

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

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة بأجي مختار - عنابة

Faculté des Sciences de l'ingénierie

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : METALLURGIE

**Détermination des défauts existant dans les tubes X70 Soudés
par SAW par la méthode ultrasonique et radiographique.**

Spécialité: Génie Métallurgique

PRESENTE PAR : SID ACHRAF DJALEL-EDDINE

Dirigé par: Dr. DEKHIL Leila

Université d'Annaba

co-encadreur: Mr.AOUNALLAH Djamel

Jury de soutenance:

Président :

Pr. MEBAREIK Abdelmalek

Université d'Annaba

Examineurs :

Dr. HASSINI Mohammed

Université d'Annaba

Session Juin 2019

Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé dans l'usine d'El-hadjar à l'atelier d'ALFAPIPE Annaba et dans le département de métallurgie et génie de matériaux de la faculté de sciences technologiques de l'Université Badji Mokhtar Annaba, sous la direction du **Madame Leila DEKHIL**, ma plus grande gratitude va à mon encadreur, pour sa disponibilité et la confiance qu'elle m'a accordée. J'ai profité pendant longtemps du savoir et du savoir-faire dont j'ai pu bénéficier au cours de nombreuses discussions. J'aimerais aussi la remercier pour l'autonomie qu'elle m'a accordée, et ses précieux conseils qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

J'exprime toute ma reconnaissance au membres de jurys pour avoir bien voulu accepter de juger ce travail.

*Mes remerciements particuliers aux personnels de l'équipe d'ALFAPIPE particulièrement, **Monsieur AOUNALLAH Djamal** et **Monsieur BELAHRACH Toufik** de m'avoir accueilli au sein de laboratoire des essais destructif et non destructifs.*

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste mémoire

Dédicaces

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux

Je dédie ce modeste travail en signe de respect, reconnaissance et de remerciement :

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un modèle exemplaire de labeur et de persévérance que dieu vous protège pour moi .

A mes chers frères: Taha, Ilyeset ma chère et unique sœur Maram

A ma grande mère, mon grand père ,mes oncles et mes tantes , pour leur soutien, patience et tendresse.

A mes cousins et cousines .

A tous mes amis de la cité universitaire DJBAILI Salah particulièrement : Mario, Nasro , Djalel , Bahi et Abdallah

A mes très proches amis : Dahi, Selman, Koki, Farouk Khalil et toute l'équipe de Salamander.

A tous mes amis et à qui je n'ai pas cité involontairement oubliés dans l'écrit mais présent dans le cœur et l'esprit.

A tout ceux qui ont participé à l'élaboration de ce modeste travail et tous ceux qui nous sont chers.

SID Achraf

SOMMAIRE

Chapitre I

I. Introduction	01
II. Historique du complexe sidérurgique d'El-Hadjar.....	01
III. Aperçu du complexe.....	01
IV. Produits du complexe d'El-Hadjar.....	02
V. Présentation de l'unité ALFA PIPE ANNABA.....	03
1. Historique de l'unité.....	04
2. La gamme des tubes produits.....	04
3. L'organisation fonctionnelle de l'unité.....	05
4. Organisation	06
VI. Conclusion	07

Chapitre II

I. Introduction.....	08
II. Les opérations principales pour la fabrication des tubes soudés en spirale.....	08
1. Stockage des bobines.....	08
2. Basculeur des bobines	09
3. Machine de préparation bobines	09
4. Machine à souder	09
5. Le rabotage	09
6. Le Guidage	10
7. Dressage bande	10
8. Cisailage	10
9. Formage de la bande	10
10. Le soudage	11
11. Oxycoupage des tubes	11
12. Nettoyage tube.....	11
III. Principaux Défauts de soudage.....	12
1. Fissures	12
2. Fissures à chaud	13
3. Fissures à froid	13
3.1.4. Fissures longitudinales	14
3.1.5. Fissure transversale.....	14
3.1.6. Fissures de cratère.....	14

SOMMAIRE

2. Inclusions	14
3. Manque de fusion	15
4. Manque de pénétration	15
4.1 Causes possibles	15
IV. Méthodes de contrôles non destructifs.....	16
1. Les stades de contrôle	16
2. Le contrôle de réception	16
3. Le contrôle en cours de fabrication	16
4. Le contrôle de produit fini.....	16
5. Définition, moyens et utilisations du contrôle non destructif	17
5.1. Définition.....	17
5.2. Moyens.....	17
5.3. Utilisations.....	17
6. Généralités sur le contrôle non destructif	17
IV.A. L'examen visuel.....	19
1. Compétences nécessaires	19
2. Restrictions.....	19
IV.B. Le ressuage.....	20
1. Définition.....	20
2. Principe de ressuage.....	20
3. Types et significations des indications	23
a. Types d'indications.....	23
b. Significations des indications.....	23
4. Domaine d'application.....	23
5. Avantages et inconvénients.....	24
IV.C. Contrôles par ultrason	25
1. Définition.....	25
2. Notion d'onde	25
2.1. Définition.....	25
2.2. Types d'ondes	26
2.3. Vitesse de propagation	27
3. Transmission et réflexion des ondes	27
3.1. Impédance acoustique.....	27

SOMMAIRE

3.2. Incidence normale	28
4. Principe de contrôle par ultrasons	28
4.1. Principe.....	28
4.2. Profondeur de l'existence du défaut	29
5. Capteur ultrasonore	30
5.1. Composition.....	30
6. Avantages et inconvénients.....	30
6.1. Avantages	30
6.2. Inconvénients	31
IV.D. Magnétoscopie.....	31
2. Définition.....	31
3. Matériaux ferromagnétiques.....	32
4. Principe de la méthode.....	32
4.1. Phase d'excitation.....	32
4.2. Phase de perturbation.....	33
4.3. Phase de révélation.....	34
5. Avantages et inconvénients.....	34
5.1. Avantages.....	34
5.2. Inconvénients.....	34
IV.E. La radiographie.....	35
1. Introduction.....	35
2. Nature des rayonnements ionisants.....	35
3. Principe de la radiographie	36
4. Production des rayons X.....	37
5. Formation de l'image radiographique.....	38
6. Enregistrement de l'image radiographique.....	40
6.1. Paramètres d'influence.....	40
6.2. Visualisation et enregistrement de l'image radiographique.....	40
a. le film radiographique.....	41
b. Visibilité des défauts	41
c. Qualité du contrôle	41
d. la radioscopie.....	41
e. la numérisation directe.....	42

SOMMAIRE

7. Avantages et inconvénients.....	42
1. Avantages.....	42
2. Inconvénients.....	42
V. Conclusion	43
Chapitre III	
I. Introduction.....	44
II. Composition chimique du tube de nuance X70	44
III. Propriétés mécaniques du tube.....	45
1. Essai de traction.....	45
2. Essai de macro dureté	45
3. Essai de résilience.....	47
4. Essai de pliage.....	48
IV. Contrôle des pipes.....	48
1. Contrôle visuel et dimensionnel	48
1.1 Principe du contrôle	48
1.2 Condition du contrôle visuel et dimensionnel	49
1.3 Matériels de contrôle	49
1.4 Forme et dimensions	49
2. Epreuve hydrostatique	50
3. Contrôle par ultrasons.....	52
4. Contrôle radiographique	54
4.1. Limites d'acceptation	55
4.2. Acceptation	56
4.3. Rapport de contrôle	56
5. Interprétations de radiographies.....	57
5.1. Pièces à souder mal alignées (Offset ou Hi-lo)	57
5.2. Un désalignement des pièces à souder (Offset ou Hi-lo) et un remplissage insuffisant à la racine du joint.....	58
5.3. Concavité excessive (insuffisamment rempli).....	58
5.4. Pénétration excessive (glaçon).....	59
5.5. Caniveau externe	59
5.6. Caniveau interne à la racine	60
5.7. Concavité interne à la racine.....	60

SOMMAIRE

5.8. Cratère à la racine localisé.....	61
5.9. Pénétration incomplète ou manque de pénétration.....	61
5.10. Inclusions de laitier en inter passe.....	62
5.11. Inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer).....	62
5.12. Manque de fusion (sur les côtés des plaques).....	63
5.13. Manque de fusion entre les passes.....	63
5.14. Porosités dispersées.....	64
5.15. Nids de Porosités ou soufflures agglomérées.....	64
5.16. Porosités ou soufflures enlignées la racine du joint	65
5.17. Fissures transversales	65
5.18. Fissures longitudinales	66
5.19. Fissures longitudinales à la racine	66
5.20. Inclusions de tungstène	67
6. Comparaison entre la radiographie numérique et la radiographie argentique.	67
6.1 Radiographie numérique.....	67
6.2 Radiographie argentique.....	67
7. Contrôle final	69
V. Conclusion	70

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Vue générale sur complexe sidérurgique d'El-Hadjar.....	02
Figure I.2: Vue générale sur l'unité ALFA PIPE.....	04
Figure I.3: Organigramme de l'unité ALFA PIPE.....	06
Figure II.1: Stocke bobines.....	08
Figure II.2: Préparation bobines.....	09
Figure II.3: Machine rabotage, guidage, dressage et cisailage.....	10
Figure II.4: soudage automatique sous flux.....	11
Figure II.5: Les différentes zones de soudure.....	12
Figure II.6: fissure à chaud.....	13
Figure II.7: fissure à froid.....	13
Figure II.8: inclusion de laitier décelé par radiographie.....	14
Figure II.9: Manque de fusion de la soudure.....	15
Figure II.10: Manque de pénétration.....	15
Figure II.11: Principe de ressuage.....	20
Figure II.12: Exemple d'une pièce avant (à gauche) et après (à droite) le contrôle par ressuage.....	22
Figure II.13 : Exemples de pièces contrôlées par ressuage.....	24
Figure II.14: Présentaion d'onde.....	26
Figure II.15: Types d'ondes ultrasonores.....	27
Figure II.16: Présentation schématique d'un faisceau incident.....	28
Figure II.17: Détection de défaut par ultrason.....	29
Figure II.18: Détection défaut pour capteur à angle.....	29
Figure II.19: Schéma d'un transducteur.....	30
Figure II.20: La direction du champs magnétique.....	32
Figure II.21: Schéma représentatif de perturbation des lignes d'induction.....	33
Figure II.22: Principe de contrôle par rayonnement.....	36
Figure II.23: radiographie argentique.....	36
Figure II.24: Principe de production des rayons X.....	37
Figure II.25: Formation d'image radiographique.....	38
Figure II.26: Paramètres d'éloignement de l'objet vers la source.....	39
Figure II.27: Flou géométrique.....	39
Figure III.1: Éprouvette normalisée selon L'API5L.....	45
Figure III.2: Les points de mesure de la dureté selon L'API 5L.....	46

LISTE DES FIGURES

Figure III.3: Essai de pliage.....	48
Figure III.4: Banc d'essai hydrostatique.....	51
Figure III.5: Schéma d'une épreuve hydrostatique de tube.....	51
Figure III.6: Contrôle par ultrason de pipe.....	52
Figure III.7: Résultat de contrôle par ultrason de tube étalon.....	53
Figure III.8: Résultat de contrôle par ultrason d'un tube sain.....	53
Figure III.9: Résultat de contrôle par ultrason d'un tube contient des anomalies.....	53
Figure III.10: Radiographie de tube début.....	54
Figure III.11: Radiographie de tube fin.....	54
Figure III.12: Radiographie de tube (manque pénétration).....	55
Figure III.13: L'image radiographique pièces à souder mal alignées (Offset ou Hi-lo)..	57
Figure III.14: L'image radiographique d'un désalignement des pièces à souder.....	58
Figure III.15: L'image radiographique concavité excessive (insuffisamment rempli)...	58
Figure III.16: L'image radiographique pénétration excessive (glaçon).....	59
Figure III.17: L'image radiographique caniveau externe.....	59
Figure III.18: L'image radiographique caniveau interne à la racine.....	60
Figure III.19: L'image radiographique concavité interne à la racine.....	60
Figure III.20: L'image radiographique cratère à la racine localisé.....	61
Figure III.21: L'image radiographique pénétration incomplète ou manque de pénétration.....	62
Figure III.22: L'image radiographique inclusions de laitier en inter passe.....	62
Figure III.23: L'image radiographique inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer).....	63
Figure III.24: L'image radiographique manque de fusion (sur les côtés des plaques)....	63
Figure III.25: L'image radiographique manque de fusion entre les passes.....	64
Figure III.26: L'image radiographique porosité dispersée.....	64
Figure III.27: L'image radiographique nid de porosité ou soufflure agglomérée.....	65
Figure III.28: L'image radiographique porosité ou soufflure enlignée la racine du joint.....	65
Figure III.29: L'image radiographique fissure transversale.....	66
Figure III.30: L'image radiographique fissure longitudinale.....	66
Figure III.31: L'image radiographique fissure longitudinale à la racine.....	67
Figure III.32: L'image radiographique inclusion de tungstène.....	69

Liste des tableaux

Tableau I.1. Liste des produits fabriqués par l'entreprise SIDER d'El-Hadjar.....	02
Tableau I.2. La gamme de production des tubes.....	04
Tableau II.1. Principaux contrôle non destructifs.....	18
Tableau III.1. Composition chimique du métal de base du tube.....	44
Tableau III.2. Pourcentage min et max des éléments.....	44
Tableau III.3. Exigence de contrôle visuel.....	50
Tableau III.4. Statistiques de l'usine pour un jour aux deux méthodes.....	68
Tableau III.5. Comparaison entre les deux méthodes.....	68
Tableau III.6. Exigences du contrôle visuel final.....	69

INTRODUCTION

L'augmentation de la demande d'énergies telles que le gaz et le pétrole nécessite de plus en plus la construction de nouvelles lignes de pipelines. En effet, ces derniers, sont devenus, durant les 50 dernières années le moyen d'acheminement le moins coûteux et le plus sûr pour de grandes quantités d'énergies et sur de longues distances (plusieurs centaines voire plusieurs milliers de kilomètres). Pour la fabrication des tubes, un grand nombre de matériaux peut être utilisé : acier, fonte, plastique, résines armées, etc... Le choix du matériau est fonction de la nature et de l'état des produits qu'elle doit acheminer.

Dans ce cas, on considère l'application de l'acier dans la fabrication, des tubes, pièces et matériaux qui satisfont aux exigences les plus sévères de l'industrie gazière.

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

- Pour le gaz naturel, on parle de gazoduc.
- Pour le pétrole, on parle d'oléoduc.

Les essais mécaniques permettent de réaliser le contrôle qualité des tubes en acier soudés en spirale. Ils 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.

le contrôle non destructif (CND) apparaît comme l'élément majeur du contrôle de la qualité des joints de soudure. On regroupe sous le vocable essais non destructifs ou encore le contrôle non destructif l'ensemble des techniques et procédés aptes à fournir des informations sur la santé d'une pièce ou d'une structure sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leur utilisation ultérieure. Mais il existe plusieurs types de défauts présents dans les cordons. Il faut alors savoir quelle méthode de contrôle sera utilisée.

La présente étude traite le thème «Détermination des défauts existant dans les tubes X70 Soudés par SAW par la méthode ultrasonique et radiographique», Alors on a développé l'étude théorique des principaux défauts avec les principales méthodes de contrôles non destructifs par un stage pratique au niveau de l'entreprise ALFAPIPE ANNABA dans un laboratoire des essais non destructifs.

Le développement de sujet est scindé en trois chapitres :

- Chapitre I : généralité sur l'usine.

Ce chapitre est consacré sur l'usine SIDER El-Hadjar Annaba et l'atelier ALFAPIPE.

- Chapitre II : une partie technologique.

ce chapitre parle de technologie de fabrication des pipes soudés en spirale, les principaux défauts et une étude théorique sur les méthodes de contrôles non destructifs
CND

- Chapitre III : une partie expérimentale

Ce chapitre concerne l'étude de propriétés chimiques et mécanique de l'acier x70 , les stades de contrôles au sein de l'atelier étape par étape avec une interprétation radiographique de défauts qui existe au cours de l'atelier.

Chapitre I:

Partie

générale

I. INTRODUCTION

L'industrie est l'outil de développement de chaque pays. Son but est la production des biens et de service. Le secteur de l'industrie lourde est choisi pour faire le premier investissement du fait que ce secteur était considéré comme la base de tout développement industriel capable d'assurer notre indépendance économique.

Les pipes sont très employées pour le transport des fluides de longue distance "pipeline" et l'assainissement en eau dans les villes. Pour cette raison ces pipes doivent être construites avec une qualité supérieure en tenant compte de tous les exigences techniques du cahier de charge.

II. Historique du complexe sidérurgique d'El-Hadjar :

La société nationale de sidérurgie a été créée le **03/09/1964** par ordonnance n° **642-72**, et constitue l'une des cinq entreprises nationales sous la tutelle de ministère de l'industrie lourde. Elle regroupe différentes unités réparties sur tout le territoire national. En tant que moyen pour assurer le développement des pays et améliorer les conditions de la vie du peuple algérien, autrement dit pour répondre aux impératifs économiques et sociaux du développement du pays⁽¹⁾.

III. Aperçu du complexe :

Ce complexe a pour mission de valoriser le minerai de fer et de fabriquer les produits sidérurgiques, l'alimentation en minerai vient des mines de OUENZA.

Il est érigé en zones de production :

- Zone fonte.
- Zone des produits longs.
- Zone des produits plats.
- Zone des tuberies.



Figure I.1 : Vue générale sur complexe sidérurgique d'El-Hadjar⁽¹⁾.

IV. Produits du complexe d'El-Hadjar :

INSTALLATION	PRODUIT	PRINCIPAUX UTILISATEURS
cokerie	Coke	<ul style="list-style-type: none"> ○ Métallurgie
Secteur haute-fourneaux 1 et 2 « HF1 et HF2 »	Fonte	<ul style="list-style-type: none"> ○ Métallurgie
Aciérie à oxygène 1et 2 « ACO1 et ACO2 »	Brames et billettes	<ul style="list-style-type: none"> ○ Industrie de transformation
Laminoir à chaud LAC	Tôles fortes	<ul style="list-style-type: none"> ○ Construction métallique ○ Chantier Navals ○ Tubes et bouteilles à gaz ○ Industrie de transformation
Laminoir à froid LAF	Tôles fines	<ul style="list-style-type: none"> ○ Electroménager ○ Mobilier métallique ○ Industrie de transformation
Tuberie spirale TUS	Tube avec soudure	<ul style="list-style-type: none"> ○ Transporte des hydrocarbures et d'hydraulique
Aciérie électrique ACE	Lingots	<ul style="list-style-type: none"> ○ Recherche et production pétrolière et transport d'hydrocarbures
Tuberie sans soudure TSS	Tube sans soudure	<ul style="list-style-type: none"> ○ Exploitation des hydrocarbures et hydrauliques
Laminoir à fils ronds LFR	Fil rond à béton	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bâtiment et travaux publics hydrauliques
Etamage	Fer blanc	<ul style="list-style-type: none"> ○ Emballages métallique divers pour l'industrie alimentaire et chimique
Galvanisation	Tôles galvanisés	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bâtiment pour l'agronomie ○ Industrie et élevage

Tableau I.1 : Liste des produits fabriqués par l'entreprise SIDER d'El-Hadjar ⁽¹⁾.

V. Présentation de l'unité ALFA PIPE ANNABA :

Notre stage a été effectué au niveau de l'unité de fabrication des tubes soudés en spirale ALFA PIPE du complexe sidérurgique d'El-Hadjar. ALFA PIPE est une entreprise spécialisée dans la fabrication des tubes pour canalisations d'hydrocarbures (gaz et pétrole) et d'hydrauliques et leurs revêtements (extérieur et intérieur). Elle dispose d'un système management qualité assurant la conformité du produit selon les normes internationales **API et ISO9001** depuis 2000. Située à 15 Km d'Annaba. ALFA PIPE a pour rôle de produire des tubes soudés en spirale à partir des bobines de tôles. La gamme de tubes fabriqués varie en diamètre entre 16 pouces (406.4 mm), et 52 pouces (1320.8 mm)⁽²⁾.

Actuellement, la plupart des commandes concerne des tubes 48 pouces (1219.2 mm) et de longueur entre 9 à 12 m. Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes **API 5L et NFA 49150**. La production des canalisations soudées est soumise à plusieurs exigences⁽²⁾.

Conformément aux spécifications, les tubes sont fabriqués par soudage automatique à l'arc immergé à partir de feuillards. Le métal devra être de bonne qualité notamment en ce qui concerne sa résistance au vieillissement. La qualité du matériau importé sous forme de bobine est vérifiée dans un laboratoire qualifié.

C'est aujourd'hui :

- Une prestation de qualité : un tube revêtu livré sur site pour éviter les aléas de manutention et de stockage intermédiaire;
- Un partenariat actif avec SONATRACH et les compagnies étrangères associées (Thyssen crupp, Arcelor, Lincoln...etc.).
- Une ferme volonté de conforter sa place de leader de production de tubes par la recherche de nouvelles formes d'association et par le renforcement de son processus de modernisation.

Le tube soudé en spirale est obtenu à partir d'un formage à froid d'une bobine d'acier, conformément aux normes API 5L et NFA 49150. La soudure des bords est faite en automatique à l'arc émergé sous flux, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur.

V. 1. Historique de l'unité :

En 1966, la SONATRACH, société nationale de transport et de commercialisation des hydrocarbures, précisait ses besoins urgents et considérables en moyens de transports oléoducs et gazoducs et par la même des hydrocarbures et d'hydrauliques en tube d'acier.

La SNS, société nationale de sidérurgie, était alors chargée par le ministère de ce projet devant permettre de satisfaire une part importante de ces besoins exceptionnels en tubes ;aux quels s'ajoutaient ceux de l'hydraulique, de l'agriculture et de l'équipement industriel en général.

En 1975, implantation d'un atelier d'enrobage intérieur (revêtement intérieur) de tubes par époxy, surtout utilisés pour les tubes de gaz.

En 1995, implantation d'un atelier d'enrobage extérieur en tricouches polyéthylène.
Après décomposition de SIDER en 1999, l'unité devient ALFATUS⁽²⁾.

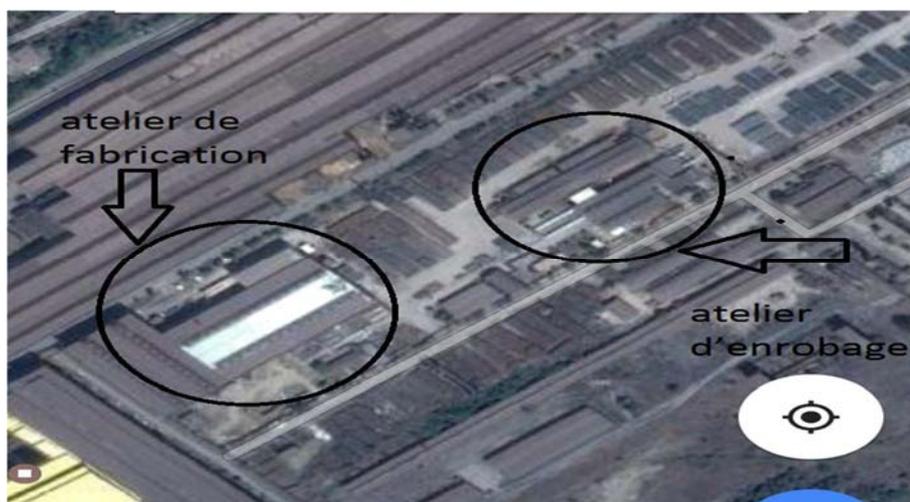


Figure I.2 : Vue générale sur l'unité ALFA PIPE.

V.2. La gamme des tubes produits:

Diamètre des tubes en Pouces	16	24	30	36	42	48
Épaisseur en (mm)	5,0	7,5	9,0	11,0	12,0	15,0
Largeur des bandes (mm)	800	1200	1500	1800	1800	1800
Capacité de production (m de tube/heure)	57	47	42	34	24	14

Tableau I.2 : La gamme de production des tubes⁽²⁾.

