

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Technologie des Matériaux

Intitulé du mémoire

*Influence des paramètres de soudage sur
les caractéristiques physico-chimiques et
mécaniques des soudures*

Présenté par :

OUANANI Hanaa

HOCEINE Selma

Promotrice :

Pr. BOUCHENAFI Naima

Co-promoteur :

Mr. BENLMNOUER M.Farid

Année universitaire 2016/2017



Nos remerciements vont d'abord à Dieu le tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Nous tenant à remercier sincèrement M^{me} BOUCHENAFI NAÏMA, qui, en tant que directrice de ce mémoire, s'est toujours montrée à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'elle a bien voulu nous consacrer.

On remercie également notre Co-promoteur Mr BENLMNEOUER MOHAMED FARID, attaché de recherche dans le CRTI pour son aide, son suivi, sa disponibilité et son expérience qui nous ont été une aide précieuse tout au long de notre travail de recherche.

Nous remercions vivement le Professeur BENAMAR MED AMINE directeur du laboratoire du laboratoire FUNDAPL de l'université Blida 1, pour nous avoir permis de réaliser l'analyse MEB au sein de son laboratoire.

Nous souhaitant adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nos plus vifs remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel du CRTI, en particulier : M^r BOUTAGHANE ainsi qu'à Mlle N.ZOUBIRI, Mr N.BENSAÏD, et Mr M.IDDIR pour leurs gentillesse, leurs aides et leurs disponibilités.

On porte envers l'ensemble des enseignants du département de Génie des Procédés qui ont contribué à notre formation, une immense gratitude, et en particulier on remercie Mme ZERMANE FAÏZA responsable d'option Technologie des Matériaux pour son aide sa gentillesse durant toutes ces années d'études.

Bien qu'il nous soit impossible de citer tous ceux et celles qui ont contribué et qui nous ont soutenu lors de la réalisation de ce travail, qu'ils soient assurés de notre profonde reconnaissance.

Merci

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 :	Diagramme d'équilibre Fe-C	04
Figure I.2 :	Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise en jeu	10
Figure I.3 :	Principe du procédé soudage TIG	11
Figure I.4 :	Forme d'onde et chemin des électrons en courant alternatif	12
Figure I.5 :	Forme d'onde du courant pulsé	12
Figure I.6 :	Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion	15
Figure I.7 :	Corrosion par piqûres.....	17
Figure I.8 :	Schéma du processus de corrosion par piqûres :a) amorçage, b) propagation.....	18
Figure I.9 :	Corrosion Intergranulaire.....	19
Figure I.10 :	Corrosion Généralisée (rouille) des pièces en acier.....	19
Figure II.1 :	Les échantillons prélevés	23
Figure II.2 :	Photo montrant les plaques soudées	26
Figure II.3 :	Les échantillons attaqués	28
Figure II.4 :	Schéma du dispositif utilisé dans le test électrochimique	30
Figure III.1 :	Macrographies des soudures.....	34

Figure III.2(a,b) :	Micrographies les matériaux de base: a :(X70) et b : (42CD4).....	35
Figure III.3 :	Micrographies des joints soudées de (E1, E2, E3 et E4).....	36
Figure III.4:	Profil de microdureté des joints de soudures.....	39
Figure III.5 :	Représentation graphique de l'impédance des matériaux de base.....	41
Figure III.6 :	Représentation graphique Impédances des échantillons soudés E1, E2, E3 et E4.....	41
Figure III.7.	Représentation graphique de $\text{Log}(I)=f(E)$ des matériaux de base : a (42CD4),b (X70).....	43
Figure III.8.	Représentation graphique d' $\text{Log}(I)=f(E)$ pour les soudures E1, E2, E3 et E4.....	44
Figure III.9 :	Microstructure des matériaux de base après test de corrosion: a (42CD4) et b (X70).....	46
Figure III.11 :	Microstructures des échantillons après le test de corrosion de E1, E2, E3 et E4.....	47
Figure III.12 :	Microstructure des matériaux de base a(42CD4), b(X70) par MEB.....	49
Figure III.13 :	Microstructure des zones fondues des échantillons E1, E3 par MEB.....	50
Figure III.14 :	Microstructures des zones fondues des échantillons E2, E4 par MEB.....	50
Figure III.15 :	Microstructures des ZAT de X70 (E1, E4) par MEB.....	51
Figure III.16 :	Microstructures des ZAT de 42CD4 (E1, E4) par MEB.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers.....	08
Tableau I.2 : Les différents facteurs de la corrosion	20
Tableau II.3 : Paramètres de soudage (TIG).....	24
Tableau II.4 : Réactif métallographique d'attaque.....	27
Tableau III.1 : Composition chimique des matériaux de base 42CD4 et X70 en % (en poids).....	33
Tableau III.2 : Composition chimique des métaux d'apport (E6010) et (Ok 60) (en poids).....	33
Tableau III.3 : Les résultats des calculs par Image j des matériaux de base a(X70)et b(42CD4).....	38
Tableau III.4 : Les résultats des calculs par Image j pour les 4 échantillons.....	38
Tableau III.5 : Résultats de la capacité et la résistance des échantillons.....	42
Tableau III.6 : Résultats de paramètres de corrosion.....	44

LISTE DES ABREVIATIONS

- CA** : Courant Alternatif.
- CC** : Courant Continu.
- CCD** : Composé chimiquement défini.
- DCC** : Distribution Cost Charge.
- ECS** : Electrode au Calomel Saturé.
- ENH** : Électrode Normale à Hydrogène.
- ET** : Electrode de Travail.
- GMA** : Grue a Montage Automatique.
- HSLA** : Acier Faiblement Allié à Haute Limite Elastique.
- Lp** : Linear polarization.
- MAG** : Metal Active Gas.
- MB** : Métal de Base.
- MEB** : Microscope Electronique à Balayage.
- MIG** : Metal Inert Gas.
- RX** : Rayon X.
- EIS** : Potentio Electrochemical Impedance Spectroscopy.
- SMAW** : Shielded Metal Arc Welding.
- TIG** : Tungsten Inert Gaz.
- ZAT** : Zone Affectée Thermiquem

ZF : Zone Fondue.

ZFP : Zone de Fusion Partielle.

ZL : Zone de Liaison.

Abstract

Materials welding assembly occupies an important place in the world of industry.

The objective of our experiment is to study microstructural, mechanical and electrometrical behavior of X70-42CD4 dissimilar weld with two filler metals and two weld currents. The main problem with these welds is the formation of metallic precipitations in the bonding zone between the two basic materials due to the difference between the contents of the additive elements existing in the two materials. as the magnification of the grains in the zone affected thermally by the thermal welding cycles. The results of our work show that alternative TIG welding (between low Carbone steel and carbone steel) presents the butter comportment in metallurgical comportement and microhardness and to low Carbone filler metal, also It was established in this study, that nickel alloy filler the best electromecanical behavior. in the thermally affected zones of the steel (42CD4), the morphology of the martensite became a dominant phase with an increase in the bainitic phase in the sample welded by alternating current. This phase is favorable for mechanical behavior. In addition, the ZATs of the X70 steel have undergone ferritic grain magnification, this magnification becomes light in the alternating current sample and the Ok60 metal.

Keywords: X70, TIG Welding, 42CD4, heterogeneous welding

Résumé

L'assemblage des matériaux par soudure hétérogène occupe une place importante dans l'univers de l'industrie. L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement microstructural mécanique, et électrochimique d'une soudure hétérogène de X70-42CD4, le problème principal de ces soudures est la formation des précipitations métalliques dans la zone de liaison entre les deux matériaux de base due à la différence entre les teneurs des éléments d'addition qui existe dans les deux matériaux, Il existe aussi d'autres problèmes tel que le grossissement des grains dans la zone affectée thermiquement par les cycles thermiques de soudage. Les résultats obtenus montrent que le soudage alternatif présente le meilleur comportement mécanique, ainsi, on a constaté que le soudage par un alliage à base de Nickel présente le meilleur comportement électrochimique, dans les zone affectées thermiquement de coté de l'acier (42CD4), la morphologie de la martensite est devenue une phase dominante avec une augmentation de la phase bainitique dans l'échantillon soudé par courant alternatif. Cette phase est favorable pour le comportement mécanique. En outre, Les ZAT de l'acier X70 ont subi un grossissement de grains ferritiques, ce grossissement devient léger dans l'échantillon soudé par courant alternatif et le métal Ok60.

Mots clés : HLE, TIG, 42CD4, soudure hétérogène,

ملخص

تجميع المواد بواسطة لحام غير متجانسة تحتل مكانة هامة في عالم الصناعة. والهدف من هذا العمل هو دراسة السلوك المجهريّة الميكانيكية والكهروكيميائية للحام غير متجانسة من X70-42CD4. المشكلة الرئيسية مع هذه اللحامات هي تشكيل راسبات معدنية في منطقة الترابط بين اثنين من المواد الأساسية بسبب الاختلاف بين محتويات العناصر المضافة الموجودة في اثنين من المواد. كما تضخم الحبوب في المنطقة المتضررة حراريا من قبل دورات اللحام الحراري. وأظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن اللحام بالتناوب يقدم أفضل السلوك الميكانيكي. وأيضاً، فقد وجد أن لحام بسبائك النيكل يتيح أفضل سلوك كهروكيميائي للحام.

الكلمات الرئيسية: التلحيم لحام غاز حامل التنغستن الفولاذ X70,42CD1، لحام غير متجانس.

Table des matières

Introduction	1
---------------------------	---

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1 Preamble.....	3
I.2. Etat de l'art.....	3
I.3. Les aciers	4
I.4. Diagramme Fe/C	4
I.5. Classification des aciers	5
I.6. Effet des éléments de microalliage sur les propriétés	7
I.7. Roles des éléments d'addition	8
I.8. Soudabilité.....	8
I.9. Le soudage.....	8
I.10. Procédé de soudage	9
I.11. Soudage Tungsten Inert Gaz TIG 000.....	10
I.12. Types de soudures	14
I.13. Caractéristiques de la soudure	15
I.14. La corrosion.....	16

Chapitre II : MATERIELS ET METHODES

II.1. Introduction.....	21
II.2. Matériaux utilisés.....	21
II.3. Préparation des échantillons	22
II.4. Procédure de soudage.....	23
II.5. Métallographie optique	26
II.6. Caractérisation électrochimique	29
II.7. Caractérisations mécaniques	31

II.8 Analyse par microscope électronique à balayage.....	32
--	----

CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

III.1. Introduction	33
III.2. Resultats de la composition chimique des materiaux utilises	33
III.3. Résultats d'examen macrographique	34
III.4. Résultats d'examen micrographique	35
III.5. Resultats des essais mecaniques (microdurete)	39
III.6. Resultats electrochimiques de corrosion.....	40
III.7. Résultats des analyses par microscope optique à balayge	48
Conclusion.....	53

INTRODUCTION

L'un des sujets récents de recherche consiste à apporter une contribution à la problématique du soudage de matériaux dissemblables, métallurgiquement peu compatibles, ou de matériaux qui, de part leurs caractéristiques particulières rendant leur soudage direct difficile nécessitent le recours au soudage hétérogène, par l'utilisation d'un matériau d'apport de nature innovante ou bien l'utilisation de nouveaux paramètres de soudage.

Dans ce travail on s'intéresse à des jonctions hétérogènes qui peuvent être utilisés comme technique d'assemblage dans les différentes industries comme les centrales électriques, l'industrie de construction mécanique et l'industrie des pipelines [1].

Les différentes nuances faiblement alliées HSLA (principalement utilisées dans les projets pétroliers) rentrent aussi dans la fabrication des tôles pour les armatures des machines [2] car ils présentent un nombre d'avantages considérable comme les propriétés mécaniques et électrochimiques, et leurs utilisations pour construire une charpente métallique est de plus en plus répandue. Cependant, les caractéristiques des jonctions bimétalliques entre les aciers hauts limite élastique et les aciers alliés durs (trempe et revenu) ne sont pas encore vérifiées, en terme soudabilité, propriétés mécaniques et métallurgiques.

Notre projet s'inscrit dans la conception, la réalisation et le développement d'une grue à montage automatique GMA réalisée dans le centre des technologies industrielles CRTI.

Le travail consiste à étudier les propriétés des soudures hétérogènes entre l'alésage de rotation fabriqués en acier 42CD4 et une tôle épaisse en acier faiblement allié lors d'une fabrication d'une grue au niveau du Centre de CRTI afin de déterminer la condition en service de ce type de liaison. Cette étude se fait par la variation des deux courants différents et deux types de métal d'apport, en particulier d'étudier le comportement mécanique et physicochimique des joints de soudures avec l'évolution microstructurales.

Pour les matériaux de base nous avons utilisé deux nuances : acier faiblement allié X70, et acier allié 42CD4, et Pour les métaux d'apport nous avons utilisé une électrode faiblement alliée (E6010) et une électrode à base de Nickel (Ok60).

Pour réaliser ce travail nous avons adopté un plan qui consiste à scinder l'étude en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous exposons l'étude bibliographique menée dans le cadre de cette étude. La première partie constitue un bref rappel sur les aciers faiblement alliés, on y aborde entre autres les éléments et le diagramme Fer-Carbone, les caractéristiques des structures métallurgiques susceptibles d'être rencontrées dans les soudures en cette acier, la deuxième partie concerne les procédés de soudage et phénomènes métallurgiques intervenant lors du soudage TIG des deux types d'aciers.

Le deuxième chapitre concerne l'approche expérimentale de notre travail, dans ce chapitre nous présenterons les matériaux sur lesquels notre étude a été réalisée ainsi que la description des modes opératoires de toutes les techniques expérimentales utilisées.

Le troisième chapitre concerne les « résultats et discussion », dans ce chapitre nous regroupons les résultats obtenus lors du soudage des deux tôles avec les paramètres optimaux obtenus.

Chapitre

1

*Synthèse
bibliographique*

Chapitre

2

*Matériels
et
méthodes*

*Résultats
et
discussion*

Conclusion

Introduction

Annexe

Références bibliographiques

I.1 PREAMBULE

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 vaste gamme de transformations qui permettent de faire varier considérablement les propriétés mécaniques des aciers, en recourant à l'addition d'éléments d'alliages et aux différents traitements mécaniques, thermiques et chimiques.

I.2 ETAT DE L'ART

Les soudures hétérogènes ont été largement utilisées, dans des applications industrielles et au niveau des chantiers, sous leurs formes des tôles, des pipes ou des structures modifiées. Elles ont trouvé un large champ d'applications surtout dans des procédés de soudage par fusion grâce à leurs caractéristiques qui peuvent être adaptées après des traitements thermiques [1,3]. Les soudures hétérogènes Inox/acier, Inox/Inox, Aluminium/acier et acier/acier sont souvent obtenus pour différentes exigences [4,5], parmi lesquelles on cite une soudure entre un acier trempant revenu (42CD4) avec un acier de faible teneur en carbone (X70) qui semble être très intéressante pour la réalisation d'une grue GMA dans notre centre.

Le problème principal des soudures hétérogène est la formation des précipitations métalliques dans la zone de liaison entre les deux matériaux de base due à la différence entre les teneurs des éléments d'addition qui existe dans les deux matériaux, Il existe aussi d'autres problèmes tel que le grossissement des grains dans la zone affectée thermiquement par les cycles thermiques de soudage [6,7].

La soudure hétérogène fait l'objet de plusieurs études, Azizieh [8] a évalué la soudabilité entre un acier trempant revenu (CK60), un acier de faible teneur en carbone (ST37) en utilisant un procédé de soudage par friction. Il a obtenu des interfaces très dures et des propriétés mécaniques discutables à travers les microstructures présentées et le mode de soudage.

Notre travail est basé sur l'amélioration des propriétés physico-chimiques des soudures hétérogène par la modification des métaux d'apport et le mode de soudage.

I.3 LES ACIERS :

L'acier est un alliage de fer-carbone renfermant au maximum 2% de ce dernier élément. Il peut contenir de petites quantités d'autres éléments incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage. Il est considéré comme un acier allié. La teneur en carbone de certains de ces aciers alliés peut parfois dépasser 2%.

I.4. DIAGRAMME FER-CARBONE :

L'acier est un alliage de fer-carbone en proportions diverses, ainsi les aciers titrent moins de 2,1% de Carbone (limite théorique). Au-delà de cette teneur l'alliage est nommé fonte. La limite de 2,1% correspond à l'extrémité du palier eutectique gamma- Fe₃-C du diagramme fer-carbone (Figure.I.1). Ainsi tout au moins à l'équilibre les aciers se solidifient sans apparition d'eutectique c'est-à-dire en absence de carbures Fe₃C primaires inversement aux fontes. Les carbures pourront toujours être dissouts dans le domaine austénitique à l'inverse des fontes.

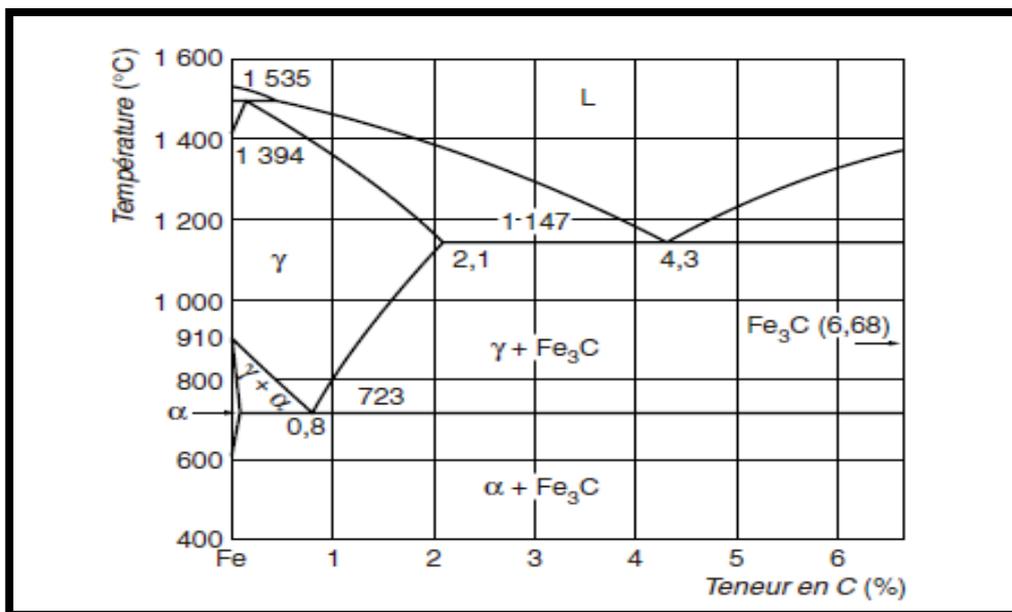


Figure I.1 Diagramme Fe/C [9]

I.4.1. Les différentes phases du système Fer-Carbone

➤ **La ferrite α**

Solution solide d'insertion de carbone dans le Fer α , à structure cubique centrée. Elle est relativement tendre, peu tenace, mais très ductile.

