



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Génie Métallurgique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

RAHMOUNE Houssam Mehaieddine & REKIS Hocine

Le : mardi 28 juin 2022

Etude pratique de soudage pipeline au niveau de l'entreprise nationale de canalisation (ENAC)

Jury :

Pr.	Messaoudi Salim	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	Bentrah Hamza	MCA	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	Athmani Moussa	MCA	Université de Biskra	Examineur

Remerciements

Au terme de ce mémoire nous tenons à remercier, en premier lieu le bon Dieu, le tout puissant, qui nous donné la force, le courage et la patience pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps de remercier nos encadreurs **MrH. BENTRAH** qui n'a épargné aucun effort pour nos diriger durant la réalisation de ce travail, nous lui très reconnaissons pour la patience dont il a fait preuve le long de ce projet.

Nous tenons aussi à remercier le président de jury Mr **S. MESSAOUDI** et le membre de jury Mr **M. ATHMANI** qui auront d'honneur à apprécier ce travail.

Nous n'oublierons pas de remercier tous la famille universitaire (Enseignants, Administrateurs, Collègues.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Etude bibliographique sur le Soudage	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de soudage	4
I.3 Avantages du soudage (par rapport aux autres techniques d'assemblage).....	5
I.4 Formes de soudage:.....	5
I.4.1 Différents types d'assemblage par soudage:	5
I.5 Propriétés de l'arc de soudage :	6
I.5.1 Le soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW	7
I.5.1.1 Caractères principaux:	7
I.5.1.2 Caractéristiques de l'électrode:	8
I.5.1.2.1 Les différents types d'électrodes enrobées:	9
I.5.1.3 Avantage et inconvénient:	10
I.5.2 Le soudage électrique à l'arc avec fil électrode fusible Sous flux en poudre	11
I.5.2.1 Caractères principaux:	11
I.5.2.2 Caractéristiquesducouplefil/flux	11
I.5.2.3 Avantageetinconvénient	11
I.6.Caractéristiques de la soudure:	13
I.4.1 Principaux métaux pour soudage	14
I.5 Types de soudures et Forme de joint	14
I.6 Classification des défauts dans les assemblages soudés	15
I.6.1 Défauts de fissures	16
I.6.2 Défauts de soufflures ou cavités	17
I.6.3 Défaut d'inclusions Solide	18
I.6.4.2 Défaut de pénétration:.....	19
I.6.5 Morsures et caniveaux.....	20
I.6.6 Défauts géométriques des cordons	21

I.6.6.1 Défaut de convexité et concavité	21
I.6.6.3 Défaut d'alignement	21
I.6.6.4 Déformations angulaires.....	22
I.6.6.5 Projection	22
I.7 Conclusion	22

Chapiter II: Applications et techniques expérimentales

II.1 Introduction	23
II.2 Pratiques et contrôle des joints a soudés	23
II.2.1 Examen visuel :.....	23
II.2.1.1 Alignement.....	23
II.2.1.2 Conditions météorologiques	23
II.2.1.3 Nettoyage entre cordons	24
II.2.2 Soudage en position	24
II.2.2.1 Cordons d'apport et de finition	24
II.2.2.2 Normes d'acceptation visuelle pour les caniveaux	24
II.2.2.2.1 Normes d'acceptation.....	24
II.2.3 Contrôles non destructif (CND).....	25
II.2.3.1 Précautions à prendre avant pendant la manipulation d'un appareil de gammagraphie :.....	25
II.3 Techniques d'étude des phénomènes de corrosion.....	27
II.3.1 Techniques électrochimiques.....	27
II.3.1.1 Courbes de polarisation	27
II.4 Conditions expérimentales	29
II.4.1 Les électrodes de travail.....	29
II.4.2 Milieu électrolytique	30
II.4.3 Les courbes intensité-potentiel (courbes de polarisation)	30
II.4.4 Microscopie optique.....	31
II.5 Examen Radiographie par rayons ionisants (Control Non Destructif).....	31

II.5.1 Le film radiographique	32
II.5.3 Préparation des 'échantillons.....	32
Chapitre III : Résultats & Discussions	
III.1.1 Milieu NaCl 0,5%	35
III.1.1.1 Courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5%	35
III.1.1.2 Analyse de la surface de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5%.	36
III. 1.2 Milieu 1M et 0,5 M HCl.....	40
III.1.2.1 Courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 1M	40
III.1.2.2 Analyse de la surface de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 0,5 M.....	41
III. 1.3 Milieu 1M et 0,5 M H ₂ SO ₄	44
III.1.3.1 Courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H ₂ SO ₄ 1M	44
III.1.3.2 Analyse de la surface de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H ₂ SO ₄ 0,5 M. ..	46
III.2 Contrôle des joints soudés :.....	48
III.2.1 Examen visuel :	48
III.2.1.1 Exemple de joint a soudé du pipeline du projet HBH et GR7 :.....	48
III.2.2 Résultats des radiographies	49
III.2.2.3. Images Radiographiques et interprétations	50
Conclusion générale	54

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Soudage manuel des pipelines (Projet EGPDF)	01
Figure I.2. Soudage semi-automatique des pipelines (Projet GR5)	01
Figure I.3. Construction métallique d'un hangar (centre logistique Ghardaïa)	01
Figure I.4. Construction station Naftal Projet SKE (Eulma)	01
Figure I.5. Les modes d'assemblage	04
Figure I.6. Les différents types d'assemblage	06
Figure I.7. Électrode enrobée : caractéristiques	07
Figure I.8. Electrode enrobée	08
Figure I.9. Différents enrobages	09
Figure I.10. Soudage sous flux en poudre	13
Figure I.11. Présentation macrographique d'un joint soudé.	13
Figure I.12. Défauts de fissures	17
Figure I.13. Illustration des défauts de soufflures ou cavités	18
Figure I.14. Défaut d'inclusions	18
Figure I.15. Défaut de manque de fusion	19
Figure I.16. Défaut de pénétration	20
Figure I.17. Morsures et caniveaux	20
Figure I.18. Défaut de convexité et concavité	21
Figure I.19 : Défaut d'alignement	21
Figure I.20 : Déformations angulaires	22
Figure I.21. défauts de projection	22

Chapitre II

Figure II.1. Contrôle par radiographie	25
Figure II.2. Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.	28
Figure II.3.a. Caractéristiques de l'électrode	30
Figure II.3.b : Electrode basique enrobée E7018	30
Figure II.4. Microscope optique HUND T100-WETZLAR	31
Figure II.5. Source gammagraphie « Préparation pour le tire »	32
Figure II.6. Cliché radiographique	32
Figure II.7. Coupage d'un échantillon	33

Figure II.8. Echelle des échantillons 33

Chapitre III

Figure III.1. Courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5% à 30°C. 36

Figure III.2. Aspect macroscopique de produits de corrosion en milieu NaCl 3,5% 37

Figure III.3. La morphologie de produit de corrosion (2 jours) de l'acier X70 et son joint soudé par le microscope optique (x 100), (a) l'acier sans produit de corrosion, (b) acier API 5L X70, (c) joint soudé. 38

Figure III.4. La morphologie de la corrosion par piqure par le microscope optique (x 100), (a) l'acier X70, (b) joint soudé, après le test d'immersion 2 jours en milieu NaCl 3,5% à 30°C 39

Figure III.5. Aspect macroscopique de l'acier et son joint soudé sans produits de corrosion. 39

Figure III.6. Courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 1M. 41

Figure III.7. Aspect macroscopique de produits de corrosion en milieu HCl 0,5 M 42

Figure III.8. La morphologie de produit de corrosion (48 heures) de l'acier X70 et son joint soudé par le microscope optique, (a) l'acier sans produit de corrosion, (b) acier API 5L X70, (c) joint soudé. 42

Figure III.9. La morphologie de la corrosion par piqure par le microscope optique (x 100), (a) l'acier X70, (b) joint soudé, après le test d'immersion 48 heures en milieu HCl 0,5 M 43

Figure III.10. Aspect macroscopique de l'acier et son joint soudé sans produits de corrosion (HCl 0,5M). 44

Figure III.11. Courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H₂SO₄ 1M 45

Figure III.12. Aspect macroscopique de produits de corrosion en milieu H₂SO₄ 0.5 M 46

Figure III.13. La morphologie de produit de corrosion (48 heures) de l'acier X70 et son joint soudé par le microscope optique, (a) l'acier sans produit de corrosion, (b) acier X70 (x 100), (c) joint soudé 47

Figure III.14. La morphologie de la corrosion par piqure par le microscope optique (x 100), (a) l'acier X70, (b) joint soudé, après le teste d'immersion 48 heures en milieu H₂SO₄ 0.5 M. 47

Figure III.15. Aspect macroscopique de l'acier et son joint soudé sans produits de corrosion H ₂ SO ₄ 0.5 M	48
Figure III.16. Joint a soudé du pipeline « Projet HBH ».	49
Figure III.17. (a) Joint a soudé du pipeline Gazoduc « Projet GR7 », (b) Défaut d'alignement	49
Figure III.18. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet HBH » représente Caniveaux à la racine (a) défaut de cratère a la racine localisée, (b) Inclusions de laitier	50
Figure III.19. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet GR7 » représente Manque de fusion	51
Figure III.20. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet GR7 » représente une soufflure isolée	51
Figure III.21. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet HBH » a. Cratère a la racine et pénétration excessive	52
Figure III.22. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet GR7 » (a) Dénivellations	52
Figure III.23. Image d'un bon joint a soudé du pipeline « Projet GR7 »	53

Liste des tableaux

Tableau II.1 Les normes d'acceptation d'un joint soudé	24
Tableau II.2 Caractéristiques mécaniques du pipeline	29
Tableau II.3 Caractéristiques chimiques du pipeline	29
Tableau III.1 Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier API 5 L X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5% à 30C°.	36
Tableau III.2 Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 1M.	40
Tableau III.3 : Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H ₂ SO ₄ 1M.	45

Liste des abréviations

SMAW: Shielded metal arc welding

EGPDF: Gazoduc reliant El kasdir-El Aricha et Beni saf

GR5 : Gazoduc reliant Reggane à Hassi R'mel ligne 5

SKE : Canalisation multi-produits Skikda –Khroub-Eulma

SAEE : Soudage à l'arc Electrique enrobée

MIG: Metal Inert Gas

MAG: Metal Active Gas

SAFP : Soudage à l'arc sous flux en poudre

TIG: Tungsten Inert Gas

SAW: Submerged arc welding

i_{corr} : Vitesse de corrosion

E_a : Énergie d'activation

R : Constante universelle des gaz parfaits

T : Température absolue

C : Concentration de l'inhibiteur

M : Mole par litre

T : Température (kelvin)

E : Le potentiel électrode/solution

E_{corr} : Potentiel de corrosion

E_{initial} : Potentiel initial

E_{final} : Potentiel final

E_{pit} : Potentiel de piqûre

\hat{i} : Intensité de courant

i : Densité de courant

i_0 : Densité de courant d'échange

I_{corr} : Densité de courant de corrosion

b_a : Coefficient de Tafel anodique

: Coefficient de Tafel cathodique

R_P : Résistance de polarisation

U_0 : Tension à vide

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

API : American Petroleum Institute

ECS : Électrode de référence au calomel saturé

K : Constant d'équilibre d'adsorption

DMOS : Descriptif du mode opératoire de soudage

ENAC : Entreprise nationale des canalisations

ASNT : American Society For Non Destructive

COFREND : Confédération française pour les essais non destructifs

BANT: Budget, Authority, Need, Timing

Introduction générale

Dans le monde de construction des pipelines des différents diamètres et épaisseur et pour la maîtrise du comportement des structures et des assemblages soudés. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le processus de leur réalisation est une nécessité absolue afin de prévenir des anomalies qui peuvent être à l'origine de leurs défaillances.

La plupart des constructions soudées présentent des risques importants en cas de défaillance. Ces risques sont importants lorsque la défaillance peut conduire à des destructions brutales de la construction. C'est le cas des constructions des pipelines qui soumises à des pressions considérable et environnement agressif.

Les défaillances peuvent entrainer des dégâts humains, matériels et environnemental importants engendrons des coûts supplémentaires très important, les défauts de soudures peuvent être à l'origine de ces défaillances.

Le soudage comme moyen d'assemblage est un domaine de construction mécanique très vaste où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue de maitriser tous ses aspect Métallurgique et Technologiques de mise en œuvre des opérations de soudage, de contrôle et de vérification de l'intégrité des soudures.

On estime aujourd'hui que 60 à 80 % de la production mondiale des aciers est destinée à la fabrication des produits soudés. Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique avec Électrode enrobée, et avec fil électrode fusible Sous flux en poudre..., la plus utilisé en construction des pipelines.

Pour ces raisons des travaux de recherches au niveau international sont périodiquement publiés dans ce domaine de constructions soudées.

Le but de notre travail est le contrôle par la méthode non destructif "gammagraphie" des assemblages soudés au niveau des projets de l'entreprise nationale de canalisations, suivi d'une étude électrochimique de l'acier API 5L X70 et son joint soudé dans des différents milieux, qui nous avons traité en trois chapitres :

Introduction générale

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur le soudage d'une manière générale.

Le deuxième chapitre expose les pratiques de contrôle et les techniques expérimentales utilisées pour l'étude de l'acier API 5L X70.

Pour étudier l'acier et son joint soudé des échantillons sont prélevés au niveau de l'entreprise nationale des canalisations ; pour le contrôle non destructif (gammagraphie) a été réalisé sur les joints soudés des pipelines de deux projets (deux régions différentes), suivi d'une étude électrochimique réalisée au niveau du laboratoire de métallurgie.

L'ensemble des résultats sont regroupés en troisième chapitre ; l'étude de la corrosion de l'acier API 5L X70 et son joint soudé en trois milieux (NaCl 3,5%, HCl 1M et 0.5 M, H₂SO₄ 1M et 0,5 M), en fin l'examen visuel et l'interprétation des images radiographiques des joints soudés de deux projets analysent les défauts de soudage.

Chapitre I

Etude bibliographique

sur le Soudage

I.1 Introduction

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction métallique à savoir : les Pipelines, les bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage

Le développement industriel est porté par le souci permanent de trouver de nouveaux procédés de fabrication pour améliorer la qualité du produit, la productivité, le coût de revient et le temps d'exécution etc. dans ce chapitre en présente des notions générales sur le soudage et explique les différents types d'assemblage et procédés, précisément le procédé de soudage à l'arc avec électrode enrobé (SMAW).figure (I.1, I.2, I.3, I.4)



Figure I.1 : Soudage manuel des pipelines (Projet EGPDF)



Figure I. 2 : Soudage semi-automatique des pipelines (Projet GR5)



Figure I.3 : Construction métallique d'un hangar (centre logistique Ghardaïa)



Figure I.4 : Construction station Naftal Projet SKE (Eulma)

I.2 Définition de soudage :

C'est le premier moyen d'assemblage de l'acier, le plus utilisé et le plus efficace, notamment dans la construction métallique et qui garantit l'assemblage de deux ou plusieurs parties, de manière d'assurer la continuité métallique entre les parties à assembler, on obtient un joint soudé, Avec ou sans emploi de produit d'apport : (Figure I.5) [Abd18]

Par pression pure :

- Soudage à la forge
- Soudage par ultrasons
- Soudage par friction

Par pression et diffusion :

- Soudage par diffusion

Par fusion :

- A l'électrode enrobée (SAEE)
- Au fil électrode fusible (MIG ou MAG)
- Sous flux en poudre (SAFP)
- Avec électrode réfractaire (TIG)
- Soudage à forte énergie
- Par plasma
- Par Faisceau d'électrons
- Par Faisceau Laser

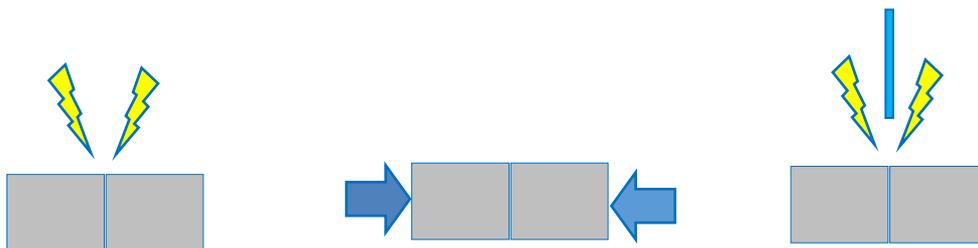


Figure I.5 : les modes d'assemblage

Le soudage relève de la métallurgie ; il faut connaître le matériau pour le souder de façon efficace. Cette connaissance est d'autant plus cruciale que l'ouvrage sera fortement sollicité. C'est pourquoi le soudage est régi par des cahiers des charges et des modes opératoires précis. [Abd18]