Les machines de l'unité peuvent traiter des aciers laminés à chaud à très hautes limites d'élasticité **HLE** nuances **X60 à X70 (PSL1/PSL2)**⁽²⁾.

Les bobines utilisées pour la fabrication des tubes spirales sont livrées brutes, ces approvisionnements proviennent principalement de l'Allemagne ou la France.

Les bobines utilisées peuvent avoir une épaisseur de **5 à 15** mm, une largeur de **600 à 1800**, un poids compris entre **29 et 36** tonnes, la production actuelle est de l'ordre de **130 000** tonnes/ans⁽²⁾.

V.3. L'organisation fonctionnelle de l'unité:

L'organisation d'ALFA PIPE ANNABA regroupe en quatre fonctions :

- **Fonction technique :**

Elle prend en charge: l'ordonnancement de la fabrication des tubes et son parachèvement, le revêtement des tubes, le contrôle qualité, la gestion de la maintenance, le dépannage, l'entretien préventif, la sous-traitance, la gestion des moyens de manutention et d'exécution des opérations de stockage.

- **Fonction commerciale :**

Elle assure l'ensemble des activités de vente et de relation avec les clients : L'assurance qualité et contrôle qualité des produits vendables, des bobines, des tubes et principaux produits de fabrication, la gestion des produits (tubes nus, tubes revêtus), la vente regroupant la programmation, la prospection, le marché, le suivi des contrats de vente, la fabrication, le recouvrement ...etc. Ainsi que le traitement des réclamations de la clientèle.

- **Fonction approvisionnement :**

Elle prend en charge les gros consommables (bobines, flux), l'achat de pièces de rechange, la prestation de services (sous-traitance), la gestion de stocke des pièces de rechange et de consommables de fabrication, le transit de la douane.

- **Fonction Ressource Humaine et moyen Généraux :**

Elle recouvre les activités suivantes :

- ✓ **Ressource Humaine** : gestion du personnel (paie, gestion, carrière), le sociale, la formation et le recrutement, les relations professionnelles et le contrôle interne de la gestion du personnel.
- ✓ **Moyens Généraux** : relations extérieures (mission, accueil), entretien et nettoyage des locaux, entretien des vestiaires, gestion parc-véhicules,

gardienage et surveillance, sécurité et prévention industrielle ; entretien de l'environnement extérieur, économat et bureau d'ordre.

- ✓ **Fonction finance et juridique** : elle assure les activités suivantes : budget, trésorerie, finance, gestion du patrimoine, assurance, fiscalité et juridique, comptabilité générale et analytique, contrôle de gestion.

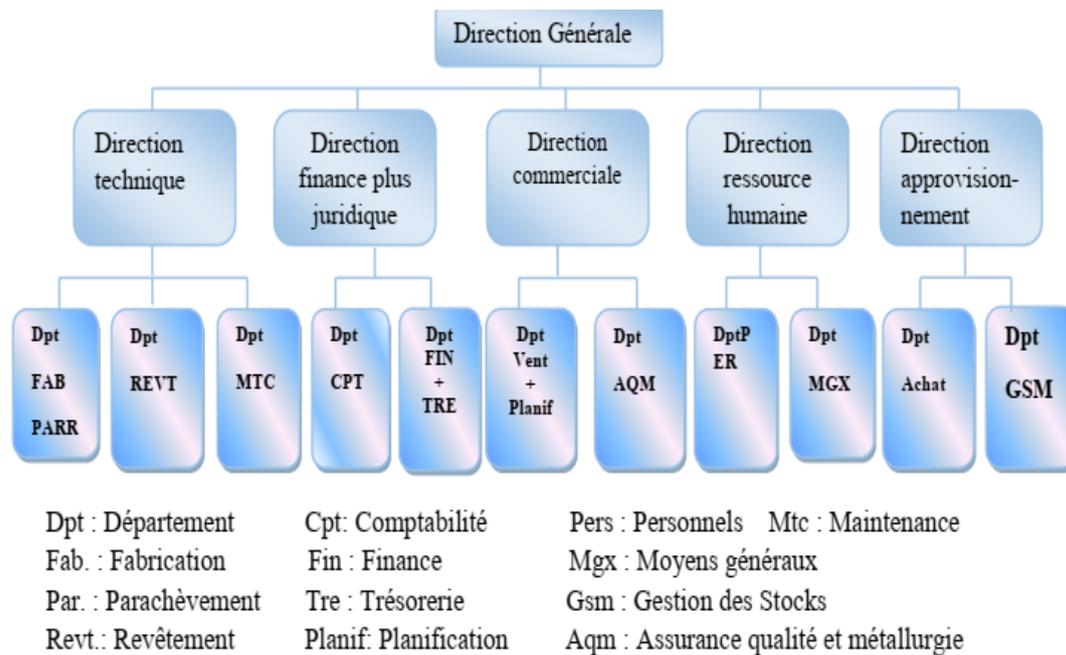


Figure I.3 : Organigramme de l'unité ALFA PIPE ⁽²⁾.

V.4. Organisation :

La tuberie spirale est composée de 04 halls couvrant une superficie d'environ 18 000m², d'un bâtiment administratif et d'une sous-station électrique de 15 kV/380V (3 transformateurs de 1600kVA et 2 transformateurs d'éclairage). Les installations de procès sont réparties dans trois Bâtiments industriels :

1. Bâtiment principal de production et contrôle des tubes nus, construit en 1968-1969 d'une superficie **18438 m²**.
2. Bâtiment du revêtement extérieur tri couche, construit en 1993-1995, d'une superficie de **4480 m²**.
3. Bâtiment de revêtement intérieur, construit en 2001, d'une superficie de **2904 m²**.

VI. Conclusion :

La qualité des tubes soudés en spirale fabriqués par ALFAPIPE est basée sur le respect des exigences de la norme Américaine API 5L (Américaine Petroleum Institut), qui passe par plusieurs étapes de contrôle, de la fiabilité du processus de fabrication et de bonne formation d'équipes de service maintenance et production.

La qualité des tubes soudés en spirale fabriqué par ALFAPIPE est basé sur le processus de fabrication et le bon réglage des machines par un contrôle périodique dès la réception de la matière première (bobine) jusqu'au produit fini (tube).

Le stage à ALFAPIPE m'a permis de découvrir un univers que je ne connaissais finalement que très peu mais pour lequel je porte un immense intérêt. J'ai trouvé l'entreprise très intéressante et enrichissante, puisqu'il s'agissait pour moi d'un domaine inconnu ou j'aimerais approfondir mes compétences.

Chapitre II:

partie

technologique

I. Introduction

Dans ce chapitre on va expliquer l'industrie des pipes dans l'entreprise ALFAPIPE. Pour ensuite expliquer les étapes de l'usinage des tubes soudés en spirale est enroulée à l'aide d'une tôle en forme de spirale, qui nous permet d'obtenir un tube assemblé par un cordon de soudure de l'intérieur et de l'extérieur de la paroi. Cette technique demande une préparation de la tôle et un réglage de la machine avec une grande précision afin d'obtenir un tube droit.

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants.

Le Contrôle Non Destructif est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, pour vérifier la fiabilité des produits. Toutes les soudures présentent des défauts. Les défauts ou les discontinuités dont la taille est trop importante sont appelés défauts inacceptables.

II. Les opérations principales pour la fabrication des tubes soudés en spirale :

II.1. Stockage des bobines:

Le hall de stockage des bobines est desservi par 2 voies ferrées et une voie sous – terrain reliée directement au LAC ainsi qu'un pont roulant de 44 tonnes, il permet de stocker 15 000 tonnes de bobines, soit la consommation d'un mois et demi de production⁽²⁾.



Figure II.1 : Stocke bobines.

II.2. Basculeur des bobines

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

II.3. Machine de préparation bobines

Cette machine est alimentée en bobines à l'axe horizontal par le pont roulant, la bobine ainsi placée est déroulée sur une certaine longueur pour subir plusieurs opérations :

La première partie de la bobine est coupée d'équerre suivant l'axe de la bande et elle est soumise à :

- Un contrôle dimensionnel (épaisseur, criques, ...).
- Un contrôle visuel (empreintes, criques, ...).

Un contrôle ultrasonique pour détecter les éventuels défauts internes (des doublures).



Figure II.2 : Préparation bobines⁽²⁾.

II.4. Machine à souder

La tuberie spirale dispose de 4 machines à souder identiques, qui permettent la réalisation de plusieurs opérations pour la fabrication du tube.

II.5. Le rabotage

C'est une opération qui consiste à couper, avec l'oxycoupeur, la fine bande sur la machine et de raccorder le bout de la précédente bobine à la nouvelle par un soudage automatique sous flux.

II.6. Le Guidage

Quatre galets de guidage à commande hydraulique permettent un réglage rapide de la bande en cas de dérives dues aux variations de largeur de la bande.

II.7 Dressage bande

Un train de rouleaux dresseurs assurent une parfaite planéité et contribuent au guidage de la bande.

II.8 Cisailage

Des cisailles de rives permettant la mise en largeur définitive de la bande. Les chutes ainsi obtenues par cisailage sont coupées par simple rotation de deux tourteaux hacheurs équipés de plusieurs couteaux en acier.



Figure II.3 : Machine rabotage, guidage, dressage et cisailage.

II.9 Formage de la bande

La bande est entraînée par deux rouleaux cylindriques, elle subit un préformage par des galets cambreurs, des bras de guidage avec plaque d'usure en téflon maintiennent la bande. Celle-ci est introduite dans la cage de formage constituée de plusieurs trains de galets, ajustés suivant le diamètre à réaliser. La bande ainsi formée, est soudée intérieurement, puis une demi-spire après, extérieurement.

Le procédé utilisé est le soudage automatique, à arc immergé sous flux ; une centrale permet la récupération du flux en excès pour le recycler. Le tube formé est coupé à la longueur voulue par un chariot d'oxycoupage prévu à cet effet.

II.10 Le soudage

Une fois enroulées en hélice, les bandes sont soudées par un procédé dit à l'arc immergé sous flux en deux passes successives, l'une à l'intérieur du tube, à l'accostage des rives, l'autre d'une demi-spire plus loin.

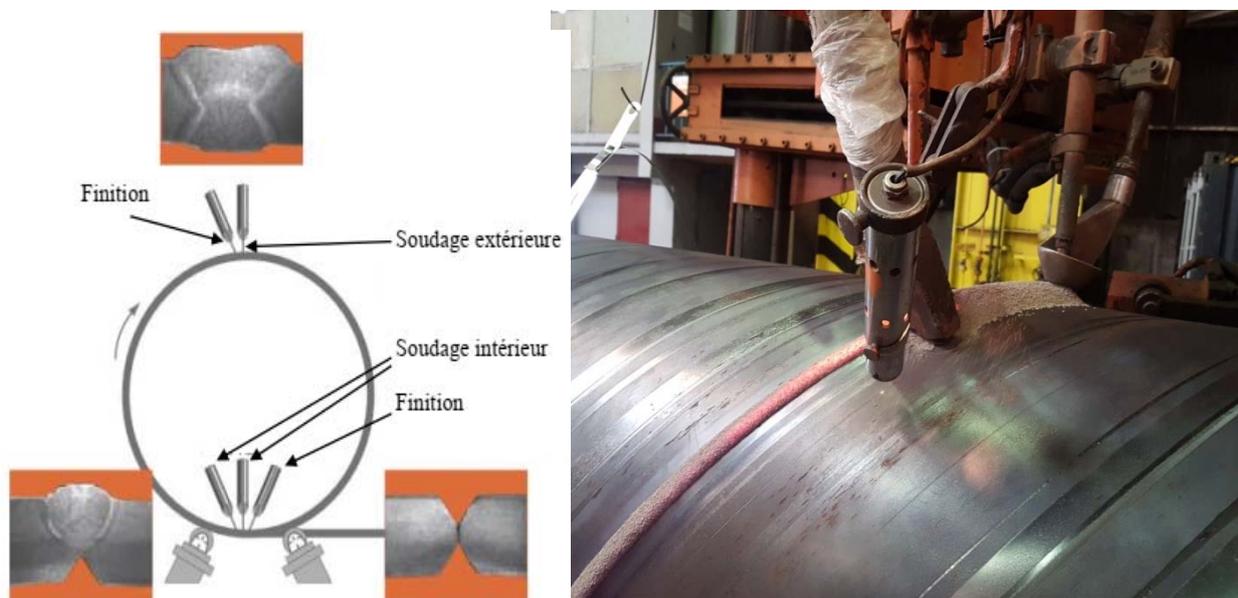


Figure II.4 : Soudage automatique sous flux⁽³⁾.

II.11 Oxycoupage des tubes

Le tube formé est coupé à la longueur voulue par un chariot d'oxycoupage prévu à cet effet.

II.12 Nettoyage tube

Le tube est nettoyé sur une machine qui le débarrasse de tous les déchets (flux, laitier, ... etc.).

III. Principaux Défauts de soudage

Il existe une grande variété de défauts caractérisé par leur nature (solide, gazeuse) leur forme et par leur origine. Lors du contrôle, la distinction entre différents types de défauts se relève cruciale car elle permet souvent d'estimer les risques de fracture de matériau. Un «défaut » est une anomalie de la matière risquant de provoquer « la ruine » de l'ensemble soudé. En soudage « un défaut » : discontinuité dans la soudure ou écart par rapport à la géométrie (volume).

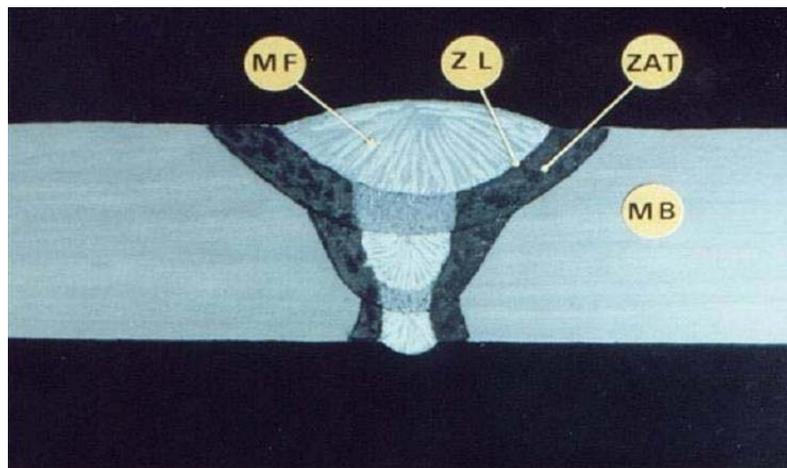


Figure II.5 : Les différentes zones de soudure⁽⁴⁾.

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

- Groupe 1 : Fissures.
- Groupe 2 : Cavités.
- Groupe 3 : Inclusion solide ou gazeuse.
- Groupe 4 : Manque de fusion / Manque de pénétration.
- Groupe 5 : Défauts de forme⁽⁵⁾.

III.1. Fissures :

Les fissures sont des déchirures qui apparaissent au cours du refroidissement sous l'effet de contraintes, ce sont des défauts plans.

Les fissures peuvent avoir des orientations différentes (transversales, longitudinales, ramifiée).

Fissures à chaud : ségrégation inter granulaire.

Fissures à froid : fragilisation par l'hydrogène.

III.1.2. Fissures à chaud :

Elle est due à la présence de ségrégations. Au moment de la solidification, les impuretés seront rejetées dans l'axe du cordon qui pourra fissurer sous l'effet des contraintes.

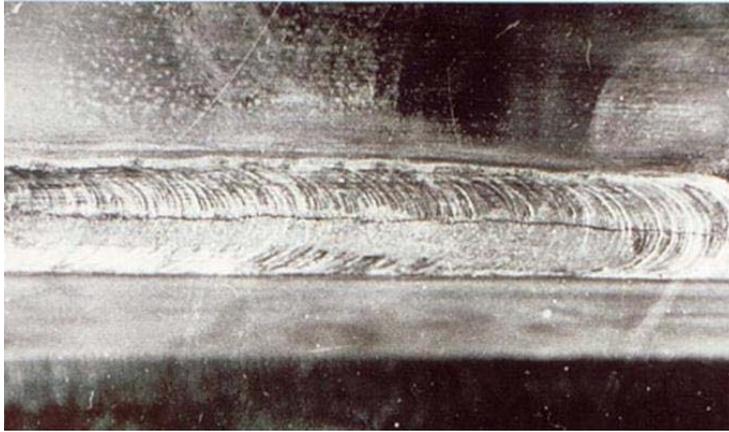


Figure II.6 : Fissure à chaud⁽⁶⁾.

III.1.3. Fissures à froid :

C'est un phénomène dû à la présence combinée de trois facteurs :

- Hydrogène.
- Contraintes.
- Structure métallurgique sensible (trempe martensitique).

Ce type de fissure peut apparaître vers la fin du refroidissement ($0^{\circ} < 250^{\circ}$) ou de façon différée, plusieurs heures après l'exécution de la soudure.

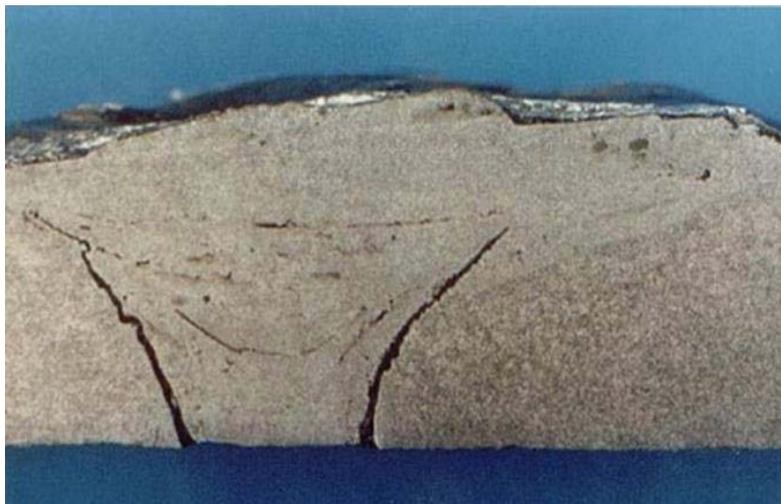


Figure II.7: Fissure à froid⁽⁶⁾.

III.1.4. Fissures longitudinales :

Fissures sensiblement parallèles à l'axe de la soudure. Elle peut se situer :

- ✚ Dans le métal fondu.
- ✚ Dans la zone de la liaison.
- ✚ Dans la zone thermiquement affecté.
- ✚ Dans le matériau de base.

III.1.5. Fissure transversale :

Fissure sensiblement transversale à l'axe de la soudure. Elle peut se situer :

- ✓ Dans le métal fondu.
- ✓ Dans la zone thermiquement affecté.
- ✓ Dans le matériau de base.

III.1.6. Fissures de cratère :

Fissure située dans un cratère de fin de cordon et qui peut être :

- a) Longitudinale.
- b) Transversale.
- c) Rayonnante.

III.2. Inclusions :

- ❖ Inclusion de laitier :

En soudure le laitier provient de la fusion des éléments non métalliques de l'enrobage, celui-ci était moins dense que le métal fondu, doit normalement flotter à la surface.



Figure II.8: Inclusion de laitier décelé par radiographie⁽⁶⁾.

III.3. Manque de fusion :

C'est un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé, il constitue une entaille aigüe susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue.

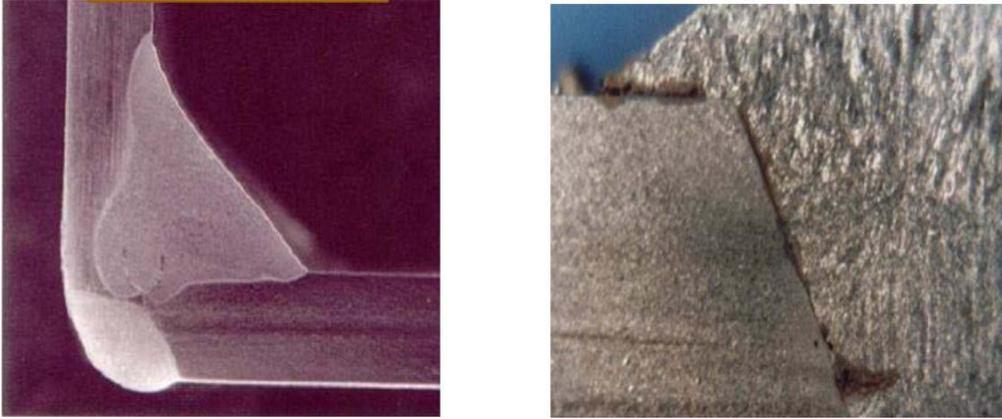


Figure II.9: Manque de fusion de la soudure⁽⁶⁾.

III.4. Manque de pénétration :

On dit qu'il y a manque de pénétration lorsque la soudure ne traverse pas complètement les tôles de part en part. ce défaut est le plus courant et aussi le plus grave parce qu'il diminue fortement la résistance du joint en créant une amorce de rupture.

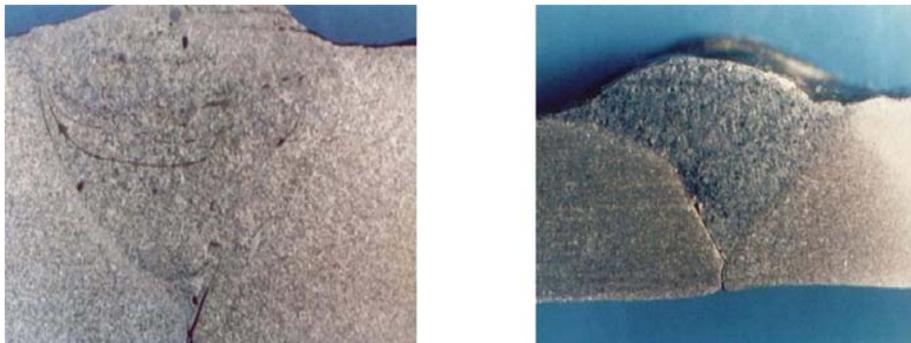


Figure II.10: Manque de pénétration⁽⁶⁾.

III.4.1 Causes possibles :

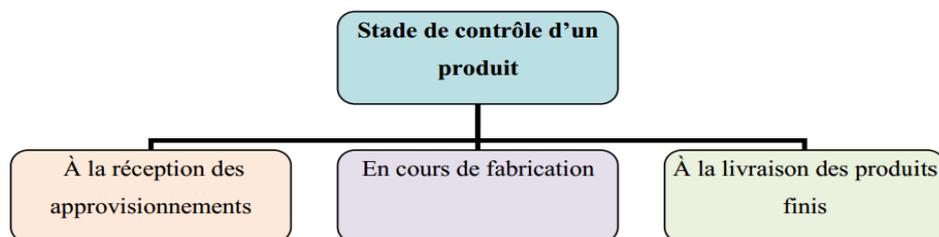
- Mauvaise préparation des bords.
- Energie de soudage insuffisante.
- Vitesse d'avance trop élevée.
- Reprise envers sans grugeage préalable.

IV. Méthodes de contrôles non destructifs

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'«Essais Non Destructifs »(END) ou d'«Examens Non Destructifs». Toutes les soudures présentent des défauts. Les défauts ou les discontinuités dont la taille est trop importante sont appelés défauts inacceptables. En pratique, les défauts de petites tailles sont peu nombreux et n'affectent pas les performances de l'assemblage soudé⁽⁷⁾.

1. Les stades de contrôle

On peut considérer que le contrôle non destructif d'un produit ou d'un objet peut être effectué à trois stades différents de sa vie :



2. Le contrôle de réception

Le contrôle de réception d'un lot de pièces, d'une installation, d'un ouvrage au moment de la livraison a pour but de respecter de conformité à des spécifications de qualité définies auparavant.

