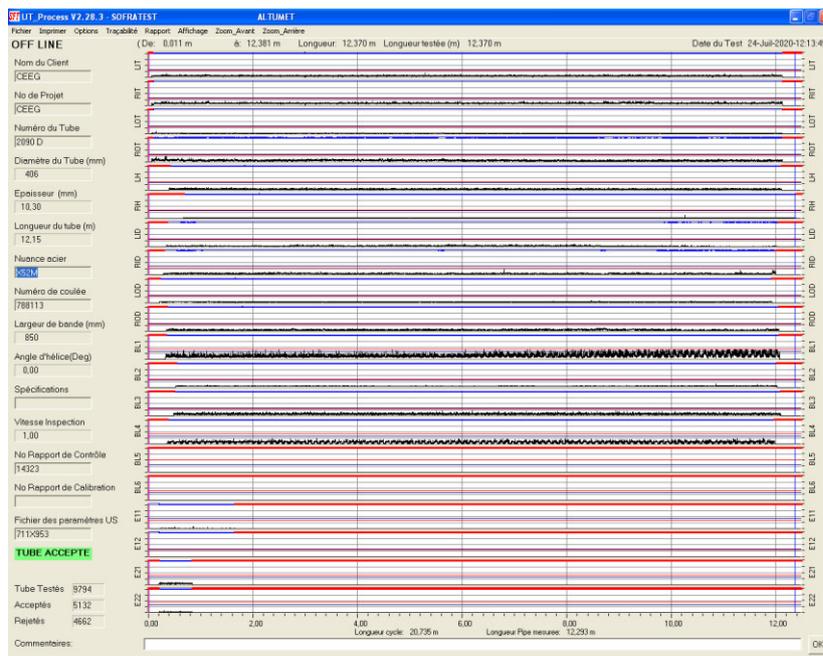


Figure III.17 : Résultat de contrôle ultrason de tube 2090D.

Cette figure représente une variation d'écho de tube 2090D traversant plusieurs palpeurs on remarque que tous les pics des échos ne dépassent pas le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason ne détecte aucun défaut alors le tube 2090D est conforme donc on passe au contrôle de radiographie classique afin de contrôler les extrémités de tube.

Remarque : pour les tubes qui restent 412D, 2004D, 2113D, 2078D, 2025D, 2249D, 3082D on a utilisés mêmes méthodes pour le teste hydrostatique et le contrôle ultrason, les résultats obtenus sont indiqués sur l'Annex.

➤ **Contrôle radiographie :**

Tableau III.16 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2090D.

Ø=406			Machine :NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
26/07/20	2090D	12,12	L1	R1	Conforme	
			L99	R1		

Ce tableau représente les résultats des films de radiographie classique des deux extrémités de tube 2090D, on déduit que les films radiographiques de tube 2090D révèlent aucun défaut dans l'extrémité donc la décision de tube est conforme.

Début de tube :



Fin de tube :



Figure III.18 : Film radiographique de tube 2090D.

✚ Le résultat du contrôle radiographie de tube 412D :

TableauIII.17 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 412D.

Ø=406			Machine :NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
30/06/20	412D	12,19	L1	R1	Réparer US43	Réparation manuelle
			L99	R1		
			US 43	R4D2		
			R5/53	R5D0		
2 -ème passage						
	412D	12,19	R6/43	R4D2	Chuter R6/43	Déclassé eau (lg<7m)

Ce tableau représente les résultats des films de radiographie classique des deux extrémités et la localisation de défaut ultrason plus la position de la réparation de défaut d'après l'observation visuelle, on déduit que les films radiographiques de tube 412D révèlent aucun défaut à l'extrémité du tube.

La position de défaut Us43 représente un nid de soufflures non conformes car les distances entre les soufflures inférieures à 3,2mm.

La deuxième position R5/53 c'est un caniveau conforme car sa longueur est inférieure à l'épaisseur divisé par deux ($t/2$).

Après la réparation de l'indication Us43 on a trouvé que le défaut existe encore donc ce tube est classé parmi les tubes hydrauliques car ils sont inférieurs à 7m.

Début de tub :



Fin de tube :



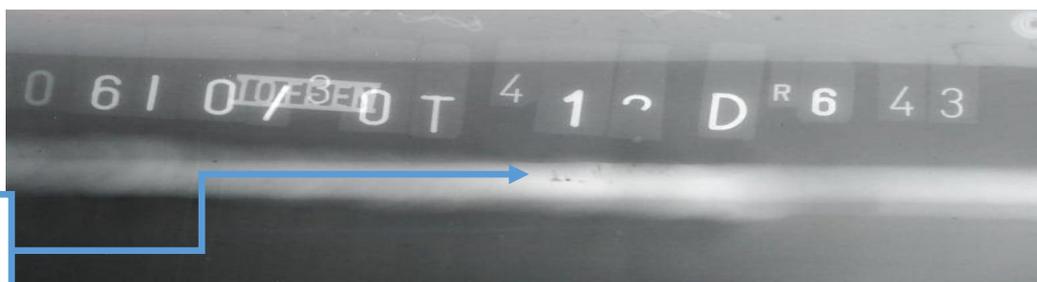
Position Us43 :



Position R5/53 :



Position R6/43



FigureIII.21 : Film radiographique de tube 412D.

Le résultat du contrôle radiographie de tube 2004D :

Tableau III.18 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2004D.

Ø=406			Machine :NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
22/07/20	2004D	12,10	L1	R1	Chuter L99 à100mm	R4D2<100mm
			L99	R4D2		
2 -ème passage						
	2004D	11,97	NL99	R1	Conforme	

Ce tableau représente les résultats des films de radiographie classique des deux extrémités déduit que les films radiographiques de tube 2004D révèlent un seul défaut à la fin de tube, ce défaut est une soufflure non acceptable car les 100mm derniers d'extrémité de tube n'acceptent aucun défaut.

La décision de tube 2004D est d'éliminer 100mm de l'extrémité de fin de tube (L99).

On refait la radiographie à la nouvelle extrémité de fin de tube et on observe sur le film qu'est bon donc le tube 2004D conforme.

Début de tube :



Fine de tube :



Nouvelle début de tube :



Figure III.24: Film radiographique de tube 2004D.

✚ Le résultat du contrôleradiographie de tube 2113D :

TableauIII.19 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2113D.

Ø=406			Machine : NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
25/07/20	2113D	12,13	L1	R1	Répare Us 42	
			L99	R1		
			US42	R5D2		
2 -ème passage						
	2113D	12,13	R4/42	R1	Conforme	

Ce tableau représente les résultats des films de radiographie classique des deux extrémités et la localisation de défaut ultrason, on déduit que les films radiographiques de tube 2113D révèlent aucun défaut à l'extrémité du tube.

La position de défaut Us42 représente Caniveaux non acceptable car l'épaisseur de tube deviser par deux est égale à 5,015mm et la profondeur de caniveaux réel est égale à 15mm.

La décision de tube 2113D est de réparer la position Us42.

On refait la radiographie a la position R4/42 de tube et on observe sur le film qu'est bon donc le tube 2113D conforme.

Début de tube :

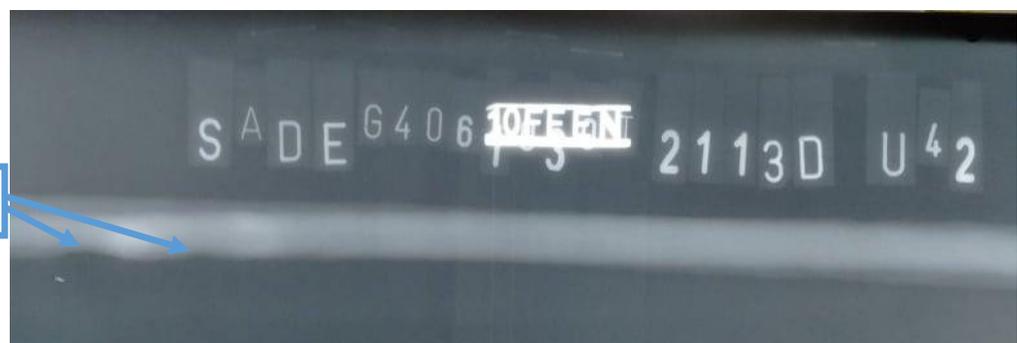


Fin de tube :

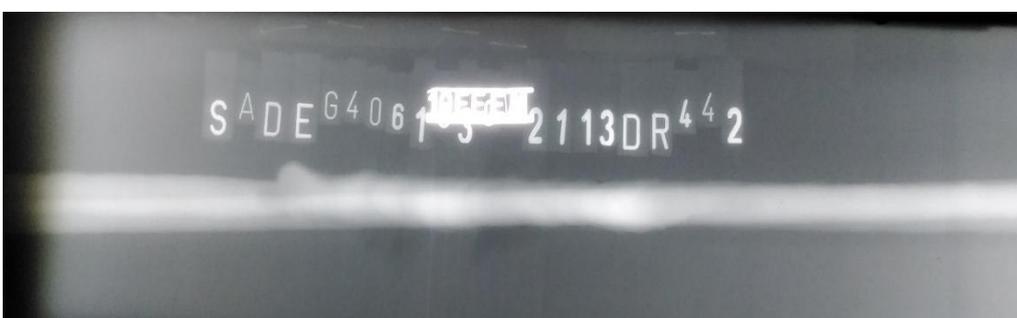


Position Us42

Caniveaux



Position R4/42 :



FigureIII.27 : Film radiographique de tube 2113D.