➤ **La ferrite δ**

Solution d'insertion de quelques atomes de carbone dans le fer δ . Sa structure est cubique centrée. Il se forme à la marge 1394-1538 °C et renferme 0.11% de carbone.

➤ **L'austénite γ**

Solution solide d'insertion d'atome de carbone dans le Fer γ , à structure cubique à face centrée, la quantité de carbone atteint $\approx 2\%C$ à 1145°C. Il est stable qu'à haute température. L'austénite est très ductile.

➤ **La cémentite (Carbone de fer Fe_3C)**

La cémentite est un composé chimiquement défini CCD. Sa décomposition égale à 6.67% en masse de carbone, en état métastable. La cémentite se présente sous forme de lamelles ou de globules dans la perlite ou d'aiguilles dans les fontes blanche. Elle est très dure et très fragile.

➤ **La perlite**

Agrégat eutectoïde ayant une structure de lamelles alternées de ferrite et de cémentite. Ce constituant contient 0.8%C. La perlite est dure, résistante et assez ductile [9].

I.5. CLASSIFICATION DES ACIERS :

Dans la plupart des normes internationales on peut classer les aciers en quatre catégories principales :

I.5.1. Aciers non alliés :

Les aciers au carbone (non alliés) contiennent entre 0.06 et 2.11 % de carbone. Par ailleurs, sur le marché, on trouve rarement des aciers à teneur en carbone supérieure à 1.7 % [10].

I.5.2. Aciers fortement alliés :

Teneur d'au moins un élément d'alliage $> 5\%$. La désignation commence par la lettre X suivie de la même désignation que celle des aciers faiblement alliés, à l'exception des valeurs des teneurs qui sont des pourcentages nominaux réels.

I.5.3. Aciers alliés :

Les aciers alliés sont des aciers contenant des éléments d'alliage supplémentaires qui permettent d'obtenir des propriétés supérieures : augmenter leur dureté, leur résistance à la corrosion, leur élasticité, leur résistance à l'usure ou encore obtenir une augmentation de leur température critique. Il s'agit de la température à laquelle le métal subit une perte de ses propriétés. Certains aciers alliés ont été élaborés spécifiquement afin d'augmenter leur soudabilité. Lors du processus de durcissement des aciers qui est la trempe, les aciers sont chauffés puis refroidis. Lorsque la pièce est mince, le refroidissement se produit également partout ; par contre, pour une pièce épaisse, le centre refroidit moins rapidement que la périphérie, ce qui crée des tensions internes. Des aciers alliés ont donc été développés pour remédier à ce problème [11].

I.5.4. Aciers faiblement alliés:

Les aciers faiblement alliés à haute limite élastique (HSLA) 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 275 MPa en état laminé ou normalisé. Ces aciers ont des meilleures propriétés mécaniques et améliorent parfois la résistance à la corrosion que les aciers au carbone laminés.

D'ailleurs, parce que la haute limite élastique des aciers HSLA peut être obtenue à basse teneur en carbone, la soudabilité des aciers HSLA est comparable ou meilleur à celui des aciers doux [12].

La teneur limite qui distingue les aciers microalliés des aciers faiblement alliés se situe aux environs de 0,1% C. 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 microalliage. La formation de composés très fins et très nombreux modifie considérablement les microstructures et les propriétés.

Les éléments principaux de microalliage sont : le Titane, le Niobium et le Vanadium.

I.6. EFFET DES ELEMENTS DE MICROALLIAGE SUR LES PROPRIETES :

L'effet global des éléments de microalliage sur les propriétés mécaniques est la somme de l'effet durcissant des précipités et des modifications de structure par suite des changements de la taille des grains ou d'autres sous-structures. Il est donc nécessaire, pour chaque propriété, de distinguer l'effet des précipités tels que le durcissement, fragilisation [12,13].

I.6.1. Durcissement

L'effet du durcissement par les précipités dépend de leur nature, de leur nombre et de leur taille. On constate que la nature du précipité joue un rôle en plus de l'effet de taille. Les précipités des divers éléments Nb, Ti, V sont indépendants les uns des autres, leurs effets sont additifs du moins tant que le carbone ou l'azote est en quantité suffisante ; il est donc possible de faire des combinaisons à deux éléments ou même à trois dans certains cas [13].

I.6.2. Contrôle du grain

Les précipités permettent de régler la taille des grains par plusieurs mécanismes. La taille du grain γ va être déterminée par l'ensemble des opérations de chauffage, les déformations, les temps entre déformations et la vitesse de refroidissement [13].

I.6.3. Ductilité

La ductilité d'une phase durcie varie en fonction inverse de sa dureté, mais l'effet est différent suivant qu'il s'agit de précipités ou d'affinement de structures. Pour apprécier l'effet global, il faut également tenir compte de la diminution de la teneur en carbone ou des éléments d'alliage que permet le microalliage [13].

I.6.4. Ténacité

Il est nécessaire de distinguer l'effet fragilisant d'une précipitation de l'effet indirect des changements de microstructure souvent très favorable d'où un effet d'amélioration global. Pour les structures bainitiques ou martensitiques, c'est l'affinement du grain austénitique γ qui joue un rôle favorable sur l'amorçage et la propagation des clivages [13].

I.7. ROLES DES ELEMENTS D'ADDITION :

Les propriétés des aciers peuvent être modifiées en ajoutant d'autres éléments, le Tableau I.1 résume cette influence.

Tableau I.1: Influence des éléments d'addition sur les caractéristiques mécaniques des aciers [14].

Propriétés	Eléments de microalliage							
	C	Mn	Ni	Cr	Va	Mo	Ti	Pb
Traction	++	++	+	++	+	++	+	+
Dureté	++	++	+	++	+	++		+
Résistance	-	+	+	+	+	+	+	+
Soudabilité	-	+			+	+		

Commentaires : + augmentation, ++ augmentation importante, - diminution

I.8. SOUDABILITE :

La soudabilité est une propriété complexe qui dépend énormément de la composition chimique de la nuance et, en particulier, de la teneur en carbone qui détermine la dureté de la martensite, se formant dans certaines conditions de soudage, et sa sensibilité à la fragilisation par l'hydrogène. Il est donc très intéressant de pouvoir changer les caractéristiques grâce au microalliage, car cela permet d'abaisser la teneur en carbone et dans certains cas aussi les éléments d'alliage qui figurent dans les formules de carbone équivalent caractérisant la trempabilité des aciers en conditions de soudage.

Les aciers microalliés ont ainsi pris une grande place dans les aciers soudables. Cet abaissement de la teneur en carbone est très favorable pour la sensibilité à la fissuration à froid, mais aussi pour l'amélioration de la ténacité du métal de base ainsi que des zones affectées [13].

I.9. LE SOUDAGE :

L'assemblage par soudage occupe une place primordiale dans l'univers industriel. Il est utilisé dans l'élaboration des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage [14].

Le soudage tout simplement c'est l'opération qui permet de lier quasiment tous les matériaux, des matériaux métalliques jusqu'aux matières plastiques ; en assurant la continuité de la matière à assembler, et en préservant les propriétés mécaniques, ainsi que métallurgiques et physiques [15].

I.10. PROCEDE DE SOUDAGE :

Expérimentalement, il existe plusieurs procédés permettant le soudage de deux pièces métalliques, le plus répandu est le soudage par arc électrique ou un champ électrique important entre deux électrodes provoque des transitions d'électrons. Toute tentative de classification des différents procédés de soudage est rendue difficile au regard des nombreuses variantes d'un procédé à l'autre. Par exemple, certains procédés ou la pression est utilisée au cours du processus de soudage (soudage électrique par résistance par points) sont en fait, des procédés en phase liquide. L'organigramme de la figure donne une liste des procédés de soudage sur la base du type d'énergie utilisée [16,17].

Le choix du procédé s'opère selon des critères bien définis : matériaux à souder, facteurs technologiques, critères de qualité et les critères économiques, critères des caractéristiques mécaniques. [18]

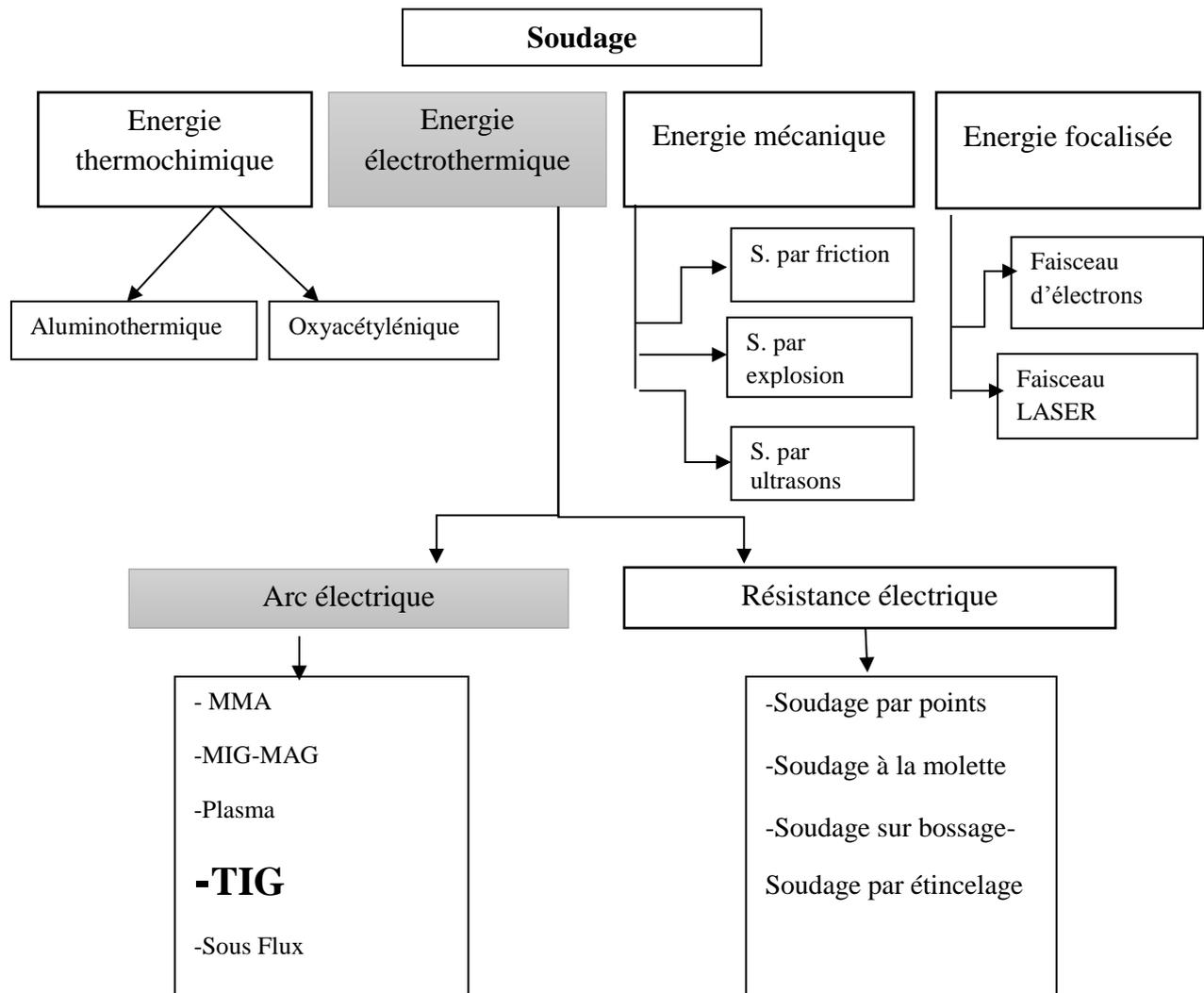


Figure I-2 : Classification générale des procédés de soudage en fonction de l'énergie mise en jeu [19].

I.11. SOUDAGE TUNGSTEN INERT GAZ (TIG) :

Un arc électrique est généré entre l'électrode de tungstène réfractaire et la pièce à souder. L'électrode concentre la chaleur de l'arc tandis que le métal de la pièce à souder fond, formant ainsi le bain de fusion. Le métal fondu de la pièce à souder et l'électrode ne doivent pas entrer en contact avec l'oxygène présent dans l'atmosphère. On utilise alors un gaz de protection inerte comme l'argon, par exemple [20].

Si l'ajout de métal s'avère nécessaire, on ajoute directement au bain de fusion, du fil d'apport qui fond grâce à l'énergie générée par l'arc électrique [21].

Ce procédé a l'avantage de réaliser des cordons lisses, d'un bel aspect, exempts de défaut de surface, les propriétés mécaniques du joint sont donc excellentes [22].

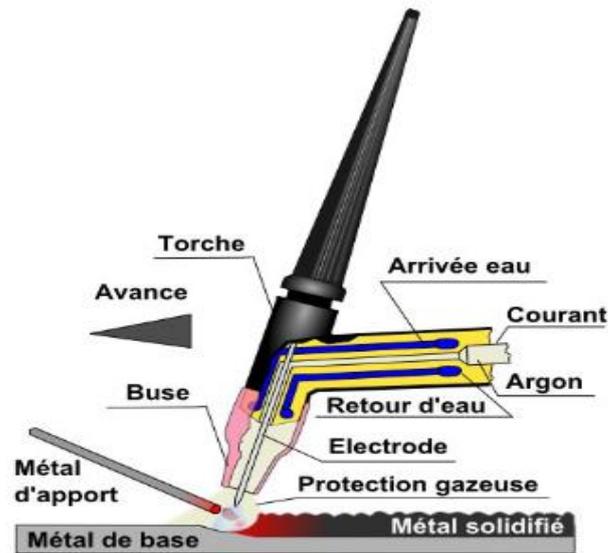


Figure I.3. Principe du procédé de soudage TIG [23]

I.11.1. Paramètres de soudage Tungsten Inert Gaz (TIG)

- **La source de courant** : fournit du courant de soudage qui peut être CA, CC ou pulsé, et une tension de soudage qui permet l'amorçage et le maintien de l'arc
- **Le gaz de protection** : est dirigé vers l'extrémité de l'électrode au tungstène afin de maintenir l'arc, de protéger le bain de soudage ainsi que l'électrode.
- **La torche** : munie d'un faisceau de câbles et tuyaux distribuant le gaz, parfois l'eau. La tête de torche maintenant l'électrode réfractaire qui assure le transfert de courant. Ceci permet à l'arc de s'établir et de se maintenir allumé.
- **L'électrode non fusible au Tungstène** : est montée sur la torche TIG et joue un rôle important dans le procédé TIG. Pour obtenir de bons résultats il faut choisir parmi les différents types et les différents diamètres.
- **La masse** : doit être parfaite afin d'assurer la fermeture du circuit électrique et garantir ainsi les amorçages et la stabilité de l'arc [21].

➤ **Types de courants :**

a). Courant Alternatif (CA) : En courant alternatif, le courant de soudage alterne entre les polarités positive et négative. C'est le mode idéal pour le soudage de l'aluminium et autres matériaux revêtus d'oxydes réfractaires. La polarité négative est utilisée pour créer le bain de fusion tandis que la polarité positive a un rôle de décapage et de perforation de la couche d'oxyde qui se forme en surface. [24]

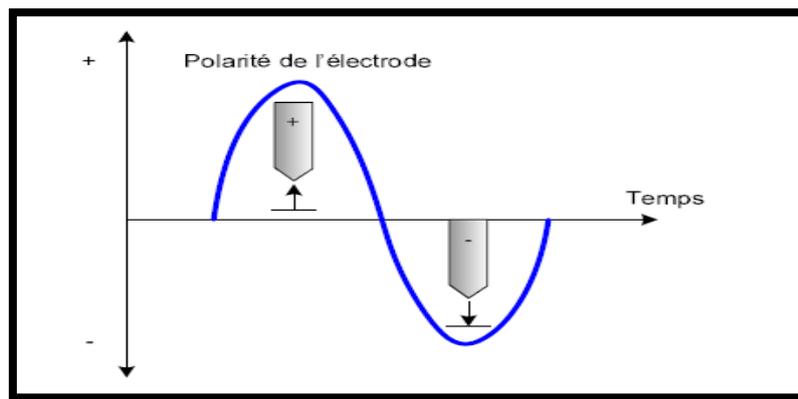


Figure I.4 : Forme d'onde et chemin des électrons en courant alternatif. [13]

b). Courant pulsé : Tout comme pour le soudage avec fil électrode fusible, les nouvelles technologies des sources de courant ont permis une meilleure maîtrise du procédé par l'utilisation du soudage par impulsion parfois appelé également « pulsage thermique ». mais le phénomène physique qui intervient dans ce cas est très différent de celui qui est mis en œuvre dans le cas du soudage avec fil électrode fusible [24].