3. Le contrôle en cours de fabrication

Le contrôle en cours de fabrication est un outil de contrôle d'un procédé souvent automatisé et impliquant alors un appareillage installé à demeure en ligne de fabrication présentant une grande robustesse, une réaction rapide, un coût d'exploitation faible et une bonne fiabilité. Les défauts recherchés sont ici généralement bien identifiés, le fonctionnement est automatique aboutissant à un repérage ou un tri des produits défectueux.

4. Le contrôle de produit fini

Ce contrôle s'effectue sur pièces ou produits finis.

5. Définition, moyens et utilisations du contrôle non destructif

5.1. Définition

Contrôle Non Destructif (CND) : Méthodes de diagnostic de produits, afin de détecter, localiser, dimensionner et caractériser, d'éventuels défauts dans ceux-ci.

5.2. Moyens

Utilisation de capteurs dont le fonctionnement est basé sur les principes de la physique (électromagnétisme, rayonnements, propagation, électricité....)⁽⁸⁾.

5.3. Utilisations

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs),
- l'aérospatiale et l'armée,
- l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs),
- l'industrie navale (contrôle des coques),
- l'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbines, ..),
- l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage..),
- le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies),
- l'inspection alimentaire...

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :

- des pièces à coût de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique...),
- des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (nucléaire, canalisation de gaz...).

6. Généralités sur le contrôle non destructif :

Le contrôle non destructif (CND) consiste à rechercher la présence éventuelle de défauts au sein des matériaux constituant les objets ou parties d'objets à tester par l'utilisation de techniques diverses, sans attenter à l'intégrité de ceux-ci. La mise en œuvre d'un contrôle non destructif demande la connaissance⁽⁸⁾ :

- Des possibilités et limites des procédés utilisables,
- De l'histoire de la pièce (forme et mode de fabrication),
- Des défauts recherchés (nature, position, dimensions,...),
- Des propriétés physiques du matériau contrôlé.

Ces connaissances permettent de choisir⁽⁹⁾ :

- La méthode de contrôle la mieux adaptée,
- La procédure permettant :
 - D'observer les défauts recherchés avec le maximum de chances de détection,
 - De quantifier de façon la plus fidèle ces défauts.
 - Mise en œuvre des contrôles non destructifs.
- La mise en œuvre correcte de contrôles non destructifs comporte trois volets :
 - La qualification des opérateurs,
 - Le choix des équipements,
 - La définition des modes opératoires.
 - Principaux contrôles non destructifs.
- Les contrôles non destructifs peuvent se classer en trois catégories⁽¹⁰⁾ :
 - Les méthodes dites de surface pour lesquelles l'anomalie est localisée, soit en surface, soit dans une zone proche de la surface (Examen visuel, le ressuage, la magnétoscopie, les courants induits),
 - Les méthodes dites volumiques pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce (Ultrasons, rayonnements ionisants),
 - Les méthodes complémentaires (Etanchéité, thermographie, émission acoustique)⁽¹²⁾.

PROCEDE	DEFAUTS DE CIBLLES	AVANTAGES	LIMITES
Examen visuelle	-défauts de surface (manque de pénétration, caniveaux) -forme de cordon incorrect	-contrôle permanent pendant le soudage -peu couteux	-défauts de surface -pas de documents
Ressuage	-défauts de surface invisibles à l'œil (fissures débouchantes)	-simple d'emploi -peu couteux	- défauts de surface -pas de documents d'archive -interprétation délicate -non utilisable sur matériaux poreux
Magnétoscopie	-défauts de surface (fissures, manque de pénétration,...)	-méthode sensible et simple -peu couteux	-défauts de surface -interprétation délicate -utilisable que sur matériaux ferromagnétiques
Rayons ionisants	-défauts volumiques porosité, inclusions, manque de pénétration,	-détection de défauts internes -résultats archivables	-matériel couteux -opérateur qualifié -sensibilité fonction de l'orientation du défaut

Tableau. II.1: Principaux contrôle non destructifs⁽¹¹⁾.

IV.A. L'examen visuel

Le contrôle visuel est une technique de base essentielle de contrôle non destructif. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci :

- des défauts évidents (comme des cassures, de la corrosion, fissures, ...)
- des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur⁽¹³⁾.

1. Compétences nécessaires

L'examen visuel permet d'aider le contrôleur à choisir la technique la plus adaptée en CND pour des examens approfondis. La formation et l'expérience du contrôleur sont très importantes:

- la connaissance des méthodes de fabrication et d'assemblage et leurs possibles défauts : défaut de coulée ou de forge, de cintrage, défaut de soudure ...
- la connaissance des contraintes apparaissant en service (corrosion, fatigue, fluage...).
- la connaissance d'autres techniques CND pour des contrôles plus profonds en addition du contrôle visuel (détection des défauts cachés et dimensionnement).
- la formation doit être adaptée au secteur : aéronautique, centrale thermique et nucléaire, industrie...

2. Restrictions

- Technique limitée aux surfaces visibles.
- La surface doit être propre.
- Besoin de formation des opérateurs.

IV.B. Le ressuage

Par opposition aux autres méthodes de contrôle non destructif, le ressuage peut être considéré comme une méthode «globale» pour tous les défauts débouchants en surface, quelle que soit la nature du matériau. À partir du moment où les conditions opératoires sont satisfaites, on n'a pas besoin de connaître à priori l'orientation du défaut pour le détecter et un seul essai peut suffire. Comme par ailleurs ce sont les discontinuités débouchantes qui peuvent nuire le plus lors de l'utilisation de la pièce, on voit tout de suite le grand intérêt que peut présenter cette méthode : elle est d'ailleurs fréquemment utilisée en tant que méthode de lever de doute pour confirmer ou infirmer la présence de défauts débouchants mis en évidence par une autre technique.

1. Définition

Le ressuage est une méthode de contrôle non destructif dont le but est la détection et la localisation de défauts ouverts et débouchant en surface sur tous métaux et certains matériaux non métalliques (céramiques, matières plastiques...).

Cette méthode repose sur la capacité de certains liquides à pénétrer, puis à ressuier par capillarité, dans ces discontinuités géométriques.

La capillarité ou la force capillaire caractérise l'aptitude d'un liquide en contact avec un solide à se déplacer par rapport à ce solide⁽¹⁴⁾.

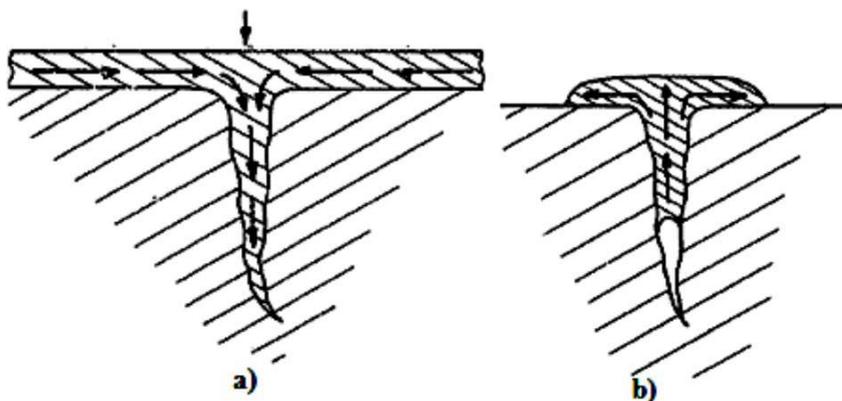
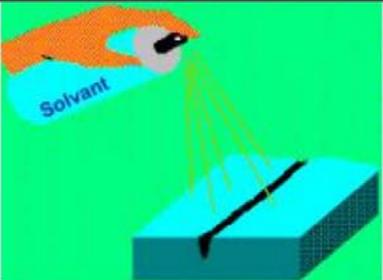
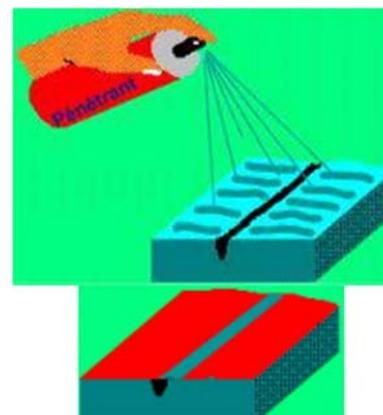
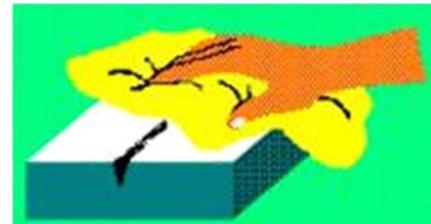
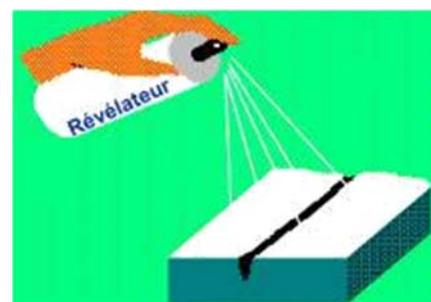


Figure II.11: Principe de ressuage⁽¹⁴⁾.

1. Introduction du pénétrant dans les discontinuités par capillarité,
2. Phénomène de ressuage après élimination de l'excès de pénétrant.

2. Principe de ressuage⁽¹⁵⁾

Le ressuage comporte 6 étapes :

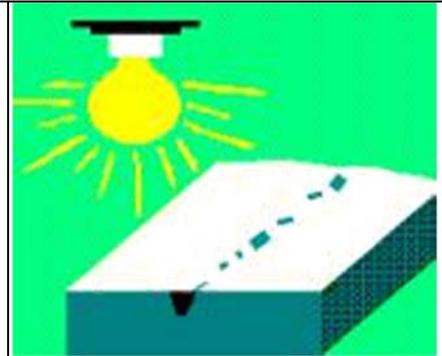
<p>a- Le nettoyage de la surface à contrôler :</p> <p>La méthode consiste à appliquer un pénétrant de faible tension superficielle (de bonne capillarité) sur la surface de la pièce :</p> <ul style="list-style-type: none">• Par meulage,• Par brossage,• Par dégraissage (chimique ou en phase vapeur)	 An illustration showing a hand holding a spray can labeled 'Solvant' (Solvent) and spraying it onto a blue rectangular block with a black crack on its top surface. The spray is depicted as several thin lines emanating from the nozzle.
<p>b- L'application du pénétrant sur la surface à contrôler:</p> <p>On laisse au pénétrant un certain temps de sorte qu'il puisse s'introduire dans les discontinuités aboutissant à la surface.</p>	 Two illustrations. The top one shows a hand holding a spray can labeled 'Pénétrant' (Penetrant) and spraying it onto the same blue block with the crack. The bottom illustration shows the blue block with a red layer of penetrant applied to its top surface, specifically filling the crack.
<p>c- L'élimination de l'excès de pénétrant :</p> <p>On élimine ensuite le pénétrant sur la surface mais cette opération laisse cependant en place la partie qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités. On utilise dans cette opération</p> <ul style="list-style-type: none">• Un chiffon sec et propre et non pelucheux,• L'eau suivi ou non d'un séchage,• Un solvant.	 An illustration showing a hand wearing a yellow glove using a yellow cloth to wipe the surface of the blue block. The red penetrant is being removed from the surface, leaving it only inside the crack.
<p>d- Application du révélateur :</p> <p>Un révélateur, produit opaque et absorbant est appliqué sur la surface, le pouvoir absorbant du révélateur fait que le pénétrant qui a réussi à s'infiltrer dans les discontinuités est alors aspiré vers la surface et y laisse une trace. Cette trace à cause de la diffusion du pénétrant dans le révélateur, est toujours plus importante que la discontinuité.</p>	 An illustration showing a hand holding a spray can labeled 'Révélateur' (Developer) and spraying it onto the blue block. The white developer is applied to the surface, creating a white layer that highlights the crack.

e- Interprétation des résultats :

L'efficacité de cette méthode de contrôle repose sur la possibilité de détecter les indications de discontinuité afin d'améliorer cette détectabilité, le pénétrant contient en général :

- un produit coloré visible à la lumière blanche (lumière du jour).
- ou un produit fluorescent visible à la lumière noire (ultra violet).

Une estimation grossière de la fissure peut être faite grâce à la largeur de l'étalement du pénétrant sur le révélateur.



f- Nettoyage final :

Un nettoyage final est préconisé pour certains matériaux (alliages d'aluminium, alliage de magnésium) pour lesquels la présence des produits utilisés peut entraîner des corrosions.

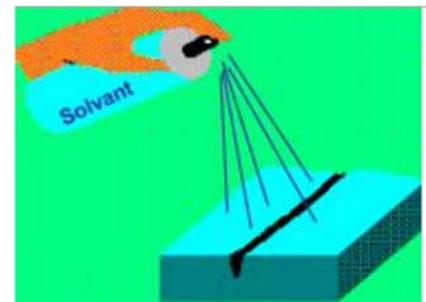


Figure II.12: Exemple d'une pièce avant (à gauche) et après (à droite) le contrôle par ressuage.

3. Types et significations des indications

3.a. Types d'indications

Toute apparition du pénétrant indique en principe la présence d'une discontinuité sur la surface. Les indications peuvent être classées en trois types:

Les vraies indications : se sont les seules indications soumises à une évaluation, elles ont pour origine les discontinuités non prévues à la conception de la pièce ou non justifié par les conséquences normales des procédés de fabrication. Les indications parasites: il s'agit d'indications résultantes des discontinuités existant réellement mais dont on connaît l'origine qui est d'ordre conceptuel. Les fausses indications: elles sont en général pour origine une élimination incomplète de pénétrant restant en surface, l'absence d'indication est aussi une fausse indication (dégraissage incomplet de la pièce, présence de poussière, ...)⁽¹⁵⁾.

3.b. Significations des indications

Les indications observées en ressues peuvent être regroupées en 5 types :

Forme arrondie: indications d'origine les défauts surfaciques de forme sphérique, (soufflure, piqûre, structure poreuse de la pièce...). Ligne continue: indication d'origine les fissures, les replis de forge, les rayures. Ligne discontinue: indication apparaît lorsque la pièce subit une préparation mécanique ou toute autre opération qui peut enfermer une partie d'un défaut débouchant. Tache ponctuelle: indication apparaissant surtout lors de contrôle des pièces moulées, elle est d'origine la nature poreuse de la pièce, des piqûres, ou de la structure grossière de la pièce. Tache diffusée: présence de micro-pores dans les pièces.⁽¹⁵⁾

4. Domaine d'application:

cette méthode est utilisée dans :

- Chaudronnerie: cordons de soudures.
- Centrales nucléaires.
- Industries mécaniques: engrenages, arbres, cylindres.
- Industries agro-alimentaires: sucreries.
- Étanchéité: détection de fuites.

5. Avantages et inconvénients

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">-Mise en œuvre possible sur organes montés dans un ensemble.-Très grande fiabilité.-grande souplesse d'adaptation en fonction de la géométrie des pièces et de leur état de surface.-Interprétation aisée des indications des discontinuités révélées.	<ul style="list-style-type: none">- Nécessité d'une bonne préparation des surfaces à contrôler.- Domaine de températures à respecter.- Nécessité de travailler proprement.- Effluents liquides à traiter.

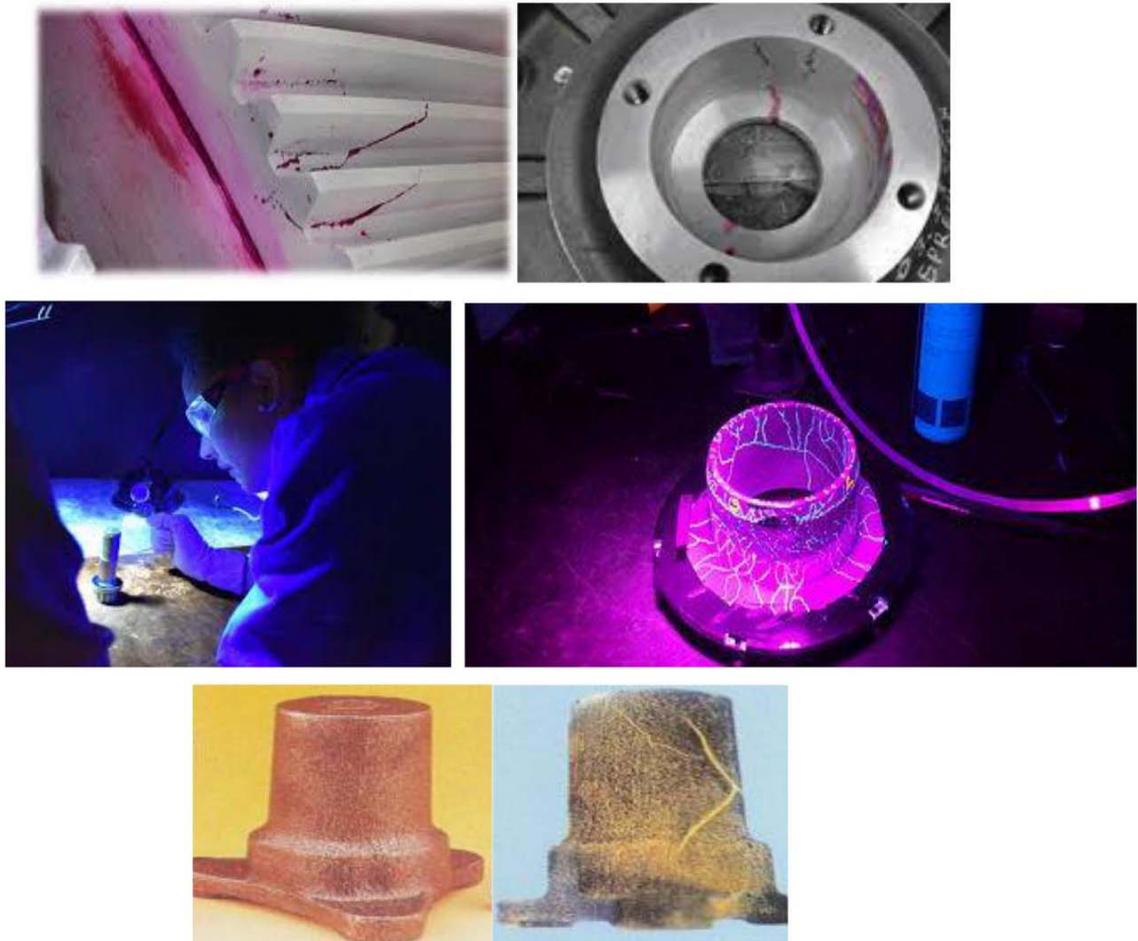


Figure II.13 : Exemples de pièces contrôlées par ressuage⁽¹⁶⁾.

IV.C. Contrôles par ultrason

Cette technique permet un contrôle non destructif assez performant des pièces. On peut ainsi:

- contrôler des fissures, des cavités, des inclusions métalliques, des occlusions gazeuses, etc...
- contrôler ou mesurer des épaisseurs quand des techniques traditionnelles ne sont pas utilisables (exemple : contrôle de l'épaisseur résiduelle de la paroi d'une cuve contenant un produit corrosif).

Le procédé est particulièrement indiqué pour des objets de forme géométrique simple (plaque, tube...).

1. Définition

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques de la matière fluide ou solide, de même nature que les sons, dont la fréquence est supérieure au domaine audible d'une oreille humaine normale (16Hz à 16KHz). Le phénomène initial du son ou d'un ultrason est toujours produit par un corps élastique animé de vibrations mécaniques dus par exemple à un choc (diapason), à une impulsion électrique (tonnerre) à un jet gazeux interrompues (sirène)⁽¹⁷⁾.

0-----16 Hz	16 Hz-----16.10 ³ Hz	16.10 ³ Hz-----150.10 ⁶ Hz	Plus que 150.10 ⁶ Hz
Infrasons sons	Zone audible	Ultrasons	Hyper sons

2. Notion d'onde

2.1. Définition

Les sons d'une manière générale sont des ondes élastiques, elles ne se diffèrent entre eux que par leurs fréquences. On parle généralement d'onde lorsqu'il s'agit d'un phénomène qui se répète après un certain temps (T) appelé période.

- La fréquence (f) de réapparition du phénomène est donc donnée par l'inverse du temps $f = 1/T$

- L'espace parcourue par l'onde pendant un cycle ou une période est dit longueur d'onde

$$\left(\lambda = V \times T = \frac{V}{f} \right)$$

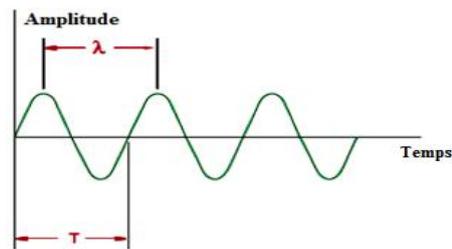


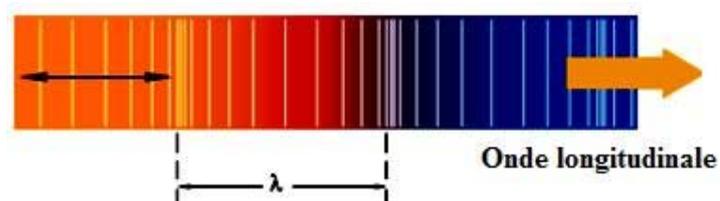
Figure II.14: Présentaion d'onde.

En contrôle non destructif, pour qu'on puisse détecter un défaut, il faut que celui -ci ait une taille au moins égal à $\lambda/2$. C'est pourquoi, on utilise des fréquences élevées, comprises en général entre 1 et 20 MHz.

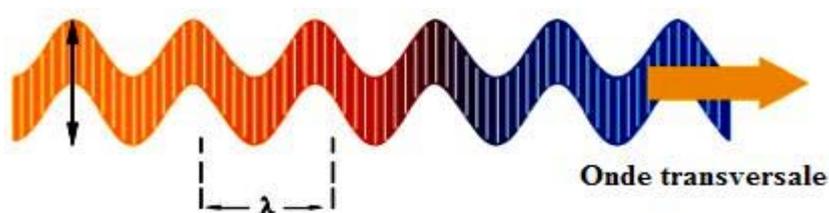
2.2. Types d'ondes

On distingue trois types d'onde :

- ✓ Onde longitudinale ou de compression : la direction des vibrations des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde⁽¹⁸⁾.



- ✓ Onde transversale ou de cisaillement : la direction des vibrations des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde⁽¹⁸⁾.



- ✓ Onde de surface : ondes obtenues par superposition des deux ondes longitudinale et transversale parallèle à la surface du solide. Sur la figure suivante, on illustre les trois types d'onde :

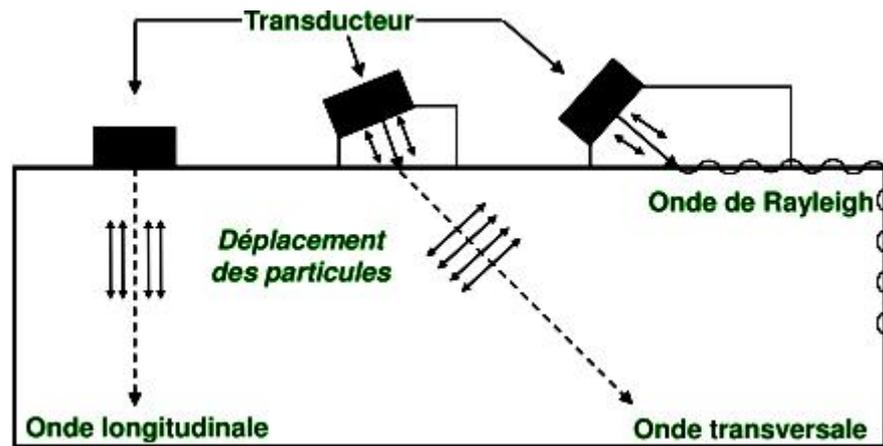


Figure II.15: Types d'ondes ultrasonores(18).

