



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE -
ANNABA -
(Ex ENSMM)

DEPARTEMENT SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR D'ETAT

SPECIALITE : SCIENCE ET GENIE DES MATERIAUX

Intitulé

Etude de comportement métallurgique et mécanique des soudures TIG hétérogène
de la nuance AISI 430

Présenté par

DJELLAB Maria
BENCHOUIA Ilham

Encadrant
Mr. BENSAID nabil

Maitre de recherche B CRTI- Alger

Encadrant
Mr. RETIMA Mohamed

Professeur ENSTI (Ex ENSMM)

Président
Mr.BENOUDIA Mohamed cherif

Professeur ENSTI (Ex ENSMM)

Examineur
Mr.BELHANI Mehdi

MCA ENSTI (Ex ENSMM)

Année 2023



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie -
Annaba

Département : Science et Génie des Matériaux

AUTORISATION DE DEPOT FINAL DU
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Je soussigné (e) M. BENOUZIA Med Chenif

Président(e) du jury de soutenance de mémoire de fin d'études (MFE), déclare

avoir autorisé l'ingénieur d'état M. DJELLAB Maria / BENOUZIA

à déposer son mémoire de fin d'études après avoir apporté les corrections
signalées par les membres du jury.

ILhem

Avis du Promoteur :

P. RETINA Med
Chenif

Avis de l'Examineur :

Dr. Dahbi Be Hammi
A.V.

Med
09.07.2023

Président du Jury

Med
Chenif

Remerciement

Avant toute chose, toute ma gratitude va au ALLAH pour m'avoir créé et donné la force nécessaire pour accomplir ce travail.

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont toujours soutenu depuis mon premier jour à l'école et jusqu'à aujourd'hui.

Au terme de ce travail, je tiens à remercier mes deux encadreurs le Pr RETIMA MOHAMED et Mr N. BENDAID pour leur disponibilité, leurs conseils et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail.

Je tiens à remercier également le Pr BENOUDIA MOHAMED CHERIF pour m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, Dr . BELHANI MEHDI d'avoir accepté de juger mon humble travail.

Je n'oublie pas de remercier les enseignants du département de SGM et tous l'équipe de notre chères école ENSTI (EX ENSMM) pour nous avoir offert, moi ainsi que tous mes camarades de la promotion, une bonne formation au bout des trois années de spécialité.

Finalement, mes remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au déroulement ce cet humble travail, tous mes camarades de classe dont l'amitié m'est très précieuse.

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A ma très chère mère SALIHA qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi.

A mon très cher père ALI pour ses encouragements son soutien surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études

A ma sœur MERIEM et ça petite famille NADIR et DINA

A mon oncle MOUHAMED et ça femme FATIMA ZAHRA

A ma sœur KHADIDJA et ça fillette MARIA ARIDJE et HAYTHEM

A mes frères SMAIL, ANOUAR, ADEM et AYMEN

A mes chères collègues de la promo 2020_2023

A mes amis : BOUCHRA, CHAIMA, KHOULOU, LILYA

En fin je remercie ma binôme et ma sœur ILHAM qui a contribué à la réalisation de ce travail.

maria

Table de matières

IntroductionGeneral	1
Chapitre I Généralités sur les aciers inoxydables	
I.1.2 Historique :	3
I.1.3 Définition :	4
I.1.4 Les types des aciers inoxydables :	5
I.1.4.1 Aciers inoxydables austénitiques :	5
I.1.4.2 Aciers inoxydables ferritiques :	5
I.1.4.3 Aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) :	6
I.1.4.4 Aciers inoxydables martensitiques :	6
I.1.4.5 Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation :	7
I.1.5 Structure des aciers inoxydables	7
I.1.5.1 Système fer-chrome.....	7
I.1.5.2 Système binaires Fe-Ni	8
I.1.5.3 Système Fe-Ni-Cr.....	8
I.1.6 Influence des éléments d'addition	10
I.1.7 Composition chimique des différents types des aciers inoxydable	11
I.1.8 Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables.....	12
I.1.9 Domaines d'utilisation des aciers inoxydables :	13
I.1.10 Désignations	14
I.2 Généralités sur les aciers inoxydables ferritique	15
I.2.1 Définition	15
I.2.2 Norme de conception internationale	16
I.2.3 Composition et propriétés	16
I.2.4 Propriété physique des aciers Ferritique	17
I.2.5 Etude spécifique des aciers inoxydables Ferritiques :	18
1.2.6. Phénomène de fragilisation :	19
I.3 Conclusion.....	19
Chapitre II Soudage des aciers inoxydables	
II.1 Introduction :	20

II.2 Conditions d'installation de la liaison métallique :	20
II.3 Définition et procédés :.....	21
Soudage :	21
II.4 Préparation de soudure.....	21
II.4 Caractéristique de soudure :.....	21
II.4.1. Zone fondue	22
II.4.2. Zone de liaison.....	22
II.4.3. Zone affectée thermiquement	22
II.4.4. Zone de métal de base.....	22
a) Soudage par fusion :	24
b) Soudage par pression :	24
II.6 Soudage à l'arc :	24
II.6 .1 Arc de soudage :.....	24
II.6.2 Gaz de protection :	25
- L'argon :	25
- L'hélium :	25
- Le dioxyde de carbone :.....	25
- L'hydrogène :	25
II.7 Soudage TIG:.....	25
II.7.1 Principe :	26
II.7.2 Matériel :	27
- Le pistolet à souder :.....	27
- L'équipement de contrôle :.....	27
- L'électrode :.....	27
- Le métal d'apport :	28
- Le gaz de protection :	28
- L'alimentation Le soudage :	28
II.8 Domaines d'application procédés de soudage TIG :	30
II.9 cycle thermique :	31
II.9 Modifications microstructurales en zone affectée thermiquement :	32
II.10.1 Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur :.....	32
II.10.2. Transformation en ZAT lors de chauffage :	32
II.10.3. Transformation en ZAT lors de refroidissement	33

II.11 Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG :	34
II.12 Les principaux défauts de soudures :	35
- Les inclusions gazeuses.....	35
- Les inclusions solides.....	35
- Défauts de fusion (collage)	35
- Défauts de pénétration.....	35
- Collage ou manque de pénétration	36
-Morsures et caniveaux.....	37
-Porosités	37
-Les fissures	38

Chapitre III Techniques expérimentales

III.1 Introduction :	39
III.2 Matériaux et composition chimique :	39
III.2.1 Le métal de base	39
III.2.1.1 Composition chimique de métal de base AISI 430 :	40
III.2.1.2 Caractéristiques générales	40
III.2.2 Choix du métal d'apport.....	41
III.3. Réalisation des soudures :	42
III.3.1. Choix des procédés de soudage :	42
III.3.1.1. Equipements du poste soudage TIG	42
III.3.1.2. Principe du procédé de soudage TIG :	42
III.4. Préparation des échantillons au contrôle :	43
III.4.1. Le découpage et mise en forme des tôles :	43
III.4.2. Nettoyage de la pièce :	44
III.4.3 Le bridage :	45
III.5. Le soudage :	45
III.5.1. Paramètres de soudage :	45
III.5.2. Déroulement de l'opération de soudage :	46
III.6. Caractérisation structurale :	47
III.6.1. Préparation métallographie des échantillons :	47
III.6.1.2. Attaque métallographique :	50
III.7. Méthodes de caractérisations :	51
III.7.1. Observation micrographique :	51

III.7.1.1. Principe de fonctionnement du microscope optique :	51
III.7.2Analyse par diffraction des rayons X :	52
III .7.3. Analyse par microscope électronique à balayage :	54
III.7.4.1. Essai de microdurte :	55
III.7.5. Essai de traction :	57

Chapitre IV Resultats et interprétations

VI.1. Introduction.....	60
VI.2. Analyse de composition chimique.....	61
VI.3. Caractérisation structurale.....	61
VI.3.1. Observation métallographique :	61
VI.3.2. Analyse par diffraction des rayons X.....	69
VI.3.3. Observations microstructurales par microscope électronique à balayage.....	74
VI.3.3.2. L’analyse des résultats obtenus par spectrométrie d’énergie dispersée (EDS)	79
VI.4. Caractérisation mécanique.....	85
VI.4.1 Essai de micro-dureté.....	85
VI.4.2. Essais de traction.....	90
VI.4.2.1. Résultats de la caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB) [examen des faciès de rupture].....	94
Conclusion général.....	97

Listes des figures

Figure. I.1. Formation de la couche passive dans les aciers inoxydables	2
Figure. I. 2.Diagramme Fe-Cr	6
Figure. I. 3.Diagramme Fe-Ni	6
Figure.I. 4.Diagramme d'équilibre ternaire Fe - Cr – Ni	7
Figure. I. 5. Coupe du diagramme ternaire Fe-Cr- Ni pour des teneurs croissantes en Nickel. Influence du Ni sur l'extension de la boucle γ	7
Figure. I. 6.diagramme de Schaeffler	13
Figure II.1.Chanfrein en V	20
Figure II.2.Les différentes zones de soudure	21
Figure II.3.Les différentes zones de soudure	23
Figure II.4. classification de Procède de soudage TIG	25
Figure II.5.principe de soudage TIG	25
Figure II.6.Formes des électrodes en fonction du courant.	28
Figure II.7.Schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage.	30
Figure II.8.Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion. Comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l'arc submergé)	31
Figure II.9.Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion. Comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l'arc submergé).	32
Figure II.10.(a) Exemple de diagramme TRC en conditions de soudage ($\theta_M=1300^\circ$)...	33
Figure II.11.Excès de pénétration	35
Figure II.12.manque de pénétration et collage en bord	36
Figure II.13.Morsures et caniveaux	36
Figure II.14.Porosités débouchantes en surface de cordon de soudure	36
Figure II.15.fissure longitudinale sur un cordon de soudure (Fissuration à chaud).....	37
Figure.III.1. Poste de soudage TIG	41
Figure.III.2. Schéma de principe du soudage TIG	41
Figure.III.3. Protection gazeuse air (a) et hélium(b).....	42

Figure.III.4.Préparation des tôles pour l'opération de soudage.	42
Figure.III.5.le nettoyage d'échantillon.....	43
Figure.III.6. systèmes de bridage de soudage.	43
Figure.III.7.Tôles soudées par la procèdes TIG.....	44
Figure.III.8.Tronçonneuse (CRTI-Alger).	46
Figure.III.9. Zone critique et zone active de la soudure.....	46
Figure.III.10.Zone de prélèvement.	46
Figure.III.11. Appareil de l'enrobage utilisé (CRTI- Alger).	47
Figure.III.12. Réactifs utilisée pour l'attaque chimique.	49
Figure.III.13. Microscope optique (CRTI-ALGER).....	50
Figure.III.14. Famille de plans réticulaires de distance d, sur lesquels diffracte un faisceau de rayons X.	51
Figure.III.15. Le diffractomètre utiliser du la marque D2 PHASER-Bruker.	51
Figure.III.16. Microscope électronique à balayage utiliser (ENSMM).	52
Figure.III.17. Dimensions de l'empreinte et formule de calcul de la dureté Vickers.....	53
Figure.III.18. Le micro-duromètre utilisée (ENSMM).....	54
Figure.III.19. Profil de microdurté.....	54
Figure.III.20. Géométrie des éprouvettes de traction conformément à la norme ASTM E08	55
Figure.III.21. La machine de traction « MTS. Criterion 45 » E8.	56
Figure.III.22. Eprouvettes avant la traction.....	56
Figure.III.23.Eprouvette après la traction.	56
Fig.VI. 1Microstructure de métal de base (X1000).	61
Fig.VI. 2 Microstructure de la zone de liaison (1) X50 ;(2) X150 ;(3) X1500.....	62
Fig.VI. 3 Diagramme pseudo-binaire à 17% Cr [9].....	63
Fig.VI. 4 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austenitique 308L).	64
Fig.VI. 5 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austenitique 309).....	64
Fig.VI. 6 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austenitique 316).....	65

Fig.VI. 7 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenito-ferritique 2209).	65
Fig.VI. 8 . Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenitique 308L).	66
Fig.VI. 9 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenitique 309).	67
Fig.VI. 10 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenitique 316).	67
Fig.VI. 11 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenito-ferritique 2209).	67
Fig.VI. 12 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenitique 308).	69
Fig.VI. 13 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenitique 309).	70
Fig.VI. 14 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d’apport austenitique 316).	70
Fig.VI. 15 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d’apport austenito-ferritique 2209).	71
Fig.VI. 16 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures courant continu	72
Fig.VI. 17 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures courant pulsé.	73
Fig.VI. 18 La microstructure du métal de base AISI 430 l’état initial obtenue par MEB	75
Fig.VI. 19 spectre d’analyse de métal de base par la technique EDS.....	75
Fig.VI. 20 . La microstructure d’échantillon souder par métal d’apport 308	75
Fig.VI. 21 La microstructure d’échantillon soudé par métal d’apport 308 avec courant pulsé	76
Fig.VI. 22 La microstructure d’échantillon souder par métal d’apport 309 avec courant continue.....	76
Fig.VI. 23 La microstructure d’échantillon souder par métal d’apport 309 avec courant pulsé (a)Interface ZAT-ZF (b) ZF	77

Fig.VI. 24 La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 316 avec courant pulsé(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF	77
Fig.VI. 25 La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 316 avec courant continue(a) Interface ZAT-ZF (b) ZF	77
Fig.VI. 26 . La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 2209 avec courant pulsé(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF	78
Fig.VI. 27 . La microstructure d'échantillon souder par métal d'apport 2209 avec courant continue(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF	78
Fig.VI. 28 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 308 l'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé.....	80
Fig.VI. 29 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 309 L'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé.....	80
Fig.VI. 30 . Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 316 L'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé.....	80
Fig.VI. 31 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 2209 a l'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé.....	81
Fig.VI. 32 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 308 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé.....	81
Fig.VI. 33 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudes avec métal d'apport 308 par la technique EDS (courant continu).....	81
Fig.VI. 34 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudes avec métal d'apport 308 par la technique EDS (courant continu).....	82
Fig.VI. 35 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 309 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé.....	82
Fig.VI. 36 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudes avec métal d'apport 309.....	82
Fig.VI. 37 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudes avec métal d'apport 309 par la technique EDS (courant pulsé)	83
Fig.VI. 38 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudes avec métal d'apport 316 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé.....	83

Fig.VI. 39 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d'apport 316 par la technique EDS (courant continu).....	83
Fig.VI. 40 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d'apport 316 par la technique EDS (courant pulsé)	84
Fig.VI. 41 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d'apport 2209 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé.....	84
Fig.VI. 42 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d'apport 316 par la technique EDS (courant continu).....	84
Fig.VI. 43 spectre d'analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d'apport 2209 par la technique EDS (courant pusé).....	85
Fig.VI. 44 Schéma du balayage de la micro-dureté.....	85
Fig.VI. 45 Profile de la microdureté de la zone de liaison (Soudures homogènes)....	86
Fig.VI. 46 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).....	86
Fig.VI. 47 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).....	87
Fig.VI. 48 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).....	87
Fig.VI. 49 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austenito-ferritique 2209).	87
Fig.VI. 50 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).....	88
Fig.VI. 51 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).....	88
Fig.VI. 52 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).....	88
Fig.VI. 53 La microdurté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austenito-ferritique 2209).	89
Fig.VI. 54 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).....	90

Fig.VI. 55 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).....	91
Fig.VI. 56 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).....	92
Fig.VI. 57 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).....	92
Fig.VI. 58 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénito-ferritique 2209).	93
Fig.VI. 59 Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 308. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé	94
Fig.VI. 60 Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 316. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé	95
Fig.VI. 61 Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 2209. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé	95

Listes des tableaux

Tableau.I.1. Composition chimique des différents types des aciers inoxydable	10
Tableau.I.2. Composition chimique des différents types des aciers inoxydable	11
Tableau.I.3. Principales applications des aciers inoxydables	12
Tableau.I.4. Composition chimique des aciers inoxydables ferretiques.....	15
Tableau.I.5. Les propriétés physiques des aciers inoxydable ferritique	16
Tableau.III.1. La composition chimique du métal de base	39
Tableau.III.2. La composition chimique du métal d'apport 308	40
Tableau.III.3. La composition chimique du métal d'apport 309	40
Tableau.III.4. La composition chimique du métal d'apport 316	40
Tableau.III.5. La composition chimique du métal d'apport 316	40
Tableau.III.6. Principaux paramètres du procédé de soudage employé en courant continu	44
Tableau.III.7. Principaux paramètres du procédé de soudage employé en courant continu	44
Tableau.III.8. Les étapes à suivre pour le polissage	48
Tableau.III.9. Les étapes à suivre pour l'attaque	49

Listes des abréviations

ZF	Zone fondue.
ZAT	Zone affectée thermiquement.
MB	Métal de base.
MEB	Microscope Electronique à Balayage
CC	Courant continu
CP	Courant pulse
DRX	Diffraction des rayon X
EDS	Spectrométrie d'énergie dispersée
AISI	American Iron & Steel Institute

Introduction générale

Les aciers inoxydables, communément appelés inox, jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines de notre vie quotidienne, tels que l'industrie mécanique, l'agroalimentaire, la chimie, les transports, la médecine, la chirurgie, et bien d'autres. Ces aciers sont des alliages de fer contenant au moins 10,5% de chrome (Cr) et au maximum 1,2% de carbone (C). Ces proportions sont essentielles pour assurer la formation d'une couche de surface auto-régénératrice, connue sous le nom de couche passive, qui confère une remarquable résistance à la corrosion.

En outre, d'autres éléments peuvent être ajoutés pour améliorer les caractéristiques de ces aciers. Dans ce contexte, il convient de mentionner que le nickel peut être incorporé afin d'améliorer les propriétés mécaniques en général, et notamment la ductilité. De même, l'ajout de molybdène ou de titane vise à renforcer la stabilité de l'alliage à des températures différentes de la température ambiante. De plus, l'introduction d'éléments à point de fusion élevé, tels que le vanadium et le tungstène, généralement accompagnée d'une augmentation de la teneur en chrome, confère une résistance accrue aux hautes températures lorsqu'ils sont exposés à une flamme (aciers réfractaires).

Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par leur excellente résistance à la corrosion par piqûres en milieu chloruré, surpassant celle des aciers austénitiques. De plus, ils présentent de bonnes propriétés de mise en forme à froid, une grande résistance à la torsion et à l'arrachement grâce à un module d'Young élevé, une résistance à l'oxydation à haute température et une dilatation thermique deux fois moins élevée que celle des aciers austénitiques. De plus, leur prix est généralement plus stable par rapport aux autres types d'aciers inoxydables.

Cependant, l'utilisation des aciers inoxydables ferritiques en construction soudée est grandement limitée en raison des nombreux problèmes rencontrés lors du procédé de soudage. Ces problèmes incluent le grossissement des grains, à la fois dans la zone fondue (ZF) et dans la zone affectée thermiquement (ZAT), ainsi que la formation de martensite au niveau des joints des grains de la soudure. Le grossissement des grains de la ferrite à haute température et la présence de martensite réduisent généralement la résilience à température ambiante, rendant l'assemblage plus susceptible de subir une rupture fragile.

Cette étude vise à réaliser une évaluation comparative des soudures TIG sur l'acier inoxydable ferritique AISI 430 en utilisant différents métaux d'apport, notamment les métaux d'apport austénitiques (de types 308, 309 et 316) ainsi que l'austéno-ferritique (de type 2209). L'objectif principal de cette étude est double : premièrement, trouver le métal d'apport adéquat, puis optimiser les paramètres de soudage en TIG continu et en TIG pulsé.

Ce manuscrit est structuré en deux parties distinctes :

La première partie se concentre sur l'étude bibliographique réalisée dans le cadre de notre recherche. Elle est divisée en deux chapitres.

- Le premier chapitre présente un bref rappel sur les aciers inoxydables ferritiques, abordant notamment les éléments et les diagrammes de phases, la description des différentes familles d'aciers inoxydables, les caractéristiques des structures métallurgiques susceptibles d'être observées dans les soudures en acier inoxydable ferritique, ainsi que les traitements thermiques associés à ces aciers.
- Le deuxième chapitre se focalise sur les procédés de soudage et les phénomènes métallurgiques intervenant lors du soudage TIG des aciers inoxydables ferritiques.

La deuxième partie traite de l'approche expérimentale de notre travail et comprend également deux chapitres.

- Dans le chapitre consacré aux "Procédures expérimentales", nous présentons en détail le matériau sur lequel notre étude a été menée, ainsi que la description des différentes techniques expérimentales utilisées.
- Le chapitre suivant, intitulé "Résultats et interprétations", regroupe les résultats obtenus au cours de nos expérimentations et propose des interprétations à partir de ces résultats.

Le manuscrit sera soigneusement finalisé avec une conclusion générale qui offrira une perspective exhaustive de cette étude, en intégrant méticuleusement les résultats obtenus. Cette conclusion mettra en évidence les liens significatifs entre les différentes parties de l'étude et offrira une vision d'ensemble cohérente.

I.1 Introduction :

Il faut souligner que, si les aciers inoxydables ont connu l'extraordinaire développement que nous connaissons, cela est dû à la disponibilité à grande échelle des métaux entrant dans leur composition, c'est-à-dire le chrome, le nickel, le molybdène et le manganèse, ce dernier pouvant être utilisé comme substitut au nickel.

De plus ces métaux doivent être économiquement rentables de manière à pouvoir produire l'acier inoxydable à un coût compétitif [01].

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer ou plus exactement à base d'acier (alliage : fer-carbone) qui doivent contenir au moins 11% de chrome et souvent d'autres éléments d'addition tel que le nickel (ou son substitut le manganèse) et dans une moindre mesure le molybdène. Cette quantité de chrome confère à l'acier une bonne résistance à la corrosion. Cette résistance est due à la formation spontanée d'une couche superficielle d'un oxyde métallique, qui protège le métal et le rend passif. Cependant l'ajout du chrome aux aciers inoxydables est limité à cause du risque de précipitation des carbures de chrome et des phases intermétalliques [02]

I.1.2 Historique :

L'histoire des aciers inoxydables est intimement liée à celle du chrome et aux travaux du chimiste français Nicolas-Louis Vauquelin (1763-1889) qui, en 1797, fut le premier à isoler cet élément

Les premières observations des propriétés « inoxydables » du fer allié au chrome furent faites par Berthier, un autre français. Il montra dès 1821 que l'alliage fer-chrome était d'autant plus résistant à certains acides que sa teneur en chrome était plus élevée. Par contre, la quasi-impossibilité d'abaisser la teneur en carbone de l'alliage constitua un obstacle majeur à son développement.

En 1904, Léon Guillet puis Albert Portevin publièrent une série d'études relatives à la structure et aux propriétés des alliages fer-chrome couvrant les nuances martensitiques à 13 % de chrome et les nuances ferritiques à 17 % de chrome.

En 1909, L. Guillet publia une étude sur les aciers inoxydables au chrome-nickel ou aciers inoxydables austénitiques complétant ainsi ses études précédentes sur les alliages fer-chrome et

couvrant pratiquement l'ensemble de la famille des aciers inoxydables. Le métallurgiste allemand W. Giesen fit, de son côté, et à la même époque, des recherches comparables.

Les études de L. Guillet, A. Portevin et W. Giesen permirent ainsi, dès 1909, de classer les aciers inoxydables en fonction de leur structure et de définir les trois familles principales : martensitique, ferritique et austénitique.

Le passage au stade industriel est attribué à Harry Brearley pour les aciers inoxydables martensitiques. Il serait à l'origine de la première élaboration réalisée à Sheffield en 1913.

Un mérite analogue reviendrait aux allemands Benno Strauss et Eduard Maurer pour la production des aciers inoxydables austénitiques et aux américains Frederick Becket et Christian

Dantsizen pour celle des aciers inoxydables ferritiques. La première description de la passivité des aciers inoxydables est attribuée à l'allemand Philipp Monnartz.

Les recherches ultérieures ont notamment porté sur le rôle des éléments d'alliage. Elles ont conduit à la mise au point des nuances à durcissement structural dont les propriétés aux températures élevées ont été mises en évidence par Pierre Chevenard. Enfin, c'est au début des années 1930 que J. Hochmann a découvert les nuances biphasées austénoferritiques appelées de nos jours duplex.

Si la période comprise entre 1904 et 1920 a été riche en travaux de laboratoire, il a fallu attendre presque un demi-siècle pour atteindre un stade véritablement industrie

I.1.3 Définition :

Les aciers inoxydables sont des alliages de fer comportant au minimum 11% de chrome et au maximum 1,2% de carbone nécessaires pour garantir la formation d'une couche de surface auto-régénérant (couche passive) qui apporte la résistance à la corrosion

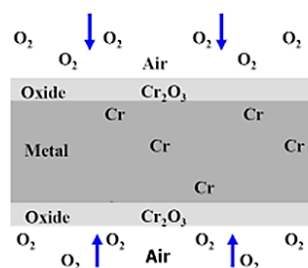


Fig. I.1. Formation de la couche passive dans les aciers inoxydables [03]

I.1.4 Les types des aciers inoxydables :

Contrairement aux autres matériaux, où la classification est généralement faite selon la composition chimique, les aciers inoxydables sont classés selon leurs phases métallurgiques et leurs structures prédominantes. On distingue :

- Aciers inoxydables austénitiques (structure cubique à faces centrées)
- Aciers inoxydables ferritiques (structure cubique centrée)
- Aciers inoxydables austéno-ferritiques (Duplex)
- Aciers inoxydables martensitiques (structure quadratique)
- Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation

I.1.4.1 Aciers inoxydables austénitiques :

Leurs principales caractéristiques sont résumées comme suit :

- Structure austénitique Ils contiennent suffisamment d'éléments gammagènes, comme le nickel, pour leur conférer leurs structures (cubique à faces centrées) [04]
- Ils sont non magnétiques
- Excellente formabilité à l'état écrouis et très bonne soudabilité
- Peuvent être utilisés depuis les températures cryogéniques jusqu'aux très haute températures dans les fourneaux et les moteurs à réaction
- Contiennent de 16 à 25% de chrome, et peuvent contenir de l'azote en solution ce qui contribuent à leurs hautes résistances à la corrosion
- Ces alliages seraient plus utilisés si le coût du nickel était moins important [05]
- Ils sont les alliages de base pour l'élaboration d'un grand nombre d'aciers réfractaires et d'aciers inoxydables [06]

I.1.4.2 Aciers inoxydables ferritiques :

Les aciers inoxydables ferritiques ont une teneur de carbone inférieure à 0.10% et sont caractérisés par le fait que leurs structures restent ferritique dans tout l'intervalle de température, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de transformation $\alpha \leftrightarrow \gamma$, ils sont magnétiques ; insensibles à la trempe ; sensibles au grossissement des grains à chaud. [07]

Les aciers inoxydables ferritiques de la série 400 contiennent de 11 à 27% de chrome et peu de nickel. Ils ne peuvent pas être durcis par traitement thermique mais peuvent l'être modérément par écrouissage. Ces aciers sont magnétiques et ont une ductilité moyenne et une bonne résistance

à la corrosion et à l'oxydation. Ceux de la série 430 contiennent généralement 17% de chrome, ils sont utilisés vastement dans l'industrie alimentaire. Les aciers de la série 409 sont probablement parmi les moins chers de tous les aciers inoxydables, ils contiennent 11% de chrome [08]

I.1.4.3 Aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex) :

Les aciers inoxydables duplex ont une structure qui comprend deux parts presque égales d'austénite et de ferrite. Ces aciers contiennent de 18 à 29% de chrome, 3 à 8% de nickel et d'autres éléments d'alliages comme l'azote et le molybdène. Ils sont hautement résistants à tous types de corrosion et possèdent une limite élastique deux fois supérieure à celle des nuances austénitiques [08].

La bonne résistance à la corrosion et les propriétés mécaniques respectables de ces aciers en font des produits de choix pour l'ingénierie chimique, le raffinage du pétrole, l'industrie agroalimentaire et l'industrie du papier. Ils sont d'autant plus facilement utilisés qu'il est possible de les forger, mouler, usiner et souder

I.1.4.4 Aciers inoxydables martensitiques :

Les aciers inoxydables martensitiques qui contiennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone variables de 0,1 à 1% environ. Ils sont utilisés après trempe martensitique et revenu de ce fait, d'acquérir des performances mécaniques élevées mais, du fait de leur composition et leur état structural, ils ne résistent pas à l'agression de tous les milieux

Les aciers inoxydables, en raison de leurs propriétés, notamment de leur résistance à la corrosion, sont utilisés pour les applications les plus diverses [09].

Ils sont magnétiques ; sensibles à la trempe et au revenu comme les aciers pour traitement thermique ; fragiles au-dessous de 400°C ; mise en œuvre difficile [10]

I.1.4.5 Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation :

Ces aciers contiennent des éléments tels que Cu, Al, Mo, Nb. Ce type d'alliage met en œuvre pour l'amélioration des propriétés de résistance par précipitation d'une seconde phase. Cette

seconde phase est constituée par une fine précipitation de composés intermétalliques. Le traitement thermique consiste en une hypertrempe conduisant à une solution solide saturée, suivie d'un revenu au cours duquel aura lieu la précipitation du composé intermétallique [11].

Hautes performances mécaniques mais traitement thermique plus délicat et évolution possible lors d'une utilisation à chaud [10].

I.1.5 Structure des aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base de fer ou plus exactement à base d'acier (alliage : fer-carbone) qui doivent contenir au moins 11 % de chrome (selon la norme européenne EN10088-1) et souvent d'autres éléments d'addition tels que le nickel (ou son substitut le manganèse) et dans une moindre mesure le molybdène

I.1.5.1 Système fer-chrome

Sur l'axe des ordonnées du diagramme Fe-Cr (Figure I.2), on retrouve, bien entendu, les températures de transformation du fer :

- 910 °C pour la transformation $\text{Fe } \alpha \rightarrow \text{Fe } \gamma$,
- 1 390 °C pour la transformation $\text{Fe } \gamma \rightarrow \text{Fe } \delta$.

