

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université AMAR TELIDJI Laghouat

Faculté Technologie

Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE De Fin D'études

Pour obtenir le diplôme de **MASTER** en Génie Mécanique

OPTION : Génie Des Matériaux

Présenté par

BOUSSALMI Mansour

LAGOUNE Benyoucef

Thème:

**MODELISATION ET OPTIMISATION DES PARAMETRES DE LA
CORROSION D'UN CORDON DE SOUDURE ACIER X60 PAR PLAN
D'EXPERIENCE BOX-BEHNKEN**

MAATI Ahmed

Pr

President

ZIDELMEL Sami

MCA

Examinateur

B. BENSMAIN Belkacem

MCB

Encadreur

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu, le Tout Puissant de nous avoir dotés de courage, de force et de capacité nécessaire pour réaliser ce mémoire.

Nous tenons à exprimer nos profonds remerciements À notre encadreur **Belkasm bensmain** pour tous les efforts fournis afin de mener à terme notre mémoire. pour ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail,

veuillez recevoir l'expression de notre profonde gratitude et de nos sincères remerciements.

Pour son patience, son compréhension et pour tout le temps qu'il m'a consacré pour la réalisation de ce travail. Nous Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury, qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Nous remercions l'ensemble des enseignants du département génie mécanique

Nos remerciements pour l'équipe laboratoire mécanique. Nos remerciements pour l'équipe laboratoire mécanique.

Mes remerciements les plus sincères pour toute l'équipe pédagogique de lépartement mécanique YOUCEFI Ahmed et HADJ AISSA Aissa.

Dédicace

A la prunelle de mes yeux et au pilier de la maison, ma chère
mère

Celle qui m'a procuré le gout de la vie et la sens

À tous ceux qui m'ont aidé à m'apprendre une lettre dans cette
vie

A toute ma famille, grande et petite

À tout ce qui m'a aidé à réussir mon parcours universitaire

A tous ceux qui m'ont appris une lettre dans cette vie

De la responsabilité.....Grand merci à ma MERE

qui reste toujours dans mon cœur.

Celui qui a été toujours la source d'inspiration

Et de courage

A toute ma famille, grande et petite

A Censemble de Mes Amies

A tout ceux qui sont présents dans le cour et absents dans

Les lignes..

A toute la promotion 2021/2022 de Département

Génie Mécanique

A Tout ce qui m'a aidé à réussir mon parcours universitaire

Liste Des Figure

Chapitre I

Figure I.1	Acier micro allié ferrito-perlitique.	5
Figure I. 2	Microstructures d'un acier ferritique,(F : ferrite allotriomorphe, P : perlite, FA : ferrite aciculaire).	6
Figure I.3	Micrographie d'un acier Dual Phas .	6
Figure I.4	Durcissement par solution solide .	11

Chapitre II

Figure II.1	illustration du déroulement de l'opération de soudage.	19
Figure II.2	Circuit électrique pour le soudage à l'arc.	21
figure II.3	Principe de soudage.	21
Figure II.4	Soudage à l'arc avec électrode enrobée.	22
Figure II .5	Les différentes zones d'un assemblage soudé	24
Figure II.6	Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé.	25
Figure II.7	Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux , Fissure Amorces d'arc).	26

Chapitre III

Figure.III.1	tube en acier pour le transport de carburant et de gaz	29
Figure.III.2	joint bout à bout normal avec un chanfrein en V	31
Figure.III.3	poste de soudure SONATRACH	32
Figure.III.4	Four pour les électro des SONATRACH	32
Figure.III.5	procédure de soudage	32
Figure.III.6	photo électrode enrobe	32
Figure III.7	Soudage de deux échantillons de tubes	33
Figure III.8	Photos de pipeline avant decoupage	33
Figure III.9	Plaque de pipeline X60 avec soudure	33
Figure III.10	Scie mécanique	34

Figure III.11	cordon soudure d'acier X60	34
Figure III.12	Echantillons découper par une tronçonneuse	35
Figure III.13	les pièces avant finition polissage	35
Figure III.14	Les pièces sont finies par polissage	36
Figure III.15	Les électrodes de travaux	37
Figure III.16	Dispositif Expérimental de la technique potentiostatique	38
Figure III.17	Courbe $\log I =f(E)$ et les droites de Tafel	39
Figure III.18	Domaine de variation du facteur	40
Figure III.19	Effet d'un facteur	40
Figure III.20	L'ensemble des réponses qui correspondent à tous les points du domaine d'étude Forme la surface de réponse	41
Figure III.21	plan de Box-Behnken pour trois facteurs	43

Chapitre IV

Figure IV .1	Courbe de polarisation de l'échantillon à (C=1.5 g/mol)	46
Figure IV. 2	Courbe de polarisation de l'échantillon à (C=1.5 g/mol)	47
Figure IV. 3	Courbe de polarisation de l'échantillon à (C=2.5g/mol)	48
Figure IV.4	Histogramme des coefficients d'effet	52
Figure IV.5	Courbe des vitesses de corrosion expérimentale, théorique	54
Figure IV.6	Histogramme des vitesses de corrosion expérimental, théorique et résidu	54
Figure IV.7	Courbes d'interaction	56
Figure IV.8	Courbe iso-réponse montrant l'influence de la vitesse	57
Figure IV.9	Courbe de profileur de surface des interactions	58

Liste Des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1	Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés).	10
Tableau I.2	Composition chimique % (Tubes de conduite PSL2 soudés).	10
Tableau I.3	Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1).	10
Tableau I.4	Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2).	11
Tableau I.5	Les facteurs de la corrosion .	17

Chapitre II

Tableau II.1	Des différents types de soudage.	20
Tableau II .2	Données sur la soudabilité en fonction du carbone equivalent.	23

Chapitre III

Tableau III.1	Composition chimique de l'acier API5L X 60 (proportions massiques en %)	30
Tableau III.1.2	Différents types des plans d'expériences	42

Chapitre IV

Tableau IV .1	Représentation des paramètres opératoire de l'essai de corrosion	45
TableauIV.2	Rèsume les résultats obtenus de la Courbe de polarisation des échantillons étudié	49
Tableau IV.3	Représente le domaine étudié pour la corrosion du cordon de soudure par l'acide sulfurique.	50
Tableau IV.4	Matrice des expériences du plan factoriel complet.	51
Tableau IV.5	Les résultats des coefficients obtenus de modèle	52
Tableau IV.6	Résultats obtenus des vitesses de corrosion expérimental, théorique et résidu.	53
Tableau IV.7	Valeurs des paramètres optimaux codés	59

Remerciement
Dédicace
Liste des figures
Liste des tableaux
Sommaire

Introduction Générale1

Chapitre I : Les aciers et corrosion

I.1. Types d'acier :.....3

I.2. Les aciers à haute limite élastique(HLE) :.....3

I.3. Classification des aciers HLE :.....4

I.3.1. Aciers résistants à la corrosion :.....4

I.3.2. Aciers micro-alliés ferrito-perlitique:.....4

I.3.3.Aciers La minés à Structure perlitique :.....5

I .3.4.Aciers à Ferrite Aciculaire (bainite à bas carbone):.....5

I.3.5. Aciers du al-phase :.....6

I.3.6. Aciers à Forme d'inclusion Contrôlés :.....7

I.4. Propriétés des aciers HLE :.....7

I.4.1Éléments de micro alliage :.....7

I.4.2. composés : carbures, nutrure, oxydes :.....8

I.4.3.Précipitation :.....9

I.5.Facteurs métallurgiques - propriétés des tubes:.....9

I.6.Applications des aciers HLE :.....12

I .6.1.Fabrication des pipelines12

I.6.2Application d'automobile :.....12

I.7. La corrosion des aciers :.....13

I.8. Définition de la corrosion :.....13

I.9.Aspect économique de la corrosion :.....13

I.10.Réaction de corrosion :.....13

I.11.Différents types de corrosion :.....14

I.11.1. Corrosion électrochimique (humide) :.....	14
I.11.2. Corrosion chimique (sèche) :.....	14
I.12. Aspect morphologique de la corrosion :.....	14
I.12.1. Corrosion généralisée:.....	14
I.12.2. Corrosion localisée (zonale) :.....	14
I.12.2.1. La Corrosion par piqûres :.....	15
I.12.2.2. La corrosion galvanique:.....	15
I.12.2.3. Corrosion cavernueuse:.....	15
I.12.2.4. Corrosion érosion :.....	15
I.12.2.5. La corrosion électrolytique:.....	15
I.12.2.6. Corrosion intergranulaire:.....	15
I.12.2.7. Corrosion frottement (tribocorrosion).....	16
I.12.2.8. La corrosion sous contrainte:.....	16
I.13. Mécanismes de corrosion électrochimique :.....	16
I.14. Les facteurs de la corrosion :.....	16
I.9. Vitesse de corrosion:.....	18

Chapitre II : procédés de Soudage

II.1. Définition du soudage :.....	19
II.2. Classification de procédés de soudages :.....	19
II 2.1. Soudage à l'arc électrique :.....	20
II 2.1.1. Principe du soudage à l'Arc et notion d'électricité :.....	20
II.2.1.2. Le soudage à l'arc avec électrode enrobée :.....	21
II.3. Soudabilité et notion de carbone équivalent :.....	23
II.4. Les différentes zones d'un assemblage soudé :.....	23
II.4.1. Le métal de base MB (en fonction de leurs compositions chimiques) :.....	24
II. 4.2. La zone fondue (ZF) :.....	24
II.4.3 Zone affectée thermiquement (ZAT) :.....	24
II.4.4. Zone de liaison (ZL) :.....	24
II .5. Aspects métallurgiques du soudage de l'acier :.....	24
II.6. Défaut de soudage :.....	25

II.7. Contrôle des soudures :	26
II.7.1. Contrôle avant soudage :	26
II.7.2. Contrôle pendant le soudage :	26
II.7.3. Contrôle après le soudage :	27
II.7.3.1. Contrôle destructif :	27
II.7.3.2. Contrôle semi destructif :	27
II.7.3.3. Contrôle non destructifs :	27
II.7.3.4. Contrôle visuel :	27
II.7.3.5. Contrôle radiographique :	28

Chapitre III : Techniques Expérimentale Et Modélisation

III.1. Protocole expérimentales :	29
III.2. Présentation de matériaux :	29
III.3. Présentation de l'assemblage soude :	29
III.3.1. Matériaux étudiés :	29
III.3.2. Composition chimique des matériaux :	30
III.4. Opération de soudage :	31
III.4.1. Préparation des joints :	31
III.4.2. Exécution du soudage :	32
III.5. Découpage de pièce de pipeline :	33
III.5.1. Préparation des échantillons :	34
III.5.2. Découpage :	34
III.6. Échantillons de soudure avec de fil conducteur :	35
III.7. Polissage les pièces (échantillons) :	36
III.8. Etude électrochimique :	36
III.8.1. Préparation les échantillons pour l'essai de corrosion :	36
III.9. Les paramètres influant sur la corrosion :	36
III.9.1 Analyse électrochimique :	37
III.9.1.1 Essais Potentiostatiques :	37

III.9.1.2.Mesure du potentiel libre :.....	39
III.9.1.3.Choix de la vitesse de balayage :.....	39
III.9.1.4.Condition de polarisation :.....	39
III.10.Modélisation mathématique des résultats :.....	39
III.11.Généralités sur la méthode des plans d'expériences :.....	40
III.12.Surfaces de réponse :	41
III.13.Modélisation :.....	41
III.13.1.Types des plans d'expériences :.....	42
III.13.2.Plansfactorielscomplets 2^k :.....	42
III.14.Plans de Box-Behnken :.....	43
III.14.1.Modèle mathématique postulé :.....	43

Chapitre IV Résultats et discussions

IV .1. Courbe de polarisation :.....	44
IV.2.Modélisation :.....	49
IV.2.1. Facteurs étudiés et domaines de variation :	50
IV.2.2.Plan d'expérimentation et résultats expérimentaux :	50
IV.2.3. Analyse statistique des résultats :.....	52
IV.2.4. Résultats de calculs :	53
IV.2.5. Analyse et validation du modèle:.....	54
IV.2.6. Résolution de modèle :.....	55
IV.2.7. Optimisation :	56
IV.3. Conclusion générale :.....	60

Introduction

Générale

Les avancées de la recherche scientifique ont de multiples répercussions sur les techniques de production industrielle de l'ère actuelle à plus grande échelle, comme c'est le cas en mécanique, en chimie ou en électricité. Elle repose sur l'exploitation des matières minérales dans tous les secteurs car nous en avons besoin dans les transports, le bâtiment, la santé, l'industrie, et même l'alimentation...etc.

Parmi ces minéraux, nous trouvons le fer, qui est considéré comme l'un des minéraux importants et basiques qui est converti en fer solide ou ce qu'on appelle l'acier, qui est un alliage métallique composé de fer et de faibles pourcentages d'autres éléments tels que le carbone, le cuivre, manganèse ... etc.) Toutes les industries et applications en dépendent en pourcentage Grand, en raison de son abondance, de son faible coût, de sa forte durabilité et de sa capacité à former, assembler, installer, modifier et entretenir.

Suffisamment de sources d'énergie différentes sont utilisées pour fondre le métal et connecter les conduites de gaz et les conduites entre elles grâce à différentes techniques de soudage, ce qui peut être utilisé dans l'industrie.

Mais ce la n'en lève rien au fait qu'il s'agit du matériau le plus sensible au phénomène de corrosion des métaux, il s'agit d'une réaction électrochimique (oxydation), les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu liquide ou gazeux agressif, donc le phénomène de corrosion est un problème de surface ou, plus précisément, problème d'interface entre un métal et un milieu liquide ou envahisseur agressif ; Comme mentionné précédemment, le processus de corrosion endommage les matériaux métalliques. Ce qui est un phénomène naturel dangereux et irréversible qui n'exclut aucun matériau des dommages ou de l'usure, mais comprendre la cause de ce problème et la façon dont il se produit aidera à trouver des solutions scientifiques et à l'empêcher de s'éroder.

Du point de vue électrochimique ce sont des zones très corrodables et du point de vue mécanique ce sont des zones fragilisées par la modification structurelle et l'introduction des contraintes mécanique,

Ce phénomène a acquis une grande importance aujourd'hui, compte tenu de l'utilisation croissante des métaux et des alliages dans la vie moderne. L'aspect du métal et le fonctionnement du milieu déterminent les types et les formes de corrosion .

Les aciers à haute limite élastique étaient utilisés pour le transport des gaz et de pétrole, l'industrie de la mécanique lourde et les réservoirs à pression. Dans le secteur de l'industrie automobile, les aciers modernes HLE se sont déjà pleinement imposés et procurent un intérêt croissant dans les secteurs de la construction navale, l'outillage, l'échafaudage et font maintenant leur entrée dans le domaine des chemins de fer. Ces aciers micro alliés au niobium, vanadium et titane obtenus par laminage à chaud peuvent être durcis par des traitements ultérieurs à savoir le vieillissement, la normalisation et la trempe suivie d'un revenu à haute température (amélioration).

L'objectif de notre travail c'est une contribution à la caractérisation du cordon de soudure et l'acier API 5L-X60 qui est très utilisé dans les installations de transport et stockage des hydrocarbures, ces dernières qui sont souvent dans un milieu chimiquement agressifs et sous contraintes mécaniques élevées.

➤ Notre travail est subdivisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités des aciers haute limite élastique et la dégradation des aciers.
- Le deuxième chapitre sera réservé aux procédés de soudage, en particulier le soudage à l'arc (soudage de pipeline).
- Le troisième chapitre est réservé aux techniques et protocoles expérimentaux utilisés.
- Le quatrième chapitre est exclusivement réservé à la partie expérimentale qui comprend l'étude électrochimique de cordon de soudure à l'acide sulfurique, l'étude de l'influence de certains paramètres influant sur la corrosion, modélisation des résultats expérimentaux et optimisation pour déterminer les conditions optimales. Pour terminer avec une conclusion générale.

Chapitre I

Les aciers et Corrosion

Les aciers sont d'une importance capitale, puisqu'on les retrouve quasiment dans tous les domaines. Ils sont à l'origine de toutes les révolutions scientifiques et industrielles. Ce progrès est essentiellement dû à la présence d'une gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers en recourant à l'addition d'éléments d'alliage et aux différents traitements mécaniques, thermiques et techniques. Parmi les causes de rupture, on peut citer : les défauts de fabrication des tubes qui renferment les imperfections des cordons de soudure d'usine, des joints de soudure des tubes effectués aux stations de double-jointing et sur le tracé, endommagement des tubes durant le transport et la construction, surcharge des conduites due à différents types d'écart par rapport à l'exigence du projet, surcharge des tubes due à des surcharges imprévues, corrosion, violation des régimes d'exploitation de la conduite et autres. [1]

I.1. Types d'aciers

Les aciers sont classés en quatre catégories principales selon la norme européenne EN 10027:

- Les aciers non-alliés d'usage général (construction), dits « aciers à ferronnerie ».
- Les aciers non-alliés spéciaux: sont utilisés pour les traitements thermiques, malléables, soudables, forgeables,...
- Les aciers faiblement alliés: ce sont des aciers pour traitements thermiques (dans la teneur de chaque élément d'addition est <5% et <1% pour le Mn). les éléments d'alliage favorisent la trempabilité et permettent d'avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, et les roulements, ...etc.
- Les aciers fortement alliés :
- Les aciers inoxydables.
- Les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les foreuses. [2]

I.2. Les aciers à haute limite élastique (HLE)

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HLE) sont un groupe d'aciers à faible teneur en carbone qui utilisent un peu d'éléments d'alliage pour atteindre les limites d'élasticité plus supérieures à 275MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone graphite lamellaire. D'ailleurs, la haute limite élastique des aciers HLE peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HLE est comparable ou meilleure à celle des aciers doux. [3]

I .3.Classification des aciers HLE

Les aciers (HLE) incluent un grand nombre de nuances standards et sont conçus pour fournir des combinaisons spécifiques de propriétés telles que la résistance, la ténacité, la formabilité, la soudabilité et la résistance à la corrosion a atmosphérique.