I.3 Avantages du soudage (par rapport aux autres techniques d'assemblage)

- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemblé (mécaniques, thermiques, chimiques, électriques, d'étanchéité, de durabilité ...).
- Il répond à des sollicitations élevées
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatiques ...)
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée. [Abd18]

I.4 Formes de soudage :

Il y a lieu de distinguer trois formes de soudage :

- **Soudage homogène** : les deux parties à sembler sont de même constitution physico-chimique et lorsque le métal d'apport est de constitution physico-chimique assemblable à celle du matériau de base. [Abd18]
- **Soudage hétérogène** : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente. [Abd18]
- **Soudage autogène** : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint. [Abd18]

I.4.1 Différents types d'assemblage par soudage :

Les assemblages soudés sont généralement classés en fonction des dispositions relatives des éléments assemblés. On distingue les assemblages suivants [Méc00], [Méc97] :

- **Assemblage bout à bout** : La soudure bout-à-bout est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle. Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. La préparation des bords est nécessaire pour les épaisseurs supérieures ou égale à 5 mm (Figure I.6 : a). [Méc00]
- **Assemblage en coin** : L'assemblage en coin est particulièrement difficile à réaliser. La tolérance sur le jeu entre les deux pièces doit être sévère (Figure I.6 : b). [Méc00]
- **Assemblage en angle** : Cet assemblage est surtout utilisé pour la fixation des raidisseurs sur les panneaux, la préfabrication des profilés reconstitués et dans les pièces mécano soudées. (Figure I.6 : c). [Méc00]

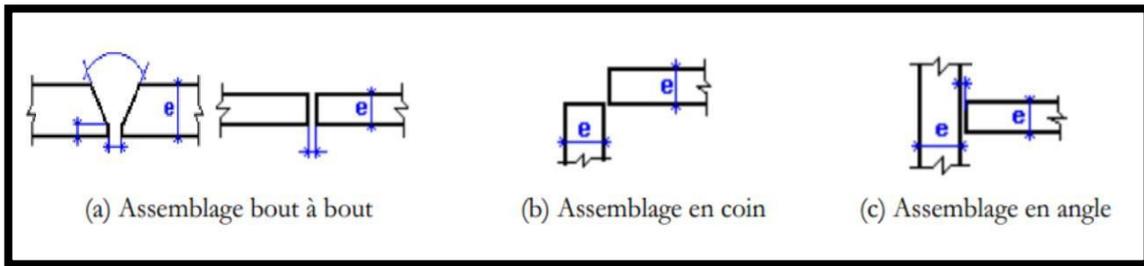


Figure I.6 : Les différents types d'assemblage [Cha05].

Le soudage fait appel nécessairement à une source d'énergie, Elle peut être thermique, électrique ou mécanique.

L'apport d'énergie localisé doit être suffisant pour assurer la fusion des bords des pièces à souder. [Mat14]

Les zones fondues nécessitent d'être protégées en cours de soudage pour éviter qu'elles soient affectées par le milieu ambiant. Les moyens de protection peuvent être :

- ✓ Enrobages des électrodes ;
- ✓ Gaz inertes tels que l'argon ou l'hélium ;
- ✓ Flux de poudre.
- Un procédé de soudage et caractériser principalement par ses moyens de protection. Dans le domaine du soudage, le principe de classification méthodique des procédés peut s'effectuer par le type d'énergie mise en œuvre ; [Mat14]
- Parmi les procédés de soudage on s'intéresse dans ce mémoire au soudage manuel à l'arc et plus précisément au soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW.

I.5 Propriétés de l'arc de soudage :

A l'aide d'un courant électrique approprié (alternatif ou continu) fourni par un générateur de courant (poste de soudure) un arc électrique jaillit entre une électrode enrobée et le métal de base.

- La chaleur dégagée par cet arc fait fondre localement la pièce à souder, et crée le « Bain de fusion ». L'état liquide du bain de fusion, forme ainsi lors de son refroidissement un « cordon de soudure » recouvert d'une couche de laitier, les deux procédés de soudage les plus utilisés sont [Mat14] :
 - Le soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW ;
 - Le soudage électrique à l'arc avec fil électrode fusible Sous flux en poudre SAW.

I.5.1 Le soudage électrique à l'arc avec Électrode enrobée SMAW

I.5.1.1 Caractères principaux :

- Électrode : tige métallique ou baguette de longueur limitée formant le métal d'apport ;
 - Protection : vapeurs provenant d'un enrobage de l'électrode ;
 - Nature du courant : alternatif ou continu ;
 - Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue ;
 - Protection : apport simultané de poudre composite appelé flux ;
 - Courant : continu et alternatif. 50 à 250 (A) ;
 - Epaisseurs (mm) : 5 à 20 plutôt moyennes ;
 - Vitesse opératoire : lente ;
 - Productivité : Faible ;
 - Forme de joint : ébout, acinien T ;
 - Hygiène : des fumées, rayonnements ;
 - Applications : tous travaux. [Mat14]
- ❖ **Appareillage** : L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse. (Figure I.7)

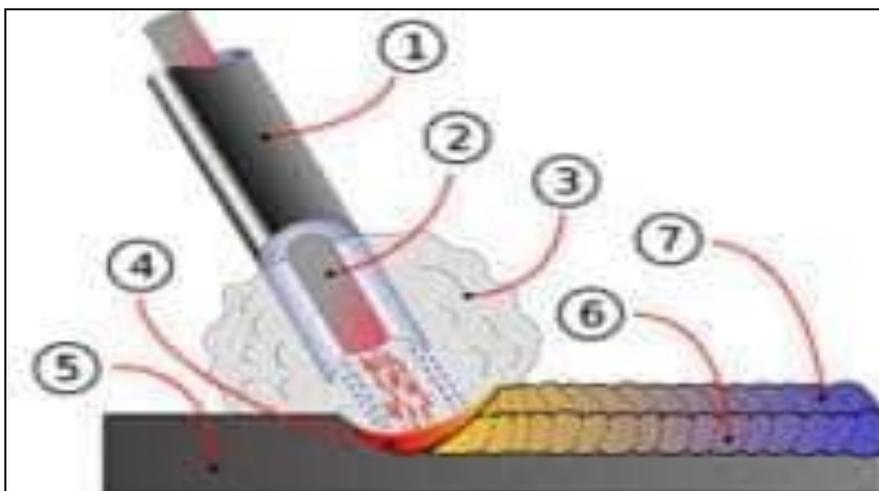


Figure I.7 : Électrode enrobée (1-Enrobage, 2- Électrode, 3- Gaz protecteur, 4- Bain de fusion, 5- Métal de base, 6- Cordon de soudure, 7- Laitier) [Mat14]

I.5.1.2 Caractéristiques de l'électrode :

L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures ; Les électrodes sont constituées de deux parties distinctes : [Mat14]

- **L'âme** : C'est la partie métallique cylindrique placée au centre de l'électrode. Son rôle principal est de conduire le courant électrique, en apportant le métal déposé de la soudure avec une légère avance par rapport à l'enrobage. Sa matière est fonction du métal de base à souder (pour les aciers au carbone, l'âme est en acier doux). [Mat14]
- **L'enrobage (revêtement)** : C'est la partie extérieure cylindrique des électrodes et la plus importante, en offrant de nombreuses fonctions et en participant à la protection du bain de fusion de l'oxydation par l'air ambiant en général une atmosphère gazeuse entourant le métal en fusion. Il contient, en outre, des matériaux pouvant dépurifier le matériel de base ainsi que des éléments pouvant contribuer à la formation d'alliage dans la fusion. Le choix du revêtement est donc très important et dépend des caractéristiques que doit présenter la fusion. Le revêtement peut aussi contenir des métaux d'apport en poudre afin d'augmenter la quantité de matériel déposé et donc la vitesse de soudage, comme c'est cas pour des électrodes dites à haut-rendement (Figure I.8). [Mat14]

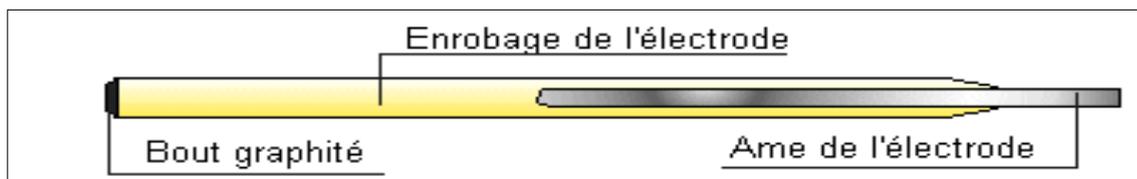


Figure I.8 : Electrode enrobée [Mat14]

L'enrobage étant constitué d'un mélange de différentes substances chimiques jouent plusieurs rôles : Électriques ; métallurgiques ; mécaniques.

a) Rôle électrique : Les éléments chimiques de l'enrobage facilitent l'amorçage, la stabilité et le maintien de l'arc. [Mat14]

b) Rôle métallurgique : En fondant, l'enrobage apporte les éléments d'alliage indispensables à la formation d'une soudure saine et de qualité. De plus, après sa fusion, l'enrobage forme un liquide plus léger que le métal en fusion qui surnage en formant une couche protectrice isolant le

bain de fusion de l'air ambiant, tout en donnant au cordon de soudure un bel aspect. [Mat14]

c) **Rôle mécanique** : L'épaisseur de l'enrobage influence la forme du cordon de soudure (Figure I.9). Dans le cas d'une électrode très épaisse, l'âme métallique fond plus rapidement que l'enrobage, formant ainsi un cratère assez profond, ce qui permet, au soudeur, d'appuyer le bout de l'électrode sur la pièce lors de l'exécution de la soudure afin d'améliorer l'aspect du cordon (phénomène associé au PINCH EFFECT). L'enrobage peut être mince, moyen, épais ou très épais [Mat14]

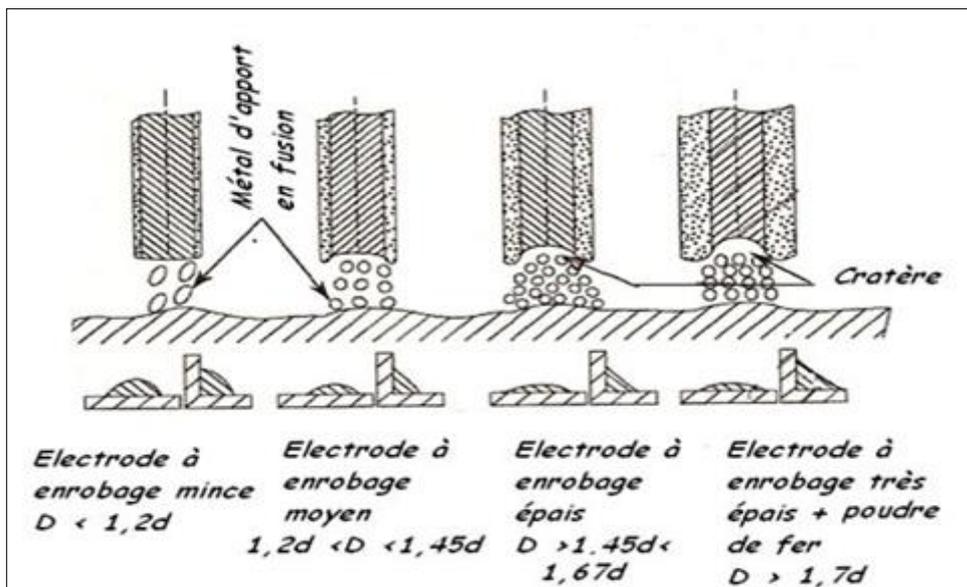


Figure I.9 : Différents enrobages [Mat14]

I.5 .1.2.1 Les différents types d'électrodes enrobées :

Les différents types d'électrodes enrobées pour le procédé SMAW sont :

- **Enrobage Acide (A)** : Cet enrobage contient du ferromanganèse, de l'oxyde de fer et de l'oxyde de manganèse. Le laitier est très fluide et abondant. Cet enrobage convient pour le soudage à plat et en gouttière. Il convient mal au soudage en position. La soudabilité du métal de base doit être bonne si non le métal constituant le joint est sensible à la fissuration à chaud pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression). [Mat14]

- **Enrobage Basique(B)** : Cet enrobage contient principalement du spath-fluor et du carbonate de calcium. Il fournit un laitier calcaire dont l'effet désulfurant est favorable au soudage des aciers ferritiques et il diminue le risque de fissuration à chaud du métal déposé. Ces électrodes nécessitent dans la plupart des cas un étuvage effectué au minimum à 350°C

pendant 2 heures sauf prescriptions contraires du fournisseur. La majeure partie de ces électrodes fonctionnent en courant continu avec une polarité inverse (+ à l'électrode). Certaines peuvent fonctionner en courant alternatif à condition d'utiliser un générateur de soudage avec une tension à vide suffisamment élevée $U_0 > 60V$. [Mat14]

➤ **Enrobage Cellulosique (C) :** Cet enrobage contient une grande quantité de substances organiques comme la cellulose. Il donne peu de laitier mais un soufflé à forte teneur en CO_2 . Celui-ci favorise le soudage rapide en position descendante et améliore la pénétration. Comme pour les électrodes basiques, les cellulosiques fonctionnent en courant continu en polarité inverse. La tension à vide doit être au moins égale à 60 Volts pour les soudures à forte pénétration en position descendante. [Mat14]

➤ **Enrobage Oxydant (O) :** Cet enrobage contient principalement des oxydes de fer et des oxydes de manganèse. Il correspond à des électrodes faciles à amorcer avec un laitier en général auto-détachable. Il s'utilise en courant continu ou alternatif pour des travaux ordinaires sur aciers doux. Les caractéristiques mécaniques du métal déposé étant très médiocres, il ne supporte aucune déformation de l'assemblage à chaud ou à froid. [Mat14]

➤ **Enrobage Rutile (R) :** Cet enrobage contient une quantité importante d'oxyde de titane. Le laitier obtenu s'élimine facilement. Il permet de souder aisément en toutes positions en courant continu ou alternatif. Les caractéristiques du métal déposé sont bonnes lorsque les aciers de base sont de bonnes qualités et ont des teneurs en carbone ainsi qu'en soufre limitées. [Ben07, Ben11, Twi08].

I.5.1.3 Avantage et inconvénient :

Procédé universel pour les avantages qu'il présente et qui sont liés à la simplicité et une flexibilité inégalées de son emploi dans tous les domaines industriels :

- Un équipement simple et facile à mettre en œuvre ;
- Possibilité d'emploi pratiquement dans toutes les conditions (Chantier, atelier, etc.) ;
- Disponibilité de main d'œuvre et produit de soudage sur le marché, large variété des électrodes de soudage.

Ces avantages sont à opposer aux inconvénients qu'il présente et qui sont notamment liés à ;

- Arrêts nécessaires pour le changement des électrodes en cours de soudage ce qui peut engendrer les défauts de reprises.

- D'une capacité et d'une productivité relativement limitée par rapport au procédé SAW et MIG/MAG. [Twi08]

I.5.2 Le soudage électrique à l'arc avec fil électrode fusible Sous flux en poudre

I.5.2.1 Caractères principaux :

- Électrode : fil métallique fusible dévidé d'une façon continue ;
- Protection : apport simultané de poudre composite appelé flux ;
- Courant : continu et alternatif. 10 à 100 (A) (et+) plutôt fortes ;
- Epaisseurs (mm) : 10 à 100 (et+) plutôt fortes ;
- Vitesse opératoire : forte ;
- Productivité : forte ;
- Forme de joint : forte, en bout en T ;
- Hygiène : aspiration des poussières ;
- Applications : chaudronnerie lourde. [Mat14]

❖ Appareillage :

- Une tête de soudage, l'entraîneur de fil, le dévidoir ;
- Recevant la bobine de fil, la trémie de poudre et son conduit à la torche ;
- Une source de courant continu ou, dans certains cas, alternatif ;
- Un coffret d'automatisme et des accessoires. (Figure I.10) [Mat14]

I.5.2.2 Caractéristiques du couple fil/flux

❖ Fil :

✓ Le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé ;

✓ Les fils d'aciers sont protégés de l'oxydation par un cuivrage électrolytique qui facilite l'arrivée du courant et reste sans effet sur le métal déposé. [Mat14]

❖ Flux :

Le flux en poudre crée le milieu ionisé (ou conducteur) et protège la soudure. De plus, comme l'enrobage, il partage avec le fil la responsabilité des caractéristiques des soudures. [Mat14]

I.5.2.3 Avantage et inconvénient

Le soudage sous flux se place, par rapport au soudage à électrode enrobée, avec pratiquement les mêmes avantages quant à son adaptative métallurgique, mais il résout le

problème de la productivité par [Mat14] :

- Son fonctionnement continu grâce faufil-électrode ;
- Son taux de dépôt supérieur.