✚ Le résultat du contrôle radiographie de tube 2078D.

TableauIII.20 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2078D.

Ø=406			Machine : NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
24/07/20	2078D	12.10	L1	R1	Répare Us 96	
			L99	R1		
			Us96	R4D2 R5D2		
2 -ème passage						
	2078D		R2/96	R4D2 R5D2 R3D2	Chuter R2/96	
3 -ème passage						
	2078D		NL99	R1	Conforme	

Ce tableau représente les résultats des films de radiographie classique des deux extrémités et la localisation de défaut ultrason, on déduit que les films radiographiques de tube 2078D révèlent aucun défaut à l'extrémité du tube.

La position de défaut Us96 représente deux défauts non acceptables :

Caniveau non acceptable car l'épaisseur de tube deviser par deux est égal à 5,015mm et la profondeur de caniveaux réel est égale à 15mm.

Souffleur non conforme car les distances entre les souffleurs inférieurs à 3,2mm.

Après la réparation de position Us96 le défaut existe encore et naissance de nouveau défaut (manque de pénétration) donc la décision est d'éliminer la partie R2 /96.

On refait la radiographie a la position NL99 de tube et on observe sur le film qu'est bon donc le tube 2078D conforme.

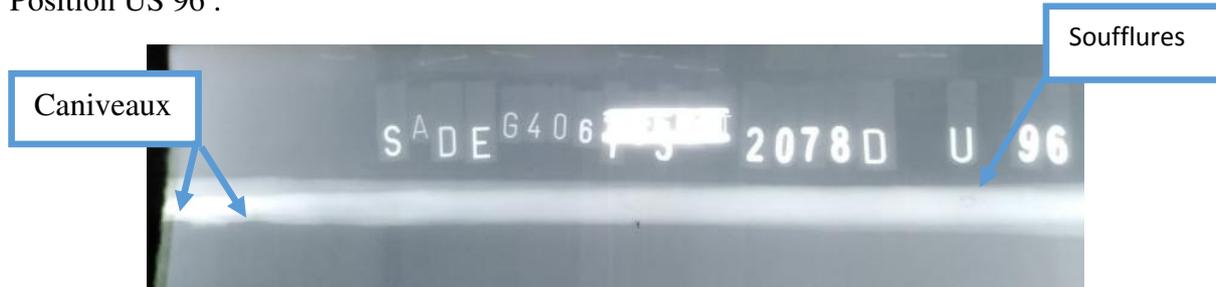
Début de tube :



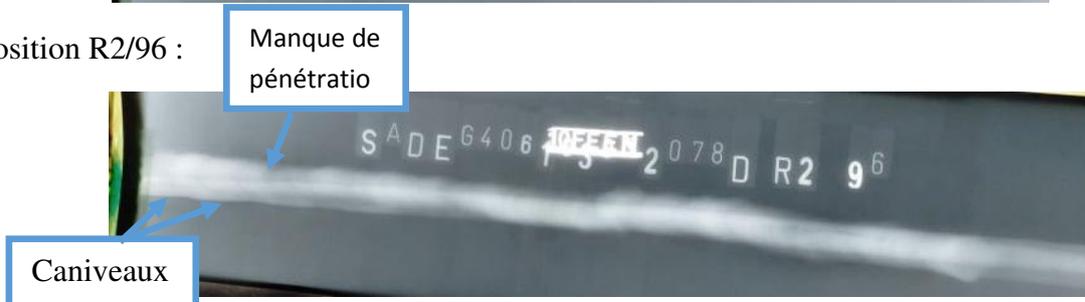
Fin de tube :



Position US 96 :



Position R2/96 :



Nouvelle début de tube :



Figure III.30 : Film radiographique de tube 2078D.

 **Le résultat du contrôle radiographie numérique de tube 2025D.**

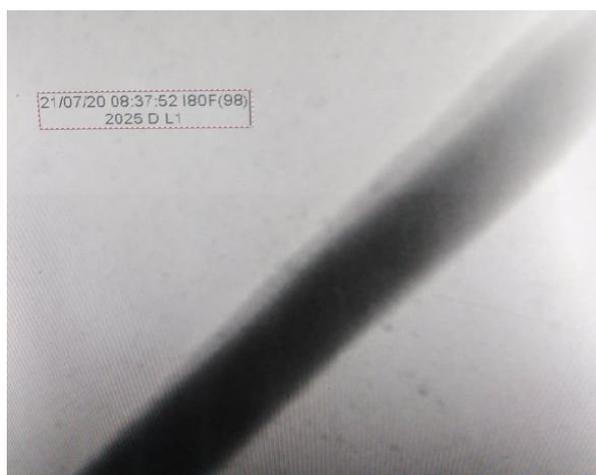
TableauIII.21 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2025D.

Ø=406			Machine : NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
21/07/2020	2025D	12.09	L1	R1	Faire tomber flux k1	Routeur radioscopie
			L99	R1		
			US2défauts	R4D0 K1 Flux		
2 -ème passage						
	2025D		K1	R1	Conforme	

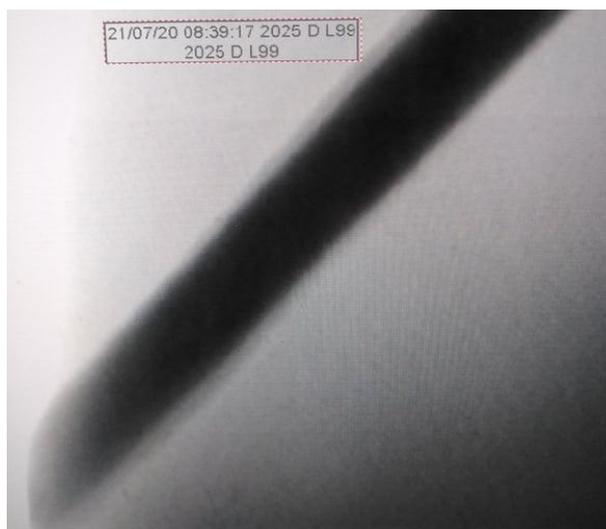
Ce tableau représente les résultats des images de radiographie numérique de tube, on déduit que les images radiographiques de tube 2025D révèlent aucun défaut à l'extrémité du tube.

La position des défauts ultrason représente deux défauts soufflures acceptables et flux la décision est de faire tomber le tube on refait la radioscopie de tube et on observe que le tube 2025D conforme.