Ces aciers ne sont pas considérés comme des aciers alliés, bien que leurs propriétés désirées soient accomplies par l'usage de petites additions d'alliages. Au lieu de cela, ils sont classés comme une catégorie d'acier séparée, qui est semblable à l'acier au carbone doux laminé, avec des propriétés mécaniques rehaussées obtenues par de judicieuses (petites) additions d'alliages et des techniques de traitement spéciales tel que le laminage contrôlé.[4]

I .3.1.Aciers résistants à la corrosion

Les premiers aciers HLE développés étaient les aciers résistants à la corrosion. Ces aciers contiennent de cuivre et d'autres éléments qui augmentent la résistance à la Corrosion, le durcissement de la solution-solide, et un certain affinement de grain de la microstructure de ferrite. [4]

I .3.2.Aciers micro-alliés ferrito-perlitique

Ces aciers emploient des additions des éléments de micro-alliage tels que le niobium et le vanadium pour augmenter la limite d'élasticité d'acier laminé à chaud sans teneur élevée de carbone et/ou de manganèse. Les propriétés des matériaux structuraux ont résulté de la découverte d'une très petite quantité de niobium et de vanadium (<0.10%) renforcent les aciers de carbone-manganèse sans interférer le traitement suivant. La teneur de carbone a pu être réduite ainsi pour améliorer la soudabilité et la dureté parce que les effets de durcissement du niobium et du vanadium ont compensé la réduction de la dureté en raison de la réduction du taux de carbone.

Les différents types d'aciers micro-alliés ferrito-perlitique incluent:

- Aciers micro-alliés au vanadium
- Aciers micro-alliés au niobium
- Aciers micro-alliés au niobium-molybdène
- Aciers micro-alliés au vanadium-niobium
- Aciers micro-alliés au Vanadium-azote

- Aciers micro-alliés au titane
- Aciers micro-alliés au Niobium-titane
- Aciers micro-alliés au Vanadium-titane

Ces aciers peuvent également inclure d'autres éléments pour la résistance à la corrosion et le durcissement de la solution solide, ou augmenter la trempabilité (si des produits de transformation autres que la ferrite-perlite sont désirés) [5]

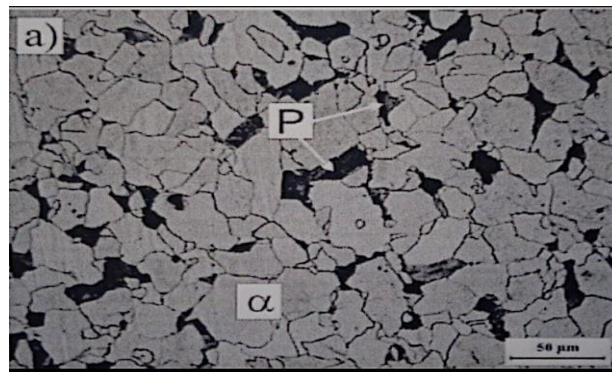


Figure I.1. Acier micro allié ferrito-perlitique. [5]

I .3.3. Aciers La minés à Structure Perlitique:

Les aciers Perlitique de construction laminés sont un groupe spécifique d'aciers HLE ayant des propriétés mécaniques augmentés (dans certains cas, la résistance à la corrosion atmosphérique) sont obtenus par l'addition des quantités modérées d'un ou plusieurs éléments de micro-alliage autres que le carbone. Certains de ces aciers sont des aciers de carbone manganèse et diffèrent des aciers au carbone ordinaires seulement en ayant un plus grand contenu de manganèse jusqu'à 19%. [6]

I .3.4. Aciers à Ferrite Aciculaire (bainite à bas carbone)

Une autre approche au développement des aciers HLE est d'obtenir une microstructure de ferrite aciculaire très forte de haute résistance, lieu de la microstructure polygonale habituelle de ferrite, pendant la transformation de refroidissement des aciers à ultra bas carbone (<0.08% C) avec la trempabilité suffisante (par des additions de manganèse, de molybdène, et/ou de bore). Le niobium peut également être employé pour le durcissement par précipitation et l'affinement des grains, dont la des grains c'est une fonction de limite élastique dépend fortement de la taille moyenne des grains. [7]

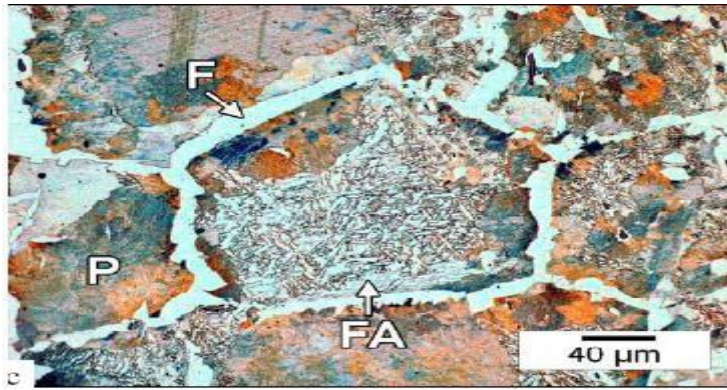


Figure I. 2.Microstructures d'un acier ferritique,(F : ferrite allotriomorphe, P : perlite, FA : ferrite aciculaire). [7]

I.3.5.Aciers dual-phase

Ces aciers ont une microstructure de ferrite polygonale (de 80 à 90%) et des îles de martensite de 10 à 20% dispersées dans toute la matrice de ferrite. le terme de duale phase se rapportent à la prédominance dans la microstructure de deux phases, la ferrite et la martensite. Ces aciers ont une basse limite d'élasticité et une résistance à la traction approximativement de 550 MPa. Les aciers Dual-phase peuvent être produits à partir des aciers à faible teneur en carbone de trois manières:

- ❖ L'austénitisation des aciers de carbone-manganèse a suivi du refroidissement rapide.
- ❖ un laminage à chaud avec des éléments favorisant la formation de ferrite (élément deoxygène) tels que le silicium et les éléments qui retardent la transformation (austénite-ferrite) tels que le chrome, le manganèse, et/ou le molybdène.
- ❖ Le recuit continu de l'acier laminé à froid de carbone-manganèse a suivi de trempage et adoucissement .[8]

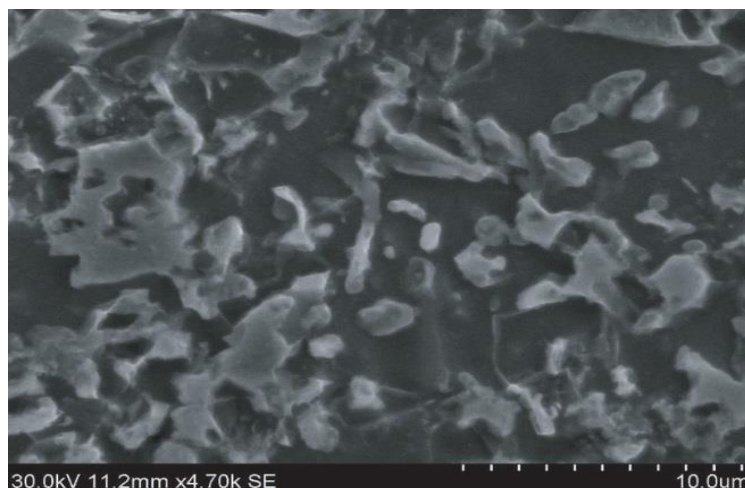


Figure I.3. Micrographie d'un acier Dual Phase.[8]

I .3.6.Aciers à Forme d'inclusion Contrôlés

Un développement important dans les aciers (HLE) micro alliés est l'utilisation du contrôle de la forme d'inclusion. Les inclusions de sulfure, qui sont plastiques aux températures de laminage et ainsi s'allongent et aplatissent pendant le laminage, affectent défavorablement la ductilité dans (par l'épaisseur) la direction transversale courte. L'objectif principal du contrôle de la forme d'inclusion est de produire des inclusions de sulfure avec la plasticité négligeable même aux températures de laminage les plus élevées .[9]

I .4.Propriétés des aciers HLE :

I.4.1.Éléments de micro alliage :

Dans le cas des aciers faiblement alliés, pour une teneur inférieure à 0,1 % C les effets des éléments métalliques en solution solide homogène sont considérés comme très faibles. Dans le cas du micro alliage, la formation de composés très fins et très nombreux modifie considérablement les microstructures et les propriétés.[10]

Les éléments principaux de micro-alliage sont:

1. Le titane.

2. le niobium.

3. le vanadium.

Le mode d'action des trois éléments retenus passe par les phénomènes de précipitation, mais avec des interactions avec les phénomènes métallurgiques de transformation de phase, de recristallisation après écrouissage à chaud ou à froid et de blocage des mouvements des joints de grain ou des dislocations .[10]

a-Titane

Élément d'addition bien connu pour désoxyder, dé nitrurer ou fixer l'azote, le titane étant réputé délicat à utiliser en raison de la formation de précipités grossiers, cubiques, très durs (surtout de nitrures, mais aussi des oxy-carbo-sulfures) très néfastes pour la ductilité, la ténacité, la tenue en fatigue et l'usinabilité. Les progrès de la métallurgie secondaire et l'emploi du vide ont permis de s'affranchir de ces inclusions et l'on peut ainsi utiliser le titane en micro alliage avec des précipitations fines. Comme indiqué dans les conditions générales, la présence de titane en solution puis la précipitation a pour conséquence de retarder la recristallisation, de durcir la matrice en fixant l'azote et le carbone .[10]

b- Niobium

Ce sont sans doute des précipités les plus fins qui sont obtenus d'où un durcissement global très intéressant ; le niobium est également très efficace pour le contrôle des grains en TTM (traitement thermomécanique) [10].

c-Vanadium

Le vanadium facilement redissout peut se révéler plus souple d'emploi que le niobium ou le titane quand les cycles thermiques sont plafonnés en température spécialement en traitement thermique ou en formage à partir de basses températures ; mais en contrepartie, il ne permet pas de contrôler le grain par les effets de recristallisation ou de blocage des joints. Il faut également tenir compte d'une interaction vanadium aluminium en ce qui concerne la formation de nitrures ; la disponibilité de l'azote pour la formation de VN dépend des conditions de précipitation du nitrure d'aluminium qui peut se substituer à VN suivant les conditions d'équilibre et de cinétique ; si l'azote est sous la forme de NAl, le durcissement sera dû au carbure VC seul .[10]

I.4.2. composés : carbures, nitrure, oxydes :

Les composés formés par les éléments de micro-alliage sont de plusieurs types :

- ❖ des précipités qui se forment en phase solide ;
- ❖ des composés qui se forment au moment de la solidification;

- Il est donc nécessaire de distinguer deux classes:

- ❖ Les précipités proprement dits qui peuvent être redissous en phase solide à haute température : carbures, carbonitrures, certains nitrures;
- ❖ Les précipités pratiquement insolubles : oxydes, oxysulfures, TiN etc ce type de précipiter présentent des points faible pour l'acier .dont ils présentent les sources des microfissures.

-Tous ces précipités sont caractérisés par leur nature, leur maille et leur répartition ; ils sont en général de structure cubique avec des paramètres de maille assez voisins, de l'ordre de 0,4 à 0,5 nm. Des structures hexagonales sont parfois signalées.[11]

I.4.3. Précipitation :

La précipitation des carbures, nitrures et carbonitrures peut avoir lieu dans quatre contextes différents :

1- Dans le domaine austénitique au refroidissement s'il est suffisamment lent, et conformément aux conditions d'équilibre;

2- Dans le domaine ferritique ou ferrito-perlitique au moment de la transformation de phase

3- Après un refroidissement suffisamment rapide, en évitant le domaine de précipitation, refroidissement suivi d'un revenu que la phase transformée soit de la ferrite, de la bainite ou de la martensite ;

4- Au cours d'un recuit de recristallisation de produits écrouis à froid, en général au moment du chauffage et à condition qu'une certaine proportion de l'élément soit restée en solution. [12]

I.5. Facteurs métallurgiques- propriétés des tubes :

Depuis plus de 25 ans, les industries de la métallurgie et de la sidérurgie développent de nouveaux types d'aciers, appelés Aciers à Haute limite d'Elasticité (acier HLE), afin de diminuer le prix de revient des pipelines. Ces métaux, qui possèdent de bonnes propriétés mécaniques, permettent de diminuer l'épaisseur des pipelines, donc de minimiser la quantité de matériau nécessaire à leur élaboration. Le coût de fabrication d'un pipeline étant essentiellement déterminé par cette quantité, l'usage d'aciers HLE permet de réaliser de fortes économies. [13]

Les qualités d'acier couramment utilisées dans la construction des pipelines sont définies dans deux spécifications API (American Petroleum Institute) qui sont adaptées depuis 1922 par l'industrie pétrolière américaine

Dénommées 5L pour les qualités normales.

5L : pour les qualités à haute résistance.

Ces spécifications sont utilisées d'une façon générale dans le monde entier ont [14].

Les quatre tableaux reflètent la composition chimique et les caractéristiques mécaniques de l'acier type API SL, tubes de conduite PSL1 et PSL2 [14].

Tableau I.1. Composition chimique % (Tubes de conduite PSL1 soudés) [13].

API5L-PSL1	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	TitanTi (max)
X42	0,26	1,30	0,030	0,030	0.04
X52	0,26	1,40	0,030	0,030	0.04
X60	0,26	1,40	0,030	0,030	0.04
X65	0,26	1,45	0,030	0,030	0.06
X70	0,26	1,65	0,030	0,030	0.06

Tableau I.2. Composition chimique% (Tubes de conduite PSL2 soudés) [13].

API5L-PSL1	Carbone C (max)	Manganèse Mn (max)	Phosphore P (max)	Soufre S (max)	Titan Ti (max)
X42	0,22	1,30	0,025	0,015	0,04
X52	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04
X60	0,22	1,40	0,025	0,015	0,04
X65	0,22	1,45	0,025	0,015	0.06
X70	0,22	1,65	0,025	0,015	0.06
X80	0.22	1,85	0,025	0,015	0.06

Tableau I.3. Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL1) [13].

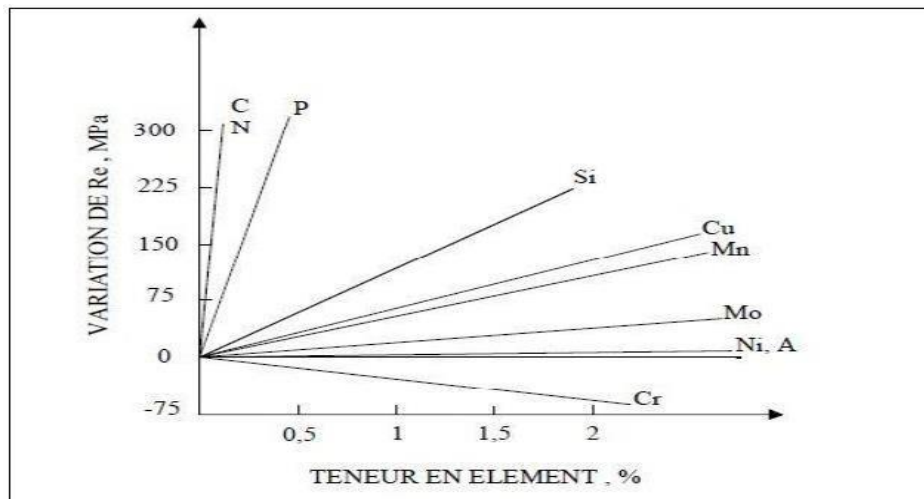
API5L- PSL1	Resistance à la rupture [N/mm2](minimum)	Limite élastique [N/mm2](minimum)
X42	414	290
X52	455	359
X60	517	414
X65	531	448
X70	565	483

Tableau I.4. Caractéristiques mécaniques (Tubes de conduite PSL2) [13].

API5L-PSL2	Resistance à la rupture [N/mm ²] (min-max)	Limite élastique [N/mm ²](min-max)
X42	414-758	290-496
X52	455-758	359-531
X60	517-758	414-565
X65	531-758	448-600
X70	565-758	483-621
X80	621-827	552-690

On distingue les éléments d'addition à effet durcissant la ferrite. Les éléments les plus efficaces sont ceux que l'on cherche à diminuer pour des raisons de soudabilité (carbone) ou d'amélioration des caractéristiques de résilience (phosphore, carbone, ...etc.) (Tableau I.1 et I.2)

Afin de ne pas rendre l'acier sensible au vieillissement et de détériorer ainsi les propriétés de résilience, l'azote est toujours présent sous une forme de Combinaison. Par contre, le manganèse est le seul élément d'addition qui soit alors favorable, mais avec un effet durcissant très limité. [17]

**Figure I.4.** Durcissement par solution solide [17]

I.6. Applications des aciers HLE :

Les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique équipements publics, bâtiment, moyens de transport, composants mécaniques [18]

I.6.1. Fabrication des pipelines :

- Un pipeline (originaire de l'anglais) est une canalisation formée par un ensemble de tubes en acier soudés bout à bout, destinée à l'acheminement d'un endroit à un autre de matières gazeuses ou liquides. Ces tubes sont souvent revêtus extérieurement et voir même intérieurement et presque toujours enterrés sauf dans certaines régions[18].
- Un pipeline permet l'échange de produits entre raffineries, dépôts pétroliers et installations portuaires. Sa longueur peut varier de quelques kilomètres à des centaines de kilomètres, voir des milliers de kilomètres [18].
- Selon le produit transporté, les pipelines sont nommés différemment. Leurs techniques de construction et d'exploitation diffèrent en fonction de certaines réglementations [18].

I.6.2 Applications d'Automobile :

Les aciers plats pour automobile sont en général classés en trois grandes familles présentées ci-dessous:

Aciers ferritiques pour emboutissage: aciers calmés aluminium ou sans interstitiels.

- ❖ aciers ferritiques à Haute Résistance: aciers isotropes ou à Bake Hardening .
- ❖ aciers rephosphorés avec ou sans interstitiels, aciers micro-alliés à haute limite d'élasticité (HLE),
- ❖ aciers multi phases à Très Haute Résistance :aciers Dual Phase ou Ferrite- Bainite de grade élevé, aciers transformation Induced Plasticity , aciers multiphasés , aciers martensitiques pour emboutissage [18] .

I.7. La corrosion des aciers:

Comme tous les matériaux de construction, l'acier tend à se dégrader superficiellement lorsqu'il est soumis à des milieux corrosifs comme le sol, l'air et le milieu marin. La corrosion est la détérioration des matériaux par interaction physico-chimique avec leur environnement, entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, etc.).