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

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

Les avantages du procédé sont :

- Régularité du travail
- Vitesse d'exécution
- Réduction de main d'œuvre
- Augmentation de la pénétration et dès lors réduction des angles et profondeur de chanfrein.
- Introduction d'éléments améliorants par le flux
- Soudage de fortes épaisseurs (avec 1 seul fil électrode, on peut déposer un cordon de l'ordre de 12 mm d'épaisseur.

Les inconvénients du procédé sont :

- Réglages de la machine délicats
 - Flux contaminable surtout dans le cas où celui-ci contient des éléments d'alliage
 - Joint invisible pendant l'opération
 - Préparation particulièrement soignée
 - Soudage en position horizontale ; toutefois à l'heure actuelle on parvient à souder en corniche et même en position verticale.
 - Propriétés mécaniques quelquefois quelconques en fonction de l'importance du dépôt.
- [Mat14]

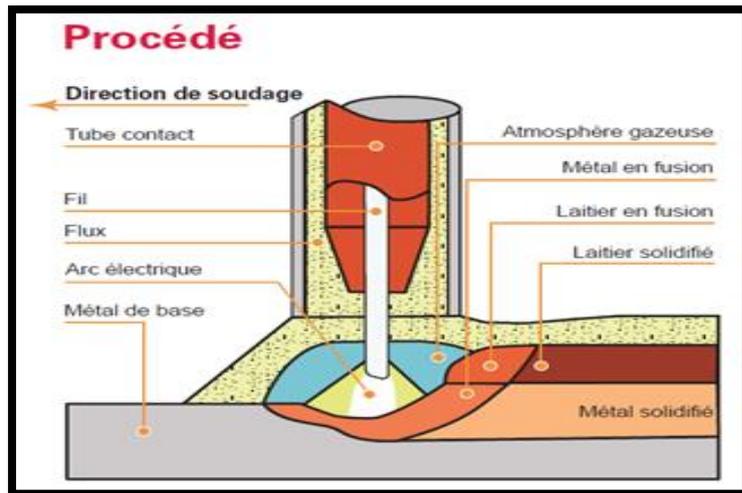


Figure I.10 : Soudage sous flux en poudre [Mat14]

I.6.Caractéristiques de la soudure :

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage de surface afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. [Gui06]

Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales. (Figure I.11)

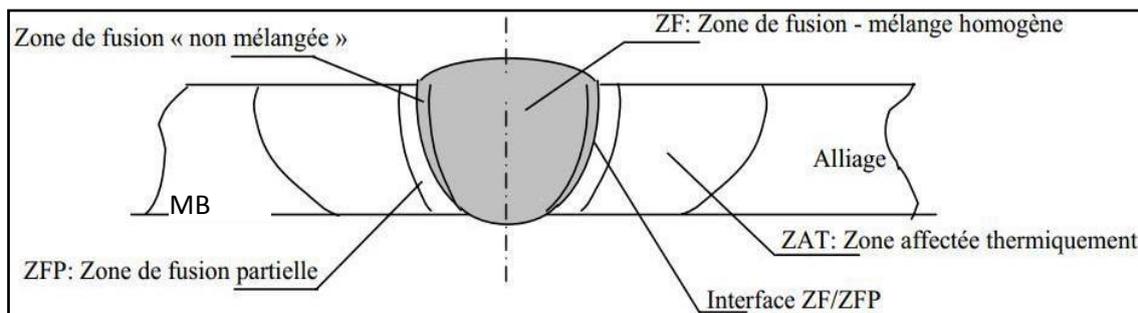


Figure I.11 : Présentation macrographique d'un joint soudé [Gui06]

- **(ZF)** la zone de fusion : est la région chauffée au-dessus de température liquidus. Le bain de fusion est similaire à un système de fonderie où le métal de base est considéré comme un moule. [Gui06]
- **(ZNM)** la zone non mélangée : est la zone étroite à l'extrémité du bain de fusion, dans

Cette zone, les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, La composition chimique est identique à celle du métal de base.

- **(ZFP)** la zone partiellement fondue : est directement adjacente à l'interface de la soudure. [Gui06]
- **(ZF/ZFP)** la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionnée et le métal de soudure solidifiée. [Gui06]
- **(ZAT)** la zone affectée thermiquement : est la zone où la température est comprise entre la température du solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide, en modifiant la structure du métal de base. [Gui06]
- **(MB)** le métal de base : est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que métallurgiquement inchangé. [Gui06]

I.4.1. Principaux métaux pour soudage

➤ Aciers :

Les aciers à faible teneur en carbone ($C < 0,25\%$) se soudent sans précaution particulière. Les difficultés de soudage augmentent avec la masse des pièces ou avec la teneur en carbone. [Gui06]

➤ Aluminium E7 alliages légers :

On évite de souder les alliages à traitement thermique (fragilité du métal au voisinage de la soudure). On soude principalement les métaux suivants :

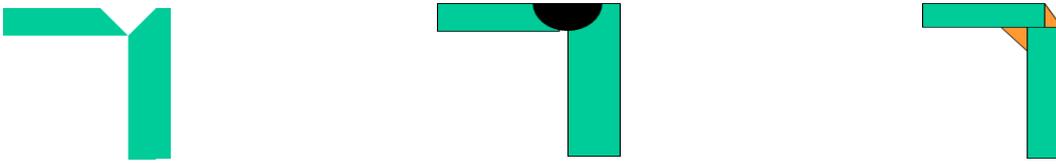
- ✓ Al99,5 — Al Mg5 — Al Mg4;
- ✓ Cuivre et alliages cuivreux

I.5 Types de soudures et Forme de joint

➤ Soudures bout à bout sur pièces chanfreinées en [Ben 12] :



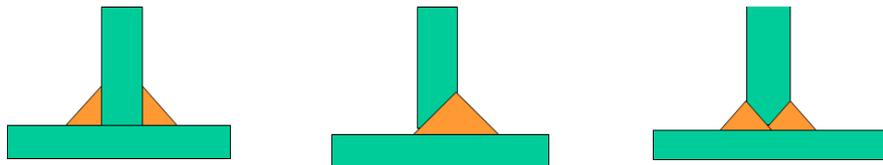
- **Assemblages en angle extérieur et intérieur [Ben 12] :**



- **Assemblage bout à bout avec latte support :**



- **Soudure sur assemblage en T [Ben 12] :**



- **Assemblages par recouvrement [Ben 12] :**



I.6 Classification des défauts dans les assemblages soudés

- Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger, Les défauts sont classés en six groupes conformément à la norme NF EN 26250 : [Tou12]

- **Groupe 1** : Fissures ;
- **Groupe 2** : Cavités(Soufflures) ;
- **Groupe 3** : Inclusions solides ;
- **Groupe 4** : Manque de fusion et de pénétration ;
- **Groupe 5** : Défauts de forme et défauts dimensionnels ;
- **Groupe 6** : Défauts divers.

I.6.1 Défauts de fissures

- Les fissurations constituent l'un des défauts de soudure les plus fréquents, Types de fissures fréquentes (Figure I.12) : [Tou12]

- Fissure longitudinale ;
- Fissure transversale ;
- Fissure de rayonnantes ;
- Fissure de cratère.

Causes des fissures :

Les fissures peuvent être dues :

- A des contraintes excessives pendant le soudage (énergie trop élevée, refroidissement trop rapide, métal d'apport non adapté...);
- Volume de cordon trop faible (préparation des bords trop étroite...) Arrêt trop brutal de la soudure ;
- La trempabilité liée au carbone équivalent ;
- La présence d'hydrogène due à l'humidité sur l'enrobage ou sur la pièce ou à certains composés comme la rouille et la calamine ;
- L'humidité dans l'air ;
- La présence de défauts à la surface de la pièce (inclusions, soufflures, trop grande épaisseur de la soudure, caniveau, etc.). [Tou12]

Remèdes contre les fissures :

- Choisir un métal d'apport approprié
- Adopter un préchauffage approprié
- Effectuer une bonne préparation des joints ; [Tou12]

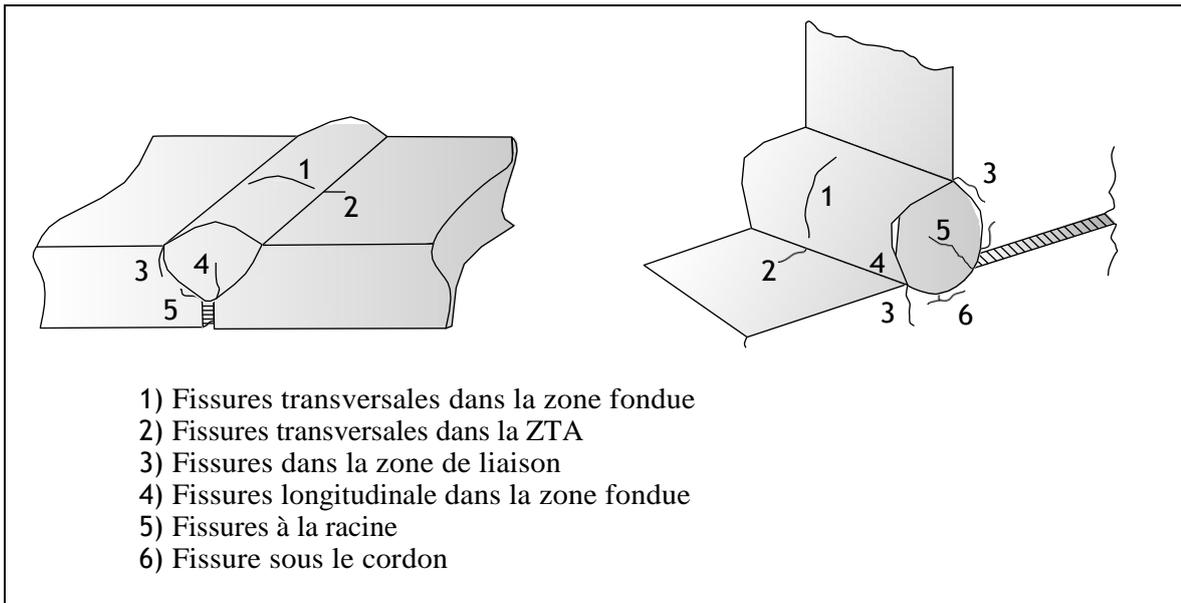


Figure I.12 : Défauts de fissures [Tou12]

I.6.2 Défauts de soufflures ou cavités

Types de soufflures fréquentes : (Figure I.13) [Gui06]

- Soufflures alignées
- Nid de soufflures ;
- Soufflures vermiculaires ;
- Piqûre ;

Cause des soufflures :

- A des courants d'air ;
- Un manque de gaz de protection
- Débit de ce gaz trop faible ;
- La présence de graisse ou d'huile sur le métal de base ou le métal d'apport ; une buse en crassée ;
- Un mauvais angle de soudage qui entraîne ; une mauvaise protection gazeuse ;
- Des impuretés dans le joint à souder. [Gui 06]

Remèdes contre le défaut de soufflures :

- S'assurer que la surface du métal de base et d'apport est propre et non gras ;
- Vérifier la protection gazeuse ;
- Une intensité de courant trop faible et une vitesse de soudage trop élevée peut entraîner ce défaut ;

- Les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base

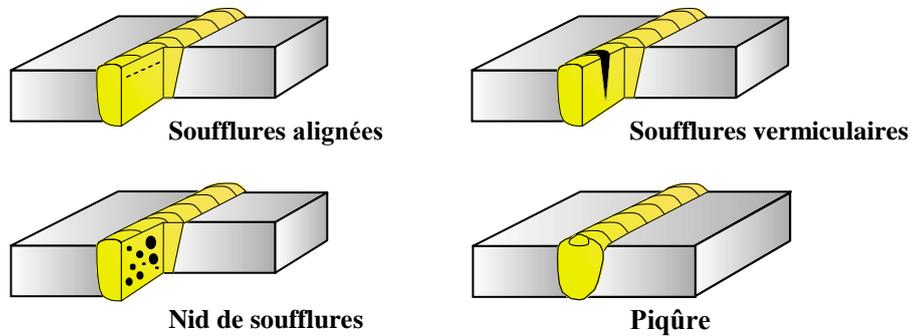


Figure I.13 : Illustration des défauts de soufflures ou cavités [Gui 06]

I.6.3 Défaut d'inclusions Solide

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

Les types d'inclusions fréquentes : (Figure I.14), [Gui 06]

- Inclusion de flux : morceau de flux inclus dans le cordon de soudure.
- Inclusion de laitier : morceau de laitier inclus dans le cordon de soudage
- Inclusion d'oxyde
- Inclusion métallique.

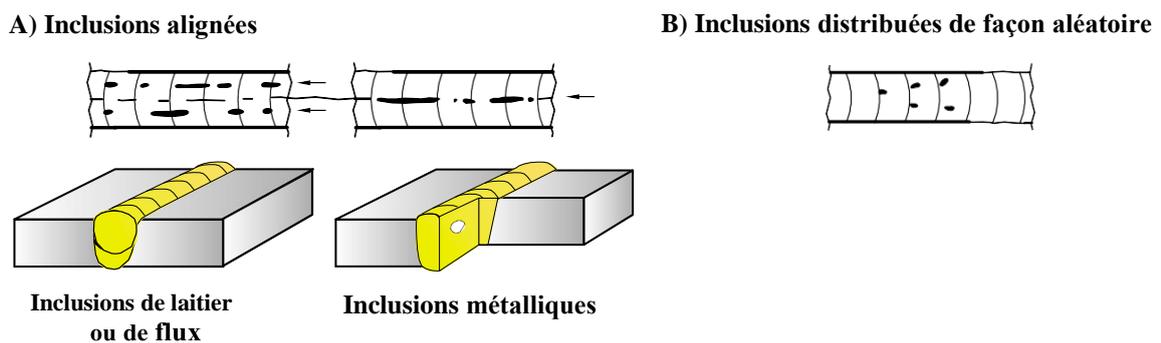


Figure I.14 : Défaut d'inclusions [Gui 06]

I-6-4- Défaut de manque de fusion et pénétration

I-6-4-1- Défaut de manque de fusion :

- Manque de fusion des bords à souder
- Manque de fusion entre les passes.
- Manque de fusion à la racine. (Figure I.15) [Gui13]

Cause des défauts de collage :

- Angle du chanfrein trop étroit
- Mauvaise orientation des électrodes

Remèdes :

- Mettre en œuvre un DMOS adapté

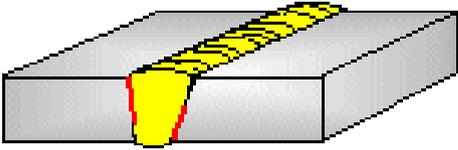
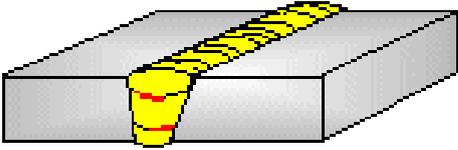
Désignation	Illustration
Manque de fusion des bords ou collage	
Manque de fusion entre passes	

Figure I.15 : Défaut de manque de fusion [Gui13]

I.6.4.2 Défaut de pénétration :

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration. L'excès de pénétration est un surplus de métal à la racine de la soudure ou un excès dans la passe précédente. (Figure I.16) [Gui13]

Cause des défauts de manque de pénétration :

- Jeu de soudage trop petit (pièces trop rapprochées)
- Vitesse d'avance trop élevée
- Intensité trop faible Métal de base trop froid. [Gui13]

Remèdes :

- Agrandir l'écart des pièces à souder
- Souder plus doucement
- Augmenter l'intensité
- Préchauffer les pièces

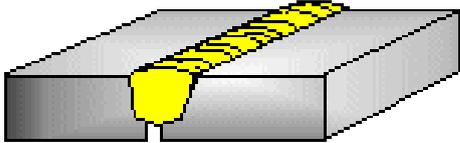
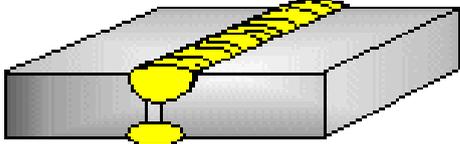
Désignation	Illustration
Manque de pénétration	
Manque d'interpénétration	

Figure I.16 : Défaut de pénétration [Gui13]

I.6.5 Morsures et caniveaux

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figure I.17). [Gui13]

Cause :

- Une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux ;
- Un courant trop fort.
- Un mauvais angle de soudage

Remède :

- Réduire intensité,
- Augmenter la vitesse d'avance,
- Augmenter la longueur d'arc.