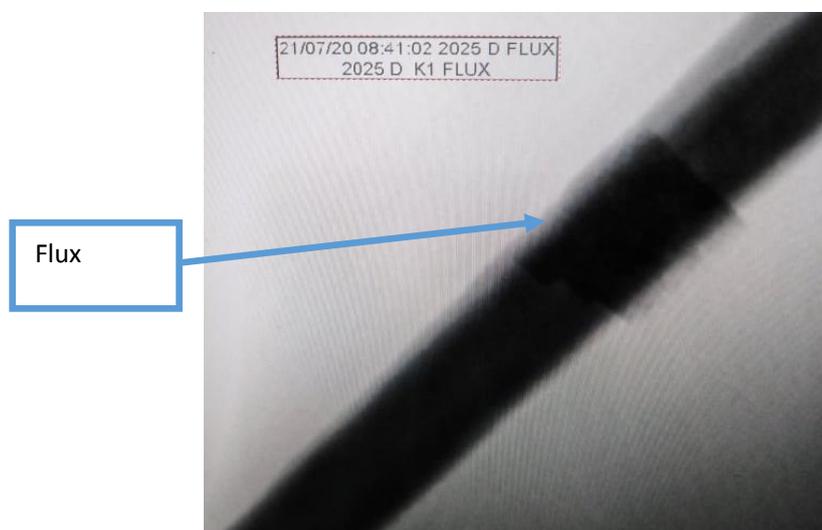
Début de tube :



Fin de tube :



K1 (Flux) :



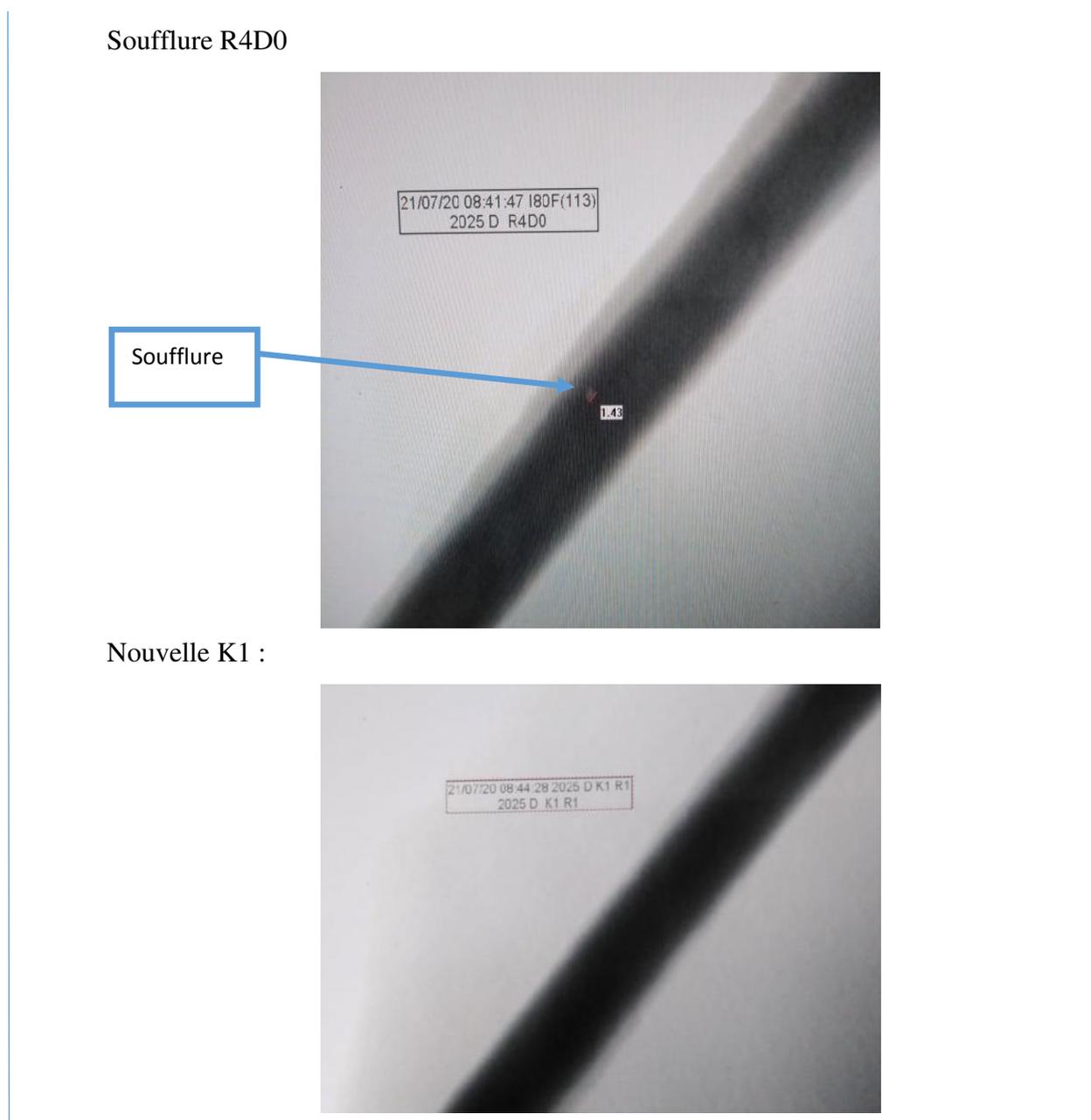


Figure III.33: Film radiographique de tube 2025D.

✚ Le résultat du contrôleradiographie numérique de tube 2249D.

TableauIII.22 : Les résultats de contrôle radiographie de tube 2249D.

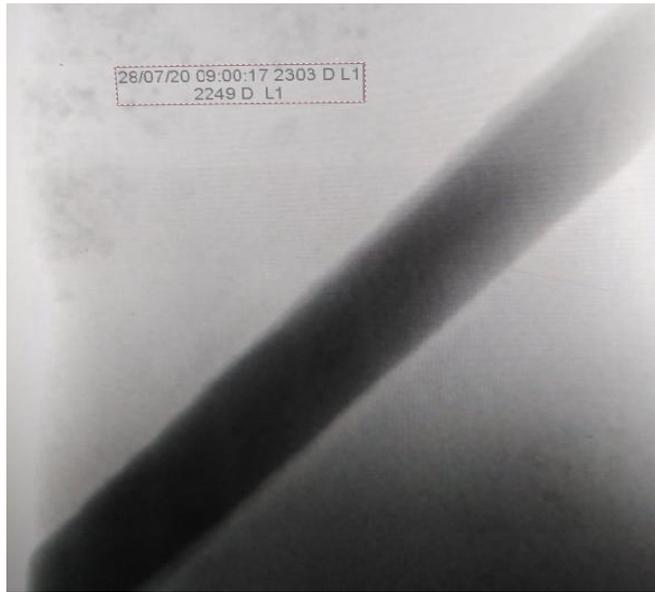
Ø=406			Machine: NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
28/07/2020	2249D	12.10	L1	R1	Chuter us 1 cotéL1	
			L99	R1		
			US 1 Us2	R5D2 R4D2 R3D2	Chuter us 2 cotéL99	
2 -ème passage						
			NL1 NL99	R1 R1	Conforme	

Ce tableau représente les résultats des images de radiographie numérique de tube, on déduit que les images radiographiques de tube 2249D révèlent aucun défaut à l'extrémité de tube.

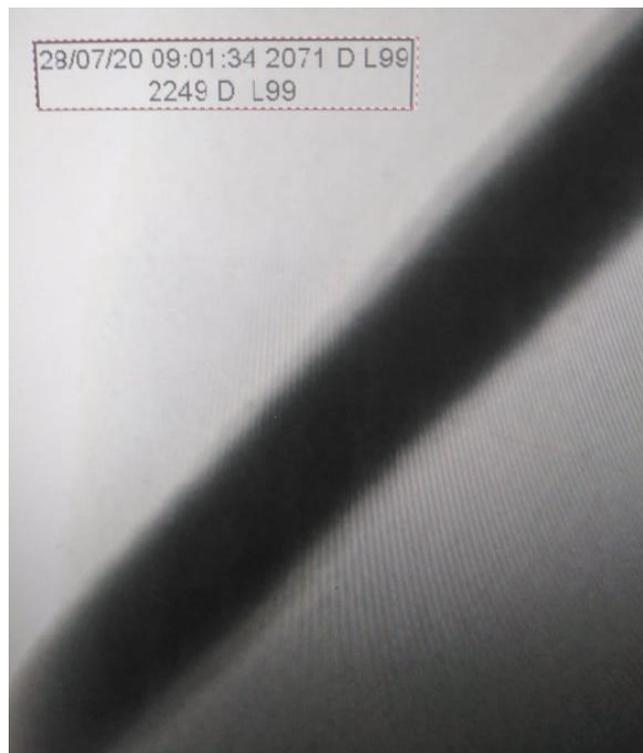
La position des défauts ultrason représente trois défauts, caniveau non acceptable, Nid de soufflures non acceptable et manque de pénétration.

La décision est d'éliminer les deux extrémités début et fin de tube on refait la radioscopie de tube et on observe que le tube 2049D conforme.