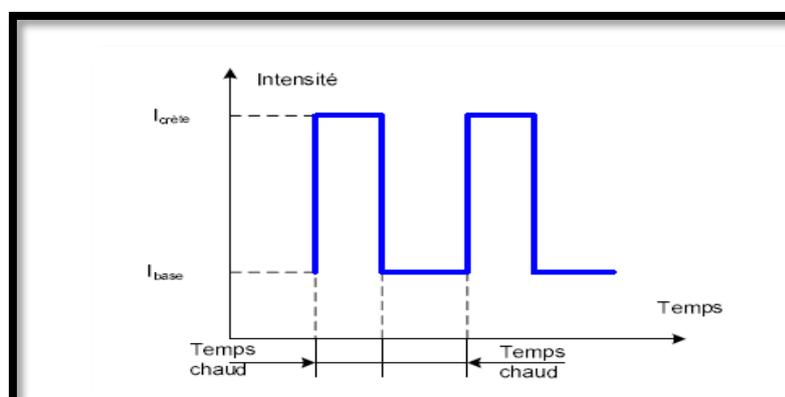


Figure : I.5 : Forme d'onde du courant pulsé [13]

c). **Courant continu (CC) :** En courant continu, polarité négative (CC-), la torche (l'électrode) est reliée à la borne négative et la pièce à souder sur la borne positive. Le courant CC permet de travailler plus rapidement sur pratiquement toutes les nuances métalliques.

Cette polarité permet aussi de souder avec précision sur des épaisseurs très fines et est souvent employé pour les passes de racine [24].

I.11.2. Application du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG) :

Le soudage TIG s'applique sur tous les métaux soudables. De plus, c'est un procédé facilement mécanisable, il est très utilisé, dans la construction aéronautique, les industries chimiques et alimentaires, la fabrication des réservoirs, des citernes, des carrosseries, ...etc.

La soudure TIG est une soudure de qualité, avec la possibilité de souder les faibles épaisseurs, un arc stable. Elle nécessite une dextérité particulière du soudeur. Les domaines d'application les plus courants sont : L'aéronautique, L'automobile et La tuyauterie industrielle [19].

I.11.3. Défauts du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG) :

- ❖ Pénétration irrégulière : Vitesse de soudage irrégulière, mauvaise position de la torche.
- ❖ Manques de pénétration localisée : Point d'accostage mal fondus, bain de fusion insuffisant au départ.
- ❖ Fissures isolées en étoile : Rupture d'arc trop rapide, manque de métal en fin de dépôt.

I.11.4. Avantages du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG) :

- Le procédé s'applique facilement à tous les aciers dont l'acier inoxydable, ainsi qu'aux alliages de nickel résistants à la corrosion ou réfractaires, le titane, l'aluminium; le magnésium, le cuivre, le laiton, le bronze ou l'or. Les pièces à souder composées de différents alliages ou de différents métaux (soudures hétérogènes) peuvent également être assemblées moyennant l'utilisation d'un métal d'apport approprié.
- Le procédé est très stable et fiable permettant d'abaisser les taux de défaut ou de reprise, à des niveaux inférieurs à 1 %.
- Les paramètres de soudage sont adaptables et, pour la plupart, indépendants les uns des autres.
- Le procédé de soudage TIG peut être mis en œuvre avec ou sans fil d'apport suivant l'application.

I.11.5. Inconvénients du soudage Tungsten Inert Gaz (TIG) :

- Comparé à d'autres procédés de soudage à l'arc, le taux de dépôt du procédé TIG est relativement faible.
- L'établissement des procédures et des paramètres de soudage nécessaires au bon fonctionnement du procédé nécessite du temps ainsi qu'un certain coût de développement.
- La sophistication de l'équipement de soudage implique des coûts d'investissement supérieurs à ceux d'un équipement de soudage manuel [26].

I.12. TYPES DE SOUDURES :

- ✓ **Soudures homogènes** : les métaux de base ou éventuellement le métal d'apport sont de même nature.
- ✓ **Soudure hétérogène** : on appelle assemblage hétérogène tout assemblage dont un des composants est différent du ou des autres :
 - Matériaux de base à assembler différents.
 - Matériaux de base identiques soudés avec un métal d'apport différent [27].

I.13. CARACTERISTIQUES DE LA SOUDURE :

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 4 zones principales [28] :

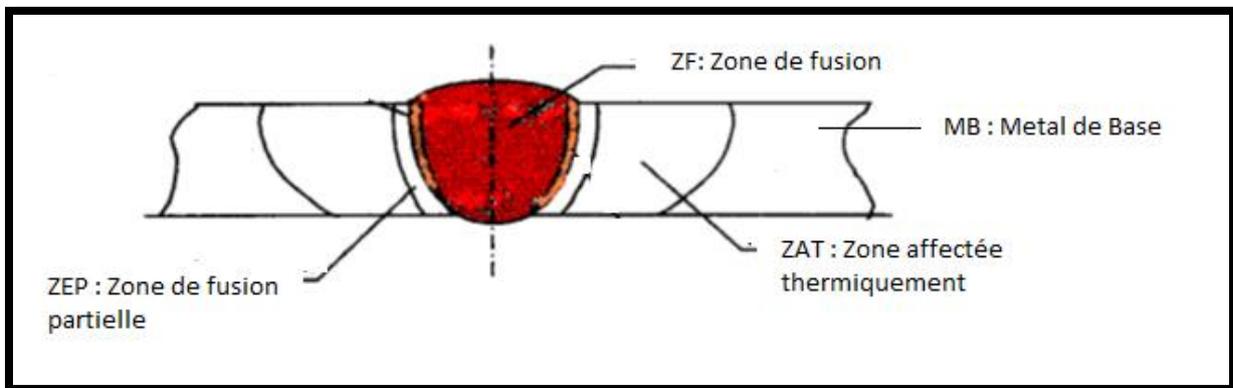


Figure I.6 Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion [28]

I.13.1. Métal de base (MB) :

Il constitue le métal des pièces à assembler, Ces pièces peuvent être en métaux semblables ou de nature légèrement différente. Le métal de base est soumis à un traitement thermique variable suivant le point considéré. De ce fait, il est le siège de transformations d'ordre physico-chimiques.

L'importance des transformations est fonction d'une part du cycle thermique et d'autre part de la nature de l'alliage. Les aciers austénitiques par exemple sont sensible aux changements de phases par précipitations [28].

I.13.2. Zone fondue (ZF) :

C'est la région où l'état liquide a régné pendant l'exécution de la soudure. Elle a été obtenue par la fusion du métal de base, avec la précipitation plus au moins importante d'un métal d'apport, le métal qui constitue la soudure est appelée métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé [28].

I.13.3. Zone de fusion partielle (ZFP) :

Le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquide et le solide de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle [28].

I.13.4. Zone affectée thermiquement (ZAT) :

C'est la partie du métal de base qui n'a pas été fondue, mais dont les propriétés mécaniques ou la microstructure ont été modifiés à un degré quelconque par la chaleur du soudage.

Dans cette zone, on distingue, dans le cas des soudures exécutées sur des métaux ayant un point de transformation, une zone de transformation contiguë à la soudure et dans laquelle la température a été suffisante pour entraîner une transformation dite allotropie de la structure et donc une modification des propriétés physiques du métal, sans qu'il y ait eu changement de sa composition chimique [28].

I.14. DEFINITION DE LA CORROSION :

La corrosion métallique c'est l'interaction physico-chimique entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou du système technique constitué par les deux facteurs [29].

I.14.1. Principaux types de la corrosion :

Il existe 5 principaux types de corrosion parmi eux on a : la corrosion localisée (corrosion par piqûres et corrosion intergranulaire) et la corrosion généralisée.

A. la corrosion localisée :

➤ Corrosion par piqûres :

La corrosion par piqûre (**Figure I-7**) est la rupture locale du film passif de l'acier provoquée par un électrolyte riche en chlorures et/ou sulfures [30] ou à des passivations incomplètes en milieu corrosif (inhibiteur en quantité insuffisante) [31].

Selon le schéma de la (**Figure I.8**), ce type de corrosion comprend au moins deux étapes [32].

-**L'amorçage** (Figure I.8a) : qui correspond au temps nécessaire pour aboutir à un défaut mesurable par destruction locale de la passivité. Sur les aciers inoxydables, l'amorçage des piqûres a généralement lieu sur des inclusions de type MnS.

-**La propagation** (Figure I.8b) : Le mécanisme de la phase de propagation est tout à fait analogue à celui de la corrosion par effet de crevasse.

La corrosion par piqûres peut affecter la plupart des matériaux passivables (c'est-à-dire recouverts d'un film protecteur de produits de corrosion [33]) : aciers, aciers inoxydables, alliages de nickel, de titane, d'aluminium, de cuivre, etc.

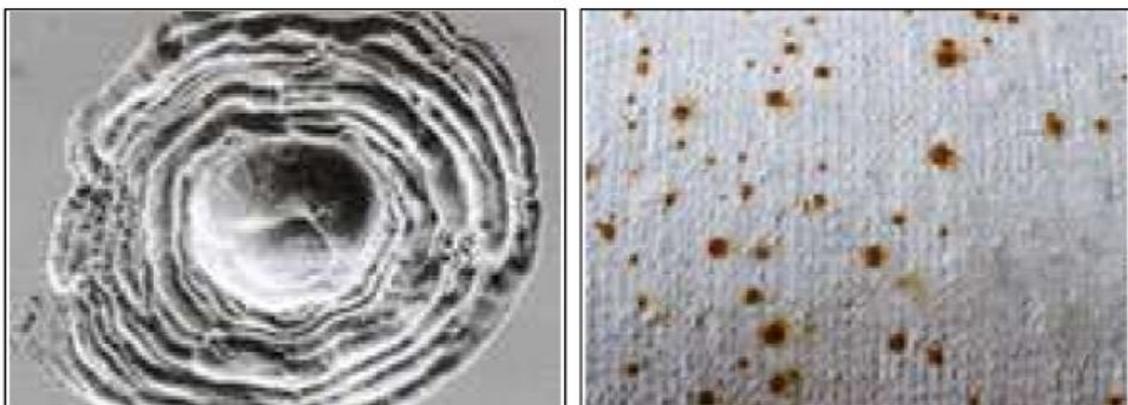


Figure I.7 : corrosion par piqûres [32].

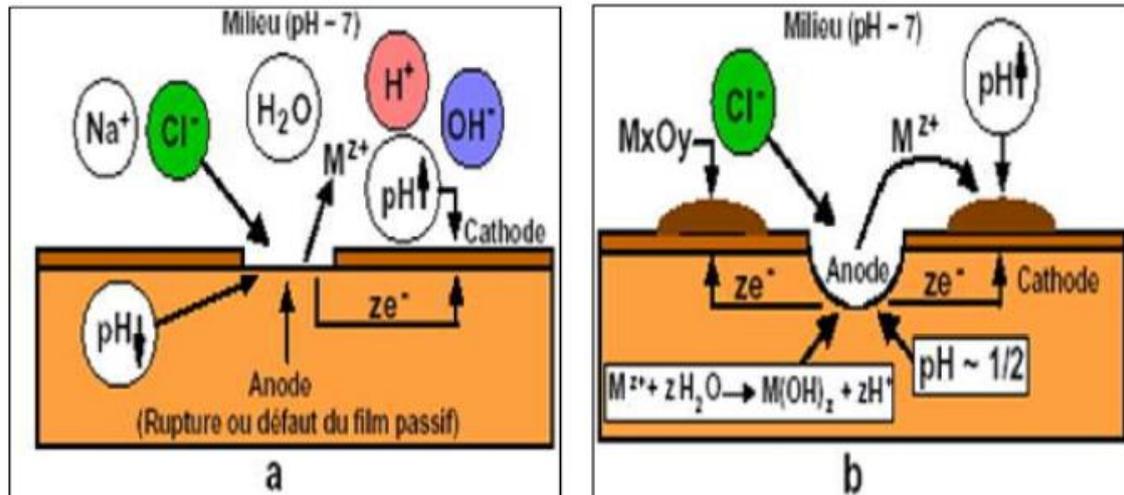


Figure I.8 : Schéma du processus de corrosion par piqûres : a) amorçage, b) propagation [32].

➤ Corrosion intergranulaire :

Comme son nom l'indique, cette corrosion se manifeste par une attaque préférentielle des joints de grains du métal [31]. Elle est liée à la précipitation de carbure de chrome le long des joints. Pour qu'elle se produise, trois conditions doivent être remplies :

- ❖ Au moins 0,035 % de carbone.
- ❖ Une sensibilisation par un maintien à une température de 400 à 800° (notamment par le biais du soudage).
- ❖ Un milieu extérieur acide avec un pouvoir oxydant compris entre deux limites bien définies.

Cette corrosion est particulièrement vicieuse car elle se développe dans des endroits confinés, à des niveaux de liquide minimum et elle provoque très souvent la ruine de l'assemblage [34].

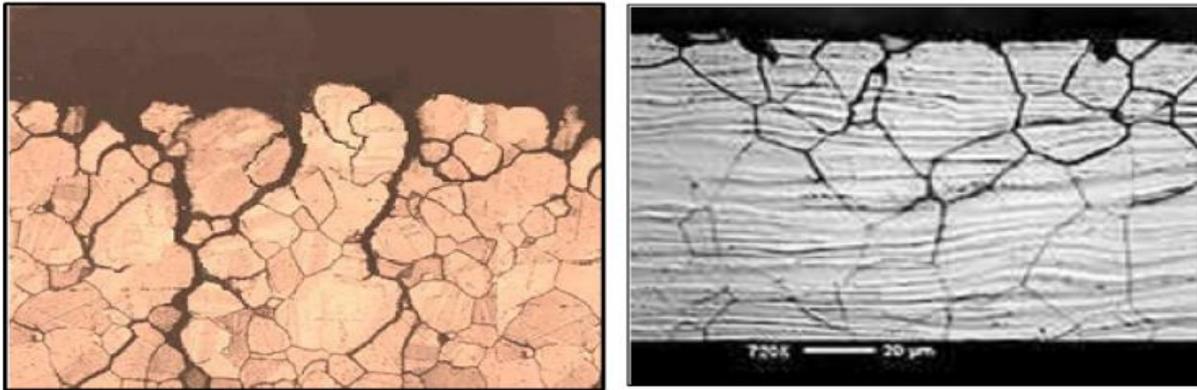


Figure I.9 : Corrosion Intergranulaire [32].

B. La corrosion généralisée (uniforme) :

Cette corrosion se traduit par une dissolution de tous les points constitutifs de la surface du matériau qui sont attaqués par le milieu corrosif. Ceci se traduit à l'échelle micrographique par une diminution globalement régulière de l'épaisseur ou perte de poids (corrosion uniforme ou généralisée par opposition à la corrosion localisée).

La corrosion uniforme (**Figure I.10**) se rencontre le plus fréquemment lorsque l'alliage métallique est en contact avec des acides tels que : l'acide sulfurique, l'acide nitrique, l'acide phosphorique, etc.. [35].

En effet, au-dessous d'une valeur de pH critique, le film passif protégeant l'acier inoxydable n'est plus stable et le matériau subit une dissolution active généralisée. Plus le milieu est acide, plus la vitesse de corrosion et la perte d'épaisseur de l'inox en résultant seront élevés [30].



Figure I.10 : Corrosion Généralisée (rouille) des pièces en acier [32].

I.14.2. les grands facteurs de corrosion :

Les phénomènes de la corrosion dépendent d'un grand nombre de facteurs et ils peuvent être classés en quatre groupes principaux dans le tableau suivant (**Tableau I.2**) [30].

Tableau I.2 : Les différents facteurs de la corrosion [30].

Le matériau	Le milieu	La conception	Le temps
-Composition chimique -Elaboration -Etat métallurgique (traitement thermique et mécanique)	-Nature chimique -Impuretés -PH (acidité) -Pression	-Etat de surface -Forme -Assemblage (soudure...) -Contact avec le milieu -Sollicitations mécaniques	-Evolution des tensions -Température variable -Vieillessement de la structure

I.14.3. Méthodes d'étude de la corrosion :

➤ Méthodes électrochimiques :

a. -Mesure du potentiel :

La potentiométrie est une méthode qui consiste à suivre l'évolution du potentiel de l'électrode de travail (dit aussi de dissolution ou de corrosion). En fonction du temps. C'est la tension d'un métal ou d'un alliage métallique mesurée par rapport à une électrode de référence dont le potentiel est connu et stable lorsque aucun courant ne s'écoule de ou vers cet échantillon. L'unité de mesure est le V/réf.

Les courbes (potentiel/temps) permettant d'apprécier les modifications de la surface de l'échantillon en fonction du temps d'immersion dans le milieu. Elles renseignent aussi sur la dégradation, la passivation ou l'immunité d'une surface métallique [32].

On peut utiliser l'électrode standard d'hydrogène dont le potentiel est par convention fixé à 0:

$$\text{EH}_2/\text{H}^+ = 0\text{V}$$

Mais on préfère d'utiliser une électrode au calomel saturé (ECS), $E = 0.241/\text{ENH}$, qui est une électrode pratique et d'emploi simple [32].

b.courbes potentiodynamiques où (intensité-potentiel) :

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir : la vitesse instantanée de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel.

Elle utilise les portions de la courbe [$i = f(E)$], éloignées du potentiel de corrosion, c'est-à-dire les portions pour lesquelles ($E \gg \gg E_{\text{corr}}$) (domaine anodique) ou ($E \ll \ll E_{\text{corr}}$) (domaine cathodique).

L' équation de Buttlér -Volmer peut être simplifiée.