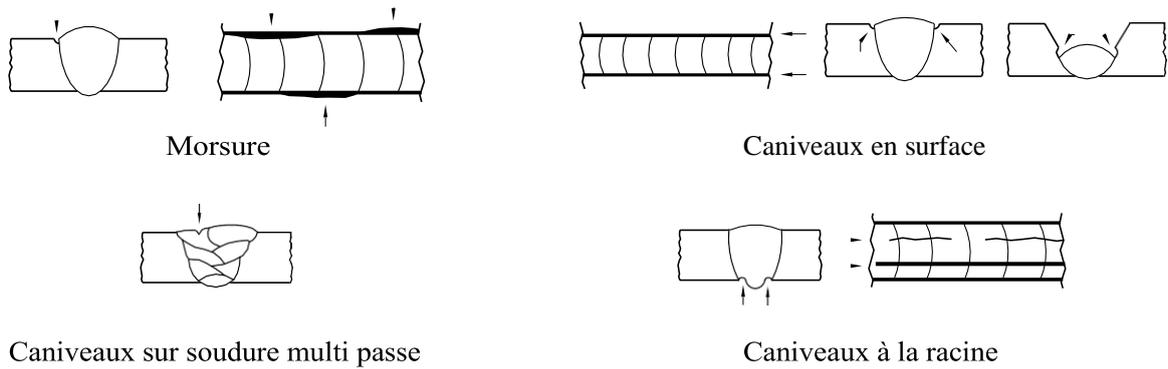


Figure I.17 : Morsures et caniveaux [Gui13]

I.6.6 Défauts géométriques des cordons

I.6.6.1 Défaut de convexité et concavité

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (Figure I.18) [Gui 06]

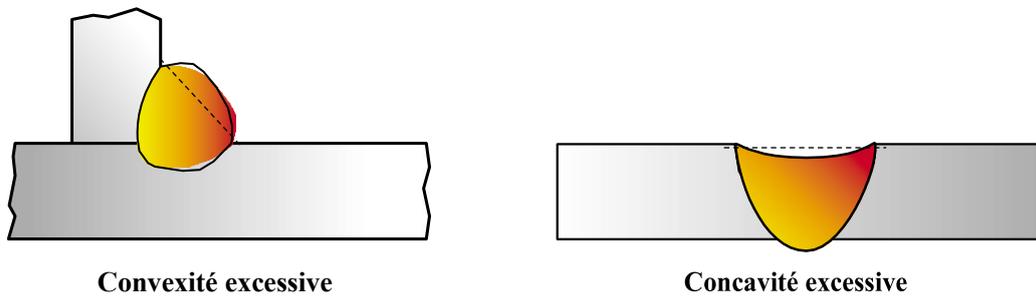


Figure I.18 : Défaut de convexité et concavité [Gui 06]

I.6.6.3 Défaut d'alignement

Lorsque les pièces sont mal bridées et/ou le pointage insuffisant, on peut avoir un défaut d'alignement (Figure I.19) [Gui 06]

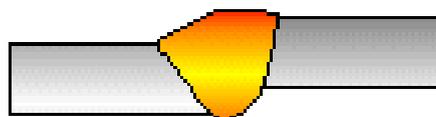


Figure I.19 : Défaut d'alignement [Gui 06]

I.6.6.4 Déformations angulaires

Les déformations importantes de l'opération de soudage peuvent aussi entraîner un défaut angulaire. Les pièces assemblées ne respectent pas la forme souhaitée. (Figure I.20)

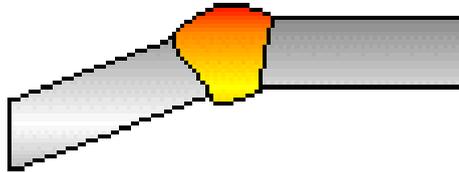


Figure I.20 : Déformations angulaires [Gui 06]

I.6.6.5 Projection (Figure I.21)

Cause :

- Courant de soudage trop élevé ;
- Arc trop long. Mauvaise polarité ;
- Électrode défectueuse.

Remède :

- Réduire le courant de soudage ;
- Réduire la longueur d'arc ;
- Utiliser des électrodes correctes. Si nécessaire, ouvrir un nouveau carton.

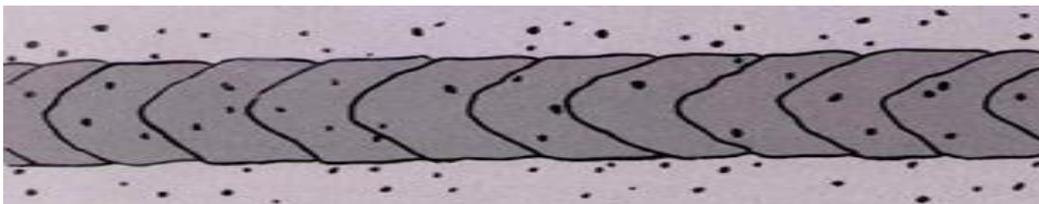


Figure I.21 : défauts de projection [Gui 06]

I.7 Conclusion

Suite à la recherche bibliographique la procédés de soudage la plus fréquent utilisable dans le soudage des pipelines est la procédées SMAW ; bien que se caractérise par plusieurs défauts.

A cet effet l'évaluation de la qualité de joint soudé est nécessaire ; afin de contrôlée les performances de l'assemblage.

Chapitre II

*Applications &
techniques
expérimentales*

II.1 Introduction

Ce chapitre décrit d'un côté les méthodes expérimentales, électrochimiques et d'analyse de surfaces utilisées dans ce travail, et d'autre côté le suivi pratique de la procédure de soudage des pipelines et le contrôle des joints soudés au niveau des projets de l'entreprise nationale de canalisations ENAC. Une description de matériau, de l'électrolyte et des montages effectués permet, dans un premier temps, de fixer une démarche expérimentale assurant une bonne reproductibilité des résultats.

II.2 Pratiques et contrôle des joints a soudés

II.2.1 Examen visuel :

L'examen visuel direct des pipelines peut constituer un contrôle suffisant pour la détection des défauts débouchant en sur face et surtout des hétérogénéités locales et superficielles, toutefois l'examen purement visuel présente des limitations de différentes natures[Dum96], Pour cela et afin de bien préparer à l'opération de soudage, il faut respecter les pratiques suivant le code API 1104 – 19eme édition – septembre 1999.

II.2.1.1 Alignement

L'alignement des extrémités bout à bout doit minimiser le décalage entre les surfaces. Pour les extrémités de tube de la même épaisseur nominale, le décalage ne doit pas dépasser 3 mm de plus grandes variations sont admissibles à condition que la variation soit consécutive à des variations des dimensions d'extrémités de tube dans les limites des tolérances de la spécification d'achat du tube, et que lesdites variations aient été réparties pratiquement uniformément autour de la circonférence du tube. Le martelage du tube pour obtenir un bon alignement doit être strictement limité. [API 1104]

II.2.1.2 Conditions météorologiques

Le soudage ne doit pas avoir lieu lorsque la qualité de la soudure réalisée serait compromise par les conditions météorologiques dominantes, y compris sans que la liste soit exhaustive, l'humidité ambiante, les tempêtes de sable, ou des vents violents. Des paravents peuvent être utilisés, le cas échéant. La société doit décider si les conditions météorologiques sont propices au soudage [API 1104].

II.2.1.3 Nettoyage entre cordons

La calamine et le laitier doivent être enlevés de chaque cordon et rainure. Des outils mécaniques peuvent être utilisés lorsque la spécification de mode opératoire le spécifie ; sinon, le nettoyage peut se faire au moyen d'outils à main ou mécaniques [API 1104].

II.2.2 Soudage en position

II.2.2.1 Cordons d'apport et de finition

Pour le soudage en position, le nombre de cordons d'apport et de finition doit assurer à la soudure achevée une section sensiblement uniforme tout autour de la circonférence du tube. La surface de crête ne doit en aucun point tomber en dessous de la surface extérieure du tube ni dépasser le métal de base de plus de 1,6 mm [API 1104].

Deux cordons ne peuvent pas commencer au même endroit. L'endroit de la soudure achevée doit être environ 3 mm plus large que la largeur de la gorge initiale.

La soudure achevée doit être brossée et nettoyée à fond.

II.2.2.2 Normes d'acceptation visuelle pour les caniveaux

Les normes d'acceptation du paragraphe **II.2.2.2.1** complètent mais ne remplacent pas les exigences d'examen visuel contenues ailleurs dans la présente norme API 1104.

II.2.2.2.1 Normes d'acceptation

Lorsque des moyens visuels et mécaniques sont utilisés pour déterminer la profondeur, le caniveau adjacent à la passe de finition ou de fond ne doit pas dépasser les dimensions indiquées au Tableau III.1. Lorsqu'on dispose à la fois de mesures mécaniques et radiographiques, les mesures mécaniques prévaudront.

Tableau II.1 : Les normes d'acceptation d'un joint soudé [API 1104]

Profondeur	Longueur
Moindre valeur d'entre > 0,8 mm ou > 12,5% de l'épaisseur de paroi de tube. Pas acceptable	Pas acceptable.
Moindre valeur d'entre > 0,4 mm ou > 6% de l'épaisseur de paroi de tube.	Moindre valeur d'entre 50 mm dans une longueur de soudure continue de 300 mm ou un sixième de la longueur de soudure.
Moindre valeur d'entre 0,4 mm ou 6% de l'épaisseur de paroi de tube.	Acceptable indépendamment de la longueur.

II.2.3 Contrôles non destructif (CND)

L'examen de la structure ou de la sante interne d'un joint soudé par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons 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, comme l'illustre la Figure II.1. Selon le même principe, on peut obtenir des images en utilisant d'autres particules que les photons et ainsi mettre en œuvre des techniques [Dum96]

La gammagraphie (également appelée tir radiographique) de soudures est une opération non destructive efficace, mais qui peut être dangereuse si elle n'est pas pratiquée dans le respect d'un corpus de règles précises et contraignantes. La zone de tirs doit être délimitée de façon à en interdire l'accès à toute personne non habilitée. [LAF08]

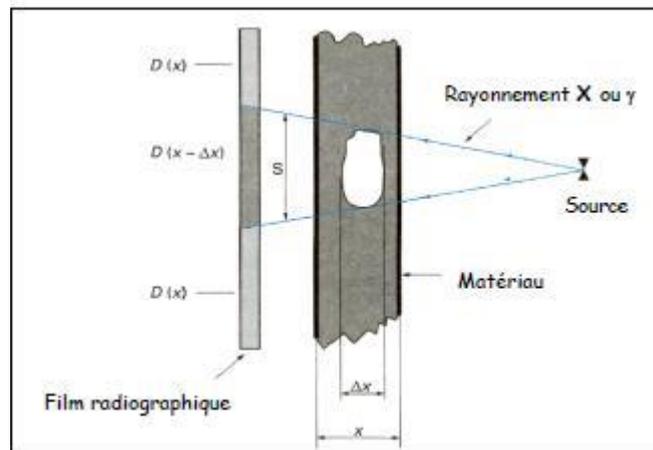


Figure II.1 : Contrôle par radiographie [LAF08]

II.2.3.1 Précautions à prendre avant pendant la manipulation d'un appareil de gammagraphie :

- ✓ Organiser les travaux de radiographie en tenant compte des conditions de travail (permis de radiographie, activités, facteur humain, etc.), des autres activités de production et dans le respect des plannings.
- ✓ Dégager la zone de travail de tout matériel ou matière encombrante.
- ✓ Assurer un balisage exhaustif de la zone d'intervention et interdire tout accès involontaire dans le périmètre (à l'aide de bandes rouges, plaques de signalisation, des lanternes

clignotantes pour les travaux de nuit). Il est impératif de vérifier le respect de débits d'équivalent de dose, en fonction des zones délimitées à l'aide du radiomètre.

- ✓ Des panneaux standards indiquant « **Danger : Zone de Rayonnement** » doivent être placés de part et d'autre de la zone de séance de radiographie, dans des endroits bien en vue et à tous les points probables d'entrée.
- ✓ Tout le personnel doit être à l'extérieur de la zone balisée lorsque la source de rayonnement est activée.
- ✓ Le personnel des autres phases ne doit pas franchir la zone balisée lorsque la source de rayonnement est désactivée jusqu'à ce que les opérateurs déterminent que l'accès ne comporte aucun danger.
- ✓ Interdire la circulation au public (piétons) à proximité de la zone de manœuvre des sources gamma graphiques.
- ✓ Tous les incidents d'entrée non appropriée ou de violation d'une zone balisée contre les rayonnements radioactifs doivent être signalés.
- ✓ Dans la mesure du possible, il faut éviter les géométries sinueuses pour le flexible d'éjection car ceci entraîne le plus souvent un blocage du porte-source.
- ✓ Contrôler l'intégrité et la propreté des accessoires avant de réaliser le montage. Des corps étrangers (sable, rouille, etc.) peuvent pénétrer dans les flexibles quand les appareils sont utilisés à l'extérieur ou dans des environnements sévères.
- ✓ Chronométrer le temps d'exposition dont la durée doit être prévue avant chaque série de contrôle.
- ✓ Contrôler régulièrement le bon fonctionnement des dosimètres et des radiomètres ainsi que celui de l'alarme sonore.
- ✓ Pendant les travaux de gammagraphie, les opérateurs doivent impérativement porter leurs dosimètres.
- ✓ Des dosimètres nominatifs doivent être portés.
- ✓ Les opérateurs doivent utiliser et faire fonctionner leur détecteur sonore et ajuster les dosimètres dès qu'ils entament les travaux à proximité d'une zone de gammagraphie.
- ✓ Réaliser les contrôles radiologiques appropriés pendant et après chaque séance de gammagraphie afin d'identifier d'éventuels problèmes et de limiter les expositions incidentelles.
- ✓ S'assurer que la source est bien rentrée dans le projecteur après chaque exposition et s'assurer du verrouillage du dispositif d'irradiation.

- ✓ La source doit toujours être remise en position de sûreté (fermée) quand elle n'est pas utilisée.
- ✓ Ne déverrouiller le dispositif d'irradiation qu'au dernier moment avant d'effectuer une exposition.
- ✓ Le personnel opérateur doit connaître les procédures d'urgence et les alarmes.
- ✓ Instaurer des séances de rappel pour remettre à jour la formation des opérateurs régulièrement à « bien réagir » en situation incidente.
- ✓ Utiliser un collimateur dans la mesure du possible, en particulier en zone urbaine [Ena19].

II.3 Techniques d'étude des phénomènes de corrosion

Pour étudier les phénomènes de corrosion en différents milieux corrosifs deux types de méthodes ont été retenus :

- Les méthodes électrochimiques (courbes de polarisation) permettent tout d'abord d'avoir une meilleure connaissance du mécanisme de corrosion en différents milieux corrosif.
- Les analyses de surface par le microscope optique (MO) ont été utilisées pour déterminer l'état de l'électrode de travail et la nature de la couche qui se forme à sa surface.

II.3.1 Techniques électrochimiques

Les méthodes électrochimiques sont basées sur la caractérisation des réactions d'oxydoréductions qui sont le siège d'un échange d'électrons entre l'oxydant et le réducteur. On obtient par cette mesure une caractérisation de la modification de l'interface métal/milieu et joint/milieu. L'aspect plus quantitatif (tracé de courbes de polarisation) permet, quant à lui, d'accéder à des valeurs de paramètres physiques décrivant l'état du système (courant de corrosion et potentiel de corrosion).

II.3.1.1 Courbes de polarisation

Les courbes de polarisation de l'interface métal-solution sont une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global (transport de matière, adsorption des espèces sur l'électrode...) à l'interface électrochimique. Pour déterminer les courbes de polarisation, on applique, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence, par le biais d'un protocole de balayage

imposant l'incrément. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre l'électrode de travail et la contre-électrode [Bou18].

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : le courant de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation (R_p). Elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique, on distingue trois principaux types de cinétique :

- Cinétique de transfert de charge (activation),
- Cinétique mixte de transfert de charge - diffusion,
- Cinétique de diffusion.

Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques à savoir la vitesse de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), le coefficient de droite de Tafel anodique (b_a) et le coefficient de droite de Tafel cathodique (b_c), une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (figure II. 2).

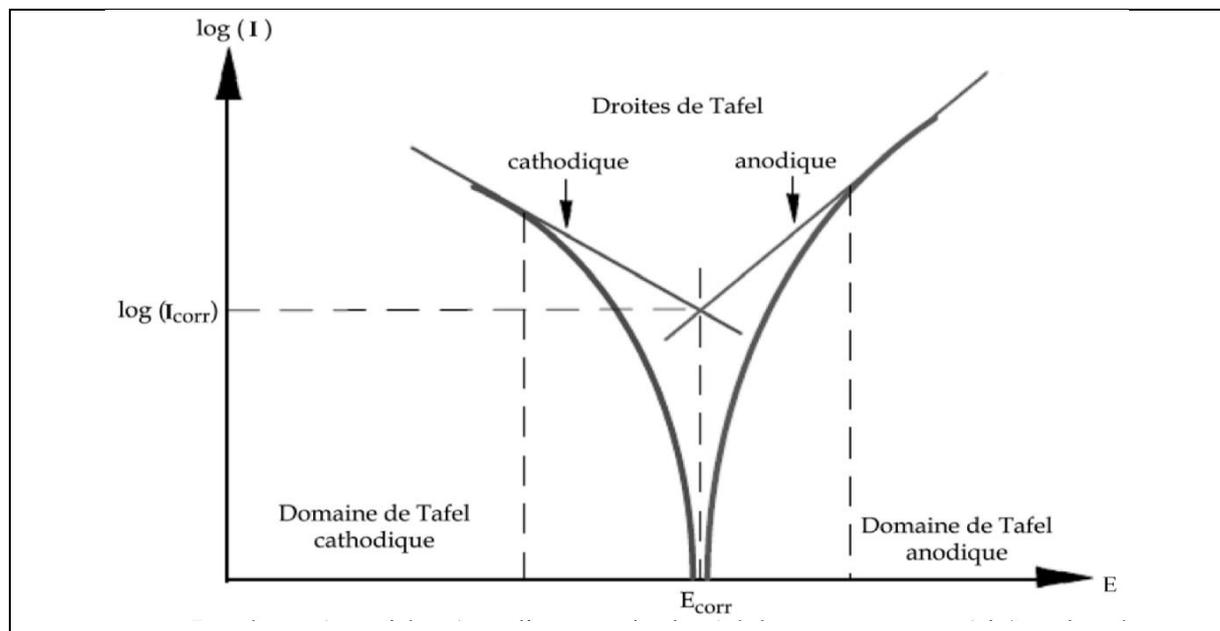


Figure II-2 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel. [Kha14]

Une autre méthode est largement utilisée pour déterminer la vitesse de corrosion à

travers l'équation de Stern–Geary [Lav91] :

$$I_{\text{corr}} = \frac{|b_a| \times |b_c|}{2,3 \times (|b_a| + |b_c|) \times R_p} \quad \text{Eq0-1}$$

Où R_p est la résistance de polarisation ($\Omega \text{ cm}^2$).

Cette méthode stationnaire reste toutefois insuffisante pour caractériser des mécanismes complexes, mettant en jeu plusieurs étapes réactionnelles et ayant des cinétiques caractéristiques différentes (ce qui est le cas lors des processus d'inhibition). L'utilisation des techniques transitoires devient alors indispensable.

II.4 Conditions expérimentales

II.4.1 Les électrodes de travail

a. Le métal de base

- Nuance de l'acier : X70
- Epaisseur du pipeline : 13 mm

❖ Propriétés mécanique

Caractéristiques API5L	Epaisseur (mm)	Re (MPa)	Rm (MPa)	A(%)	Re/Rm
X70	11-13	482	566	≥ 18	0.85

Tableau II.2 : Caractéristiques mécaniques du pipeline

❖ Propriété chimique

Elément	C	SI	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu
Valeur	0.17	0.45	1.75	0.002	0.001	0.033	0.018	0.003	0.038	0.003	0.013
Elément	Nb	Ti	V	W	Sn	B	Fe	V+ Nb	S+D	C eq	
Valeur	0.053	0.06	0.01	0.003	0.604	0.001	96.37	0.05	0.0073	0.36	

Tableau II.3 : Caractéristiques chimiques du pipeline

Les électrodes de travail destinées à l'analyse électrochimique sont constituées d'un

barreau cylindrique (en acier API 5L X70 et joint soudé) de diamètre 1,4 cm prélevées sur un tube pour le transport du pétrole. Chaque échantillon prend sa place dans un porte échantillon où la section polaire de l'électrode de travail est 1 cm^2 .

Chaque échantillon destiné à l'examen par le microscope optique, diffraction des rayons X et l'analyse électrochimique est poli aux papiers abrasifs P120, P180, P340, P600 et P800, rincé à l'eau distillée, et dégraissé à l'acétone.

b. Le métal d'apport

L'électrode utilise est l'électrode basique enrobée de diamètre 3,25mm (figure III.3.a et b) a 120 ampère et le diamètre 4mm(E7018) a 160 ampère La forme de la pointe de l'électrode peut affecter la forme.



Figure II.3.a : Caractéristiques de l'électrode

Figure II.3.b : Electrode basique enrobée E7018

II.4.2 Milieu électrolytique

La finalité industrielle de l'étude a orienté le choix de l'électrolyte vers des solutions aqueuses : Acide chlorhydrique (HCl) de concentration 1M et 0.5M, acide sulfurique (H_2SO_4) 1 M et 0.5 M et solution NaCl 3.5%.

II.4.3 Les courbes intensité-potentiel (courbes de polarisation)

Les branches anodiques et cathodiques ont été obtenues consécutivement de -700 mV/ECS à -300 mV/ECS à la vitesse de balayage de 0.3 mV/sec .

En raison de la présence d'un degré de non-linéarité des pentes de Tafel, les coefficients de Tafel ont été calculés à partir de la pente des points après 50 mV/ECS de potentiel de corrosion E_{corr} . Nous avons adopté la méthode graphique pour déterminer la vitesse de

corrosion.

II.4.4 Microscopie optique

Les observations de la structure métallographique à l'état de réception et des piqûres qui apparaissent après les tests d'immersion ont été effectuées avec un microscope optique de type HUND T100-WETZLAR (Figure II.4).



Figure II-4 : Microscope optique HUND T100-WETZLAR

II.5 Examen Radiographie par rayons ionisants (Control Non Destructif)

On utilise la méthode des rayons ionisants la gammagraphie, le principe de contrôle Le contrôle est le suivant :

- La pièce est soumise à l'action d'une source de rayonnement. Le rayonnement sortant de la pièce est fonction de l'épaisseur traversée. Au droit d'un défaut, l'intensité transmise sera plus élevée ou plus faible.

- Une image se forme sur le film après exposition pendant un temps donné fonction du matériau, de l'épaisseur et de la puissance de la source, de la qualité du rayonnement.

- Le film est développé et interprété sous un éclairage adapté

La Figure II.5 montre une source gammagraphie



Figure II.5 : Source gammagraphie « Préparation pour le tir »

Le contrôle détecte la différence d'absorption provoquée par la présence du défaut par rapport au reste de la pièce. Cette différence peut être mise en évidence par la radiographie.

II.5.1 Le film radiographique

Les films sont constitués d'un support plastique recouvert sur les deux faces d'une émulsion de sels d'halogénures d'argent dans une couche de gélatine. Une des caractéristiques des films est la taille du grain. Les films à gros grains sont plus rapides que les films à grains fins, mais la définition des images est plus faible, la figure II.6 montre le film radiographique utilisé dans l'examen radiographique.



Figure II.6 : Film radiographique

II.5.3 Préparation des 'échantillons

Le matériau en étude est un joint d'acier X70 soudé par SMAW non traité. La préparation de

l'échantillon a été effectuée de sorte à éviter tout échauffement ou déformation du matériau, afin d'éliminer toute modification structurale. L'obtention de la surface d'observation commence par le prélèvement de l'échantillon jusqu'à l'attaque chimique. Echantillons préparés de joint soudé de dimension 105 x 22 mm dont l'épaisseur est d'environ 13 mm (Figure I.7, I.8)



Figure II.7 : coupage d'un échantillon

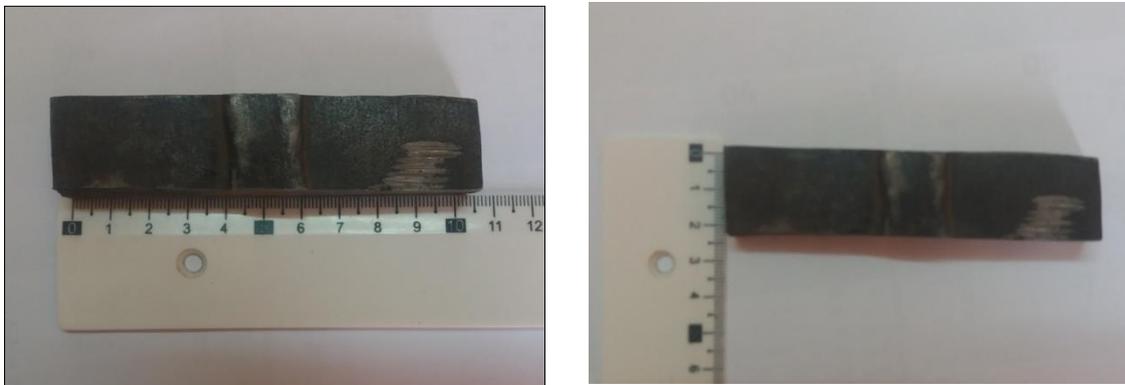


Figure II.8 : Echelle des échantillons

Chapitre III

Résultats

&

Discussions

III.1 Corrosion de l'acier API 5L-X70 et son joint soudé dans différents milieux corrosifs.

III.1.1 Milieu NaCl 0,5%

Cette partie est consacrée à l'évaluation de la corrosion de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5%. Pour cela, les tests de polarisation potentiodynamique et l'analyses de surface par le microscope optique ont été réalisées. A partir des courbes de polarisation la vitesse de corrosion I_{corr} et le potentiel de corrosion E_{corr} de l'acier et du joint soudé ont été déterminés.

III.1.1.1 Courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5%

La figure III.1 représente la courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5%.

Les courbes de polarisation de l'acier X70 et le joint soudé montrent trois domaines de potentiel (figure III.1) :

La zone I : l'acier sous la polarisation cathodique. L'acier est protégé et la réaction qui se déroule est la réaction de réduction de l'eau H_2O [Lan03]



Le domaine actif (la zone II) : situé entre E_{corr} et E_{pit} , dans ce domaine il y a une dissolution active de l'acier selon l'équation. [Lan03]



Les électrons libérés par la dissolution active sont repris par l'oxygène dissous du milieu pour former les hydroxydes OH^- selon la réaction.[Lan03]



La cinétique de corrosion est entièrement fixée par les réactions de transfert de charge.

La zone III : c'est la zone de la corrosion par piqûre, après E_{pit} la densité de courant augmente rapidement.

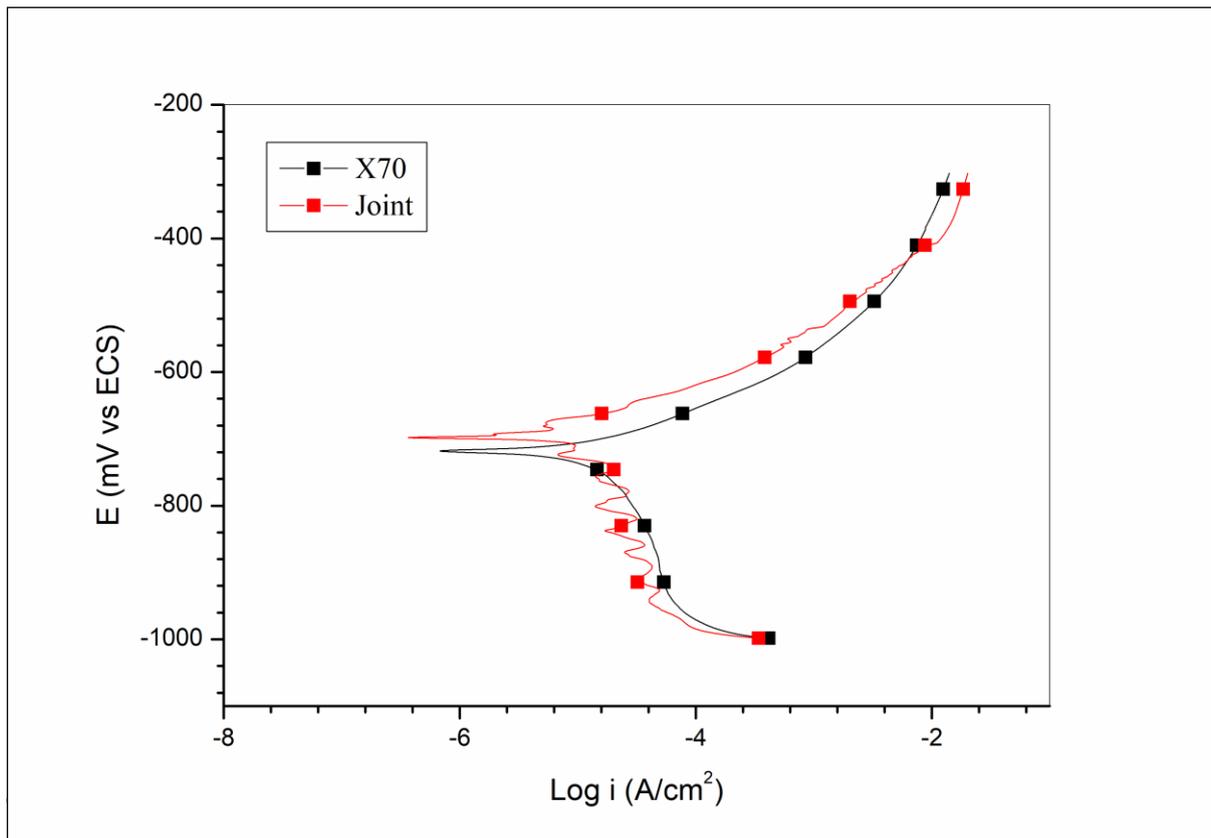


Figure III.1 : Courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5% à 30°C.

Tableau III.1 Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier API 5 L X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5% à 30°C°.

matériau	E_{corr} (mVvs.SCE)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	E_{pit} (mVvs.SCE)
X70	-708	17,2	-648
Joint soudé	-689	14,8	-610

A partir du tableau III.4, on peut constater que le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion de l'acier X70 sont proches de ceux de joint soudé.

III.1.1.2 Analyse de la surface de l'acier X70 et son joint soudé en milieu NaCl 3,5%.

On a immergé des échantillons dans un bain de solution NaCl 3,5% pendant une durée (48 heures).

La figure III.2 présente un aspect macroscopique des produits de corrosion sur la surface de l'acier X70 et son joint soudé.



Figure III.2 : Aspect macroscopique de produits de corrosion en milieu NaCl 3,5%
 (1) Acier X70, (2) joint soudé

Quand l'acier entre en contact avec l'eau, un processus électrochimique lent commence. Sur la surface du métal, le fer (état d'oxydation 0) est oxydé pour passer à l'état d'oxydation II : [Lan03]



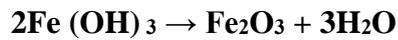
Pendant que le dioxygène de l'air (degré d'oxydation 0) est réduit en ion hydroxyde : [Lan03]



Lors de la seconde étape (quasi instantanée) l'hydroxyde de fer II est rapidement oxydé en hydroxyde de fer III selon cette réaction : [Lan03]



Finalement, cet hydroxyde de fer III se transforme spontanément en oxyde de fer III hydraté selon l'équation suivante. [Lan03]



Equ III.7

Les surfaces des échantillons immergés ont été examinées au moyen d'un microscope optique qui a permis d'exposer le contraste lumineux. La figure III.3 présente la morphologie de produit de corrosion en milieu NaCl 3,5%.