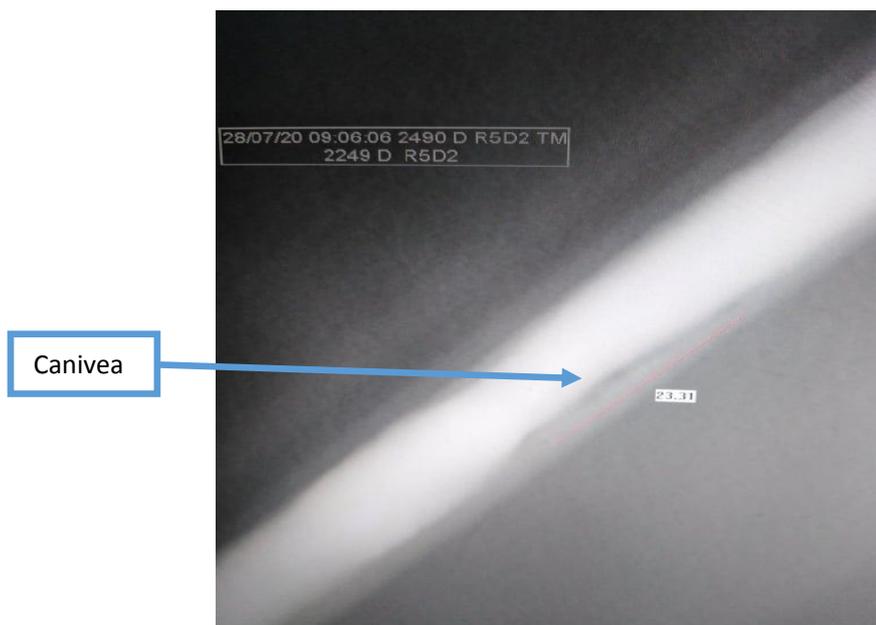
Début de tube:



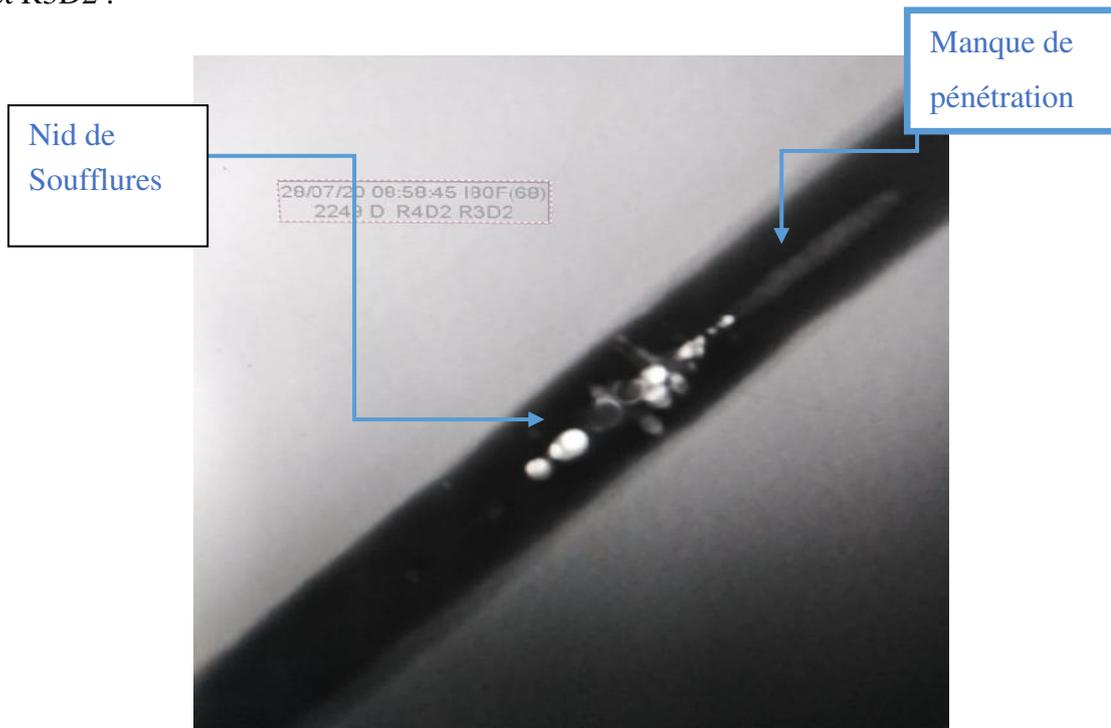
Fin de tube :



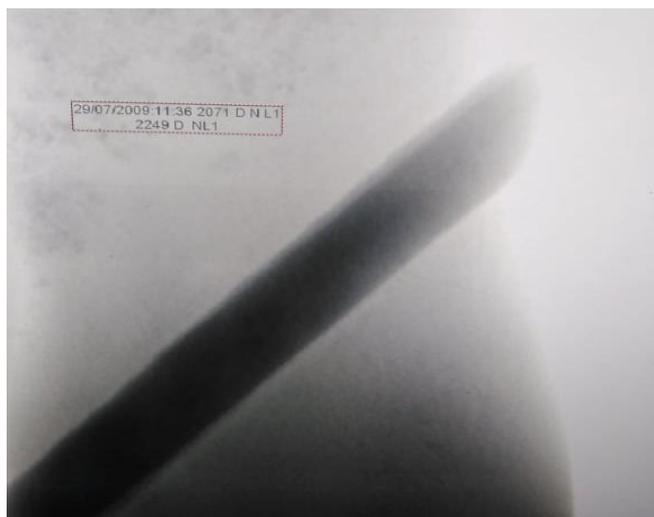
R5D2 (Caniveau non acceptable):



R4D2 et R3D2 :



Nouvelle début de tube :



Nouvelle Fine de tube :



FigureIII.36 : Film radiographique de tube 2249D.

✚ Le résultat du contrôle radiographie numérique de tube 3082.

Tableau III.23: Les résultats de contrôle radiographie de tube 3082D.

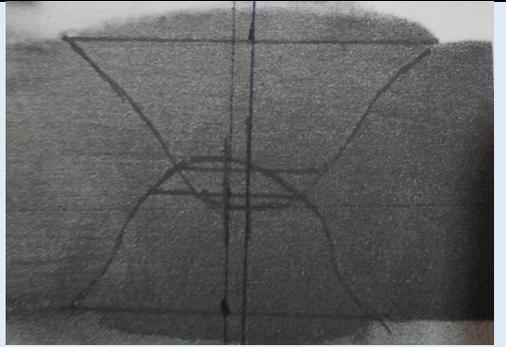
Ø=406			Machine:NLAT	Commande :gaz	Client :SADEG	
Date	Numéro de tube	Lg(m)	Localisation défaut	Interprétation	Décision	Observation
28/07/2020	3082D	12.09	L1	R7D2	Examen macrographique	Conforme
			L99	R7D2		
			US	R7D2		

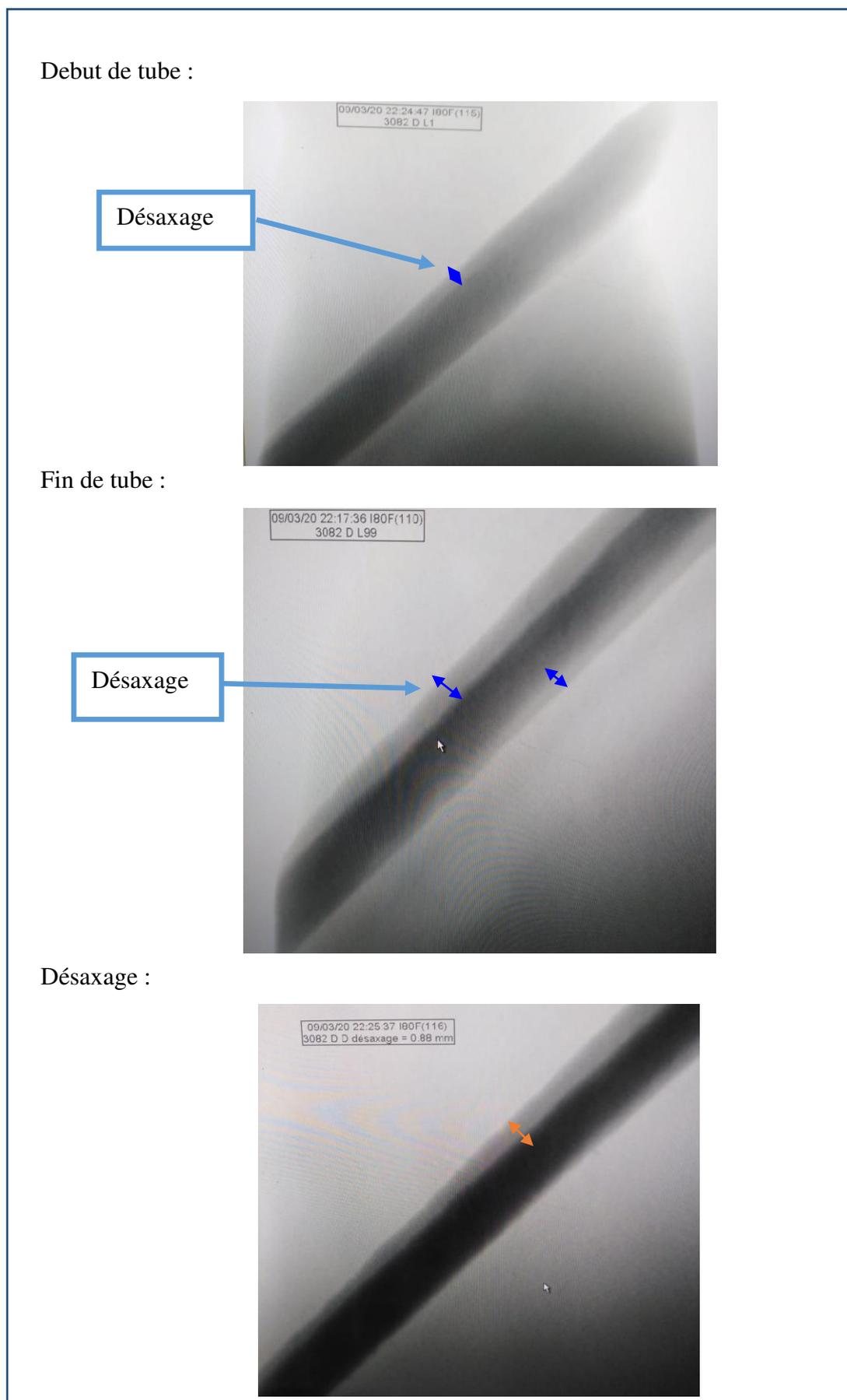
Ce tableau représente les résultats des images de radiographie numérique de tube, on déduit que les images radiographiques de tube 2025D on a observé un désaxage.