Pour la branche anodique ($E \gg \gg E_{\text{corr}}$)

$$i_a = i_{\text{corr}} \cdot \exp [(2.3 (E - E_{\text{corr}}) / b_a)] \quad (1.0)$$

$$E - E_{\text{corr}} = a + b \cdot \log (i) \quad (1.1)$$

$$\eta_a = a + b \cdot \log (i) \quad (1.2)$$

$$\text{EH}_2/\text{H}^+ = 0\text{V}$$

Où

η_a : surtension anodique.

a : l' ordonnée à l' origine

Pour la branche cathodique ($E \lll E_{\text{corr}}$)

$$i_c = -i_{\text{corr}} \exp \left[\frac{-2.3 (E - E_{\text{corr}})}{bc} \right] \quad (1.3)$$

$$E - E_{\text{corr}} = a' + b' \log(i') \quad (1.4)$$

$$\eta_c = a' + b' \log(i') \quad (1.5)$$

Les équations (1.2) et (1.5) représentent la loi de Tafel sous sa forme simplifiée et indiquent que la courbe $\log(i) = f(E)$ doit présenter une partie linéaire appelée couramment « droite de Tafel ».

Pour déterminer expérimentalement les paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (**Figure I-11**) [30].

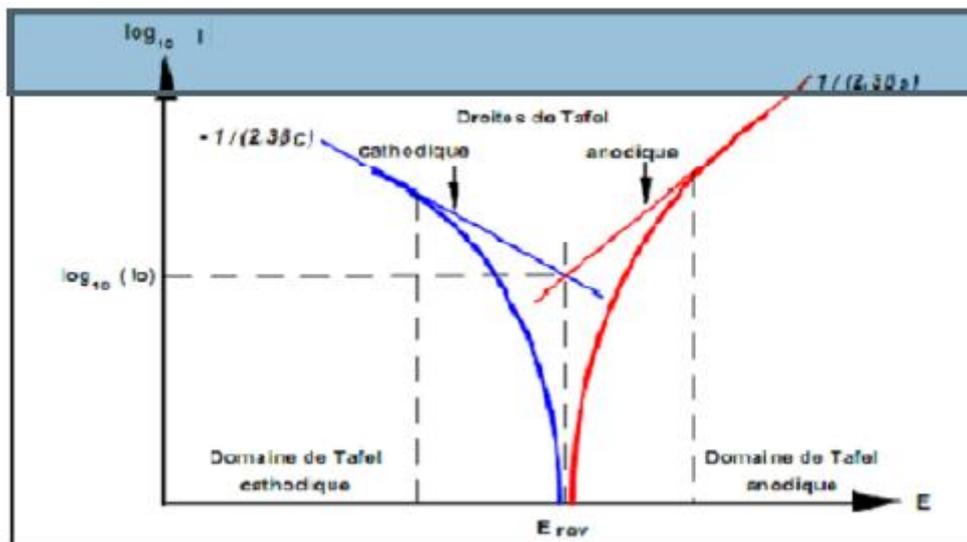


Figure I.11: Courbe de TAFEL [30].

II.1. INTRODUCTION :

Dans les travaux scientifiques expérimentaux, il existe plusieurs techniques pour caractériser et estimer l'évolution des propriétés physico-chimiques et mécaniques de différentes soudures.

Dans ce chapitre nous présentons les techniques expérimentales que nous avons utilisées pour caractériser les joints de soudure hétérogènes obtenus pour différents paramètres de soudage TIG. Commençant par présenter la composition chimique des matériaux, la technique de soudage utilisée, puis la caractérisation métallographique et la détermination de la taille des grains (Image J), une caractérisation mécanique (essai de micro dureté), une caractérisation électrochimique (Essai de corrosion) et à la fin une caractérisation par microscopie électronique à balayage.

II.2. MATERIAUX UTILISES :

II.2.1. Matériaux de base :

Les matériaux de base sur lesquels a été réalisé le soudage sont deux types d'aciers faiblement alliés type 42CD4 et API5L X70.

Les aciers utilisés pour l'étude, ont été usiné sous forme de tôles.

➤ Analyse chimique :

L'analyse chimique des matériaux de base des deux aciers sont effectuées au niveau du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI). Cette analyse est faite par spectromètre FOUNDRY-MASTER Xpert.

FOUNDRY-MASTER Xpert est un spectromètre de laboratoire permettant de d'analyser la qualité du métal. L'échantillon métallique à analyser est placé sur le support d'étincelage et serré par une pince de maintien. L'échantillon est brûlé en surface par un arc électrique. A la décharge, une zone de la surface de l'échantillon est fondue et s'est évaporée sous l'action de la brûlure. L'énergie élevée contenue dans l'étincelle génère un plasma. Ce plasma émet de la lumière dont le spectre est analysé et mesuré grâce à des dispositifs à couplage de charge (DCC, puces à semi-conducteur sensibles à la lumière).

Une zone du spectre mesuré peut être attribuée à chaque élément. L'instrument est commandé par des touches grâce à un logiciel fourni qui affiche le résultat de l'analyse sur l'écran du PC connecté.

II.2.2.Métaux d'apport :

Les matériaux de base sont soudés à l'arc électrique TIG en deux passes avec ce procédé : les électrodes de type OK60 et E6010, de manière permettant d'obtenir des joints avec un maximum d'homogénéité de la structure métallurgique.

II.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS :

Avant de procéder au soudage, il faut passer par l'étape de préparation des échantillons à souder.

Le X70 se présente sous forme d'un pipeline de 712 mm de diamètre de 11.5mm d'épaisseur, tandis que le 42CD4, il présente sous forme d'un cylindre plein.

➤ Découpage des pièces :

Le découpage des échantillons à étudier s'est effectué automatiquement à l'aide d'une scie à rubans (KNUTH HB450) avec lubrification. On a découpé 4 toles ou échantillons (80mm*30mm et 4mm d'épaisseur) pour chaque type d'acier.

➤ Rectification :

La rectification des épaisseurs après découpage a été faite à l'aide d'une fraiseuse semi-automatique, afin d'obtenir des pièces de même épaisseur (4mm).

La figure suivante présente les échantillons prélevés après le découpage et la rectification des pièces.



Figure II.1 : Les échantillons prélevés.

II.4. PROCEDURE DE SOUDAGE

Dans notre travail on a utilisé le soudage Tungsten Inert Gaz (TIG) manuel, ce choix est justifié par la bonne qualité des cordons qui présentent le minimal nombre de défauts en surface par rapport aux autres procédés existants. Ainsi le TIG présente des bonnes propriétés mécaniques des joints soudés par rapport au Shielded metal arc welding (SMAW).

L'opération de soudage TIG a été faite sur 4 pièces plates de 4mm d'épaisseur, pour chaque type d'acier. On a essayé de garder les mêmes paramètres de soudage pour toutes les pièces soudées afin de ne pas perturber les résultats obtenus afin d'obtenir les paramètres optimaux souhaités.

Les courants utilisés sont le courant continu et le courant alternatif avec une polarité normale, les électrons circulent de l'électrode vers la pièce à souder et frappent sa surface avec une vitesse normale, concentrant ainsi la chaleur sur le joint de soudure.

➤ Paramètres de soudage :

Les opérations de soudage sont réalisées au niveau de l'atelier de soudage au Centre de Recherche en Technologie Industrielle (CRTI) par un soudeur qualifié.

Le tableau suivant donne les principaux paramètres de TIG utilisés pour les procédés réalisés.

Tableau II.3 : Paramètres de soudage (TIG).

Courant	Echantillon	Electrode	Paramètres	
CC	01	Ok60	Tension (V)	10.65
			Intension (A)	100
			Vitesse (mm/min)	35.24
			Débit du gaz (L/min)	6
			Diamètres de l'électrode (mm)	1.6
			Temps de soudage (min)	2.27
	02	E6010	Tension (V)	11.65
			Intension (A)	100
			Vitesse (mm/min)	36.70
			Débit du gaz (L/min)	6
			Diamètres de l'électrode (mm)	1.6
			Temps de soudage (min)	2.18
CA	03	Ok60	Tension (V)	11.84
			Intension (A)	100
			Vitesse (mm/min)	25.72
			Débit du gaz (L/min)	6
			Diamètre de l'électrode (mm)	1.6
			Temps de soudage	3.11
	04	E6010	Tension (V)	14.4
			Intension (A)	100
			Vitesse (mm/min)	37
			Débit du gaz (L/min)	6
			Diamètre de l'électrode (mm)	1.6
			Temps de soudage	2.16

➤ **Le déroulement de soudage :**

Le déroulement de l'opération de soudage a été fait en respectant les paramètres précédents. L'ensemble des opérations que nous avons suivi, se résume comme suit :

a) Préparation des bords : les pièces à souder ont été chanfreinés en V, Ces chanfreins ont été réalisés à l'aide d'un tour.

b) Nettoyage des bords : les bords ont été nettoyés afin d'éviter toute contamination du bain fondu au cours de l'exécution du soudage.

c) Pointage des pièces à souder : la fixation des bords des pièces à souder a été faite par la réalisation d'un pointage. Ce pointage va nous permettre un soudage à position fixe.

d) Réalisation de la protection : cette protection a été réalisée à cause du risque d'oxydation des pièces. Nous avons laissé une fente d'un petit diamètre pour permettre l'accès du gaz protecteur - qui est l'argon – à l'intérieur des pièces pendant l'opération de soudage.

e) Réalisation de la première passe : cette passe a été réalisée par le procédé TIG. Après cette étape la protection a été enlevée et le cordon a subi un nettoyage à l'aide d'une brosse métallique en acier inoxydable.

f) Réalisation de la deuxième passe : cette passe a été réalisée avec les mêmes conditions que la première, le cordon a été nettoyé par brossage.

g) Finition de la soudure : après soudage, le joint soudé a subi un nettoyage pour enlever le laitier par meulage et brossage.

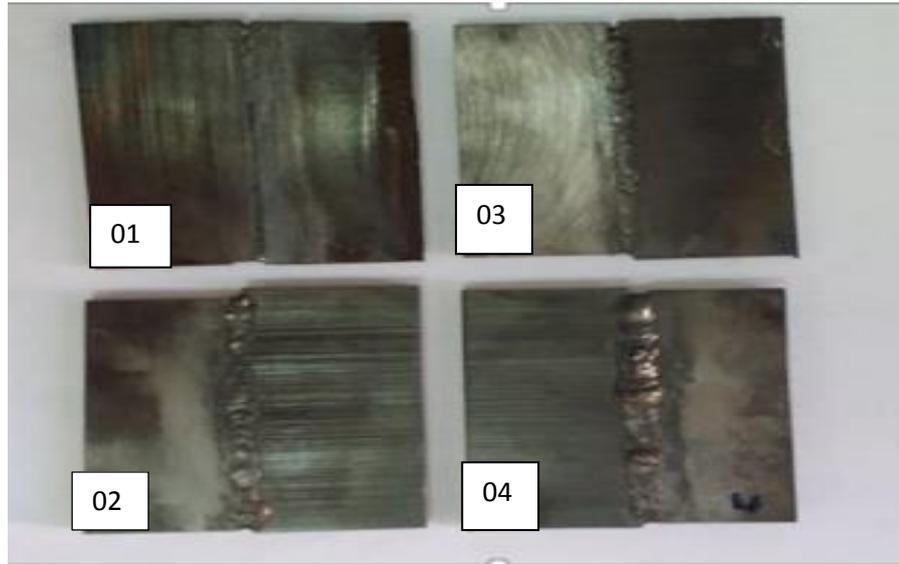


Figure II.2 : Photo montrant les plaques soudées.

II.5. METALLOGRAPHIE OPTIQUE :

La métallographie optique permet d'obtenir des microstructures des zones soudées, telles que la texture, la dimension des grains et les différentes phases présentes. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement par le Nital à 3%.

L'obtention de ces surfaces polies nécessite une suite d'opérations allant du prélèvement des échantillons à l'attaque chimique. Dans ce qui suit, nous donnons le détail de chaque opération.

II.5.1. Découpage des échantillons :

Le découpage a été effectué perpendiculairement aux cordons de soudure à l'aide d'une tronçonneuse sous lubrification afin d'éviter toutes altérations thermomécaniques.

II.5.2. Enrobage :

Les échantillons sont souvent enrobés dans des cylindres en plastique, cette opération est nécessaire pour faciliter la manipulation surtout dans le cas des échantillons minces et d'assurer une planéité pendant l'opération de polissage. C'est un procédé de moulage qui consiste à envelopper l'échantillon dans une résine polymérisante. Deux types de résines ont été utilisés, Chacune avec ses avantages et ses inconvénients.

Les deux types d'enrobage :

- ✓ A chaud : se fait dans une résine bakélite dans une presse pour l'observation optique.
- ✓ A froid : se fait dans un moule de résine auto-durcissant pour la caractérisation électrochimique [36].

II.5.3. Polissage :

Après l'enrobage, les éprouvettes ont été placées sur une polisseuse. C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométrie des grains abrasif en carbure de silicium du plus gros au plus fin :(80,180, 220, 320,500, 800, 1000, 1200,2400 et 4000 mèsh) qui tourne avec des vitesses variables, cette opération se fait sous aspersion d'eau pour éviter l'échauffement de l'échantillon.

II.5.4. Attaque chimique :

L'attaque chimique donne des différences de relief ou coloration, entre les différents constituants ou entre les cristaux différemment orientés d'une même phase. Après polissage mécanique et de finition, nous avons procédé à une attaque chimique de la surface par le Nital (tableau II.4).

Les échantillons ont été immergés durant 20 à 30 secondes, lavés à l'eau et séchés à l'aide d'un sèche-cheveux ordinaire.

Tableau II.4 : Réactif métallographique d'attaque.

Désignation	Composition	Condition d'utilisation	Emploi
Nital	Acide nitrique (HNO ₃)3% Ethanol 97%	Quelques secondes a froid	Aciers et fontes



Figure II.3 : Les échantillons attaqués.

II.5.5. Microscopie optique :

L'examen métallographique met en évidence les hétérogénéités qui existent dans le matériau ; il est donc particulièrement bien appliqué en soudage car cette opération entraîne, dans l'espace métallique, de nombreuses modifications structurales. Il est important d'examiner et caractériser la microstructure du joint soudé et de comprendre sa formation et son effet sur les propriétés mécaniques et électrochimiques. Donc, la caractérisation microstructurale des soudures a deux buts :

Évaluer la microstructure en ce qui concerne les propriétés, et relier la microstructure au processus employé.

Le but final est d'optimiser le processus pour produire la microstructure la plus souhaitable. Les paramètres caractérisant les microstructures de soudure, sont la taille de grain, leur morphologie et la quantification des diverses phases ou micro constituants présents. [37,38]

L'appareillage utilisé pour l'acquisition des images est un microscope optique équipé d'une caméra numérique reliée à un micro-ordinateur, équipée d'un logiciel installé pour l'acquisition et le traitement des images.

Pour l'observation de l'évolution de la microstructure après chaque réparation dans la zone affectée thermiquement (ZAT), la zone fondue (ZF), la zone de liaison (ZL) et le métal de base (MB), nous avons fait un balayage de ces zones à trois niveaux parallèles équidistants, en commençant par le plus faible grossissement, suivi progressivement par les plus élevés pour évaluer les caractéristiques de la microstructure.

➤ **Méthode de calcul de la taille des grains**

C'est une étude quantitative après observation par le microscope optique, nous prenons les images obtenues sur l'ordinateur puis on les traite avec un logiciel « image J ».

La taille de grain d'une microstructure donnée est déterminée par la méthode numérique, par le biais d'un logiciel. La grosseur du grain peut être caractérisée par différentes grandeurs conventionnelles déduites de l'observation d'une coupe plane du matériau préparée pour faire apparaître les contours des sections des grains par le plan de coupe.

II.6. CARACTERISATION ELECTROCHIMIQUE :

C'est un dispositif expérimental qui nous a permis d'accélérer les phénomènes de dégradation, par rapport à l'évolution naturelle et d'accéder à certains paramètres caractéristiques de corrosion comme : les potentiels de corrosion (E_{corr}), courants de corrosion (I_{corr}), vitesses de corrosion (V_{corr})...etc. Les essais de corrosion ont été réalisés au niveau du laboratoire de CRTI.

Pour effectuer ces essais électrochimiques on a utilisé une chaîne de mesure qui comprend :

- Un potentiostat/Galvanostat EGG Princeton 263, mesure la différence de potentiel entre l'électrode de travail (E_t) et de la référence d'une cellule à trois électrodes, fait passer d'un courant I_c dans la cellule par l'intermédiaire de la contre électrode (E_c) et mesure le courant à l'aide différence de potentiel aux bornes de la résistance R_m .

- Une cellule électrochimique de forme cylindrique thermostatée, en verre, à double paroi de capacité de 250 ml. Elle est équipée d'un montage conventionnel à trois électrodes : Travail ou échantillon, référence une électrode au calomel saturé (ECS) dont l'extrémité est placée près de l'électrode de travail et contre électrode qui étant une grille de platine pour assurer le passage du courant.
- Un ordinateur qui pilote l'ensemble et effectue l'acquisition et le traitement des données grâce au logiciel NOVA, pour les méthodes stationnaires (méthode de Tafel) et la spectroscopie d'impédance électrochimique qui permet d'identifier les mécanismes qui se déroulent à l'interface métal/solution et proposer des modèles cinétiques

Le but de ce choix est de se situer entre les limites de réduction et d'oxydation de la solution corrosive.



Figure II. 10 : Schéma du dispositif utilisé dans le test électrochimique.

Afin de se rapprocher au mieux des conditions réelles de travail de l'acier comme implant, nous avons choisi les conditions suivantes :

- Milieu acide HCL 4M
- Un milieu biologique au même pH = 5,6 agité à raison de 250 trs/min à 37°C de température.

II.7. CARACTERISATIONS MECANIQUES :

En général, une soudure n'est acceptée que si les essais mécaniques répondent à des critères de qualités conformément à une norme de référence.

Pour évaluer le comportement mécanique, dans ce travail on utilise l'essai de microdureté.