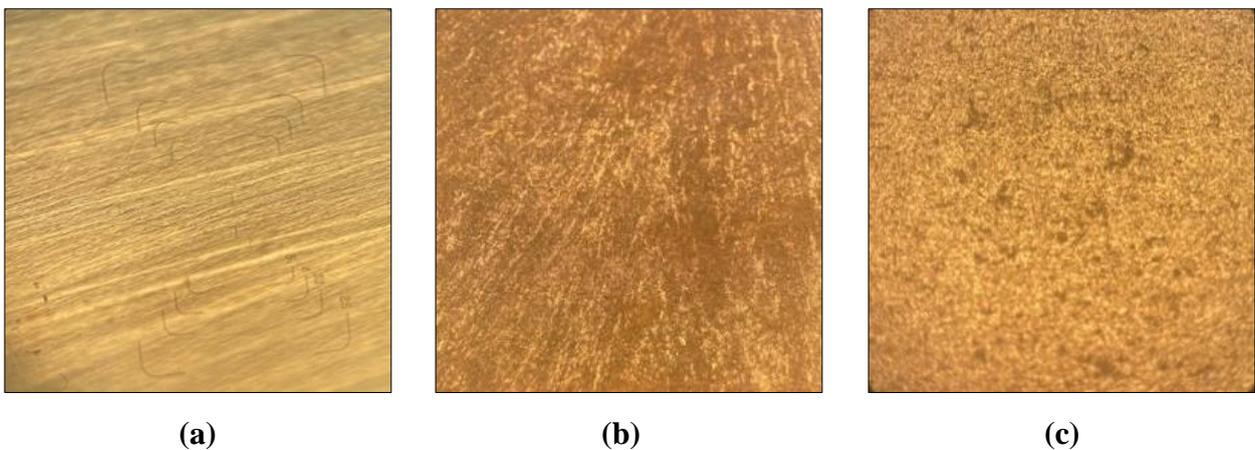


Figure III.3 : la morphologie de produit de corrosion (2 jours) de l'acier X70 et son joint soudé par le microscope optique (X200), (a) l'acier sans produit de corrosion , (b) acier API 5L X70, (c) joint soudé.

La couleur rouge de la surface d'acier, (Figure III.3 (b) et (c)), c'est une couleur de l'hématite.

Les zones lumineuses, mais restent moins lumineuses que la Figure III.3 (a), représentent la corrosion généralisée, par contre les zones sombres représentent probablement la corrosion par piqûre.

On peut constater que la Figure III.4 reflète la corrosion par piqûre de l'acier X70 en milieu NaCl 3,5%.

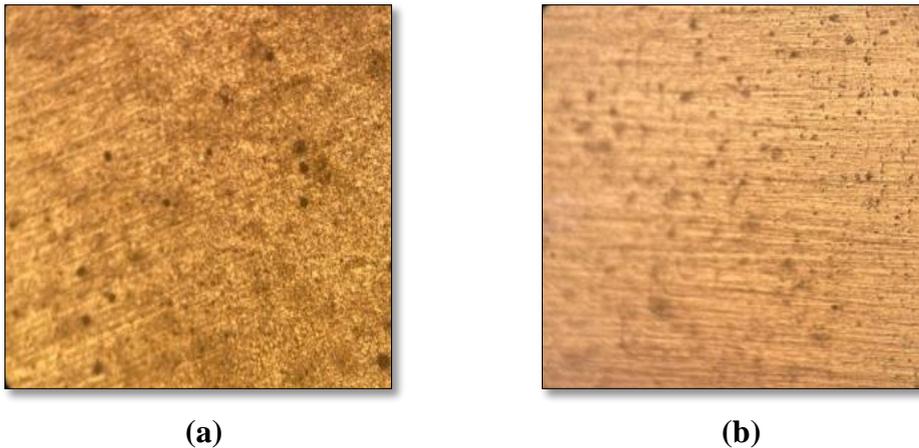


Figure III.4 : La morphologie de la corrosion par piqure par le microscope optique (X200), (a) l'acier X70, (b) joint soudé, après le test d'immersion 2 jours en milieu NaCl 3,5% à 30°C

Pour évaluer la corrosion par piqûre de l'acier après le teste d'immersion, Il était nécessaire d'enlever ou diminuer la couche de produit de corrosion pour accéder à l'acier nu Figure III.4. Les produits de corrosion ont été éliminés par un polissage de la surface par un papier grade 1200 pendant 60 secondes.

La figure III.5 représente l'aspect macroscopique de l'échantillon après enlever les produits de corrosion.

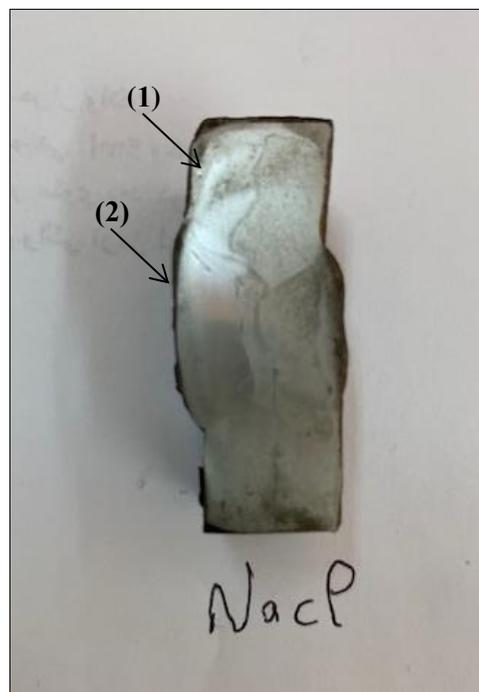


Figure III.5 : aspect macroscopique de l'acier et son joint soudé sans produits de corrosion. (1) acier X70, (2) joint soudé

On peut remarquer que la surface est uniforme, ce qui signifie que la corrosion s'effectue de manière similaire dans l'acier et son joint soudé.

Bon accord avec les essais électrochimiques.

III. 1.2 Milieu 1M et 0,5 M HCl

III.1.2.1 Courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 1M

Les courbes de polarisation anodique de l'acier X70 et son joint soudé (Figure III.6) présentent un seul domaine de potentiel. Le domaine actif, situé après E_{corr} , dans ce domaine il y a une dissolution active de l'acier selon l'équation Equ III.8. [Lan03]



Les électrons libérés par la dissolution active sont repris par les protons du milieu pour former des molécules de gaz hydrogène selon la réaction Equ III.9. [Lan03]



La cinétique de corrosion est entièrement fixée par les réactions de transfert de charge.

Le tableau III.2 regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation.

Tableau III.2 : Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 1M.

matériau	E_{corr} (mV vs. SCE)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
X70	-450	1560
Joint soudé	-453	157

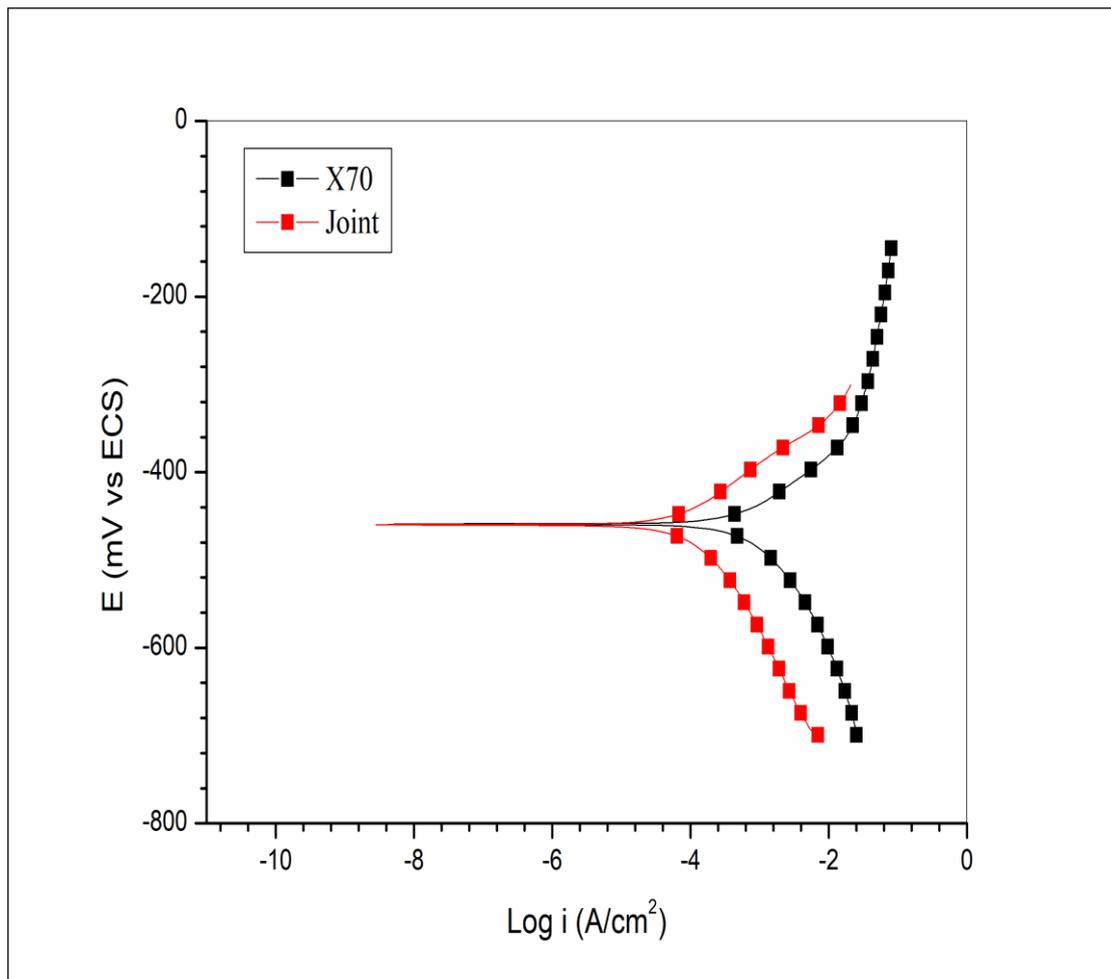


Figure III.6 : Courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 1M.

A partir du tableau III.2, on peut constater que le potentiel de corrosion de l'acier X70 et du joint soudé sont presque identiques, par contre la vitesse de corrosion de l'acier est plus grande que celle du joint soudé (figure III.6).

III.1.2.2 Analyse de la surface de l'acier X70 et son joint soudé en milieu HCl 0,5 M

On a immergé des échantillons dans un bain de solution HCl 0,5 M pendant une durée (48 heures).

La figure III.7 présente un aspect macroscopique des produits de corrosion sur la surface de l'acier X70 et son joint soudé.

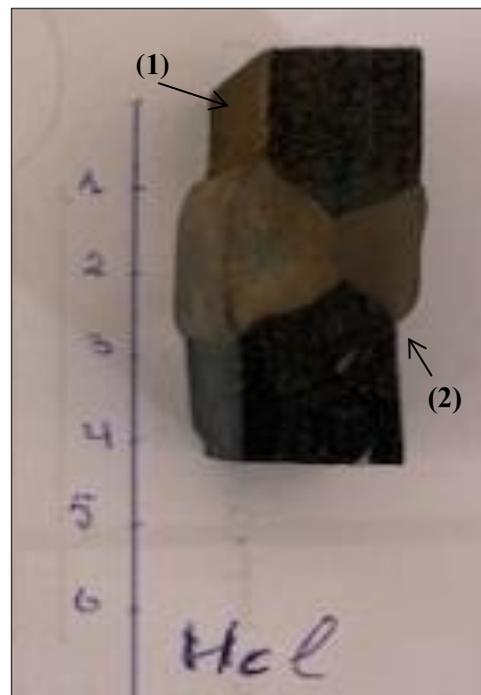


Figure III.7 : Aspect macroscopique de produits de corrosion en milieu HCl 0,5 M
(1) acier X70, (2) joint soudé

Les surfaces des échantillons immergés ont été examinées au moyen d'un microscope optique qui a permis d'exposer le contraste lumineux. La figure III.8 présente la morphologie de produit de corrosion en milieu HCl 0,5 M.

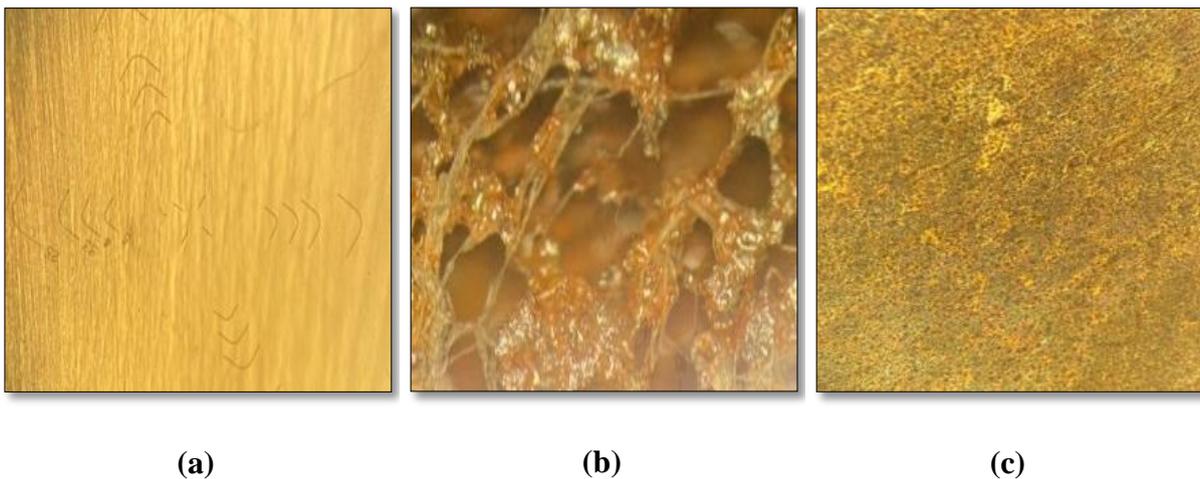


Figure III.8 : la morphologie de produit de corrosion (48 heures) de l'acier X70 et son joint soudé par le microscope optique (X200), (a) l'acier sans produit de corrosion, (b) acier API 5L X70, (c) joint soudé.

La couleur brun rouge de la surface d'acier, figure III.8 (b), (c), c'est la couleur de l'hématite.

Les zones lumineuses de Figure III.8 (b), (c), mais restent moins lumineuses que la Figure III.8 (a), représentent la corrosion généralisée, par contre les zones sombres représentent probablement la corrosion par piqûre.

Pour évaluer la corrosion par piqûre de l'acier et son joint soudé après le test d'immersion, Il était nécessaire d'enlever ou diminuer la couche de produit de corrosion pour accéder à l'acier nu Figure III.9. Les produits de corrosion ont été éliminés par un polissage de la surface par un papier grade 1200 pendant 60 secondes.

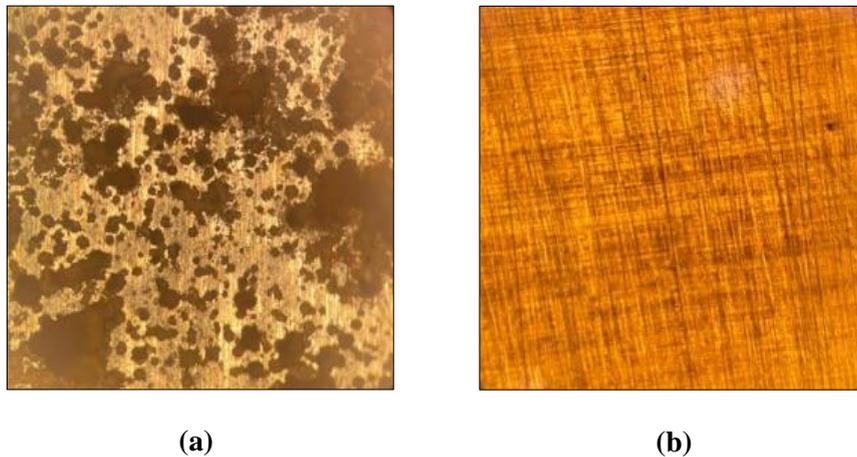


Figure III.9 : La morphologie de la corrosion par piqûre par le microscope optique (X200), (a) l'acier X70, (b) joint soudé, après le test d'immersion 48 heures en milieu HCl 0,5 M

La figure III.10 représente l'aspect macroscopique de l'échantillon après enlever les produits de corrosion

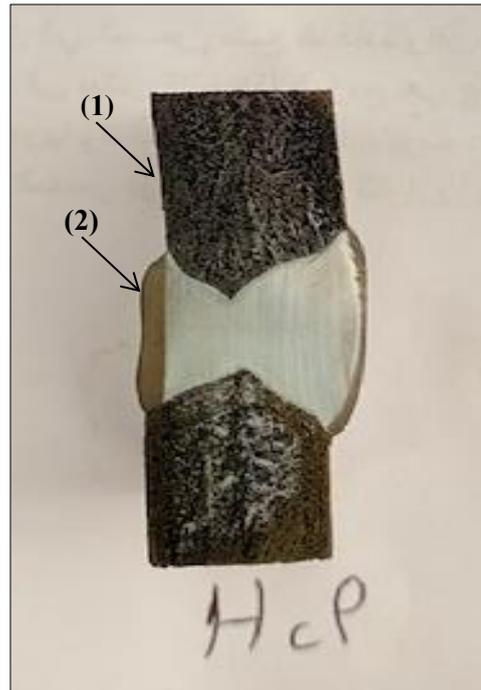


Figure III.10 : aspect macroscopique de l'acier et son joint soudé sans produits de corrosion (HCl 0,5M), (1) acier X70, (2) joint soudé.