La décision est de contrôler le tube avec l'examen macrographie, le résultat de ce dernier est conforme car le désaxage est inférieur de 3mm.

Tableau III.24 : l'examen macrographique de tube 3082D.

CORDON	EXT	INT
SUREPAISSEUR (mm)	1,76	1,23
LARGEUR (mm)	14,48	11,66
PENETRATION (%)	62,35	55,42
DESAXAGE (mm)	0,88	
INTERPENETRATION (mm)	1,7	





FigureIII.39 : Film radiographique de tube 3082D.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier la caractérisation physique et mécanique des tubes à gaz destinés aux applications industrielles par des méthodes destructives et non-destructives.

Dans un premier temps, On a présenté une caractérisation expérimentale de l'acier API 5L X70M et X52M qui est utilisé pour la fabrication des tubes au niveau de l'entreprise Algérienne des Tubes Métalliques ALTUMET de REGHAIA. L'épaisseur nominale du tube étudiée pour les deux nuances :

- X70M l'épaisseur nominale du tube étudié est 9,59 mm.
- X52M l'épaisseur nominale du tube étudié est 10,30 mm.

En second lieu, on a utilisé le contrôle non-destructives sur les tubes suivants 2090D, 412D, 2004D, 2113D, 2078D, 2025D, 2249D, 3082D qui sont fabriqués pour la commande gaz, client SADAG et nuance X52M d'épaisseur nominale du tube étudié est 10,30 mm et de diamètre 406mm.

Après l'obtention et traitement des résultats, on résulte que :

L'acier API 5L X70M et X52M utilisé pour la fabrication des tubes possède des propriétés particulières répondant bien aux conditions de choix pour une telle utilisation à cause de sa haute limite élastique, de sa bonne ductilité.

Pour le tube fabriquer en acier X 70M le cordon de soudure utilisé pour le soudage des tubes possède une résistance à la rupture et une dureté supérieure à celles du métal de base et une résilience inférieure à celle du métal de base et presque le même au la ZAT.

Pour le tube fabrique en acier X52M le cordon de soudure utilise pour le soudage des tubes possède une résistance a la rupture presque la même que métal de base et une dureté supérieure à celles du métal de base et une résilience presque la mêmeque la ZAT et supérieure à celle du métal de base.

On déduit que la résistance à la rupture et la dureté de l'acier X52Mest inférieure relativement que celle de l'acier X70M mais d'un autre côté on trouve que la résilience de l'acier X52M est relativement supérieure que celle X70M.

Après les essais effectués sur ces tubes qui sont destinés pour le transport de gaz comme il a été tracé comme objectif de notre étude et en même temps selon les exigences du client SADAG avec l'entreprise ALTUMET de Reghaia, les résultats de ces derniers ont donné les chiffres suivants:

- 95% des tubes sont conformes
- 5% ont été déclaré non conformes pour le transport du Gaz alors qu'il peut être utile pour d'autres destinations.

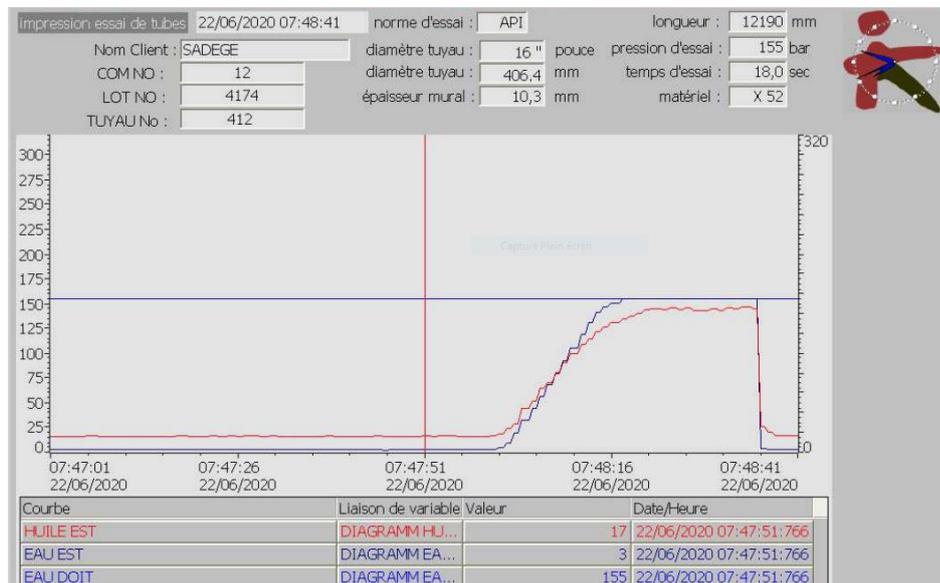
Références Bibliographiques

- [1] Wikipédia, Alain Maire, *Le transport par pipeline*, Éditions Technip, 2011, 303 p.
- [2] fabrication de tubes suivant la norme NF EN 10224 en avril 2003.
- [3] Documentation de revêtement externe triple couche à base de polyéthylène. Application par extrusion. la norme NF A 49- 710 en 1988
- [4] Tubes en acier. Revêtement interne et/ou externe double couche à base de résine époxydique et de polyamide. Application par trempage en bain de poudre fluidisée/papier. La norme NF ENA 49-713 en 1993.
- [5] Memo soudage. Ex Fredylelongi professeur des N.N.A .12/11/02.
- [6] Documentation ALTUMET classification des défauts dans la soudure des matériaux métallique EN ISO 6520-1.
- [7] Documentation ALTUMET ultrason essai non destructive partie 1 : principe généraux la norme NF EN .583-1 en 1998.
- [8] Documentation ALTUMET Radiographie industriel.
- [9] Documentation du laboratoire d'essai d'ALTUMET. par décision du Directeur Général d'AFNOR. Remplace les normes homologuées NF EN 10208-1 et NF EN 10208-2, de septembre 2009 qui restent en vigueur jusqu'en novembre 2013.