II.7.1. Profils de microdureté Vickers :

L'essai de microdureté des joints soudés est largement utilisé comme mesure rapide des propriétés mécaniques à travers les microstructures variables de la région soudée. Il permet de comparer la résistance des régions locales et différentes des microstructures, parce que la résistance est corrélée avec la dureté. La dureté a été principalement liée à la résistance, à la traction plutôt qu'à la limite d'élasticité ou à la ductilité [38].

➤ Préparation des échantillons

Les échantillons utilisés pour la métallographie sont adéquats pour mesurer la microdureté car celle-ci exige une préparation de la surface de l'échantillon et principalement la microdureté qui requiert des coupes bien polies pour prendre des valeurs de zones bien précises de la ZAT et connaître le début et la fin de chaque zone durant les traversées de microdureté [38].

➤ Méthode de mesure

Les essais de microdureté sont effectués au CTRI à moyen d'un microduromètre semi-automatique de marque (MICROMET 3) avec un pénétrateur pyramide de diamant, placé entre deux lentilles de microscope. Le microduromètre est aussi équipé d'un afficheur des résultats d'essai avec la dureté équivalente.

On a appliqué une charge de 200 grf pendant 20 secondes (HV 0.2/20) dans chaque point de mesure.

II.8. ANALYSE PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB) :

La microscopie électronique à balayage a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage de marque (ZEISS GEMINI SEM 300) au laboratoire FUNDAPL (université Blida1)

Le microscope électronique à balayage a permis une analyse plus fine de la microstructure, une analyse qualitative de la chimie des précipités et des différentes zones, grâce aux électrons rétrodiffusés et aux RX, et une observation des surfaces de rupture grâce aux électrons secondaires (fractographie). C'est une technique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon.

-Principe de fonctionnement :

En relation avec le mode de diffusion des électrons par l'échantillon, le **MEB** fournit des images de manière séquentielle en balayant la surface de matériau par un faisceau d'électrons.

L'impact d'un faisceau d'électrons sur la surface d'un échantillon engendre une émission des électrons secondaires et rétrodiffusés. Ces derniers sont détectés dans des détecteurs. Une image est obtenue en relation avec l'intensité du courant électrique produit en chaque point de la surface. La topographie de l'échantillon est ainsi obtenue.

La Microscopie Electronique à Balayage est actuellement la méthode la plus utilisée pour observer la morphologie et les microstructures des couches (en coupe transverse) et pour mesurer leur épaisseur. Ces observations apportent également des compléments d'information sur le mode de croissance des couches et les précipités qui peuvent se former.

III.1. INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale des soudures des aciers (X70 et 42CD4) et les différents résultats relatifs à la micrographie et aux essais mécaniques. Le chapitre est structuré comme suit :

En premier lieu on fait une vision générale sur l'état des matériaux ainsi que du cordon de soudure. Ensuite, on s'intéresse à la micrographie réalisée par un microscope optique pour avoir des images micrographiques montrant les différentes phases, la taille et l'orientation des grains, pour pouvoir ensuite les comparer avec les résultats obtenus à l'aide des essais mécaniques (micro dureté), les essais électrochimiques (corrosion) et le microscope électronique à balayage (MEB).

III.2. RESULTATS DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES MATERIAUX UTILISES :

Analyse par le spectromètre FOUNDRY-MASTER Xpert. La composition chimique illustrée dans les Tableaux III.1 et III.2.

Tableau III.1 : Composition chimique des matériaux de base 42CD4 et X70 en % (en poids)

Elément	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Ni
X70 (%)	0.08	0.7	2.39	0.01	0.001	0.06	0.01	0.04	0.1	0.05	0.4	0.09	0.02
42CD4 (%)	0.45	0.4	0.90	0.35	0.0.35	-	-	1.20	0.3	-	-	-	-

Tableau III.2 : Composition chimique des métaux d'apport (E6010) et (Ok 60) (en poids)

Elément	Fe	Ni	C	Si	Mn
Ok 60 (%)	0.40	0.60	-	-	-
E6010 (%)	Rest	-	0.10	0.20	0.50

III.3. EXAMEN MACROGRAPHIQUE :

L'objectif de ces examens est de vérifier les irrégularités du cordon de soudure (défauts de formes) ou les défauts débouchant et apparents telles que les porosités, les fissures.

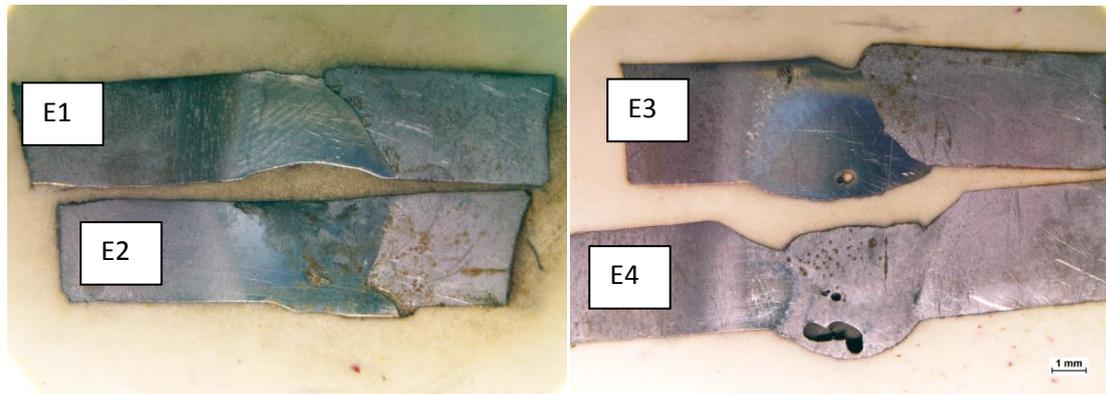


Figure III.1 : Macrographies des soudures.

Ces examens nous permettent de conclure que :

- les échantillons E1 et E2 soudés avec courant continu et les métaux d'apport Ok60 et E6010 successivement, montrent que le cordon de soudure a une bonne pénétration sans présence de défauts, les examens visuels confirment un cordon régulier et de bel aspect.
- les échantillons E3 et E4 soudés avec courant alternatif et les métaux d'apport Ok60 et E6010 successivement, montre par contre que le cordon de soudure a une pénétration satisfaisante avec présence de défauts (caniveaux et porosités) qui sont dû aux inclusions de tungstène ou l'électrode est en contact avec le bain fondu.

III.4. EXAMEN MICROGRAPHIQUE :

Une analyse métallographique en microscopie optique a permis de mettre en évidence les différentes zones, à savoir :

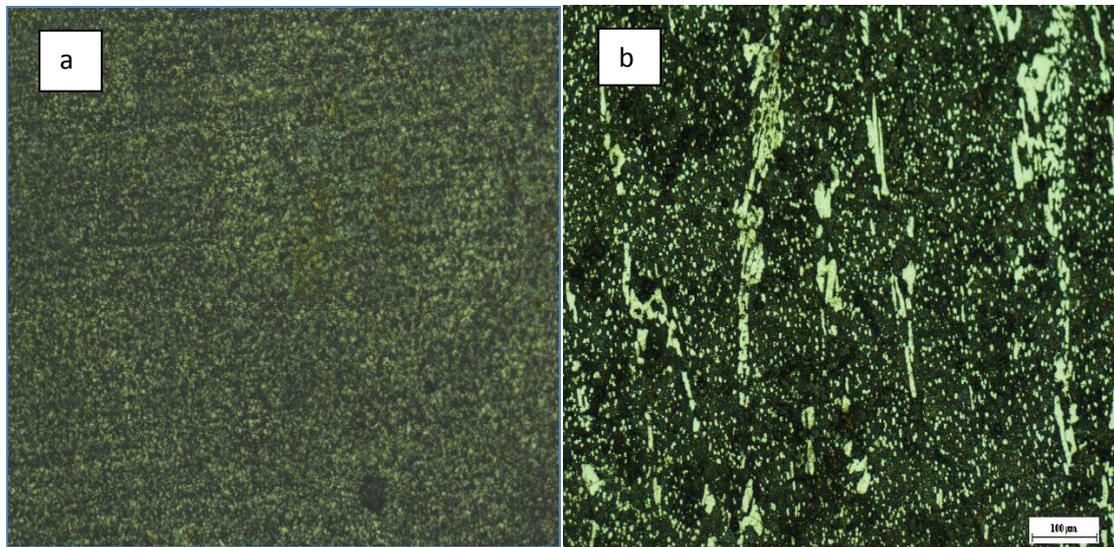


Figure III.2 (a,b) : Micrographies les matériaux de base: a : (X70) et b : (42CD4).

- La perlite présente sous forme des points noirs.
- La ferrite présente sous forme des points blancs.
- La martensite présente sous forme des aiguilles.
- La bénite c'est une matrice situe entre la ferrite et la martensite.

La micrographie des deux matériaux de base montre que : la microstructure biphasés de l'acier X70 est constituée de ferrite et perlite, en revanche l'acier 42CD4 présente une microstructure martensitique dans une matrice ferritique avec une faible proportion de bénite. Pour vérifier et calculer la taille des grains et le pourcentage de chaque phase nous avons utilisé le logiciel image J.

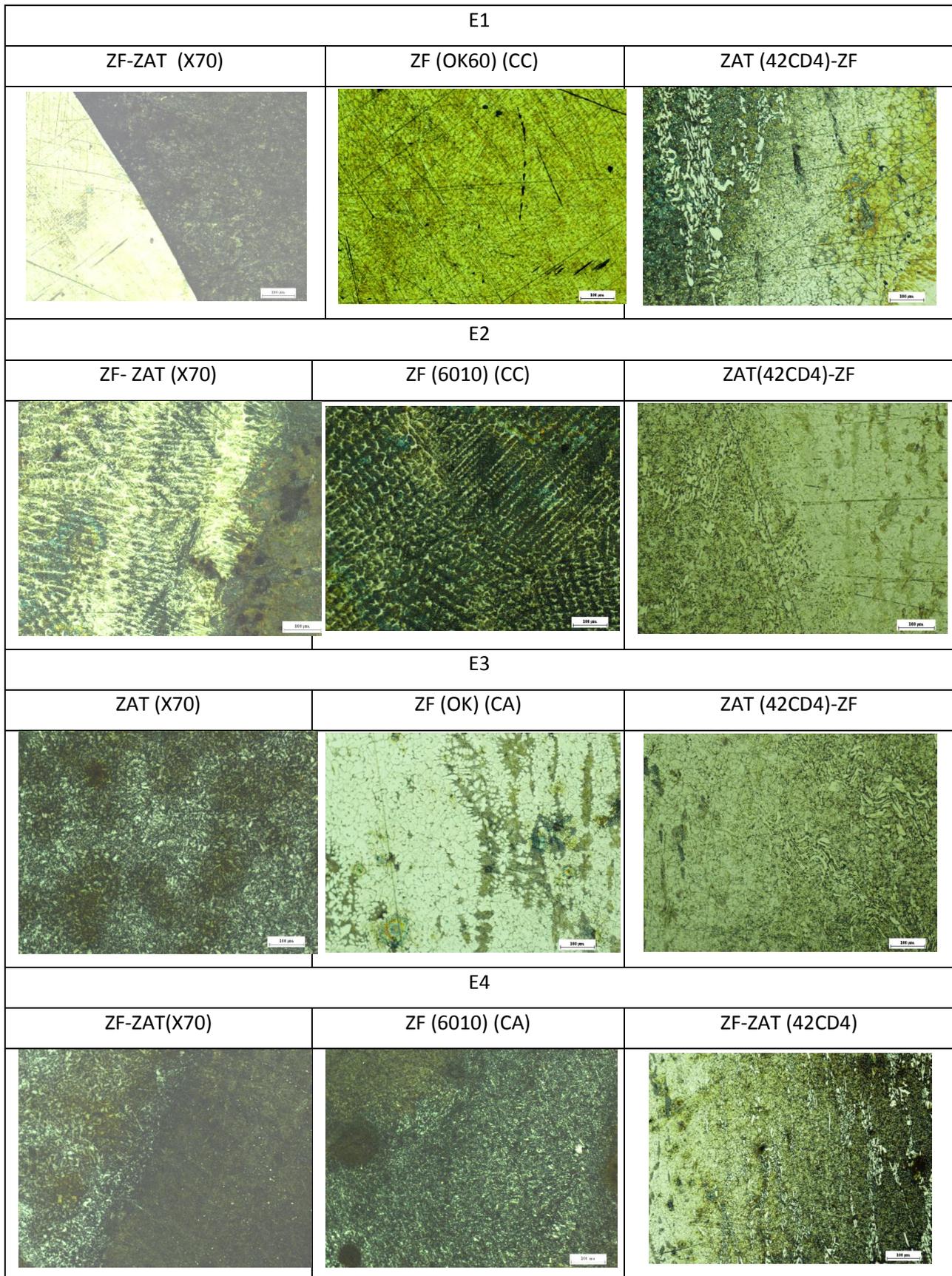


Figure III.3 : Micrographies des joints soudées de (E1, E2, E3 et E4).

Les résultats obtenus par le microscope optique sont regroupés dans la figure III.3 montrant les différents changements des microstructures soudées :

- La phase martensite est située au niveau des frontières de grains de phase ferrite.
- Dans les ZAT des cotés 42CD4, la morphologie de la martensite est devenue une phase dominante avec une augmentation de la phase bainitique dans l'échantillon soudé par courant alternatif. En outre, la taille granulométrique (18 μ m) de la phase de martensite est devenue petite (12 μ m) dans les ZAT de courant alternatif avec une dispersion de la martensite dans la matrice dans la ZAT (CA), cette dispersion est liée aux cycles thermiques de soudage alternatif.
- Les ZAT de l'acier X70 ont subi un grossissement de grains ferritiques, ce grossissement devient de plus en plus léger dans le cas des courants alternatifs.
- La zone fondu dans (E2) et (E4) permet d'obtenir des structures fines avec des zones brutes de Solidification comme, ferrite proeutectoïde et aciculaire, Constituant lamellaire comme Bainite et martensite.
- La zone fondu dans (E1) et (E3) présente des Grains γ colonnaires entourés par des précipitations ferritiques, on observe que dans le cas de (CA) les grains austinitique subissent une augmentation des grains.
- On distingue la présentation de certains défauts de soudure dans le cas du (CA)

III.4.1. Résultats de mesure de la taille des grains :

Le tableau ci-dessous représente les résultats de mesure de la taille des grains obtenus à l'aide du logiciel **IMAGEJ**. On a mesuré la taille des grains pour les métaux de base (X70 et 42 CD4) et dans la zone affectée thermiquement (ZAT) des deux côtés et la zone fondue (ZF) pour les pièces soudées.

La taille de grains pour les métaux de base :

Tableau III.3 : Les résultats des calculs par Image j des matériaux de base a(X70) et b(42CD4).

Echantillon	Taille des grains (μm)
A	6.057
B	4.448

On remarque que la taille des grains d'acier X70 est supérieure de celle d'acier 42CD4.

Tableau III.4 Les résultats des calculs par Image j pour les 4 échantillons.

échantillon	Métal d'apport	courant	Taille de grains (μm)	
			ZAT X70	ZAT 42CD4
E1	Ok 60	Continu	6.272	6.075
E2	E6010	Continu	7.136	5.448
E3	Ok 60	Alternatif	6.100	4.600
E4	E6010	Alternatif	7.813	6

D'après les résultats obtenus on constate que la taille des grains est différenciée entre les soudures réalisées par E6010 et Ok60 d'où on observe que la taille des grains soudés par Ok60 est inférieure de celle soudée par E6010, et la taille des grains dans la ZAT de X70 est plus importante de celle de la ZAT de 42CD4.

D'autre part quand on compare entre les deux courants dans lesquelles on a utilisé l'Ok60 on observe aussi que la taille des grains des soudures réalisées par le courant alternatif (CA) est inférieure de celle soudée par le courant continu (CC). Ceci implique que le métal d'apport Ok60 et le courant alternatif ont donné les meilleurs résultats.

III.5. RESULTATS DES ESSAIS MECANQUES (MICRODURETE) :

La figure III.3 montre la variation de la microdureté Vickers mesurée à travers le métal fondu, les deux ZAT et les deux matériaux de base.

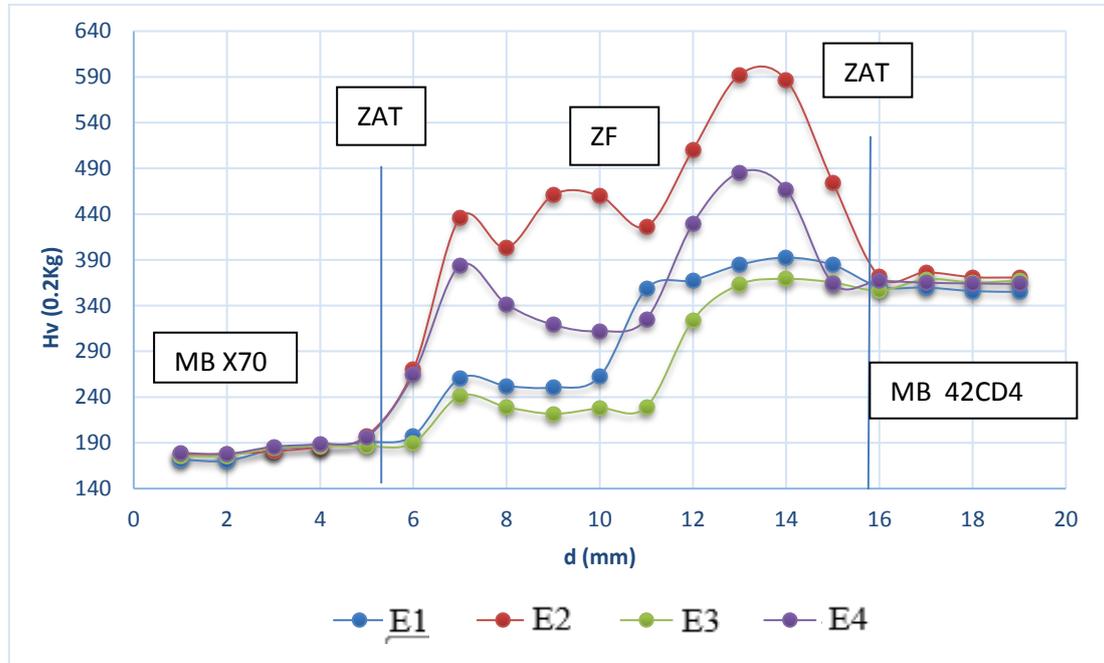


Figure III.4: Profil de microdureté des joints de soudures

Les quatre courbes représentent la microdureté des échantillons dont deux échantillons subissent un soudage TIG alternatif (E3) et (E4) et un soudage TIG continu dans (E1) et (E2). Quand les courbes de microdureté se stabilisent, elles indiquent que les valeurs de microdureté de l'acier (X70) est 175 Hv et 362 Hv pour (42CD4).