Les mécanismes mis en jeu sont divers et conduisent à des formes différentes de corrosion. [19]

I.8. Définition de la corrosion:

La corrosion est la dégradation du matériau par réaction chimique ou électrochimique avec l'environnement. Il subit en effet une perte de matière progressive aux points de contact avec le milieu environnant. Cette définition admet que la corrosion est un phénomène nuisible: elle détruit le matériau et réduit ses propriétés, ce qui le rend inutilisable pour une application prévue.[20]

I.9. Aspect économique de la corrosion :

Les effets directs ou indirects de la corrosion sont résumés ci-après:

- ✓ Coût du à l'utilisation de matériaux plus nobles
- ✓ Perte d'efficacité
- ✓ Perte du produit
- ✓ Augmentation des coefficients de sécurité,
- ✓ Coût de l'entretien et du contrôle
- ✓ Arrêt de production
- ✓ Contamination du produit par les produits de corrosion solubles.[20]

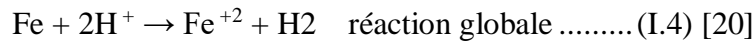
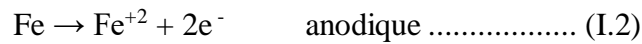
I.10. Réaction de corrosion :

La corrosion des métaux est due à une réaction d'oxydoréduction irréversible entre le métal et un agent oxydant contenu dans l'environnement. L'oxydation du métal implique la réduction de l'agent oxydant selon la réaction :



Toute réaction d'oxydoréduction se compose de deux réactions partielles :

la réaction partielle d'oxydation ou réaction partielle anodique, et la réaction partielle de réduction ou réaction partielle cathodique :



I.11. Différents types de corrosion:

Selon la nature de l'environnement et son comportement qui autour le métal, on peut déterminer le type de corrosion. En général on peut résumer les différents processus de la corrosion comme ci-dessous :

I.11.1. Corrosion électrochimique (humide):

Si le réactif est liquide, il est en général, accompagné d'une corrosion électrochimique qui produite essentiellement par l'oxydation d'un métal sous forme d'ions ou d'oxydes et réduite l'agent corrosifs qui existants dans la solution électrolyte. Par ailleurs, elle se produit par de transferts électroniques entre un métal et une solution électrolytique à son contact (circulation d'un courant électrique)[23]

I.11.2. Corrosion chimique (sèche) :

La corrosion chimique est l'attaque directe du métal par son environnement. Ce type de corrosion se développe dans une solution non électrolyte ou sur action des gazeux (gaz d'O₂, gaz H₂S et gaz CO₂). Lorsque le réactif est gazeux ou cette corrosion se produit à haute température, elle est alors appelée: Corrosion sèche ou corrosion à haute température [23]

I.12. Aspect morphologique de la corrosion :

La corrosion d'un métal ou d'un alliage peut se développer suivant différents processus qui caractérisent chaque type de corrosion. [24]

I.12.1. Corrosion généralisée :

Elle est due à une réaction chimique ou électrochimique qui se produit uniformément sur toute la surface considérée. Sa vitesse est généralement facile à prévoir avec une précision suffisante pour déterminer la durée de vie probable d'un appareil [24]

I.12.2 Corrosion localisée (zonale) :

La corrosion localisée est définie comme étant une attaque qui se déroule en un milieu spécifiquement anodique d'une surface d'un matériau. Dans ce cas de réaction, on distingue clairement les zones anodiques et cathodiques.[24]

I.12.2.1.La Corrosion par piqures:

Elle se produit quand les métaux protégés par un film d'oxyde mince comme l'aluminium et ses alliages et les aciers inoxydables sont mis en contact avec un milieu aqueux (pour un Ph voisin de la neutralité) contenant les halogénures, notamment le chlorure Cl⁻. La quantité de métal corrodé est très faible telle que, elle introduit des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre à l'intérieur du matériau à partir d'une ouverture de faible surface. [24]

I.12.2.2.La corrosion galvanique:

C'est une des formes les plus courantes de corrosion en milieu aqueux. Est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux matériaux dans la quelle une des électrodes (l'anode) se consomme au bénéfice de l'autre (la cathode) qui reste intacte. Cette sélectivité des réactions est due à une hétérogénéité provenant soit du matériau, soit du milieu ou des conditions physico chimiques à l'interface.[25]

I.12.2.3.Corrosion caverneuse :

La corrosion caverneuse qui est observée lorsqu'il y a infiltration d'une solution entre deux parties d'un assemblage.

I.12.2.4.Corrosion érosion:

La corrosion-érosion affecte de nombreux matériaux (aluminium, acier...), elle est due à l'action conjointe d'une réaction électrochimique et d'un enlèvement La mécanique de la matière. Elle est souvent favorisée par l'écoulement rapide fluide .[25,24]

I.12.2.5.La corrosion sélective:

Cette forme de corrosion est due à l'oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse.

I.12.2.6.Corrosion inter-granulaire:

Cette forme de corrosion se manifeste par une attaque localisée aux joints de grains du matériau. L'hétérogénéité au niveau du joint de grain et l'existence d'un milieu corrosif jouant le rôle d'électrolyte représentent deux conditions pour développer cette forme de corrosion .[23]

I.12.2.7. Corrosion frottement (tribocorrosion):

Ici encore le dommage est essentiellement d'origine mécanique, le processus de corrosion n'intervenant que dans une deuxième étape.

Cette forme de corrosion intervient lorsque deux surfaces métalliques en contact sont sujettes à un déplacement rapide périodique (vibration).[23]

En générale, le phénomène se rencontre en phase gazeuse (gaz, atmosphère); il est en particulier fréquent lors des transports de pièces métalliques.

I.12.2.8. La corrosion sous contrainte:

Cette forme est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.[22]

I.13. Mécanismes de corrosion électrochimique:

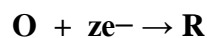
Bien que les formes de corrosion citées ci-dessus soient diverses, les mécanismes de base de la corrosion d'un matériau métallique en milieu aqueux ont la même origine qui est de nature électrochimique.

Ces mécanismes résultent d'un ensemble de réactions qui se produisent à l'interface métal - solution et qui mettent en jeu des électrons et des espèces chimiques. Ces réactions électrochimiques peuvent être décrites de la façon simplifiée suivante: [24]

- Réaction anodique de dissolution du métal (M)



- Réaction cathodique de réduction de l'agent corrosif (O)



I.14. Les facteurs de la corrosion :

Certains facteurs dus à la corrosion des métaux, ils peuvent être classés en quatre groupes principaux (tableau I.5).[24]

Tableau I. 5 Les facteurs de la corrosion.[24]

Facteur liés au milieu corrosif	Facteurs métallurgiques	Facteurs de finissant Le mode d'emploi.	Facteur dépendants du temps.
-Concentration de réactif -Teneur en oxygène -pH du milieu -Température -Pression -Présence de bactéries.	-Composition de l'alliage -Procédé d'élaboration - Impuretés -Traitement Thermique -Traitement mécanique	-Etat de surface -Forme des pièces -Emploi d'inhibiteur -Procédés d'assemblage	-Vieillessement -Tension mécaniques -Modification des Revêtement protecteurs

La vitesse de corrosion d'un métal dans un milieu corrosif dépend de :

a) Effet de la température: Généralement, l'augmentation de la température accélère les phénomènes de corrosion, car elle diminue les domaines de stabilité des métaux et accélère la cinétique de réaction et de transport de charge. L'importance de son influence varie en fonction du milieu corrosif dans le quel se trouve le matériau [23].

b) Effet de l'acidité: La susceptibilité du matériau à la corrosion est en fonction du pH de l'électrolyte. Une forte concentration en protons dans la solution augmente l'agressivité du milieu, ce qui modifié les équilibres des réactions chimiques et électrochimiques. La corrosion augmente avec la diminution du pH du milieu.[25]

c) Régime hydrodynamique: hydrodynamiques fixent les vitesses de réactions en contrôlant le transport de matière par l'établissement d'une couche limite de diffusion des espèces, appelée couche de Nernst, ce qui explique l'importance de l'agitation de l'électrolyte lors des essais de corrosion en laboratoire.[25]

La salinité : Les chlorures sont des ions agressifs, souvent à l'origine de corrosions localisées, leur présence en solution s'accompagne d'effets complémentaires, d'une part, leur concentration locale induit une acidification du milieu et d'autre part, la salinité a une influence sur la conductivité du milieu aqueux .[25]

I.15. Vitesse de corrosion :

La vitesse de corrosion d'un métal dans un milieu corrosif dépend à la fois des caractéristiques de ces deux paramètres. La température et le pH ont une influence directe sur la vitesse de corrosion, et une influence indirecte à travers la phase aqueuse (eau de condensation, eau de production). Les conditions de flux, le film formé à la surface du métal et la pression ont une influence directe à travers la pression partielle du CO₂. [25]

Chapitre II

Procédés de soudage

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [26]

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler, soit par chauffage, soit par intervention de pression, soit par l'un et l'autre, avec ou sans métal d'apport dont la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle du matériau de base [27]

II.1. Définition du soudage :

Le soudage tout simplement c'est l'opération qui permet de lier quasiment tous matériaux, des matériaux métalliques jusqu'aux matières plastiques. Le soudage assure une continuité métallique de la pièce lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalent à celles du métal assemblé. Caractéristiques mécaniques, thermiques, chimiques, électriques. D'étanchéité, de durabilité.

Autrement dit le soudage est un procédé d'assemblage qui consiste à la mise des pièces à souder à la température de soudage (Température de fusion, dans la majorité des cas) au niveau de leur joint, par le biais d'une source de chaleur. Une pression mécanique peut être éventuellement associée à cette chaleur. [28]

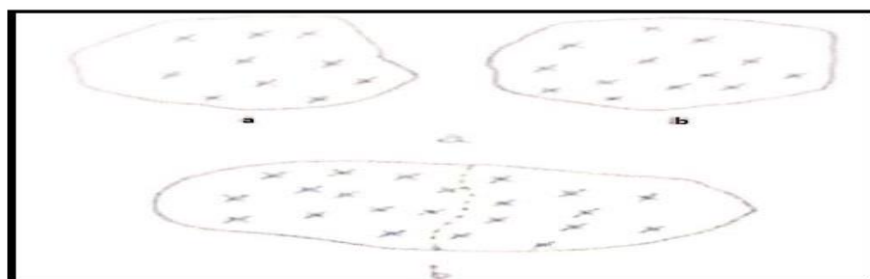


Figure II.1.illustration du déroulement de l'opération de soudage [28]

II.2. Classification de procédés de soudages :

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

- Le mode de transfert d'énergie utilisée
- Sans ou avec un métal d'apport
- La manuelle ou 'automatique
- La nature de matériaux
- La destination des éléments soudés. [29]

Tableau II .1 Des différents types de soudage . [30]

Soudage avec fusion locale des pièces a assembler	Soudage sans fusion locale des pièces à Assembler
Le soudage aux gaz	Soudage par diffusion
Le soudage plasma	Soudage par friction
Le soudage à l'arc électrique	Soudage à la forge
Le soudage par faisceau d'électrons	Soudage par ultra-son
Le soudage par faisceau laser	Soudage par explosion
Le soudage par résistance électrique	
Le soudage aluminothermique	

Il existe plusieurs procédés de soudages. Dans ce qui suit, nous présentons le soudage à l'arc avec électrode enrobée car ce procédé est utilisé pour réaliser ce travail.

II 2.1.Soudage à l'arc électrique :

II 2.1.1.Principe du soudage à 'Arc et notion d'électricité :

Le procédé de soudage à l'arc a été découvert vers 1885 ses applications demeurent Nombreuses encore aujourd'hui

— Bien que le procédé tende à disparaître de plus en plus des ateliers de fabrication en série, il demeure très utilisé lorsqu'il s'agit d'effectuer des réparations ou dans le cas de certaines applications spécialisées, dans lesquelles des propriétés particulières sont requises.

— De plus, le procédé SMAW a servi à développer les autres procédés de soudage à l'arc utilisant des fils électrodes (FCAW, GMAW. SAW, MCAW). Ces derniers sont moins polyvalents que le SMAW, quoique leurs d'utilisation possibilités d'utilisation augmentent chaque année. Le soudage a l'arc avec électrode enrobée (SMAW) demeure toujours un procédé très utilisé.

— car il permet une grande liberté d'exécution, une grande autonomie, et l'équipement réguis est le moins coûteux qui soit. Ainsi, selon la technique utilisée, il devient possible de réaliser des soudures dans n'importe quelle position de soudage. Les dépôts obtenus lors de sont souvent plus purs que le métal de base, et que leurs propriétés mécaniques se révèlent meilleures.

- L'application de ce procédé possèdent des qualités non négligeables, puisqu'ils Parmi les applications concrètes du procédé de soudage SMAW, on trouve la fabrication et la réparation de
- Récipients et tuyaux sous pression
 - Réservoirs de stockage
 - Ponts et bâtiments
 - Navires et wagons.[30]

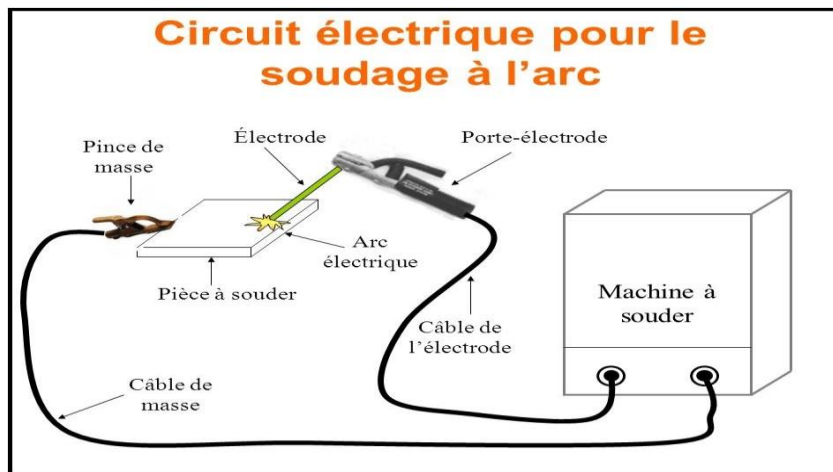


figure II.2 Circuit électrique pour le soudage à l'arc. [30]

II.2.1.2. Le soudage a l'arc avec électrode enrobée :

Le principe de base du soudage a l'arc avec électrode enrobée est présenté dans la figure II.3.L électrode est constituée par: [31]

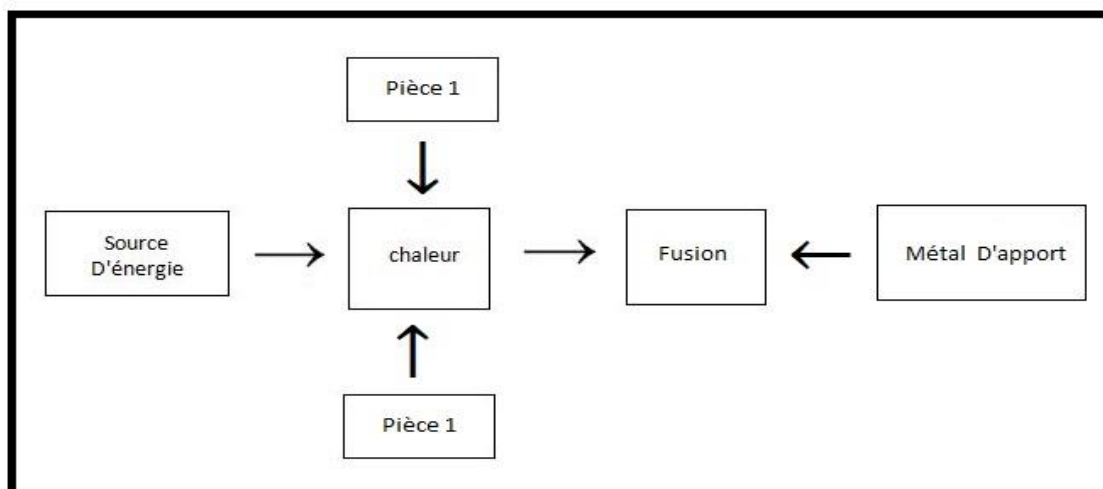


figure II.3. Principe de soudage. [31]

Une âme métallique (dont le diamètre est généralement compris entre 1 et 10 mm et dont la longueur peut atteindre 450 mm) qui assure la conduction du courant et sert de métal d'apport, et par un revêtement adhérent appelé enrobage qui est constitué, à la fois, de composés qui vont concourir à la formation du laitier protecteur, d'autres produits qui vont se volatiliser dans le plasma d'arc pour le stabiliser et, éventuellement, de particules métalliques qui participeront à la formation du bain de fusion. Cet enrobage peut être, le plus souvent. [31]

-Cellulosique : il donne peu de laitier mais sa combustion libère du dioxyde de carbone et concourt à l'enrichissement du métal fondu en hydrogène dissous;

-Rutile : le constituant de base est de l'oxyde de titane ; il contribue à la désulfuration du métal fondu ; les liants utilisés dégagent de l'hydrogène;

-Basique : (électrodes utilisées en soudage des aciers); le constituant de base est le carbonate de calcium ; il libère peu d'hydrogène mais il est hygroscopique et exige de ce fait que les électrodes soient correctement étuvées (vers 300°C environ) puis protégées (par conservation à 100°C par exemple) avant emploi [32].

— La fusion de l'âme précède légèrement celle de l'enrobage. Il se forme un cratère qui oriente le transfert du métal d'apport vers le métal fondu. Ce transfert se fait sous la forme de grosses gouttes (enrobages cellulosiques ou basiques) ou par pulvérisation (enrobages rutiles).

— Dans de nombreux cas, l'arc peut être alimenté en courant continu (la polarité est alors choisie en fonction de la nature du métal de base, de l'enrobage et de la position de soudage) mais il est parfois possible d'utiliser du courant alternatif (notamment pour le soudage des aciers).