Annexe A :

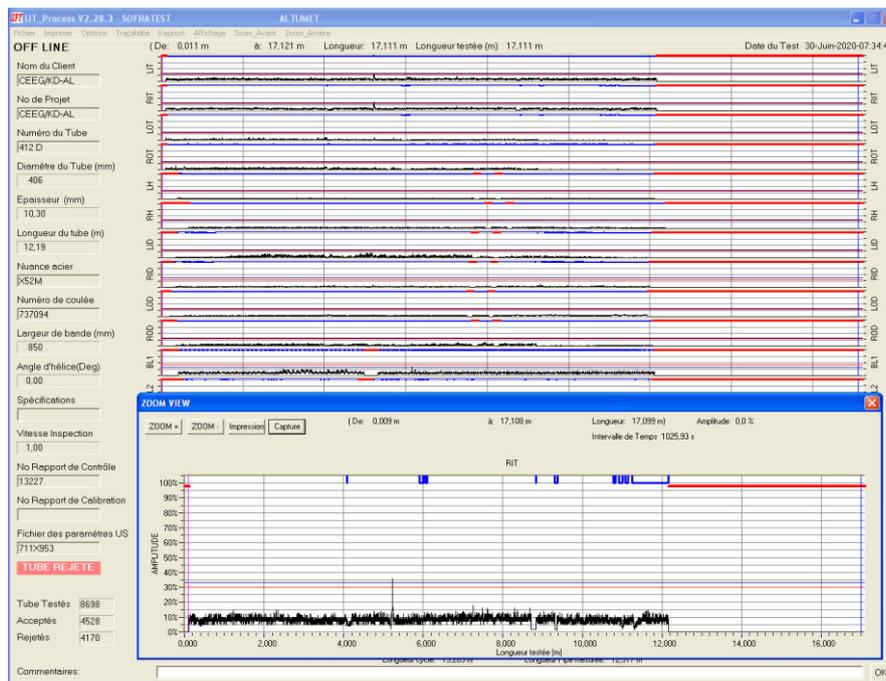
Le résultat du contrôle de tube 412D :

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 412D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :

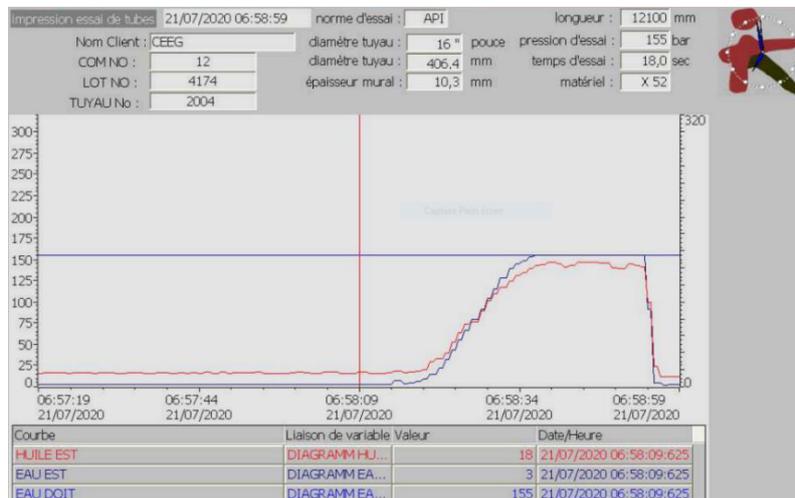


Cette figure représente une variation d'écho de tube 412D traversant plusieurs palpeurs on remarque qu'il y a un pic d'écho qui a dépassé le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason détecte

un seul défaut alors le tube 412D n'est pas conforme donc on passe au contrôle de radiographie classique afin de contrôler la position de défaut et l'extrémité de tube.

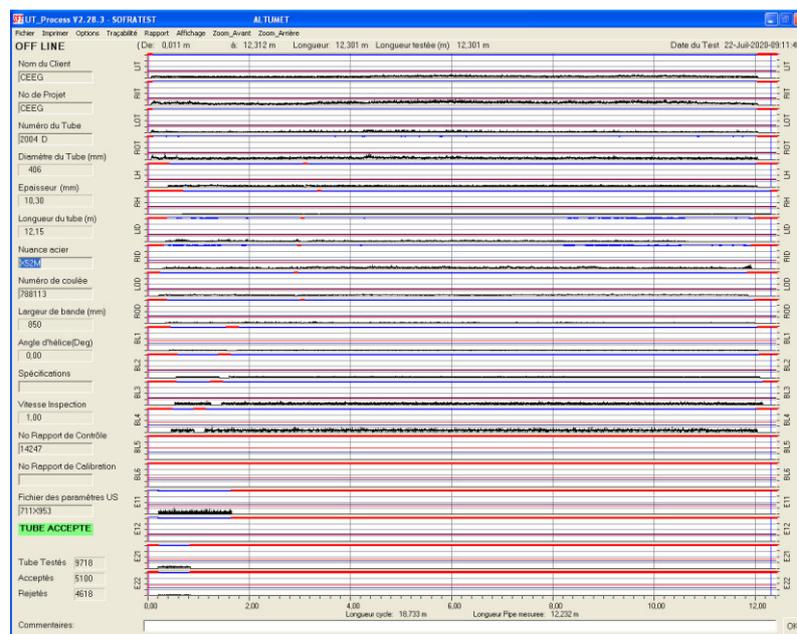
✚ Le résultat du contrôle de tube 2004D :

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 2004D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :

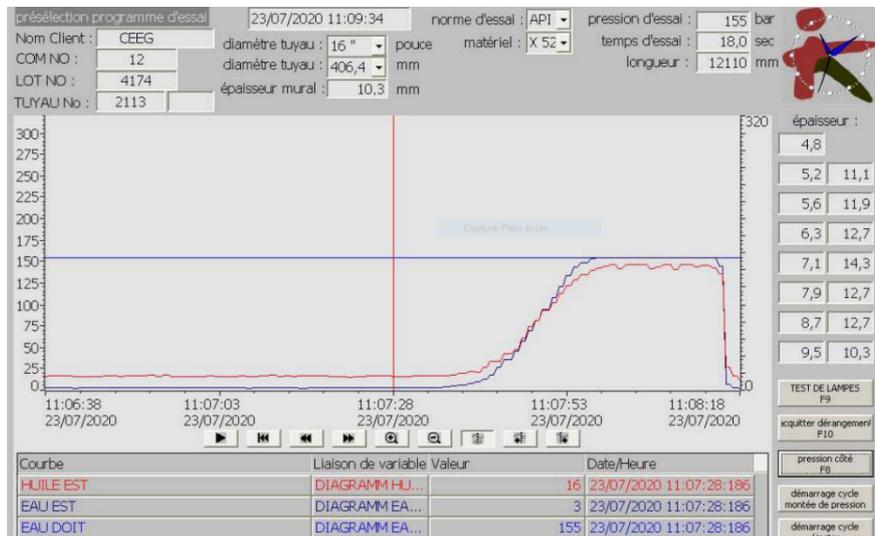


Cette figure représente une variation d'écho de tube 2004D traversant plusieurs palpeurs on remarque que tous les pics des échos ne dépassent pas le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason

ne détecte aucun défaut alors le tube 2004D est conforme donc on passe au contrôle de radiographie classique afin de contrôler les extrémités de tube.

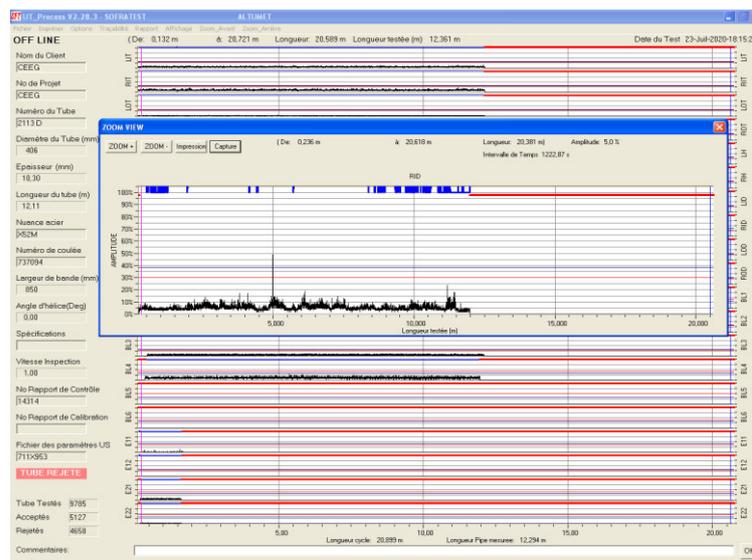
✚ Le résultat du contrôle de tube 2113D :

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 2113D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :

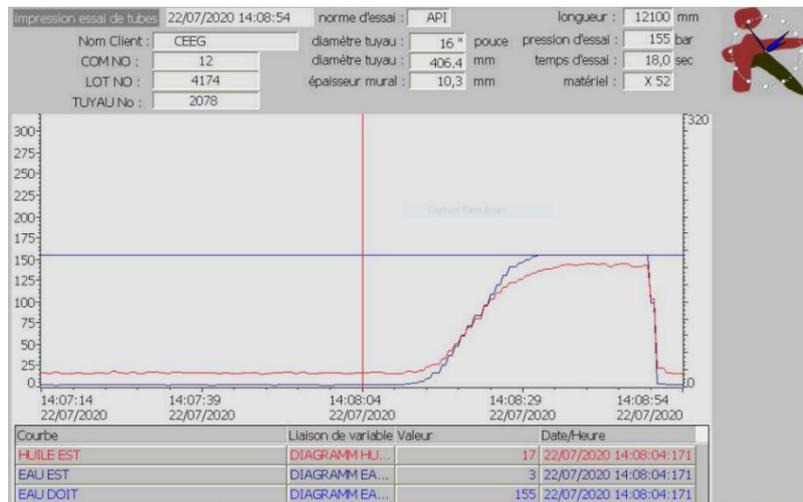


Cette figure représente une variation d'écho de tube 2113D traversant plusieurs palpeurs on remarque qu'il y a un pic d'écho qui a dépassé le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason

détecte un seul défaut alors le tube 2113D n'est pas conforme donc on passe au contrôle de radiographie classique afin de contrôler la position de défaut et l'extrémité de tube.