A partir de ces graphes de profils de microdureté on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les échantillons soudés subissent une grande augmentation de la microdureté dans les zones affectées thermiquement (ZAT) par rapport aux matériaux de base, où il y a une création de structures relativement fragiles riche en carbure métalliques (martensite...) lors de l'opération de soudage, cette richesse devient énorme dans le coté 42CD4.

- La variation de la microdureté est liée aussi en premier degré à la teneur du carbone et en deuxième degré à l'effet des éléments d'addition qui sont présent dans chaque matériau de base. Le rôle des éléments gammagènes (Mn, Ni) diminue notablement les températures de transformation des phases et déplacent les diagrammes en refroidissement continu vers les vitesses lentes. Le manganèse en particulier a un rôle très important sur la vitesse critique martensitique. L'effet premier des éléments carburigènes (Cr, Mo) est d'augmenter la trempabilité et tout particulièrement pour le molybdène d'accroître la stabilité du domaine bainitique, en retardant la germination de la ferrite. De plus, ces éléments forment au cours des cycles alternatif des carbures dispersés avec le fer, par contre dans le (CC) ils forment des carbures moins dispersés et concentrés dans la ZAT, ce qui fait un risque d'une fracture brutal.
- Dans le cas de courant Alternatif on note une diminution de la microdureté par rapport au courant continu, cette diminution est due à l'effet de cycle thermique de soudage ce qui provoque une variation rapide dans le taux de chauffage.
- Dans le cas des échantillons soudés avec E6010 on note une augmentation de microdureté par rapport aux soudures avec Ok60 cela dû aux effets des éléments d'addition.

III.6. RESULTATS DE CARACTERISATIONS ELECTROCHIMIQUES

Le comportement à la corrosion de la soudure hétérogène (42CD/X70) a été étudié en utilisant une solution de HCl 4M.

III.6.1 Courbes de l'impédance :

Les mesures de l'impédance ont été effectuées après l'immersion des échantillons en milieu acide, les spectres de l'impédance ont été tracés en déplaçant la bi-électrode le long du rayon avec un pas de 1 mm. Les figures III.5 et III.6 présentent les résultats obtenus. Il faut noter que sur chacun des deux matériaux, l'impédance basse fréquence augmente de manière non négligeable quand la bi-électrode est déplacée du centre vers le bord de l'échantillon. Ce phénomène est lié à la présence du champ de potentiel à la surface de l'électrode.

Les figures représentent les courbes d'impédance dans le plan de Nyquist Z à différentes soudures à l'abandon et dans la gamme de fréquence : 50 Hz - 100 mHz.

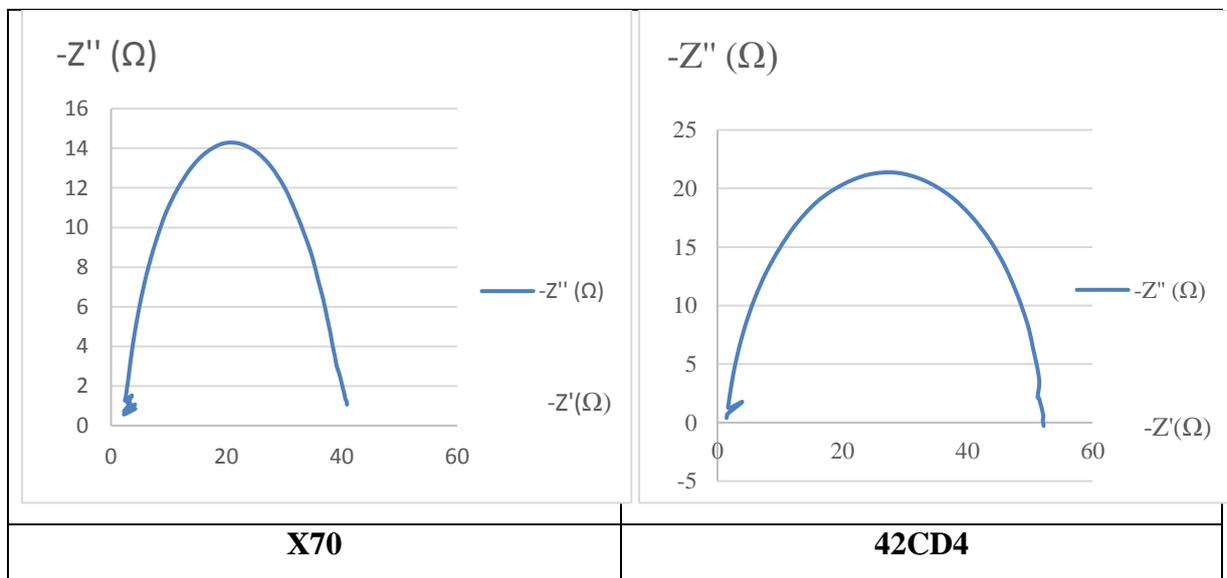


Figure III.5 : Représentation graphique de l'impédance des matériaux de base.

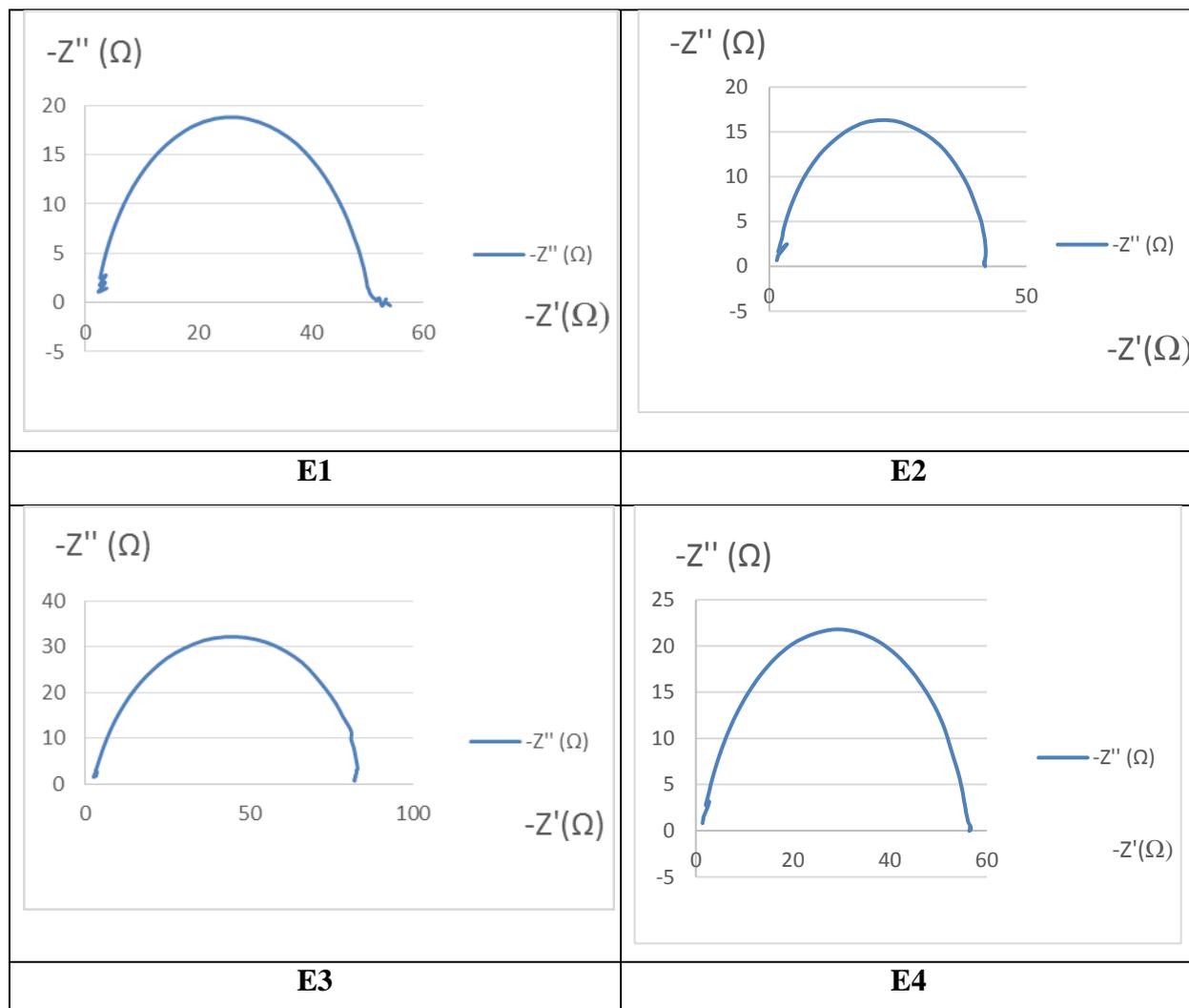


Figure III.6: Représentation graphique de l'impédance des échantillons soudés E1, E2, E3 et E4.

A partir des courbes de l'impédance on a eu les résultats suivants :

Tableau III.5. : Résultats de la capacité et la résistance des échantillons

échantillons	Résistance (Ω)	Capacité
X70	38.589	0.99657
42CD4	50.973	0.99805
E1	42.22	0.99731
E2	41.437	0.99747
E3	88.672	0.99723
E4	54.972	0.99742

Dans le **Tableau III.5**, La représentation dans le plan de Nyquist a été utilisée pour déterminer la Résistance de Transfert de charge et Capacité des échantillons. L'interprétation des graphes permet de déterminer les différents processus qui ont lieu à l'électrode et la résistance de transfert de charge.

A partir des courbes de l'impédance on peut constater que :

L'évolution d'impédance dans le plan Nyquist Z en fonction des paramètres de soudage, a donné un bon comportement électrochimique traduit par une augmentation considérable de la résistance de transfert de charge conjointement à une diminution de la capacité de l'échantillon. Les essais électrochimiques ont montré une bonne capacité observée dans E3, Ainsi qu'une bonne résistance de transfert de charge par rapport aux matériaux de base et aux autres soudures.

III.6.2. Courbe de polarisation :

L'objectif de cette partie est d'effectuer une interprétation de test de polarisation électrochimique.

Les courbes suivantes représentent les résultats de potentiodynamiques des deux matériaux de base et les quatre échantillons.

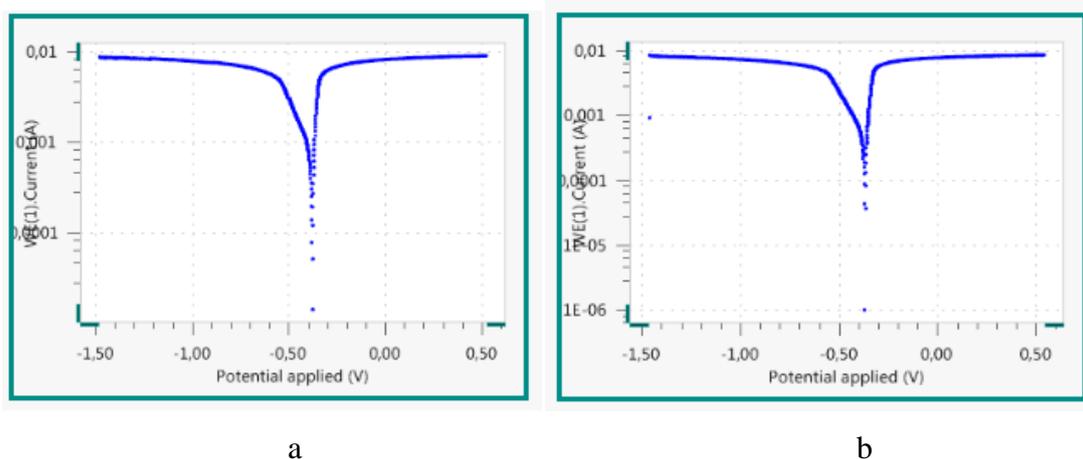


Figure III.7 : Représentation graphique de $\text{Log}(I)=f(E)$ des matériaux de base : a (42CD4), b (X70).

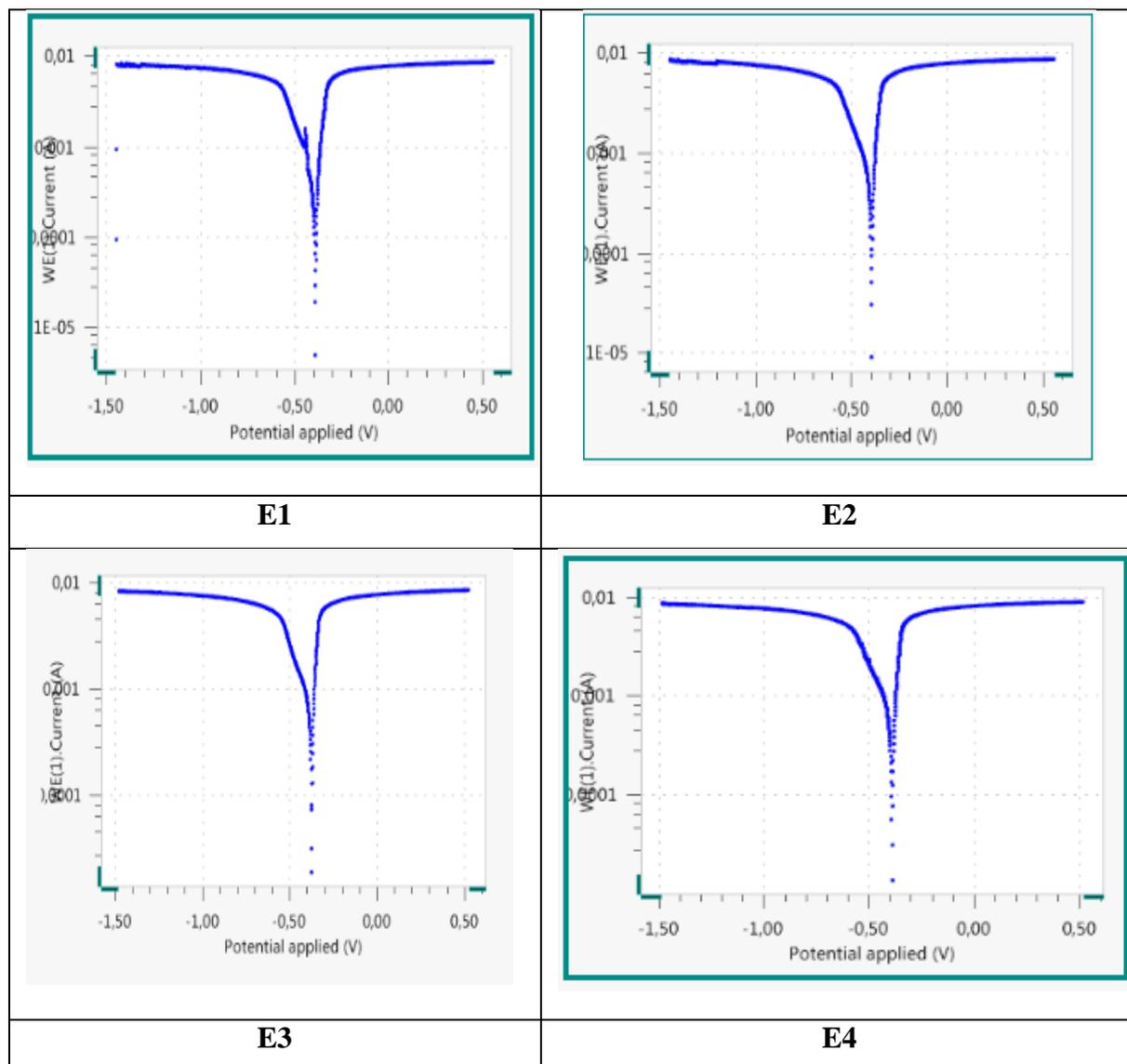


Figure III.8 : Représentation graphique d'Log(I)=f (E) pour les soudures E1, E2, E3 E4.

A partir des courbes de courbes Tafel on a eu les résultats suivants :

Tableau III.6. Résultats de paramètres de corrosion.

Echantillons	ba (v/dec)	bc (V/dec)	Ecorr (V)	I corr (A)	Vcorr (mm/an)
A	0.73402	0.21418	-0.37431	0.0025587	29.732
B	1.1318	0.50853	-0.40282	0.0037302	43.345
E1	0.47959	0.20530	-0.37561	0.0022648	21.744
E2	1.0276	0.46995	-0.40969	0.0032702	38
E3	0.55053	0.19139	-0.396	0.0018713	16.317
E4	1.2367	0.42045	-0.39137	0.0035365	41.094

Ou :

a : le métal de base d'acier 42CD4.

b : le métal de base d'acier X70.

E1 : la soudure 1 (courant continu, métal d'apport OK60).

E2 : la soudure 2 (courant continu, métal d'apport E6010).

E3 : la soudure 3 (courant alternatif, métal d'apport OK60).

E4 : la soudure 4 (courant alternatif, métal d'apport E6010).

ba : borne anodique.

bc : borne cathodique.

Ecorr : le potentiel de corrosion en volt.

Icorr : le courant de corrosion en ampère.

Vcorr : la vitesse de corrosion en millimètre par an.