— L'intensité du courant de soudage est choisie en fonction du diamètre de l'électrode. Elle est généralement préconisée par le producteur. [32]

— Le soudage est pratiquement possible dans toutes les positions, chacune demandant réglages particuliers et des préparations adaptées. [32]

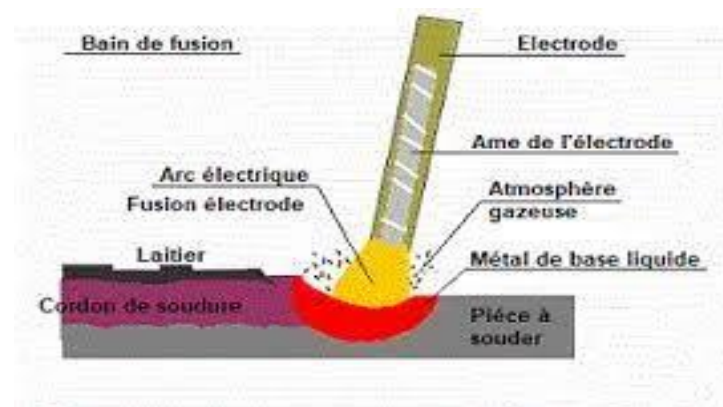


Figure II.4. Soudage à l'arc avec électrode enrobée. [32]

II.3.Soudabilité et notion de carbone équivalent :

Le phénomène de trempe a pour facteur essentiel le carbone, néanmoins les éléments d'alliages favorisent eux aussi la trempabilité. Une formule exprimant le pouvoir trempant de l'acier en fonction de ses constituants a été établie. Elle tend à remplacer la teneur réelle en carbone par un nombre dit : carbone équivalent noté C_{eq} qui reflète mieux le pouvoir trempant de l'acier du fait qu'il tient compte de l'action des éléments alliés sur la trempabilité. [33]

$$C_{eq} = C + Mn / 20 + Ni / 15 + (Cr + Mo + V) / 10 . \quad [35]$$

Le tableau suivant donne la soudabilité à l'arc à l'électrode enrobée basique

TableauII.2 Données sur la soudabilité en fonction du carbone équivalent. [35]

C_{eq} pour soudage à l'arc à l'électrode enrobée basique	enrobée basique Soudabilité
$C_{eq} < 0,25$	Excellente
$0.26 \leq C_{eq} \leq 0.30$	Bonne
$0.31 \leq C_{eq} \leq 0.35$	Moyenne
$0.36 \leq C_{eq} \leq 0.40$	Mauvaise
$0.41 \leq C_{eq} \leq 0.45$	Très mauvaise
$C_{eq} \geq 0.46$	Impossible

— Plus C_{eq} devient important en valeur plus le soudage devient dur plus le soudage devient difficile, ce pouvoir trempant induit aussi une fragilisation de plus en plus importante des structures dans le joint de plus en plus importante des structures dans le joint et la ZAT

Le soudage = fusion du métal de base et du produit d'apport

— Continuité métallique : Cette exigence implique la mise en jeu entre les éléments à assembler, de forces de liaison interatomiques de type métallique (pour les métaux)

— L'intervention de ces dernières exige l'absence de tout corps étranger susceptible de constituer une barrière à leur action [36]

II.4.Les différentes zones d'un assemblage soudé :

Le cordon de soudure est réparti en 3 parties essentielles

II.4.1. Le métal de base MB (en fonction de leurs compositions chimiques) :

référence pour apprécier les différentes transformations intervenant lors du déroulement du processus de soudage [37]

II. 4.2. La zone fondue (ZF) :

Refroidi rapidement depuis l'état liquide, cette zone est obtenue par la fusion du métal (ou métaux) de base avec la contribution plus ou moins importante du métal d'apport

Zone fondue = Métal d'apport + Métal fondu [37]

II.4.3 Zone affectée thermiquement (ZAT) :

Suffisamment proche de la zone fondue de sorte que les différents cycles thermiques ont provoqué diverses transformations structurales. [37]

fixe la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement en d'autres termes elle correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. [37]

II.4.4. Zone de liaison (ZL) :

Fixe la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement en d'autres termes elle correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. [37]

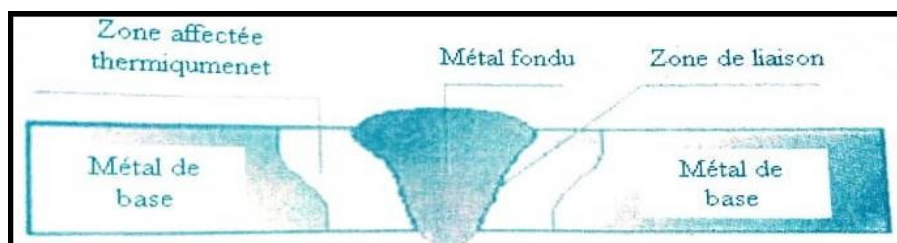


Figure I.5. Les différentes zones d'un assemblage soudé [37]

II .5. Aspects métallurgiques du soudage de l'acier :

— Les Caractéristiques d'un acier sont fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique thermique que subit l'acier.

— Les principes généraux de la métallurgie (composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures. [37]

— L'examen métallographique de la soudure fait apparaître une grande diversité de structures. On observe pour chaque joint soudé divers aspects qui rendent compte de la variation du cycle thermique subi en chaque point examiné. La température et le temps de chauffage ainsi que les vitesses de refroidissement produisent des modifications qui affectent la dimension des grains et les phases en présence.

— Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. Leur dimension dépend de la température et de la cinétique de refroidissement.

Voir figure II.5. Qui donne une représentation schématique d'un joint soude Perpendiculairement à la ligne de fusion. [37, 38]

On distingue plusieurs zones : figure II.6. [38]

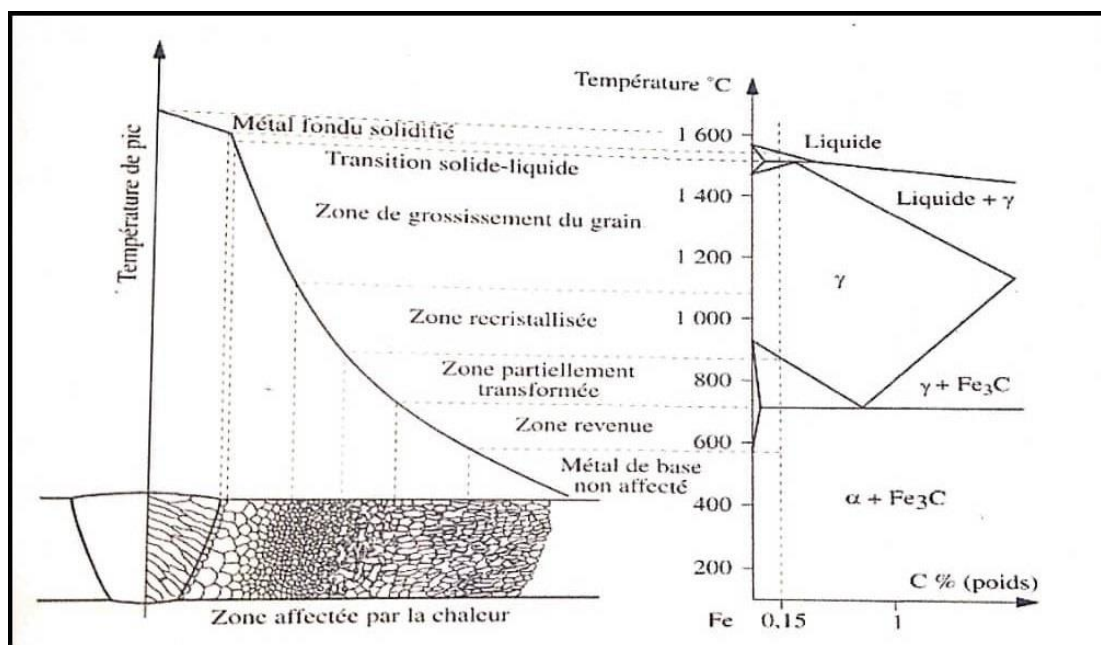


Figure II.6. Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé.[38]

II.6.Défaut de soudage :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger.

La classification des défauts est réalisée conformément à la norme NF EN 26250

a) **Cratère** : ce défaut apparaît lorsque une pression de retrait a la fin d'une passe où la source de chaleur a été enlevée.

b) **Fissure** : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de contraintes

c) **Amorces d'arc** : ce défaut apparaît lorsque la pince d'électrode ou la masse ont touché par hasard le métal de base.

d) **Morsures/Caniveaux** : ce défaut apparaît lorsque creux irrégulier à la surface du Cordon juste au contact du métal d'apport et du métal de base.

e) **Fissure** : ce défaut apparaît lorsque le refroidissement rapide et les forces de Contraintes [39].



Figure II.8. Cordon de soudure avec les défauts (cratère, morsures/caniveaux , Fissure Amorces d'arc),[39]

II.7. Contrôle des soudures :

— Il est nécessaire et de la plus haute importance de vérifier la santé des soudures sur de pièces de résistances. A cet effet de très nombreuses méthodes sont utilisées. Seuls sont habilités à conduire ces essais.

— Les soudeurs eux même, lorsqu'ils sont qualifiés selon la norme EN 287 et qu'il s'agit d'opérations directement liées à la procédure de soudage.

— Les opérateurs qualifiés par le comité français des Essais Non Destructifs (COFREND). [40]

— Si l'on constate des anomalies, on doit comparer leur nombre et leur taille aux tolérances des normes et suivant les cas effectuer une correction des soudures. Naturellement on doit aussi. [40]

II.7.1. Contrôle avant soudage :

— Analyse chimique du matériau, mise en évidence de zones d'impuretés dans les zones proches du joint, etc. les soudeurs doit aussi vérifier:

S'il utilise les bonnes électrodes et emploi le bon métal d'apport

- La température
- La géométrie du chanfrein s'il existe
- Le réglage de la tension et de l'intensité du poste générateur
- La température et l'étendue du préchauffage. [40]

II.7.2. Contrôle pendant le soudage :

A surtout pour but de vérifier que les conditions d'exécution sont bien respectée, que les règles de l'art du soudage. [40]

- Ne pas stocker les électrodes dans un milieu qui peut nuire à leur enrobage
- La température entre les passes de soudage
- La qualité de l'élimination du laitier
- Différents contrôles visuels [41]

II.7.3. Contrôle après le soudage :

II.7.3.1. Contrôle destructif :

Utilisé surtout pour des productions en séries, donc assez peu pour nos métiers. Il consiste à prélever certaines pièces sur un lot de pièces soudées, sur lesquelles seront prélevées des éprouvettes qui seront testées

- Macrographies
- Micrographies
- Essais de dureté
- Essais de traction
- Essai de pliage
- Essais de résilience [40]

II.7.3.2. Contrôle semi destructif :

Il se pratique en perçant ou en fraisant localement le joint soudé en vue d'examiner les Parois assemblées. La forme de l'entaille doit naturellement être telle que sa réparation soit aisée. Cette méthode permet d'apprécier.

- ❖ La pénétration de la soudure.
- ❖ La liaison des bords.
- ❖ Les défauts physiques du joint au droit de la cavité.[41]

II.7.3.3. Contrôle non destructifs :

Il permet de vérifier la qualité de la soudure sans en corrompre la qualité

II.7.3.4. Contrôle visuel :

présence d'éventuels caniveaux, surépaisseurs des soudures bout à bout, valeur de gorge des soudures d'angles, défauts de surface.[41]

II.7.3.5. Contrôle radiographique :

— Utilisé pour révéler les anomalies volumiques. La pièce à contrôler est soumise a un rayonnement **X** ou **g**. En plaçant un film derrière la pièce, celui-ci va être impressionné par les rayonnements traversant. Toutefois l'intensité de celui-ci va différer au droit des défauts. Cela se traduira par une tache plus sombre ou plus claire que la teinte générale du film. Cette technique demande un matériel lourd et présente des risques potentiels pour le personnel. [41]

Chapitre III

Techniques Expérimentale

Et

Modélisation

III .1. Protocole expérimentales:

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériau étudié et les différentes techniques appliquées pour la réalisation du cordon de soudure (électrodes utiliser dans le procédé de soudage, méthode de soudure et condition de travail). Des essais de corrosion sont effectués dans un milieu agressive H_2SO_4 , dans le but d'optimiser certains paramètres qui influent sur la dégradation de joints de soudure, ces paramètres sont la concentration de milieu, la vitesse d'écoulement de la solution et rugosité de la surface du joint.

III.2.Présentation de matériaux:

Le matériau de notre étude est constitué de tubes en acier carbone-manganèse utilisés pour le transport d'hydrocarbures avec une pression de 70 bar, classe API 5L-X. Répond aux spécifications requises par la norme API 5L.



Figure III.1. tube en acier pour le transport de carburant et de gaz

III.3.Présentation de l'assemblage soude :

III.3.1.Matériaux étudiés :

Le matériau de base étudié se présente sous la forme d'un tube de 9 mm d'épaisseur, c'est un acier à haute limite d'élasticité X60 pipeline industriel utilisé par SONATRACH DML (Laghouat) soudé à l'arc électrique en 05 passes avec des électrodes de type :E8018G.

L'acier utilisé pour les conduites de transport d'hydrocarbure et de gaz, répond au critère de la spécification technique API5L X ;

la signification de ces désignations sont:

-API : Institut américain du pétrole.

- 5L: Spécification pour les conduites de transport d'hydro carbure et de gaz

- X : Désignation de qualité.

Dans notre cas ,le pipe répond au critère de la spécification API 5L de grade X60.

III.3.2.Composition chimique des matériaux:

La composition chimique du matériau a été faite par analyse spectrophométrie sur machine type SPECTRO Rp 212 disponible au niveau de l'usine ALPHAPIPE à Annaba de production des tube sens spiral.

Tableau III.1 Composition chimique de l'acier API5L X 60 (proportions massiques en %)

Element chimique	Carbone	Silicium	Manganèse	Phosphore	Soufre	Chrome	Nickel	Molybdène
Symbole	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
Poids en %	0.213	0.380	1.35	0.015	0.003	0.025	0.024	0.013

Element chimique	Aluminium	Tungsten	Cuivre	Niobium	Titan	Vanadium	Bore	Fer
Symbole	Al	W	Cu	Nb	Ti	V	B	Fe
Poids en %	0.067	0.0015	0.029	0.078	0.003	0.0015	0.006	97.8

On notera que la teneur en soufre est très basse par rapport aux teneurs rencontrées dans les nuances des tubes de transport actuels. Il en résulte une basse teneur inclusion aère et donc une bonne ductilité. Parai leurs on révèle la présence de très petite quantité d'aluminium(pour la dés oxydation).

III.4.Opération de soudage :

Les assemblages soudés ,objet de cette étude sont exécutés par un soudeur qualifié DADI B DML LAGHOUAT.

Les surfaces à ,assembler sont lisses, uniformes ,exemptes de bavures, de défaut de laminage, de traces de peinture, de graisse ou d'autres matières nuisibles qui pour raient avoir un effet préjudiciable sur le soudage .

Le type de joint et l'écartement entre les extrémités à souder sont conformes aux termes de la spécification concernant le procédé de soudage à appliquer..

L'alignement des extrémités est réglé de façon à minimiser les dénivellations entre les éléments du tube. L'utilisation des cavaliers s'avère nécessaire afin de brider l'éprouvette.

III.4.1.Préparation des joints :

- Chanfrein des bords à souder

La forme et les dimensions du chanfrein dépendent principalement de l'épaisseur de la pièce à souder, dans notre cas, il s'agit des tubes de 9 mm d'épaisseur. Pour souder de telles éprouvettes nous avons choisi un chanfrein en V dont les dimensions sont montrées sur la figure ci dessous.

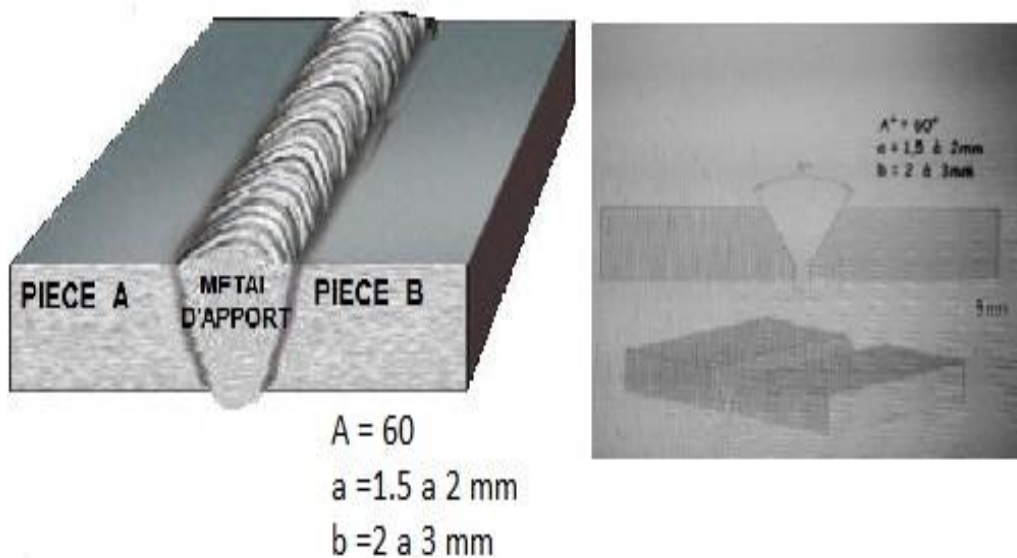


Figure III.2. joint bout à bout normal avec un chanfrein en V.