On peut remarquer que la surface de l'acier X70 a subi une attaque très agressive tandis que la surface de joint soudé a resté intacte.

Bon accord avec les essais électrochimiques

III. 1.3 Milieu 1M et 0,5 M H₂SO₄

III.1.3.1 Courbe de polarisation potentiodynamique de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H₂SO₄ 1M

La figure III.11 représente les courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé. On peut constater que le comportement électrochimique de l'acier et le joint soudé en milieu H₂SO₄ 1 M est le même que celui en milieu HCl 1M.

Le tableau III.3 regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation

Tableau III.3 : Les valeurs des paramètres électrochimiques de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H_2SO_4 1M.

matériau	E_{corr} (mV vs. SCE)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)
X70	-502	656
Joint soudé	-490	675

A partir du tableau III.3, on peut constater que le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion de l'acier X70 sont proches de ceux de joint soudé, (figure III.11).

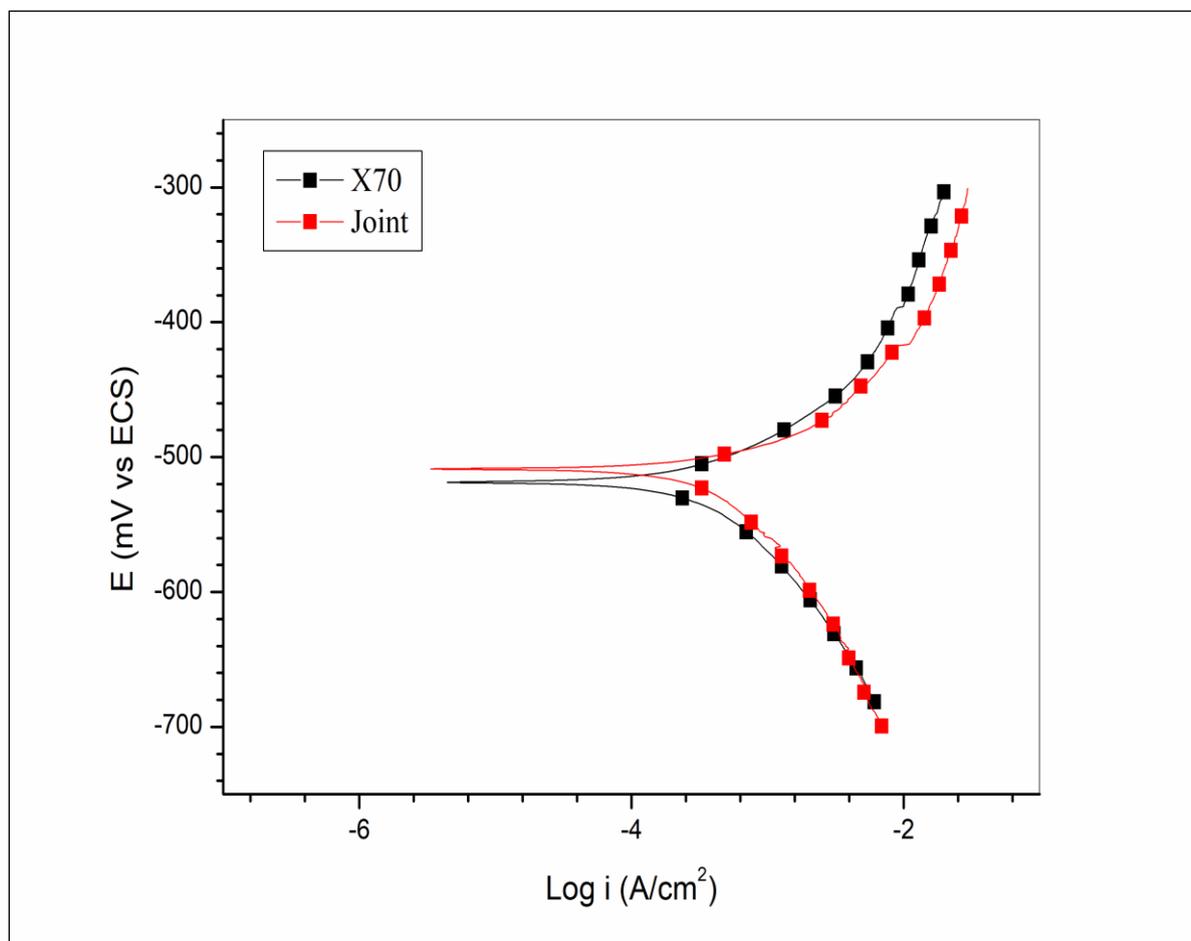


Figure III.11 : Courbes de polarisation de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H_2SO_4 1M

III.1.3.2 Analyse de la surface de l'acier X70 et son joint soudé en milieu H_2SO_4 0,5 M.

On a immergé des échantillons dans un bain de solution H_2SO_4 0.5 M pendant une durée (48 heures). La figure III.12 présente un aspect macroscopique des produits de corrosion sur la surface de l'acier X70 et son joint soudé.

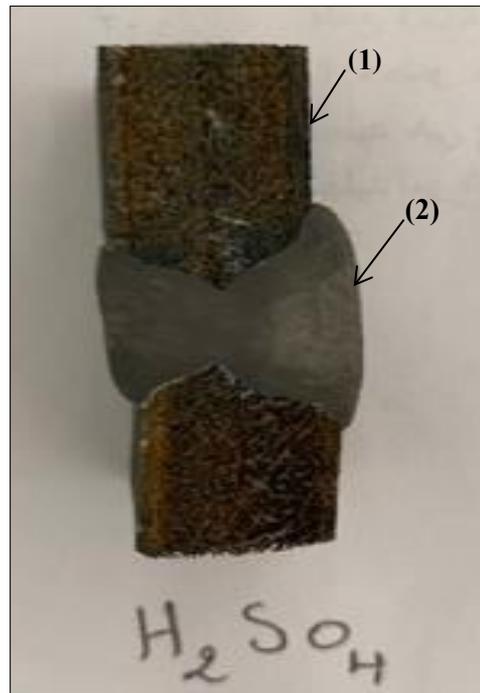


Figure III.12 : Aspect macroscopique de produits de corrosion en milieu H_2SO_4 0.5 M, (1) acier X70, (2) joint soudé.

Les surfaces des échantillons immergés ont été examinées au moyen d'un microscope optique qui a permis d'exposer le contraste lumineux. La figure III.13 présente la morphologie de produit de corrosion en milieu H_2SO_4 0.5 M.

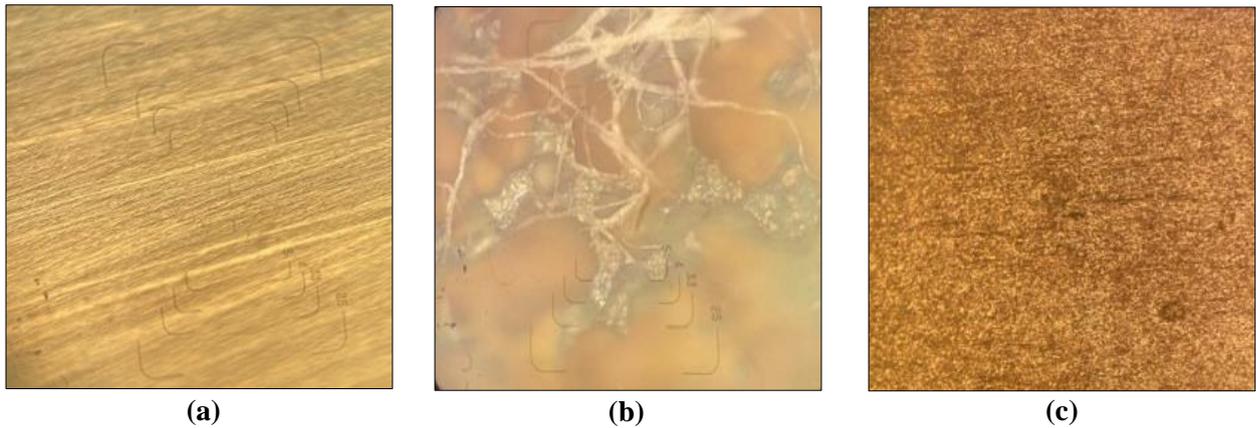


Figure III.13 : la morphologie de produit de corrosion (48 heures) de l'acier X70 et son joint soudé par le microscope optique (X200), (a) l'acier sans produit de corrosion, (b) acier X70, (c) joint soudé

Pour évaluer la corrosion par piqûre de l'acier et son joint soudé après le test d'immersion, Il était nécessaire d'enlever ou diminuer la couche de produit de corrosion pour accéder à l'acier nu Figure III.14. Les produits de corrosion ont été éliminés par un polissage de la surface par un papier grade 1200 pendant 60 secondes.

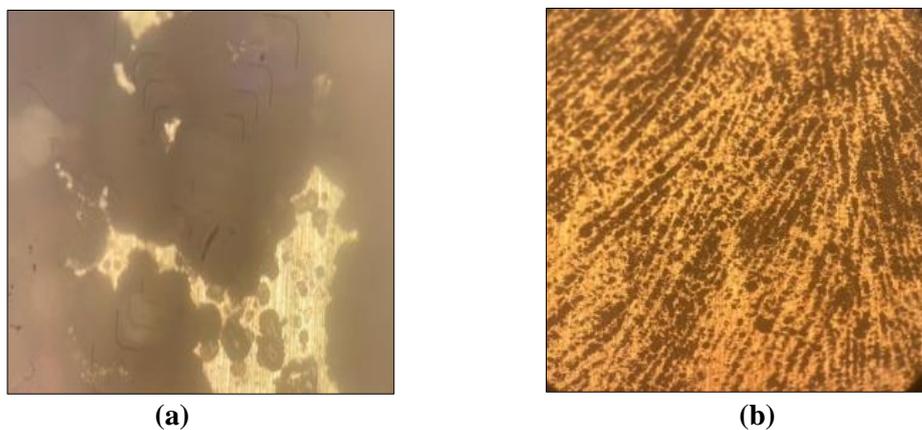


Figure III.14: La morphologie de la corrosion par piqure par le microscope optique (X200), (a) l'acier X70, (b) joint soudé, après le teste d'immersion 48 heures en milieu H_2SO_4 0.5 M.

La figure III.15 représente l'aspect macroscopique de l'échantillon après enlever les produits de corrosion.

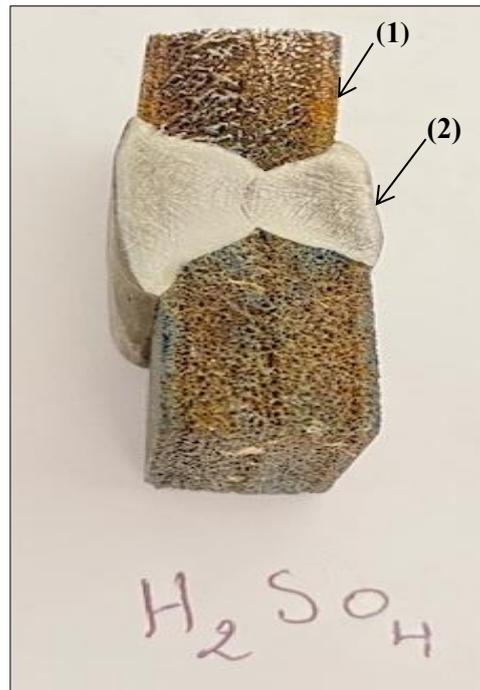


Figure III.15 : aspect macroscopique de l'acier et son joint soudé sans produits de corrosion H_2SO_4 0.5 M, (1) acier X70, (2) joint soudé.

On peut remarquer que la surface est uniforme, ce qui signifie que la corrosion s'effectue de manière similaire dans l'acier et son joint soudé. Bon accord avec les essais électrochimiques.

III.2 Contrôle des joints soudés :

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. La norme européenne EN 970 est applicable pour les assemblages soudés.

III.2.1 Examen visuel :

III.2.1.1 Exemple de joint a soudé du pipeline du projet HBH et GR7 :

La figure III.16 représente différents aspects macroscopiques d'un joint a soudé double du pipeline au niveau de la ligne du projet Hassi Bahamou HBH El Meniaa. L'examen visuel montre l'absence de défaut d'alignement de joint. Par contre, la figure III.17 (b) montre un défaut d'alignement très clair de joint soudé du projet GR7du au mal bridées de l'extrémité des pipelines qui engendre des problèmes la mise en service du gazoduc (coincement du piston en cas de la non détection et représente un point favorable à l'érosion.



Figure III.16 : Joint a soudé du pipeline « Projet HBH ».

(a)



(b)



Figure III.17 : (a) Joint a soudé du pipeline Gazoduc « Projet GR7 », (b) Défaut d'alignement

III.2.2 Résultats des radiographies

Sur l'ensemble du 190 km du pipeline au niveau de projet GR7 les résultats des radiographies à déduire mois de 3% des joints soudés pour réparation, L'interprétation des radiogrammes est une opération délicate dans le processus du contrôle de la qualité. Elle se caractérise par l'identification des indications et l'application des critères d'acceptabilité définis par les documents de référence (norme API 1104) et qui aboutissent soit au rebut si le dimension du défaut dépasse le 6% de l'épaisseur de la paroi de tube soit à l'acceptation du produit s'il est inférieur.

Elle est effectuée par un contrôleur certifié niveau II ASNT, COFREND, BANT ou équivalent, avec des équipements adaptés et en bon état (négatoscope, densitomètre...) et sur la base de procédures de contrôle approuvées.

III.2.2.3. Images Radiographiques et interprétations

Dans l'image radiographique révèle une zone localisée de densité plus sombre sur une très petite distance ou on a remarqué que l'arête est floue dans le centre de la largeur du cordon de soudure. Cela peut être plus large que la largeur même à la racine qui indique une dépression très sévère dans le centre du cordon à la racine provoquant un creux qui s'appelle fissure de cratère à la racine localisée ce type de fissure à chaud car la fissuration se produit pendant la phase de solidification et pour éviter en utilisons la technique du pas en arrière (figure III.18 (a)).

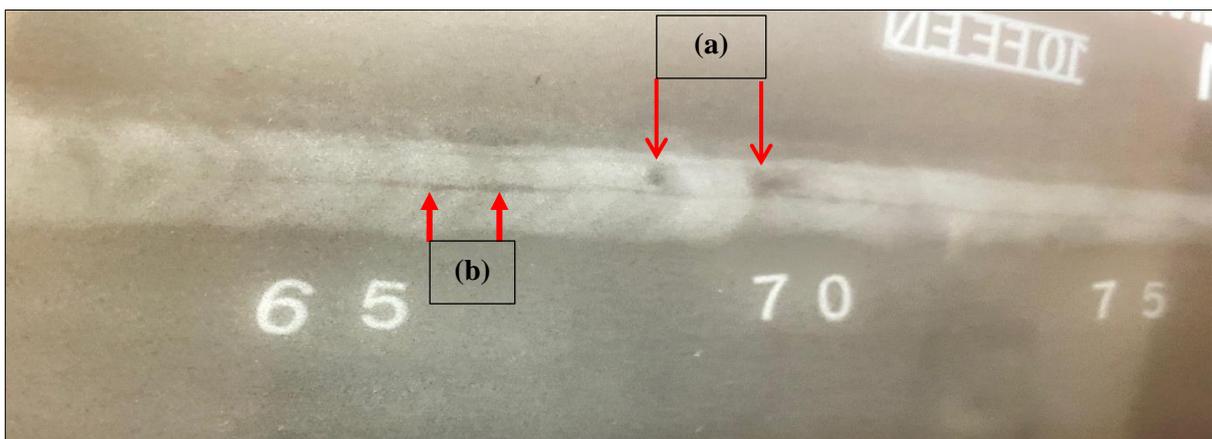


Figure III.18. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet HBH » représente Caniveaux à la racine (a) défaut de cratère à la racine localisée, (b) Inclusion de laitier

L'image radiographique révèle une ligne de densité plus sombre régulière, étroitement allongées dans le sens de longueur, qui représente des inclusions de laitier en ligné allongée se sont habituellement des impuretés non métalliques qui sont solidifiées à la surface de la soudure et qui n'ont pas correctement enlevées entre les passes (figure III.18 (b)).