2.3. Vitesse de propagation :

La vitesse de l'onde dépend de la nature de matériaux que la transporte et de type d'onde :

- Onde longitudinale :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

E : Module d'Young (module d'élasticité) du matériau N/m².

ρ : Masse spécifique du matériau (Kg/m³).

ν : Coefficient de Poisson.

- Onde transversale :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$

E : Module d'Young (module d'élasticité) du matériau N/m².

ρ : Masse spécifique du matériau (Kg/m³).

ν : Coefficient de Poisson.

- Onde de surface :

$$V_s = 0,9 \times V_t.$$

3. Transmission et réflexion des ondes

3.1. Impédance acoustique

C'est la propriété qui détermine la transmission des ultrasons à travers la ligne adjacente à deux milieux, pour un matériau donné elle est égale aux produits de la masse spécifique de matériau par la vitesse de l'onde. ($Z = \rho \cdot V$). Les matériaux ayant de grandes

impédances acoustiques sont dits « durs ». Les matériaux ayant de faibles impédances acoustiques sont dits « mous ».

3.2. Incidence normale

Une incidence est dite normale si la direction de propagation de l'onde incidente est perpendiculaire à la surface séparant les deux milieux.

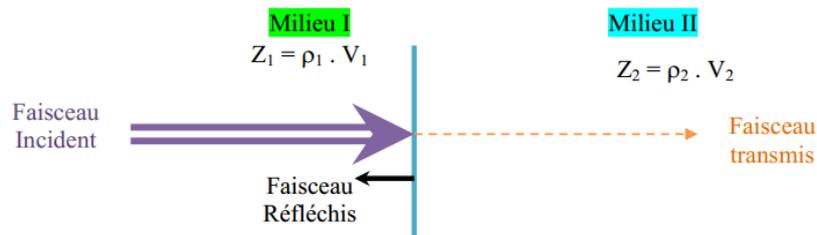


Figure II.16: Présentation schématique d'un faisceau incident.

On distingue 3 cas :

- 1^{er} cas : $Z_1 = Z_2$: transmission totale
- 2^{ème} cas : $Z_1 \cong Z_2$: transmission partielle
- 3^{ème} cas : $Z_1 \gg \gg \gg Z_2$: réflexion totale

On note par :

A_r : l'amplitude de l'onde réfléchie

A_i : l'amplitude de l'onde incidente

A_t : l'amplitude de l'onde transmise

4. Principe de contrôle par ultrasons

4.1 Principe

Une onde ultrasonore est émise par un palpeur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans celui-ci. Il est nécessaire d'ajouter un couplant (gel) entre le palpeur et la pièce 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 »⁽¹⁹⁾.

-Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut.

-Temps de pose (temps de silence) : c'est le temps nécessaire pour lequel l'onde soit perturbé (se réfléchisse) par le fond de la pièce ou par le défaut.

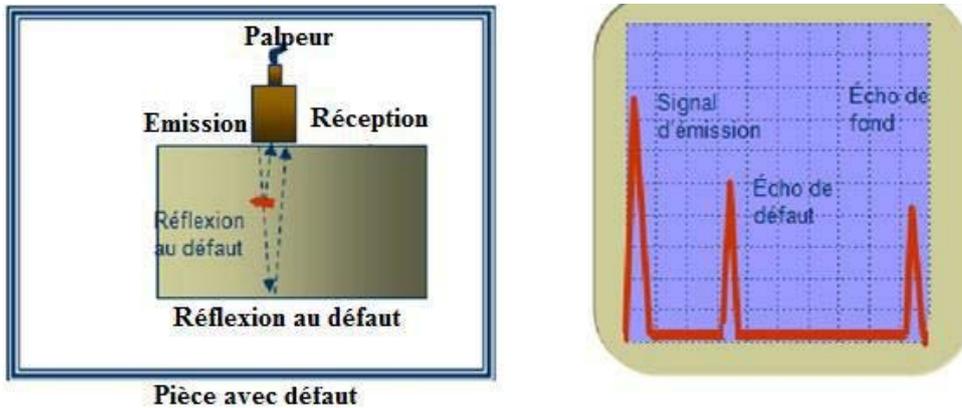


Figure II.17: Détection de défaut par ultrason.

4.2. Profondeur de l'existence du défaut :

- Pour un capteur droit (0° , ondes L):

On note par :

$$P = \frac{Vl \times t}{2}$$

p : la profondeur de l'existence du défaut par rapport à la surface supérieure de la pièce à contrôler.

t : le temps qui sépare l'écho d'émission et l'écho du fond.

V_l : vitesse de propagation d'onde L

- Pour un capteur d'angle (0° , ondes L):

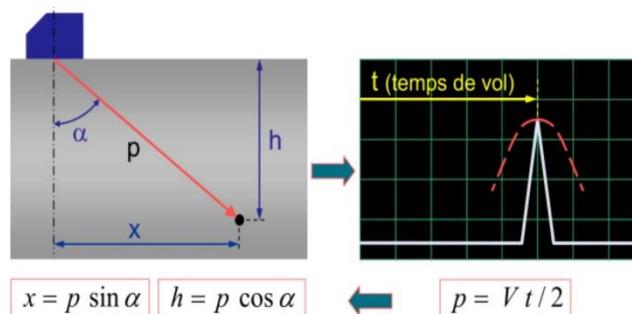


Figure II.18 : Détection défaut pour capteur à angle .

5. Capteur ultrasonore

5.1. Composition

Dans le sens large du mot, un transducteur une traduction du mot anglais “transducteur”, est un élément qui converti une énergie en une autre. Les transducteurs ultrasoniques convertissent l’énergie électrique en un son à haute fréquence (équivalent à une vibration à haute fréquence) et vis versa⁽²⁰⁾.

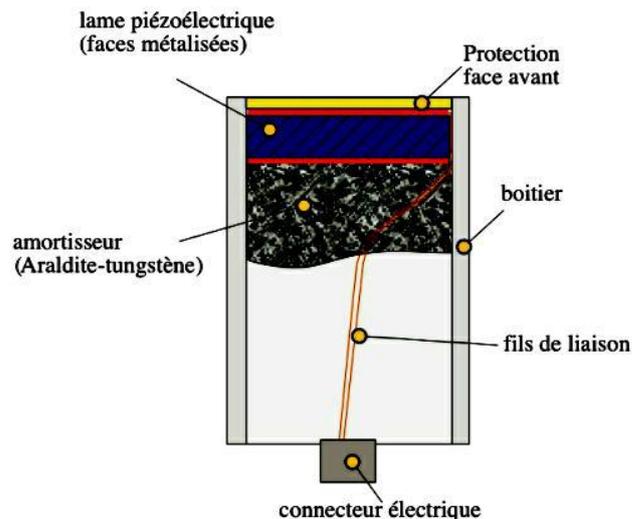


Figure II.19 : Schéma d'un transducteur⁽²⁰⁾.

Il existe plusieurs familles de palpeurs piézoélectriques adaptées aux différents modes d'utilisation : contrôle par contact ou en immersion, nature du produit à sonder, des défauts, etc.

Les 4 types de palpeurs les plus utilisés dans l'industrie sont les suivants: palpeur droit cylindrique, palpeur d'angle à sabot, palpeur droit focalisé, palpeur droit double avec émission et réception séparées (palpeurs SE). Certaines applications particulières font appel à des palpeurs spéciaux tels que les palpeurs droits rectangulaires, les palpeurs à focalisation cylindrique et les barrettes multi-palpeurs, nées dans le domaine médical et dont l'emploi se développe dans l'industrie⁽²⁰⁾.

6. Avantages et inconvénients

6.1. Avantages

- Contrôle sur métaux, plastiques, matériaux divers
- La détection des défauts à l'intérieur des matériaux
- Grande précision possible.
- Localisation et dimensionnement des défauts.

- Rapidité de mise en œuvre et transportabilité.
- Contrôle en service possible, large domaine d'application.
- Contrôle en temps réel

6.2. Inconvénients

- La sensibilité de la méthode est fortement influencée par l'orientation de la surface du défaut vis-à-vis de la direction principale du faisceau acoustique.
- Il est nécessaire d'interposer un milieu de couplage intermédiaire entre le traducteur et la pièce pour assurer la continuité de la propagation.
- L'interprétation de la nature des défauts et de leur dimension nécessite du personnel qualifié ayant une grande expérience.
- La mise en œuvre est difficile sur certains matériaux (matériaux absorbants).

IV.D. Magnétoscopie

Le magnétoscope complète l'examen visuel. Souvent les imperfections de surface, surtout lorsqu'il s'agit de solution de continuité, restent peu visibles au ressuage malgré tout le soin apporté. Parfois même si les anomalies débouchant, le milieu ne permet pas d'avoir recours au ressuage (pièces immergées par exemple). Lorsque le ressuage est insuffisant, on a recours à la magnétoscopie sous ses différentes formes: passage de courant électrique, passage de flux magnétique.

2. Définition

La norme **NF A09-590** définit la magnétoscopie comme suit:

"L'examen magnétoscopie consiste à soumettre la pièce ou une partie de la pièce à un champ magnétique de valeur définie en fonction de la pièce. Les discontinuités superficielles provoquent à leur endroit des fuites magnétiques qui sont mise en évidence par des produits indicateurs déposés à la surface de la pièce. L'image magnétique obtenue est observée dans des conditions qui dépendent du produit indicateur utilisé."

Le contrôle par magnétoscopie permet la détection de défauts superficiels débouchant ou sous-jacents dans les matériaux ferromagnétiques⁽²¹⁾.

Un matériau est dit ferromagnétique si lorsqu'il est soumis à un champ magnétique de 2400 A/m il présente une induction d'au moins 1 Tesla (**NF A 09-125 de Janvier 1982**). En effet un champ magnétique élevé ne peut s'obtenir que sur les matériaux ferromagnétiques⁽²²⁾.

3. Matériaux ferromagnétiques

Parmi les matériaux courants on peut considérer comme étant ferromagnétique :

- le fer pur,
- la fonte,
- le nickel,
- le cobalt,
- les aciers moulés, forgés,
- les aciers ordinaires au carbone, au silicium et faiblement alliés,
- les aciers à 3,5 - 6 et 9% de nickel (martensitique et ferritique -martensitique).

4. Principe de la méthode

Mise en présence d'un champ magnétique, la pièce ferromagnétique à examiner est parcourue par des lignes de forces. Lorsque ces lignes de force rencontrent un défaut dans la pièce, elles ne le traversent pas, mais la perturbation ainsi produite se transmet aux lignes de forces adjacentes et se propage jusqu'aux lignes proches de la surface de la pièce. Ces dernières vont alors "fuir" à l'extérieur, créant un champ local dénommé " champ de fuite" au droit du défaut⁽²³⁾.

4.1. Phase d'excitation

C'est la phase initiale qui consiste à soumettre la pièce à l'action du champ magnétique. Trois paramètres importants sont à prendre en considération dans cette phase :

- la nature du champ magnétique,
- l'intensité du champ magnétique,
- la direction du champ magnétique.



Figure II.20: La direction du champs magnétique.

-La nature du champ magnétique :

On peut rencontrer, suivant les installations utilisées, les formes d'ondes suivantes : monophasée sinusoïdale, monophasée redressée simple ou double alternances, triphasée redressée simple ou double alternances. La forme d'onde utilisée réagit essentiellement

sur la pénétration des lignes d'induction dans la section de la pièce se qui agit sur la précision de détection des défauts.

-L'intensité du champ magnétique :

Ce paramètre influe sur les conditions d'aimantation du matériau : une valeur trop élevée provoque la saturation de l'induction dans le matériau, ce qui n'est pas souhaitable.

-La direction du champ magnétique :

La sensibilité est optimale lorsque la direction est perpendiculaire à la direction présumée du défaut. C'est pourquoi on réalise généralement un contrôle suivant deux directions de champ orthogonales.

4.2. Phase de perturbation

C'est la phase la plus complexe car elle traduit l'interaction entre le matériau, le défaut et le champ exciteur. Les paramètres à prendre en considération dans cette phase sont les suivants :

a. **Nature ferromagnétique du matériau** : La courbe d'évolution de la perméabilité magnétique relative en fonction du champ magnétique est une caractéristique propre du matériau, présentant un maximum pour une valeur précise du champ exciteur : c'est pour cette valeur maximale que l'efficacité de la méthode est la plus grande. Dans la pratique, un compromis est adopté autour de cette valeur.

b. **Géométrie de la pièce** : La carte des lignes d'induction dans la pièce, ou son voisinage immédiat, est influencée par le profil de la pièce.

c. **Géométrie et position du défaut** : La perturbation des lignes d'induction, localement à l'aplomb de défaut conduit à un gradient d'induction dont l'intensité est fonction de la largeur du défaut, de sa profondeur et de sa position sous la surface.

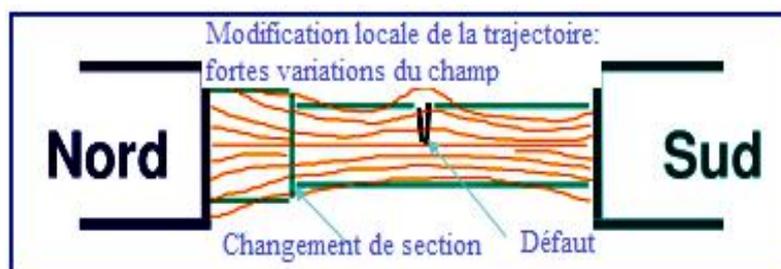


Figure II.21: Schéma représentatif de perturbation des lignes d'induction.

4.3. Phase de révélation

Le mécanisme mis en jeu dans cette phase résulte d'un équilibre des forces auxquelles sont soumises les particules de révélateur : force due à la pesanteur, force due à l'action mécanique de projection et force magnétique due au gradient local d'induction. Cette dernière force dépend du volume de la particule et de son aimantation.

En d'autres termes, les paramètres influençant la formation du spectre sont les suivants

- nature ferromagnétique des particules,
- volume et géométrie des particules,
- valeur locale de l'induction à l'aplomb du défaut.

L'efficacité globale de la méthode est étroitement liée à la maîtrise des paramètres évoqués dans ces trois phases et du jugement apporté par l'opérateur qui se trouve confronté à l'interprétation des spectres obtenus :

- Seule l'appréciation de la longueur du défaut est possible,
- Un doute subsiste dans certains cas critiques sur la distinction entre le défaut réellement préjudiciable et l'effet géométrique ayant engendré un spectre sans caractère de nocivité⁽²³⁾.

5. Avantages et inconvénients

5.1. Avantages

La méthode est relativement simple de mise en œuvre, elle permet une localisation précise des défauts de surface ou légèrement sous-jacentes et une appréciation de leur longueur.

5.2. Inconvénients

La méthode ne s'applique que sur les matériaux ferromagnétiques et la sensibilité est dépendante de l'orientation du défaut par rapport à la direction générale des lignes d'induction. Elle ne permet pas une appréciation de la profondeur et l'interprétation dans la phase de révélation reste parfois très délicate : l'automatisation de cette dernière phase n'a pas encore vraiment débouché industriellement. Une désaimantation des pièces après contrôle est nécessaire pour les pièces exposées à un environnement sévère.

IV.E. La radiographie

1. Introduction

L'examen de la structure interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié, un film dans la plupart des cas⁽²⁾.

2. Nature des rayonnements ionisants

Rayonnements de même nature mais d'origine différente, les rayons X et γ sont des ondes électromagnétiques de très courtes longueurs.

Les rayons X, créés par la collision d'électrons sur des atomes de matière, sont des ondes électromagnétiques, de même nature que la lumière visible ou les ondes radiophoniques, mais de longueur d'onde très courte, comprise entre 10^{-7} et 10^{-11} mètres, et dotées d'une grande énergie. Ces longueurs d'onde de l'ordre de l'Angström (10^{-10} m), sont proches des distances interatomiques, ce qui permet le passage du rayonnement à travers la matière, alors qu'un rayonnement de plus grande longueur d'onde se trouve réfléchi par la surface du matériau étudié. On caractérise couramment ces rayonnements par l'énergie unitaire E des photons associés, exprimée en électronvolts (eV). Si l'on exprime E en MeV et la longueur d'onde λ en pm, on tire de la relation du photon :

$$E = h \times f$$

Avec : W : est exprimée en électronvolt,

h : est la constante de Planck ($h = 6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s),

f : est la fréquence de l'onde.

La relation pratique :

$$E = \frac{1,24}{\lambda}$$

Les énergies requises en contrôle non destructif se situent dans une gamme allant de 50 keV à 20 MeV. Généralement, la fréquence f d'un phénomène périodique peut s'écrire : $f = C / \lambda$

Avec : C est la vitesse d'une onde électromagnétique ($C = 2.998 \cdot 10^8$ m.s⁻¹).

D'où, l'expression de l'énergie devient :

$$W = \frac{h \times C}{\lambda}$$

Par conséquent, l'énergie W sera plus importante si la longueur d'onde est plus faible. Cela confère donc aux rayons X et aux rayons gamma l'aptitude de traverser des milieux solides puisqu'ils sont caractérisés par des énergies élevées qui sont comprises entre 10^4 eV et 10^9 eV pour les rayons X et $10^5 < W < 10^7$ eV pour les rayons gamma.

3. Principe de la radiographie :

La radiographie enregistre l'image formée par des rayons X qui sont plus ou moins absorbés lorsqu'ils traversent un objet. On obtient ainsi à la fois une représentation de la constitution interne (structure, armatures, assemblages, ...).

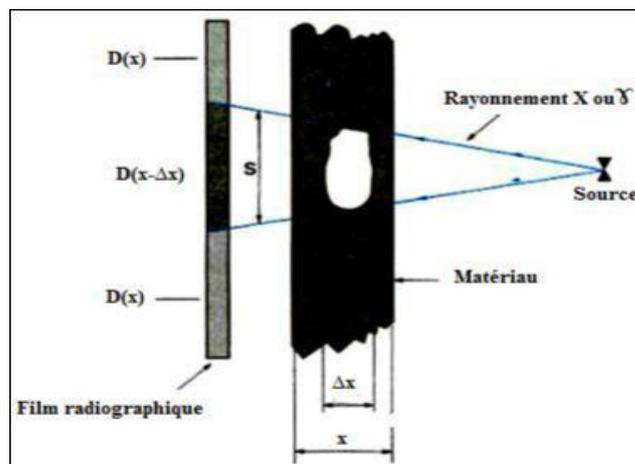


Figure II.22: Principe de contrôle par rayonnement⁽²⁴⁾.

Lors de la traversée de la matière par les rayons, les éventuels défauts contenus dans celle-ci constituent des obstacles qui absorbent plus ou moins le rayonnement. Les différences d'absorption peuvent être soit visualisées sur un écran fluorescent (par exemple : la radiographie utilisée dans le domaine médical), soit enregistrées sur un film spécial (cas de radiographie industrielle).

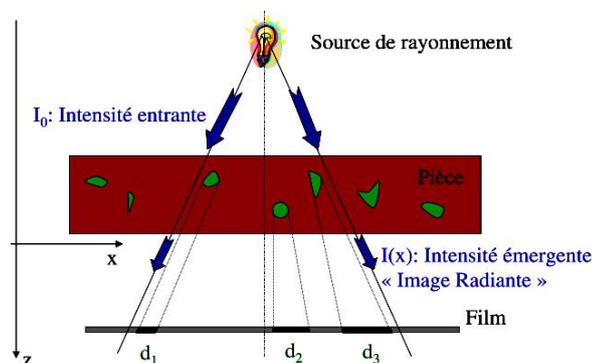


Figure II.23: Radiographie argentique⁽²⁵⁾.

- La pièce est placée entre la source de radiation et le film.
- Plus le matériau traversé est dense, plus il absorbe le rayonnement.
- L'intensité de gris du film est proportionnelle à l'intensité du rayonnement.
- Impression, sur le film radiographique, de l'image du défaut.

4. Production des rayons X

L'enveloppe externe d'un générateur de rayons X est en général une ampoule de verre ou plus récemment une association métal-céramique, dans laquelle a été fait le vide.

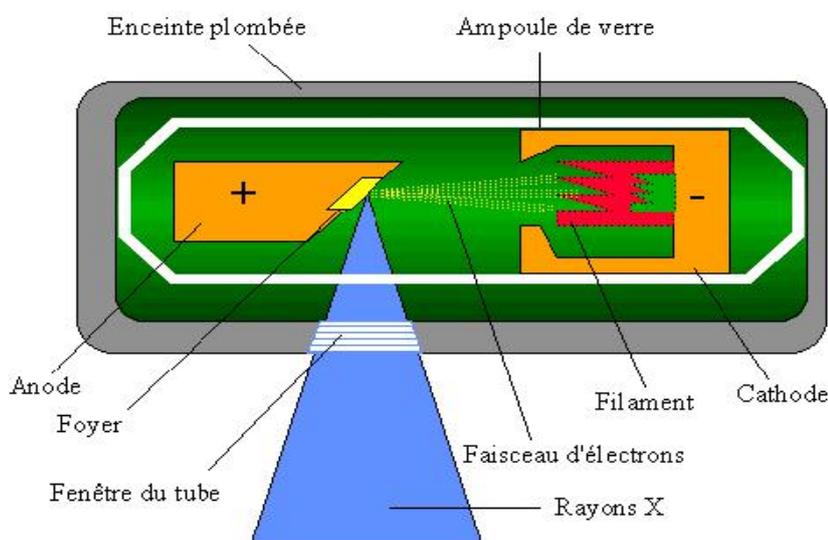


Figure II.24: Principe de production des rayons X.

Une cathode (-), constituée d'un filament métallique chauffé par le passage d'un courant de quelques milliampères, fournit des électrons mobiles facilement accélérés par une forte différence de potentiel (de quelques kilovolts à environ 450 kilovolts pour les générateurs les plus courants). Ce pinceau d'électrons heurte l'anode (+), en produisant principalement de la chaleur (99 %), mais aussi des rayons X.

Une **augmentation de la tension** appliquée entre l'anode et la cathode influe sur la qualité du rayonnement en entraînant:

- **un raccourcissement** des longueurs d'ondes.
- **un accroissement** de la pénétration du rayonnement par élévation de l'énergie des rayons X.

L'intensité de rayonnement émis augmente approximativement comme le carré de la tension d'excitation.

Les variations de l'intensité du courant de chauffage appliqué au filament de la cathode modifient la quantité des rayonnements émis, mais pas leur qualité: les longueurs d'ondes demeurent identiques.

Le noircissement obtenu sur le film dépend directement du produit du temps d'exposition par l'intensité du rayonnement, par exemple en radiographie médicale l'unité d'exposition utilisée est le mAs (produit des milliampères par les secondes), pour d'autres applications (radiographie industrielle) le mAm (produit des milliampères par les minutes). Certains matériels travaillent à intensité fixe, seuls varient le temps d'exposition et la tension.

5. Formation de l'image radiographique

Les rayons X sont issus d'une petite surface de l'anode appelée foyer. Ils se propagent en ligne droite et ne sont pas déviés par des champs magnétiques. Ils sont très difficilement réfractés, sauf par des dispositifs extrêmement complexes. L'image radiographique est donc formée uniquement par la projection conique des rayons à partir du foyer, sans utilisation d'un système optique.

- L'atténuation du rayonnement est fonction du carré de la distance parcourue entre la source et le film radiographique.
- La netteté de l'image dépend de la distance entre la source, l'objet et le film, de l'épaisseur de l'objet, des dimensions du foyer, et aussi de l'absence de mouvement de l'objet, du film et de la source de rayonnement.