On notera que le domaine d'existence de l'austénite, ou boucle γ est d'autant plus faible quand la teneur en chrome est élevée. Par conséquent, le chrome favorise l'existence du fer α (cubique centré) ; il est dit alphagène. En l'absence de carbone, au-delà de 11 % Cr environ, la phase γ disparaît complètement. Par contre, si l'on ajoute du carbone, cette boucle γ augmente [07].

On peut délimiter deux régions de teneur en chrome [11]

- %Cr<13 : Ces alliages ont la possibilité d'être austénitiques totalement ou particulièrement et peuvent donc subir la transformation $\text{Fe } \gamma \rightarrow \text{Fe } \alpha$ par refroidissement lent ou rapide.
- %Cr>13 : Ces alliages, toujours « ferritiques », ne peuvent pas subir de durcissement par trempe martensitique. Pour des teneurs suffisantes en Cr, il y a possibilité d'apparition d'une phase intermédiaire, phase sigma (σ), qui pour des refroidissements lents Précipite dans la matrice ferritique ou aux joints des grains, entraînant une fragilisation importante de l'alliage.

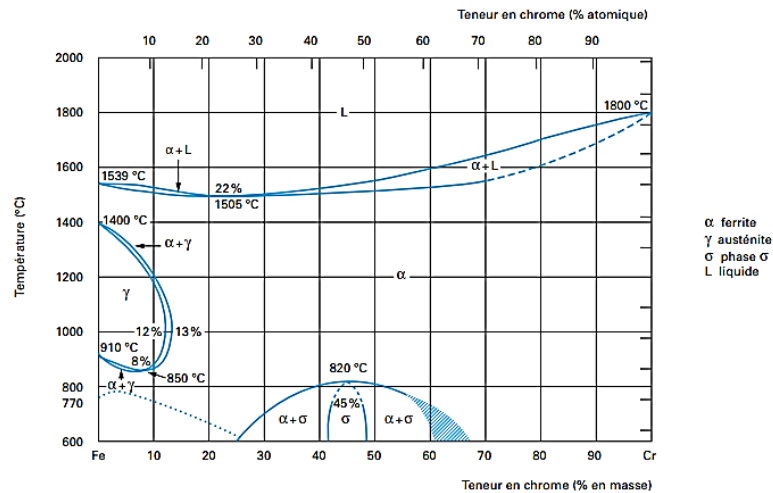


Fig.I.2. Diagramme Fe-Cr

I.1.5.2 Système binaires Fe-Ni

À l'inverse du précédent, le diagramme fer-nickel (Figure I.3) montre que le domaine d'existence de la phase γ augmente avec la teneur en nickel. Le nickel est donc un élément gammagène. Étant cubique à faces centrées, il favorise la phase austénitique pour des raisons d'isomorphisme. Par conséquent, l'addition de nickel conduit à augmenter la boucle γ des alliages fer-chrome

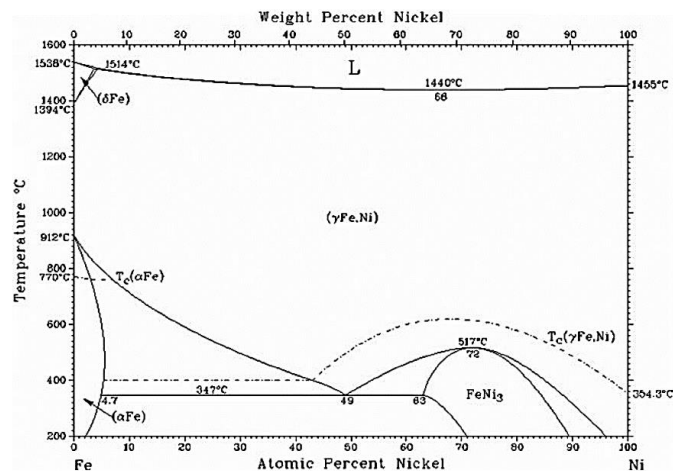


Fig.I.3. Diagramme Fe-Ni [12]

I.1.5.3 Système Fe-Ni-Cr

Le constituant d'équilibre des alliages Fe-Ni-Cr dépend des teneurs relatives en Ni (γ -gène) et en Cr (α -gène). En outre, des coupes isothermes ternaires (refroidissements lents) montre que la phase σ apparaît pour des teneurs en Cr inférieure à celles du binaire Fe-Cr : Ni favorise l'apparition de σ

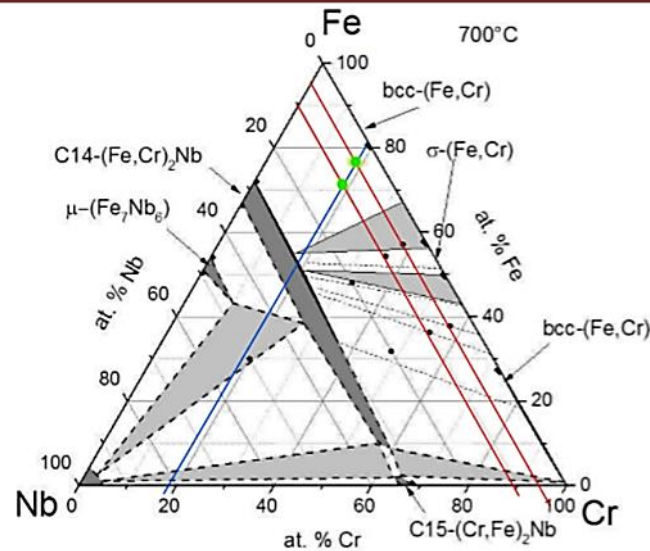


Fig.I.4. Diagramme d'équilibre ternaire Fe - Cr - Ni [13]

Celui-ci montre l'influence du nickel sur la boucle γ du diagramme Fe-Cr : l'addition du Ni élargit en teneur et en température le domaine γ des alliages Fe-Cr (Figure I.5)

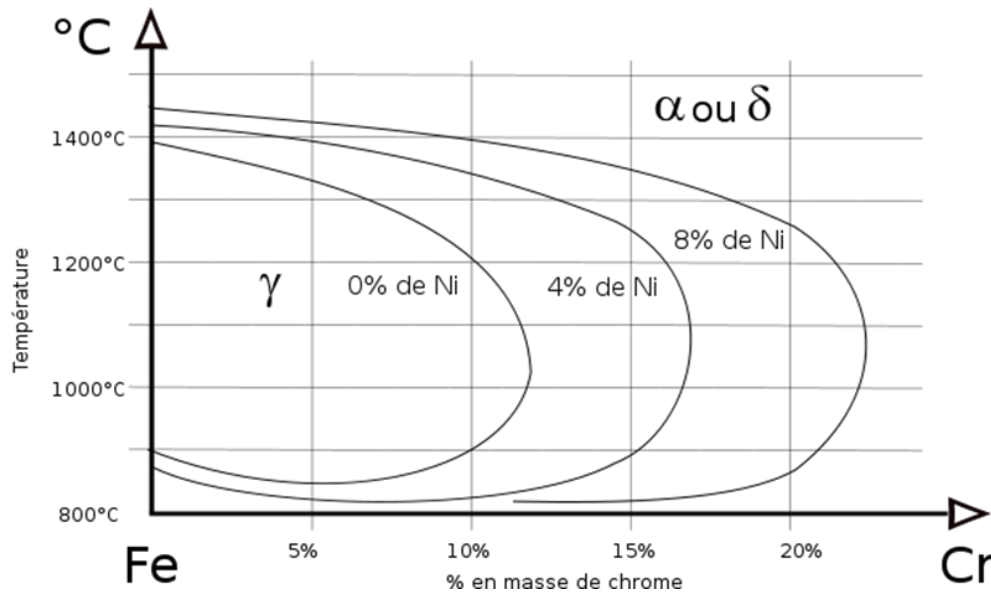


Fig.I.5. Coupe du diagramme ternaire Fe-Cr- Ni pour des teneurs croissantes en Nickel. Influence du Ni sur l'extension de la boucle γ [14]

Aux basses températures (au-dessous de 820°C), on trouve dans les alliages Fe- Cr la phase σ dure et fragile. Dans les alliages Fe-Cr-Ni, elle se forme aussi par décomposition de la phase α bien que l'on trouve un domaine où elle est en équilibre avec la phase γ .

L'addition du Nickel à la phase σ (Fe-Cr) augmente la température à partir de laquelle elle peut apparaître au refroidissement. Elle peut contenir jusqu'à 12% de Ni, ce qui élève jusqu'à

900°C son domaine de stabilité. Mais la présence de Nickel rend la formation de cette phase σ encore plus difficile que dans les alliages binaires Fe-Cr ou elle déjà très lente.

De ce fait, sa présence est très incertaine dans les alliages Fe-Cr-Ni au-dessous de 650°C elle n'apparaît qu'après des séjours très longs aux températures où elle est stable. Au-dessous de 500°C. On retrouve les phases ordonnées Ni_3Fe et Ni_2Cr , limitées aux alliages binaires Fe-Ni et Ni-Cr en pratique [15]

I.1.6 Influence des éléments d'addition

a) Le chrome :

Les aciers inoxydables sont des alliages fer-chrome ou plus exactement acier-chrome c'est à-dire fer-carbone-chrome. Conformément à la norme européenne EN 10088-1, un acier est classé acier inoxydable s'il contient au minimum 12 % en masse de chrome et moins de 1,2 % de carbone [16]

Le Cr est un élément essentiel à tous les aciers inoxydables qui favorise leur résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et à l'oxydation à haute température. Il améliore aussi leur résistance mécanique. Cet élément est très réactif du point de vue chimique et il est en particulier très oxydable [07]

b) Le carbone :

Le carbone est l'élément essentiel non métallique de tous les aciers en élargissant le domaine austénitique, sa teneur est maintenue très basse pour des raisons de corrosion et Soudabilité. Il contribue à la stabilisation de l'austénite lors de déformation à froid.

Le cas le plus typique est la précipitation des carbures de composition $M_{23}C_6$ dans l'austénite

c) Le nickel :

Le Nickel favorise la formation de structures homogènes de type austénitique, intéressantes pour éviter la corrosion. Le manganèse est un substitut du nickel. Certaines séries d'alliages austénitiques ont été développées permettant de faire face aux incertitudes d'approvisionnement du nickel. [16]

d) Le molybdène et le cuivre :

Ils améliorent la tenue dans la plupart des milieux corrosifs, en particulier ceux qui sont acides, mais aussi dans les solutions phosphoriques, soufrées, etc. Le molybdène accroît la stabilité des films de passivation. [17]

e) Le tungstène :

Il améliore la tenue aux températures élevées des aciers inoxydables austénitiques.

f) Le titane :

Il doit être utilisé à une teneur qui dépasse le quadruple de la teneur en carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane [16-18]

g) Le niobium :

Il a un point de fusion beaucoup plus élevé que le titane et présente des propriétés semblables. Il est utilisé dans les métaux d'apport pour soudage à l'arc électrique en lieu et place du titane qui serait volatilisé pendant le transfert dans l'arc électrique. [16]

h) Le silicium :

Il joue également un rôle dans la résistance à l'oxydation, notamment vis-à-vis des acides fortement oxydants (acide nitrique concentré ou acide sulfurique concentré à chaud) [18]

I.1.7 Composition chimique des différents types des aciers inoxydable

Tableau.I.1.Composition chimique des différents types des aciers inoxydable [19]

Qualité AISI	Type	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Mn	%Si	%S	%P	Autre
304	Austénitique	0.08	18-20	8-10	—	2.0	1.0	0.03	0.045	—
316	Austénitique	0.08	16-18	10-14	2-3	2.0	1.5	0.03	0.045	—
409	Ferritique	0.08 - -	11.5- 14.5	—	—	1.0	1.0	-- 0.045	0.045	Ti : [6 x (C+N)] to 0.65
430	Ferritique	0.12 - - --	16-18	—	—	1.0	1.0	0.03	0.04	—
410	Martensitique	0.15	11.5- 13.0	—	—	1.0	1.0	0.03	0.04	—

431	Martensitique	0.12-0.22	15-17	1.5-2.0	—	< 1.5	1.0	<0.015	0.4	—
7-17 Ph	Duplex	0.07 -	15.5-17.5	3-5	—	1.0	1.0	0.03	0.04	3-5Cu, 0.15Nb, 0.45Ta
3RE60	Durcis sable par précipitation	0.03	18-19	4.3-5.3	2.5-3.0	1.2	1.5	0.03		0.03

I.1.8 Propriétés physiques et caractéristiques mécaniques des aciers inoxydables

Ce tableau présente les propriétés physique et mécaniques des différents types d'acier inoxydable :

Tableau.I.2. Composition chimique des différents types des aciers inoxydables [20]

Les types	Microstructure	Propriétés mécaniques			Propriétés physiques
		Resistance a la rupture MPa	La limite d'élasticité MPa	Allongement %mm	
Austénitique	Austénite	490- 860	205-557	30-60	Amagnétique Non traitable à la chaleur
Ferritiques	Ferrite	415-650	275-550	10-25	Non traitable à la chaleur Magnétique
Martensitique	Martensite	480-1000	275-860	14-30	Durcissable par traitement thermique Haute résistance
Duplex	Ferrite + Austénite	680-900	410-900	10-48	Non traitable à la chaleur Haute résistance
Durcissable par précipitation	Austénite + Martensite	895-1000	276-1000	10-35	Très haute résistance Durcissable par traitement thermique

I.1.9 Domaines d'utilisation des aciers inoxydables :

Les aciers inoxydables sont choisis pour leurs excellentes résistances à la corrosion, mais aussi pour leurs caractéristiques mécaniques (résistance mécanique, ductilité, ténacité). Leurs grandes facilités de mise en œuvre et d'assemblage ne sont pas de moindre importance, et grâce à l'emboutissage profond, en particulier, des nuances austénitiques, des formes extrêmement complexes peuvent être réalisées [18]

Tableau.I.3. Principales applications des aciers inoxydables [21]

Famille	Applications principales
Aciers inoxydables ferritiques	-Secteur automobile (pots d'échappements) -Bâtiments -Sucrerie (tubes minces) -Containers -Eviers -Ballon d'eau chaude
Aciers inoxydables austénitiques	-Industrie chimique -Retraitement du combustible -Appareillages scientifiques -Electronique
Aciers inoxydables austéno-ferritiques (Duplex)	-Industrie chimique -Industrie de la papèterie -Industrie pétrolière -Chaudronnerie lourde
Aciers inoxydables martensitiques	-Pièces mécaniques -Vannes, robinets -Outils ménagers (coutellerie) -Outils chirurgicaux -Grosse pièces industrielles (vannes, pompes, turbines hydrauliques)

I.1.10 Désignations

Selon la norme (NF EN 10 088-1) Les aciers inoxydables sont définis comme des aciers titrant plus de 11% de chrome, moins de 1,2% de carbone et contenant éventuellement d'autres éléments d'alliage. Il s'agit donc d'aciers spéciaux très alliés. En effet, il y a plusieurs normes pour désigner les aciers inoxydables dont la norme européenne, et la norme américaine.

La norme européenne : leur dénomination commence par la lettre X suivie de la teneur en carbone multipliée par 100, des principaux éléments d'alliage et de leur concentration en pourcent (par exemple X6CrNi18-10, X3CND17-12-02).

La désignation américaine AISI (American Iron and Steel Institute) : est moins intuitive car il n'existe aucun rapport direct entre la désignation des différentes nuances et leur composition chimique. Il y a deux grandes familles pour désigner les aciers inoxydables austénitiques, les séries AISI 300 dont les nuances sont dérivées de la composition initiale type 18-8 (18%Cr-8%Ni) et les séries AISI 200 qui correspondent principalement aux aciers à l'azote. Les nuances ferritiques et martensitiques appartiennent à la série AISI 400, série des alliages type Fe-Cr a priori sans Ni [22].

I.2 Généralités sur les aciers inoxydables ferritique

I.2.1 Définition

Cette famille d'aciers dont la teneur en chrome (10,5 %) et un maximum de 0,1% de carbone. Leur positionnement sur le diagramme de Schaeffler / Bystram est indiqué sur le schéma de la figure

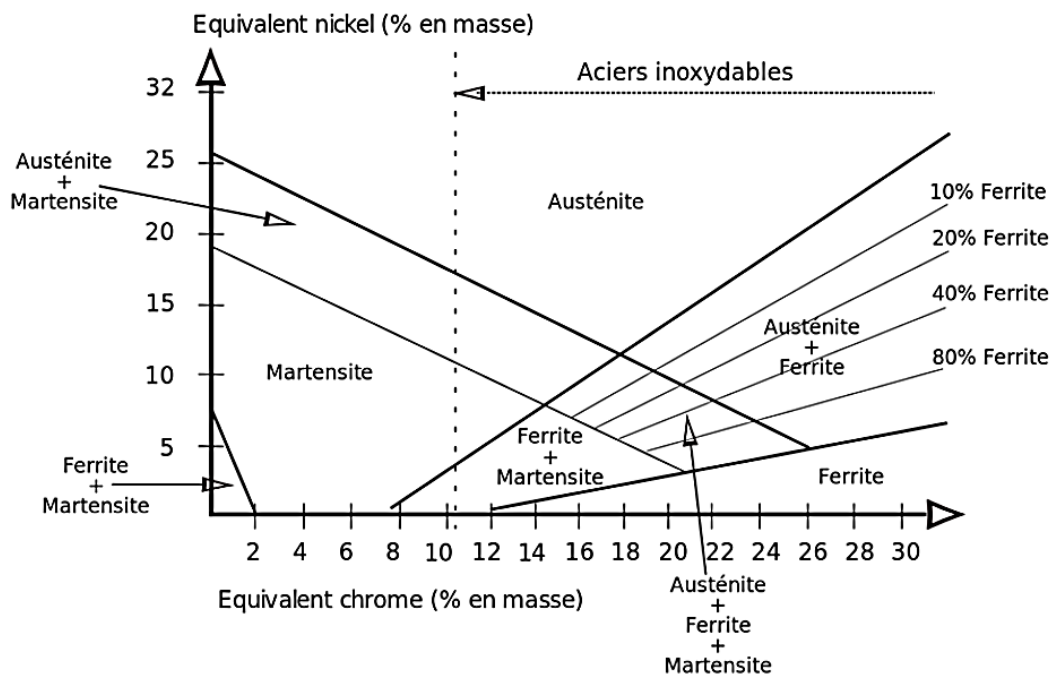


Fig.I.6. diagramme de Schaeffler

Ce teneur de Cr est suffisant pour assurer une excellente résistance à la corrosion vis-à-vis de nombreux milieux (atmosphères urbaines et marines en particulier) présente, après avoir subi certains cycles thermiques à haute température, une sensibilité accusée à plusieurs formes de fragilité, dans le cas de nuances non stabilisées. En revanche, elle présente un excellent comportement à haute température en atmosphère oxydante jusqu'à 800°C (Cr 18 %) et même

1000°C ($18 \% < \text{Cr} < 30 \%$) sous réserve d'éviter toutefois pour ces dernières nuances le maintien prolongé entre 450 et 550 °C susceptible de les fragiliser. La mise en œuvre, par soudage par fusion, des nuances stabilisées, et a fortiori de celles non stabilisées, doit faire l'objet des plus grandes précautions sur le plan énergétique, et l'exécution d'un traitement après soudage est recommandée dans le cas du soudage homogène.

I.2.2 Norme de conception internationale

Trois nuances ferritiques sont couvertes par la spécification américaine ASCE/SEI pour la conception d'éléments de charpente en acier inoxydable formés à froid [24] pour des épaisseurs allant jusqu'à 3,8 mm, à savoir les nuances 1.4512, 1.4016 et 1.4510. L'Afrique du Sud (Bureau sud-africain des normes, 1997) et Australie/Nouvelle-Zélande (Standards Australia Standards New Zealand, 2001) [25] les normes structurelles en acier inoxydable incluent également la nuance 1.4003.

La version actuelle de l'Eurocode pour les aciers inoxydables de construction, EN 1993-1-4 [26] stipule qu'il est applicable à trois nuances ferritiques (nuances 1.4003, 1.4016 et 1.4512), cependant, les recommandations est presque exclusivement issu des travaux sur les aciers inoxydables austénitiques et duplex et dans de nombreux 4 cas, des conseils spécifiques au ferritique sont manquants. EN 1993-1-4 fait référence à un certain nombre de clauses dans d'autres parties de l'Eurocode 3 telles qu'EN 1993-1-2 [27], 1-8 [28], 1-9 [29] et 1-10[30] qui n'ont pas été validée pour les aciers inoxydables ferritiques. Une exception est que l'EN 1993-1-2 inclut des données sur une nuance ferritique.

I.2.3 Composition et propriétés

Les aciers ferritiques contiennent de 10 à 30 % de chrome, avec une teneur en carbone et azote réduite Ils peuvent contenir des additions telles que :

- Molybdène pour améliorer leur tenue à la corrosion
- Titane ou niobium pour piéger le carbone et améliorer les propriétés des joints soudés

Les aciers purement ferritiques n'ont pas de point de transformation et sont donc très sensibles au grossissement du grain au-dessus de 800 °C. Il est impossible de régénérer leur structure par traitement thermique. Ils sont souvent « stabilisés » par le titane ou/et le niobium,

Les aciers semi-ferritiques (410S, 405, 4003, 430) présentent une structure biphasée (ferrite + martensite) à haute température qui se traduit au refroidissement par la présence éventuelle de martensite précipitée aux joints de grain ou de produits de décomposition (par exemple, ferrite et carbures, pour des refroidissements lents).

Les aciers ferritiques très alliés, parfois appelés « super-ferritiques », développés pour leur bonne résistance à la corrosion par piqûres et à la corrosion sous contrainte. Ces aciers présentent des teneurs élevées en chrome (20 à 30%), molybdène (2 à 4%) et des additions de titane ou de niobium pour piéger le carbone et l'azote. Des additions de nickel améliorent sensiblement leur ténacité. Ces aciers ne sont généralement utilisés qu'en tubes ou feuillets très minces (moins de 2 mm).

Tableau.I.4.Composition chimique des aciers inoxydables ferritiques

Acier semi ferritiques							
ASTM	EN	C (% en masse)	Cr (% en masse)	Mo (% en masse)	Ti (% en masse)	Autre (%) en masse)	Traitement thermique
405	1,4006	0,04	12			Al=0,3	700°C, eau
410S	1,4000	0,04	12				
41003	1,4003	0,015	12			Ni=0,5	
430	1,4016	0,04	16,5				
Acier ferritiques							
409	1,4512	0,01	12		0,2	Al=0,3	750°C, eau
430Ti	1,4510	0,02	17		0,3		
444	1,4521	0,02	18	2	0,4	Ni=0,5	
Aciers ferritiques très alliés							
44635		0 ,015	25	4	0,5	Ni=4	1050°C,
44700		0,005	29	4	0,5		eau

I.2.4 Propriété physique des aciers Ferritique

Les nuances ferritiques sont magnétiques. Ils ont sensiblement plus valeurs de conductivité thermique et peut donc transférer la chaleur comparativement plus efficacement que aciers inoxydables austénitiques. Le coefficient de dilatation thermique des aciers inoxydables ferritiques est bien inférieur à celui de l'acier austénitique et se rapproche. Ce fait que les ferritiques se déforment moins que les austénitiques lorsqu'ils sont chauffés.

Tableau.I.5.Les propriétés physiques des aciers inoxydable ferritique [27-31]

Grade	Density	Résistance électrique à 20°C	La capacité thermique spécifique à 20°C	Conductivité thermique à 20°C	Coefficient de dilatation thermique à 20 °C	Module d'élasticité×103
	g/cm3 10	Ωmm2 /m	J/kg°C	W/m°C	0~100°C	N/mm2
					10-6/°C	
1.4003	7.7	0.60	460	28	10.4	220
1.4016	7.7	0.60	460	26	10.0	220
1.4509	7.7	0.60	460	26	10.0	220
1.4521	7.7	0.80	460	26	10.4	220
1.4301 (acier austénitique inoxydable)	7.9	0.73	500	15	16	200

I.2.5 Etude spécifique des aciers inoxydables Ferritiques :

Ces aciers contiennent de 12% à 30% de chrome :(Exemples : X6Cr17, X6CrMo17-1, X3CrTi17). La teneur en carbone ne dépasse pas 0.1%, ce qui n'autorise pas la trempe martensitique. Leurs éléments d'alliages sont le molybdène qui améliore la résistance à la corrosion localisée dans les milieux chlorés, et l'aluminium qui apporte une meilleure résistance à l'oxydation à chaud. Les aciers à 17% de chrome résistent bien à l'oxydation mais sont difficilement soudables. Ceux contenant plus de 20% de chrome ont une excellente résistance à l'oxydation et au fluage à haute température et sont dits réfractaires. La nuance Ferritique la plus connue est le 430 (ASTM), qui contient à peu près 17% de chrome. On l'utilise surtout pour des applications domestiques peu coûteuses et pour des revêtements, on peut les diviser en trois groupes. [32].

a) Groupe I :

Aciers à 11.5/13.5% Cr avec une teneur en carbone inférieure à 0.008% dans lesquels la transformation au chauffage et la trempe martensitique sont supprimées, grâce à l'addition d'un élément alphasène : Al, Ti ou Nb.

b) Groupe II

Aciers à 16/18% Cr, avec une teneur en carbone inférieure à 0.1% sans additions d'autres éléments, ce sont les aciers de loin, les plus utilisés dans la famille des aciers ferritiques

c) Groupe III

Aciers à teneur en chrome supérieure à 20% comprise souvent entre 23/27%, ce sont les plus résistants à la corrosion parmi les aciers ferritiques, leur teneur en carbone varie entre 0.02 et 0.2%. [33]

1.2.6. Phénomène de fragilisation :

Lorsqu'on maintient les aciers ferritiques, pendant plusieurs heures dans la zone de température comprise entre 400 et 500°C, on constate un durcissement très net d'autant plus important que la teneur en chrome est plus élevée. Ce durcissement s'accompagne d'un abaissement de l'allongement et de la résilience (les aciers à 16/17% Cr peuvent avoir une résilience notable avant la fragilisation). L'effet maximal de ce durcissement et de fragilisation est obtenu à 475°C.

Ce phénomène de fragilisation est dû à la précipitation de fines particules d'une phase très riche en chrome à structure cubique (C.C), non ferromagnétique à la température ordinaire, dont les distances inter-réculaires sont comprises entre celle du Fer et celle du Chrome. Des dosages effectués sur les résidus extraits ont indiqué des teneurs en Fer, variant entre 39 et 18 %. Cette précipitation d'une phase riche en Chrome, appelée α est liée à la présence d'un domaine de non miscibilité dans le diagramme Fe-Cr avec la phase sigma [33]

I.3 Conclusion

Il existe plusieurs types d'aciers inoxydables ; leurs classifications dépendent essentiellement de la composition chimique et de la structure. L'amélioration des propriétés de ces aciers n'a pas cessé d'évoluer, faisant toujours appel à des techniques poussées de l'affinage des éléments d'addition.

II.1 Introduction :

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. La clé des problèmes qui se posent lors d'une opération de soudage relève du métier du soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages : découpage de l'assemblage et disposition des joints.
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces.
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service

II.2 Conditions d'installation de la liaison métallique :

Installer la liaison métallique consisterait, théoriquement, à rapprocher les surfaces à unir de telle sorte que les atomes superficiels parviennent à des distances de l'ordre de grandeur des distances inter-nœuds de leur système cristallin propre. Cette opération, qui supposerait au départ que les surfaces soient chimiquement propres et dans un état de poli spéculaire, n'est pas réalisable pratiquement.

Le procédé d'activation des surfaces : le plus efficace est la fusion qui, simultanément, peut assurer leur nettoyage. La liaison métallique est créée par la solidification. Différents processus peuvent être mis en œuvre :

Les deux pièces à assembler subissent une fusion superficielle et participent donc à la formation d'un bain de métal fondu (avec, éventuellement, l'addition d'un métal d'apport) qui se solidifie sans action extérieure :

- Si les pièces à assembler et le métal fondu sont constitués d'un même métal, on parle de soudure homogène
- Si les pièces à assembler et/ou le métal fondu sont constitués de métaux différents, la soudure est dite hétérogène.

Une soudure est dite Autogène lorsque les deux matériaux de base sont de la même Composition et que l'assemblage s'effectue sans métal d'apport comme l'exemple du soudage des deux aciers inoxydables austénitiques AISI 304 [01]

Les deux pièces à assembler subissent une fusion superficielle mais une action mécanique extérieure chasse le métal fondu et crée l'assemblage en mettant en contact les surfaces à la température du solidus ;

L'activation des surfaces : peut être obtenue par échauffement sans fusion. La liaison est assurée par la solidification d'un métal ayant une température de fusion inférieure à celle du ou des métaux à assembler

II.3 Définition et procédés :

Soudage :

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 homogène dans le cas de métaux différents.

II.4 Préparation de soudure

Pour faciliter l'exécution et obtenir des cordons sans défauts ; elle consiste à donner aux bords, ou aux extrémités à souder, la forme qui va permettre le mieux possible une fusion franche et totale et qui donnera le moins lieu aux effets de la dilatation et du retrait. Cette tâche consiste à abattre l'angle supérieur des bords de façon que, une fois rapprochés, ces derniers forment une ouverture en "V" dans laquelle la soudure se fait aisément [02]

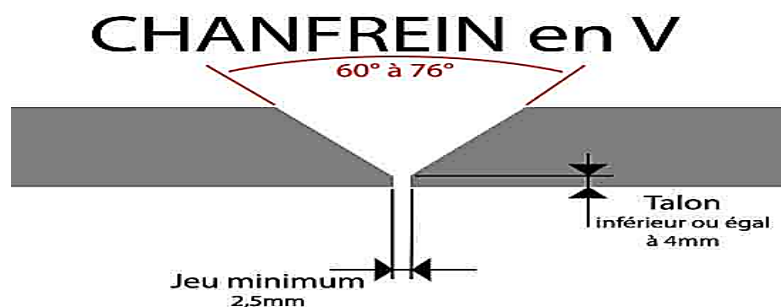


Figure II.1.Chanfrein en V

II.4 Caractéristique de soudure :

Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure type d'un alliage est composée de 4 zones principales.