Les essais de polarisation montrent clairement que les caractéristiques du comportement électrochimique des soudures sont généralement comprises entre les bornes des valeurs des deux matériaux de base.

La vitesse de corrosion de l'acier X70 est nettement inférieure comparativement à celle de l'acier au carbone 42CD4. Ainsi les vitesses des soudures (E1, E3) sont nettement inférieures comparativement aux autres échantillons cela s'explique par la présence d'une bonne teneur (60%) de Ni dans le métal d'apport OK60 qui est un bon résistant à la corrosion.

De plus, on constate que la soudure (E3) présente un potentiel et une tension de corrosion inférieurs à celui de (E1) et Par rapport aux autres échantillons. L'échantillon (E3) se passive et sa courbe de polarisation présente des légers paliers de passivation, son courant de corrosion reste le plus faible 0.0018713 A et Son potentiel de corrosion est égale à -0.396V.

III.6.3. Micrographie après test d'électrochimie :

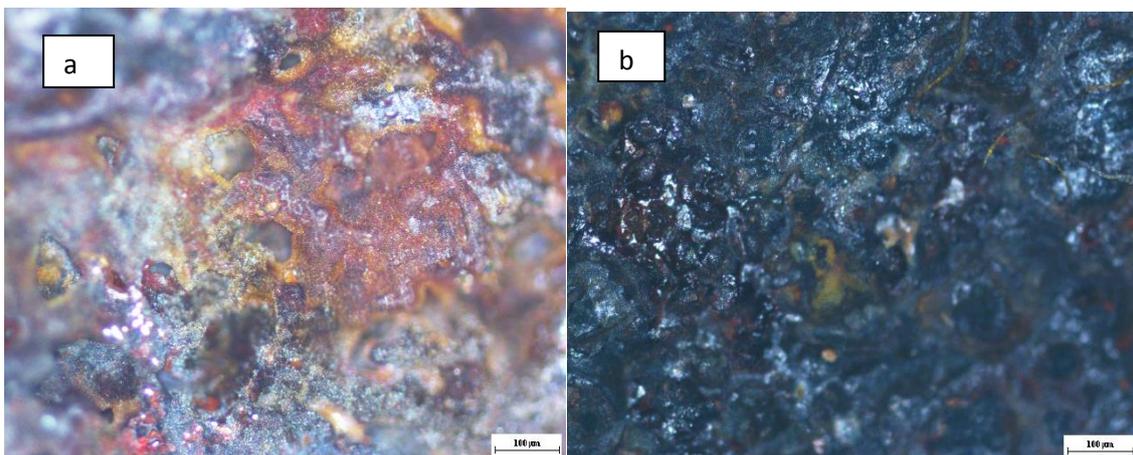


Figure III.9 : Microstructure des matériaux de base après test de corrosion: a (42CD4) et b (X70).

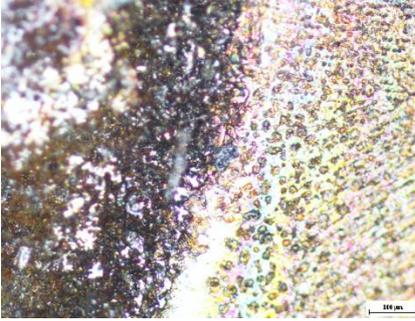
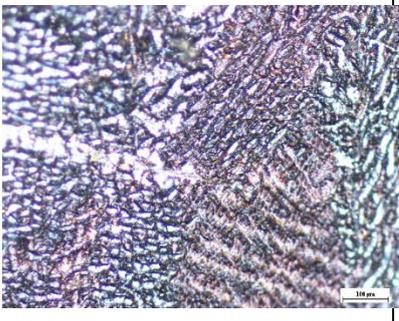
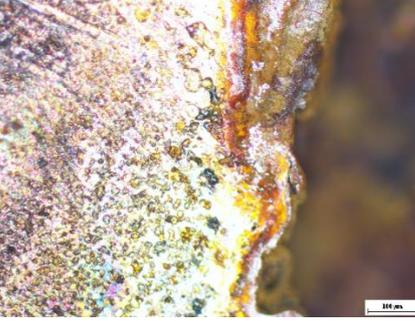
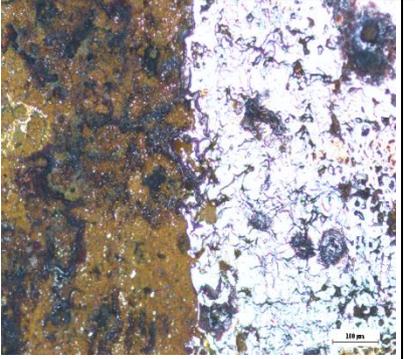
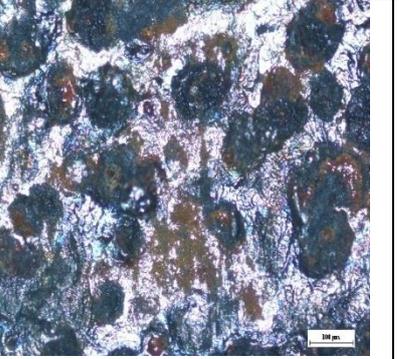
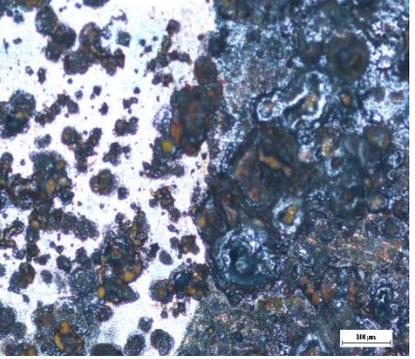
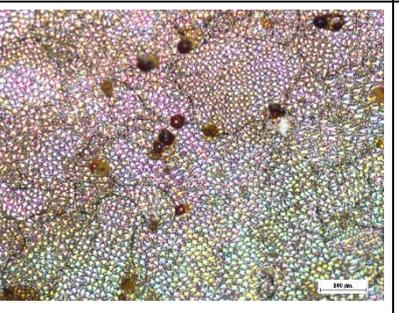
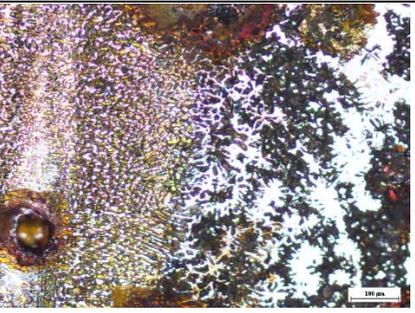
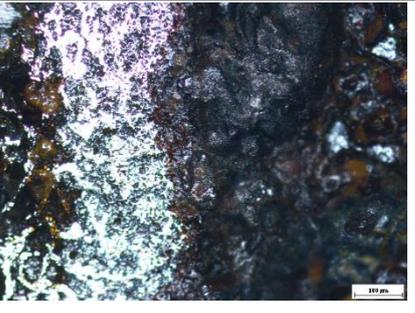
E1		
ZF-ZAT (X70)	ZF (OK60) (CC)	ZAT (42CD4)-ZF
		
E2		
ZF-ZAT (X70)	ZF (6010) (CC)	ZAT(42CD4)-ZF
		
E3		
ZAT (X70)	ZF (OK) (CA)	ZAT (304L)-ZF
		
E4		
ZF-ZAT(X70)	ZF (6010) (CA)	ZF-ZAT (42CD4)
		

Figure III.11 : Microstructures des échantillons après le test de corrosion de E1, E2, E3 et E4

Les figures (III,10 et III.11) montrent les résultats des observations optiques des surfaces de corrosion pour un grossissement (**X100**).

Ces micrographies montrent une structure fortement attaquée dans le 42 CD4, avec une grande densité de dissolution, D'autre part, les micrographies des soudures (Figure III.11) présentent des aspects fortement brûlée dans les soudures (E4, E1), on remarque aussi que la zone fondue des soudures avec le Ok60 est le moins altérée par les essais électrochimiques. On observe aussi la présence des piqûres réparties aléatoirement sur les surfaces obtenues. Le nombre de ces défauts est moindre dans les échantillons soudés par le Ok.60.

Les aciers alliés et faiblement alliés sont des matériaux passivables sensible à la corrosion par piqûres en présence d'espèces agressives spécifiques. Ce sont le plus souvent les ions chlorures (Cl⁻), qui sont les plus agressifs et qui jouent un rôle important dans le mécanisme de piqûration.

La corrosion par piqûres est liée aux attaques très localisées d'hétérogénéités qui contribuent à la détérioration de la couche passivante protégeant le matériau. Ce processus de détérioration du matériau conduit généralement à un phénomène de corrosion généralisé.

III.7. RESULTATS DE MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Dans le but de faire une étude détailler sur les phases résultantes de soudage et de comprendre les différents processus métallurgiques lors du soudage. Des caractérisations par MEB vont illustrer ce fait. :

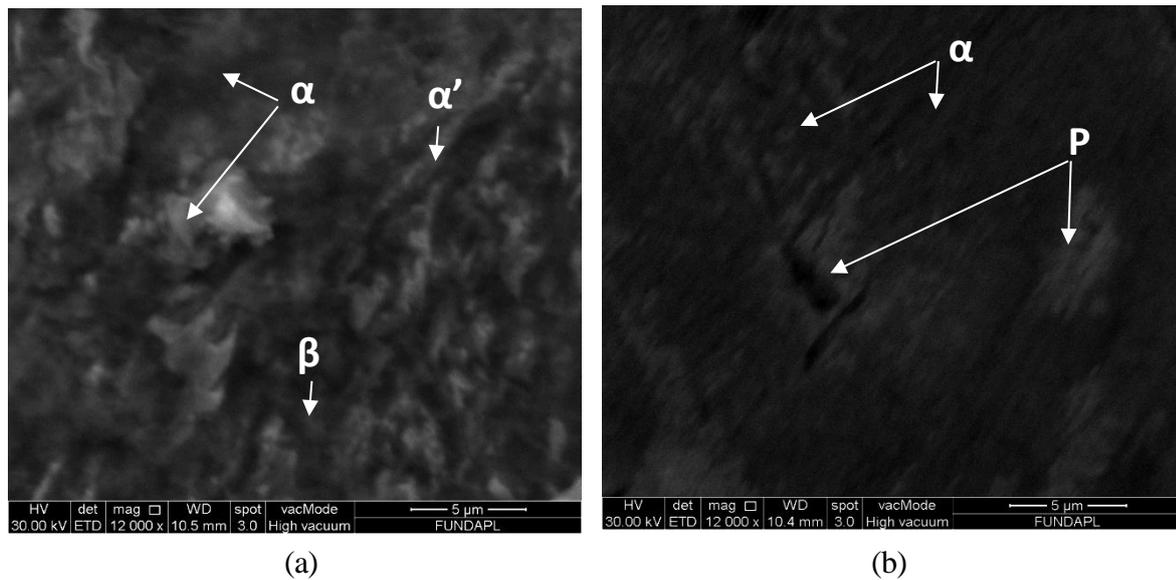
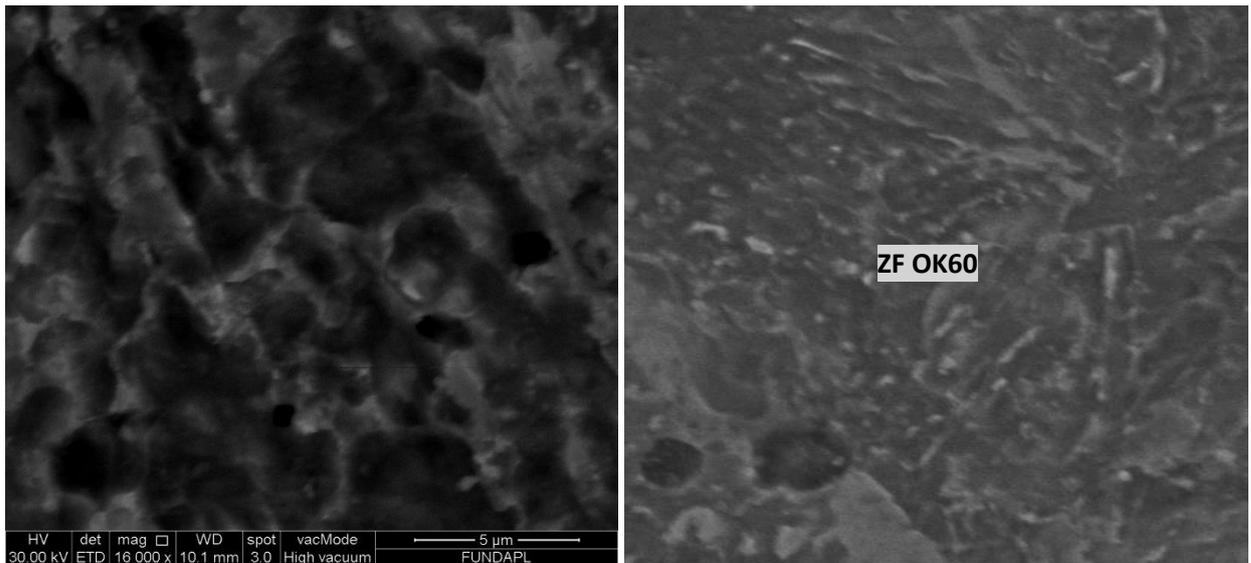


Figure III.12. Microstructure des matériaux de base a(42CD4), b(X70) par MEB.

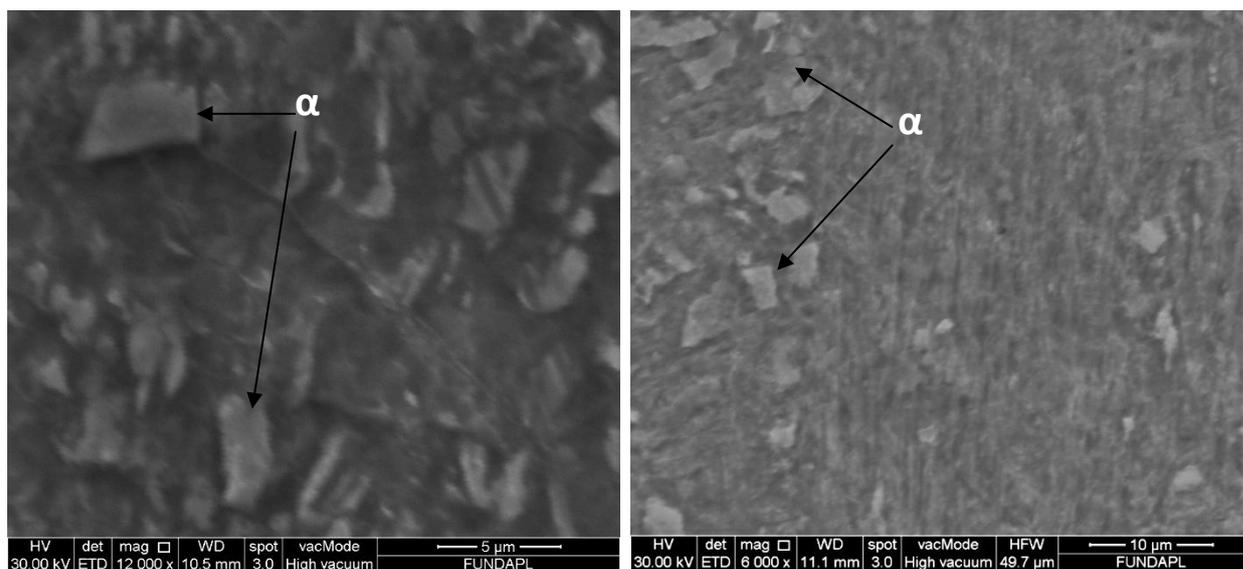
L'issue des petites échelles microscopique en MEB permet de bien caractériser les phases ferritiques, Martensitiques et bainitiques dans les matériaux de base d'une part, et la proportion des composés finesses comme la cémentite et la perlite d'autre part.

La figure III.12 Montre bien les formes et les bords de chaque phase : Dans le 42CD4 on distingue une matrice composé de la bainite granulaire, avec la présence de lamelle de la martensite et des îles ferritiques, Ainsi l'acier X70 comporte des phases perlitiques (en blanche) avec une matrice ferritique.



E1 (OK60, CC)

E3 (Ok60, CA)

Figure III.13. Microstructure des zones fondues des échantillons E1, E3 par MEB.

E2 (E6010, CC)

E4 (E6010, CA)

Figure III.14. Microstructures des zones fondues des échantillons E2, E4 par MEB.

Les figures (III.13 et III.14) montrent que :

Les structures imposées par l'OK60 sont de type austénitique avec des joints de grains ferritiques épais dans le CC et très fins dans le CA.

Dans les zones fondues E6010, les grains ferritiques deviennent très fins dans CA due à la cinétique de refroidissement dans ce processus.