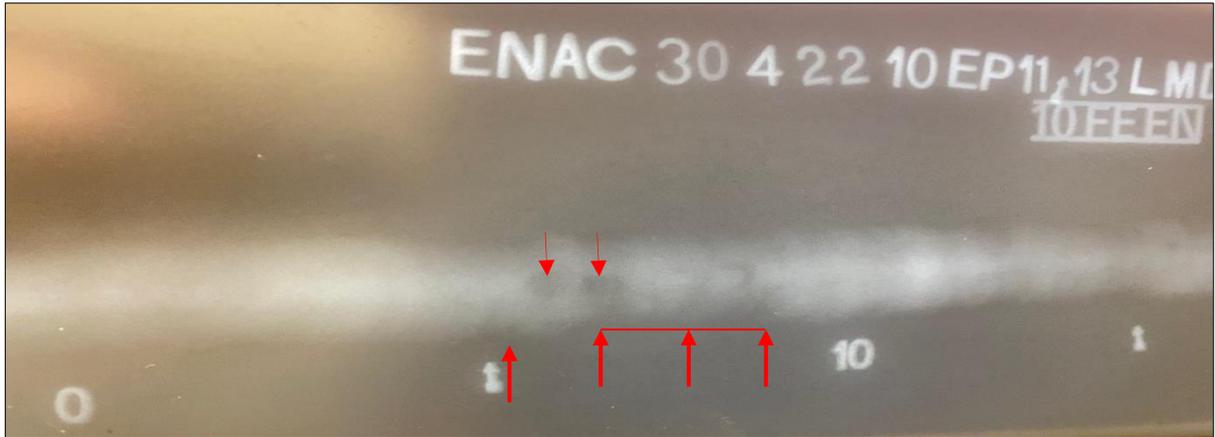


Figure III.19. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet GR7 » représente Manque de fusion

L'image radiographique de révèle la figure II.19, une ligne de densité plus sombre qui représente une zone de manque de fusion sur le long de la surface, Le manque de fusion ou collage est un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base ou entre deux couches contiguës de métal déposé due probablement au chanfrein trop étroit, mauvaise orientation des électrodes ou intensité très faible.

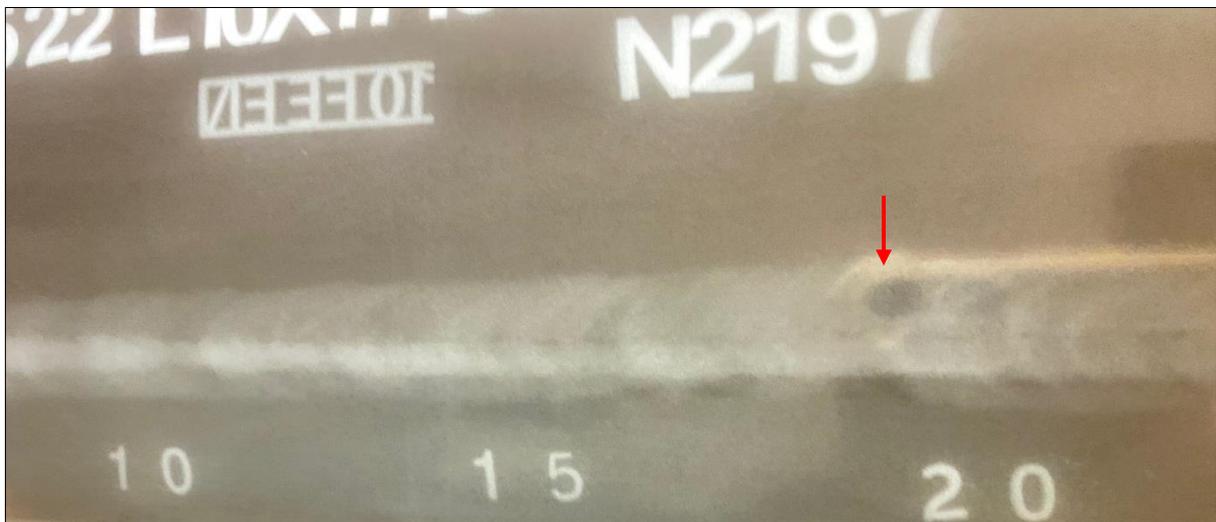
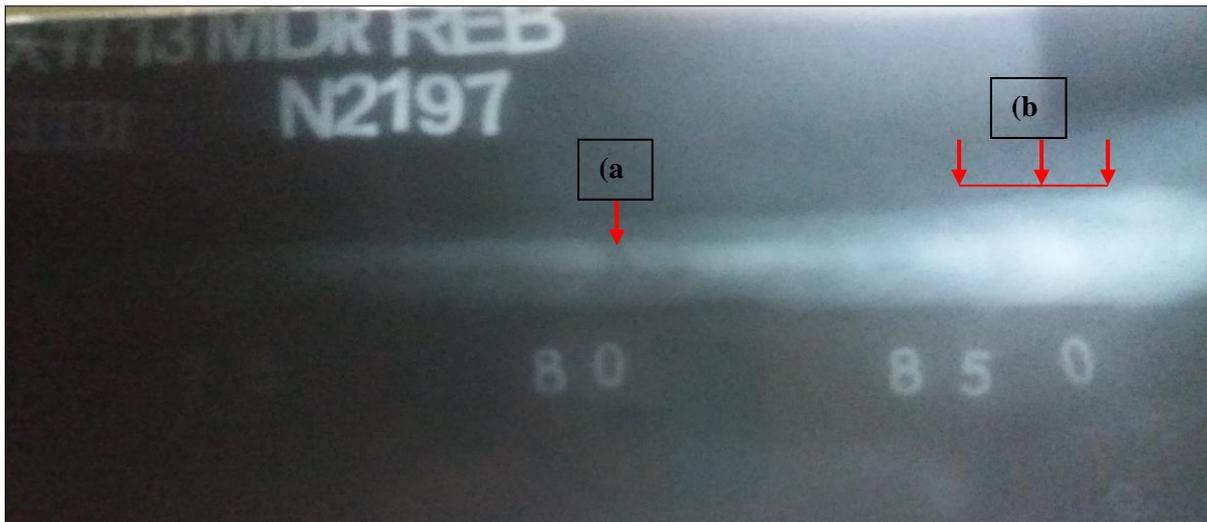


Figure III.20 : Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet GR7 » représente une soufflure isolée

Une induction sombre arrondie nette représente une soufflure isolée sur l'image radioactive de la figure III.20



**Figure III.21. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet HBH »
a. Cratère à la racine et pénétration excessive**

Cette image radiographie révèle une zones (a) de la figure III.21 ; localisée une densité plus sombre sur une petite distance avec arête flou qui indiquant à un creux sur la surface interne de cordon et une zone (b) figure III.21 ; de densité plus clair au centre de la largeur de soudure a des zones isolées et ce due à la quantité du métal d'apport à la racine du cordon excédante.



Figure III.22. Image d'un joint a soudé du pipeline « Projet GR7 » (a)Dénivellations

L'image radiographie de la figure III.22 révèle un changement abrupt de la densité du film, on remarque de façon longitudinale une zone de densité plus sombre qui représente un désalignement du tube soudé due au remplissage insuffisant à la racine du joint et probablement

à cause au laitier emprisonné dans le cordon de soudure qui affaiblit les propriétés mécaniques du joint et ce remédier par le nettoyage mécanique.

L'image radiographique de la figure III.23 révèle un bon joint de soudure



Figure III.23. Image d'un bon joint a soudé du pipeline « Projet GR7 »

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un ensemble soudé chaque joint soudé, ayant une importance propre et ,tant soumis à des sollicitations différentes mécanique et électrochimique.

L'étude de comportement électrochimique de l'acier de pipeline API 5L X70 et son joint soudé dans les différents milieux (NaCl 3,5%, HCl 1M ,0.5 et H₂SO₄ 1 M et 0,5 M).

En milieu NaCl 3,5% : La corrosion s'effectue de manière similaire dans l'acier et son joint soudé avec une vitesse de corrosion égale à 17.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour l'acier API 5L X70 et 14.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour le joint soudé. Les potentiels de corrosion sont très proches, -717 mV pour l'acier API 5L X70 et -696 mV pour le joint soudé.

En milieu HCl 1M : on peut constater que le potentiel de corrosion de l'acier X70 égale à 450 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour et 450 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ du joint soudé sont presque identiques, par contre la vitesse de corrosion de l'acier égale à 1560 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ est plus grande que celle du joint soudé 157 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$

En milieu H₂SO₄ : La corrosion s'effectue de manière similaire dans l'acier et son joint soudé avec une vitesse de corrosion égale à 656 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour l'acier X70 et 675 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour le joint soudé. Les potentiels de corrosion sont très proches, -502 mV pour l'acier X70 et -490 mV pour le joint soudé.

A partir des analyses de la surface les produits de corrosion qui se forme à la surface de l'acier API 5L X70 et son joint soudé, pour les trois milieux, est composés d'Hématite.

La corrosion uniforme et la corrosion par piqûre sont les types observés dans l'acier et son joint soudé pour les trois milieux.

On peut constater que le comportement à la corrosion du joint soudé se conforme avec l'acier API 5L X70 en milieu NaCl 3,5% et H₂SO₄ 0,1 et 0,5 M, mais il ne conforme pas en milieu HCl 1M.

Suite aux résultats des potentiels de corrosion de l'acier est plus grande que celle du joint soudé qui favorise l'effet de pile électrochimique nécessitons l'inhibition a la partie intérieur et les revêtements au partie extérieur du pipeline

Conclusion générale

La méthode de contrôle non destructif est appliquée 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. Le contrôle par la gammagraphie est une méthode technologique efficace, parmi ses propriétés, la détection d'un nombre important des irrégularités dans le matériau ou dans un assemblage comme l'indiquent les films radiographiques. Plusieurs défauts de soudage à savoir caniveaux, manque de fusion, désalignement avec la détermination des causes, ceci dépend de la performance des équipes de contrôle mais avec le respect des pratiques d'utilisation.

Suite aux résultats en conclure que l'utilisation des procédés SMAW, montre un taux de dépôt élevé, bien que ce procédé présente des défauts qui sont les inclusions de laitiers et le manque de pénétration.

Les inclusions de laitier reviennent à l'utilisation d'électrode enrobées qui favorise l'apparition, sur le joint, d'une couche de laitier qui doit être éliminée à la fin du soudage au moyen d'un marteau à piquer ou d'une brosse métallique.

Le manque de pénétration est fréquent avec électrode surtout si la forme du joint n'est pas régulière.

Références bibliographiques

- Abd18** : M. Abdellatif, ‘‘Etude comparative des différents procédés de soudage sur l’effet de fissuration à froid dans la ZAT ‘’, Mémoire de Master, Université de Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2018.
- API1104**: Standard for Welding Pipelines and Related Facilities, American Petroleum institute, Nineteenth edition, Septembre 1999.
- Bel17** : A. Belabed, ‘‘Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d’angles’’, Mémoire du Master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- Ben07** : M. K. Bencharif, ‘‘ Procédés de soudage – le soudage manuel à l’arc avec électrode enrobée ‘’, Vinçotte International Algérie, 2007.
- Ben11** : M. K. Bencharif, ‘‘Soudage –métaux d’apport’’, Cosider, Biskra, 2011.
- Ben 12** : M. Beneddeb, Etude défauts de soudage des pipelines, Mémoire de Master, université de Biskra, 2012
- Bou16** : H. Bouchelliga, ‘‘ Identification expérimentale des caractéristiques mécaniques de l’acier X70 D’ALFAPIPE ‘’, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- Bou18** : I. Bouali, Étude d’inhibiteurs de corrosion métallique à base d’ortho phosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés : synthèse, caractérisations et applications, Doctorat, l’université de Lorraine, Nancy, 2018.
- Cha05** : S. Chayoukhia, et al, ‘‘ Approche entité préparation pour la génération de gamme de fabrication des pièces à souder’’, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes, Septembre 2005.
- Deb18** : A. Debabi, ‘‘ Etude des caractéristiques mécaniques d’un joint de soudure après application d’un traitement thermique ‘’, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M’SILA, 2018.
- Dum96** : J. DUMONT-FILLON, Contrôle non destructif CND, Site technique –ingénieur, janvier 1996.
- Ena19** : ENAC, consignes de radioprotection, FOR-SMI-DEN-12, 2019.
- Gui13** : J. C. Guichard, La soudure à l’arc électrique : des principes aux applications, groupe Eyrolles, décembre 2013.

Références bibliographiques

- Gui06** : J. C. Guichard, Soudage et assemblage, Groupe eyrolles, 2006
- Kha14** : A. KHADRAOUI, extraction et pouvoir bio inhibiteur de substances naturelles d'origine végétale vis avis de la corrosion acide de l'acier, doctorat, université de saad dahleb Blida, 2014.
- Mat14** : J. Maton, Technologie de soudage, Editeur Jean Maton, édition 2014
- Méc00** : Mécano soudage : Fabrication, Edition CETIM, Mars 2000.
- Méc97** : Mécano soudage : Conception, Edition CETIM, Août1997.
- Lan03** : D. Landolt et chimie de surfaces des métaux, Presses polytechniques et Universitaires Romande, premier édition 1993, réimpression corrigée 2003.
- LAF08** : M. LAFON, S. TONNOIR, A. BERTHOZ, G. THIBAUT, "Analyse de la préparation et de la réalisation des tirs radiographiques pour le contrôle non destructif des soudures en Centre Nucléaire de Production d'Électricité sous l'angle de la cognition spatiale", Radioprotection – Vol. 43 – EDP Sciences, 2008.
- Lav91** : L. Lavigue, Evaluation d'essais de corrosion réalisés en laboratoire et un épurateur humide, maîtrise en ressources, université du QUEBEC, Juin 1991.
- Tou12** : M. Touboul. Étude du comportement mécanique à chaud de l'acier P91 : vers la compréhension du rôle des mécanismes intra/inter granulaires sur la tenue en fluage. Application aux structures soudées. Thèse de doctorat. Ecole Doctorale Sciences des Métiers de l'Ingénieur SMI (Paris). 2012.
- Twi08** : TWI, "Section15 : Welding Consumables", Senior Welding Inspection, 2008.

Résumé

ملخص

جودة لحام فولاذ أنابيب نقل البترول (API 5L X70) من خلال اللحام بالقطب المطلي اليدوي تتم عملية الدراسة عن طريق الاختبار الغير متلف، باستعمال إشعاع غاما لأجل معرفة الخلل ومعالجة الأسباب وفي نفس الوقت دراسته، بغمسه في عدة محاليل (كلور الصوديوم، حمض الكلور وحمض الكبريت) و بواسطة طريقة الاستقطاب الديناميكي الفعال وتحليل بنية السطح بالمجهر الضوئي ليتبين استقرار لحام المفصل مع الفولاذ في محلول كلور الصوديوم وحمض الكبريت بينما هناك تغير كبير في شدة التآكل في حمض الكلور.

Résumé

La qualité de soudage de l'acier API 5L X70 par la procédés SMAW est étudiées au moyen d'essai non destructif, la gammagraphie afin de détecté les défauts et déduire les raisons, et en même temps étudier l'effet de différente solutions (solution NaCl, acide chlorhydrique et sulfurique) par la méthode de polarisation potentiodynamique et l'analyse de la morphologie de surface (microscope optique). Les résultats montrent qu'il y a une conformité entre l'acier et le joint soudé dans la solution de NaCl et l'acide sulfurique. Par contre, dans l'acide chlorhydrique, il y a une grande différence de potentiel de corrosion.

Mot clé : Joint soudé ; API 5L X70 ; courbe de polarisation ; corrosion ; HCl ; solution NaCl ; acide sulfurique, radioactive, gammagraphie.

Abstract

The welding quality of API 5L X70 steel by the SMAW process is studied by means of non-destructive testing, gammagraphy to detect faults and deduce the reasons and the same time study the effect of different solutions (NaCl, HCl, H₂SO₄) by the microscope, the results show that there is conformity between the steel and welded joint in the solutions of NaCl and H₂SO₄ but in HCl solution a large difference in corrosion potential.