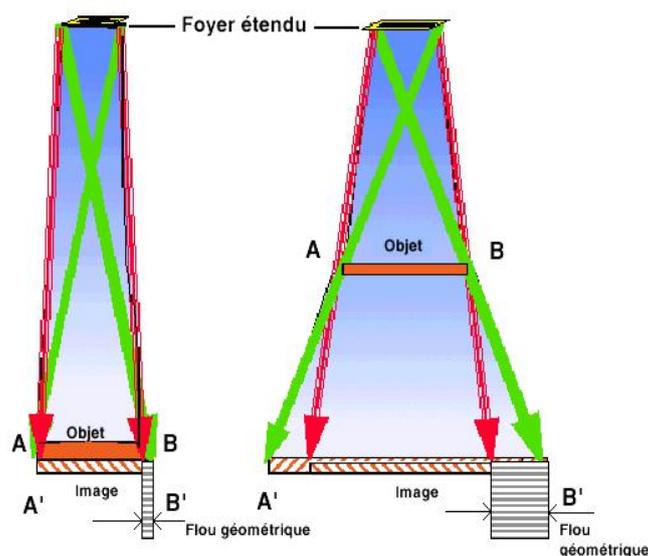


Figure II.25: Formation d'image radiographique⁽²⁶⁾.

- Lorsque le film est en contact direct avec l'objet, l'image A'B' est de même grandeur que l'objet (image de gauche).
- L'éloignement de l'objet vers la source de rayons X augmente la taille de l'image (image de droite), mais abaisse sa netteté à cause de l'étendue du foyer (comprise en général entre 0,6 mm au carré et 3 mm au carré), les rayons X issus des points extrêmes du foyer donnent des images éloignées d'un point de l'objet.
- L'image est considérée comme nette lorsque le flou géométrique maximal (l'étendue de la pénombre) est d'environ 0,2 mm⁽²⁶⁾.

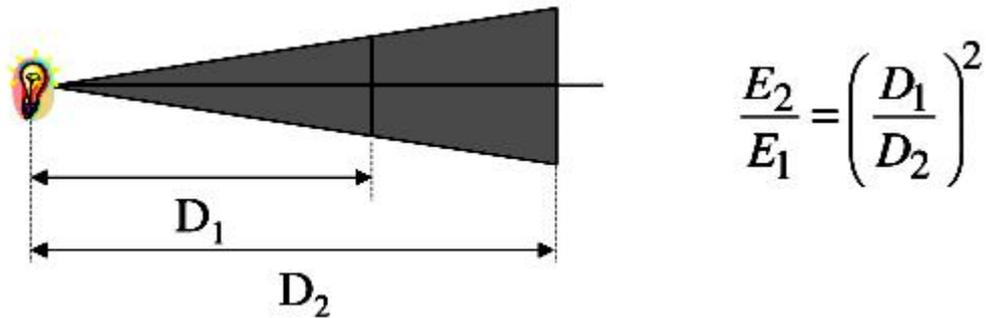


Figure II.26: Paramètres d'éloignement de l'objet vers la source.

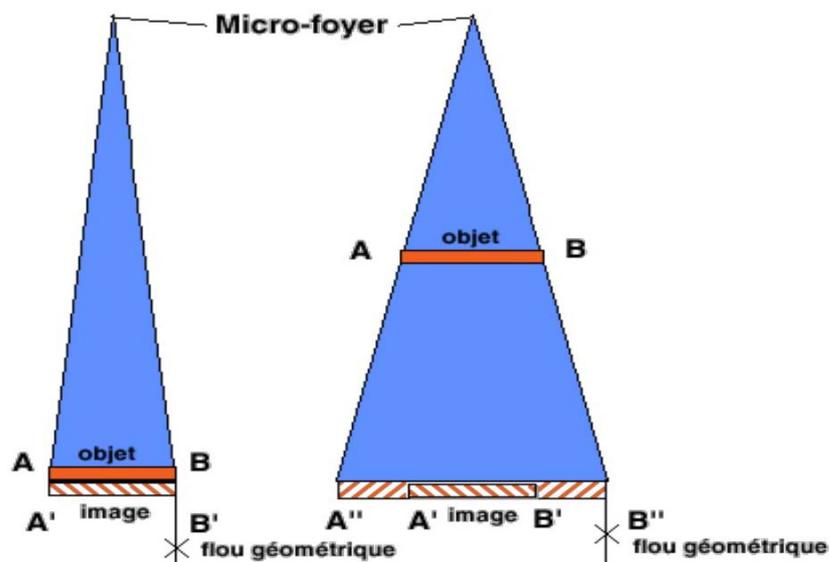


Figure II.27: Flou géométrique.

-L'image suivante montre que la diminution des dimensions du foyer par l'utilisation d'un tube à micro-foyer (typiquement 0,015 mm au carré) rend négligeable le flou géométrique et permet de forts agrandissements directs de l'image.

-L'absorption du rayonnement est proportionnelle à l'épaisseur de matière traversée, et à une puissance du numéro atomique de l'élément traversé. Ainsi un objet composé d'un unique matériau sera de plus en plus opaque aux rayons X quand son épaisseur augmentera.

6. Enregistrement de l'image radiographique

6.1. Paramètres d'influence

L'image radiographique est formée par les modulations du faisceau émergent résiduel de rayons X ayant traversé l'objet. Les paramètres à prendre en compte pour l'exposition sont :

- **la tension**, mesurée en kilovolts (kV), elle règle l'énergie du rayonnement et donc sa pénétration dans la matière,
- **l'intensité**, en milliampères (mA), et le temps, dont le produit détermine la quantité totale de rayonnements reçus par l'objet,
- **la distance** séparant la source de rayonnements du récepteur,
- **la sensibilité** du récepteur
- la présence éventuelle de **filtration** dans le faisceau, d'**écrans renforçateurs** disposés contre le film,
- **la nature de l'objet** (numéro atomique des éléments constitutifs), et son (ou ses) épaisseur(s).

La plus importante restriction dans l'emploi de la radiographie est la mauvaise discrimination de deux éléments de numéro atomique très proches. Ce phénomène provient du fait que la distribution de l'absorption du rayonnement ne présente pas de discontinuité entre un élément et ses voisins immédiats. On constate sur la courbe suivante la constance du coefficient d'absorption des rayons X, et les variations de plus en plus affirmées pour des rayons X de plus basse énergie⁽²⁶⁾.

6.2. Visualisation et enregistrement de l'image radiographique

Il existe trois moyens complémentaires de visualiser et d'enregistrer l'image radiographique :

a- le film radiographique

C'est un film photographique spécial, muni d'une forte épaisseur d'émulsion sensible, très chargée en halogénures d'argent. Il est généralement bicouche (une demi-émulsion sur chaque face) pour faciliter le développement de l'image. Plus l'énergie du rayonnement est élevée, plus l'oxydation des sels métalliques contenus dans l'émulsion photographique est importante, et le noircissement du film important.

b-Visibilité des défauts :

Cette visibilité des défauts est déterminée par les facteurs suivants :

- La nature et l'épaisseur traversée par le rayonnement du défaut,
- Les facteurs géométriques (distance du foyer de la source au film par exemple) qui vont conditionner la netteté des contours du défaut (problème de flou),
- Les propriétés du film (granulation, voile de base, présence d'écrans filtrants et (ou) de renforçateurs),
- La qualité du rayonnement utilisé.

c-Qualité du contrôle :

Pour apprécier la qualité de l'image radiographique, il faut la traduire sous forme numérique. Pour cela, on utilise des indicateurs de qualité d'image (IQI). Ils sont placés au contact de la pièce face à la source de rayonnement. L'image de l'IQI sur le film traduira la qualité de l'image.

Les principaux IQI utilisés sont les suivants:

- Indicateurs à fils (utilisé dans la plupart des pays européens),
- Indicateurs à gradins percés (utilisé surtout en France),
- Indicateurs à plaquettes percées (utilisé aux USA).

d- la radioscopie

La fluorescence d'écrans sensibles aux rayons X forme l'image visible de l'objet. Cette image était naguère observée directement derrière l'écran, ce qui était très dangereux pour l'observateur non protégé, et a entraîné au début du siècle de nombreuses maladies chez les radiologues (nécrose des mains par exemple), et même plusieurs décès. De nos jours, cette image est reprise par une caméra de télévision, l'observation se fait donc loin des rayonnements dangereux. L'écran fluorescent constitue souvent la face d'entrée d'un amplificateur de brillance, dans lequel les électrons produits à la surface de l'écran par les rayons X sont accélérés puis transformés en lumière visible par un écran phosphorescent qui

fournit une image lumineuse à l'objectif de la caméra. Cette amplification diminue fortement les doses de rayonnement nécessaires. L'image de l'écran peut être enregistrée sur bande magnétique, imprimée, ou numérisée.

e- la numérisation directe

Un capteur sensibilisé aux rayons X transforme l'intensité du rayonnement en valeur numérique. Deux voies parallèles existent :

- les **capteurs** en forme de **barrette**, qui nécessite l'exploration de la surface de l'image par défilement soit de l'objet, soit du support de la barrette,

les **capteurs plans**, en forme de **matrice**, qui analyse en bloc la surface de l'image. Une voie détournée consiste à effectuer la numérisation d'après un film.

7. Avantages et inconvénients

1. Avantages

- Technique possible dans tous les matériaux.
- Large gamme d'épaisseurs (de quelques fractions de mm à plusieurs centaines de cm).
- Film radio : preuve.
- Large domaine d'applications.

2. Inconvénients

➤ Limites d'ordre techniques :

- Interprétation délicate des images,
- Personnel hautement qualifié.

➤ Limites d'ordre pratique :

- Conditions de sécurité strictes,
- Orientation du défaut,
- Prix de revient élevé.
- radiographie déjà existant , ou en sortie de la radioscopie télévisée.

V. Conclusion :

Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.

Les méthodes de contrôles non destructifs sont appliquées souvent sur les joints de soudures quel que soit le procédé de soudage utilisé, les contrôles non destructifs sont nécessaires pour qualifier les pièces à assembler.

Chapitre III:

partie

expérimentale

I. Introduction

Les méthodes de contrôles non destructifs sont les moyens qui déterminent la qualité des pipes et assurent leur fiabilités en utilisant deux principales méthodes de caractérisation à savoir les ultrasons et la radiographie.

II. Composition chimique du tube de nuance X70

La composition chimique de l'acier utilisé X70 selon la norme API 5L est donnée dans le tableau :

Tableau III.1. Composition chimique du métal de base du tube⁽¹³⁾.

Elément	Valeur max%
C	0.12
Si	0.45
Mn	1.70
P	0.025
S	0.015
Cr	0.3
Ni	0.3
Mo	0.1
Cu	0.25
Nb	0.06
Ti	0.06
V	0.10
N	0.012
CE (Pcm)	0.20

Tableau III.2. Pourcentage min et max des éléments⁽¹³⁾.

Elément	% Min	%Max
Al	0.015	0.050
B		0.0005
Ca		0.006
Sn		0.010

- $(Cu+Cr+Ni+Mo) \leq 0.5 \%$,
- $(Nb+V+Ti) \leq 0.15 \%$
- $Al/N \geq 2/1$

Pour toute réduction de 0.01% de C, une augmentation de 0.05% de Mn est permise, jusqu'à une teneur limite de 2% (selon l'exigence de la norme API 5L).

III. Propriétés mécaniques du tube

les caractéristiques mécaniques sont obtenues par les essais suivants:

1. Essai de traction

L'essai de traction détermine:

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

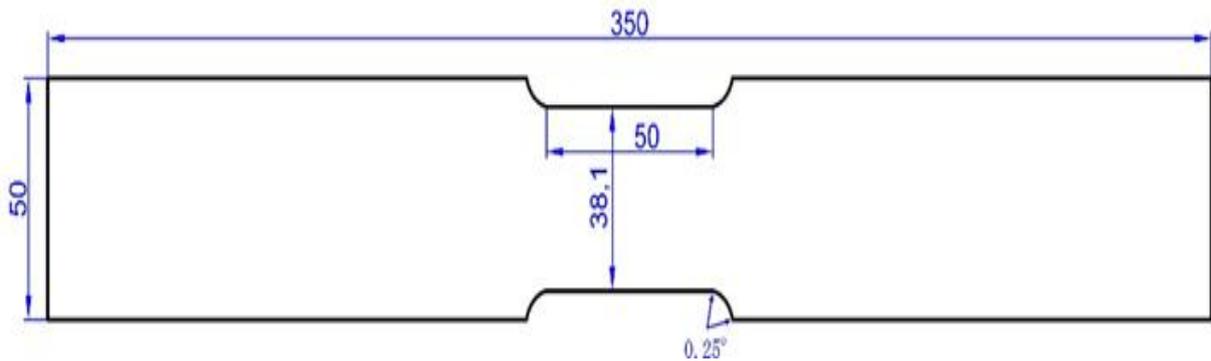


Figure III.1 : Éprouvette normalisée selon L'API5L.⁽²⁷⁾

Après deux essais de traction pour deux échantillon prélevés de deux différentes bobines les résultats sont dans le tableau suivant⁽¹³⁾:

Numéro de coulée	Numéro de bobine	R_e (MPa)	R_m (MPa)	R_{ms} (MPa)	A%	R_e/R_m
730215182	6729049	542,14	636,53	689,52	36	0,85
730215632	6748036	541,1	625,24	676,37	35	0,87

2. Essai de macro dureté

La pratique de macro dureté nécessite la préparation des éprouvettes par polissage par meulage à l'eau à l'aide de papiers abrasifs à indice de granulation croissante jusqu'à 600, on prépare uniquement la face qui fait l'objet de l'essai On mesure la dureté à l'aide d'un duromètre de type : ZWICK ZHV10. On appliquant une masse de 10 KG dans les 16 points (Norme API 5L) comme l'indique la figure on obtient les duretés Vickers suivantes⁽¹³⁾:

1-Dans le métal de base:

Dureté MB						
1	2	3	14	15	16	Moy
212	213	214	213	215	212	213,166667
210	216	213	213	216	214	213,666667

2-Dans la zone fondu :

Dureté ZF				
7	8	9	10	Moy
222	221	224	224	222,75
219	221	218	225	220,75

3-Dans la zone affectée thermiquement:

Dureté ZAT						
4	5	6	11	12	13	Moy
226	224	228	223	221	229	225,166667
222	222	229	219	222	230	224

Les trois duretés sont regroupés dans le tableau suivant :

Les zones	Les points	La dureté H.V
Métal de base (Mb)	6 points	Bobine 01: 213.16 H.V Bobine 02: 213.66 H.V
Zone affecté thermiquement (ZAT)	6 points	Bobine 01: 222.75 H.V Bobine 02: 220.75 H.V
Cordon de soudure(ZF)	4 points	Bobine 01: 225.16 H.V Bobine 02: 224 H.V

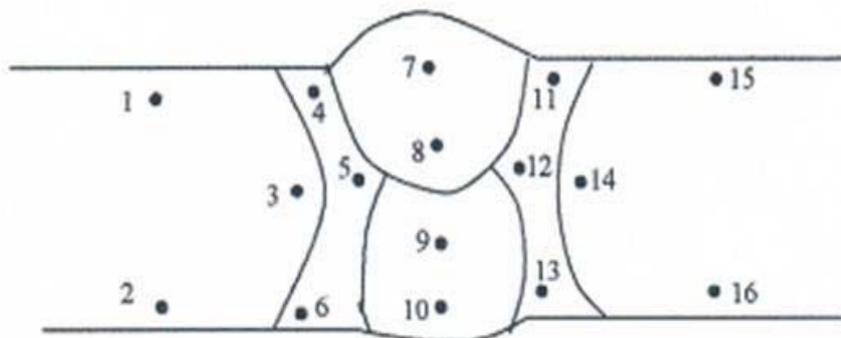


Figure III.2: Les points de mesure de la dureté selon L'API 5L.⁽²⁷⁾

- Pour les résultats de dureté

Remarque:

- D'après les résultats de duretés obtenus, nous remarquons que les valeurs de la zone affecté thermiquement (Z.A.T) sont relativement élevées par rapport au métal de base et au cordon de soudure. Ceci peut être attribué au changement structural de cette zone qui a subi une sorte de traitement thermique (trempe) conduisant à un durcissement.
- Pour la zone fondue, qui est moins dure que la zone affecté thermiquement, les valeurs de dureté sont dues à la légère modification de la composition chimique du fil de soudage par la méthode S.A.W et le flux lui même.

3. Essai de résilience:

Cet essai est fait par une éprouvette normalisée selon la norme API5L à fin de déterminer la fragilité du matériau à une température de -10°C .
on mesure la résilience des trois zones (M.B, Z.A.T, Z.F) avec trois essais pour chaque zone comme les tableaux suivants montrent⁽¹³⁾:

Résilience MB J/cm ²			
Kv1	Kv2	Kv3	Kv moy
358	330	325	338
238	263	265	255

Résilience ZF J/cm ²			
Kvs1	Kvs2	Kvs3	Kvs moy
275	225	363	288
163	125	178	155

Résilience ZAT J/cm ²			
Kv_{z1}	Kv_{z2}	Kv_{z3}	Kv_z moy
280	215	230	242
168	163	135	155

- D'après les résultats de l'essai de résilience obtenus, nous remarquons que les valeurs K_{CV} évoluent contrairement à celles de la dureté. Ceci, peut être expliqué par le fait que : plus la dureté augmente plus l'énergie absorbée pendant le choc est moindre.

4. Essai de pliage:

On a fait cet essai avec des éprouvettes similaires à celles utilisées dans l'essai de traction pour évaluer la capacité de déformation plastique d'un matériau donc pour vérifier la ductilité. Ses résultats sont :

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



Figure III.3: Essai de pliage.

IV. Contrôle des pipes

Après l'étude de caractérisation chimique et mécanique des pipes selon la norme API 5L, les pipes passent au contrôle. Ce stade consiste à contrôler les pipes par plusieurs méthodes en commençant par l'œil nue (contrôle visuel), ensuite on passe aux ultrasons pour vérifier les défauts qui ne peuvent pas être déterminés par le contrôle visuel.

1. Contrôle visuel et dimensionnel :

1.1 Principe du contrôle :

Le contrôle visuel et dimensionnel consiste à soumettre une surface, une préparation de chanfrein ou une soudure à une vérification visuelle de son aspect physique et de ses dimensions géométriques.

1.2 Condition du contrôle visuel et dimensionnel :

Le contrôle visuel et dimensionnel doit être réalisé sous une luminosité de 350 lux minimum (recommandé: 500 lux). L'œil de l'observateur doit être placé à une distance inférieure à 500 mm de la surface à examiner sous un angle supérieur à 30°.

1.3 Matériels de contrôle :

- Règle droite ou ruban de mesure avec graduations de 1 mm ;
- Loupe grossissante de 2 à 5 fois ;
- Jeu de jauges ou cales de 0,1 à 3 mm ;
- Jauge à vernier ou calibre de soudure ;
- Miroir ou endoscope.

1.4 Forme et dimensions :

- 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.

- La soudure est contrôlée pour vérifier que :
 - 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.

- Les dimensions de pipe sont contrôlés pour vérifier :
 - l'épaisseur de pipe
 - le longueur de pipe
 - le diamètre

Tableau III.3. Exigence de contrôle visuel.⁽²⁷⁾

Désignation	Exigence	
	Minimale	Maximale
✓ Longueur	08.00ml	12.30ml
✓ Epaisseur (nominale 14.30mm)	12.87mm	15.73mm
✓ Diamètre extérieur		
- Au corps ($\text{Ø}^{\pm 3.2}$)	708.0mm	714.4mm
- En extrémité sur 101.6mm ($\text{Ø}^{\pm 1.6}$)	709.6mm	712.8mm
✓ Hauteur de cordon de soudure		
- Extérieur	0mm	3mm
- Intérieur	0mm	3mm
✓ Enfoncement		
- Profondeur	-	3mm
- Longueur	-	177.8mm
✓ Caniveau (profondeur)	-	0.8mm
✓ Défaut d'aspect à l'extrémité sur 50mm	Non toléré	
Réparation à l'extrémité sur 150mm	Non toléré	
Réparation de soudure manuelle		
nombre de réparation	≤ 03 soudures de réparation par tube	
séparation entre 02 réparations	≥ ½ Ø (355.6mm)	
cumul soudure de réparation	≤ Ø (711.2mm)	
type de réparation	Traitement par défaut	
reprise de réparation	Non toléré	

2. Epreuve hydrostatique :

Chaque tube subit l'épreuve hydrostatique au niveau de l'installation relative à ce test (banc d'épreuve hydrostatique) avant tout test non destructif final. Les tubes sont testés à 90% de leur limite élastique selon API 5L et la spécification du client, en respectant la réglementation algérienne (DDP). Chaque tube doit être maintenu à la pression d'essai pendant au moins 15 secondes et pression de test 117 bars (exiger par le client). Les étapes de l'épreuve sont enregistrées automatiquement par le biais d'une machine résultant en des courbes.



Figure III.4: Banc d'essai hydrostatique.

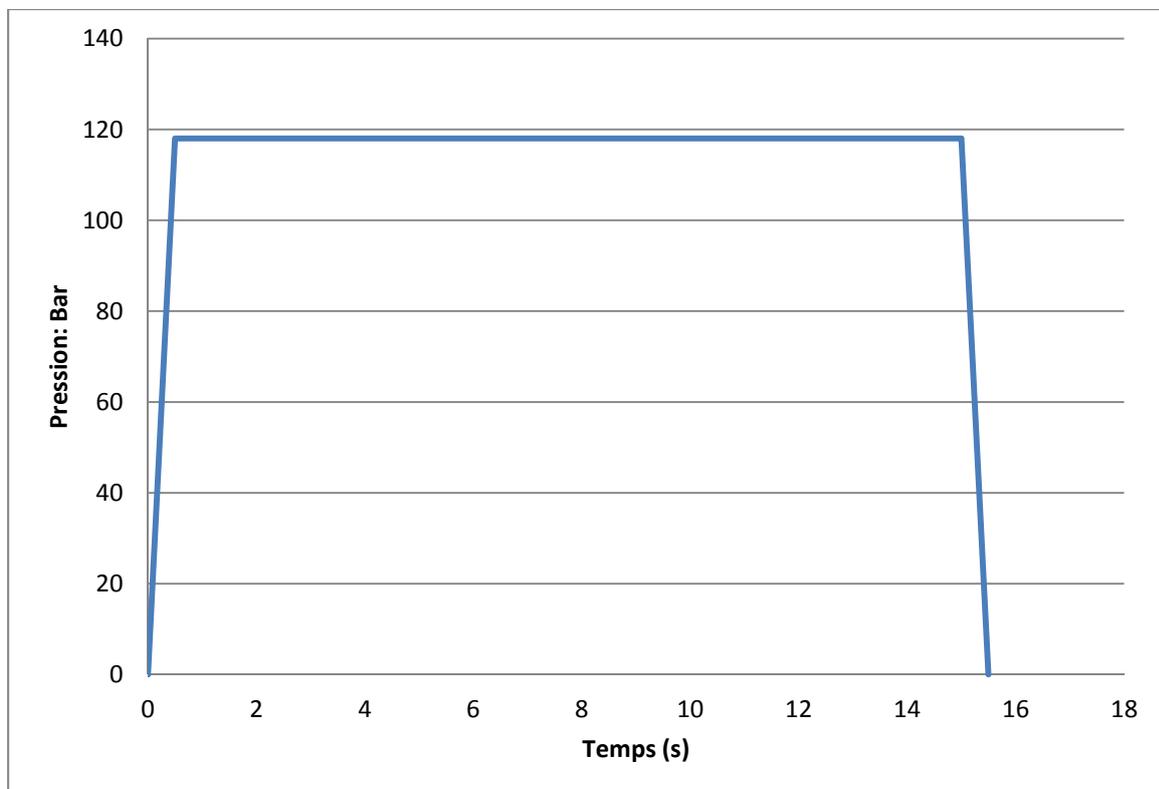


Figure III.5: Schéma d'une épreuve hydrostatique de tube.⁽¹³⁾

3. Contrôle par ultrasons:

Après l'épreuve hydrostatique, le pipe passe au contrôle par ultrasons pour l'examiner au volume. Dans ce stade là on détermine les défauts volumiques sans savoir la nature de défaut. Ce contrôle est réalisé sur le cordon de soudure, le métal de base et les extrémités du tube afin de détecter tout les défauts. Les résultats du contrôle sont enregistrés automatiquement sur un micro ordinateur et imprimé sur papier (rapport Ultrason ou numéro du 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 contrôle début et fin de chaque poste de travail, l'inspecteur s'assurera que tout les défauts artificiels créés sur ce tube sont repérés lors du contrôle (figure x). Le cordon de soudure est contrôlé par une machine électrique à émission ultrason à l'aide de deux (02) palpeurs longitudinaux situés de part et d'autre du cordon de soudure. La tôle est également contrôlée par un palpeur transversal plan en mouvement de translation entre les deux (02) spires.