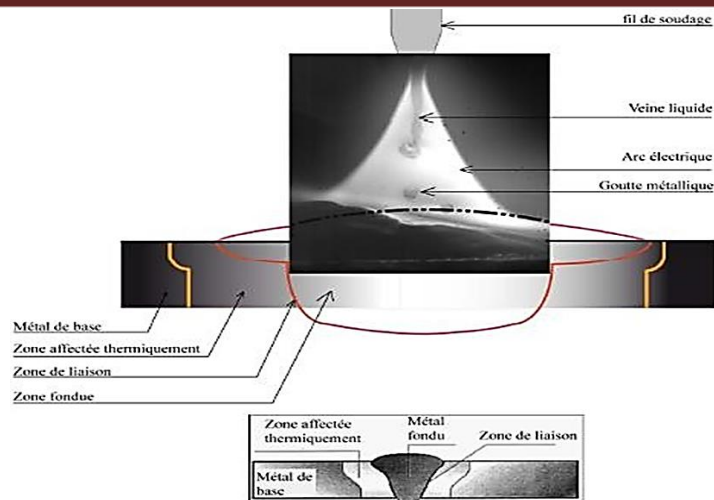


Figure II.2. Les différentes zones de soudure

II.4.1. Zone fondue

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 appelé métal fondu. Le métal apporté à l'état liquide, c'est-à-dire avant dilution, est appelé métal déposé.

II.4.2. Zone de liaison

Cette zone correspond à la limite jusqu'à laquelle le métal de base a été porté à la fusion. Elle délimite ainsi la zone fondue et elle est mise en évidence par la différence de structure que l'on constate de part et d'autre.

II.4.3. Zone affectée thermiquement

Le cycle thermique de soudage provoque au sein de cette zone, à partir de l'état initial, une ou plusieurs transformations à l'état solide intervenant à l'échauffement. Chaque transformation étant caractérisée par une température minimale, la limite extérieure de la zone affectée correspondante coïncide avec l'isotherme caractéristique de cette température.

II.4.4. Zone de métal de base

Le métal de base (MB) est la partie du matériau qui ne subit pas de modifications microstructurales. Bien que métallurgiquement inchangé, en revanche, (MB) est le siège de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure.

II.5. Classification des procédés :

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de types chimiques, électriques, optiques ou mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure II.2[03]

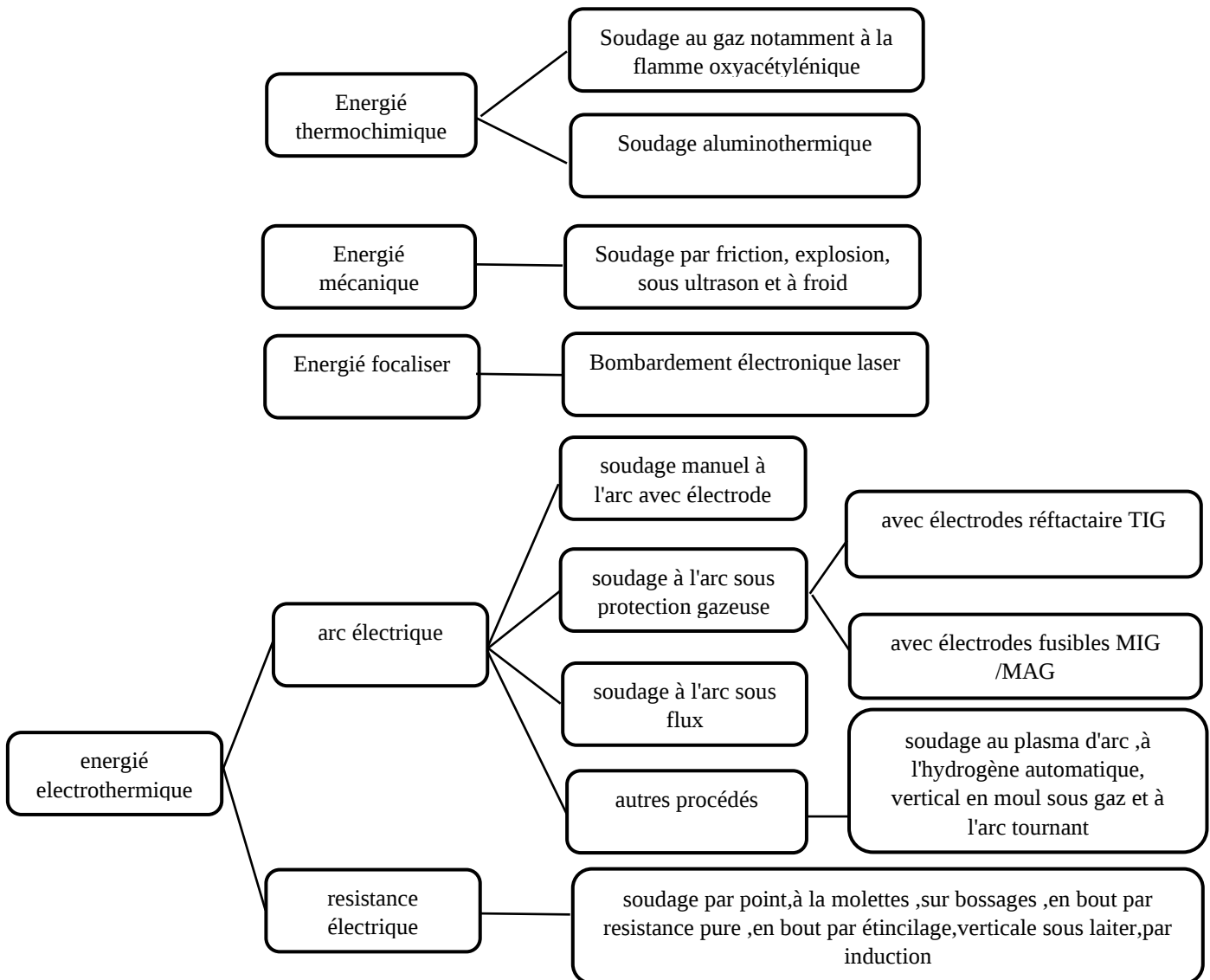


Figure II.3. Classification des procédés de soudage [04].

Selon l'état du métal à l'endroit du soudage

Deux classes sont à distinguer :

a) **Soudage par fusion :**

Le soudage par fusion regroupe l'ensemble des procédés de soudage où les bords des pièces à souder sont fusionnés (Pour tout type de source d'énergie utilisée)

b) **Soudage par pression :**

Le soudage par pression regroupe l'ensemble des procédés de soudage où on utilise une pression et un chauffage localisé sans métal d'apport. La soudure est réalisée par déformation plastique. [05]

En ce qui nous concerne les procédés à arc électriques sont les plus adéquats : Ce procédé se réalise à l'aide d'un arc électrique [une décharge électrique créée entre deux électrodes dans un gaz (ou dans une vapeur métallique issue des électrodes) qui fournit l'énergie nécessaire pour faire fondre l'électrode (constituée de métal d'apport) qui va se solidifier en un dépôt solidaire avec les métaux de base. [06].

II.6 Soudage à l'arc :

Dans cette étude, on s'intéresse surtout à ce type de soudage, car la jonction des deux pièces est réalisée par le procédé TIG.

II.6 .1 Arc de soudage :

Un arc de soudage est un arc électrique amorcé par court-circuit entre deux électrodes. Entre l'électrode et la pièce à souder, l'arc se chauffe et ionise le gaz qui se trouve autour de lui ; il forme un état qui l'appelle état plasma [07].

Cet état permet le passage du courant électrique jusqu'à la pièce à souder. La quantité de chaleur dégagée sera le facteur essentiel de fusion de l'électrode et à une partie de surface de la pièce à souder. Cette quantité de chaleur dépend des paramètres de l'alimentation (tension et intensité) de l'arc électrique. La température nécessaire au maintien de l'ionisation dépend aussi du gaz de protection utilisé. Dans certains procédés de soudage avec électrode consommable l'arc joue deux rôles : il produit de la chaleur, et amène le matériau d'apport au bain de fusion [07].

II.6.2 Gaz de protection :

Le but de l'utilisation de gaz de protection est de protéger la soudure contre l'oxydation, les inclusions de laitier provoquées par l'oxygène, et contre le risque de porosités formées par le piégeage de l'azote [07]. Le choix du gaz de protection dépend de la procédure utilisée, et de la nature du matériau soudé.

- L'argon :

C'est un gaz inerte, il convient particulièrement pour le soudage des aciers inoxydables et de l'aluminium. L'ajout d'une faible quantité de dioxyde de carbone ou d'oxygène améliore la qualité de la soudure, particulièrement en soudage à l'arc court.

- L'hélium :

C'est un gaz inerte caractérisé par sa forte conductivité thermique. L'ajout de l'argon augmente la vitesse de soudage et compense les pertes de chaleur par diffusion à l'intérieur de la pièce à souder. En revanche il gêne l'amorçage de l'arc et son coût est très élevé.

- Le dioxyde de carbone :

Le dioxyde de carbone est le gaz le moins coûteux. Il s'adapte bien au soudage des aciers galvanisés. Il ne convient pas au soudage à l'arc de pulvérisation.

- L'hydrogène :

C'est le gaz caractérisé par la réduction du phénomène d'oxydation. Il augmente l'apport de chaleur et la vitesse de soudage. Cependant, le risque d'avoir des fissures est très probable. C'est pourquoi on limite son utilisation au soudage des aciers austénitiques.

II.7 Soudage TIG:

L'existence du procédé TIG remonte aux années 1930 et son développement remonte à la deuxième guerre mondiale avec l'utilisation de nouveaux matériaux tels que les alliages d'aluminium et de magnésium [08]

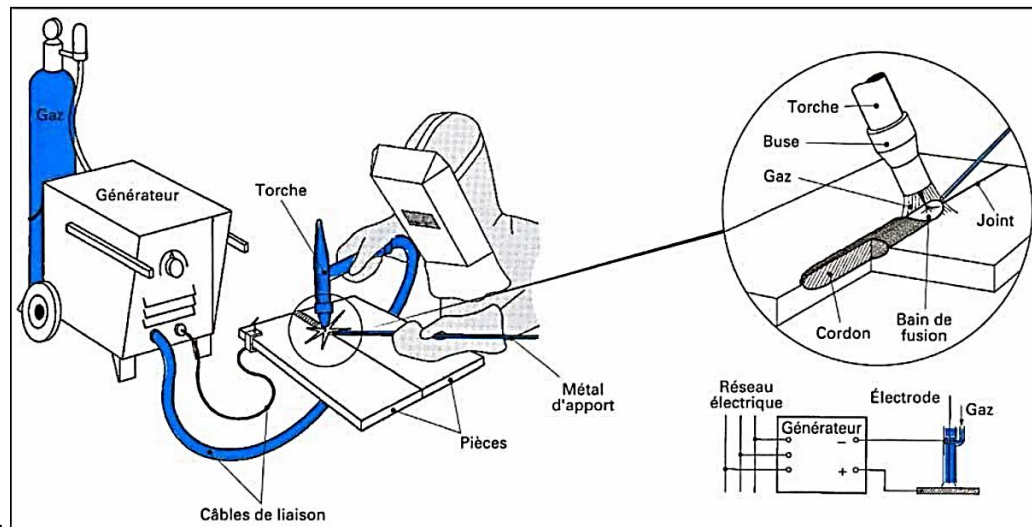


Figure II.4. Procédé de soudage TIG [09]

II.7.1 Principe :

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) est un procédé de soudage à arc. Son arc électrique est créé entre la pièce à souder (l'anode) et l'électrode en tungstène qui ne fond pas dans cette procédure. Le bain de fusion et l'arc sont entourés par un gaz de protection inerte dans lequel l'écoulement de ce gaz est assuré par une buse à gaz fixée à l'extrémité du pistolet à souder. L'électrode est située au centre de cette buse (figure II.2). L'utilisation de métal d'apport dans cette opération s'effectue sous deux formes, soit sous forme de baguette maniée manuellement par l'opérateur, soit sous forme de fil d'apport contrôlé automatiquement [07]

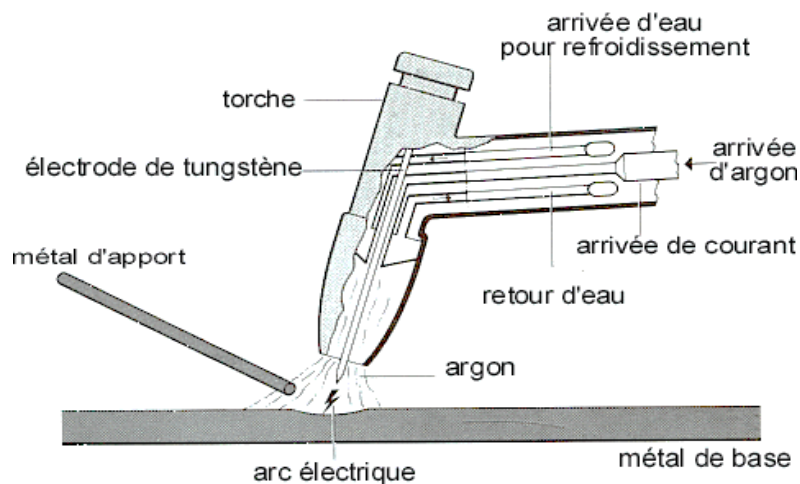


Figure II.5. principe de soudage TIG

II.7.2 Matériel :

Le matériel Nécessaire dans ce procédé est le suivant :

- Pistolet à souder
- Équipement de contrôle
- Électrode
- Métal d'apport
- Gaz de protection
- Alimentation électrique

- Le pistolet à souder :

Le pistolet à souder doit être parfaitement isolé et facile à manier par l'utilisateur. Il existe deux types de pistolet à souder : le pistolet à refroidissement par air (l'intensité maximale de soudage est de 200 A), et le pistolet à refroidissement par eau (l'intensité maximale de soudage est de 400 A).

- L'équipement de contrôle :

L'équipement de contrôle dépend essentiellement du degré d'automatisation du processus de soudage. Ces équipements possèdent plusieurs systèmes d'asservissement qui assurent le contrôle automatique de la durée de post gaz et de pré gaz de protection destiné à empêcher l'oxydation de l'électrode et du bain de fusion, le bon fonctionnement de générateur dans la descente ou la remonte du courant pour le remplissage optimal de cratères [09].

- L'électrode :

Dans cette procédure, l'électrode utilisée doit respecter certaines caractéristiques techniques :

- Une faible résistance électrique.
- Un point de fusion élevé.
- Une forte émission électrique.
- Une bonne conductivité thermique.

L'électrode en tungstène répond mieux à ces exigences. Cependant l'ajout de certains additifs améliore considérablement certaines caractéristiques. Le tableau donne quelques exemples d'électrodes utilisé en soudage au TIG.

Tableau.II.1. Exemples d'électrodes de soudage TIG conformes ISO 68 48[10].

Additif	Proportion	Courant utiliser	Code de couleur
Thorium	2%	Continu	Rouge
Zirconium	0.8%	Alternative	Marron
Lanthane	1%	Continu	Noir
Cérium	2%	Alternatif	Gris

Les électrodes en tungstène pur sont utilisées pour le soudage de matériaux légers par un courant alternatif. L'ajout de 1 à 2% de l'oxyde de thorium dans l'alliage de l'électrode en tungstène améliore la stabilité de l'arc. En revanche, le meulage des électrodes qui contient de thorium présente un danger pour l'opérateur, parce que le thorium est radioactif. On peut utiliser à la place du thorium des oxydes non radioactifs tels que l'oxyde de zirconium, l'oxyde de cérium ou l'oxyde de lanthane.

- Le métal d'apport :

Pour le soudage des pièces de faible épaisseur (moins de 4 mm), l'utilisation de métal d'apport n'est pas nécessaire parce que le joint est entièrement formé par le métal fondu de la pièce à souder.

Pour le soudage des pièces épaisses l'utilisation d'un matériau d'apport sera importante pour former le joint de soudure. La qualité de la soudure peut être améliorée par le pré chauffage du fil d'apport.

- Le gaz de protection :

Le gaz de protection utilisé pour souder les aciers non alliés, faiblement alliés, ou inoxydables est l'argon pur. Pour le soudage des aciers inoxydables duplex, on ajoute de l'hélium pour améliorer le transfert de chaleur.

Dans certaines conditions, l'utilisation de l'hélium pur comme gaz de protection est préférable pour réaliser des soudures horizontales et en corniches.

- L'alimentation Le soudage :

En fonction des matériaux, des dimensions et des épaisseurs à souder, l'opération de soudage s'effectue en courant continu à polarité directe, en courant pulsé, ou en courant alternatif.

- Courant continu :

C'est le type de courant le plus utilisé, appelé également soudage en polarité directe (DCSP, Direct Current Straight Polarity), L'électrode est reliée au pôle négatif du générateur. Le courant continu convient le soudage des aciers, des aciers inoxydables et du cuivre [07].

Cette alimentation est contrôlée électroniquement au moyen d'un inverseur ou d'un montage redresseur à thyristor [07].

Dans certains cas très rares, la pièce devient cathode et l'électrode devient anode. C'est qu'on appelle le soudage en polarité inverse (DCRP, Direct Current Reverse Polarity). Ce type d'alimentation est utilisé pour détruire la couche d'oxyde qui se forme à la surface du joint soudé. C'est le cas des alliages en aluminium [09].

- Courant alternatif :

Ce type de courant est utilisé pour le soudage des alliages en aluminium ou en magnésium. L'alternance de polarité de courant permet de faire le contrôle de pénétration et la désoxydation au moment du soudage [09].

La nature du courant se traduit par des différences de morphologies du bain de fusion comme le montre la figure

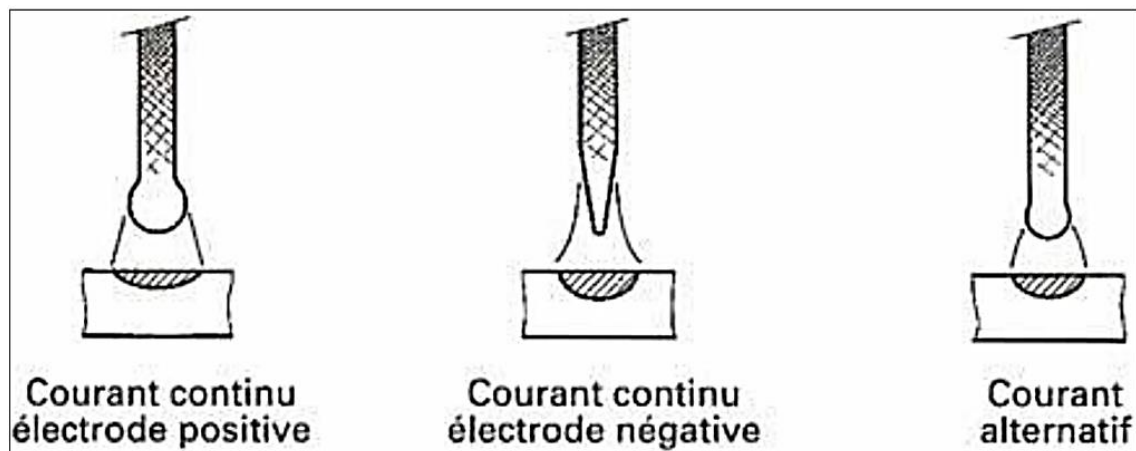


Figure II.6.Formes des électrodes en fonction du courant [09].

- Le courant pulsé :

Le soudage TIG par impulsion consiste à faire varier périodiquement l'intensité du courant de soudage d'une valeur de base I_b à une valeur de pointe I_p . Il en résulte une valeur moyenne du courant de soudage $I_m = \frac{1}{T} \int_0^T I dt$ qui, dans le cas d'ondes rectangulaires est égale :

$$I = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot T_b}{T}$$

- Le courant de pointe I_p .
- La durée de passage de ce courant T_p .
- Le courant de base I_b .
- La durée de passage de ce courant T_b .
- La valeur moyenne du courant I_e .
- La durée du cycle T ou la fréquence des impulsions.

Cette modulation du courant permet une régulation du cycle thermique en particulier, il est possible de procéder à la fusion de petite partie seulement du métal de base pendant les temps de passage du courant de pointe I_p , avec solidification au moins partielle pendant les temps de passage du courant de base I_b . Ainsi, la quantité de métal fondu est moins grande, le bain de fusion est moins important, ce qui facilite son maintien en particulier pour le soudage en position. Avec une onde de courant pulsé à basse fréquence, on obtient ainsi un cordon de soudure formé d'une suite de points de soudage se chevauchant. En outre, l'énergie thermique fournie est plus faible que dans le cas du soudage à courant constant I_p , ce qui est préférable du point de vue métallurgique.

II.8 Domaines d'application procédés de soudage TIG :

Le soudage TIG assure l'intégrité de la zone fondue de par sa protection gazeuse. L'absence de transfert de métal dans l'arc assure un comportement d'arc et de bain très stable qui garantit des qualités de cordons optimales, lisses en endroit et en envers, exemptes de défauts tels que les caniveaux, les morsures ou les projections de métal.

Il est donc très souvent utilisé pour des matériaux dont le risque de pollution atmosphérique est important comme les alliages de titane, de nickel, le zirconium, l'aluminium et les aciers inoxydables, ou bien pour des applications qui requièrent une grande qualité de joint comme dans les industries agroalimentaires, pétrochimiques, nucléaires, aéronautiques et aérospatiales.

Cependant, les soudures TIG souffrent d'une faible pénétration de bain accessible en une seule passe. En effet, l'arc diffus, l'absence de transfert de métal entre l'électrode et la pièce, le

comportement mouillant du métal fondu, conduisent à la formation de bains de fusion qui sont larges et peu pénétrés. En conséquence, les assemblages d'épaisseurs supérieures à 3 mm nécessitent, pour tous les matériaux métalliques, des usinages des bords à souder (chanfreins) ainsi que la réalisation avec métal d'apport de passes successives pour venir combler le joint.

Outre les risques cumulés de défauts, le faible taux de dépôt du soudage TIG ne peut rendre ce procédé compétitif par rapport à d'autres procédés à l'arc comme le MIG (Metal Inert Gas, fil électrode fusible).

II.9 cycle thermique :

L'apport localisé et, souvent, brutal de chaleur qui est mis en œuvre pour réaliser une soudure crée un champ thermique dont on peut apprécier simplement les effets en enregistrant les évolutions de la température en fonction du temps. En mettant en place des couples thermoélectriques lors de la préparation des pièces à assembler, on peut enregistrer à partir de chacun d'eux la courbe température = f (temps), c'est-à-dire la courbe que l'on appelle le « cycle thermique de soudage » qui correspond au volume de métal voisin de la soudure chaude. Les résultats obtenus prennent les formes schématisées sur la figure II.4. On voit déjà que le métal est soumis à :

- un chauffage très rapide jusqu'à une température maximale (T) variant, suivant la distance entre le point considéré et la zone m fondue, depuis la température initiale du métal (au plus loin du métal fondu) jusqu'à la température de début de fusion de celui-ci (au plus près du métal fondu).
- un refroidissement généralement rapide qui succède immédiatement à l'arrêt du chauffage [11].

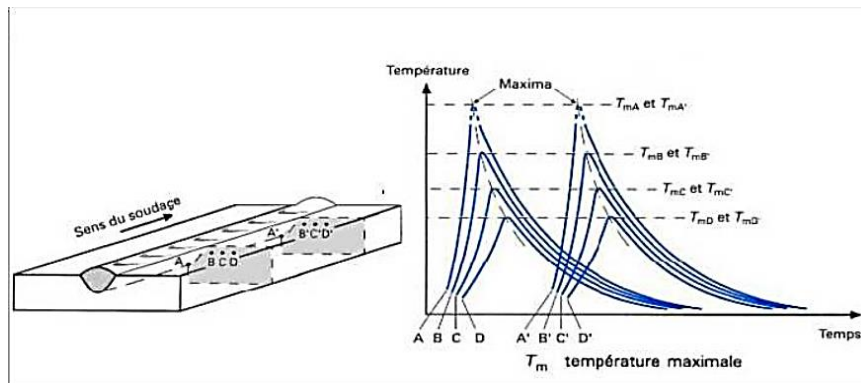


Figure II.7. Schéma des enregistrements des cycles thermiques de soudage [11].

Les cycles thermiques dépendent des variables suivantes :

- Position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure.

- Procédé de soudage et ses paramètres.
- Épaisseur des pièces et type de joint.
- Température initiale de la pièce.

II.9 Modifications microstructurales en zone affectée thermiquement :

II.10.1 Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur :

D'après les expressions analytiques du cycle thermique de soudage $\theta(t)$ décrivant l'évolution de la température en fonction du temps dans les cas respectifs du soudage de produits épais ou minces, la température maximale est atteinte à un temps t_M tel que :

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right)_{t_M} = 0$$

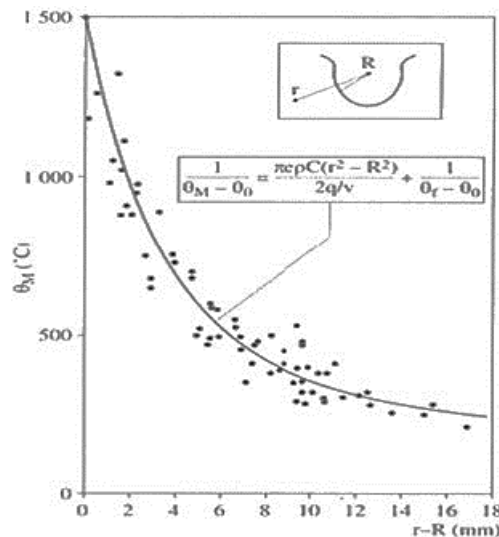


Figure II.8. Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion. Comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l'arc submergé) [12]

II.10.2. Transformation en ZAT lors de chauffage :

Au sens strict, le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, à l'exemple d'Easterling [13], il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales (voir figure II.6).

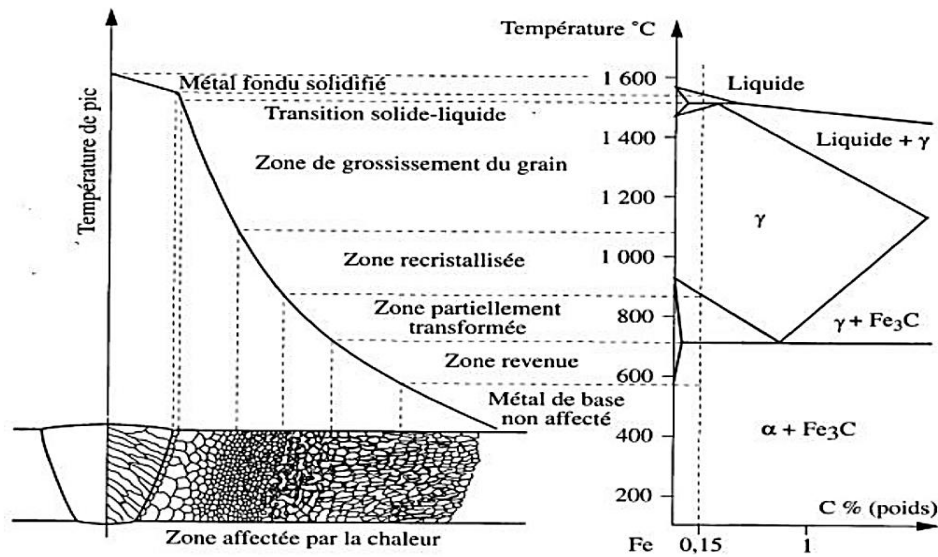


Figure II.9. Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion. Comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l'arc submergé) [13].

En se rapprochant de la zone fondue, on trouvera successivement les zones suivantes.

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage.
- Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase.

Certains phénomènes tels que revenu, globularisation, recristallisation, vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.

- Une zone de transformation partielle (ou intercritique).
- A partir de la température A3 et jusqu'à 1 495 °C environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure antérieure. C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain, la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques
- Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide (δ) et une phase liquide. Enfin le métal fondu a souvent une composition différente de celle du métal de base. Les premiers germes du métal fondu se solidifient par épitaxie (relations de cohérence cristallographique) sur les grains de la Zone Affectée par la Chaleur ZAT.