III.4.2.Exécution du soudage :

- Nettoyage des bords pour éliminer les graisses et les huiles qui pour raient être Dé posées suite aux différentes opérations d’usinage.
- Fixation des bords à souder par la réalisation de points de soudure sur un support métallique fixe
- Prévoir d’importants mouvements de la pièce ,dus au retrait ou aux dé formations
- Souder selon les paramètres de la spécification



Figure III.4.Four pour les électro des SONATRACH



Figure III.3.poste de soudure SONATRACH



Figure III.6.photo électrode enrobé



Figure III.5.procédure de soudage

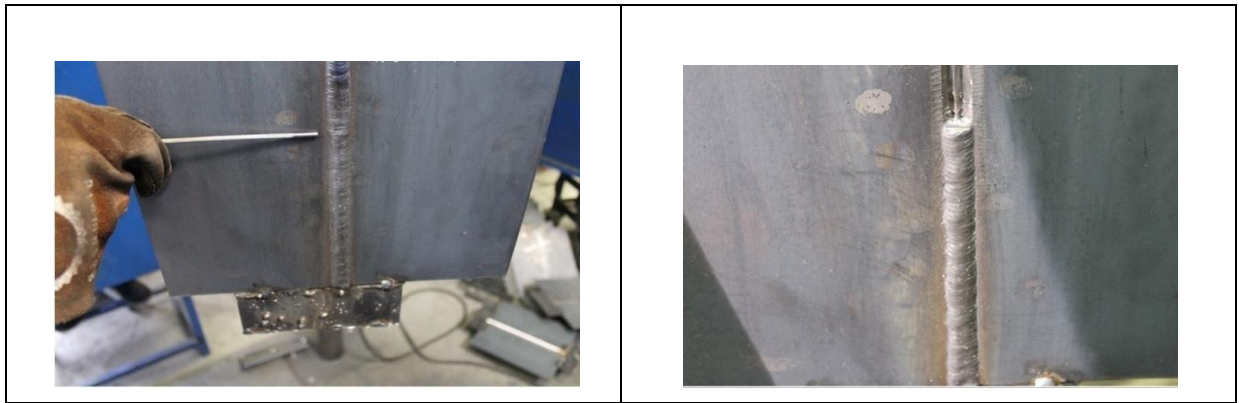


Figure III.7.Soudage de deux échantillons de tubes

III.5.Découpage de pièce de pipeline :

La photo de pipeline avant le coupe



Figure III.8.Photos de pipeline avant découpage

La photo de pièce après le coupage pipeline



Figure III.9.Plaque de pipeline X60 avec soudure

III.5.1.Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons a été réalisée à l'atelier de SONATRACH DML Laghouat (découpage grossie) et dans le laboratoire de mécanique à l'université de Laghouat (découpage de finition)

III.5.2.Découpage :

La préparation des échantillons passer par plusieurs étapes, à savoir le découpage manuel avec une tronçonneuse est scie mécanique.

a — Premier étape :

Les pièces préparées pour les opérations de fraisage ont été découpées par une scie mécanique située dans l'atelier du Département de Génie Mécanique de l'Université de Laghouat. Pour réaliser les travaux de ce projet, la pièce doit contenir le cordon de soudure de ce acier utilisé.



Figure III.10.Scie mécanique

Les pièces après le découpage par scie mécanique

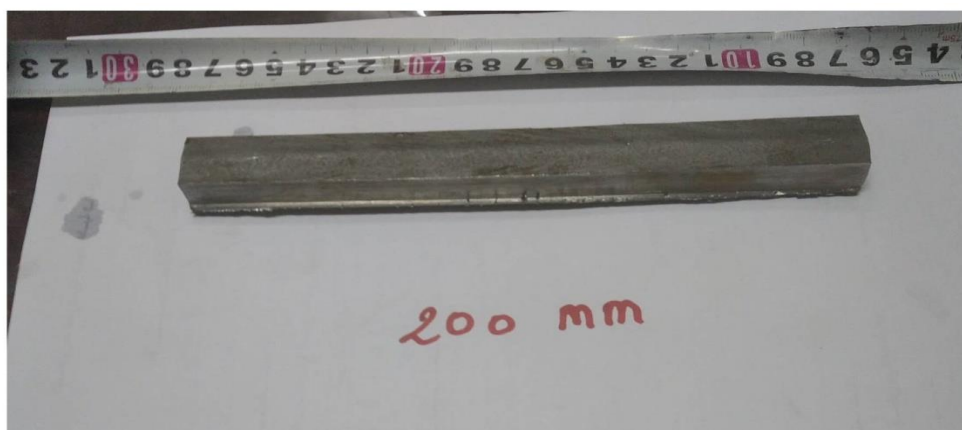


Figure III.11.cordon soudure d'acier X60

b — Deuxième étape :

Coupée la pièce cordon soudure d'acier X60 par une tronçonneuse située dans l'atelier du Département de Génie Mécanique de l'Université de Laghouat Chaque échantillon est formé par le cordon de soudure comme le montre le schéma de la Figure (III.12)

Les photos Coupée la pièce cordon soudure



Figure III.12.Echantillons découper par une tronçonneuse

III.6.Échantillons de soudure avec de fil conducteur :

Avant de préparation et polissage des pièces échantillons, nous avons soudé une des faces des pièces avec du fil conducteur d'électricité cuivre enrobé à l'étain et l'avons moulée à l'arsin tout en gardant visible une des faces des pièces échantillons.



Figure III.13. les pièces avant finition polissage

III.7. Polissage les pièces (échantillons) :

Après la préparation des échantillons on a fait maintenant le polissage avec machine de polissage pour assurer une surface bien finet pour essai de dureté. Avec utilisation le papier carbure de silice (p80, p100, p600, p1000).

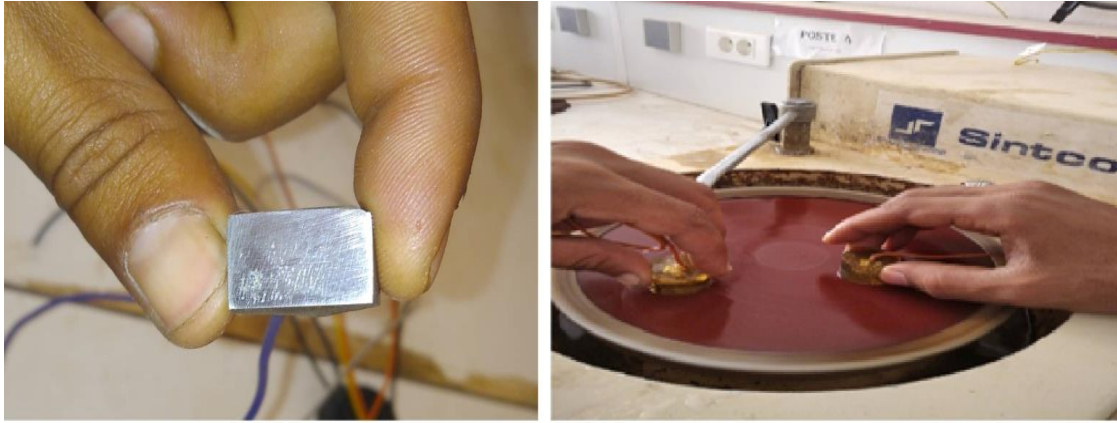


Figure III.14. Les pièces sont finies par polissage

III.8. Etude électrochimique :

III.8.1. Préparation les échantillons pour l'essai de corrosion :

Nous avons préparé de échantillons pour les essai de corrosion .La préparation des échantillons consisté a les souder, les enrobé a les polir comme suit :

➤ La pile électrochimique :

Le soudage à l'étain s'effectue entre échantillon et le fil conducteur en cuivre enrobé d'une gaine en caoutchouc. Le soudage assure un bon contact électrique entre échantillon et le fil conducteur pour assurer un bon passe de courant. Nous avons effectué par la suite l'enrobage des échantillons à l'aide d'une résine thermo durcissable (Araldite) et des moules adéquats aux dimensions des échantillons.

L'enrobage nous permet d'assurer seulement la surface étudié en contact avec la solution électrolytique.

III.9. Les paramètres influant sur la corrosion :

Dans notre travail nous avons étudié trois paramétré talque la concentration de milieu corrosif qui varie en entre 0.5 jusqu'à 2.5 g/mol et nous avons créé une variété de rugosité de la surface du joint de soudure par le procédure de polissage avec un papier abrasive de 100 à 600 mm et 1000 mm et le dernier paramètre c'est l'écoulement de milieu est contrôle par une plaque agitatrice avec une vitesse de rotation varie entre 100 et 400 t/min Afin de terminer la

préparation des échantillons pour les essais expérimentaux nous réalisons des tests de corrosion (Figure.III.19) , ces série des tests est suivi par un modélisation statistique par la méthode de plan factoriel pour optimiser ces paramètres.

III.9.1Analyseélectrochimique :

III.9.1.1 Essais Potentiostatiques :

Les essais ont été réalisés au laboratoire génie mécanique de L'Université de – Amar Telidjia Laghouat l'aide d'une chaine électrochimique constituée de:

➤ **Potentiostat / Glavanostat :**

Type PGZ 301 : permet de imposer un potentiel varié sur l'électrode de travail qui représente l'acier x60 et donc la mesure du courant circulant entre l'électrode de travail et celle de référence.

➤ **Cellule électrochimique :**

La cellule de mesure utilisée pour les essais électrochimiques est une vase en verre pyrex de forme cylindrique de volume de 1000 m l à doubles parois thermostatiques , aux côtés du cylindre des rodages coniques permettant l'introduction des électrodes.

➤ **Les électrodes.**

a. Électrode du travail :

L'échantillon utilisé sont des zones d'un cordon souder d'un acier à haut limite d'élastique X60 API5 utilisées pour pipe line ont été dé coupés à l'atelier mécanique , Sous forme de petits surfaces carrés .Afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles ,l'électrode de travail subit, avant chaque essai, un prétraitement, qui consiste en un polissage de la surface de l'électrode de travail aux papiers abrasifs en carbure de silicium de finesse en grains décroissance (80,100, 100, 1000) sous jet d'eau, le polissage est ensuite un polissage de finition puis d'un séchage sous un flux d'air.



Figure III.15. Les électrodes de travail

b. Électrode de référence

Est une électrode au calomel saturé (ECS).

c . Électrode auxiliaire

Une contre électrode appelée aussi électrode auxiliaire en platine.

- L'électrode de référence est une électrode au calomel saturée ECS (+0.24V/ENH).



Figure III.16. Dispositif Expérimental de la technique potentiostatique

- Système d'acquisition,
- Voltalab.PGZ301
- Plaque chauffante agitatrice de laboratoire
- Cellule électrochimique
- Electrode au calomel saturée.(électrode de référence)
- Electrode de travail
- Electrode auxiliaire fil de platine

➤ **Le type de solution utilisé**

Notre étude est réalisée en milieu acide sulfurique (H_2SO_4).L'ensemble est lié à un micro ordinateur muni d'un logiciel (Volta master 4)permettant le tracé des courbes:

$E=f(t)$ et $I= f(E)$ et $\log |i| = f(E)$,et détermine ainsi le taux de corrosion et la vitesse de corrosion.

III.9.1.2.Mesure du potentiel libre :

Les courbes de polarisation nécessitent la connaissance du potentiel libre, après différents essais, nous avons choisi pour une immersion de l'échantillon une durée de 4 minutes. Ce temps est suffisant pour obtenir une stabilisation satisfaisante du potentiel libre.

III.9.1.3.Choix de la vitesse de balayage :

Nous avons opté à une vitesse de balayage égale à 10mV/s ,cette dernière nous permet une bonne reproductibilité des résultats sans masquer les phénomènes .

III.9.1.4.Condition de polarisation :

> **Courbes de polarisation** :le tracé des courbes a été effectué dans un domaine de potentiel allant de -1à+1V.

Courbes de Tafel : pour le tracé de ces courbe son a choisi le domaine de linéarité des branches cathodiques et anodiques de la courbe $\log I=f(E)$.

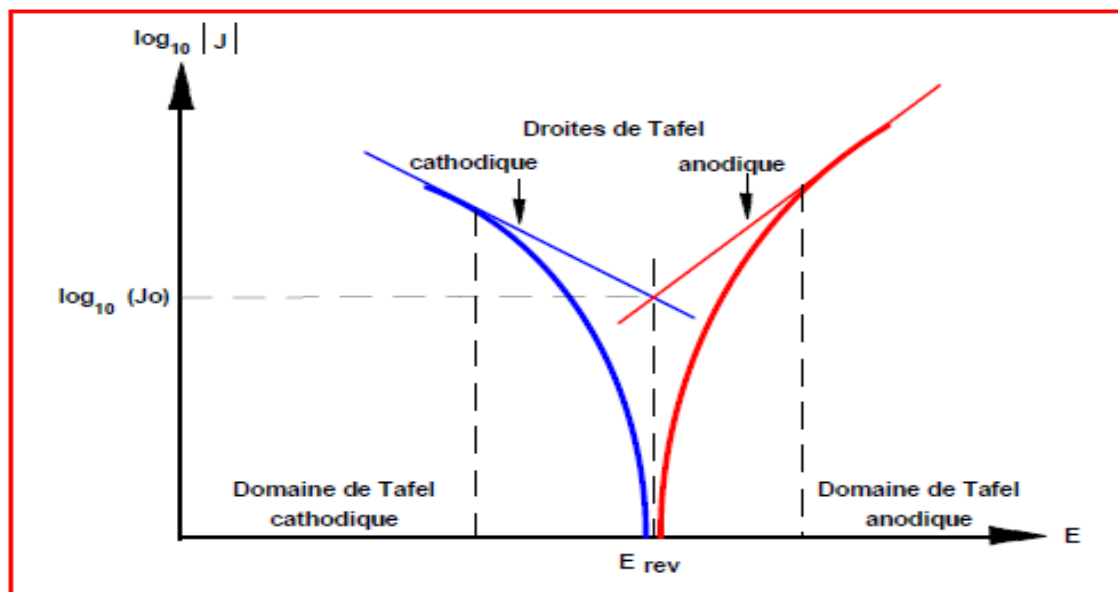


Figure III.17.Courbe $\log|I|=f(E)$ et les droites de Tafel

III.10.Modélisation mathématique des résultats :

La méthode des plans d'expériences est un outil indispensable pour la recherche et le développement industriel. Elle permet de fournir le meilleur protocole expérimental pour modéliser ou prédire une réponse en fonction de facteurs de variabilité, selon un modèle présumé. Si l'expérimentation est aussi ancienne que la science ,la planification expérimentale, destinée à optimiser le processus d'obtention des données,

III.11. Généralités sur la méthode des plans d'expériences :

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée Y , porte le nom de « réponse ». Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées facteurs. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes facteur et réponse sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.

➤ Facteur

Les variables que l'on désire étudier sont appelées facteurs. En général, un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure que l'on note souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure que souvent notée par $+1$). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation (figure III.20). Un facteur peut prendre plusieurs niveaux à l'intérieur de son domaine de variation.

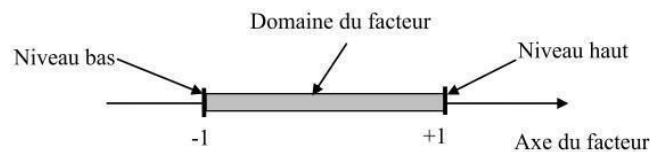


Figure III.18. Domaine de variation du facteur

➤ Effet d'un facteur

L'effet d'un facteur A sur la réponse Y s'obtient en comparant les valeurs prises par Y quand A passe du niveau -1 au niveau $+1$. Soient y_1 et y_2 ces valeurs (figure IV-2).

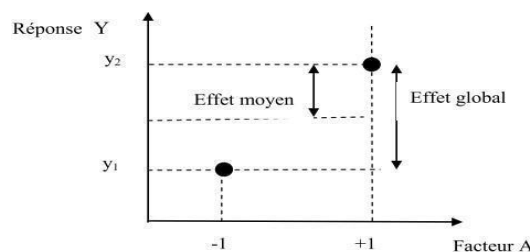


Figure III.19. Effet d'un facteur

Nous distinguons:

- l'effet global $y_2 - y_1$;
- l'effet moyen $(y_2 - y_1) / 2$.

➤ La réponse

Les grandeurs qui intéressent l'expérimentateur et qui sont mesurées à chaque expérience sont appelées réponses. Le choix de la réponse ne relève pas de la théorie des plans d'expériences. Ce n'est qu'après une analyse minutieuse des phénomènes, des en jeux, des objectifs et des contraintes de l'étude que l'on peut définir la ou les bonnes réponses, donc une recherche d'extremum.

III.12.Surfaces de réponse :

À chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse.

En général, on ne connaît que quelques réponses ,celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur .On interpole ,à l'aide d'un modèle mathématique ,les réponses in connues pour obtenir la surface de réponse .Les points d'expériences, retenus par la théorie des plans d'expériences, assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

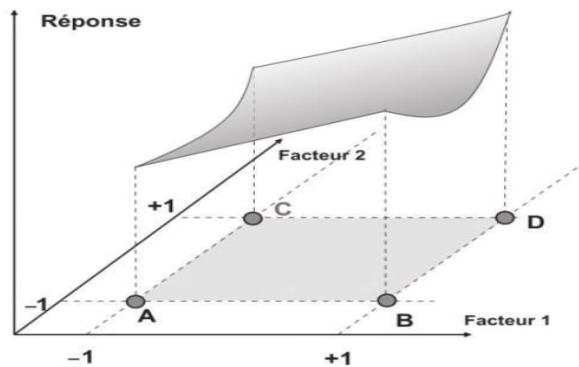


Figure III.20. L'ensemble des réponses qui correspondent à tous les points du domaine d'étude
Forme la surface de réponse

III.13.Modélisation :

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que : $y=f(x_1, x_2,..,x_n)$
..... (IV.1)

$$Y=a_0+a_1X_1+ a_2X_2+a_3X_3+a_{12}X_1X_2+ a_{13}X_1X_3+a_{23}X_2X_3+a_{123}X_1X_2X_3... (IV.2)$$

Où : y est la réponse et x_1, \dots, x_n sont les facteurs. Ce modèle est déterministe (la réponse dépend uniquement des facteurs sans aucune incertitude possible, ce qui revient à ignorer les bruits tels

que les erreurs de mesure) et invariant (le comportement n'évolue pas au cours du temps).

III.13.1.Types des plans d'expériences :

Il existe de nombreux plans d'expériences classiques adaptés à tous les cas rencontrés par un expérimentateur ,les plus utilisés sont:

- Plans de criblage : pour trouver les facteurs les plus influents sur une réponse;
- Plans de modélisation ou plans pour surfaces de réponse : modèles du 1^{er} ou 2^{ème} degré;
- Plans de mélange : adaptés aux facteurs dépendants;
- Plans factoriels complets : toutes les combinaisons des niveaux de facteurs sont présentes.
- Plans factoriels fractionnaires : tous les niveaux, de chaque facteur, sont présents, mais pas toutes les combinaisons possibles de facteurs.

Le choix d'un plan dépend essentiellement de la nature des questions à traiter, du degré de généralités recherché pour les conclusions et des ressources disponibles (matériau expérimental, personnel , contraintes de temps...).