Quand il y a un défaut la machine crache par la peinture la zone ou il y a le défaut sur le tube.



Figure III.6: Contrôle par ultrason de pipe.⁽¹³⁾

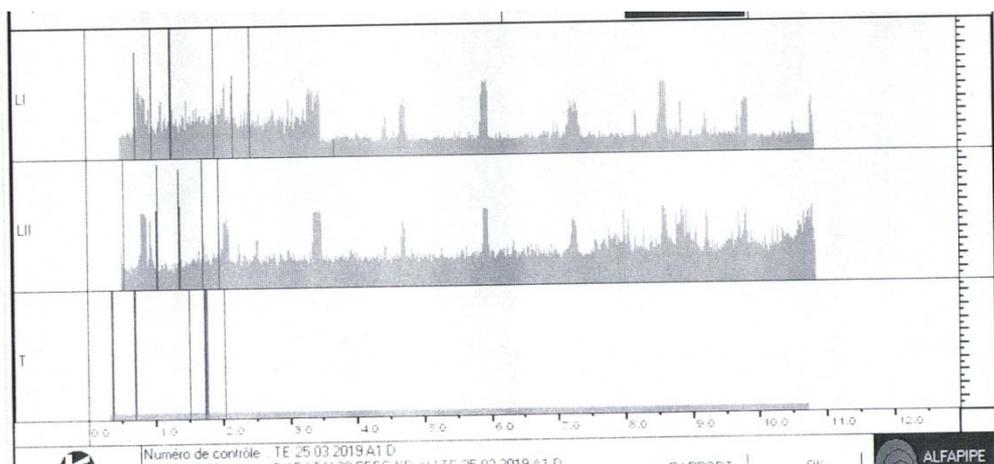


Figure III.7: Résultat de contrôle par ultrason de tube étalon. (13)

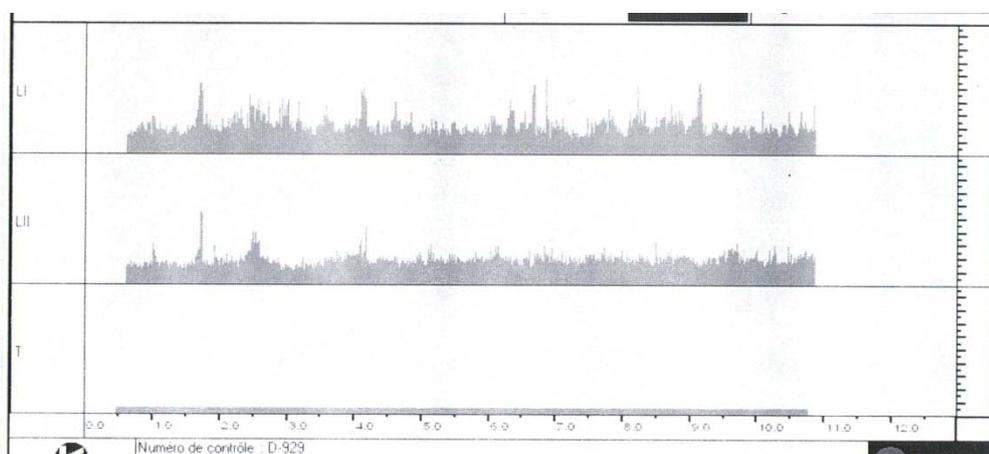


Figure III.8: Résultat de contrôle par ultrason d'un tube sain. (13)

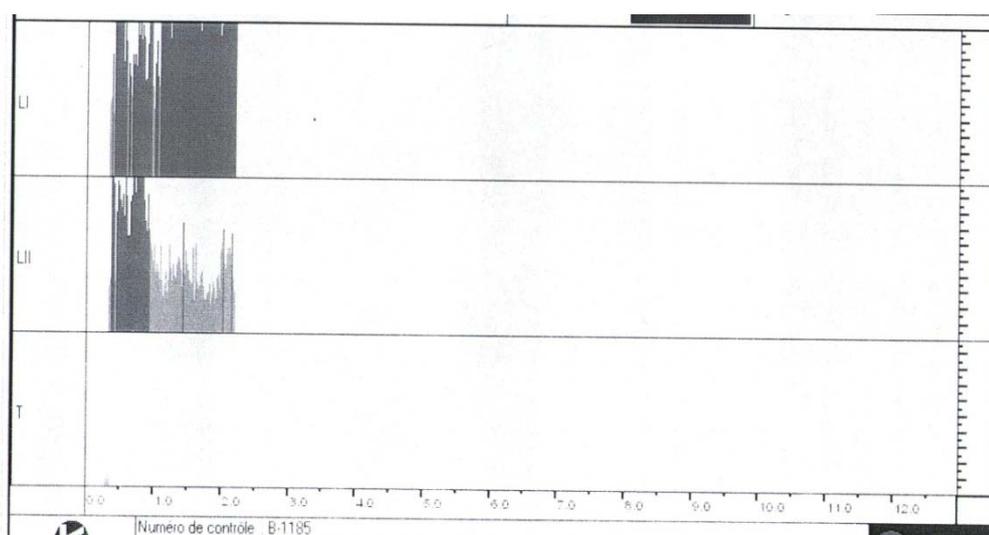


Figure III.9: Résultat de contrôle par ultrason d'un tube contient des anomalies. (13)

4. Contrôle radiographique:

Chaque défaut de soudage repéré à l'ultrason automatique et les réparations, fait l'objet d'une première radiographie au rayon X. Un second appareillage radiographique, identique au précédent, est spécialisé dans la prise de la radiographie des soudures d'extrémités. La radioscopie utilise un écran fluorescent visualisant les défauts (l'ancienne technologie utilise le film argentique.)

- pour un tube sain (après contrôle par ultrason)

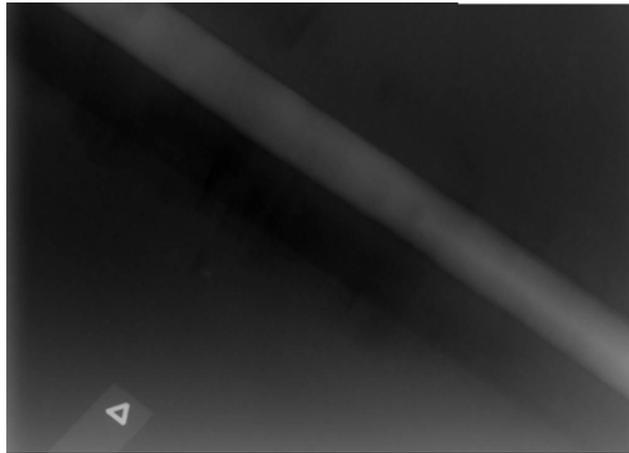


Figure III.10: Radiographie de tube début.

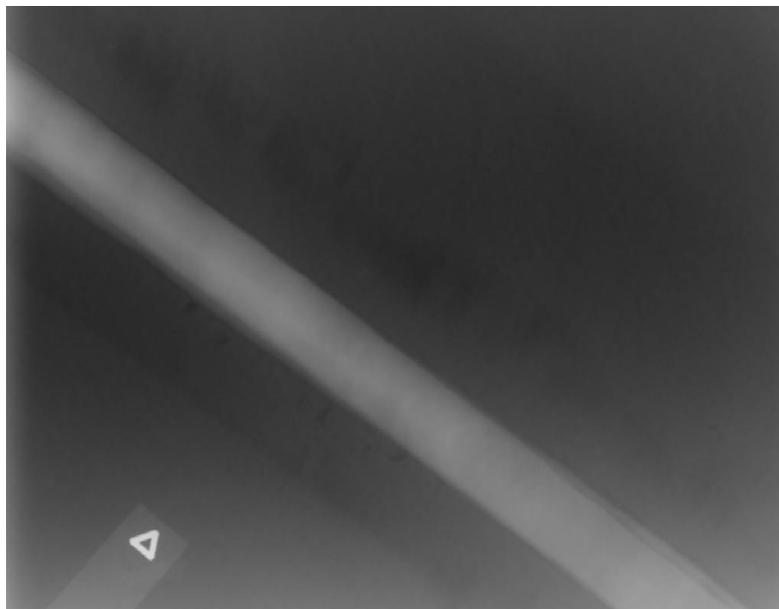


Figure III.11: Radiographie de tube fin.

- Pour un tube qui contient des défauts :

le contrôle par ultrason indique qu'il y a quatre défauts, mais le contrôle par radiographie détermine que ces quatre défauts sont de même type (manque pénétration)

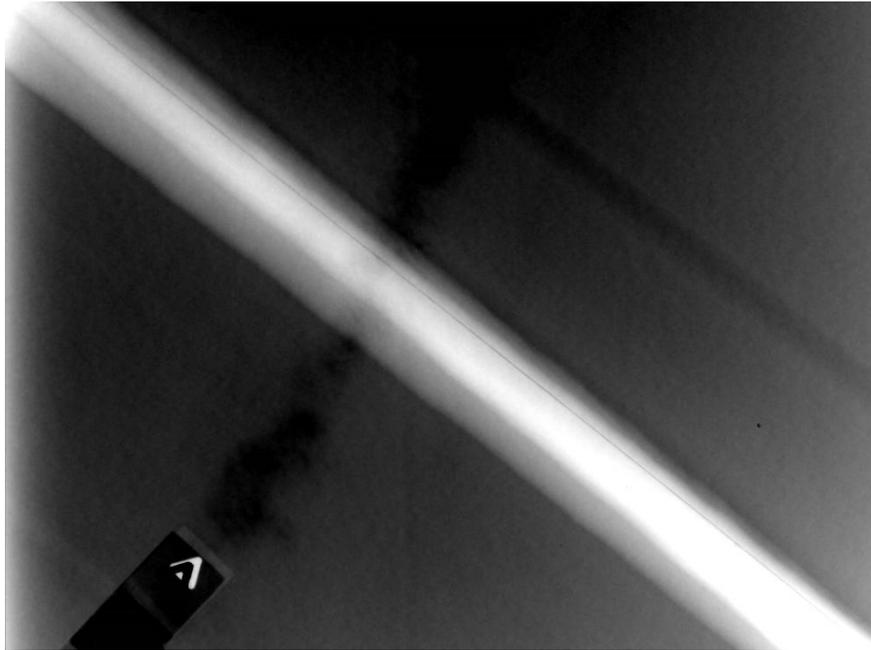


Figure III.12: Radiographie de tube (manque pénétration).

4.1. Limites d'acceptation

- Les limites d'acceptation sont applicables à l'examen radiographique du cordon de soudure, sauf si d'autres exigences sont spécifiées dans les normes de produit.
- Les fissures, la pénétration incomplète et le manque de fusion sont inacceptables.
- Les inclusions de laitier circulaires individuelles et les soufflures jusqu'à la plus petite des deux valeurs 3,0 mm ou $T/3$ pour le diamètre (T étant l'épaisseur spécifiée) sont acceptables. La somme des diamètres de toutes ces imperfections individuelles tolérées sur toute longueur de soudure de 150 mm ou $12T$, la valeur la plus petite étant retenue, ne doit pas dépasser la plus petite des deux valeurs 6,0 mm ou $0,5T$, lorsque la séparation entre deux inclusions est inférieure à $4T$.
- Les inclusions de laitier allongées individuelles d'une longueur inférieure ou égale à la plus petite des deux valeurs 12,0 mm ou T , ou d'une largeur inférieure ou égale à 1,5 mm, sont acceptables. La longueur cumulée de ces imperfections individuelles tolérées sur toute longueur de soudure de 150 mm ou $12T$, la valeur la plus petite étant retenue, ne doit pas dépasser 12,0 mm, lorsque la séparation entre deux inclusions est inférieure à $4T$.

- Les caniveaux individuels d'une profondeur maximale de 0,4 mm et ne conduisant pas à une valeur d'épaisseur inférieure à l'épaisseur minimale spécifiée sont acceptables quelle que soit leur longueur. Les caniveaux individuels d'une longueur maximale de $T/2$ et d'une profondeur maximale de 0,5 mm et ne dépassant pas 10 % de l'épaisseur spécifiée sont acceptables, à condition qu'il ne s'en trouve pas plus de deux sur toute longueur de soudure de 300 mm et que tous ces caniveaux soient réparés.
- Tous les caniveaux sur les soudures internes ou externes qui coïncident dans le sens longitudinal sont inacceptables.⁽²⁷⁾

4.2. Acceptation

- Tout tube ne produisant pas d'indications supérieures à celles autorisées par les limites d'acceptation correspondantes doit être réputé avoir satisfait au contrôle.
- Tout tube produisant des indications supérieures à celles autorisées par les limites d'acceptation correspondantes doit être considéré comme douteux.
- Pour les tubes «douteux», une ou plusieurs des actions suivantes doivent être exécutées, en fonction des exigences de la norme de produit.
 - a) La zone douteuse doit être éliminée par réparation. L'élimination totale du défaut doit être vérifiée par ressuage ou magnétoscopie et la zone réparée doit être à nouveau contrôlée par radiographie. L'épaisseur restante doit être mesurée par une technique appropriée afin de vérifier sa conformité aux tolérances spécifiées.
 - b) La zone douteuse doit être réparée par soudage selon un mode opératoire de soudage qualifié. La zone réparée doit ensuite être soumise à un examen radiographique conformément aux exigences de la présente partie de l'ISO 10893 et de la norme de produit.
 - c) La zone douteuse doit être chutée. La longueur de tube restante doit être mesurée afin de vérifier sa conformité aux tolérances spécifiées.
 - d) Le tube doit être refusé.⁽²⁷⁾

4.3. Rapport de contrôle

Lorsque cela est stipulé, le producteur doit présenter à l'acheteur un rapport de contrôle contenant au moins

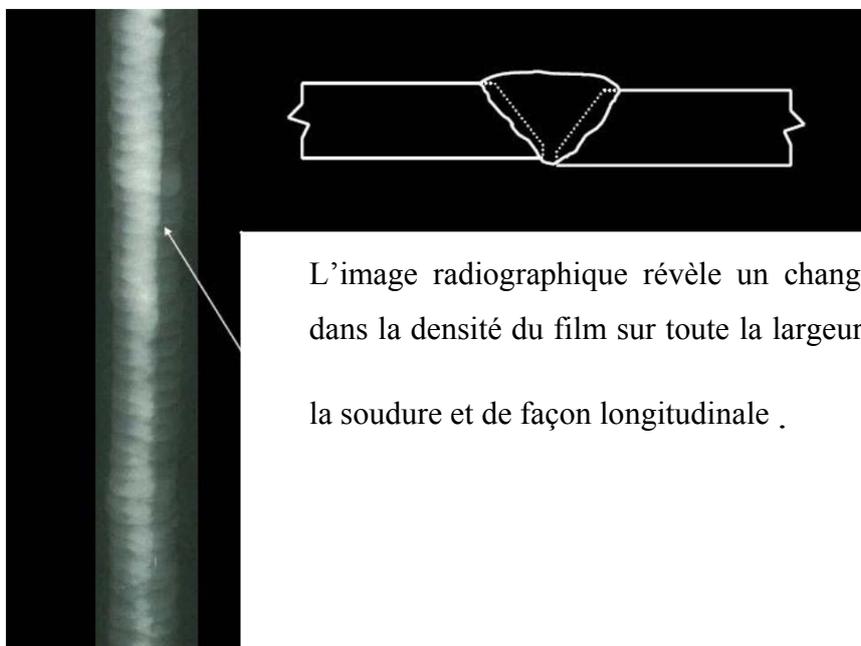
les informations suivantes:

- référence à la présente partie de l'ISO 10893 (c'est-à-dire ISO 10893-6);

- attestation de conformité;
- tout écart, convenu ou non, par rapport aux modes opératoires spécifiés;
- désignation du produit par nuance d'acier et dimensions;
- source de rayonnement, type et dimension réelle du foyer et équipement utilisé;
- systèmes de films, écrans et filtres choisis;
- tension et intensité du tube;
- temps d'exposition et distance source-film;
- type et position des indicateurs de qualité d'images (IQI);
- lecture des IQI et densité minimale du film;
- classe de qualité d'image obtenue;
- date d'exposition et date du rapport;
- identification de l'opérateur et nom, certification et signature des personnes responsables.

5. Interprétations de radiographies:

5.1. Pièces à souder mal alignées (Offset ou Hi-lo) :



L'image radiographique révèle un changement abrupte dans la densité du film sur toute la largeur de l'image de la soudure et de façon longitudinale .

Figure III.13: L'image radiographique pièces à souder mal alignées (Offset ou Hi-lo).

5.2. Un désalignement des pièces à souder (Offset ou Hi-lo) et un remplissage insuffisant à la racine du joint :

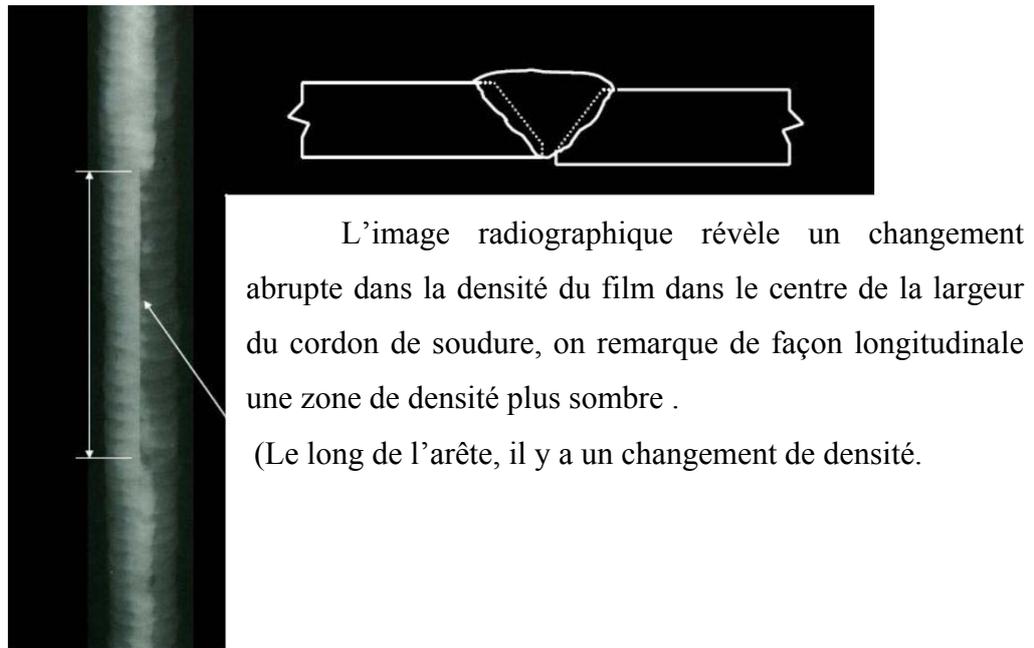


Figure III.14: L'image radiographique d'un désalignement des pièces à souder.

5.3. Concavité excessive (insuffisamment rempli) :

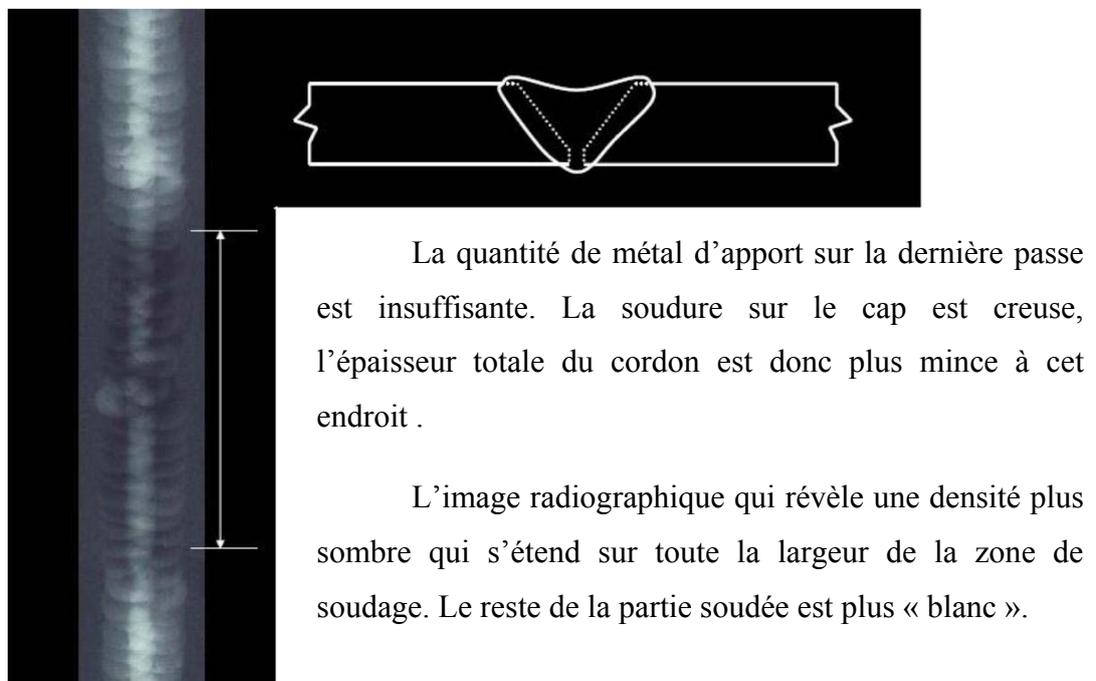


Figure III.15: L'image radiographique concavité excessive (insuffisamment rempli).

5.4. Pénétration excessive (glaçon) :

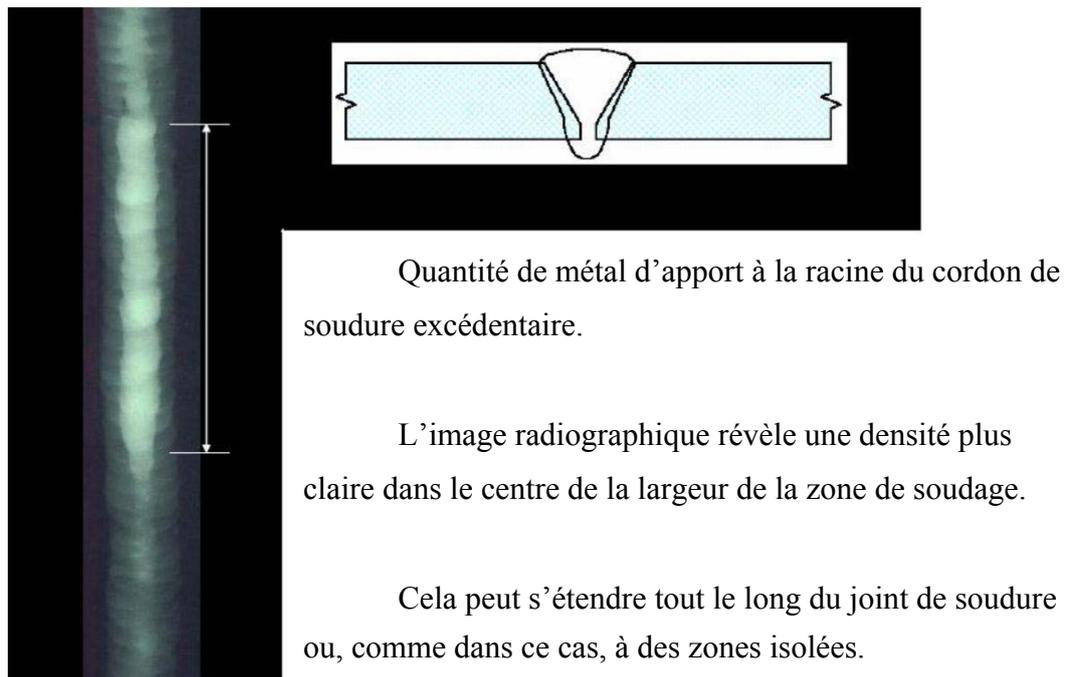


Figure III.16: L'image radiographique pénétration excessive (glaçon).