II.10.3. Transformation en ZAT lors de refroidissement

Selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures sont susceptibles de se former. Il existe dans le métal de base une zone qui dépasse la température de transformation ferrite – austénite T_{α} . Cette zone appelée Zone Affectée Thermiquement ZAT est comprise entre la ligne de

fusion dans le métal de base et la température T_α . En soudage, la vitesse de refroidissement de la ZAT est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la zone thermiquement affectée ne permet pas d'appréhender correctement les phénomènes métallurgiques qui apparaissent dans la zone thermiquement affectée. Ceci peut se faire au moyen de diagramme au refroidissement continu élaboré en condition de soudage (diagramme CCT-S) (Figure II .6) [13]

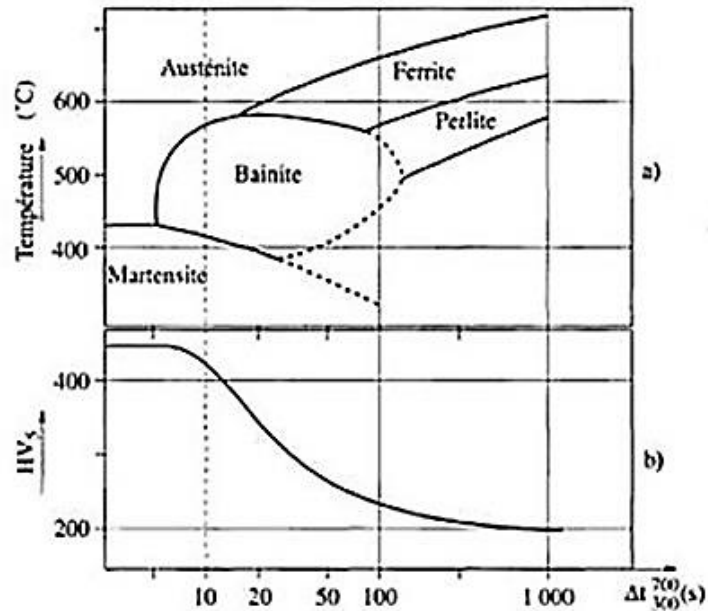


Figure II.10. (a) Exemple de diagramme TRC en conditions de soudage ($\theta_M=1300^\circ$) :
(b) Courbe (dureté-critère de refroidissement Δt) correspondante (Acier C= 0.18% Mn= 1.4%, Si=0.4%)

Compte tenu de la vitesse élevée de refroidissement, la zone thermiquement affectée subira une trempe plus ou moins sévère en fonction de la trempabilité du métal de base et de la vitesse de refroidissement.

Les caractéristiques mécaniques de la zone thermiquement affectée par le soudage sont liées à la sévérité de la trempe qu'elle a subie. Cette trempe se manifeste par :

- une résistance mécanique plus élevée.
- une possibilité de déformation plus limitée (perte de ductilité)

II.11 Paramètres ayant une influence sur la soudure TIG :

- La vitesse de soudage.
- Le choix et le débit du gaz.
- Le choix du métal d'apport.
- Le choix, l'affutage, la distance, et le diamètre de l'électrode réfractaire.

- L'intensité du courant.
- L'apport thermique

II.12 Les principaux défauts de soudures :

Les défauts les plus importants qui risquent de donner lieu à une reprise du joint ou à mise en cause de la résistance de ces derniers sont :

- Les inclusions gazeuses

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- Utilisation d'aciers calmés.
- Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation.
- Séchage des pièces avant soudage.
- Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage.

- Les inclusions solides

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures. Pour les éviter, il faut un nettoyage convenable des cordons, et un choix d'électrodes d'un diamètre correspond à l'épaisseur des pièces dessouder. La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et éventuellement le contrôle radiographie si la racine est inaccessible

- Défauts de fusion (collage)

Elles sont causées par une intensité très faible du courant de soudure, vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal. Pour les éviter, il faut faire un choix judicieux de l'intensité du courant et la vitesse d'avancement de l'électrode.

- Défauts de pénétration

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration (figure II .8). L'excès de pénétration est un surplus du métal d'apport soit à la racine ou à la surface du cordon de soudure, par contre le manque de pénétration est l'insuffisance du métal d'apport au-dessus ou au-dessous de cordon de soudure. Les principales causes de ce type des défauts sont classées pour le manque et l'excès respectivement :

- Vitesse petite de soudage /trop grande.
- Apport calorifique forte/ trop faible.

- Distance électrode courte /pièce trop large.

La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et éventuellement le contrôle radiographie si la racine est inaccessible

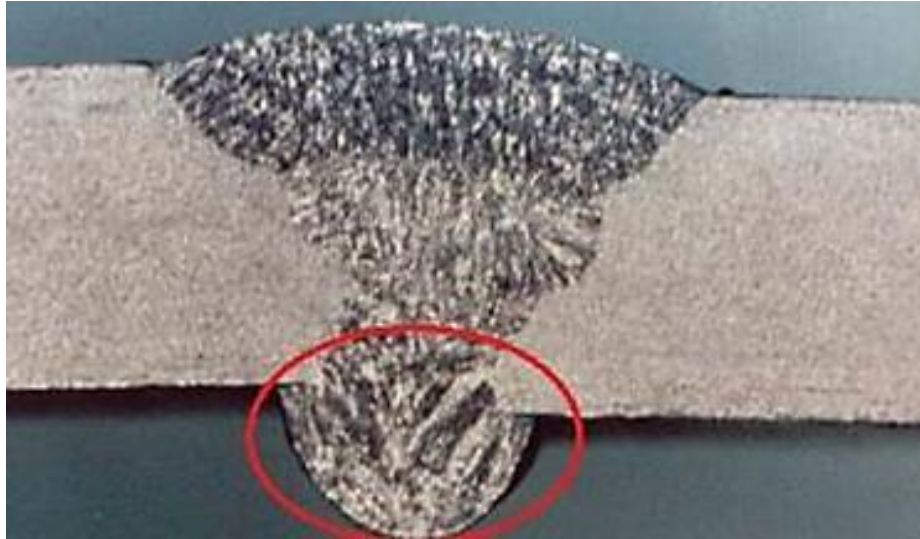


Figure II.11.Excès de pénétration

- Collage ou manque de pénétration

Le métal de base est non fondu, ce qui diminue la section efficace de la soudure, figure II.9. On distingue le collage noir où l'interface entre le métal de base et la soudure est vide (par contrôle radiographique, apparaît une tache sombre sur les clichés) et le collage blanc, où l'interface est comblée par des oxydes fondus (variété indécélable par contrôle radio).



Figure II.12.manque de pénétration et collage en bord

-Morsures et caniveaux

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figure II.9). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

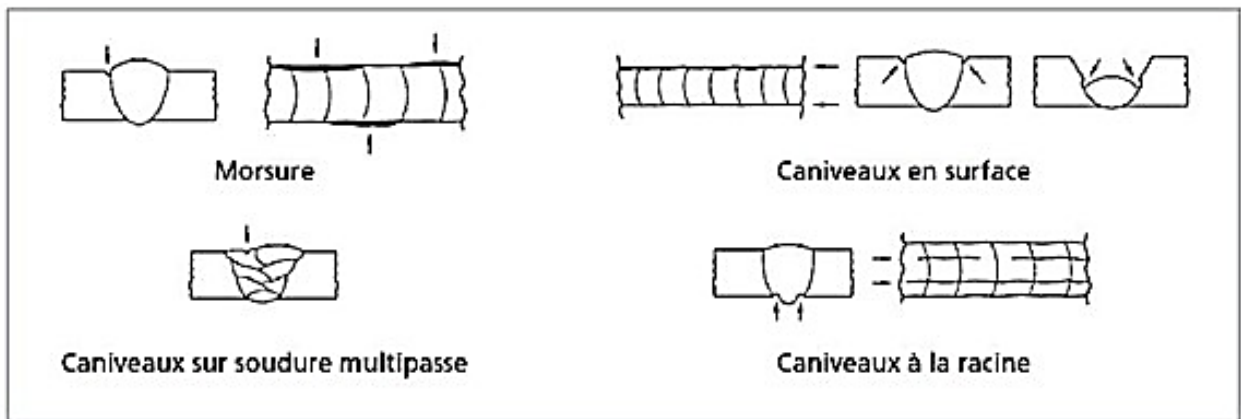


Figure II.13.Morsures et caniveaux

-Porosités

Il s'agit de défauts sphériques creux qui peuvent être ou non débouchant, figure II.18. Elles sont causées par les courants d'air, le manque de gaz, l'obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, de l'eau ou des impuretés dans le joint à souder...etc.



Figure II.14.Porosités débouchâtes en surface de cordon de soudure

➤ **Les fissures**

Les fissures dans un métal sont divisées en deux catégories selon l'endroit où elles apparaissent.

-Les fissures peuvent être localisées dans le métal fondu ; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport et des conditions d'exécution de la soudure.

-Les fissures peuvent aussi se retrouver dans le métal de base, dans la zone de liaison ; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal.

On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure : la fissuration à chaud et la fissuration à froid.

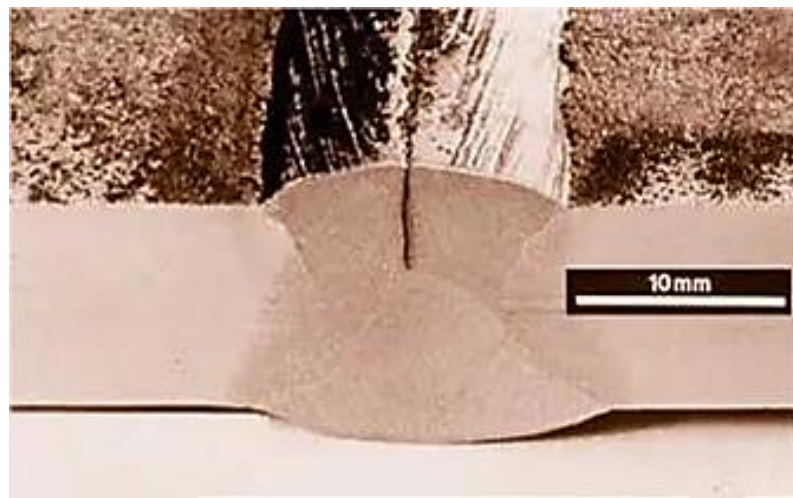


Figure II.15.fissure longitudinale sur un cordon de soudure (Fissuration à chaud).

III.1 Introduction :

Dans cette section du chapitre, notre objectif est de présenter les différentes techniques expérimentales utilisées pour étudier les soudures et de comparer les caractéristiques mécaniques et physiques des structures métallurgiques obtenues.

Plusieurs méthodes ont été employées pour caractériser ces structures. Les observations métallographiques permettent d'examiner la microstructure des échantillons soudés. La diffraction des rayons X est utilisée pour analyser la cristallinité et l'orientation des phases présentes. Les mesures de microdureté fournissent des informations sur la résistance et la dureté locales des matériaux. Enfin, des essais mécaniques de traction sont réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction et l'allongement à la rupture.

Afin d'obtenir des résultats fiables et pertinents, une préparation minutieuse des échantillons est essentielle. Cela implique de suivre une séquence de procédures rigoureuses, comprenant notamment le polissage des surfaces, l'attaque chimique pour révéler la microstructure, et la préparation soignée des échantillons pour les essais mécaniques.

En utilisant ces différentes techniques expérimentales et en respectant les protocoles de préparation des échantillons, nous pourrions obtenir une caractérisation complète et approfondie des soudures, permettant ainsi une meilleure compréhension des propriétés des structures métallurgiques.

III.2 Matériaux et composition chimique :

III.2.1 Le métal de base

Le matériau du métal de base utilisé est l'acier inoxydable ferritique type AISI 430, reçu sous forme des tôles de 1.2 mm d'épaisseur. Ce dernier subi une analyse de composition chimique par spectromètre de type FOUNDRY-MASTER Xpert. Ces analyses ont été réalisées au niveau du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Cheraga.

FOUNDRY-MASTER Xpert est un spectromètre de laboratoire permettant de d'analyser la composition chimique des métaux. 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 (Figure III.1).



Figure 0-1. Spectromètre de type FOUNDRY-MASTER Xpert.

III.2.1.1 Composition chimique de métal de base AISI 430 :

La composition chimique de ce matériau est présentée en tableau III.1

Tableau.III.1. La composition chimique du métal de base

Les éléments	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	P	N	Fe
Teneur (%)	0.06	0.53	0.38	16.61	0.02	0.26	0.18	0.04	0.02	0.007	Bal.

III.2.1.2 Caractéristiques générales

Les principales caractéristiques de cette nuance sont :

- Une insensibilité à la corrosion sous contrainte et inter granulaire.

- De bonnes propriétés de mise en forme à froid.
- Bel aspect de surface tel que livré, évitant généralement le recours à des opérations de finition ultérieures.
- Présentent également une bonne résistance à l'oxydation sous température élevée.
- L'utilisation d'un inox ferritique permet de diminuer l'épaisseur grâce à sa limite élastique élevée tout en résistant à la pression.
- Bonne résistance à la torsion et l'arrachement grâce à un module d'Young élevé.
- La dilatation des ferritiques est 2x moins élevée que celle des austénitiques.

III.2.2 Choix du métal d'apport

Le métal d'apport doit avoir une composition chimique plus proche que métal de base soudés pour l'obtention d'une homogénéité au niveau des joints soudés donc le choix du métal d'apport s'est fait suivant :

- La nuance et caractéristiques de métaux d'apport (doit avoir une composition chimique plus proche que le métal de base soudés pour l'obtention d'une homogénéité au niveau des joints soudés)
- On utilisé dans notre travail quatre métaux d'apport : 308, 309, 316, 2209

III.2.2.1. Compositions chimique de métal d'apport étudiées :

La composition chimique de ce matériau est présentée en tableaux (III.2.3.4.5) par ordre 308 ,309, 316 et 2209

Le métal d'apport 308 :

Tableau.III.2. La composition chimique du métal d'apport 308

Les éléments	Fe	C	Cr	Ni	Si	Mn
La teneur (%)	Base	0.015	19.5	9.8	0.42	1.8

Le métal d'apport 309 :

Tableau.III.3. La composition chimique du métal d'apport 309

Les éléments	Fe	C	Cr	Ni	P	S	Mn
La teneur (%)	Base	0.08	22-24	12-15	0.045	0.03	2

Le métal d'apport 316 :

Tableau.III.4. La composition chimique du métal d'apport 316

Les éléments	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	C	S	P	Fe
La teneur (%)	10-14	16-18	2- 3	2	0.75	0.03	0.03	0.045	Base

Le métal d'apport 2209 :

Tableau.III.5. La composition chimique du métal d'apport 2209

Les éléments	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Fe
La teneur (%)	1.7	0.5	23	9	3	0.02	0.02	Base

III.3. Réalisation des soudures :

III.3.1. Choix des procédés de soudage :

Le soudage TIG manuel nous permet obtenir une bonne qualité des cordons qui sont exempts de défauts en surface, de même que d'excellentes propriétés mécaniques des joints soudés

III.3.1.1. Equipements du poste soudage TIG

Les procédures expérimentales sont réalisées et mise au point au niveau de l'atelier de soudage du CSC (Centre National de Recherche en Soudage et Contrôle) dans le cadre des études de soudage TIG. Une vue d'ensemble de cet équipement est présentée dans la (Figure III.1)

**Figure.III.2.** Poste de soudage TIG.

III.3.1.2. Principe du procédé de soudage TIG :

Un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène et la pièce à souder nous permet de réaliser les soudures. Le métal d'apport est amené manuellement dans le bain

de fusion. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible d'inertie de gaz de protection (Argon).

Un courant continu ou alternatif est fourni par un générateur électrique avec une intensité de courant variant selon différents paramètres comme :

- Le diamètre du fil.
- La position de soudage.
- Le type d'assemblage.
- Le type de la torche (torche sèche refroidissement à l'air, torche humide refroidissement à l'eau).
- La dimension et la nuance des pièces à assembler.
- La polarité de l'électrode est toujours négative en courant continu (polarité directe)



Figure. III.4. Protection gazeuse air (a) et hélium(b)

III.4. Préparation des échantillons au contrôle :

III.4.1. Le découpage et mise en forme des tôles :

Lors du prélèvement, des précautions doivent être prises pour ne pas favoriser une modification de la structure du métal ; résultant soit d'un échauffement, soit d'une déformation de ce dernier entraînant un écrouissage. Dans notre cas, les tôles sont découpées avec une micro tronçonneuse avec lubrification ils sont encore découpés en plusieurs rectangles.

Les caractéristiques géométriques sont représentées schématiquement dans la (Figure III.3)

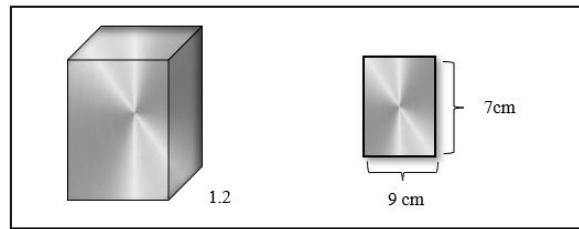


Figure.III.5. Préparation des tôles pour l'opération de soudage.

III.4.2. Nettoyage de la pièce :

Ensuite on utilise une brosse métallique en inox pour faire le un nettoyage mécanique (par brossage) et un nettoyage chimique par l'intermédiaire de l'acétone afin d'éviter la contamination du bain fondu par les poussières ou les grains présents sur les tôles et plus précisément sur les bords à souder.

Il faut trouver les bonnes procédures de nettoyage des bords à souder, mais aussi la façon d'isoler de toute contamination extérieure (poussières, graisses, autres alliages métalliques) les alliages soumis à une opération de soudage. Les techniques de nettoyage des bords à souder sont soit chimiques, soit mécanique où la combinaison des deux.

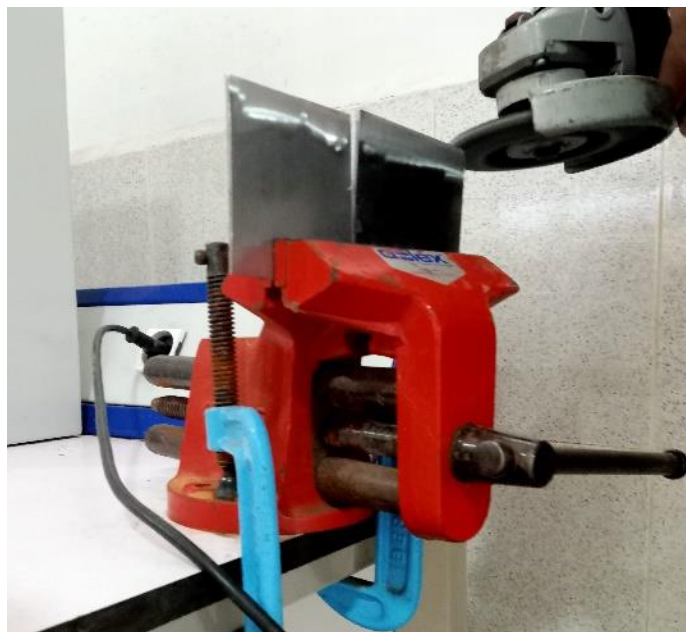


Figure.III.6.le nettoyage d'échantillon.

III.4.3 Le bridage :

Cette opération consiste à fixer les tôles à souder dans le but d'éviter les déformations dues aux phénomènes de dilatation et de retrait produits par l'apport de chaleur lors du soudage.



Figure.III.7. systèmes de bridage de soudage.

III.5. Le soudage :

Les soudures ont été réalisées manuellement, utilisant des modes de courant pulsé (CP) et continu (CC), avec une électrode de tungstène théorie de 1 mm de diamètre, utilisant l'argon comme gaz protection avec une pureté de 99,9%.

Le soudage a été réalisé en une seule passe avec plusieurs métaux d'apport en acier inoxydable austénitique 308 309 316 et duplex 2209. Les paramètres de soudage sont mentionnés dans les tableaux (III.6) et (III.7).

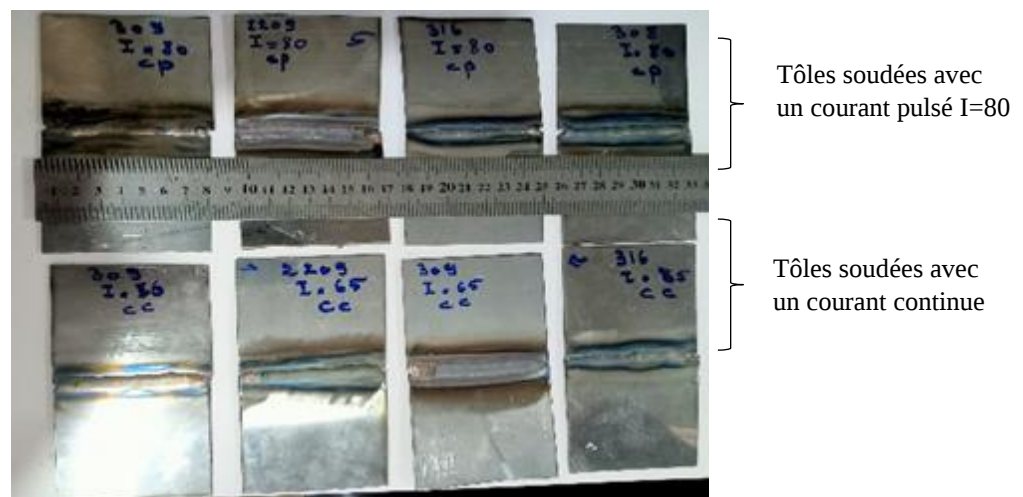


Figure.III.8. Tôles soudées par la procédés TIG.

III.5.1. Paramètres de soudage :

Les paramètres de soudage sont présentés par et tableau III.6

Tableau.III.6. Principaux paramètres du procédé de soudage employé en courant continu

Epaisseur métal d'apport (mm)	0.6
Tension (V)	9.5
Polarité	CCD
Intensité (A)	60
Vitesse de soudage /mm s ⁻¹	15,33
Energie de soudage /j.mm ⁻¹	43,62
Type de gaz	Argon (99.99%)
Débit du gaz (l/min)	8
Diamètre de l'électrode	1,6

Tableau.III.7. Principaux paramètres du procédé de soudage employé en courant continu

Epaisseur métal d'apport (mm)	0.6
Fréquence (Hz)	6
Courant haut et base(A)	60-100
Tension (V)	10
Intensité (A)	80
Vitesse de soudage (mm.s ⁻¹)	8,73
Energie de soudage (j.mm ⁻¹)	96,32
Type de gaz	Argon (99.99%)
Débit du gaz (l/min)	12
Diamètre de l'électrode (mm)	1,6
Temps de refroidissement et chauffage (%)	50%

III.5.2. Déroulement de l'opération de soudage :

Les opérations qui ont été suivies le long du soudage sont

A-Pointage des tôles à souder :

La fixation des bords des tôles à souder a été faite par un pointage on deux positions réparties le long de la longueur des tôles. Ce pointage a permis un soudage à position fixe.

B-Réalisation de la première passe (passe de pénétration) :

Cette passe a été réalisée par le procédé TIG., avec une électrode nue en acier inoxydable ferritiques. Une fois, que cette passe est terminée la protection à l'envers a été enlevée, puis le laitier

a été enlevé des deux côtés par meulage et le cordon a subi un nettoyage à l'aide d'une brosse métallique en acier inoxydable.

III.6. Caractérisation structurale :

III.6.1. Préparation métallographie des échantillons :

III.6.1.1. Prélèvement des échantillons :

III.6.1.1.1. Equipement utilise pour la Prélèvement des échantillons :

On a utilisé un disque très fin installé sur une micro-tronçonneuse automatique qui assure une découpe en douceur de l'échantillon, au cours de découpage Les échantillons étant refroidis par un jet d'eau froid afin de ne pas abîmer la surface des échantillons.



Figure.III.9. Tronçonneuse (CRTI-Alger).

III.6.1.1.2. Mode de Prélèvement des échantillons :

Les prélèvements sont effectués sur chaque échantillon perpendiculairement à la ligne de soudure ils doivent être représentés toute la portion de soudure ou l'état quasi-stationnaire a été atteint durant l'opération de soudage. Nous avons pris en considération l'étendue de la zone critique de la soudure qui est constituée de la ZF et les ZAT et les matériaux de base.

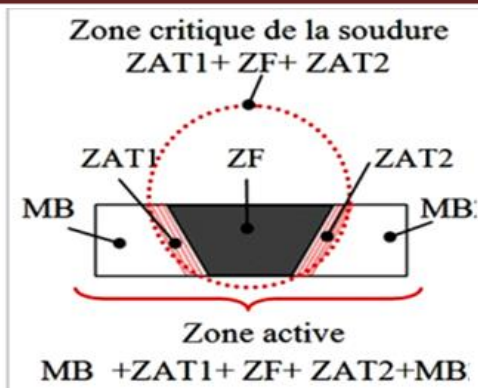


Figure. III.10. Zone critique et zone active de la soudure.

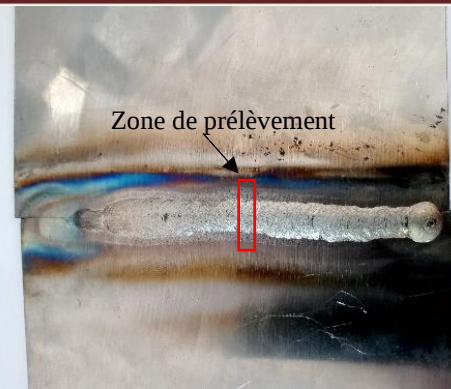


Figure. III.11. Zone de prélèvement.

III.6.1.1.3. Enrobage à chaud :

L'objectif de l'enrobage est de protéger les matériaux fragiles ou revêtus au cours de leur préparation et d'obtenir une netteté des bords parfaite. L'enrobage permet également de manipuler plus soigneusement et facilement les échantillons petits, à bords vifs ou de forme irrégulière.

L'enrobage à chaud est idéal pour les échantillons très nombreux arrivant au laboratoire successivement. Les enrobages obtenus sont de haute qualité, de taille uniforme et de forme régulière, et ne nécessitent qu'un temps de processus court.

L'échantillon propre et sec est positionné dans le cylindre d'enrobage de la presse d'enrobage et la résine d'enrobage adaptée est ajoutée. Une température d'environ 180 °C et une force d'environ 250 bars sont appliquées pendant l'enrobage de l'échantillon. Un système de refroidissement à eau est utilisé pour réduire au maximum le temps d'enrobage.



Figure. III.12. Appareil de l'enrobage utilisé (CRTI- Alger).

III.6.1.1.4. Le procédé de polissage :

Le polissage est une étape qui permet d'obtenir une surface plane et miroir pour faciliter l'observation il est réalisé sur des machines comportant un disque abrasif qui tourne à une vitesse de quelque centaine de tours par minute sous un jet d'eau. Cette opération est effectuée en deux étapes

- Pré-polissage :

Le but de cette opération est d'obtenir la planéité de la surface d'examen de l'échantillon. Elle s'appelle aussi Polissage grossier ou abrasion On commence le polissage par le papier abrasif de grande granulométrie, puis on dégrade la granulométrie de plus en plus finement.

Le refroidissement de la surface à polir est assuré par un lubrifiant (eau) pour éviter tout frottement. L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible taille de grain

À chaque fois que la granulométrie est changée, il faut effectuer une rotation de 90° pour éliminer les stries.

Tableau.III.8. Les étapes à suivre pour le polissage

Ordre d'opération de polissage	Granulométrie utilise	Durée (Min)	Vitesse de polissage (tr/min)
1	80	4	250
2	120	4	250
3	180	4	250
4	220	4	250
5	500	4	250
6	800	4	250
7	1000	4	250
8	1200	4	250
9	2400	4	250
10	4000	4	250

- Le polissage de finition :

Le polissage de finition permet d'obtenir une surface miroir il s'appliquant sur un papier feutre avec une solution d'alumine de 5 à 3 μm et suivi d'une pâte diamantée soluble dans l'eau (0.3 μm)

III.6.1.2. Attaque métallographique :

L'attaque chimique nous permet de révéler la structure du matériau : joint de grains, phases des constituants, défauts, précipitations, inclusions. Les conditions de l'attaque plus légères. On arrête l'attaque par un rinçage soigné (eau ou alcool) suivi d'un séchage avec un sèche-cheveux la structure n'est habituellement visible qu'après attaque chimique.

Les surfaces polies doivent être manipulées avec grand soin, car elles sont très sensibles à la pollution et leur polissage correct coûte cher. Elles doivent être déjà nettoyées pendant le polissage avec du coton sous l'eau courante ou bien par immersion dans un bain d'alcool agité par ultrasons.

Le réactif utilisé dans l'attaque chimique dépend du domaine d'application, pour les aciers les réactifs utilisés sont présentés dans le (Tableau III.9).

Tableau.III.9. Les étapes à suivre pour l'attaque

Métaux	Réactif (composition)	Durée et température d'attaque	Effet
Acier AISI 430	HNO ₃1V HCL.....3V GLICEROLE....3V	20 à 40 s 20 °C	Microstructure

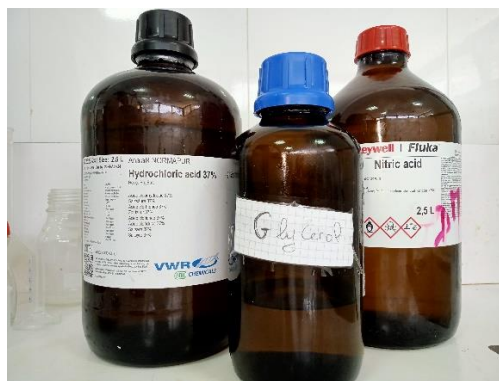


Figure.III.13. Réactifs utilisés pour l'attaque chimique. .

III.7. Méthodes de caractérisations :**III.7.1. Observation micrographique :**

Le microscope est un instrument permettant l'observation visuelle de petits objets ou détails d'objets, usuellement indiscernables à l'œil nu.

Une des propriétés de cet appareil est son agrandissement angulaire, c'est-à-dire la possibilité de fournir une image agrandie d'un objet à étudier. Cependant, ce paramètre ne suffit pas à lui seul à caractériser les performances du dispositif. Il faut en effet que cette propriété s'applique à tous les détails de l'objet, y compris les plus fins.

La seconde propriété du microscope est donc sa résolution, dont découlent d'importantes conséquences pratiques, puisque cela implique de travailler avec des optiques de grande ouverture numérique, mais limitée par la diffraction. Les bons microscopes sont donc des systèmes optiques et mécaniques complexes et coûteux

Pour observer l'échantillon au microscope optique, celui-ci doit être plat afin que l'image soit nette, son épaisseur doit être faible afin que la lumière puisse le traverser. Sa surface doit être polie, les parties à observer doivent être différenciables.