Tableau III.2 Différents types des plans d'expériences

Plan de criblage	Plan de modélisation
Plan a un facteur a la fois	Plan factoriels complex
Plan factoriels fractionnaires	Plan non conventionnels
Plan sursaturés	Plan composites centre
Plan factoriels	plan de Dohlert
-	Plan de Box-Behnken
-	Plan D-optimaux
-	Plan de mélange

III.13.2.Plansfactorielscomplets 2^k :

Ces plans sont les plus simples à réaliser. Ils consistent à prendre pour chaque facteur deux valeurs significatives (ou niveaux) qui correspondent aux limites du domaine de variations de celui-ci. La borne inférieure est le niveau bas (indiqué par -1).

La borne supérieure est le niveau haut (indiqué par+1). Toutes les combinaisons de niveaux sont réalisées. La dénomination 2^k a la signification suivante :le chiffre 2 représente les deux niveaux haut et bas des facteurs ,et kindi que le nombre de facteurs.

III.14.Plans de Box-Behnken :

Les points expérimentaux du plan Box-Behnken sont représentés au milieu des arêtes de chacun des côtés d'un cube. C'est un plan qui peut comporter jusqu'à douze essais, auxquels on peut ajouter des points au centre. Un plan avec trois facteurs est illustré dans la figure suivante :

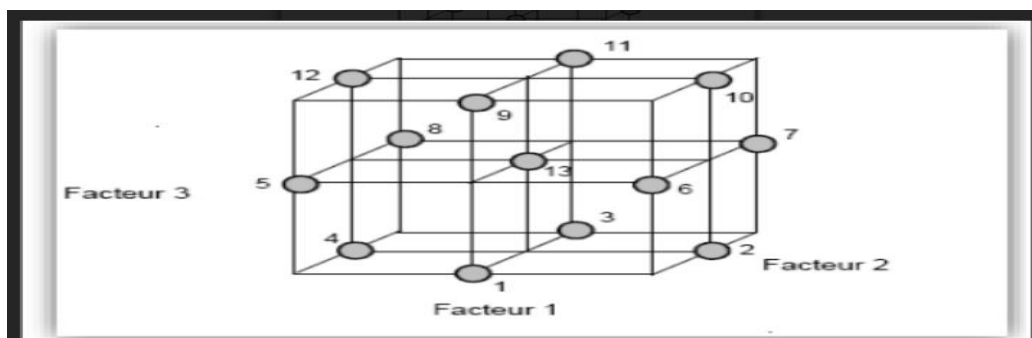


Figure III.21.plan de Box-Behnken pour trois facteurs

III.14.1.Modèle mathématique postulé :

Une loi d'évolution générale est donnée lors de l'absence de toute information concernant la fonction qui met en relation la réponse aux facteurs, elle est du type :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

Etant trop générale, il en est d'usage de prendre un développement limité de Taylor-Marc Laur in. Le développement précédant prend la forme d'un polynôme de degré plus au moins élevé si les dérivés sont considérés comme des constantes, elle s'écrit :

$$Y = a + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots + e$$

On a :

Y : c'est la réponse ou grandeur d'intérêt ;

x_i : représente un niveau du facteur i ;

x_j : représente un niveau de facteur j

a₀, a_{ij}, a_{ii} : sont les coefficients du polynôme

e: L'erreur.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV .1. Courbe de polarisation :

Le but de cet essai est la caractérisation électrochimique et la connaissance de la résistance à la corrosion du cordon de soudure de l'acier X60 dans un milieu agressive (acide sulfurique) à différentes concentrations, différentes vitesses d'écoulement de l'acide sulfurique et l'état de surface du cordon de soudure à différentes rugosités.

Cette méthode est basée sur le tracé des courbes de polarisation ($\log i = f(E)$), tirées de l'équation principale électrochimique de Butler-Volmer. D'après les hypothèses de Tafel une polarisation anodique et cathodique permet d'obtenir des courbes avec des branches linéaires connues sous l'appellation "droites de Tafel".

Cette linéarité donne une proportionnalité entre le potentiel et le courant, ce qui permet de déterminer par extrapolation le courant de corrosion. Le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion exprimée le coefficient de Tafel anodique et cathodique ainsi que la résistance de polarisation.

L'objectif d'après cette caractérisation est de tracer les courbes de polarisation ainsi les courbes de Tafel et l'extrapolation des paramètres de la cinétique de la corrosion du cordon de soudure dans l'acide sulfurique.

La polarisation potentiostat dynamique a été établie par un balayage (potentiel appliqué) de -1 volt jusqu'à 1 volt avec un pas de balayage égal à 10 mV/s, cette vitesse de balayage permet une bonne reproductibilité des résultats sans masquer les phénomènes à étudier.

Les tests de l'essai de corrosion ont été réalisés. On met en contact un échantillon d'un cordon de soudure avec un volume de 200 ml de H_2SO_4 à une concentration de [0.5 , 2.5 M] pour chaque solution avec une vitesse de rotation de l'agitateur de 100 et 300 t/min et la vitesse d'écoulement de 100 à 400t/min ces tests ont été réalisés à une vitesse de balayage de 10mV/S.

Les données de mode opératoire de cet essai sont regroupées dans le Tableau IV .1

Tableau IV .1. Représentation des paramètres opératoire de l'essai de corrosion

échantillon	Surface de l'électrode de travail (cm ²)	Valence	Densité (g/cm ³)	Masse atomique (g)	Valeur balayée (mV)	Vitesse de balayage (mV/s)
1	1.4	2	7.8	55.85	2000	5
2	1.31	2	7.8	55.85	2000	5
3	1.28	2	7.8	55.85	2000	5
4	1.10	2	7.8	55.85	2000	5
5	1.23	2	7.8	55.85	2000	5
6	1.36	2	7.8	55.85	2000	5
7	1.38	2	7.8	55.85	2000	5
8	1.5	2	7.8	55.85	2000	5
9	1.34	2	7.8	55.85	2000	5
10	1.32	2	7.8	55.85	2000	5
11	1.31	2	7.8	55.85	2000	5
12	1.29	2	7.8	55.85	2000	5
13	1.32	2	7.8	55.85	2000	5
14	1.28	2	7.8	55.85	2000	5
15	1.26	2	7.8	55.85	2000	5
16	1.24	2	7.8	55.85	2000	5
17	1.27	2	7.8	55.85	2000	5

Les vitesses de corrosion de l'acier X60 vis-à-vis le milieu étudié sont obtenues après un temps d'immersion égal à 4 min dans le milieu corrosif composé d'une solution d'H₂SO₄ selon les conditions mentionné dans le tableau IV .2. Les résultats sont regroupés dans les tableaux (IV.3)

Les tracés de la courbe de Tafel et l'extrapolation des paramètres cinétique de la corrosion du cordon de soudure sont représenté par les figures (IV.1 à IV.3)

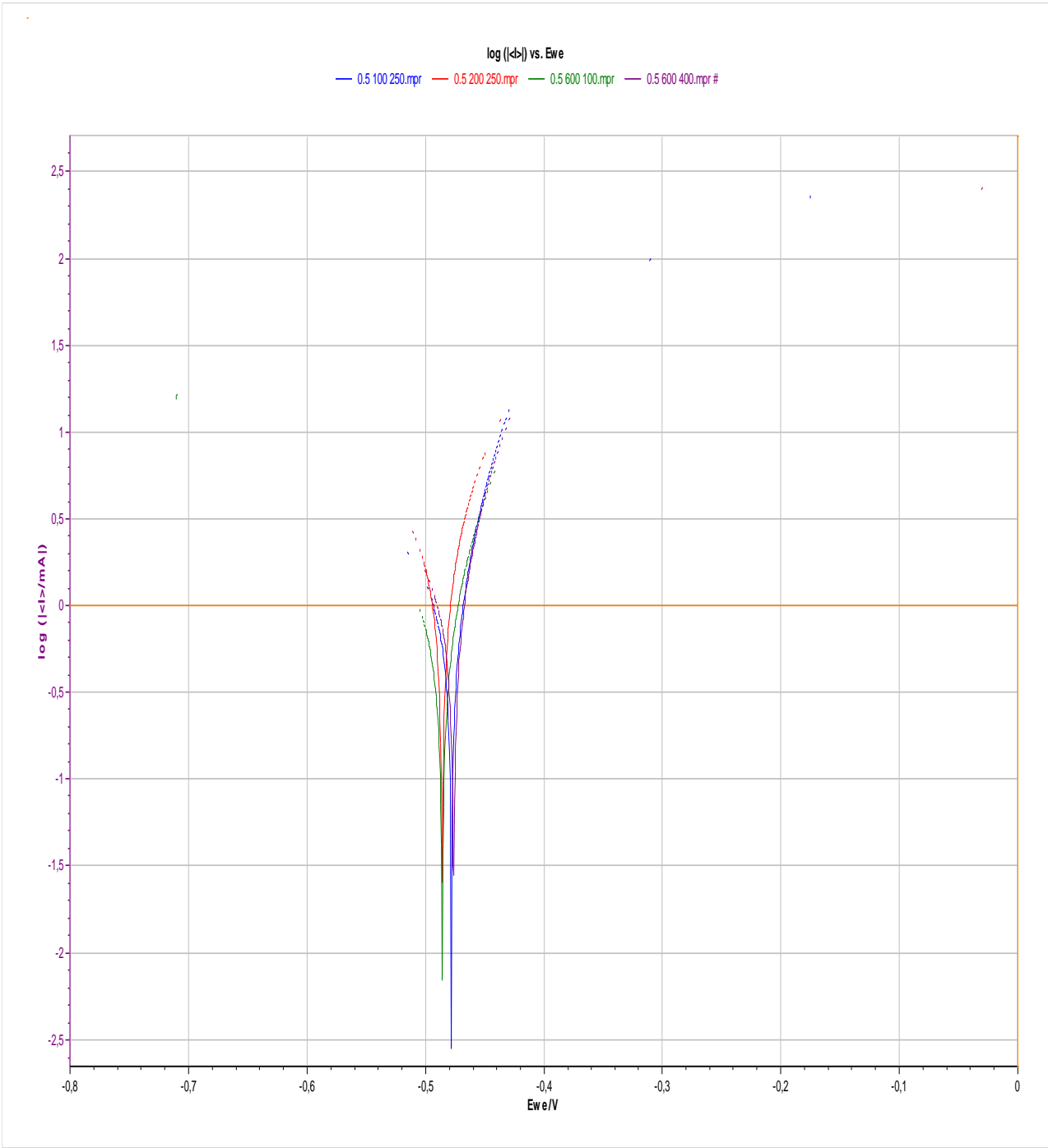


Figure IV .1 : Courbe de polarisation de l'échantillon à (C=0.5g/mol

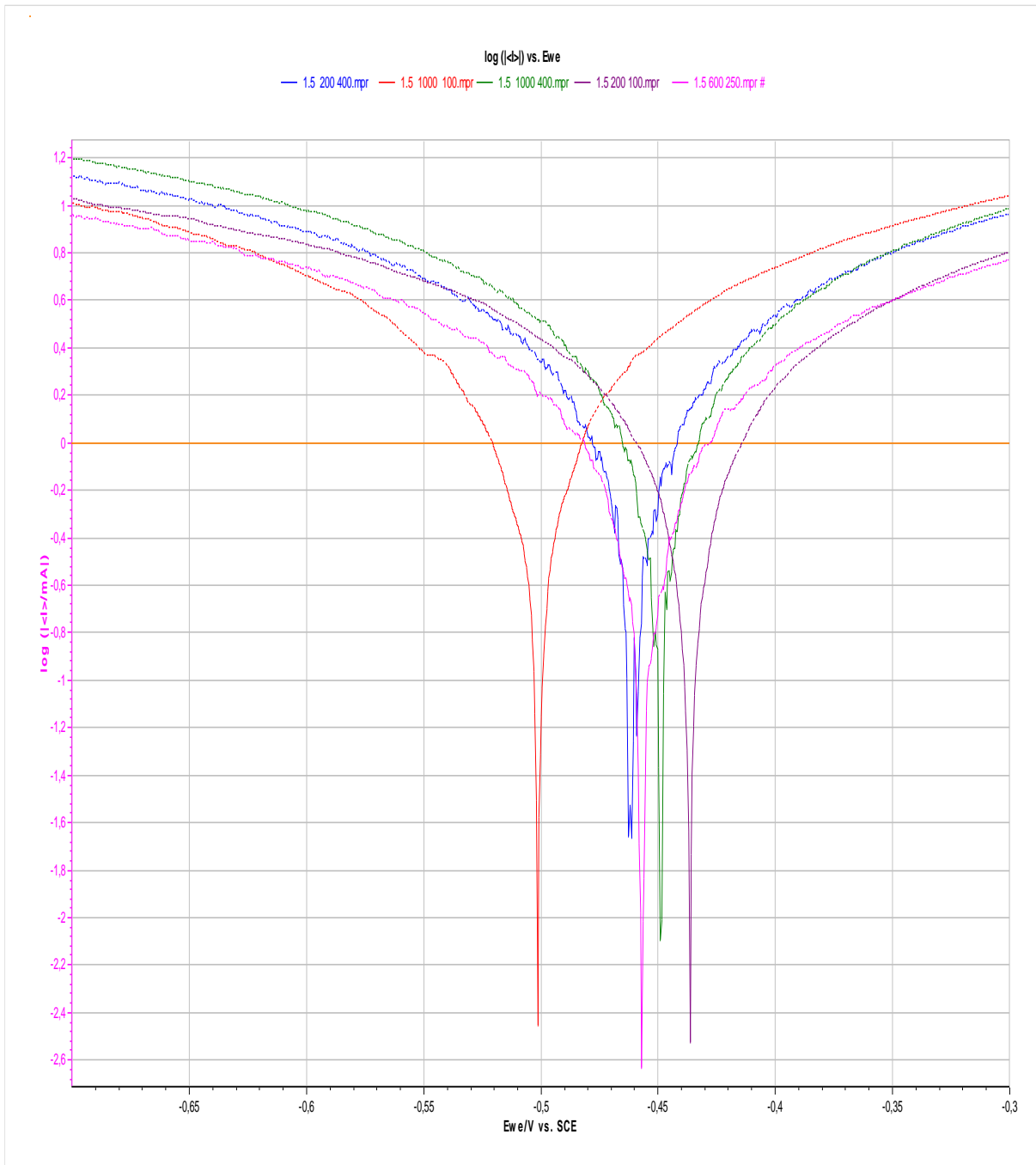


Figure IV. 2: Courbe de polarisation de l'échantillon à ($C=1.5$ g/mol)

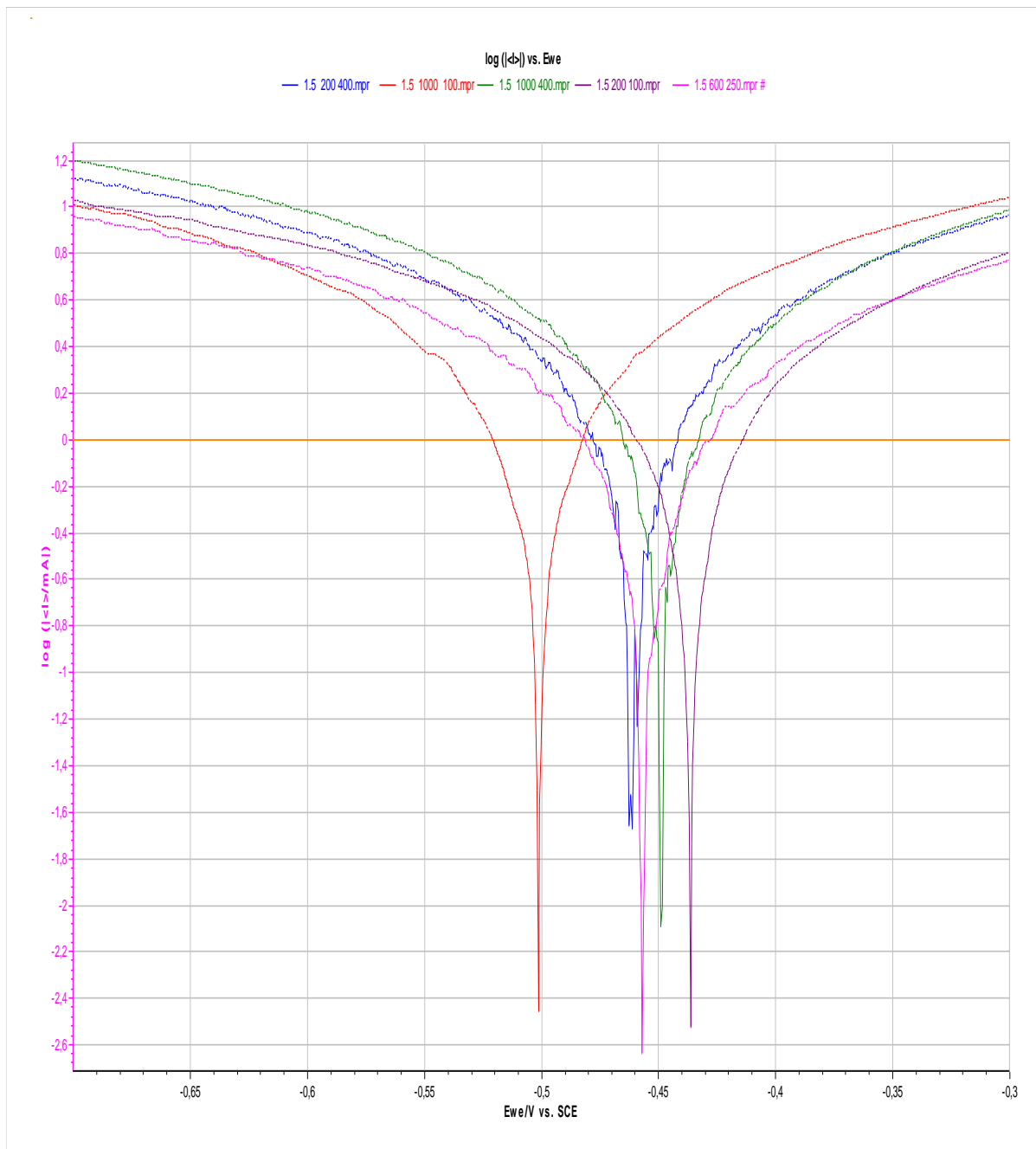


Figure IV. 3 : Courbe de polarisation de l'échantillon à (C=2.5g/mol)

Tableau IV.2 : résume les résultats obtenus de la Courbe de polarisation des échantillons étudié

Parameter à étudier			Vitesse de corrosion
Concentration de H ₂ SO ₄	Rugosité	Vitesse d'écoulement	
1,5	200	400	400
1,5	600	250	250
0,5	600	100	100
1,5	600	250	250
1,5	1000	400	400
1,5	600	250	250
0,5	200	250	250
0,5	1000	250	250
2,5	1000	250	250
1,5	600	250	250
2,5	600	100	100
1,5	200	100	100
2,5	200	250	250
1,5	600	250	250
0,5	600	400	400
2,5	600	400	400
1,5	1000	100	100

IV.2.Modélisation

Dans ce travail, le plan factoriel de box-behnken a été utilisé afin de réduire le nombre d'expérience à effectuer et de fixer les paramètres optimaux et démontrer l'effet de chaque paramètre sur un autre et sur la corrosion du cordon. On prend ($n= 2$ et $k = 3$). Ainsi, le nombre total des expériences nécessaires à cette étude est de $23 = 8$ plus le 5 point du centre donc nombre d'essai est 17.