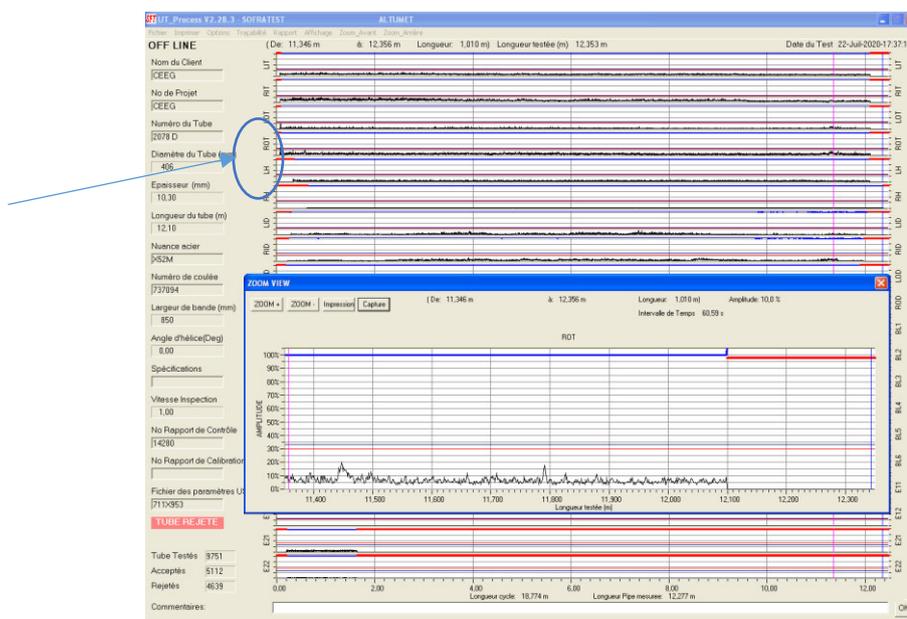
✚ Le résultat du contrôle de tube 2078D.

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 2078D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :

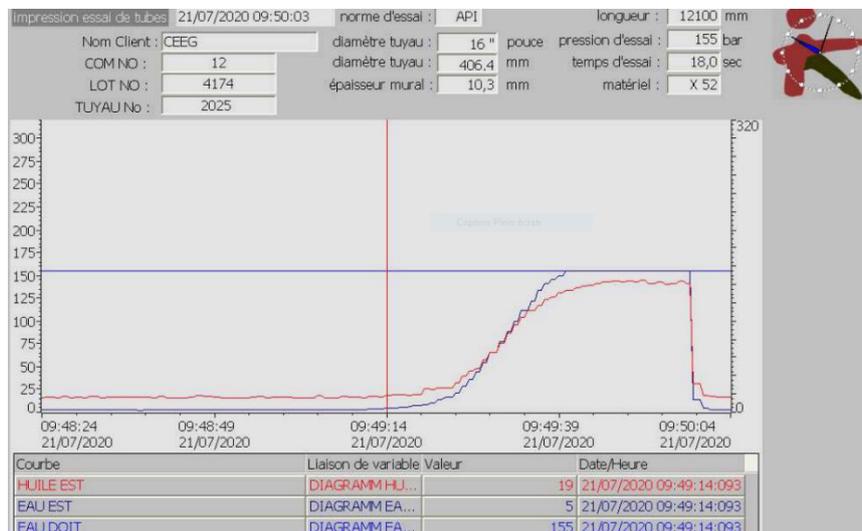


Cette figure représente une variation d'écho de tube 2078D traversant plusieurs palpeurs on remarque qu'il y a un pic d'écho qui a dépassé le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason détecte

un seul défaut alors le tube 2078D n'est pas conforme donc on passe au contrôle de radiographie classique afin de contrôler la position de défaut et l'extrémité de tube.

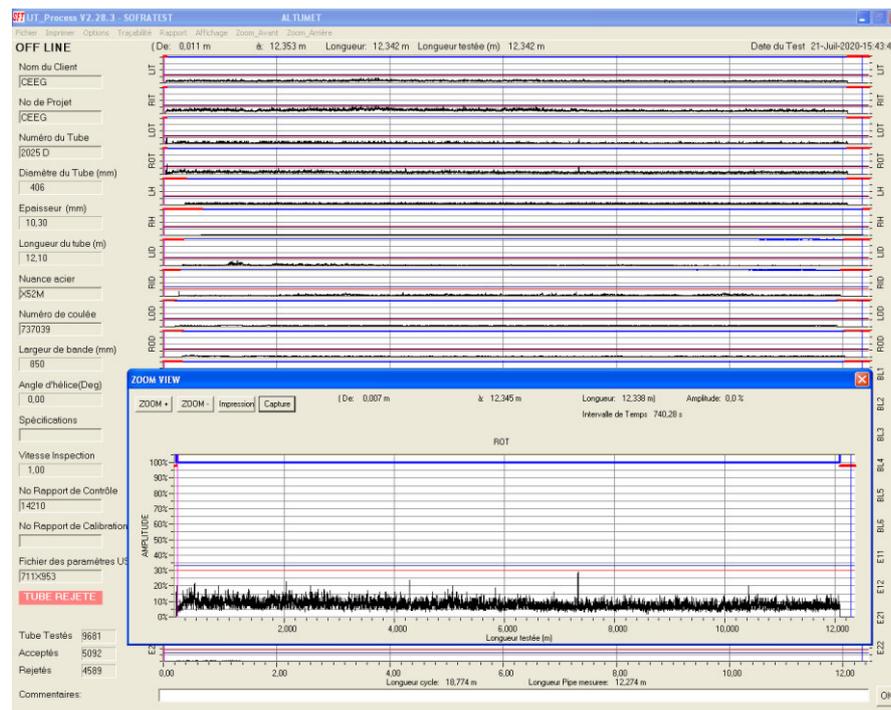
✚ Le résultat du contrôle de tube 2025D.

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 2025D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

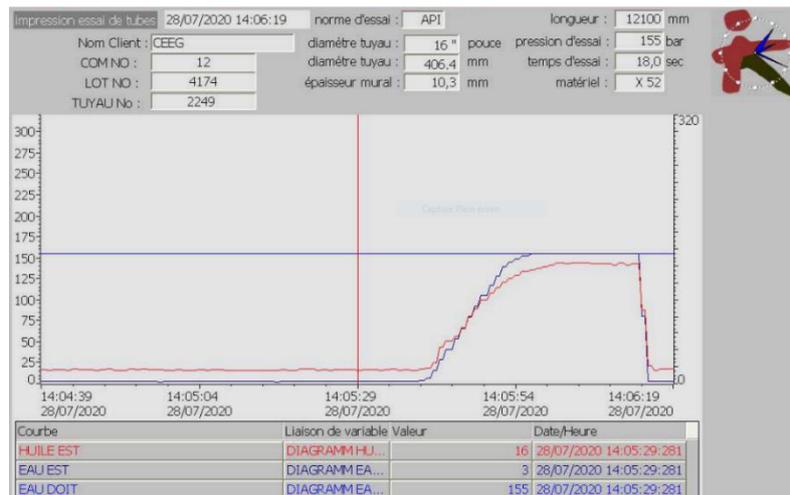
➤ Contrôle par ultrasons :



Cette figure représente une variation d'écho de tube 2025D traversant plusieurs palpeurs on remarque qu'il y a deux pics d'écho qui a dépassé le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason détecte deux défauts alors le tube 2025D n'est pas conforme donc on passe au contrôle de radiographie numérique afin de contrôler le tube.