III.7.1.1. Principe de fonctionnement du microscope optique :

Le microscope est constitué comme la montre dans le schéma (Figure III.6) :

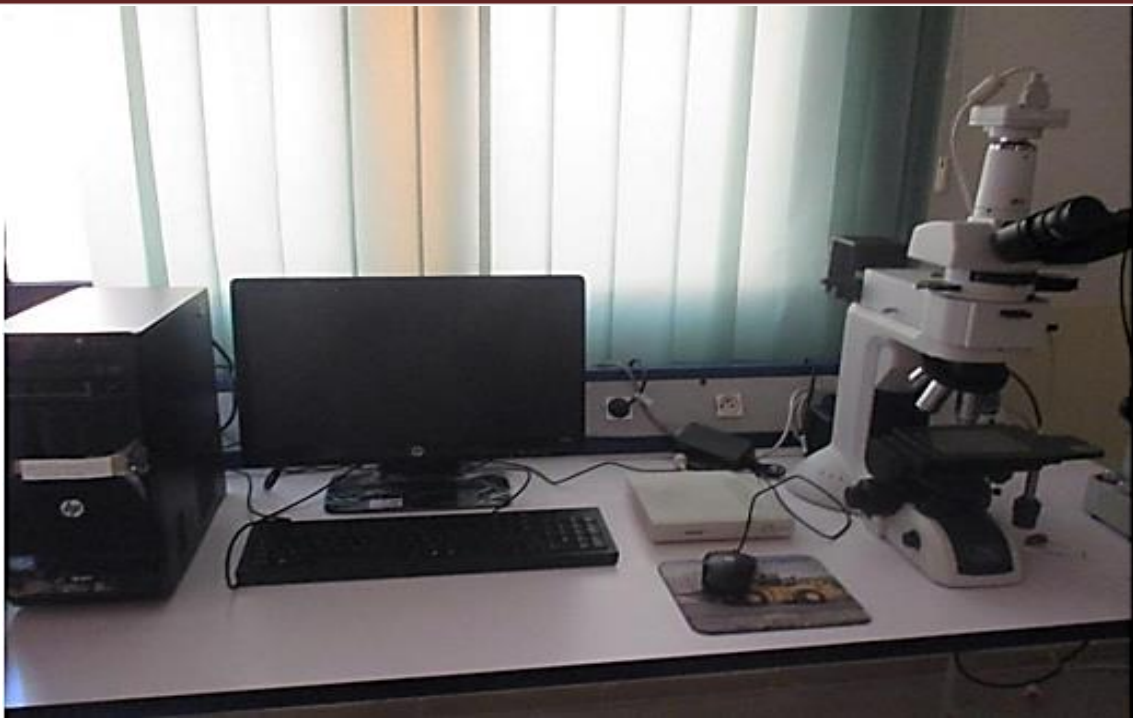


Figure.III.14. Microscope optique (CRTI-ALGER).

- D'un objectif et d'un oculaire. Pour le moment, ils sont représentés par deux lentilles minces convergentes pour simplifier la compréhension. L'objectif et l'oculaire sont en réalité des systèmes épais composés de plusieurs lentilles, afin de limiter les aberrations.

- De deux diaphragmes DO et DC, respectivement diaphragme d'ouverture et diaphragme de champ de l'oculaire. L'objectif donne de l'objet AB une image (intermédiaire) réelle et agrandie A'B'. On place ensuite l'oculaire de telle sorte que l'image intermédiaire se trouve exactement à la position de son foyer objet Fo_2 . Dans cette configuration, l'image reprise par l'oculaire donne une image virtuelle à l'infini, observable par l'œil nu. Le grossissement global du microscope est donc le produit du grossissement de l'oculaire par l'agrandissement de l'objectif

III.7.2Analyse par diffraction des rayons X :

La méthode de la diffraction des RX est une des méthodes utilisées pour étudier l'évolution microstructurale de l'acier avant et après chaque essai de traitement thermique du métal de base (MB), le cordon de soudure et la zone fondue (ZF) de chaque échantillon.

Cette méthode consiste à soumettre l'échantillon à un faisceau de RX. Certains plans de la structure cristalline de l'échantillon diffractent celui-ci. La différence de marche entre les ondes I et II est :

$$\delta = 2d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Pour que les ondes I et II soient en phase ; il faut que $\delta = n \cdot \lambda$ d'où la relation de Bragg :

$$2d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \text{ (relation de Bragg).}$$

d_{hkl} : Distance entre 02 plans cristallins propres à chaque famille de plans d'une structure cristalline donnée.

θ : Angle d'incidence du RX de longueur d'onde.

λ n : Entier caractérisant l'ordre de la diffraction.

La diffraction des RX demeure une méthode d'étude des couches superficielles. La détermination d'une structure cristalline se fait par le calcul des distances inter réticulaires à partir des angles de diffraction. On peut déduire la structure cristalline, la nature des phases et calculer les paramètres de la maille. La mesure précise de ces paramètres permet de déterminer la composition d'une solution solide. Les intensités relatives des pics de diffraction peuvent conduire aux pourcentages des phases en présence dans le cas d'un mélange de phases.

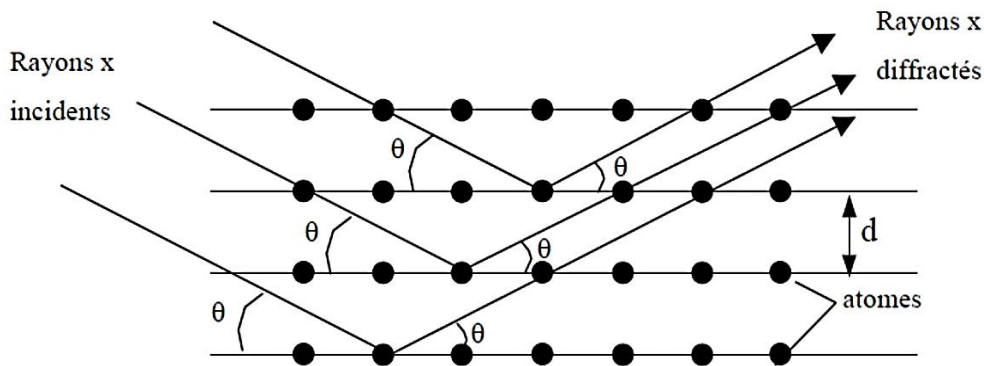


Figure. III.15. Famille de plans réticulaires de distance d , sur lesquels diffracte un faisceau de rayons X. [01]



Figure. III.16. Le diffractomètre utilisé de la marque D2 PHASER-Bruker.

III.7.3. Analyse par microscope électronique à balayage :

III.7.3.1. Principe MEB :

Le fonctionnement du MEB est basé sur l'émission d'un faisceau d'électrons produit par une cathode qui balaye totalement la surface de l'échantillon. L'interaction du faisceau avec l'échantillon provoque un certain nombre d'émission électronique et électromagnétique.

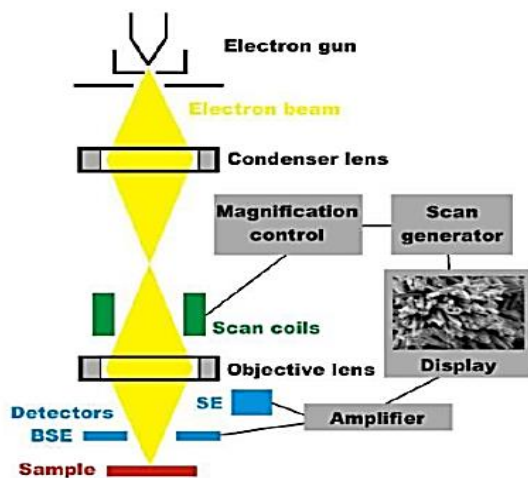
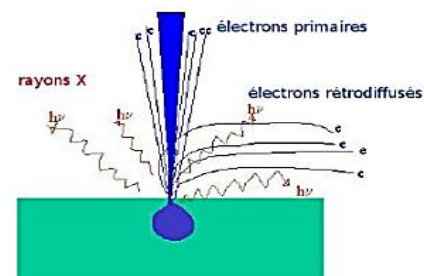


Schéma d'un microscope électronique à balayage



Interactions électrons-matière

Figure III.17. Principe de fonctionnement de microscope électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage possède trois types de détecteur :

- Un détecteur des électrons secondaires.
- Un détecteur des électrons rétrodiffusés.
- Un détecteur des photons X.

Les émissions non détectées se dissipent en chaleur des parois de la chambre de l'échantillon, ou sont mise à la terre.



Figure. III.18. Microscope électronique à balayage utiliser (ENSM).

III.7.4. Essais mécaniques :

Dans cette partie nous allons présenter les tests mécaniques appliqués au joint soudé hétérogène le but de cette étude est d'exposer le comportement mécanique de ces soudures hétérogènes.

III.7.4.1. Essai de microdurte :

III.7.4.1. Principes généraux

L'essai consiste à pénétrer en appliquant une force (F) sur un pénétrateur ayant une forme de pyramide normalisée en diamant de base carrée au sommet de 136°. L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure la diagonale d de ce carré à l'aide d'un appareil optique. C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

$$HV = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{gd^2}$$

HV : la dureté Vickers

F : force appliquée [N].

D : diagonales de l'empreinte [mm].

G : accélération terrestre [ms⁻²] (9.80665).

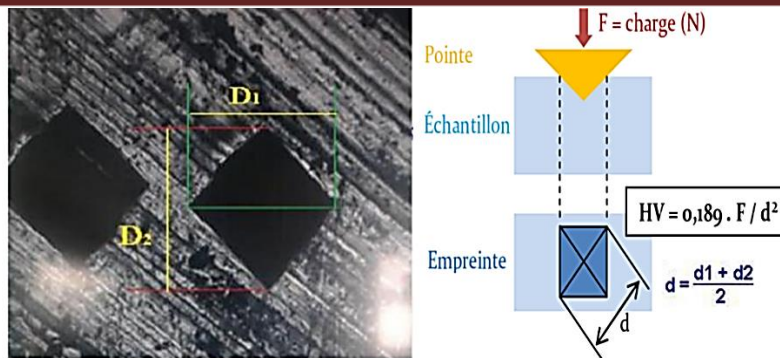


Figure. III.19. Dimensions de l'empreinte et formule de calcul de la dureté Vickers [02].

III.7.4.3. Equipement utilisé pour l'essai de microdureté :

Les essais de la micro dureté sont réalisés au niveau de ENSMM-ANNABA la machine à dû la marque INNOVATEST

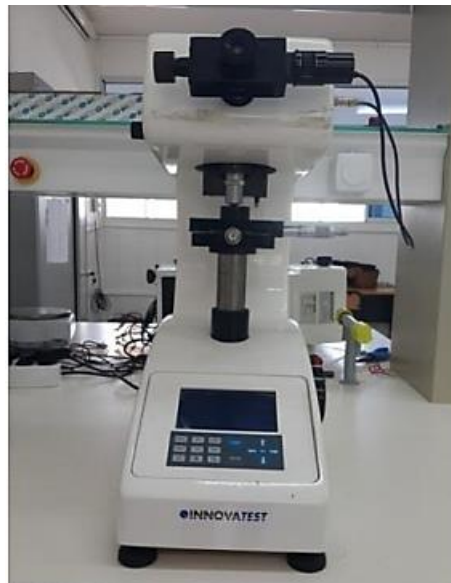


Figure. III.20. Le micro-duromètre utilisée (ENSMM).

III.7.4.4. Mode de l'essai :

Un profil de microdureté a été effectué au niveau de cette huit échantillons (quatre échantillons pour le courant continu et quatre échantillons pour le courant pulsé) avec une charge $F = 100\text{gf}$ pendant 15 secondes.

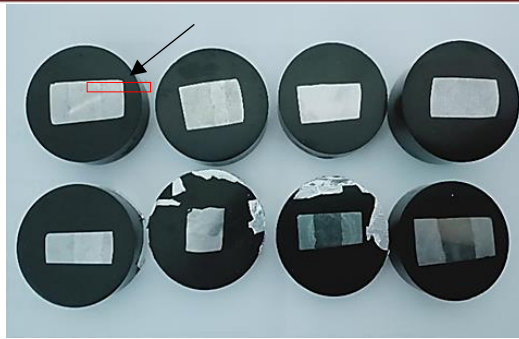


Figure. III.21. Profil de microdurté.

III.7.5. Essai de traction :

III.7.5.1 Principe généraux :

Pour la détermination des caractéristiques mécaniques des joints soudés (limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture) on applique une contrainte uniforme uni axiale de traction sur les éprouvettes normalisées qui contient ces joints et on enregistre l'allongement résultant.

Le but de cet essai est de vérifier que la rupture sous la surcharge se produira dans le métal de base plutôt que dans le métal fondu ou la ZAT

III.7.5.2. Les caractéristiques mécaniques déterminées par la traction :

Les caractéristiques mécaniques déterminées par la traction :

- Limite élastique.
- Résistance à la rupture.
- Allongement à la rupture.
- module de Young et Coefficient de poisson.

III.7.5.3. Préparation des éprouvettes pour l'essai :

La taille de chaque éprouvette en traction a été préparée conformément à la norme ASTM E8 (American Society for Testing and Materials) (Figure III.14) Le prélèvement de l'éprouvette de traction est réalisé dans le sens transversal du cordon de soudure.

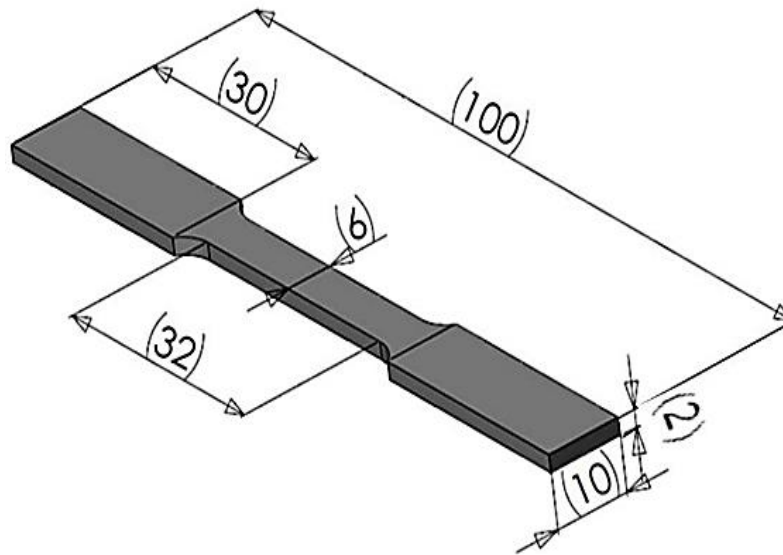


Figure. III.22. Géométrie des éprouvettes de traction conformément à la norme ASTM E08 de 100 KN avec une vitesse de traction de 0,03(mm/s),

III.7.5.4. Equipement utilisé pour l'essai de traction :

Les essais de traction sont effectués au Laboratoire des essais mécaniques (CRTI), au moyen d'une machine de traction de type « MTS. Criterion 45 », 100KN intègre de nombreuses innovations MTS pour maximiser la fiabilité des essais. L'efficacité opérationnelle, la convivialité, la sécurité et la facilité de maintenance, le contrôleur numérique MTS assurent la régulation rapide et en boucle fermée et l'acquisition des données en vue d'obtenir des données d'essais plus fiables et des analyses plus significatives.



Figure. III.23. La machine de traction « MTS. Criterion 45 » E8.

III.7.5.5 Mode de l'essai :

L'essai a été effectué sur les huit éprouvettes avec une charge de 100 KN et une vitesse de traction $V=0.03$ m/S.

On observe (Fig.III.17) que la cassure apparaît dans la zone fondue Si la cassure a lieu dans la zone affectée thermiquement, on peut noter une charge de rupture, mais la valeur de cette charge dépend de l'épaisseur d'éprouvette donnée et de celle de la ZAT. Par un effet de consolidation dû au métal de base.



Figure. III.24. Eprouvettes avant la traction.



Figure.III.25. Eprouvette après la traction.

VI.1. Introduction

Le chapitre "Résultats et Discussions" constitue l'essentiel de cette étude, où nous présentons et analysons les résultats obtenus à partir des différentes caractérisations effectuées sur les échantillons étudiés. Ce chapitre vise à dévoiler les informations clés concernant la composition chimique du métal de base, la caractérisation microstructurale et les propriétés mécaniques des cordons de soudure, ainsi que les résultats de l'analyse par diffraction des rayons X.

Nous commençons par une analyse de la composition chimique afin d'évaluer la nature du matériau de base. Ensuite, la caractérisation microstructurale nous permet d'examiner la microstructure et de détecter d'éventuels défauts. Les propriétés mécaniques sont évaluées à travers des essais de micro-dureté et des essais de traction. La diffraction des rayons X est utilisée pour déterminer la structure cristalline et identifier les phases présentes. Enfin, le microscope électronique à balayage est utilisé pour l'analyse par EDS et l'examen des faciès de rupture.

L'ensemble de ces résultats et discussions fournira une compréhension approfondie des échantillons étudiés, en établissant des liens entre la composition chimique, la microstructure et les propriétés mécaniques. Cette analyse approfondie constitue une base solide pour les conclusions et les recommandations qui seront exposées par la suite.

VI.2. Analyse de composition chimique

Le matériau du métal de base est l'acier inoxydable ferritique AISI 430. Ce dernier reçu sous forme des tôles d'épaisseur de 1.5 mm. Une analyse de composition chimique par spectromètre de type FOUNDRY-MASTER Xpert, est réalisée au niveau du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Cheraga. Les compositions chimiques illustrées dans le tableau IV.1.

Tableau VI.1. Composition chimique de l'acier inoxydable ferritique AISI 430.

	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	P	N	Fe
Teneur (%)	0.06	0.53	0.38	16.61	0.02	0.26	0.18	0.04	0.02	0.007	Bal.

VI.3. Caractérisation structurale

VI.3.1. Observation métallographique :

VI.3.1.1. Microstructure de matériau de base :

La (Figure IV.1), montre le résultat de l'observation optique de la microstructure de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 pour un grossissement (X1000). Cette micrographie montre une structure ferritique, avec une taille des grains de 8 µm calculé par le logiciel image J.

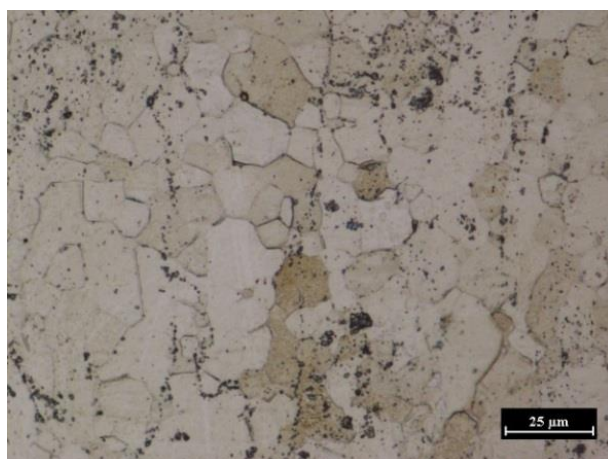
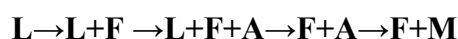


Fig.VI. 1 Microstructure de métal de base (X1000).

IV.3.1.2. Microstructure de la zone de liaison

VI.3.1.2.1. Soudures homogènes

Comme montre la figure IV.2 la solidification préliminaire des soudures se produit sous forme de ferrite primaire. La microstructure de la zone de fusion soit constituée d'un mélange de ferrite et de martensite, qui est présente le long des joints des grains. Lors du refroidissement, de l'austénite se forme à température élevée le long des joints de grains de ferrite. Cette austénite se transforme ensuite en martensite lorsque la zone de fusion se refroidit à température ambiante.



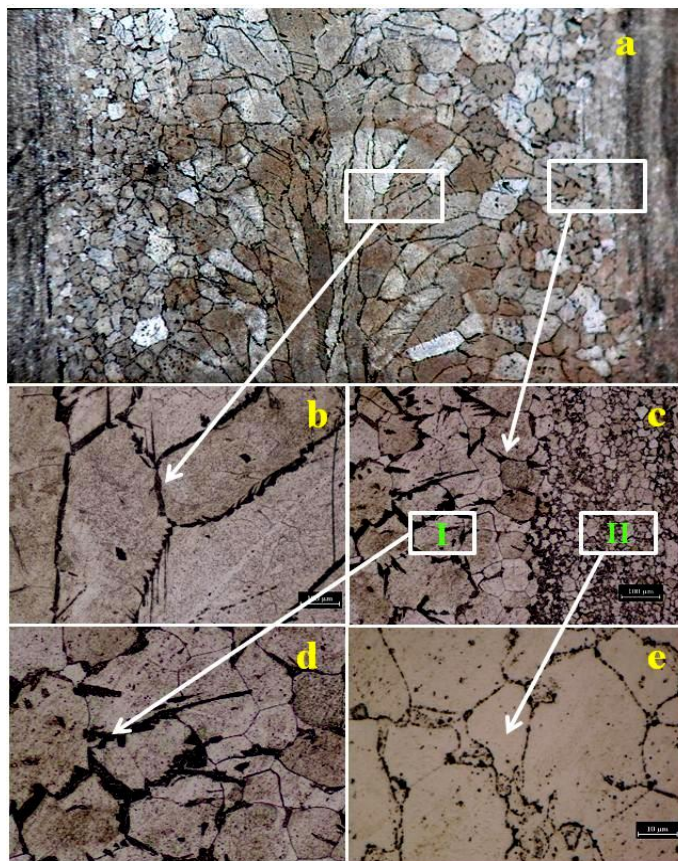


Fig.VI. 2 Microstructure de la zone de liaison (1) X50 ;(2) X150 ;(3) X1500.

Pailleurs, comme les transformations ne sont pas complètes, le grossissement des grains qui se produit à haute température ne pourra pas être résorbé ultérieurement. Dans ces conditions, la soudure, après retour à la température ambiante, se présentera généralement dans l'état structural suivant :

La zone fondue (ZF) : structure à gros grains formée de ferrite, et de martensite aux joints de grains de la ferrite (Figure III.2.b).

La zone affectée thermiquement (ZAT) : Comme montre-la (Figure III.2.c) la zone affectée par la chaleur est divisée en deux parties :

ZAT1 : Celle voisine du métal fondu qui a atteint une température assez élevée pour que se produise la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$. Elle est constituée de ferrite et de martensite comme le métal fondu mais la grosseur des grains et la teneur en martensite régressent lorsque l'on s'éloigne de la zone fondue (Figure III.2.d).

ZAT2 : Celle qui n'a pas subi de transformation et dans laquelle seuls les précipités de carbure de chrome ont pu évolué (Figure III.2.d).

Le diagramme pseudo-binaire à 17% Cr (Figure IV.3), est utile pour illustrer et décrire la métallurgie physique de ces alliages. Ce diagramme, représenté une concentration nominale en carbone de 0,05% en poids superposé (Cette composition se rapproche de celle de l'acier AISI 430). Le diagramme prédit que la structure sera entièrement ferritique à la fin de la solidification. Il restera ferritique à jusqu'à ce qu'il refroidisse en dessous d'environ 1100 °C (2010 °F). A cette température, et sous des conditions d'équilibre de refroidissement, l'austénite se transforme en ferrite et carbure et de la structure finale est un mélange de ferrite et carbure Cr_{23}C_6 .

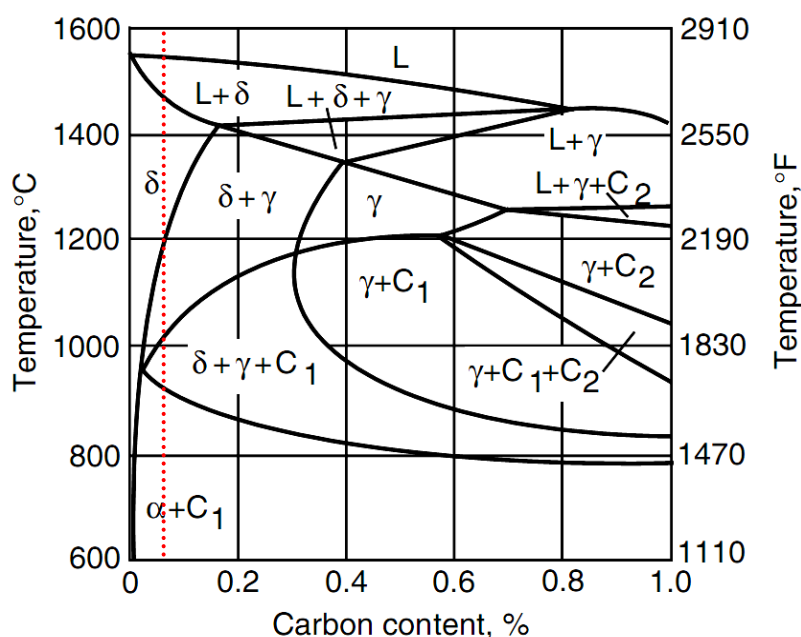


Fig.VI. 3 Diagramme pseudo-binaire à 17% Cr [9].

Dans le cas d'un cycle thermique de soudage, lors du chauffage, puis au cours du refroidissement, ces aciers sont susceptibles de subir les transformations : $\alpha \rightarrow \gamma$

Lorsque ces transformations vont se développer au cours des cycles thermiques de soudage, elles ne vont pas pouvoir atteindre leur équilibre compte tenu de la rapidité avec laquelle ces cycles sont parcourus. Elles seront donc incomplètes, ce qui pourra avoir deux conséquences principales, sur le plan structural :

La quantité d'austénite formée sera, en général, inférieure à celle prévue par le diagramme d'équilibre ;

La transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ pourra être escamotée car, compte tenu de la vitesse de refroidissement d'une part et, d'autre part, de la trempabilité de cette austénite (très

alliée), on tendra vers une transformation martensitique se développant à plus basse température.

VI.3.1.2.2. Soudures hétérogènes

VI.3.1.2.2.1. Courant continue

La microstructure du cordon de soudure de l'acier inoxydable ferritique 430, réalisé à l'aide du soudage TIG avec une intensité de courant ($I=60$), en utilisant différents métaux d'apport austénitiques tels que le 308L, 309, 316 et l'austénitoferritique 2209, présente des caractéristiques distinctes. Les observations suivantes décrivent la microstructure typique :

La zone fondue (ZF) : constitue la partie centrale du cordon de soudure où la fusion du métal de base et du matériau d'apport a eu lieu. Selon les conditions de soudage, cette microstructure peut présenter des dendrites, qui sont des structures cristallines ramifiées se développant à partir du front de solidification. Les propriétés et la qualité du cordon de soudure sont étroitement liées à la microstructure de la zone fondue.

La zone affectée thermiquement (ZAT) : entoure la zone fondue et subit des modifications microstructurales sans fondre complètement. La ZAT est caractérisée par une recristallisation partielle ou complète des grains de l'acier inoxydable ferritique d'origine, en fonction de la température atteinte pendant le soudage. Des variations de taille de grains et de dureté peuvent être observées dans cette zone, résultant des changements thermiques induits par le soudage.

En résumé, ces observations détaillent la microstructure du cordon de soudure, mettant en évidence les zones fondue et affectée thermiquement ainsi que les caractéristiques spécifiques de chaque zone.

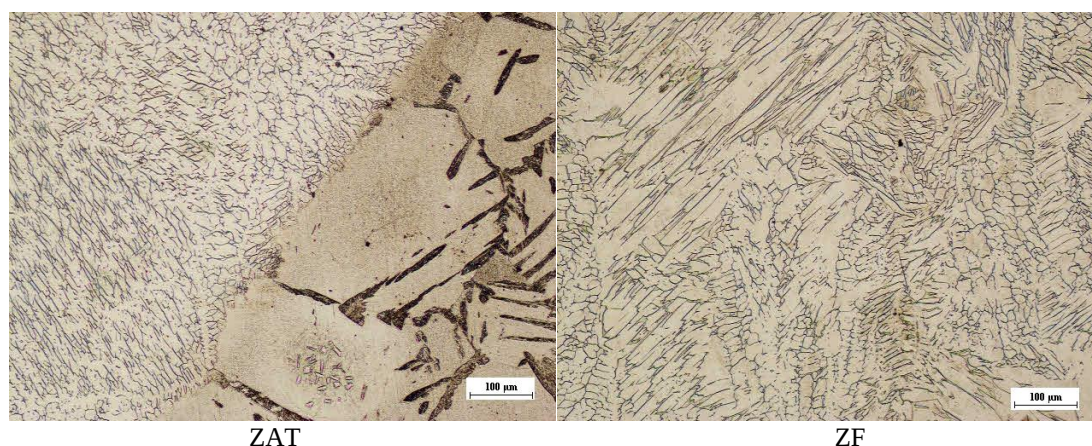


Fig.VI. 4 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).

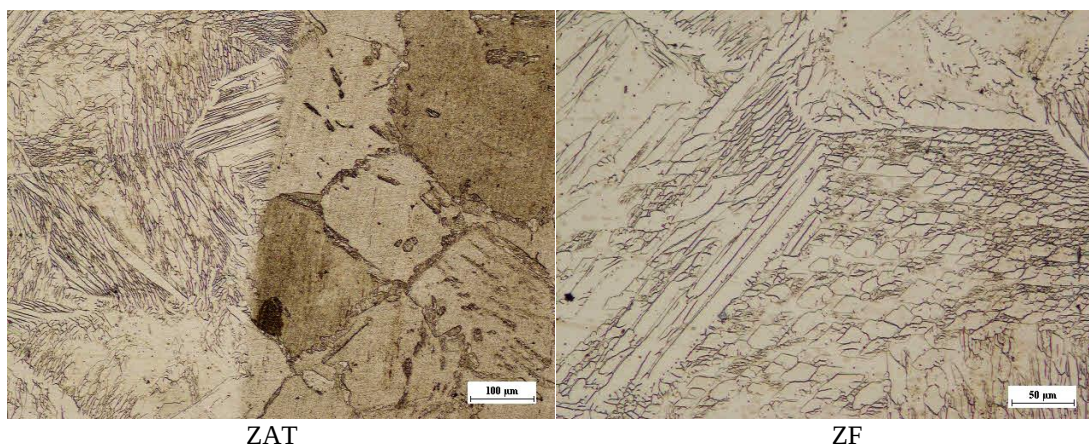


Fig.VI. 5 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austénitique 309).