5.5. Caniveau externe :

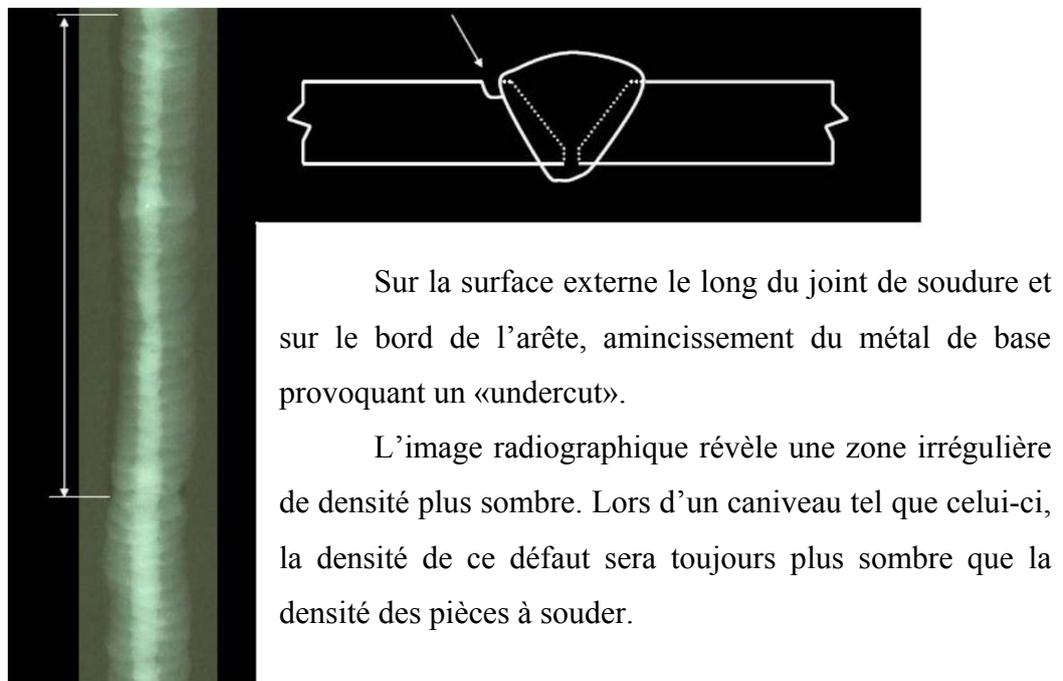


Figure III.17: L'image radiographique caniveau externe.

5.6. Caniveau interne à la racine :

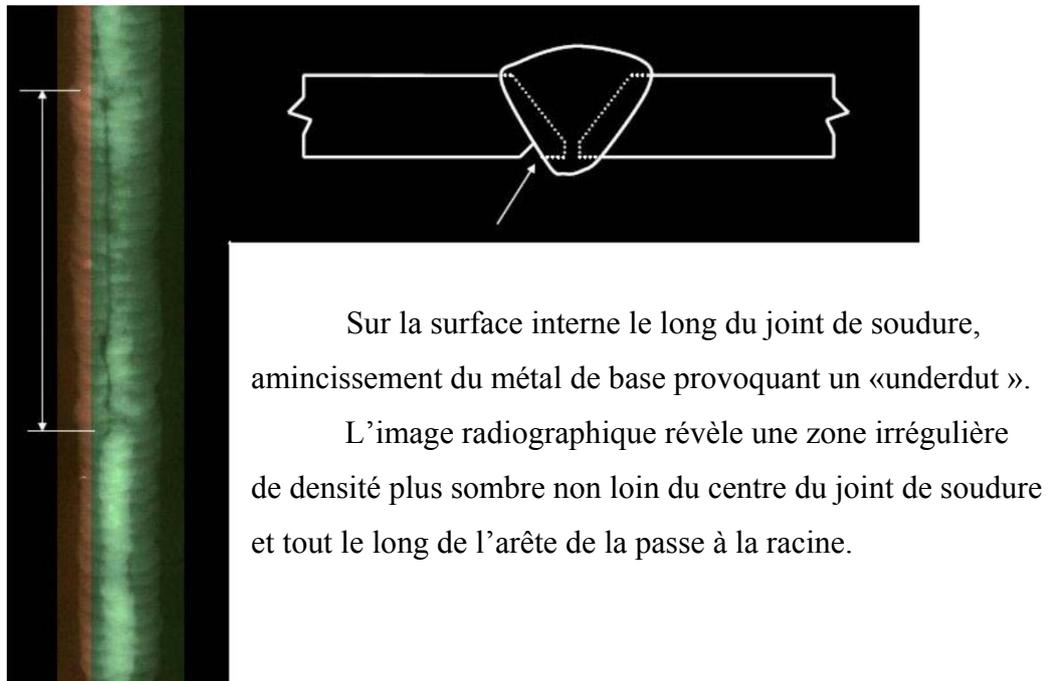


Figure III.18: L'image radiographique caniveau interne à la racine.

5.7. Concavité interne à la racine :

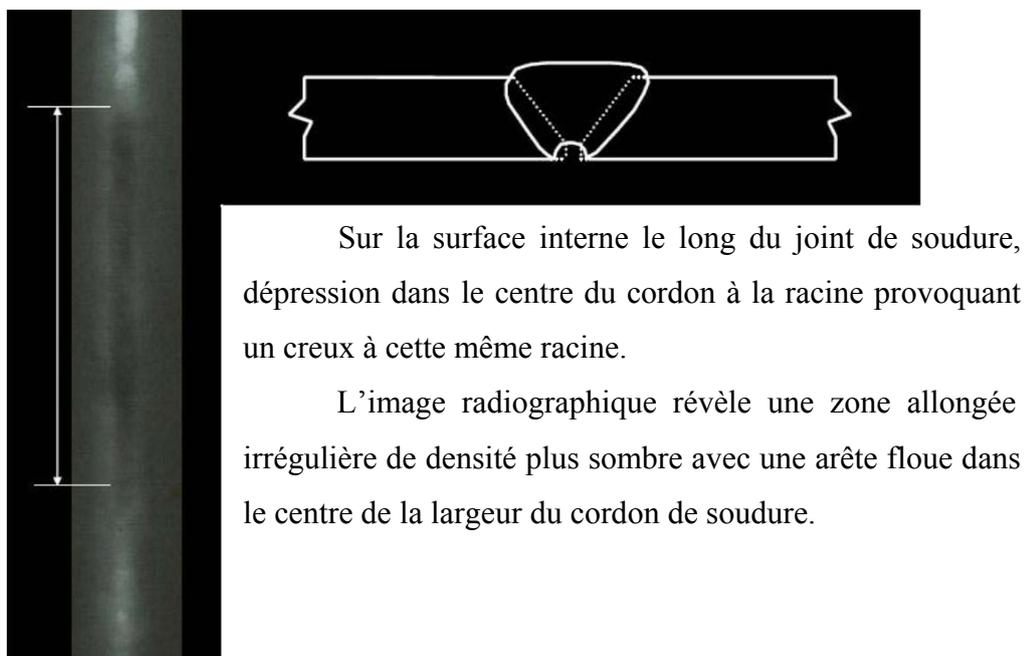


Figure III.19: L'image radiographique concavité interne à la racine.

5.8. Cratère à la racine localisé :

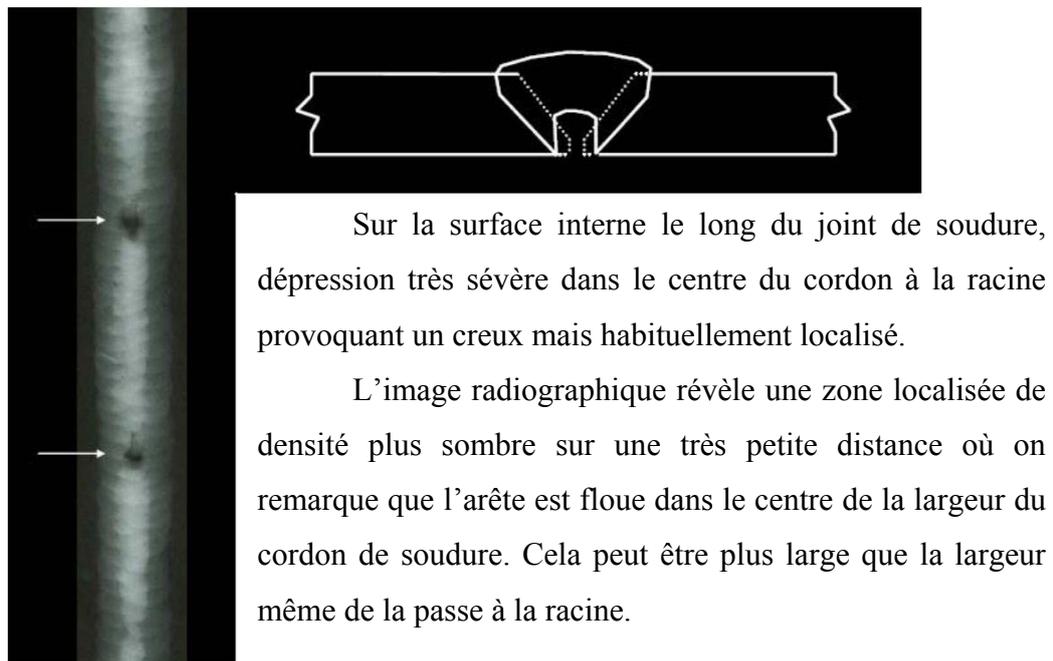


Figure III.20: L'image radiographique cratère à la racine localisé.

5.9. Pénétration incomplète ou manque de pénétration :

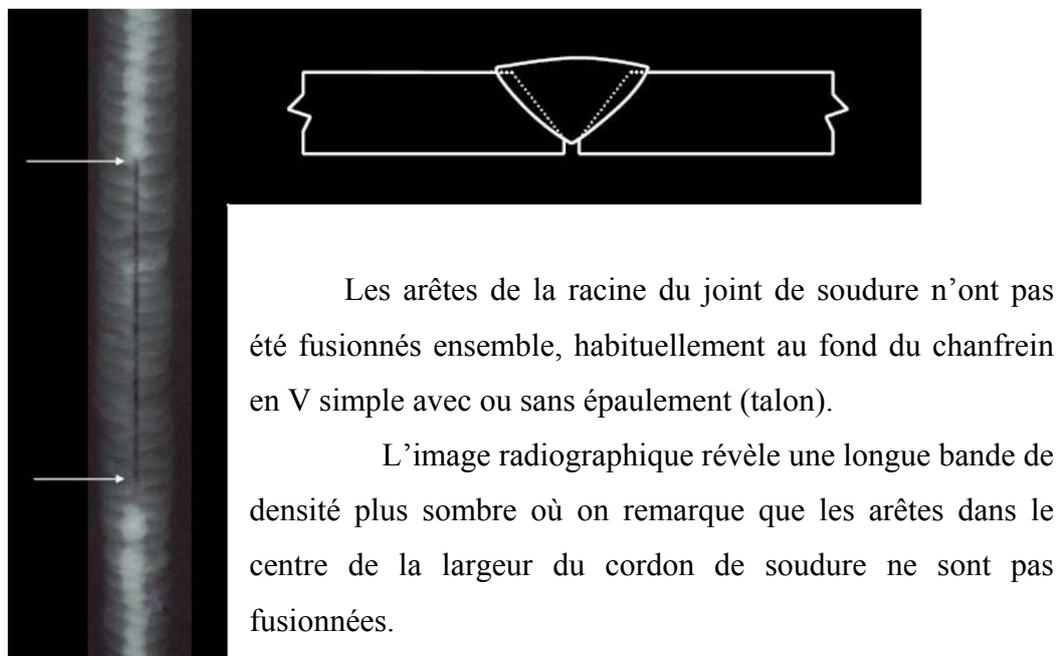


Figure III.21: L'image radiographique pénétration incomplète ou manque de pénétration.

5.10. Inclusions de laitier en inter passe :

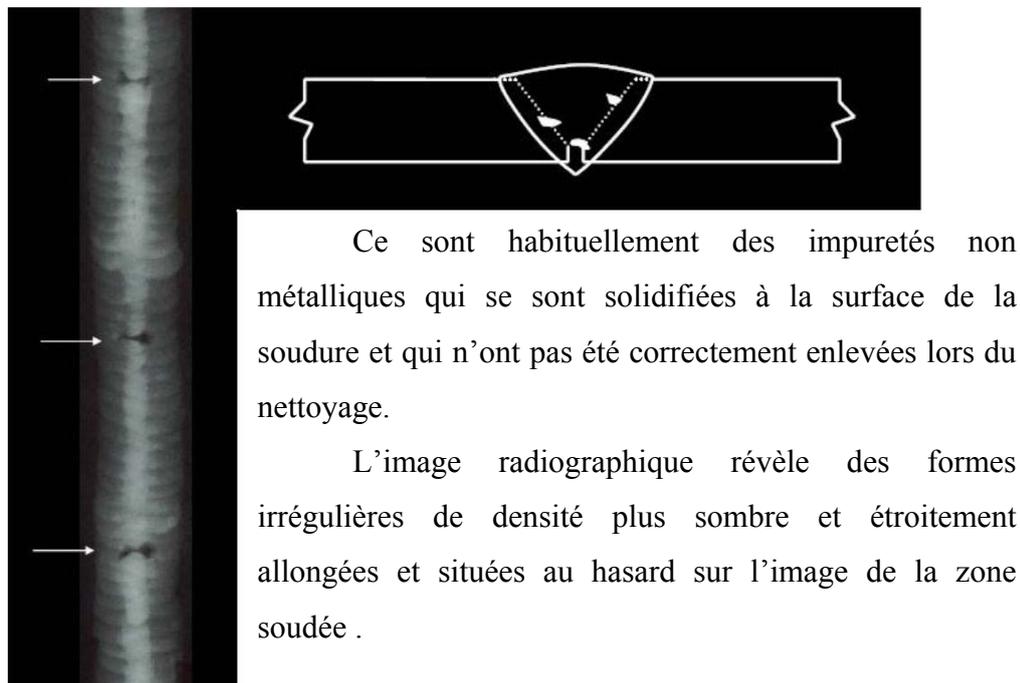


Figure III.22: L'image radiographique inclusions de laitier en inter passe.

5.11. Inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer) :

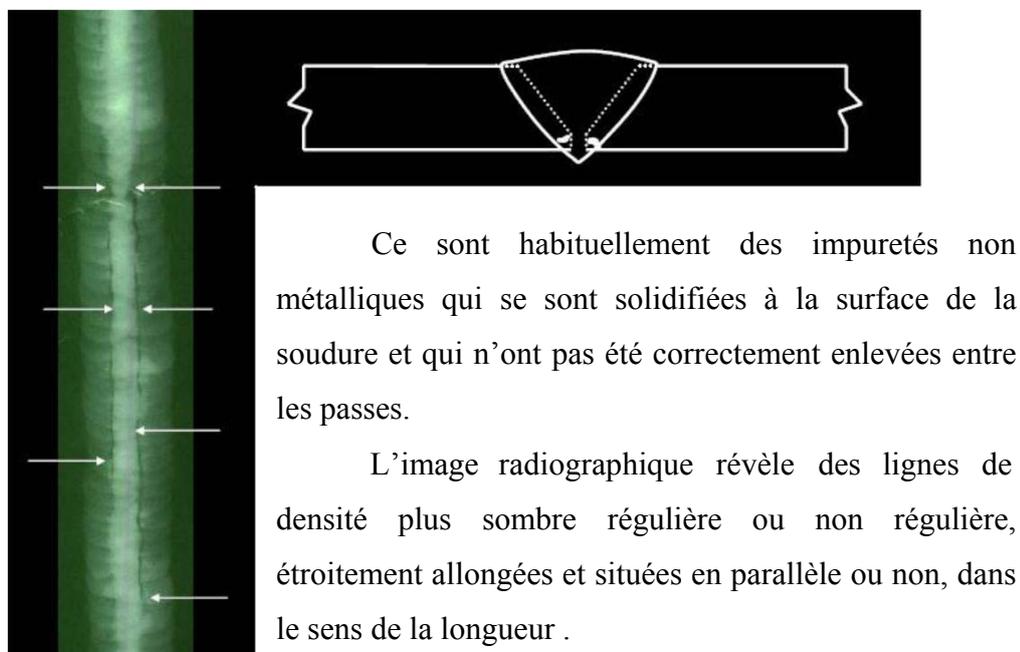


Figure III.23: L'image radiographique inclusions de laitier en lignes allongées (en chemin de fer).

5.12. Manque de fusion (sur les côtés des plaques) :

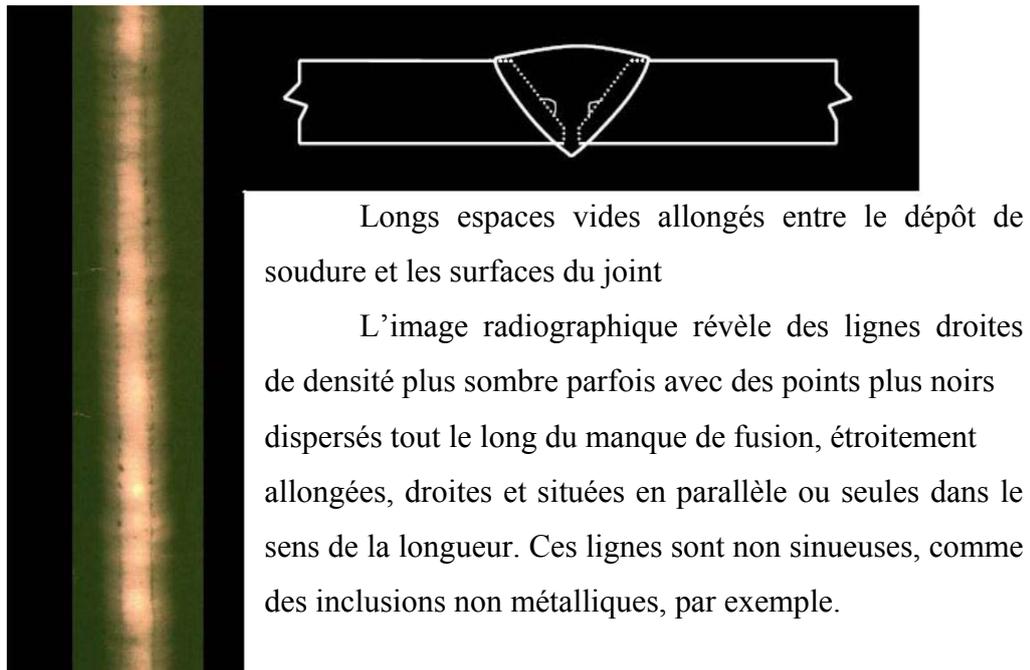


Figure III.24: L'image radiographique manque de fusion (sur les côtés des plaques).

5.13. Manque de fusion entre les passes :

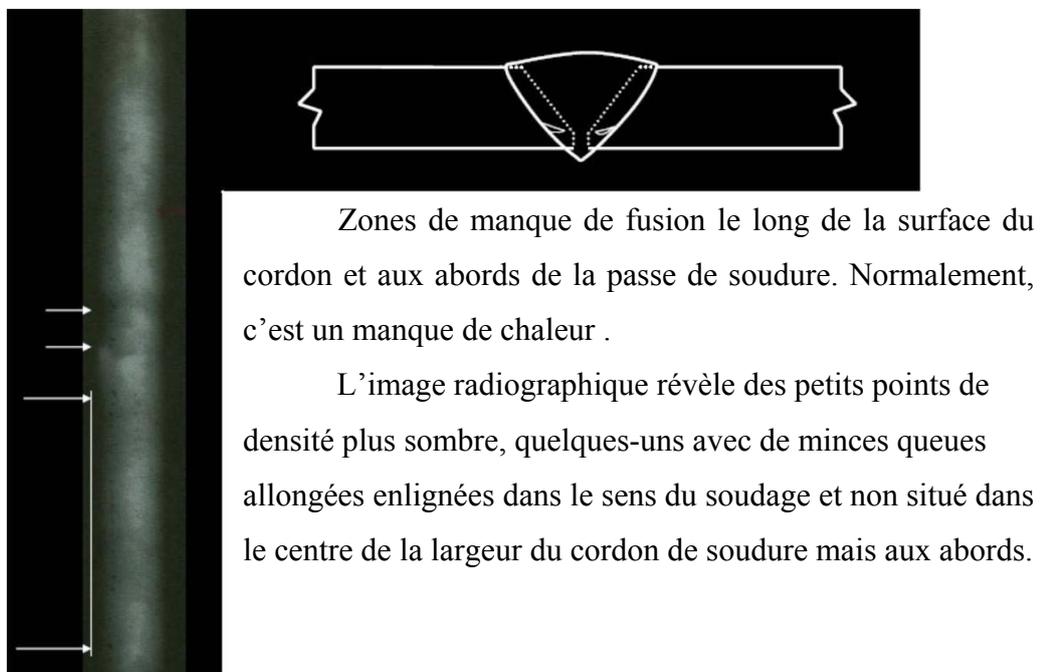


Figure III.25: L'image radiographique manque de fusion entre les passes.

5.14. Porosités dispersées :

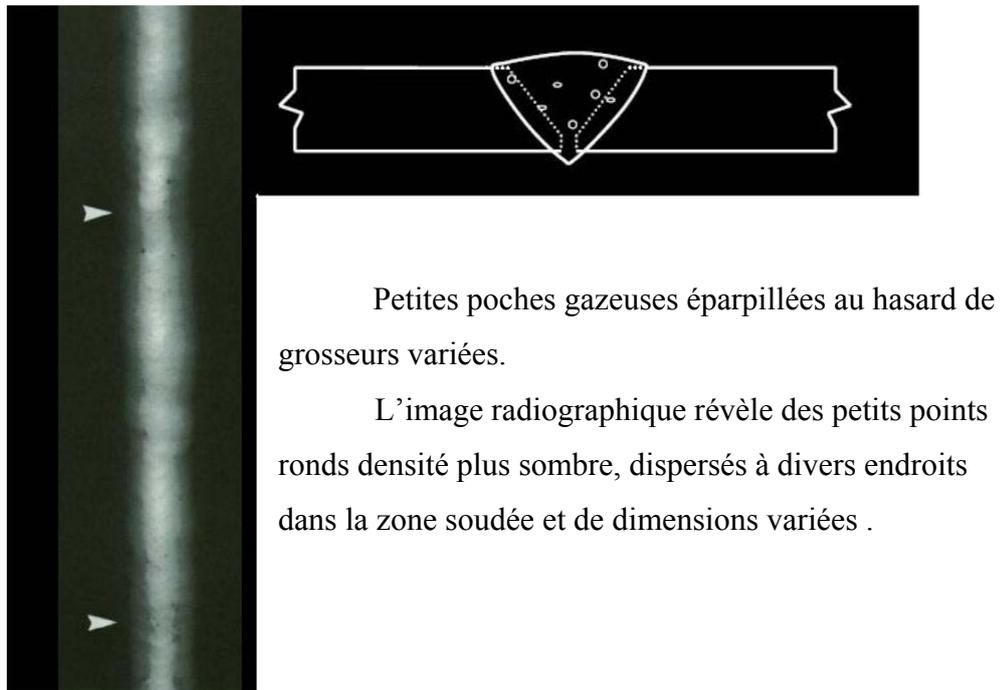


Figure III.26: L'image radiographique porosité dispersée.