IV.2.1. Facteurs étudiés et domaines de variation :

Dans cette partie nous allons procéder à la modélisation du processus expérimental par simulation mathématique qui aboutirait une fonction objective exprimant la vitesse de corrosion (V_{cor}) en fonction de vitesse d'écoulement(V_e), concentration de milieu (C) et rugosité de la surface (R_e).

tableau IV.3 représente le domaine étudié pour la corrosion du cordon de soudure par l'acide sulfurique.

Facteurs	Min (-)	Max (+)
Vitessed'écoulement	100	400
Concentration du milieu	0.5	2.5
Rugosité du surface	200	1000

L'équation du modèle utilisant les variables réduites est celle exprimée par l'équation :

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2+ a_{13}X_1X_3+ a_{23}X_2X_3 + a_{11}(X_1)^2 + a_{22}(X_2)^2 + a_{33}(X_3)^2+ e.....(IV.3)$$

Où a_0, a_1, a_2, a_3 , sont des coefficients linéaires, a_{12}, a_{13}, a_{23} , sont les termes d'interactions du second ordre et a_{123} est le terme d'interaction du troisième ordre X_1, X_2, X_3 , sont des valeurs adimensionnelles réduites correspondent à la contribution de la vitesse d'écoulement, de la rugosité de la surface et la concentration de l'acide sulfurique.

IV.2.2. Plan d'expérimentation et résultats expérimentaux

Le plan d'expérimentation et les résultats expérimentaux de la vitesse de corrosion obtenus selon le plan factoriel de box-behnken pour la corrosion du cordon de soudure dans l'acide sulfurique sont reportés dans le tableau IV.5, avec les 17 expériences.

Chacun des paramètres peut être exprimé dans le plan factoriel considéré par sa variable centré réduit

$$Xi = \frac{xi - \frac{ximax - ximin}{2}}{\frac{ximax - ximin}{2}}$$

.....(IV.4)

X_i : variable réduite $-1 \leq X_i \leq 1$;

x_i : variable réelle (Ve, C, Re), $i=1, 2, 3$;

Nous aurons donc

X_1 : pour Concentration de milieu

X_2 : pour Rugosité de surface

X_3 : pour vitesse d'écoulement

x_i max et x_i min : valeurs inférieure et supérieure de ces variables

Tableau IV.4. Matrice des expériences du plan factoriel complet.

N° d'essais	Paramètres Réponses			Valeurs réduites			Réponses
	Concentration de milieu (C)	Rugosité de surface (R_e)	Vitesse d'écoulement (V_e)	X_1	X_2	X_3	V_{cor}
1	1,5	200	400	-1	0	-1	11,445
2	1,5	600	250	1	1	0	27,803
3	0,5	600	100	1	0	1	28,471
4	1,5	600	250	-1	0	1	13,987
5	1,5	1000	400	0	0	0	10,896
6	1,5	600	250	0	1	1	19,23
7	0,5	200	250	0	0	0	10,543
8	0,5	1000	250	-1	1	0	21,649
9	2,5	1000	250	1	0	-1	23,437
10	1,5	600	250	0	0	0	10,518
11	2,5	600	100	0	-1	-1	24,606
12	1,5	200	100	0	1	-1	20,226
13	2,5	200	250	1	-1	0	40,762
14	1,5	600	250	0	-1	1	19,946
15	0,5	600	400	0	0	0	10,936
16	2,5	600	400	-1	-1	0	19,424
17	1,5	1000	100	0	0	0	10,11

IV.2.3. Analyse statistique des résultats

Le logiciel JMP pro 14 nous a permis d’obtenir une équation modèle codée reliant les niveaux des paramètres avec la vitesse de corrosion grâce aux données initiales (expérimentales) fournies :

$$y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}(X_1)^2 + a_{22}(X_2)^2 + a_{33}(X_3)^2$$

(IV.4)

Les valeurs des coefficients du model sont consignées dans le tableau IV.6

Tableau IV.5. Les résultats des coefficients obtenus de modèle

a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁₂	a ₁₃	a ₂₃	a ₁₁	a ₂₂	a ₃₃
10,6006	6,746	-1,9787	0,24	-3,796	0,623	0,916	7,57095	9,23795	1,16345

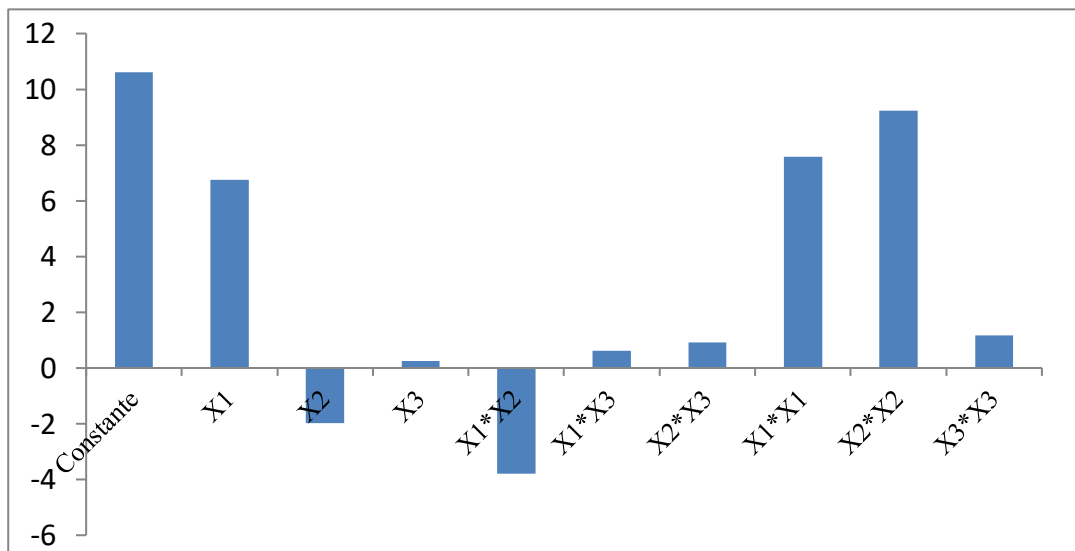


Figure IV.4. Histogramme des coefficients d’effet

La figure IV.4, indique les influences relatives des différents facteurs et de leurs interactions. Nous pouvons remarquer que la concentration de l’acide sulfurique et la vitesse d’écoulement a plus grande influence positive sur la corrosion, tandis que la rugosité de la surface du cordon possède l’effet le plus négatif sur le procédé.

Nous constatons que :

L’interaction de la concentration du milieu - la rugosité de la surface du cordon a un effet significatif et influe positivement sur la vitesse de corrosion.

L'interaction de la vitesse d'écoulement - la rugosité de la surface du cordon et les carré des trois paramètres a un effet significatif et influe sur la vitesse de corrosion.

Par contre L'interaction de la rugosité de la surface - la concentration du milieu et a un effet significatif et influe négativement sur la vitesse de corrosion.

IV.2.4. Résultats de calculs :

Les vitesses théoriques obtenues par le modèle et les différences entre les résultats expérimentaux et théoriques (résidus) sont regroupés dans le tableau IV.7

Tableau IV.6 : Résultats obtenus des vitesses de corrosion expérimental, théorique et résidu.

N° d'essais	Valeursréduites			Réponses		
	X ₁	X ₂	X ₃	V _{cor}	Vcor Cal	Résidu V _{cor}
1	-1	0	-1	11,445	12,972	-1,527
2	1	1	0	27,803	28,38075	-0,57775
3	1	0	1	28,471	26,944	1,527
4	-1	0	1	13,987	12,206	1,781
5	0	0	0	10,896	10,6006	0,2954
6	0	1	1	19,23	20,17925	-0,94925
7	0	0	0	10,543	10,6006	-0,0576
8	-1	1	0	21,649	22,48075	-0,83175
9	1	0	-1	23,437	25,218	-1,781
10	0	0	0	10,518	10,6006	-0,0826
11	0	-1	-1	24,606	23,65675	0,94925
12	0	1	-1	20,226	17,86725	2,35875
13	1	-1	0	40,762	39,93025	0,83175
14	0	-1	1	19,946	22,30475	-2,35875
15	0	0	0	10,936	10,6006	0,3354
16	-1	-1	0	19,424	18,84625	0,57775
17	0	0	0	10,11	10,6006	-0,4906

IV.2.5. Analyse et validation du modèle

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par le modèle avec les valeurs expérimentales, nous traçons les vitesses de corrosion expérimentales en fonction des vitesses de corrosion théoriques. Nous remarquons d'après la figure IV.5 que les points sont regroupés autour de la bissectrice ($y = x$) avec un coefficient de corrélation égale à 0,9767, ce qui signifie que les vitesses expérimentaux et théoriques sont fortement identiques. Ce coefficient est calculé grâce au logiciel JMP Pro 14.

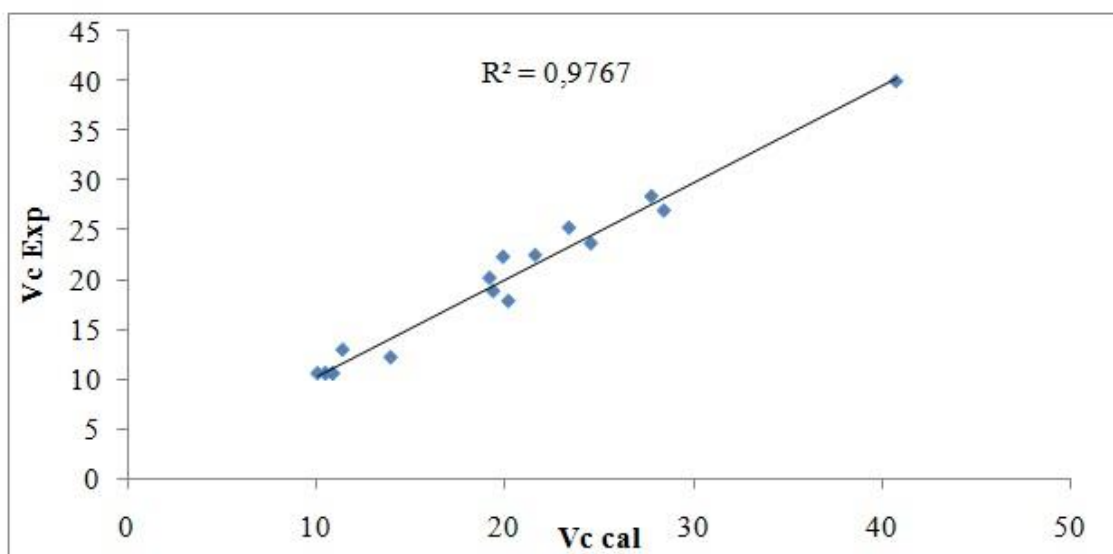


Figure IV.5. Courbe des vitesses de corrosion expérimentale, théorique

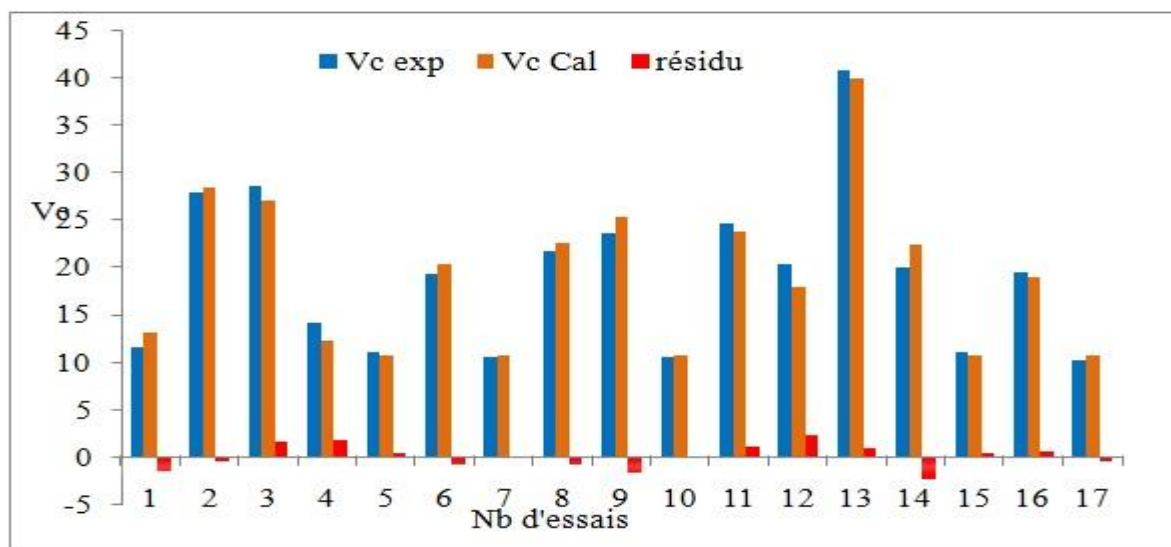


Figure IV.6. Histogramme des vitesses de corrosion expérimental, théorique et résidu

Il est à noter aussi que les résidus (représentants les différences entre les vitesses de corrosion expérimentaux et théoriques) qui sont tracés sous forme d'histogramme (figure IV.6) sont très faibles par rapport aux valeurs des vitesses expérimentaux pour la grande majorité des observations.

IV.2.6. Résolution de modèle :

Les effets individuels et combinés des différents paramètres sont discutés sur la base de la valeur absolue et du signe de chaque coefficient. Ces valeurs des coefficients définissent la force de l'effet correspondant et la façon dont ils agissent sur la vitesse de corrosion. La résolution du modèle nous donne les modèles polynomiales présentés ci-dessous.

L'équation du modèle s'écrit :

$$V_{co} = 10,006 + 6,746X_1 - 1,97875X_2 + 0,24X_3 - 3,796X_1X_2 + 0,623X_1X_3 + 0,916X_2X_3 + 7,57095(X_1)^2 + 9,23795(X_2)^2 + 1,16345(X_3)^2$$

Dans notre cas et vu le modèle trouvé, nous constatons que le paramètre le plus déterminant est qui a un effet positif sur la vitesse de corrosion est la vitesse d'écoulement (X_3) et la concentration de milieu (X_1). En second lieu, la rugosité de la surface (X_2) avec a un effet important mais influe négativement sur la vitesse de corrosion.

Concernant les interactions (rugosité-concentration), elles représentent une influence négative sur la vitesse de corrosion, son effet est négative (a_{12}). Cependant, pour les autres interactions (vitesse d'écoulement-concentration) (a_{13}), et (vitesse d'écoulement - rugosité) (a_{23}) nous remarquons que tous ces effets ont une influence positive sur la vitesse de corrosion.

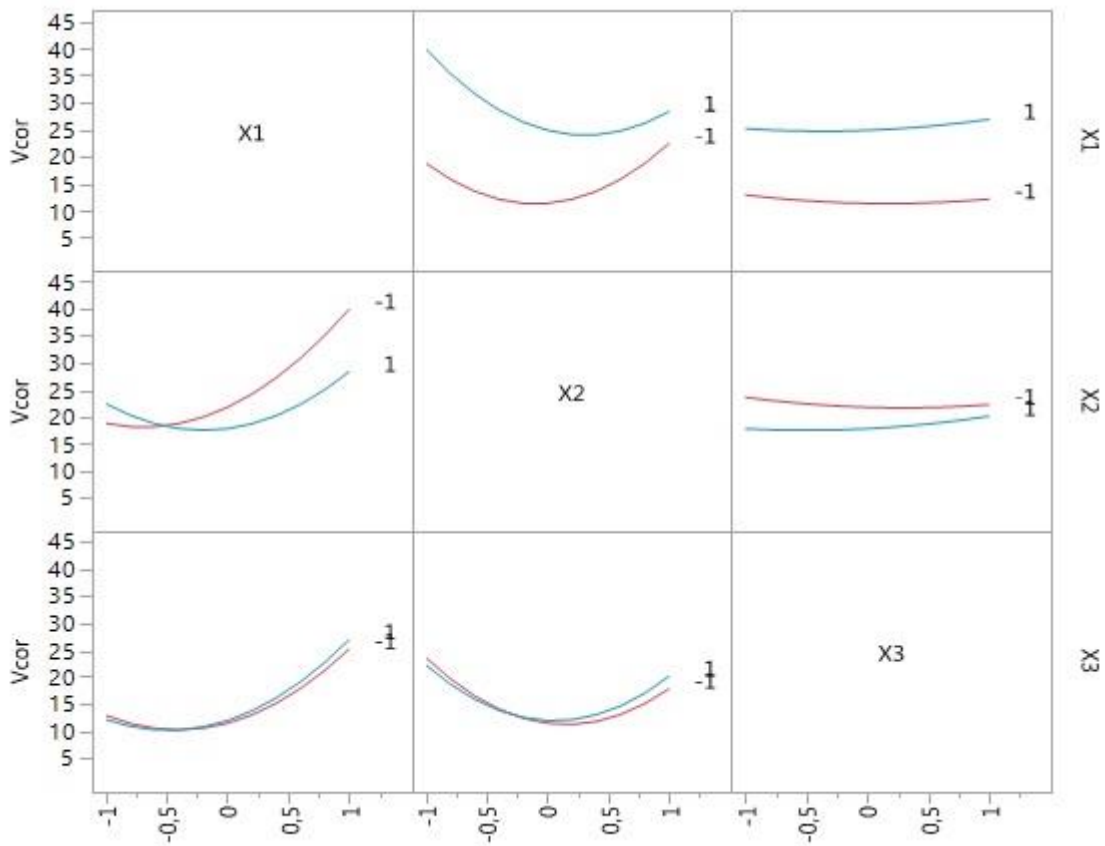


Figure IV.7 : Courbes d'interaction

IV.2.7. Optimisation :

Afin de déterminer théoriquement les paramètres optimaux du processus de corrosion du cordon de soudure dans le domaine considéré, le principe de l'optimisation nous renvoie à l'étude de la dérivée de la fonction ou du modèle.