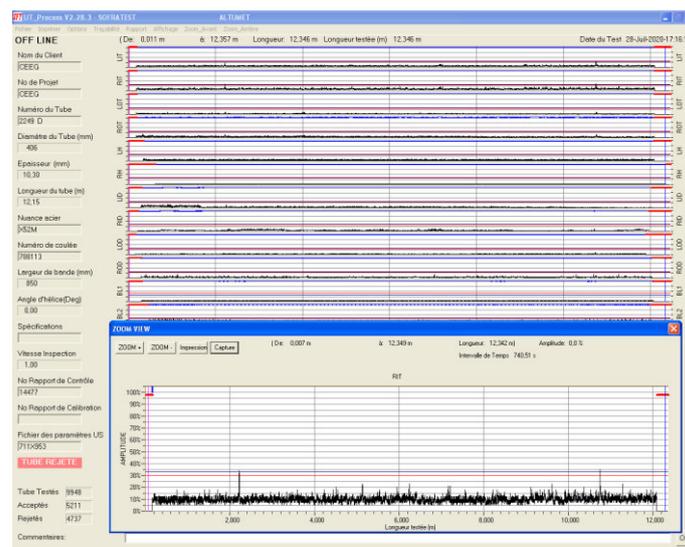
Le résultat du contrôle de tube 2249D.

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 2249D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :

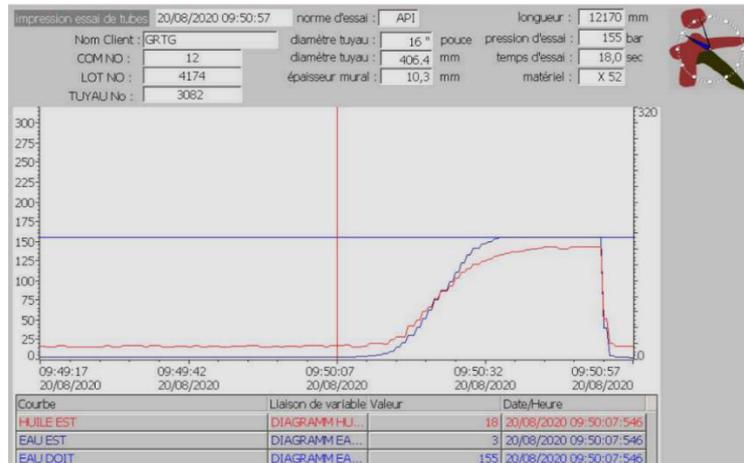


Cette figure représente une variation d'écho de tube 2249D traversant plusieurs palpeurs on remarque qu'il y a deux pics d'écho qui a dépassé le seuil c'est-à-dire le contrôle ultrason

détecte deux défauts alors le tube 2249D n'est pas conforme donc on passe au contrôle de radiographie numérique afin de contrôler le tube.

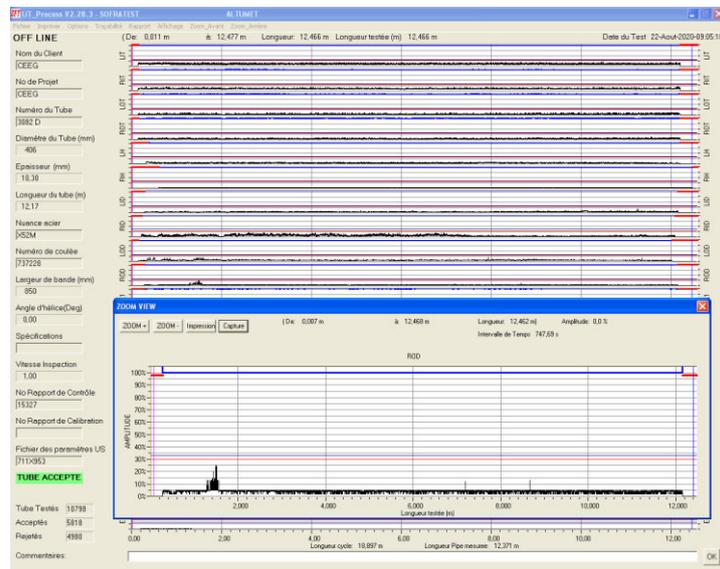
✚ Le résultat du contrôle de tube 3082.

➤ Contrôle par Hydrostatique :



Cette figure représente le graphe de teste hydrostatique de tube 3082D. On applique une pression 155bar pendant 18,0 secondes, le graphe est stable donc le résultat de test hydrostatique est conforme.

➤ Contrôle par ultrasons :



Cette figure représente une variation d'écho de tube 3082D traversant plusieurs palpeurs on remarque qu'il y a une perturbation de signal c'est-à-dire le contrôle ultrason de tube 3082D n'est pas conforme donc on passe au contrôle de radiographie numérique afin de contrôler le tube.

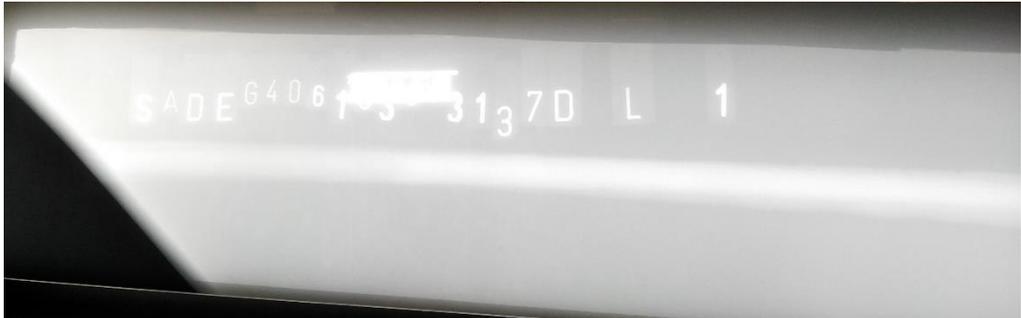
Annexe B :

Principales causes d'insuccès dans le traitement des film et l'interprétation (R2)

- Film non exposé.



- Sous exposition.



- Sur exposition.



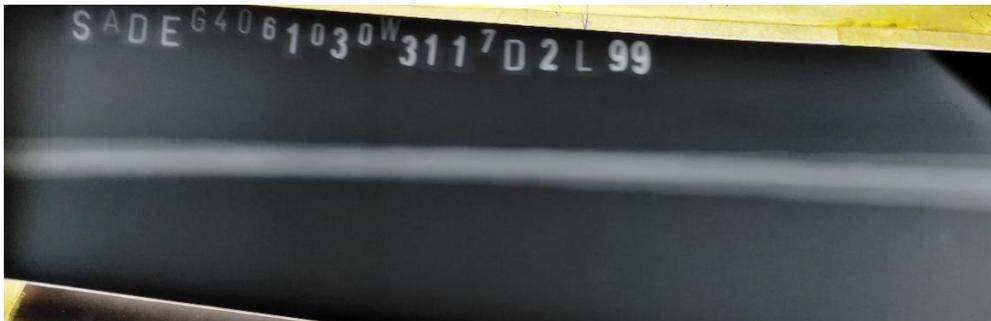
- Corps étrange.



- Tache noir coup d'angle pli dans le film. Saisi entre plus de deux doigts avant l'exposition.



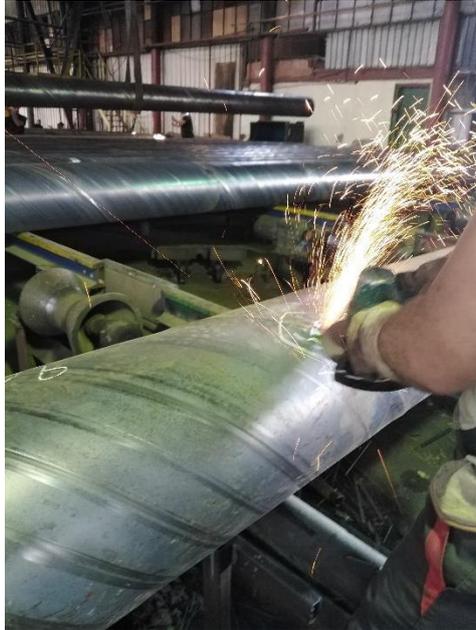
- Film sans indicateur de qualité d'image (IQI).



Annexe C :

Certaines photos sont prises de la partie pratique dans l'atelier de contrôle de qualité de Magnétoscope :

Le contrôle s'applique sur la soudure des tubes après chaque opération de gougeage avant réparation pour s'assurer que le défaut a été complètement éliminé.



Application d'une couche de peinture blanche pour améliorer le contraste.



Application du champ magnétique plus liqueur noire (révélateur de défaut).



Résultat :