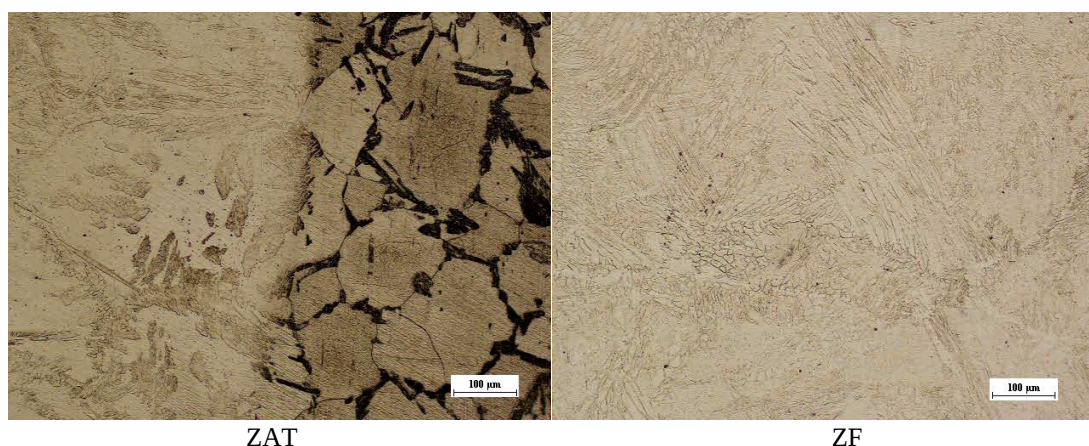


Fig.VI. 6 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austénitique 316).

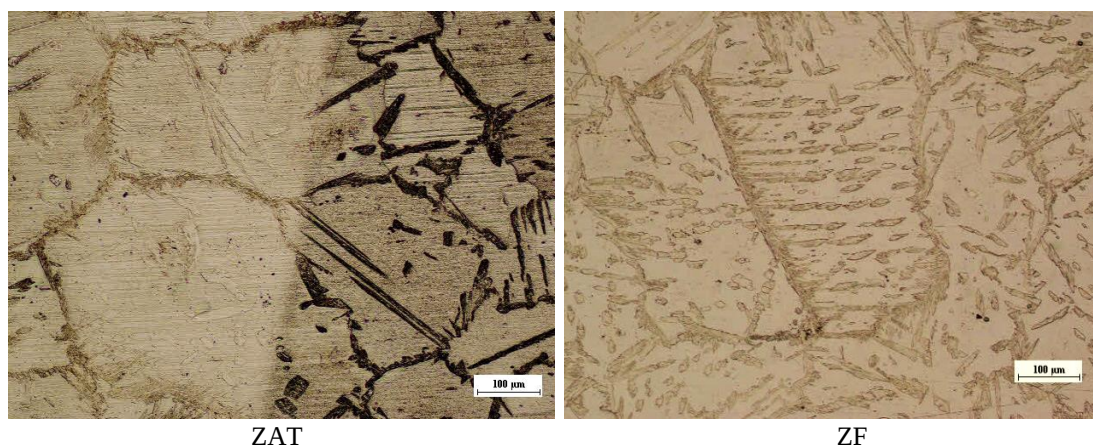


Fig.VI. 7 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austénito-ferritique 2209).

VI.3.1.2.2.2. Courant pulsé

La microstructure des cordons de soudure obtenus par soudage TIG pulsé, avec une intensité de courant ($I=80A$), en utilisant différents métaux d'apport austénitiques

tels que le 308L, 309, 316 et l'austénitoferritique 2209, présente des caractéristiques distinctes. Les observations suivantes décrivent la microstructure typique :

La zone fondue (ZF) : La microstructure de la zone fondue lors du soudage avec courant pulsé peut présenter des caractéristiques similaires à celles du soudage avec courant continu. Toutefois, l'utilisation du courant pulsé permet généralement d'obtenir une fusion plus précise et un meilleur contrôle de la dilution, conduisant ainsi à une microstructure plus homogène avec une répartition plus uniforme des phases ferritique et austénitique.

La zone affectée thermiquement (ZAT) : La microstructure de la zone affectée thermiquement dans les soudures TIG pulsé présente des caractéristiques similaires à celles du soudage TIG continu. La taille des grains et la teneur en martensite diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la zone fondue.

En résumé, la microstructure des cordons de soudure obtenus par soudage TIG pulsé, en utilisant des métaux d'apport austénitiques et l'austénitoferritique, présente des particularités spécifiques dans les zones fondue et affectée thermiquement.

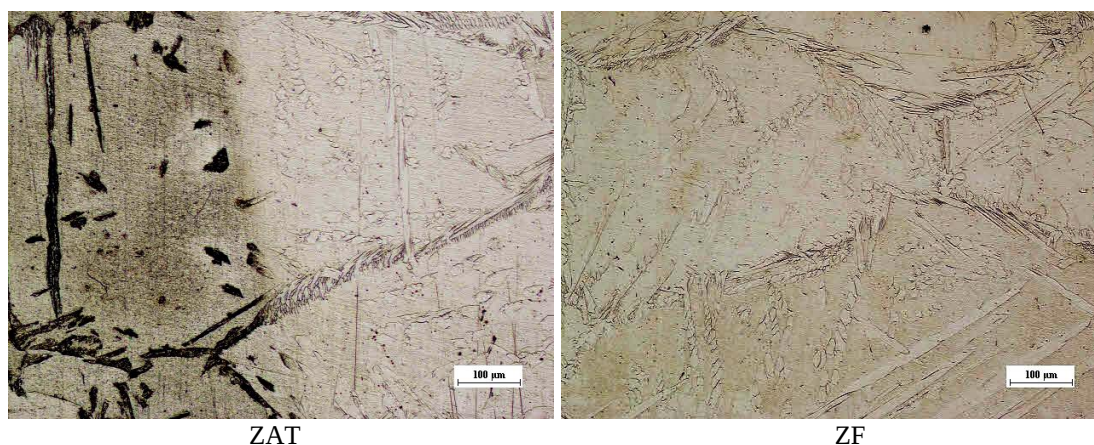


Fig.VI. 8 . Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austénitique 308L).

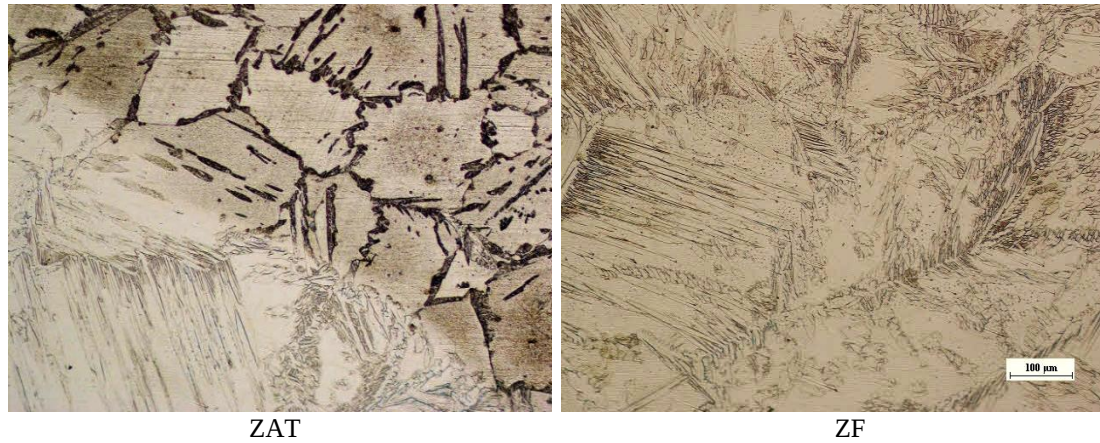


Fig.VI. 9 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austenitique 309).

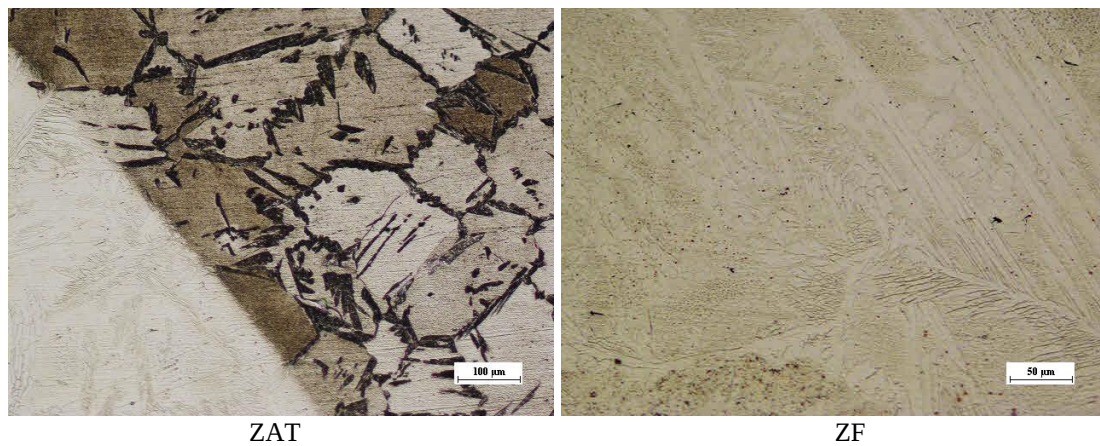


Fig.VI. 10 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austenitique 316).

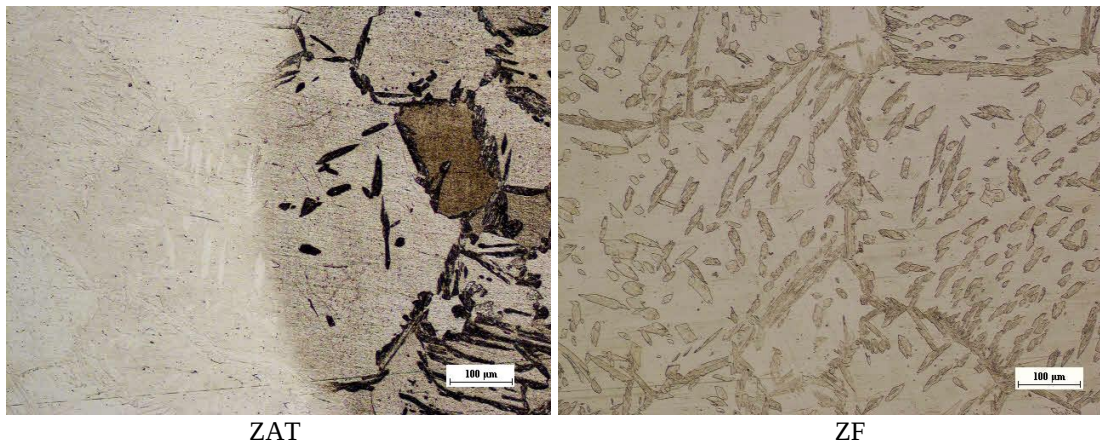


Fig.VI. 11 Microstructure de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austenito-ferritique 2209).

VI.3.1.3. Interprétation

Dans cette partie, nous examinons comment la microstructure de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 évolue en fonction des métaux d'apport utilisés lors du

soudage. Nous étudions les effets de différents métaux d'apport tels que le 308, le 309, le 316 et le 2209 sur la microstructure de la zone de liaison.

Les illustrations présentent la microstructure des soudures, y compris le métal de base, la zone affectée thermiquement et la zone fondue. L'analyse microstructurale de la zone affectée thermiquement révèle que toutes les soudures présentent une matrice de ferrite grossière avec de la martensite inter-granulaire. Lors du processus refroidissement, une phase d'austénite se forme à des températures élevées le long des joints de grains de ferrite. Par la suite, cette austénite subit une transformation en martensite lorsque la zone affectée thermiquement atteint la température ambiante.

L'analyse approfondie de la zone fondue des échantillons révèle que la composition du métal d'apport ainsi que le type de courant utilisé (continu ou pulsé) jouent un rôle significatif dans la transformation de la microstructure de la zone fondue. Les échantillons soudés avec les métaux d'apport 308 et 309 révèlent une structure combinant de l'austénite et de la ferrite vermiculaire. La formation de réseaux presque continus de ferrite vermiculaire est due à la présence de zones riches en chrome (Cr) et pauvres en nickel (Ni) au sein des sous-grains dendritiques cellulaires. De plus, la vitesse de refroidissement pendant la solidification joue un rôle crucial dans l'évolution de la microstructure. L'échantillon soudé avec le métal d'apport 316 présentait une microstructure caractérisée par une matrice de phase austénitique (représentée en blanc) avec la présence de ferrite (phase sombre). Les soudures réalisées avec le métal d'apport 2209 présentent une microstructure biphasée où la ferrite est présente sous forme lamellaire, répartie au sein d'une matrice constituée d'austénite ferrite et d'austénite.

Une analyse microstructurale approfondie, utilisant des techniques telles que, la diffraction des rayons X et la spectrométrie de dispersion d'énergie (EDS), est nécessaire pour caractériser précisément la microstructure du cordon de soudure dans chaque cas spécifique.

VI.3.2. Analyse par diffraction des rayons X

- Courant continue

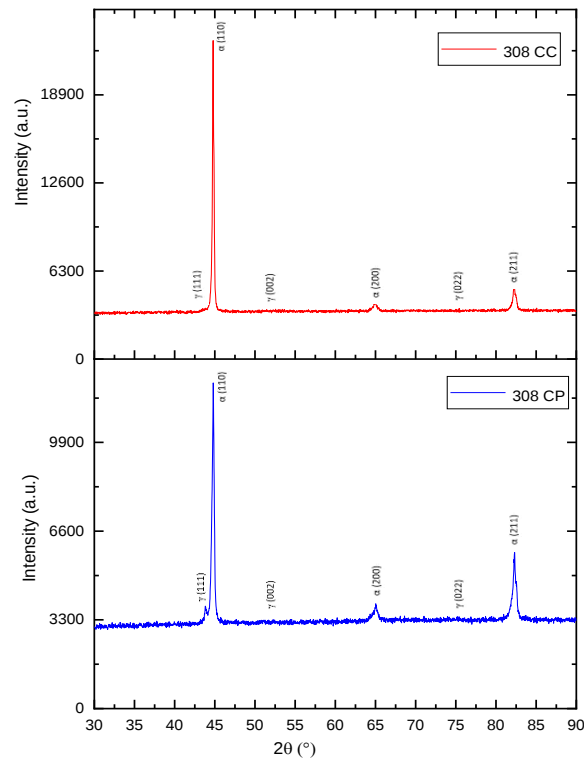


Fig.VI. 12 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austénitique 308).

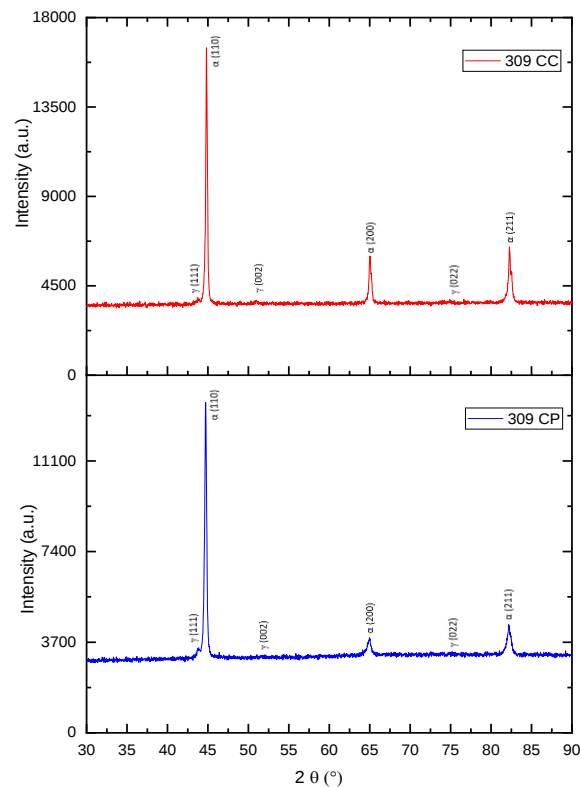


Fig.VI. 13 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (metal de base ferritique (AISI 430) avec un metal d'apport austénitique 309).

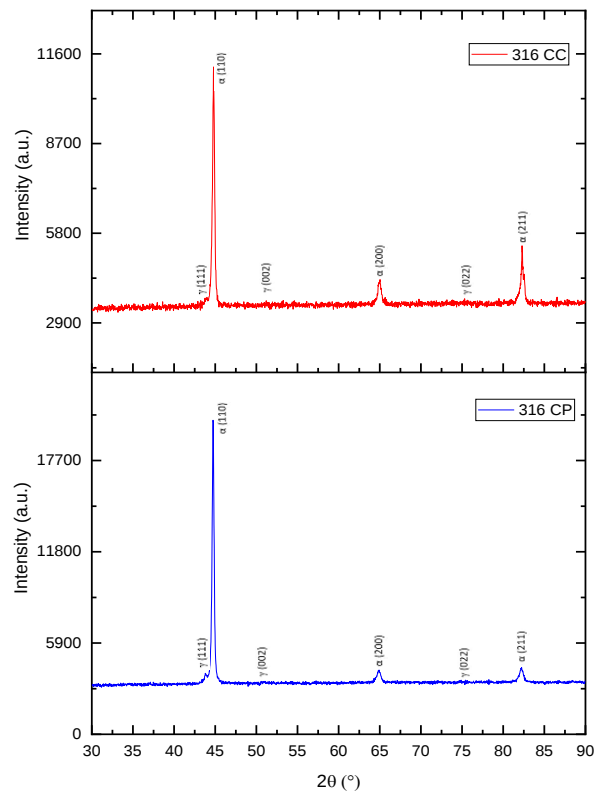


Fig.VI. 14 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).

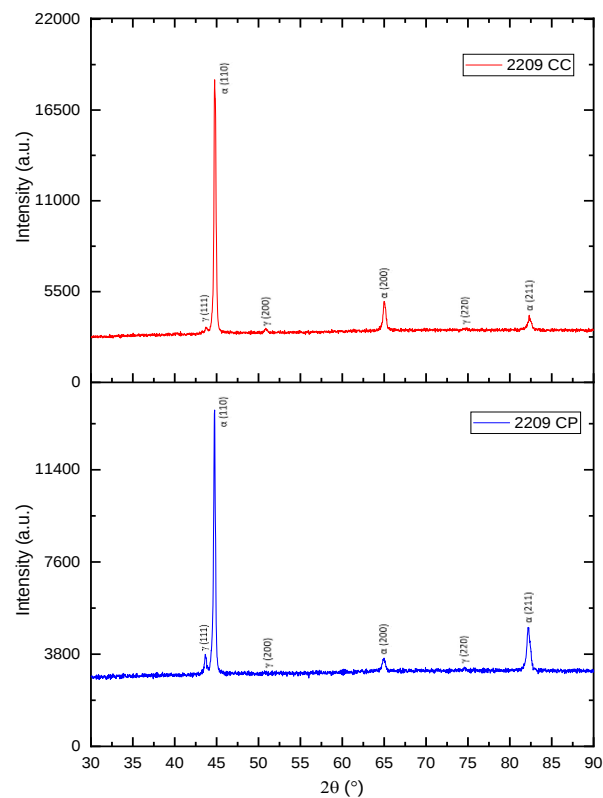


Fig.VI. 15 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénito-ferritique 2209).

- Courant continu

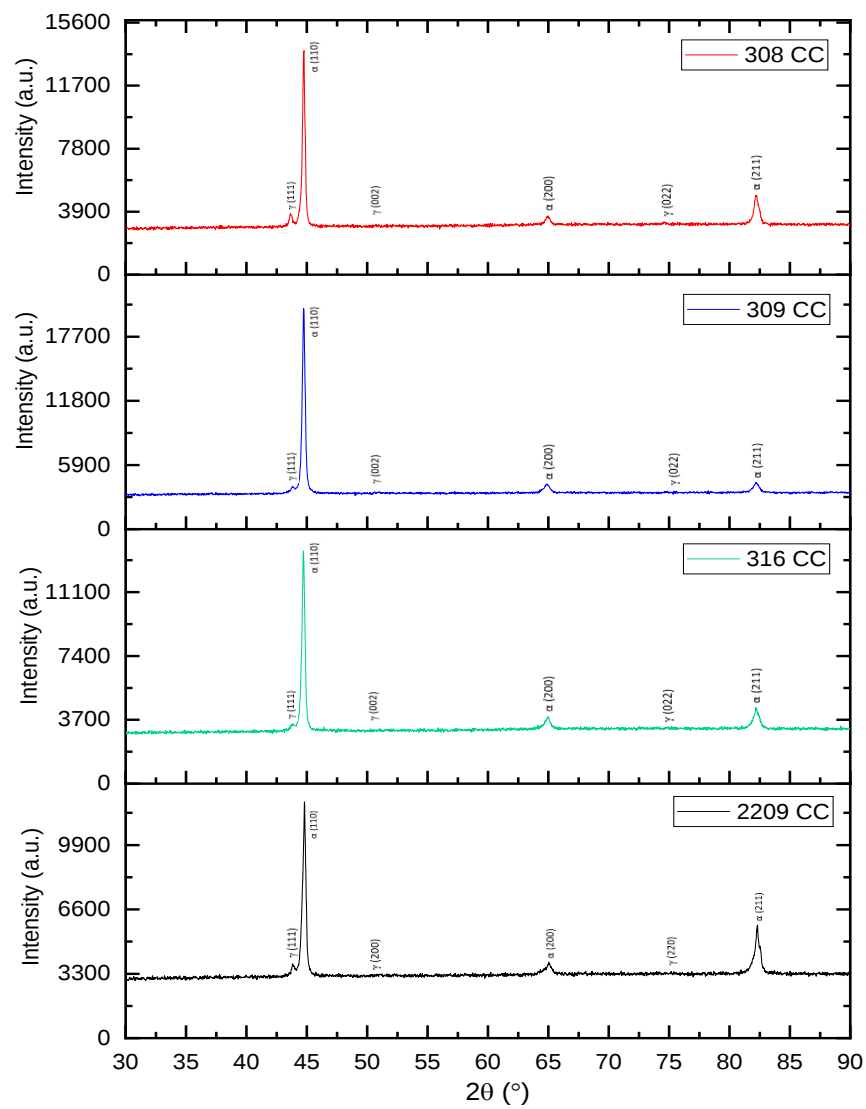


Fig.VI. 16 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures courant continu

- Courant pulsé

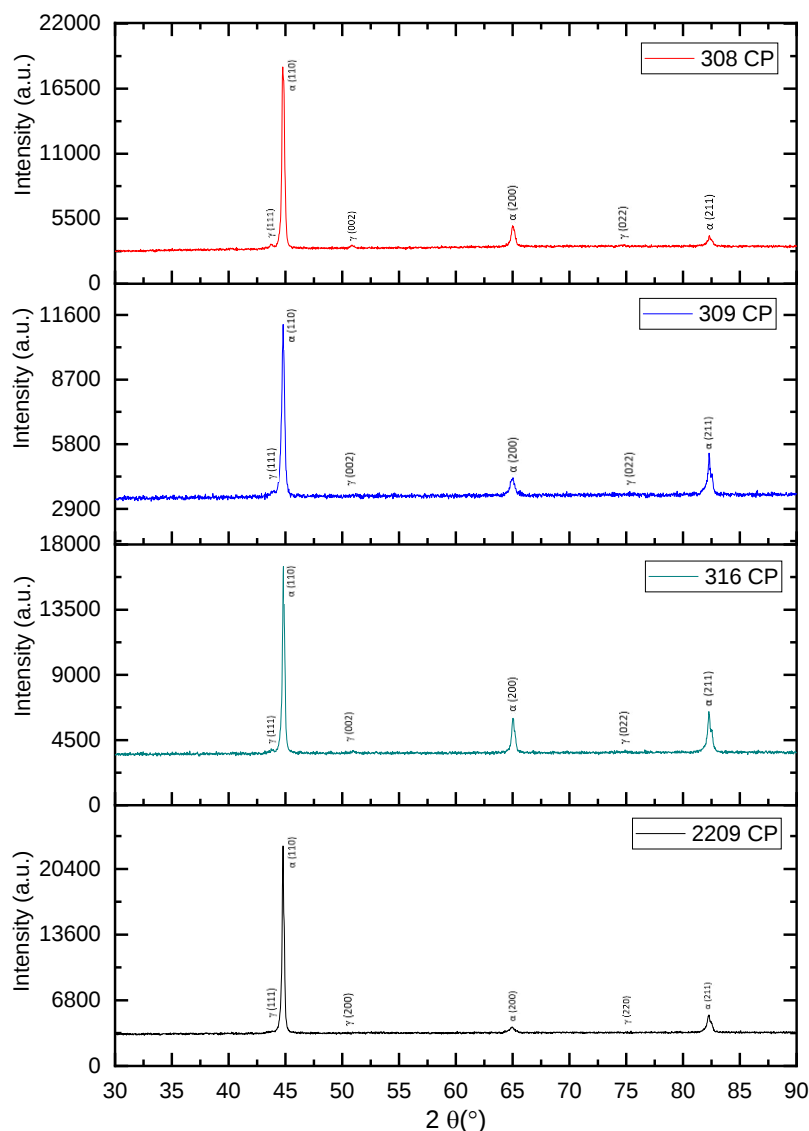


Fig.VI. 17 Diagramme RX de la zone de liaison des soudures courant pulsé.

Les figures IV12 à IV17 montrent les schémas de diffraction des rayons X (DRX) pour la zone de liaison des soudures de l'acier inoxydable 430 réalisées avec différents métaux d'apport tels que le 308, le 309, le 316 et le 2209. Les figures indiquent que tous les échantillons présentent principalement deux types de pics, l'austénite (γ) et la ferrite (α), conformément aux résultats obtenus par microscopie optique.

Il est important de noter que tous les spectres présentent des raies globalement aux mêmes positions angulaires et qu'aucune nouvelle raie n'apparaît. Nous pouvons clairement observer la présence des trois premières raies caractéristiques $\{110\}$, $\{200\}$ et $\{211\}$ d'une structure CC correspondant à la ferrite (α). De plus, nous constatons la présence des trois premières raies caractéristiques $\{111\}$, $\{022\}$ et $\{022\}$ d'une structure CC correspondant à l'austénite (γ) avec une formule chimique de (Fe_3Ni) , à

l'exception des soudures réalisées avec le métal d'apport 2209, où les trois premières raies caractéristiques $\{111\}$, $\{200\}$ et $\{220\}$ correspondent à une structure CC d'austénite (γ) avec une formule chimique de $(\text{FeCr}_{0.29}\text{Ni}_{0.16}\text{C}_{0.06})$.

Nous remarquons également que l'intensité et la largeur des pics sont influencées par la nature du métal d'apport et le type de courant de soudage (continu/pulsé).

Le mode de solidification austénitique-ferritique s'est produit dans toutes les soudures : $L \rightarrow L+F \rightarrow L+F+(F+A) \rightarrow F+A$, où 'L', 'F' et 'A' représentent respectivement le liquide, la ferrite et l'austénite. Dans ce mode de solidification, la phase ferritique se précipite d'abord au début de la solidification. À la fin de la solidification, certaines austénites se forment aux limites des grains de ferrite par réaction péritectique-eutectique. Lorsque le métal de soudure se refroidit vers la zone biphasée ferrite-austénite, la ferrite devient de plus en plus instable et se convertit en austénite par une réaction contrôlée par la diffusion. Au fur et à mesure de la progression de la transition de phase, les éléments ferritiques s'accumulent progressivement dans la ferrite résiduelle, tandis que les éléments austénitiques diminuent progressivement. Ensuite, la diffusion est limitée et la ferrite atteint un état stable à une température plus basse. Dans ce cas, les soudures présentent une microstructure mixte de ferrite et d'austénite. La ferrite adopte une forme de lamelle et traverse la dendrite d'origine, tandis que l'austénite est répartie le long de la limite de la dendrite d'origine.

VI.3.3. Observations microstructurales par microscope électronique à balayage

VI.3.3.1. Le métal de base

La figure dessous obtenue par microscopie électronique à balayage (MEB) pour l'acier AISI 430 permet d'analyser la structure et la composition du matériau à l'échelle microscopique montre une matrice de grains ferritiques. Ces grains peuvent apparaître comme des zones claires et homogènes avec une texture globale.