5.15. Nids de Porosités ou soufflures agglomérées :

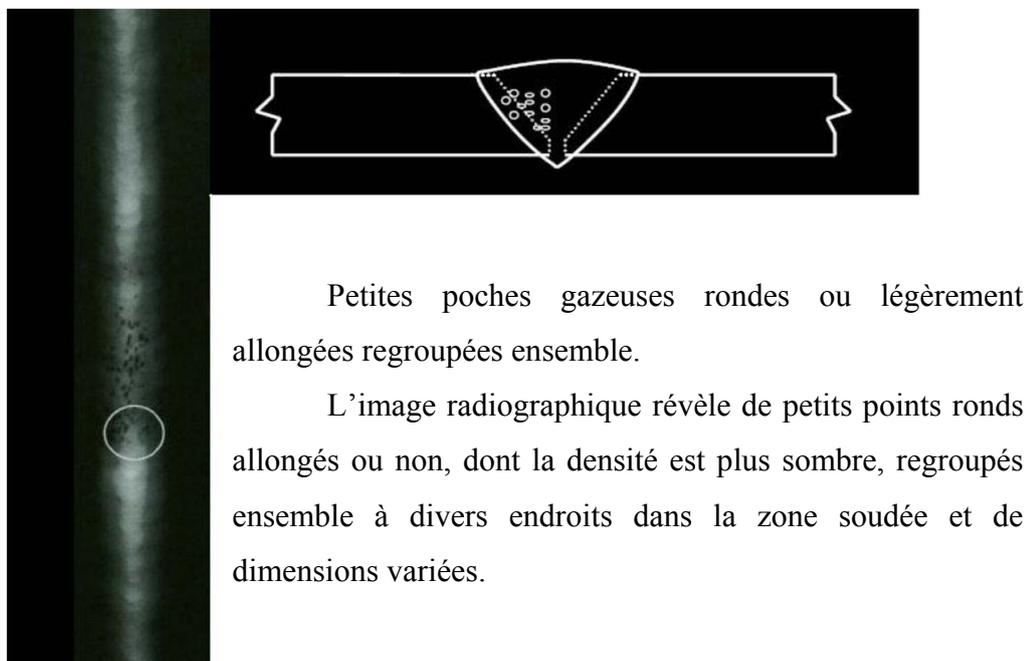


Figure III.27: L'image radiographique nid de porosité ou soufflure agglomérée.

5.16. Porosités ou soufflures enlignées la racine du joint :

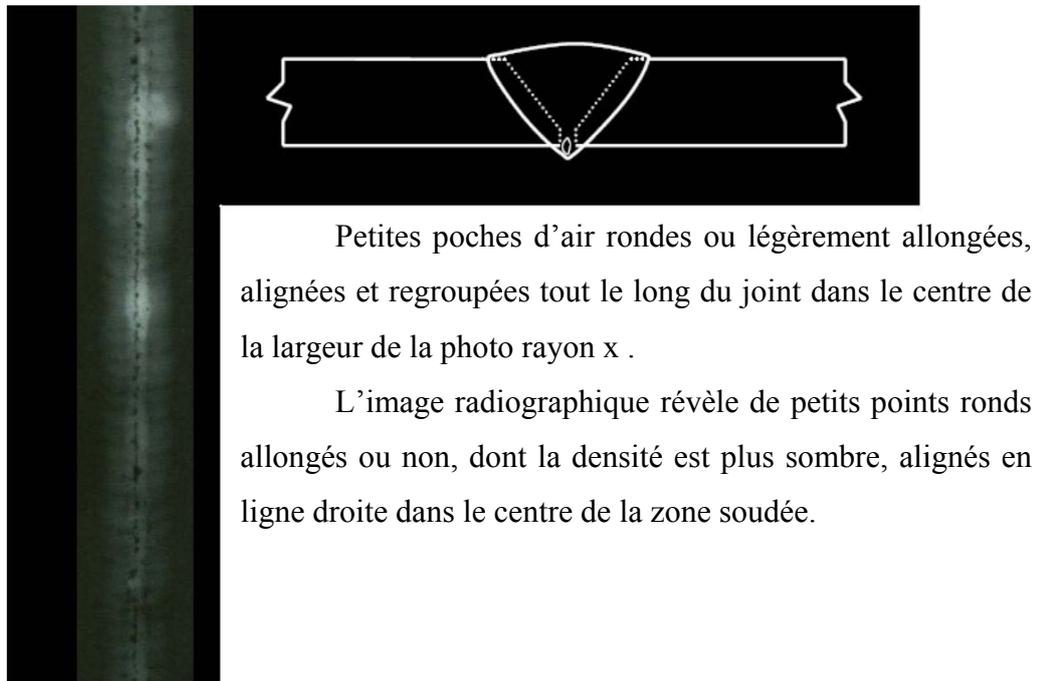


Figure III.28: L'image radiographique porosité ou soufflure enlignée la racine du joint.

5.17. Fissures transversales :

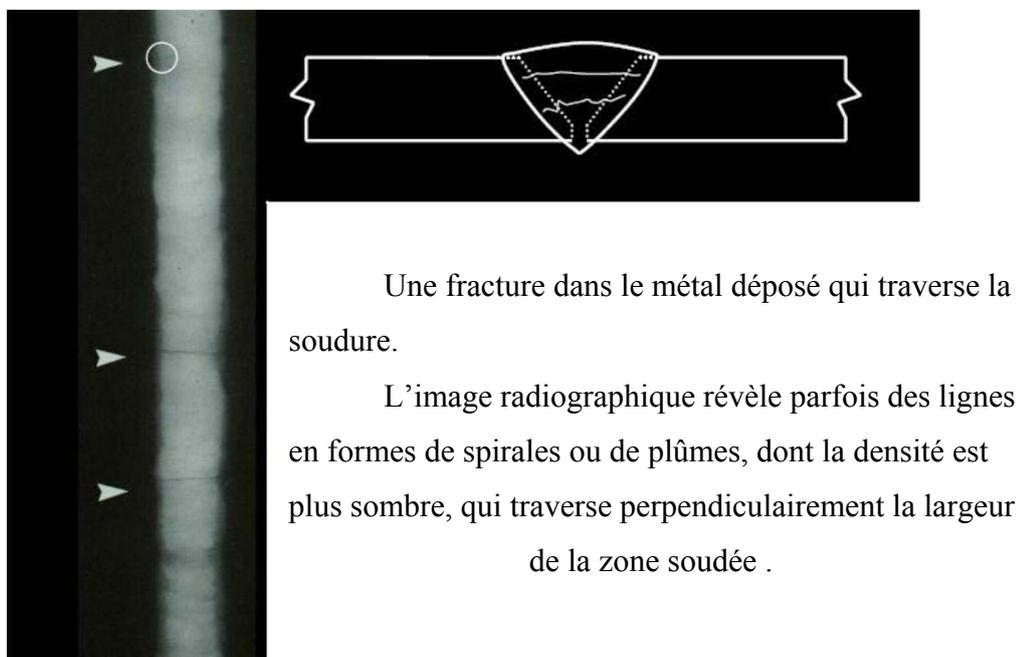
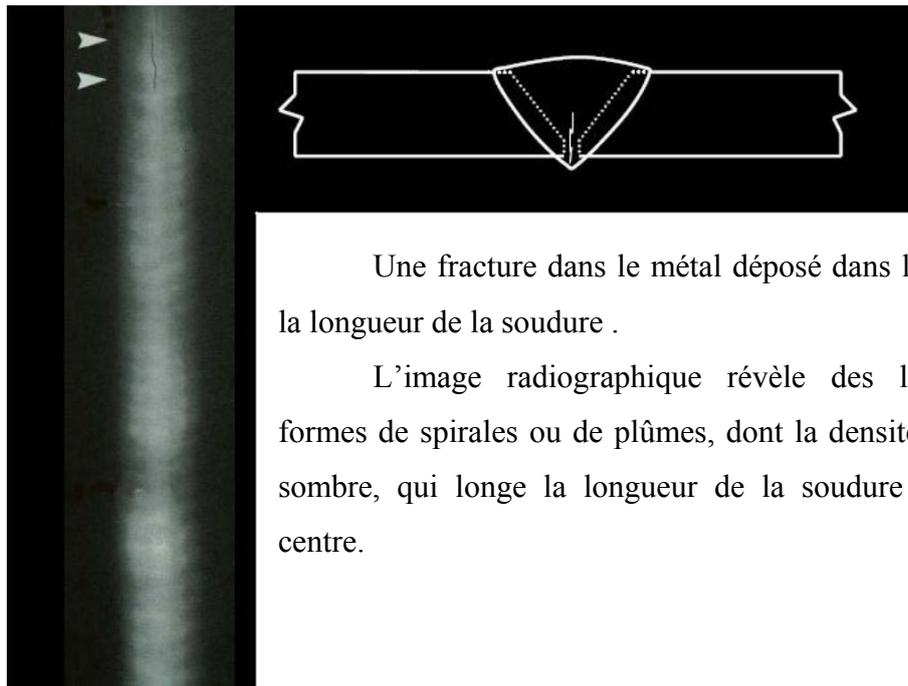


Figure III.29: L'image radiographique fissure transversale.

5.18. Fissures longitudinales :

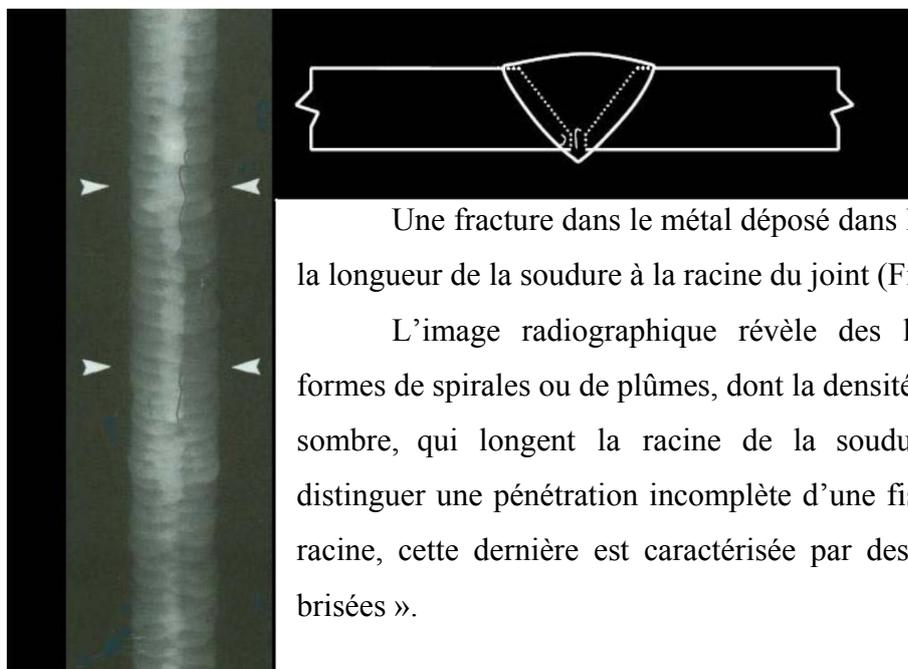


Une fracture dans le métal déposé dans le sens de la longueur de la soudure .

L'image radiographique révèle des lignes en formes de spirales ou de plumes, dont la densité est plus sombre, qui longe la longueur de la soudure en plein centre.

Figure III.30: L'image radiographique fissure longitudinale.

5.19. Fissures longitudinales à la racine :



Une fracture dans le métal déposé dans le sens de la longueur de la soudure à la racine du joint (Fig.115.).

L'image radiographique révèle des lignes en formes de spirales ou de plumes, dont la densité est plus sombre, qui longent la racine de la soudure. Pour distinguer une pénétration incomplète d'une fissure à la racine, cette dernière est caractérisée par des lignes « brisées ».

Figure III.31: L'image radiographique fissure longitudinale à la racine.

5.20. Inclusions de tungstène :

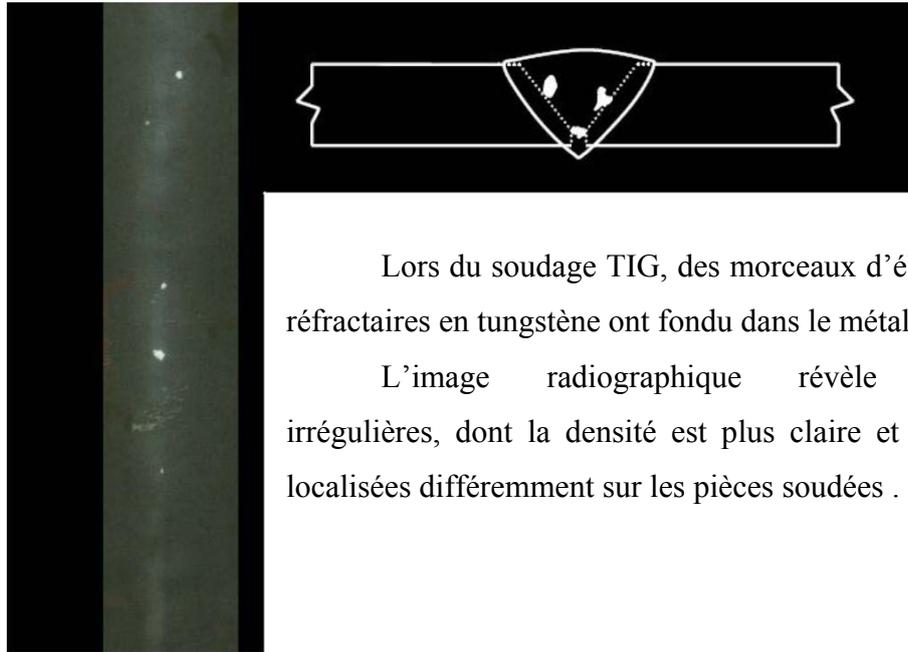


Figure III.32: L'image radiographique inclusion de tungstène.

6. Comparaison entre la radiographie numérique et la radiographie argentique :

6.1 Radiographie numérique

Un équipement de radioscopie est constitué d'un générateur haute tension, d'un tube émetteur de rayons X, d'un pupitre de commande (pour manipuler la pièce et moduler le rayonnement), d'un détecteur (écran fluorescent et amplificateur de brillance) et d'un moniteur d'affichage de l'image radio (écran cathodique ou écran de PC). La radioscopie numérique, plus récente, ajoute un module d'acquisition, une numérisation de l'image (et son stockage) et quelquefois un traitement d'image intégré.

6.2 Radiographie argentique

En radiographie, le détecteur est remplacé par un film radio, qui est placé sur la face de la pièce à contrôler. Le film est ensuite développé. Il existe des images de références. De plus en plus, la radiographie numérique remplace la radiographie argentique sur film.

Tableau III.4. Statistiques de l'usine pour un jour aux deux méthodes.

Date	28/02/2019	28/10/2018
Type de radiographie	Radiographie numérique	Radiographie argentique
Poste	4P (A+B+C+D)	
Réparation auto	3	17
Réparation manuelle	-	-
Film à refaire	-	2
Film à reprendre	-	4
Sandage à prendre	1	12
Visuel	-	-
Chanfrein	-	-
Chute	1	4
Films ratés RX1	-	-
Films ratés RX2	-	3
Défauts développement	-	-
Défauts lecteur	-	3
Dscan	-	-

- La radioscopie numérique est la meilleur méthode car:

Tableau III.5. Comparaison entre les deux méthodes.

	Radiographie numérique	Radiographie argentique
de point de vue archivage	Dans un ordinateur.	Dans des stocke et un personnel pour stocker les films
de point de vue économique	Image traité sur ordinateur.	Argent pour les films , les produits chimique: révélateur ,fixateur...etc
de point de vue environnement	Aucun déchet	Des déchets de film argentique et les produits chimiques qui sont toxiques.
de point de vue production	Temps de traitement environ 2min par tube	Temps de traitement environ 15min par tube
personnel	Moins de personnels	Plus de personnels

7. 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.

Tableau III.6. Exigences du contrôle visuel final.⁽²⁷⁾

Désignation		Exigence	
		Minimale	Maximale
✓	Longueur	08.00ml	12.30ml
✓	Epaisseur (nominale 14.30mm)	12.87mm	15.73mm
✓	Diamètre extérieur		
-	Au corps ($\text{Ø}^{\pm 3.2}$)	708.0mm	714.4mm
-	En extrémité sur 101.6mm ($\text{Ø}^{\pm 1.6}$)	709.6mm	712.8mm
✓	Hauteur de cordon de soudure		
-	Extérieur	0mm	3mm
-	Intérieur	0mm	3mm
✓	Enfoncement		
-	Profondeur	-	3mm
-	Longueur	-	177.8mm
✓	Caniveau (profondeur)	-	0.8mm
✓	Défaut d'aspect à l'extrémité sur 50mm	Non toléré	
	Réparation à l'extrémité sur 150mm	Non toléré	
	Dénivellation	-	1.5mm
	Ovalisation en extrémité 101.6mm	-	7.1mm
	Rectitude	Longueur total	0.12% de longueur
		Locale	3.2mm/1.5m
	Chanfrein		
	Angle	30°	35°
	Talon (méplat)	0.8mm	2.4mm
	Meulage du cordon de soudure		
	Extrémité intérieure	101.6 mm	-
	Extrémité extérieure	-	101.6mm
	Perpendicularité	0mm	1.6mm

- l'ovalisation : le tube ne doit pas être ovale en comparant le diamètre donc : $D \approx D_2$

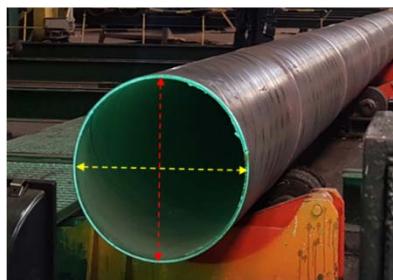


Figure III.33: vérification de l'ovalisation

V. Conclusion :

après la caractérisation chimique et mécanique , les méthodes de contrôles non destructifs interviennent à fin de vérifier la fiabilité de tube soudé en passant par plusieurs méthodes.

Les contrôles visuels nous ont permis de :

- Contrôle de l'aspect visuel de la tôle et du cordon.
- Contrôle dimensionnel (longueur, diamètre, épaisseur).
- Elimination par meulage de certains types de défauts.
- Transcription de ces informations sur la carte suiveuse du tube.
- (Signalisation des opérations qui sont réalisé sur le tube).

Les contrôles par ultrasons nous ont permis de détecter tout les défauts volumiques (défauts qui ne peuvent pas se voie à l'œil nue) sans savoir le type de défauts, Donc les contrôles par ultrasons sont l'étape de détection.

Les contrôles par radiographie sont l'étape de précision et décision, ils nous permis de identifier les types de défauts à fin de les réparer.

Les contrôles visuels finals nous ont permis de accepter ou refuser le tube.

Conclusion

générale

Notre travail de fin d'étude de master consiste à réaliser un stage en entreprise afin de connaître la réalité du milieu industriel et surtout d'apprécier les opérations de production et de contrôle des produits destinés au marché. Notre stage a été effectué dans l'entreprise ALFAPIPE et nous avons traité un sujet relatif aux contrôles qualité des tubes soudés en spirale.

On a présenté la technologie des pipelines, les caractéristiques des tubes utilisés. Par la suite on a développé l'étude théorique des principaux défauts de soudage et les méthodes de contrôles non destructifs pour l'inspection des matériaux et les conditions de contrôle par ces méthodes.

Cette étude a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le procédé de production de tubes soudés en spirale est complexe et nécessite plusieurs connaissances dans différents domaines liés aux matériaux (soudage, traitements thermique, revêtement, grenailage, essais destructifs et non destructifs...).
- Les défauts de soudage peuvent être causés par de nombreux facteurs, dont la vitesse d'avance ou l'intensité du courant. Dans bien des cas, les défauts peuvent être détectés et corrigés en cours de soudage.
- Avant de commencer à contrôler les défauts de soudage présents dans les tubes, il faut d'abord connaître les caractéristiques chimiques (composition chimique de l'acier X70) et mécaniques.
- Les essais mécaniques (contrôle destructif) tels que : l'essai de traction, l'essai de dureté, l'essai de résilience et l'essai de pliage permettent de contrôler la qualité des tubes
- Les contrôles non destructifs (visuels, ultrasons et radioscopie) permettent d'assurer la fiabilité des pipes pour assurer de prévenir les dégâts au cours de leurs utilisations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Documents technique SIDER El-Hadjar ANNABA.
- [2] Documents technique ALFAPIPE ANNABA.
- [3] Document IIS/IIW-146-64 : de l'institut international de la soudure.[juillet-aout 1961].
- [4] A. VALLINI. Joints soudés - Contrôle, métallurgie, résistance DUNOD.
- [5] H.GRANJON. «Bases métallurgiques de soudage » 2ème édition.
- [6] Documents (PDF) défauts de soudage des pipelines Yamani Institute of Technology.
- [7] « Les CND, c'est quoi ? » , sur *cofrend.com* (consulté le 13 mai 2015).
- [8] D. Kolb, Initiation au contrôle des matériaux –2011.
- [9] J. Dumont-Fillon, «Contrôle non destructif (CND)», Edition technique de l'ingénieur, mesures et contrôle (R1400).
- [10] M. Lacroix, «Essais non destructifs», Edition techniques de l'ingénieur, (M110).
- [11] Documents Technique .C.N.D. ALFAPIPE ANNABA.
- [12] Jacques DUMONT-FILLON : Contrôle non destructifs.
- [13] Documentation du laboratoire d'essai d'ALFAPIPE.
- [14] Henri Walaszek, Caractérisation de défauts par magnétoscopie, ressuage, courants de Foucault, CETIM, Octobre 2012.
- [15] Pierre CHEMIN, Patrick DUBOSC, Ressuage, 10 déc. 2018
- [16] Document Hadj Brahim Boujemaa ISET Siliana 2017/2018.
- [17] Manuel pour l'examen par ultrasons des soudures, institut international de la soudure, commission V. 1978.
- [18] Ultrasons techniques particulières de contrôle : Cahiers de formation CETIM [2em édition 1996].
- [19] Cours théorique et pratique de l'ultrason : Programme de formation « Gtp » . [02/01/2008]
- [20] JEAN PEDIJON : le contrôle non destructif par ultrason [Éditions hermès 1993]
- [21] La norme **NF A09-590**
- [22] E. Soergel, « Visualization of ferroelectric domains in bulk single crystals », *Applied Physics B*, vol. 81, 2005, p. 729–752
- [23] NF EN ISO 10893-5 2011 contrôle magnétoscopie.
- [24] NF EN ISO 5579 : Essais non destructifs - Contrôle radiographique des matériaux métalliques au moyen de film et de rayons X et gamma - Règles de base
- [25] NF EN ISO 17636-1 : Contrôle non destructif des assemblages soudés - Contrôle par radiographie - Partie 1 : Techniques par rayons X ou gamma à l'aide de film

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[26] NF EN ISO 11699-1 : Essais non destructifs - Film pour radiographie industrielle -
Partie 1 : classification des systèmes de films pour radiographie industrielle

[27] La norme API 5L. American petroleum institut (API Specification 5L 44th Ed. Oct. 2007
Errata Jan. 2009 Addendum Feb. 2009 - Specification for Line Pipe - ISO 3183;2007).