Soit la fonction à optimiser :

$$V_{cor} = 10,006 + 6,746X_1 - 1,97875X_2 + 0,24X_3 - 3,796X_1X_2 + 0,623X_1X_3 + 0,916X_2X_3 + 7,57095(X_1)^2 + 9,23795(X_2)^2 + 1,16345(X_3)^2$$

La variation de la vitesse de corrosion en fonction des trois paramètres : la concentration de milieu, la rugosité de surface et la vitesse d'écoulement étant linéaire, l'optimum pour ces trois paramètres correspond aux valeurs qui donnent une vitesse de corrosion minimale

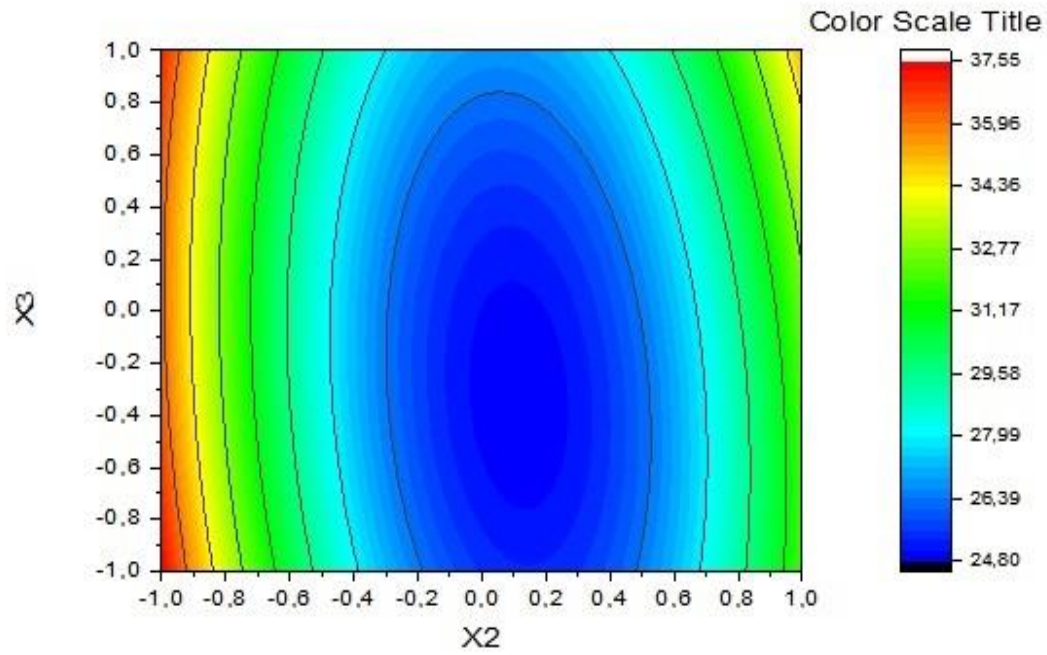
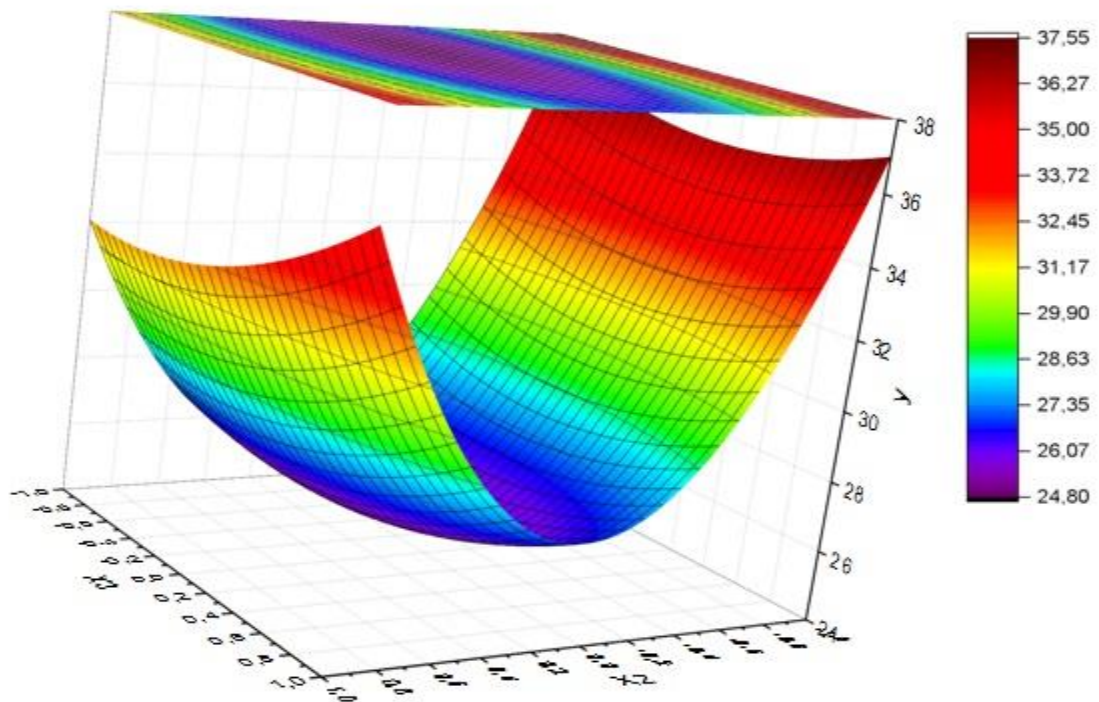


Figure IV.8 : Courbe iso-réponse montrant l'influence de la vitesse



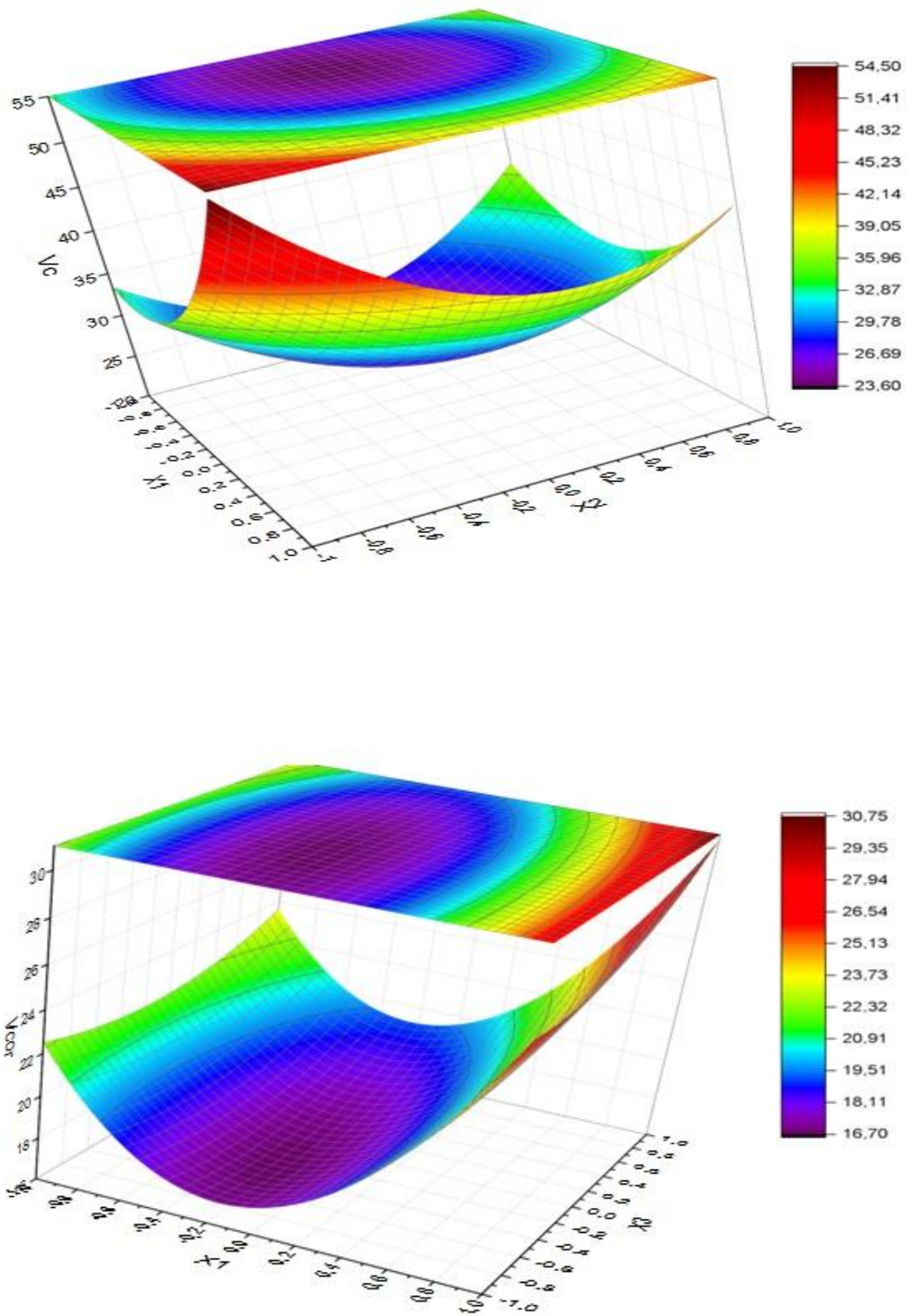


Figure IV.9 : Courbe de profileur de surface des interactions

D'après cette figure (IV.8 et 9) la vitesse de corrosion basse se situe dans un domaine de concentration de milieu et rugosité de surface élevée. Ce résultat obtenu sur la base de dix-sept expériences et en adéquation avec celui qu'on peut facilement déduire à partir des résultats expérimentaux

Les valeurs des paramètres codes optimaux sont illustrées dans le tableau IV.8

Tableau IV.7 : valeurs des paramètres optimaux codés

Variable	Valeur critique
X ₁	-0,441909
X ₂	0,0158629
X ₃	0,0089299

Nous avons utilisé équation (IV.4) Pour déduire les valeurs réelle des paramètres optimaux à partir des résultats obtenus dans le tableau IV.16

Ces trois valeurs sont :

$$V_e = 137,08 \text{ t/min}, R_e = 406,639\text{mm} \text{ et } [\text{H}_2\text{SO}_4] = 1,0782413\text{g/mol}$$

Ces conditions conduisent à une vitesse de corrosion de $V_{\text{cor}} = 9.095 \text{ mm/an}$

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les caractéristiques mécaniques de l'acier API 5 L X60 selon l'exigence des clients sont présentées. Les différents essais de comportement à la corrosion, la microstructure, la dureté, montrent que les propriétés mécaniques sont convenables pour l'utilisation dans le transport des hydrocarbures.

L'étude bibliographique, nous avons mis en évidence certaines informations disponibles sur le comportement structural et mécanique d'un cordon de soudure de l'acier X60, leur évolution suite à une opération de soudage et en fonction de la température lors de traitements thermiques.

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude électrochimique d'un cordon de soudure X60 dans un milieu corrosif à des conditions opératoire sous l'effet de certain paramètre tel que la concentration du milieu, la vitesse d'écoulement et la rugosité de la surface du cordon.

Les différentes expériences menées au laboratoire ont permis de définir les différents paramètres influant ce procédé de corrosion, et certaines conclusions ont pu être tirées :

La vitesse de corrosion atteint sa valeur maximale pour une valeur d'acidité égale à 0.5 g/mol Cette vitesse est justifié par la présence d'une vitesse d'écoulement maximale (251,34 t/min) et la plus identifiée par une surface rugueuse (606,35 mm).

► La faible vitesse de corrosion 9.095 mm/an est obtenu pour une concentration en acide sulfurique 1,078 g/mol.

La dégradation du cordon est élevée à des états de surface rugueuse.

► La méthode du plan factoriel est un outil efficace pour une approche méthodologique de l'expérimentation. L'application de cette technique à la corrosion du cordon de soudure X60 a abouti aux résultats suivants :

La concentration de l'acide sulfurique et la vitesse d'écoulement a plus grande influence positive sur la corrosion, tandis que la rugosité de la surface du cordon possède l'effet le plus négatif sur le procédé.

Références Bibliographiques

- [1] Marc GRUMBACH, Technique de l'ingénieur, «Aciers microalliés», M4 525.
- [2] BLONDEAU REGIS «métallurgie et mécanique du soudage», ED. Lavoisier, Paris, Hermès Sciences Publications, 2001.
- [3] BAIN E. C et al, Facteurs métallurgique déterminants les propriété mécanique ,1968
- [4] Bou17: Y. Bouguerra et S. Bourahla, "Analyse structurale de l'acier X-42 du point de vue fissuration à froid en soudage", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2017.
- [5] ARC 08]: ARCELORMITTAL. Catalogue produit – Edition européenne[en ligne]. Disponible sur: <http://www.arcelormittal.com/automotive> (consulté le 03.12.2008), 2008
- [6] A Short introduction to corrosion and its control, corrosion in the metals and its prevention, National Corrosion Service, NPL, 2003. PP. 1-9, disponible sur: [http://www.npl.co.uk/lmm/docs/_basic_of_corrosion_control .pdf](http://www.npl.co.uk/lmm/docs/_basic_of_corrosion_control.pdf)
- [7] Hicham E., Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique, Mémoire d'Etudes Supérieures Approfondies, Université de Oujda (Maroc), 2000.
- [8] Corrosion des métaux, ENSPM formation industrie -IFP training, France, 2005.
- [9] Francois R., Corrosion and de posists course, Master of science in oil and gas production engineering, France, 2005.
- [10] :R. Mehibil. Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium. Magister 2008. Université de Skikda.
- [11] : K. ROUIBAH, mémoire de magistère" Contribution à l'étude du comportement électrochimique du couple galvanique acier au carbone/anodes de zinc dans l'eau de mer naturelle", (2003).
- [12] : Gérard B, Henri M., Corrosion des métaux et alliages, Hermès science publications, Paris, 2002.
- [13] : H.El bakouri. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux au carbone en milieu acide orthophosphorique par un antibiotique organique. Mémoire pour du DESA. Université Mohammed 1 – oujde.
- [14] : Matériaux Métalliques "Phénomènes de Corrosion, 4ième partie " Les différentes formes de corrosion aqueuse".
- [15] : Soraya KHIRECHE, mémoire de magister "Elaboration et étude de la corrosion des alliages

Al-Zn et Al-Sn dans une solution à 3% en poids NaCl". Université de Tizi ousou.

[16] : C. DEFONTAINE, " Mécanismes de corrosion, systèmes de protection et vieillissement accéléré", Journée thématique du 24 mars 2011.

[17]. BILL NIMMO , GARETH HINDS. Beginners guide to corrosion. NPL, February 2003. PP.1-9, disponible sur: http://www.npl.co.uk/Imm/docs/beginners-guide_to_corrosion.pdf.

[18]. A. ZEGHLOUL. Mécanismes d'endommagement des structures métalliques, disponible sur : [www.mim.univ-metz.fr/formations/documents/1/cours DMLuno.pdf](http://www.mim.univ-metz.fr/formations/documents/1/cours_DMLuno.pdf). PP.5-39.

[19] F.Dabosiet al, Corrosion localisée, Ed. Physiques, 1994.

[20] : Raymond Desjardins. Le traitement des eaux, édition de l'école Polytechnique de Montréal ,2e édition.

[21] H. Ma, T. Song, H. Sun et al., Thin Solid Films, 516, 1020, 2008.

[22] Y. Feng, S. Chen, H. Zhang et al., Appli. Surf. Sci., 253, 2812, 2006.

[24] K. Aramaki, T. Shimura, Corros. Sci., 47, 1582, 2005.

[23]. H.Uhlig, « corrosion et protection », Edition Technique et Documentation, Dunod, Paris, (1970).

[24] LANDOLT D. : Traité des matériaux .12. Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1997

[25] A. Bendjebbour, Corrosion localisé des aciers API SL - de la ligne DE ASR/MP sollicité en sol algérien, Université de Tlemcen, 2011.

[26] Guy MURRY, Technique de l'ingénieur, «Soudage et soudabilité métallurgique des métaux», M715.

[27] D.BENSAIDA, « Feliachi » Technologie Office De Publication Universitaires 2eme Edition ; (2009)

[28] Collection Terme Et Définition Utilise En Soudage Et Technique Connexes Publications De La Soudure Autogene, (1996)

[29] R. Cazes Procédés de soudage: principes généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur, B7700

[30] A. OULDAMER Soudage, Séminaire. E.N.P (2004)

[31] BOUMELITA Yassine (Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier API X60 en fonction de la succession des réparations Application dureté)

[32] Esab Ab Welding Equipment Ab,Laxà, Sweden, (2007)

[33] J. Barralis et G. Maeder. "Précis métallurgie, élaboration, structures. Propriétés, Normalisation". Edition NATHAN. 1997.

[34] Blondeau REG IS «métallurgie et mécanique du soudage», ed. Lavoisier, Paris, Hermès Sciences Publications, 2001

- [35] B. POLIZZI, « Fumees De Soudage : Efficacité Des Différents Systèmes De Protection Du Soudeur Et De Son Environnement En Soudage Smaw », Centre Technique Des Industries Mécaniques, France, (2004).
- [36] S. Benissaad "Le soudage ", édition OPU
- [37] BENEDDEB Mostefa Étude les défauts de soudage des pipelines Construction Mécanique Université Mohamed Khider Biskra 2012
- [38] H. Granjon. "Bases métallurgique du soudage", 2eme édition Publication du soudage et de ses applications, 1995, 251p
- [39] R. Varisellaz Soudage: éléments de conception et de réalisation, Dunod, (1982)
- [40] Mémoire de Fin d'Etudes En vue de l'obtention du diplôme de MASTER Eude les défauts de soudage des pipelines BENEDDEB Mostefa 2012
- [41] notech.franceserv.com/soudure-controle.html (consulté le 03.12.2008), 2008