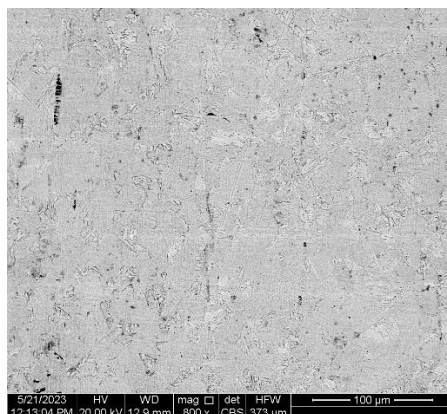
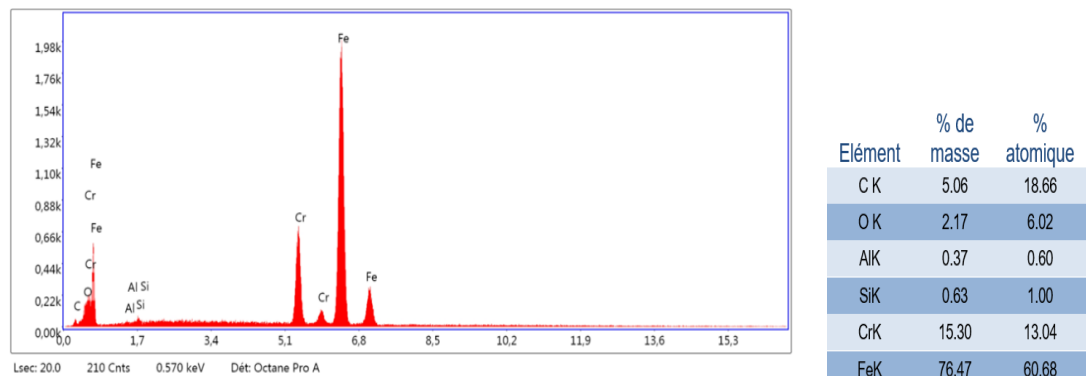
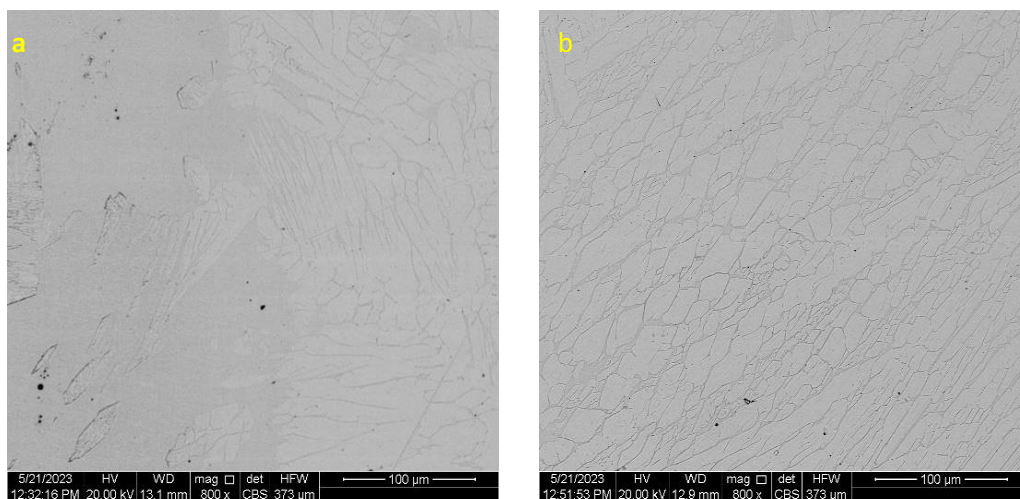


Fig.VI. 18 La microstructure du métal de base AISI 430 l'état initial obtenue par MEB

Par conséquent, l'observation de la microstructure par MEB doit être complétée par d'autres techniques d'analyse telle que la spectroscopie d'énergie dispersée (EDS), pour obtenir la composition chimique précise comme il montre dans les deux figures ci-dessous.

**Fig.VI. 19** spectre d'analyse de métal de base par la technique EDS

VI.3.2. Microstructure obtenue par MEB pour l'échantillon soudé par les différents métal d'apport avec le courant continue et le courant pulsé

**Fig.VI. 20** . La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 308

(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF

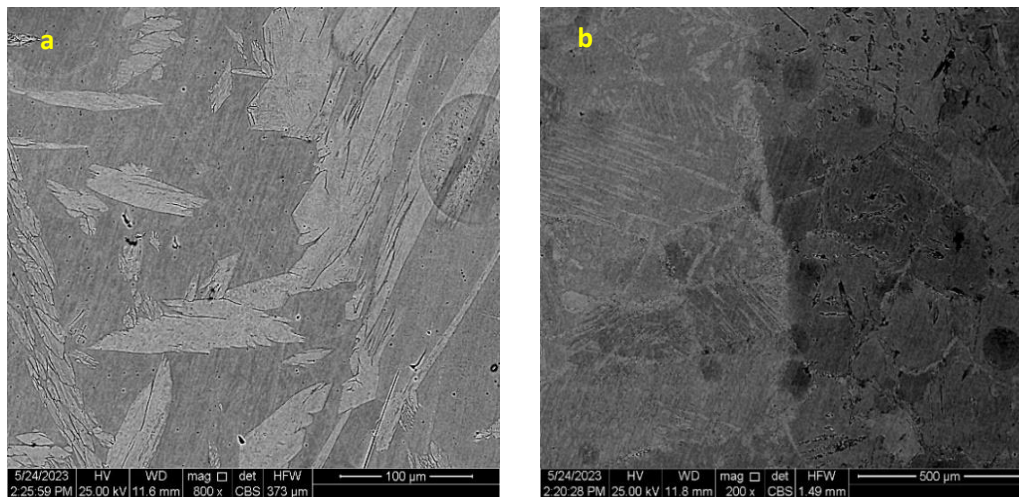


Fig.VI. 21 La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 308 avec courant pulsé

(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF

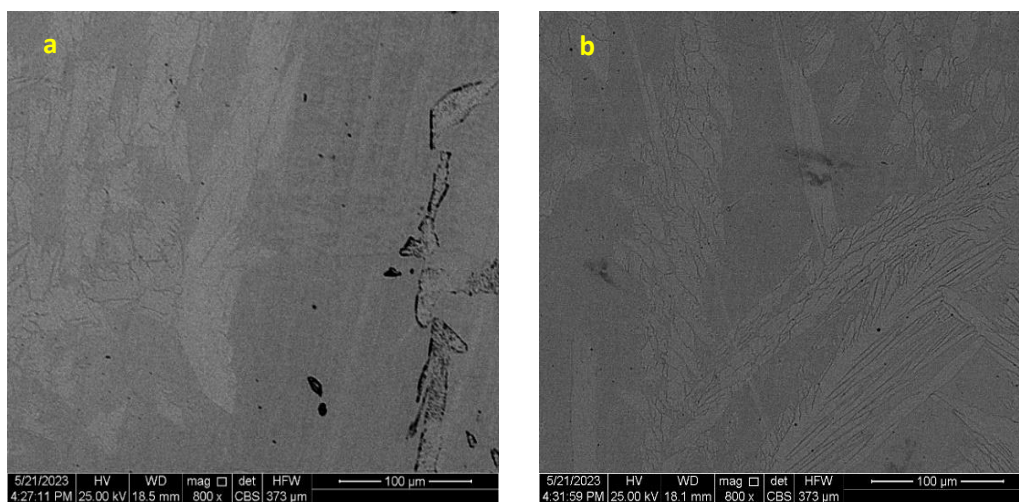


Fig.VI. 22 La microstructure d'échantillon souder par métal d'apport 309 avec courant continue

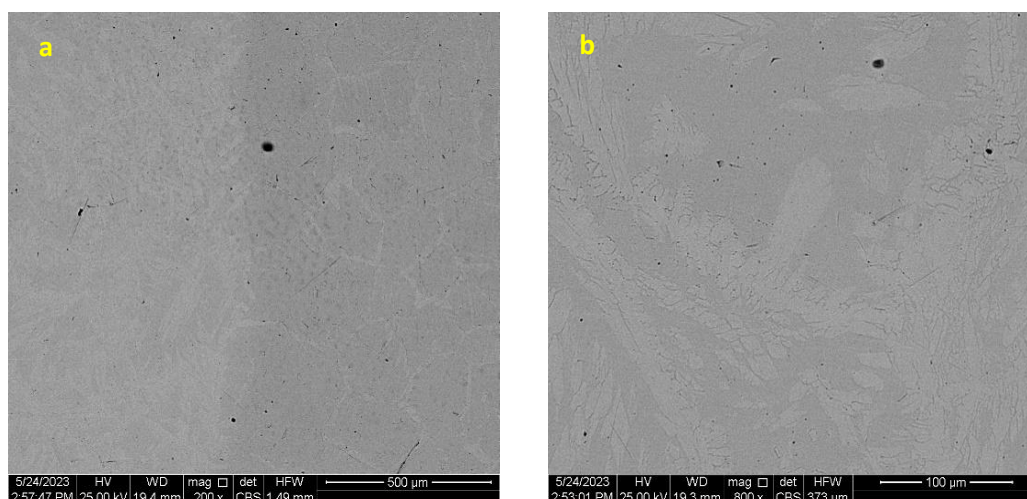


Fig.VI. 23 La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 309 avec courant pulsé
(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF

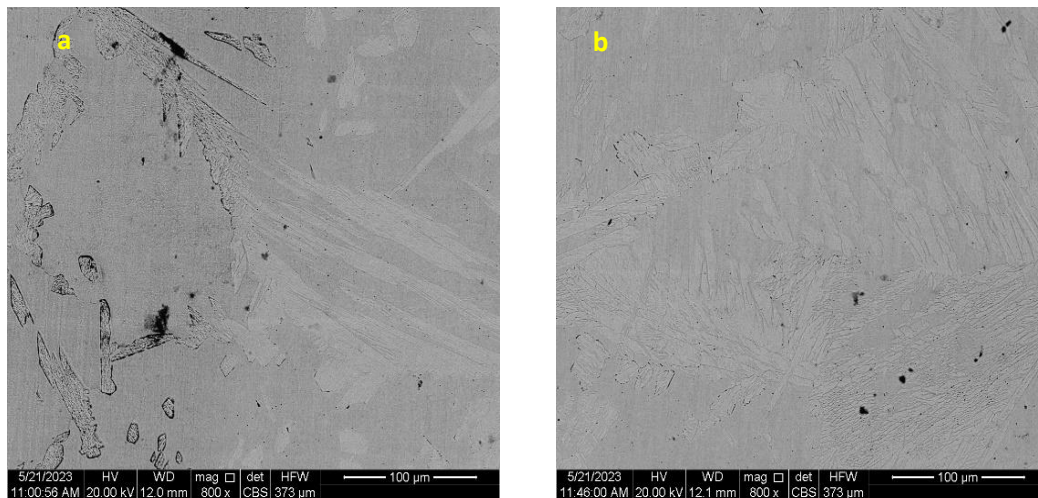


Fig.VI. 24 La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 316 avec courant pulsé(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF

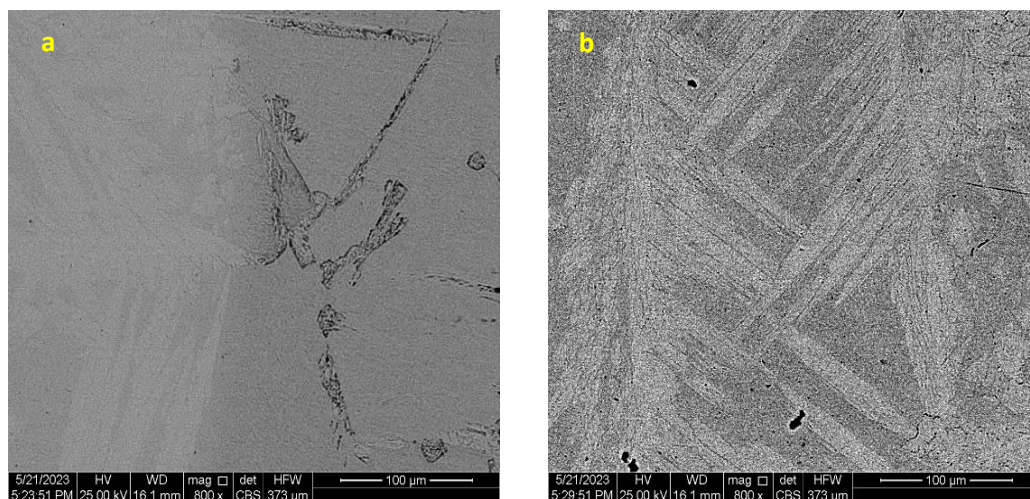


Fig.VI. 25 La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 316 avec courant continue(a) Interface ZAT-ZF (b) ZF

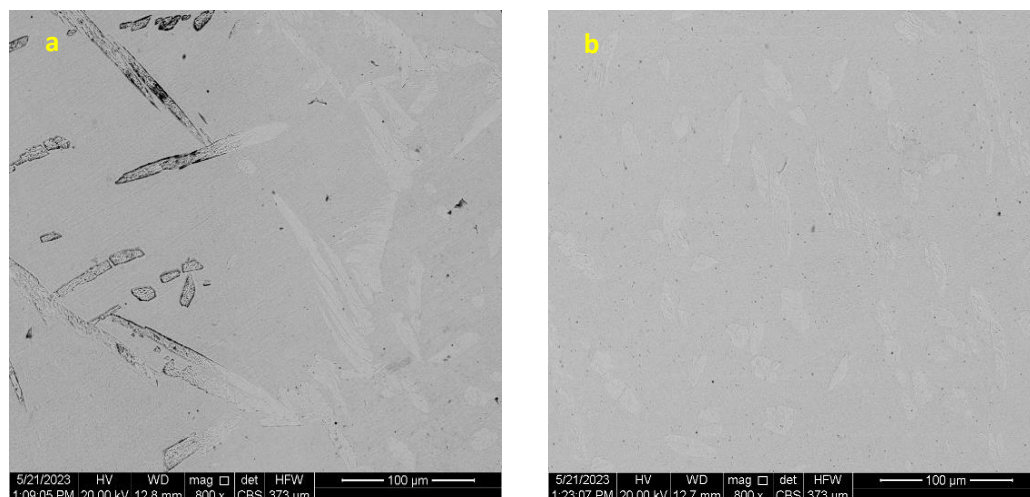


Fig.VI. 26 . La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 2209 avec courant pulsé(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF

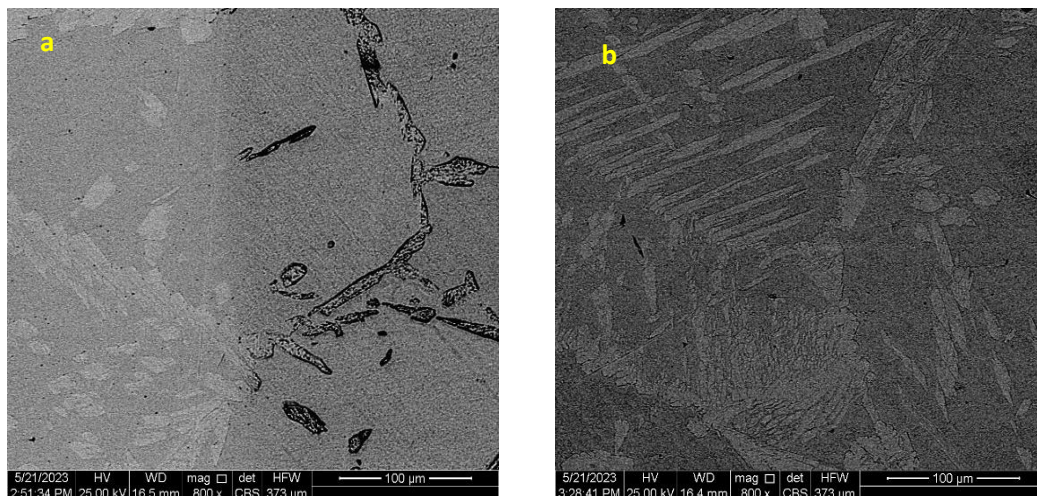


Fig.VI. 27 . La microstructure d'échantillon soudé par métal d'apport 2209 avec courant continu(a)Interface ZAT-ZF (b) ZF

III.3.2.1. Interprétation

Cette partie examine l'évolution microstructurale de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 en fonction de la variation des métaux d'apport. Différents métaux d'apport tels que le 308, le 309, le 316 et le 2209 sont utilisés lors du soudage.

Les Figures au-dessus montrent la microstructure des soudures (y compris le métal de base, la zone affectée thermiquement, et la zone fondue). L'analyse microstructurale de la zone affectée thermiquement, révèle que toutes les soudures présentent une matrice de ferrite grossière avec de la martensite inter-granulaire; cette microstructure peut également être prédite par la relation d'équivalence de Kaltenhauser (facteur K). De plus, une intensité de chaleur plus élevée avec une vitesse de refroidissement plus faible et un temps de diffusion plus long favorise la précipitation remarquable de martensite pendant le refroidissement.

L'analyse microstructurale de la zone fondue, révèle que la composition du métal d'apport joue un rôle important dans l'évolution de la microstructure zone fondue.

Les échantillons soudés avec les métaux d'apports 308 et 309 présentent une structure austénitique et une ferrite vermiculaire, des réseaux presque continus de ferrite vermiculaire se sont formés en raison de la formation de régions enrichies en chrome (Cr) et appauvries en nickel (Ni) au cœur du sous-grain dendritique cellulaire. La formation de ferrite vermiculaire dans l'acier augmente avec l'augmentation le rapport Cr_{eq}/Ni_{eq} . La ferrite vermiculaire dans la zone fondue présente une orientation

cristallographique similaire. Le métal fondu se transforme en δ -ferrite à environ 1530 °C et la solidification se termine à une température d'environ 1455 °C.

En dessous de cette température, la δ -ferrite se transforme en austénite γ . La transformation de δ en γ se poursuit jusqu'à ce que le métal refroidisse à 877 °C. Alors le mode de solidification est en mode FA, dans lequel le métal liquide se transforme en $L+\delta$. Cette δ -ferrite se transforme à nouveau en austénite γ ($L+\delta+\gamma$), et finalement en $\delta+\gamma$. L'évolution microstructurale est également influencée par la vitesse de refroidissement lors de la solidification. Les taux de refroidissement plus lents favorisent la transformation de la ferrite delta en austénite. Cependant, dans cette étude, la vitesse de refroidissement n'est pas suffisante pour une transformation complète de la ferrite delta en austénite.

L'échantillon soudé avec le métal d'apport 316 présentait une microstructure composée d'une matrice de phase austénitique (blanche) avec de la ferrite squelettique (phase sombre gravée). Une vitesse de refroidissement modérée et un rapport Cr_{eq}/Ni_{eq} dans la plage ferrite-austénite (FA) favorisent les phases squelettiques.

La microstructure des soudures avec le métal d'apport 2209 présentent une microstructure biphasée composée de ferrite delta et d'austénite, et aucune phase intermétallique ou précipitation néfaste n'est visible. La ferrite est sous forme lamellaire réparties dans une matrice d'austénite. Les soudures sont solidifiées en mode entièrement ferritique (la première phase qui a cristallisé directement à partir du liquide), tandis que l'austénite a cristallisé en dessous de la température de solvus ferritique. Ce mode de solidification est dépendant du rapport Cr_{eq}/Ni_{eq} de l'acier, ceci peut être bien compris grâce au diagramme pseudo-binaire Fe-Cr-Ni, qui est l'outil le plus important pour prédire le mode de solidification.

VI.3.3.2. L'analyse des résultats obtenus par spectrométrie d'énergie dispersée (EDS)

L'EDS permet d'identifier les éléments chimiques présents dans la zone analysée. En utilisant les spectres d'énergie obtenus, on détermine quels éléments sont présents et en quelle quantité. Dans le cas de l'acier AISI 430 soudé avec un métal d'apport austénitique, vous pouvez vous attendre à détecter des éléments tels que le fer (Fe), le chrome (Cr), le nickel (Ni), le carbone (C) et d'autre

➤ La zone affectée thermiquement

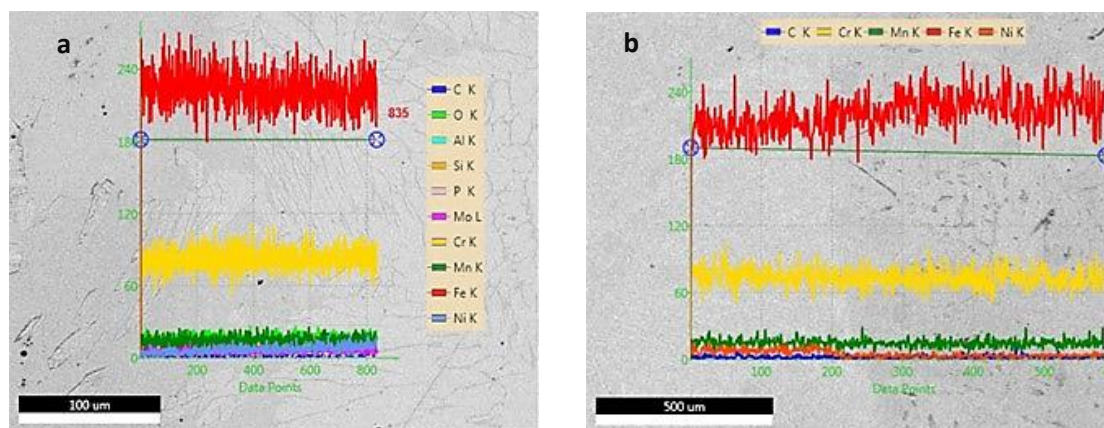


Fig.VI. 28 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d'apport 308 l'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé

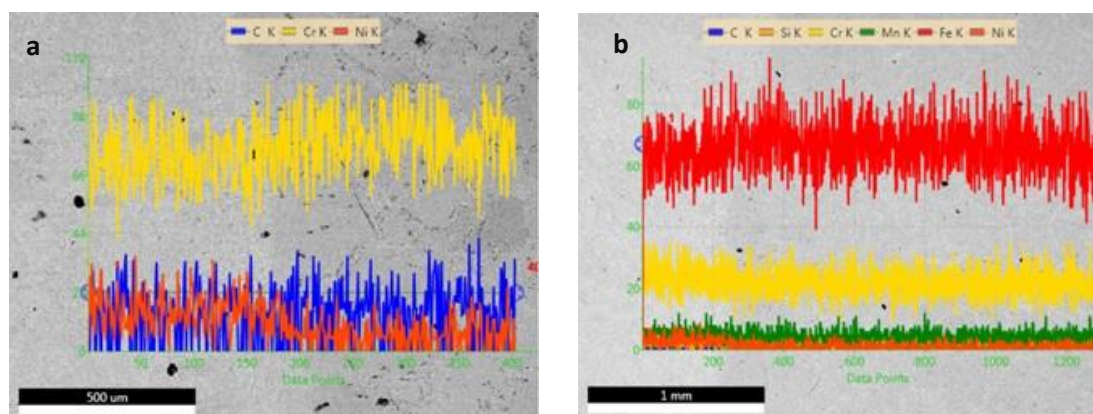


Fig.VI. 29 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d'apport 309 L'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé

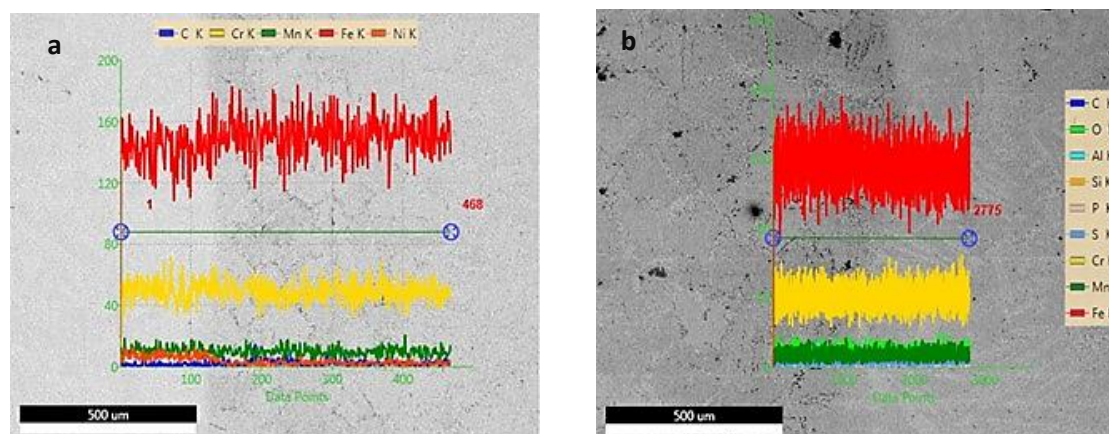


Fig.VI. 30 . Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d'apport 316 L'interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé

a

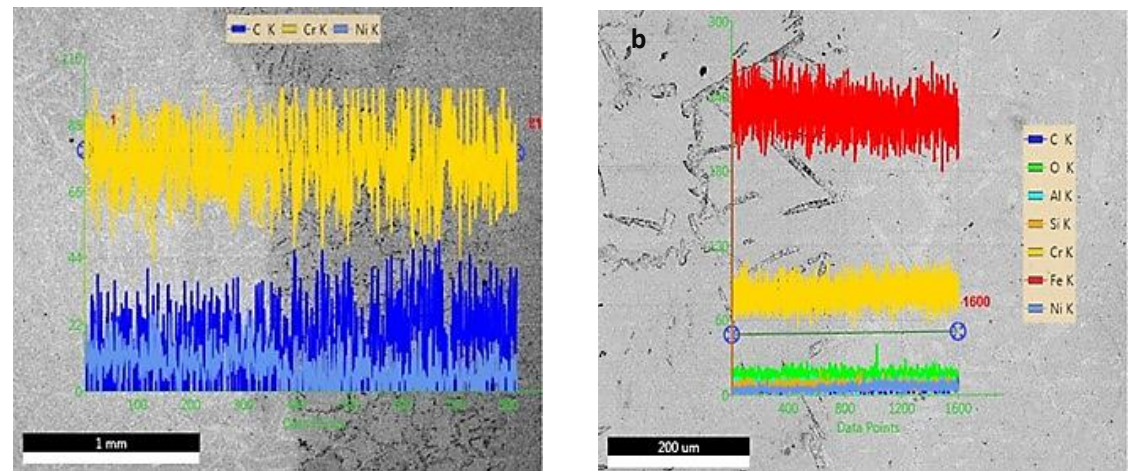


Fig.VI. 31 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d’apport 2209 a l’interface ZAT-ZF (a) courant continue (b) courant pulsé

➤ La zone fondue

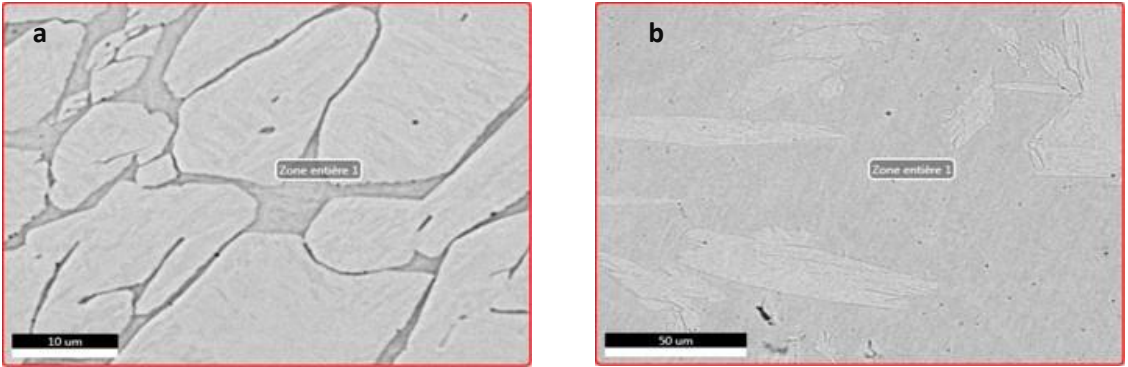


Fig.VI. 32 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d’apport 308 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé

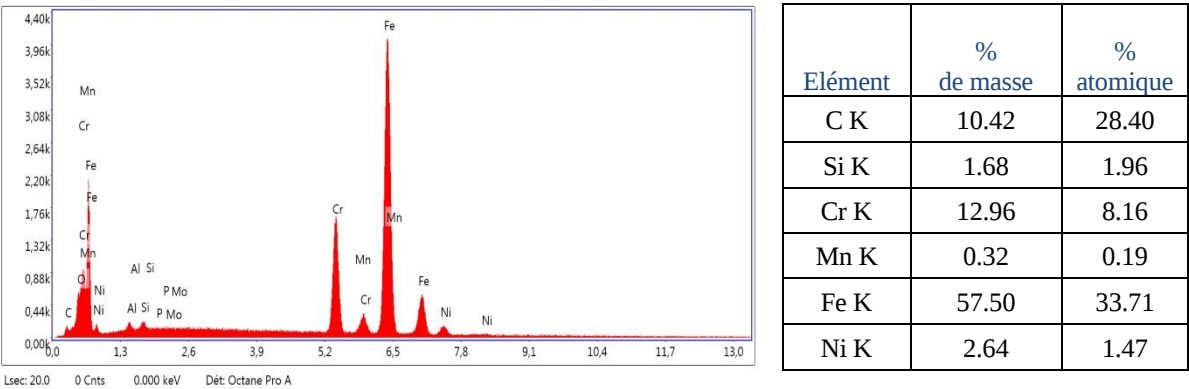
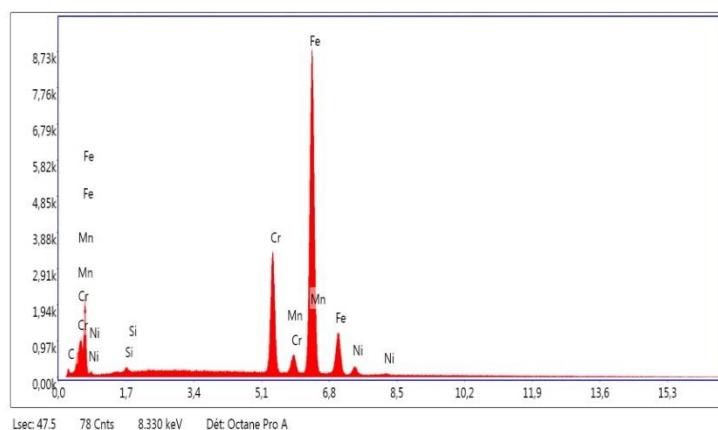