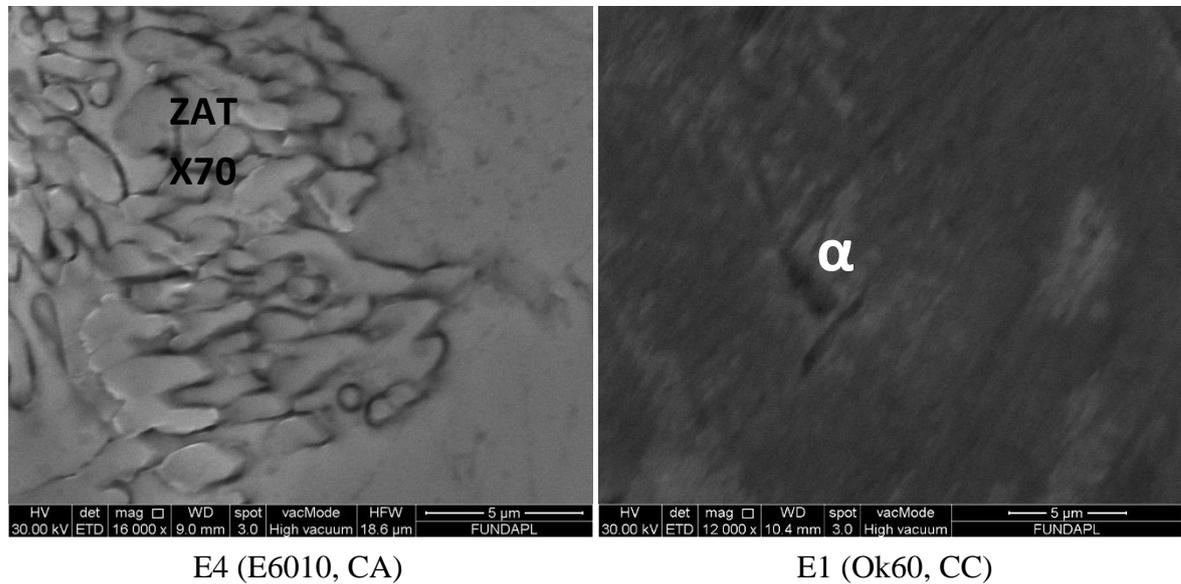


Figure III.15. Microstructures des ZAT de X70 (E1, E4) par MEB

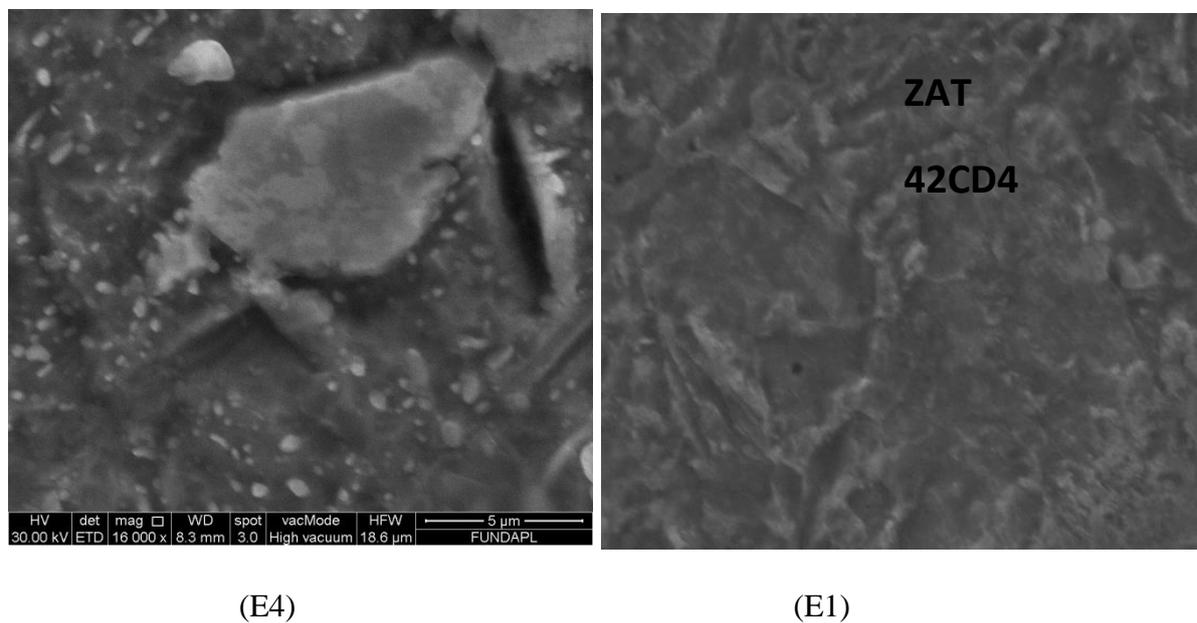


Figure III.16. Microstructures des ZAT de 42CD4 (E1, E4) par MEB

La figure III.16 montre que : Dans la zone affectée thermiquement (ZAT) du X70 soudé par le métal d'apport OK60, la perlite se transforme en austénite avec une teneur en carbone élevée due à la forte présence du Nickel (élément favorisant de l'austénite), Ainsi le Nickel se diffuse à partir des zones riches vers les zones pauvres, par contre on remarque l'existence de la perlite dans la zone affectée thermiquement dans E4.

La figure III.16 nous a permis de conclure qu'il y a un fort grossissement de grains ferritiques dans l'acier 42 CD4.

CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans un projet de compréhension globale des différents phénomènes rencontrés lors du soudage hétérogène des structures. Elle a été conduite selon une démarche purement expérimentale pour comprendre les principaux phénomènes, à prendre en compte lors de la réalisation de jonctions soudées hétérogènes par soudage TIG.

Nous nous sommes proposés d'étudier l'interaction entre microstructure, comportement mécanique et comportement électrochimique des soudures.

Après la réalisation des jonctions de soudage par le procédé TIG avec deux métaux d'apport, et deux courants différents, notre travail visait en premier lieu la caractérisation métallurgique des interfaces soudées. L'objectif étant d'expliquer les zones d'hétérogénéité du cordon de soudure.

Pour se faire, la mise en œuvre d'une large gamme de techniques de caractérisation par analyse de métallographie optique, profils de microdureté Vickers, les essais électrochimiques qui ont été indispensables. Les premiers travaux menés consolidés par ces différentes analyses ont confirmé des résultats, à savoir :

- La micrographie des deux matériaux de base montre que : la microstructure biphasés de l'acier X70 est constituée de ferrite et perlite, en revanche l'acier 42CD4 présente une microstructure martensitique dans une matrice ferritique avec une faible proportion de bénite.

- Dans les ZAT des cotés de l'acier au Carbone (42CD4), la morphologie de la martensite est devenue une phase dominante avec une augmentation de la phase bainitique dans l'échantillon soudé par courant alternatif. Cette phase est favorable pour le comportement mécanique. En outre, Les ZAT de l'acier X70 ont subi un grossissement des grains ferritiques, ce grossissement devient Léger dans E3.

- Le soudage par un acier faiblement allié E6010 (E2, E4) permet d'obtenir des zones fondues avec des structures fines constituées de zones brutes de solidification comme: ferrite proeutectoïde et aciculaire, constituant lamellaire de bainite et martensite.

- Le soudage par un alliage à base de Nickel induit des zones fondues constituées de grains austénitiques colonnaires entourés par des précipitations ferritiques, on observe aussi que dans le cas de (CA) les grains austénitiques subissent un grossissement.

- L'utilisation du courant Alternatif provoque une diminution de la microdureté par rapport au courant continu, cette diminution est due à l'effet du cycle thermique de soudage ce qui provoque une variation rapide dans le taux de chauffage.

- L'utilisation du métal d'apport E6010 augmente la microdureté par rapport au OK60 cela est dû aux effets des éléments d'addition.

- Les essais de polarisation montrent clairement que les caractéristiques du Comportement électrochimique des échantillons soudés par Ok60 sont meilleurs.

Ce travail ne constitue qu'une modeste contribution à la compréhension des différents phénomènes physico-chimiques rencontrés liés à la fiabilité des structures métalliques hétérogènes. Afin de compléter nos résultats, plusieurs directions d'études pourraient être suivies. A ce jour, deux principales voies peuvent être envisagées :

➤ Travailler à l'échelle microscopique moyennant des caractérisations métallographiques plus fines (MEB, DRX) afin d'identifier avec précision les différentes phases en présence et corrélérer la structure métallurgique au comportement vis à vis de la traction et la résilience.

Références bibliographiques

[1] : **Guozhen WANG, Haitao WANG, Fuzhen XUAN, Shantung TU, Changjun LIU**, Local fracture properties and dissimilar weld integrity in nuclear power plants (Eng. 2013 vol8(3) : 283-290.

[2] : **Marc GRUMBACH**, Technique de l'ingénieur, «Aciers microalliés», M4 525.

[3] Matériaux et assemblages hétérogènes : de l'élaboration à la caractérisation mécanique, version 1-4apr 2013

[4] **Jeong Kil Kim, Seung Gab Hong, Ki Boong Kang, and Chung Yum Kang**, Microstructure and High Temperature Properties of the Dissimilar Weld between Ferritic Stainless Steel and Carbon Steel, vol 5, No5 (2009), pp :834-849.

[5] **Jing Wang, Min-xu Lu, Lei Zhang, Wei Chang, Li-ning Xu and Li-hua Hu**, Effect of welding process on microstructure and properties of dissimilar weld joints between low alloy steel and duplex stainless steel, International Journal of Metallurgy and Materials, Vol 19, No 6, June 2012 : p 518

[6] **Anna Vyroslova, Jan Kepic, Viera Homolova and Ladislav Falat**, Precipitation of Niobium Boride Phases at the Base Metal/Weld Interface in Dissimilar Weld joints, JMEPEG (2015) vol 24 : 2699-2708.

[7] **K. Bettahar, J H Schmitt, R Badji, M Gaceb, C Kahloun, B Bacroix**, Microstructure and mechanical behavior in dissimilar 13Cr/2205 stainless steel welded pipes. Material and Design vol 85 (2015) : 221-229.

[8] **M Azizieh, M Khamisi, D J Lee, E Y Yoon, H S Kim**, Characterizations of friction welding of ST37 and CK60 steels, Int J Manuf Technol (2016)85 : 2773-2781.

[9] : **B. Thomas, J.H.Schmitt.** Durcissement des Aciers : Role de la microstructure, Techniques de l'ingénieur, m 4341,2002.

[10] : **Norme NF.NE.10.027**

[11] : **Norme ISO 4948-1 :1982.**

[12] : Le Comité sectoriel de la main-d'œuvre dans la fabrication métallique industrielle (CSMOFMI), août 2010.

[13]: Metalshandbook Vol.1 «Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys», ASM International, USA, 2005.

[14] : **DUDOGNON JULIEN** : Étude des modifications structurales induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques, thèse de doctorat de l'université d'Orleans, Décembre2006.

[15] : **Jean-Pierre Planckaert.** Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc. Automatique / Robotique. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2008.

[16] **HERBERT H. UHLIG & R. WINSTON REVIE.** Corrosion and corrosion control. Third edition / an instruction to corrosion science and Engineering, page 299-300, 1985.

[17] **R. Cazes** Procédés de soudage : principes généraux et critères de choix, Technique de l'ingénieur,7700.

[18] : **K.LAZAZI** : « Comportement en conditions de fatigue thermique de l'acier inoxydable austénitique 304 soudé par procédé TIG», thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

[19]: **R.VARISELLAZ** : « Soudage, éléments de conception et de réalisation », Paris 1982.

[20] **R. Le gouic** Précis de soudage brassage et techniques connexes, Eyroles, (1978).

[21] **W. CHAPEAU, R. BAUS.** “Application du soudage aux constructions” Editions Sciences et Lettres. (1977).

[22] **R.Cazes** Soudage à l'arc, Techniques de l'ingénieur, B7730, Août 1995

[23] **ESAB Antony FERNANDES**, jeudi 29 octobre 2009

[24] Edition originale: Polysoude S.A.S. Nantes France Publié par Fronius International GmbH

[25] **Althous**, Procédé de soudage à l'arc, Éd. Rynald Goulet inc, 2008.

[26] le soudage TIG, LINCOLN ELECTRIC the welding experts

[27] **Rocdacier**, Les défauts du soudage TIG.le 25/06/2015

[28] MISE EN OEUVRE ET CARACTERISATION D'ASSEMBLAGES SOUDES PAR PROCEDES TIG ET LASER DE TOLES D'ALLIAGES DE TITANE REFRACTAIRES le 9 novembre 2005 Institut National Polytechnique de Toulouse.

[29] **Norme ISO 8044**, corrosion des métaux et alliages, vocabulaire,2eme édition (1989).

[30] **Gérard Béranger, Henri Mazille**, corrosion des métaux et alliages, Lavoisier,(2002).

[31] corrosion localisée, **F.DABOSI, G.BERANGER, B.BAROUX.**

[32] **Afaf youcef Azouz.** « Effets de la concentration de (NaCl) sur la corrosion de l'acier doux en présence des cations Zn et Anions CrO », Mémoire de magister, université Hadj Lakhdar Batna.

[33] Corrosion basics, chap V, Localized corrosion 93-108, Ed. NACE (1984).

[34]<https://fr.wikibooks.org/w/index.php?title=Technologie/Matériaux/Généralités/Aciersinoxydables&oldid=427044>

[35] **Pierre-Jean CUNAT**, Technique d'ingénieur : Aciers inoxydables, propriétés, Résistance à la corrosion

[36] **Vincent Gaudefroy, Bogdan Cazacliu, Chantal De La Roche, François Olard, Etienne Beduneau, et al.**. Etude en laboratoire des performances mécaniques des enrobés à la mousse de bitume utilisant des granulats tièdes. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2007, pp 165-174.

[37] Mémoire de Master 2 Matériaux et traitement de surface Thème Investigation expérimentale de la soudabilité hétérogène acier micro-allié /acier 2015/2016

[38] : Thèse de master, université de Biskra « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers » par HICHEM BEKOUICHE promotion juin 2013.

[39] **Jean POKORNY** «Welding pressure pipelines &pipingsystems», ed. THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY 2003.



La grue fabriquée par le CRTI

- **Appareillage :**

- Scie à métaux
- Fraiseuse.
- Spectrometre.
- Microtronçonneuse
- Appareille de l'enrobage
- Polisseuse.
- Microscope optique.
- Le microscope électronique à balayage.
- Microduromètre .



Scie à ruban
(KNUTH HB450)



Fraiseuse
(KNUTH HB 400)



Appareille de soudage TIG
(Dymasty 350)



Spectrometre
(FOUNDRY-MASTER Xpert)



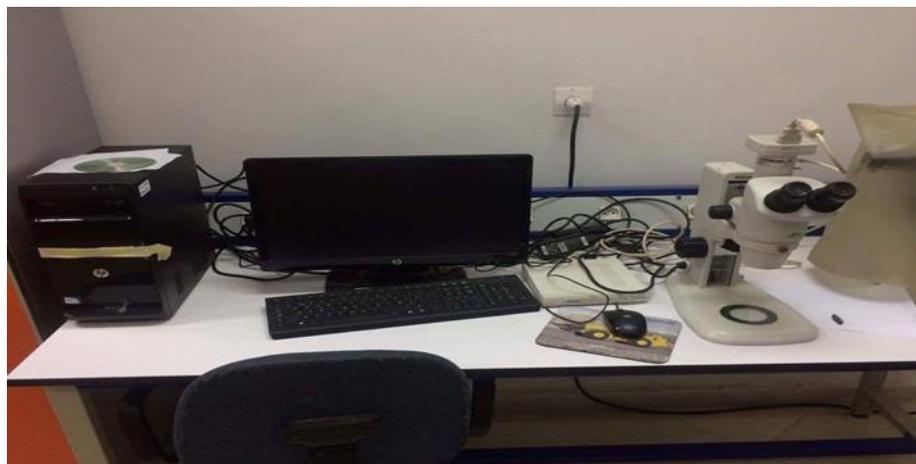
Microtronçonneuse
(Struers Disctom-6)



Appareille de l'enrobage
(Stuers labopress-1)



Polisseuse
(STRUERS)



Microscope optique
(NIKON)



Le microscope électronique à balayage
(ZIESS Gemini SEM 300)



Microduromètre semi-automatique
(SHIMADZU HMV-M)

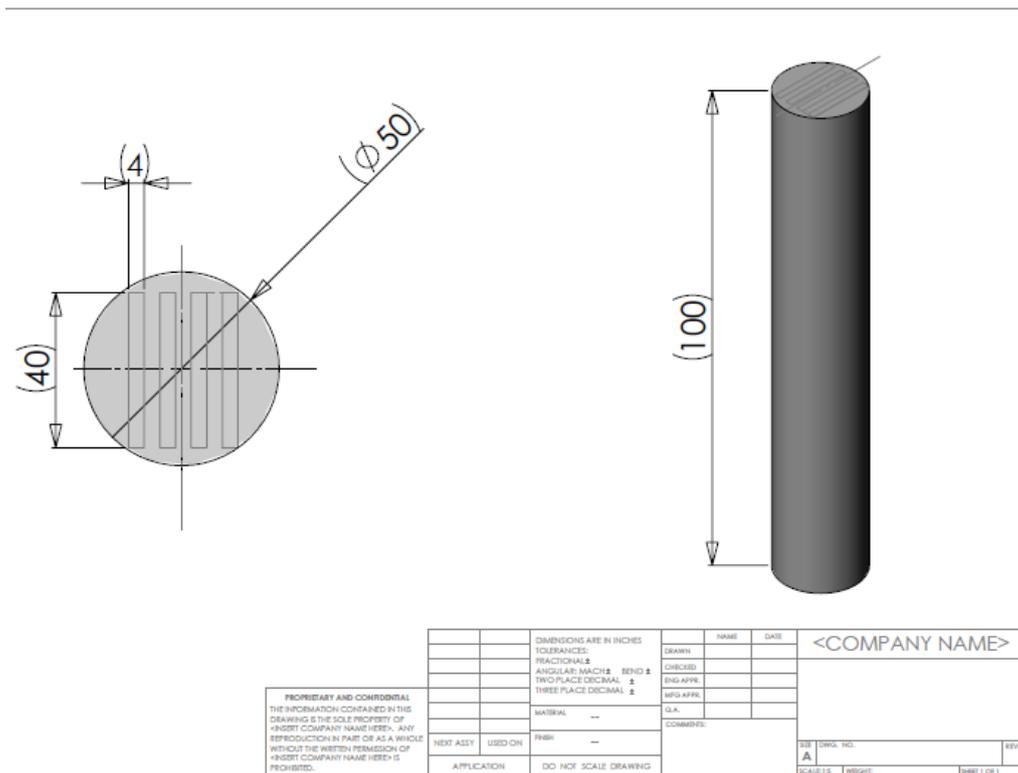


Schéma de découpage de l'acier 42CD4 par le logiciel SOLIDWORKS