Fig.VI. 33 spectre d’analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d’apport 308 par la technique EDS (courant continu)



Elément	% de masse	% atomique
C K	26.63	61.39
Si K	3.81	3.75
Cr K	11.76	6.26
Mn K	0.35	0.18
Fe K	55.07	27.30
Ni K	2.39	1.13

Fig.VI. 34 spectre d'analyse de la zone fondue de l'échantillon soudé avec métal d'apport 308 par la technique EDS (courant continu)

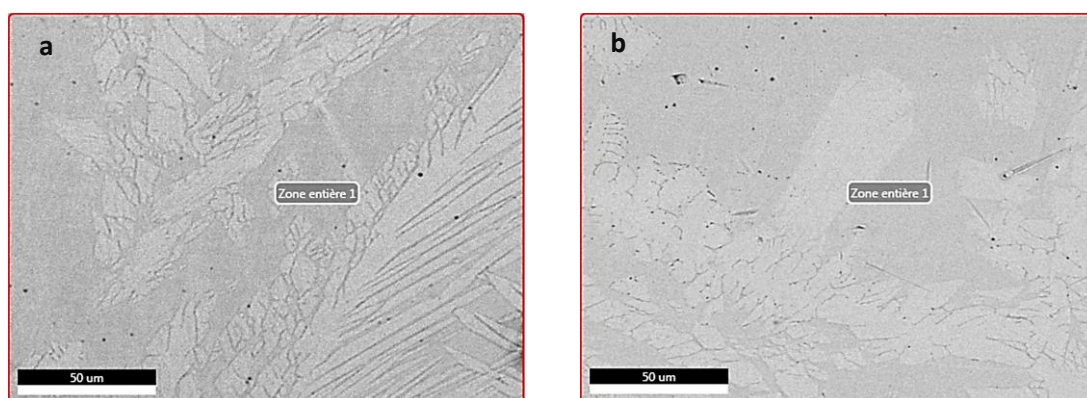
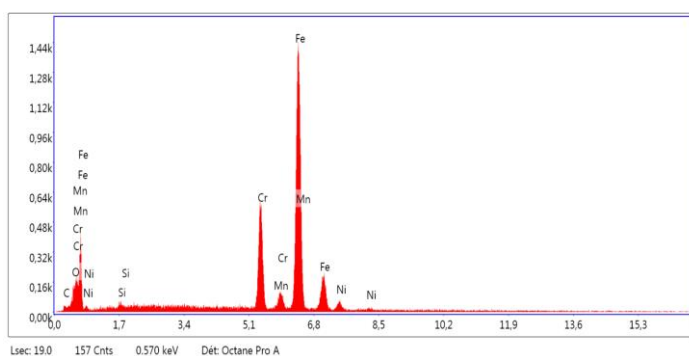


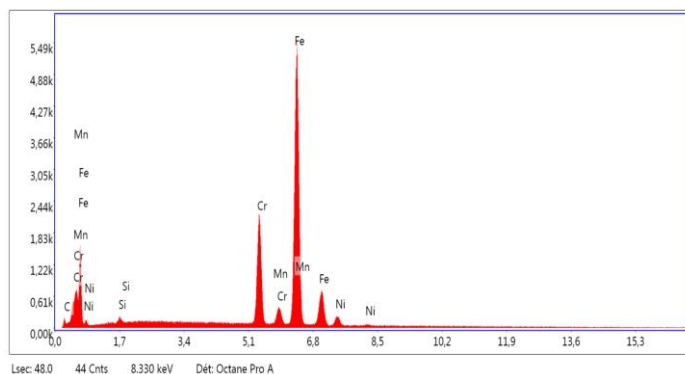
Fig.VI. 35 Résultat obtenu par EDS de l'échantillon soudé avec métal d'apport 309 pour la zone fondue (a) courant continu (b) courant pulsé



Elément	% de masse	% Atomique
C K	33.35	13.18
Si K	0.50	0.84
Cr K	17.75	16.15
Mn K	1.31	1.13
Fe K	72.23	61.20
Ni K	3.20	2.58

Fig.VI. 36 spectre d'analyse de la zone fondue de l'échantillon soudé avec métal d'apport 309

Elément	% de masse	% Atomique
C K	4.96	19.26
Si K	0.51	0.84
Cr K	17.56	15.83



Mn K	1.53	1.30
Fe K	71.84	59.96
Ni K	3.51	2.79

Fig.VI. 37 spectre d'analyse de la zone fondue de l'échantillon soudé avec métal d'apport 309 par la technique EDS (courant pulsé)

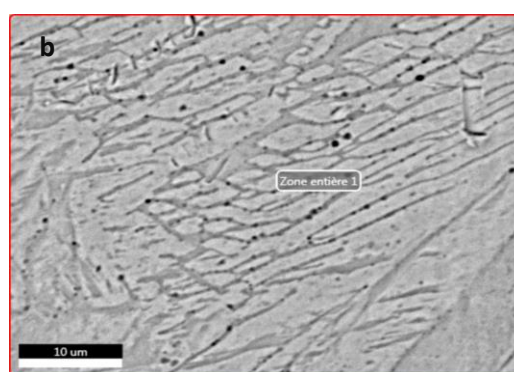
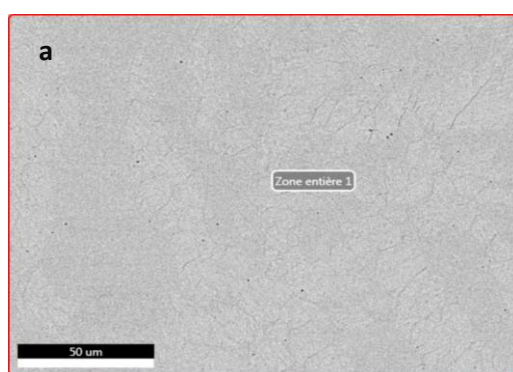
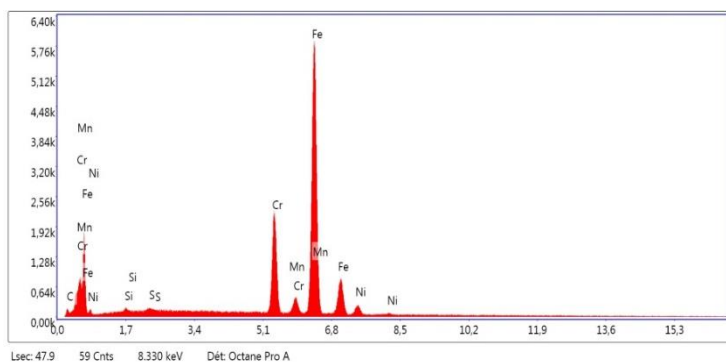


Fig.VI. 38 Résultat obtenu par EDS de échantillons soudés avec métal d'apport 316 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé



Elément	% de masse	% Atomique
C K	4.08	16.29
S K	0.26	0.38
Cr K	16.80	15.51
Mn K	1.18	1.03
Fe K	73.85	63.45
Ni K	0.26	0.38

Fig.VI. 39 spectre d'analyse de la zone fondue de l'échantillon soudé avec métal d'apport 316 par la technique EDS (courant continu)

Elément	% de masse	% Atomique
C K	14.66	14.66
S K	0.61	0.51
Cr K	9.98	5.12
Mn K	0.13	0.06
Fe K	47.11	22.51

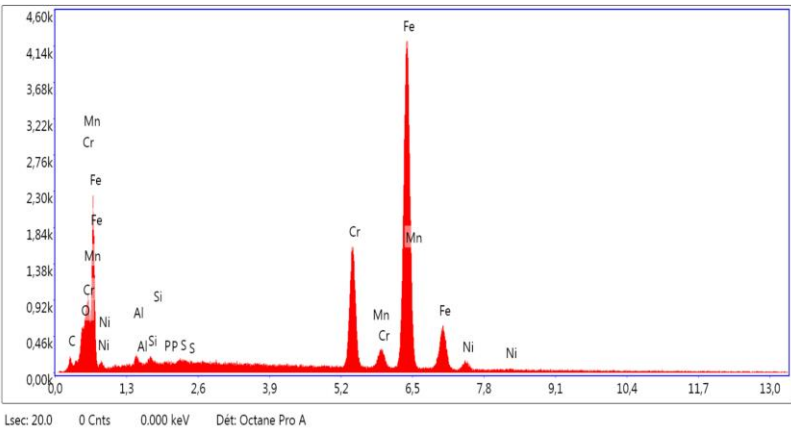


Fig.VI. 40 spectre d’analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d’apport 316par la technique EDS (courant pulsé)

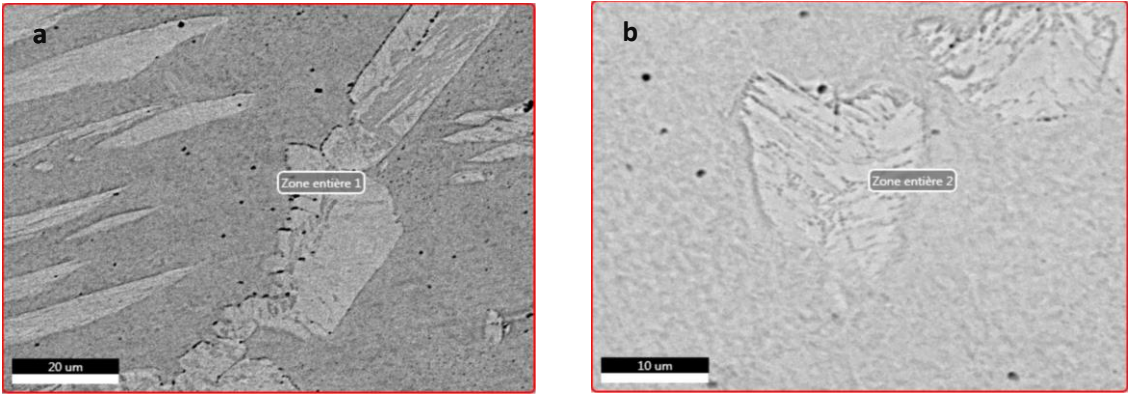
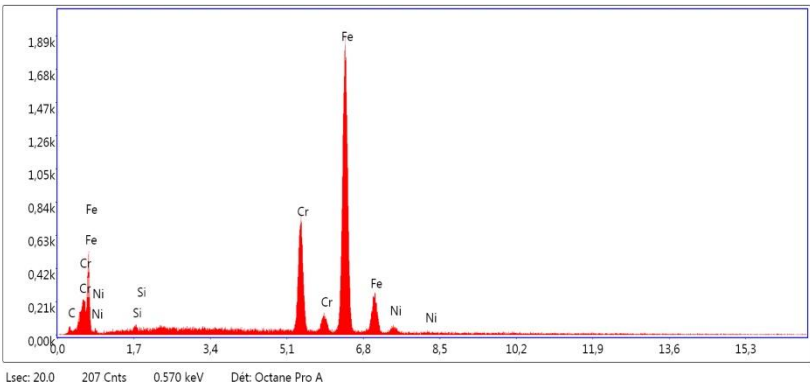


Fig.VI. 41 Résultat obtenue par EDS de échantillons soudés avec métal d’apport 2209 pour la zone fondue (a) courant continue (b) courant pulsé



Elément	% de masse	% Atomique
C K	4.37	17.30
Si K	0.37	0.63
Cr K	17.87	16.33
Mn K	1.53	1.30
Fe K	75.84	63.96
Ni K	2.21	1.78

Fig.VI. 42 spectre d’analyse de la zone fondue de léchantillons soudés avec métal d’apport 316par la technique EDS (courant continu)

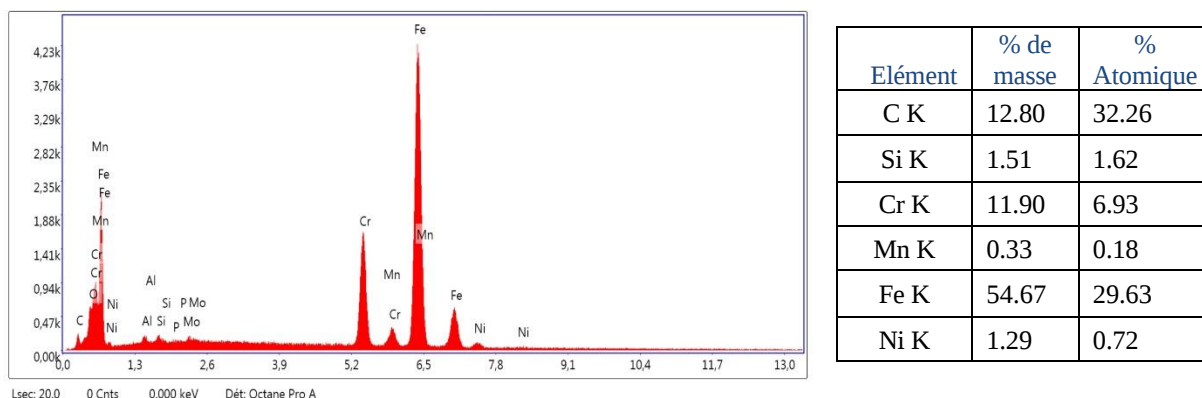


Fig.VI. 43 spectre d'analyse de la zone fondue de l'échantillon soudé avec métal d'apport 2209 par la technique EDS (courant puse)

VI.4. Caractérisation mécanique

VI.4.1 Essai de micro-dureté

Pour apprécier les effets du cycle thermique de soudage ainsi que, les variations structurales et leurs conséquences sur les propriétés mécaniques nous avons procédé aux mesures de micro-duretés avec une charge de 100 gf. et un balayage tout au long de la pièce soudée (en commençant par le métal de base à la zone fondue en arrivant à l'autre extrémité du métal de base) avec un pas de 500 μ m selon les abscisses et les ordonnées pour les soudures (Figure IV.42). Les profils de la micro-dureté de la zone de liaison des échantillons soudés avec des paramètres variables sont présentés sur la figure.

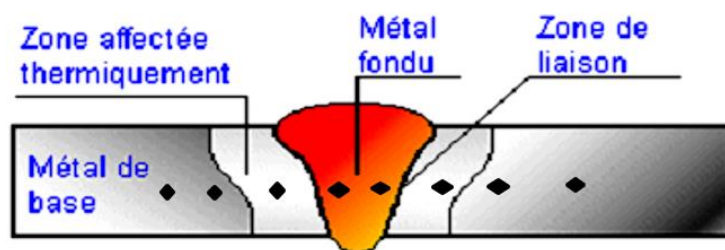


Fig.VI. 44 Schéma du balayage de la micro-dureté

a. Soudures homogènes

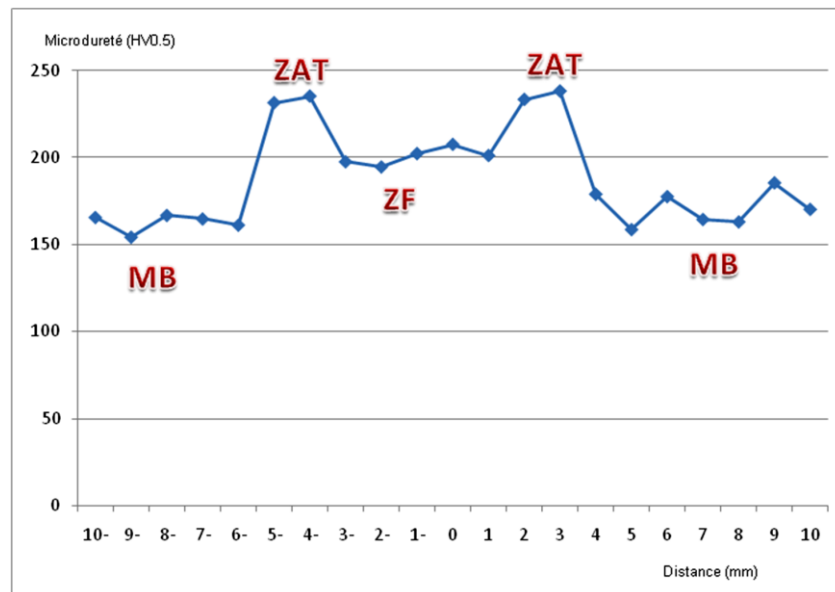


Fig.VI. 45 Profile de la microdureté de la zone de liaison (Soudures homogènes).

b. Soudures hétérogènes

- Courant continu

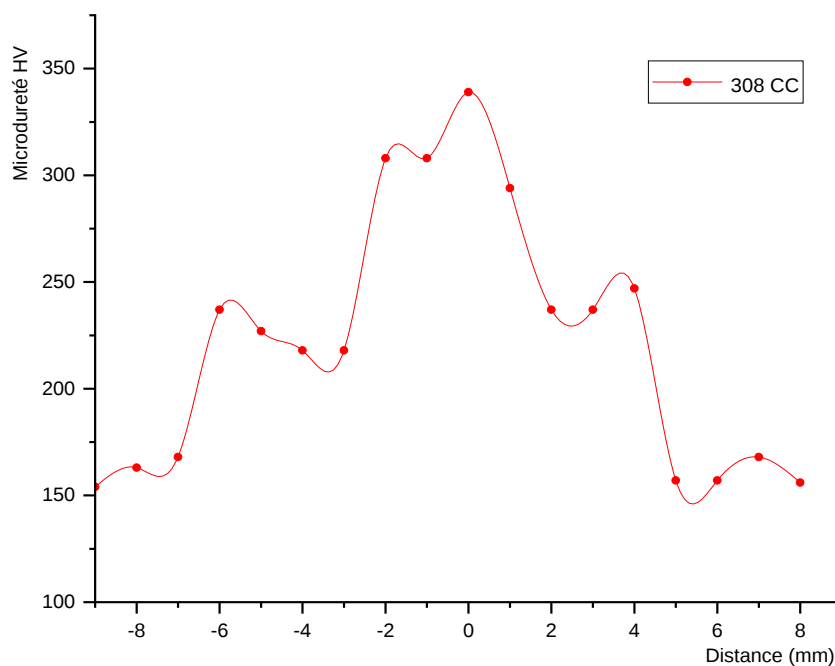


Fig.VI. 46 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).

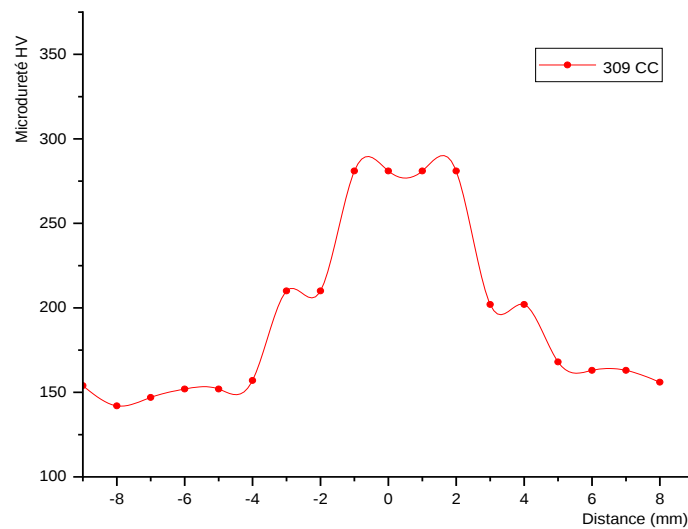


Fig.VI. 47 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).

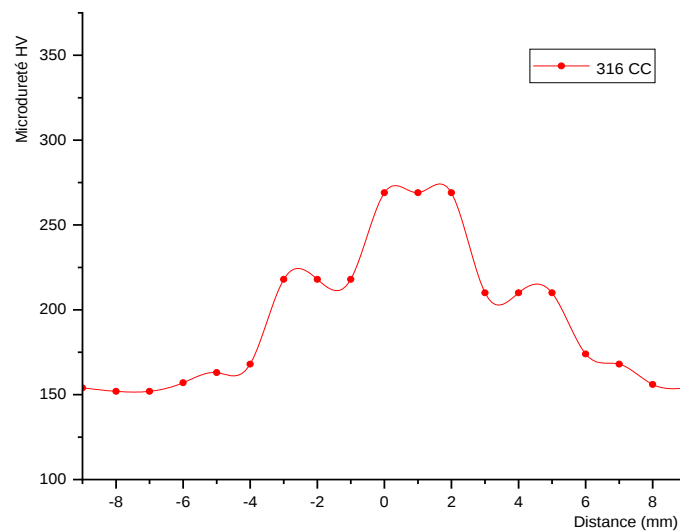


Fig.VI. 48 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).

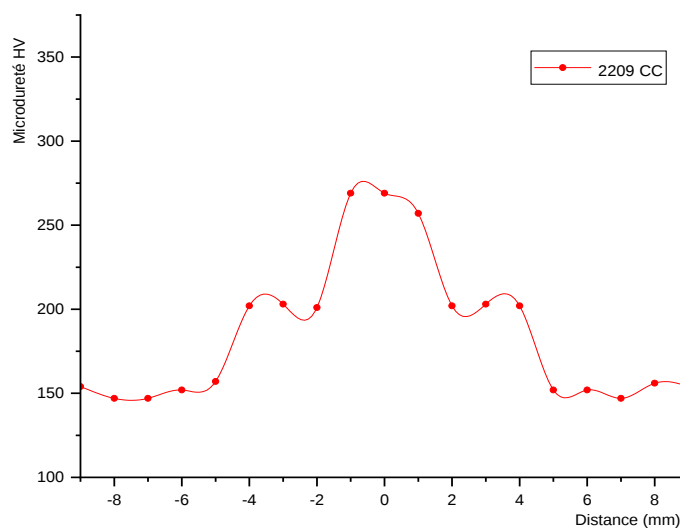


Fig.VI. 49 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénito-ferritique 2209).

- Courant pulsé

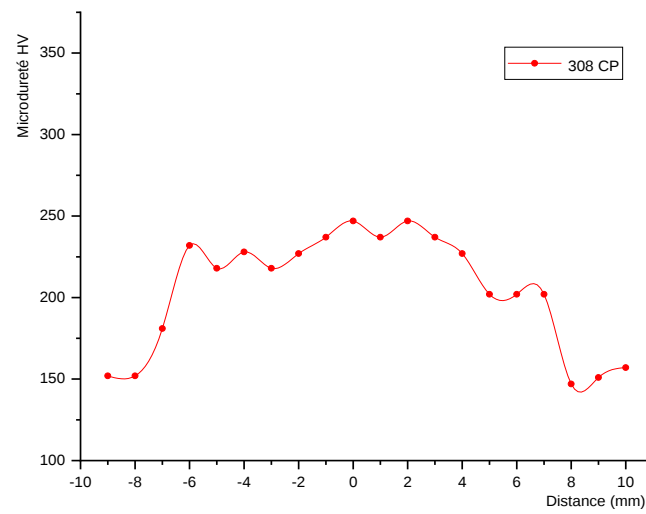


Fig.VI. 50 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).

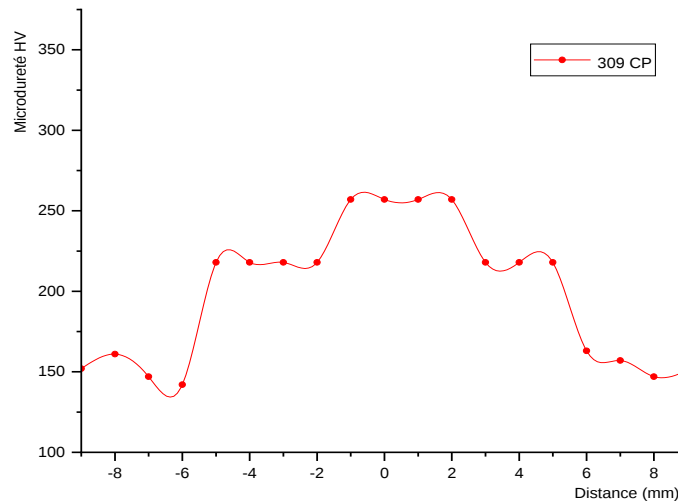


Fig.VI. 51 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).

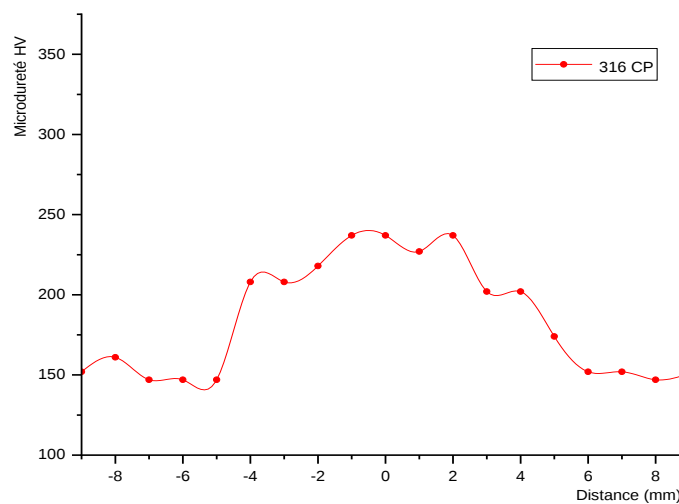


Fig.VI. 52 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).

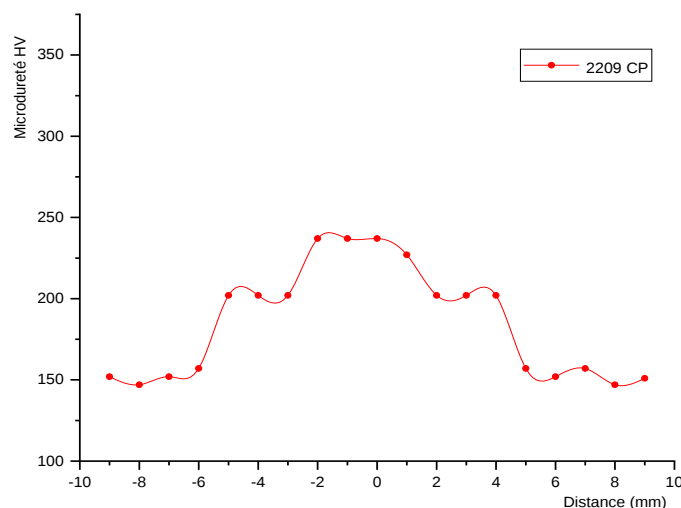


Fig.VI. 53 La microdureté de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénite-ferritique 2209).

Les effets du soudage sur les différentes régions zones de soudures offrent une approche fiable pour comprendre les propriétés mécaniques de ces zones spécifiques.

Le métal de base : Cette région n'est pas directement affectée par le soudage. Sa dureté se rapproche de celle du matériau d'origine avant le soudage (acier inoxydable ferritique). Le profil de microdureté montre une stabilité et une cohérence de la dureté dans cette zone, avec des valeurs comprises entre 150 et 170 HV. Ces résultats sont en accord avec la littérature.

La zone fondue (ZF) : Cette zone correspond à la partie fondue lors du processus de soudage. Elle se caractérise par une dureté supérieure aux autres zones en raison de la solidification rapide du métal. Le profil de microdureté révèle une augmentation de la dureté dans la zone fondue, avec des valeurs allant de 200 à 300 HV. La formation de structures cristallines plus régulières réduit les contraintes internes, entraînant une diminution de la microdureté. Le refroidissement lent de la zone fondue favorise une croissance des grains plus importante dans la microstructure.

La zone affectée thermiquement (ZAT) : La ZAT est la région adjacente à la ZF qui a subi une augmentation de température, bien que moins importante. Les changements microstructuraux et de dureté peuvent être moins prononcés que dans la ZF, mais des variations de dureté sont observées. On constate une nette augmentation de la dureté au niveau de la ZAT en raison de la possible transformation de l'austénite en martensite lors d'un refroidissement rapide des aciers inoxydables. La formation de martensite intergranulaire et la croissance des grains de ferrite contribuent à cette augmentation de dureté.

Lors d'un refroidissement rapide, notamment pendant le soudage, des transformations de phase peuvent se produire. Ce refroidissement rapide réduit également la taille des grains, ce qui peut augmenter la dureté. Les valeurs de dureté dans la ZAT varient entre 200 et 300 HV, en accord avec la littérature existante.

VI.4.2. Essais de traction

Influence du métal d'apport sur la résistance à la traction (TIG continue)

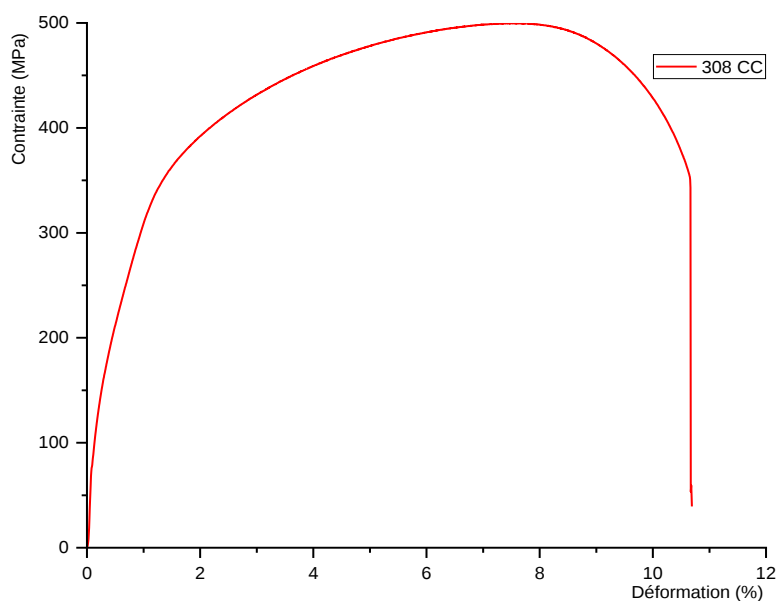


Fig. VI. 54 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).

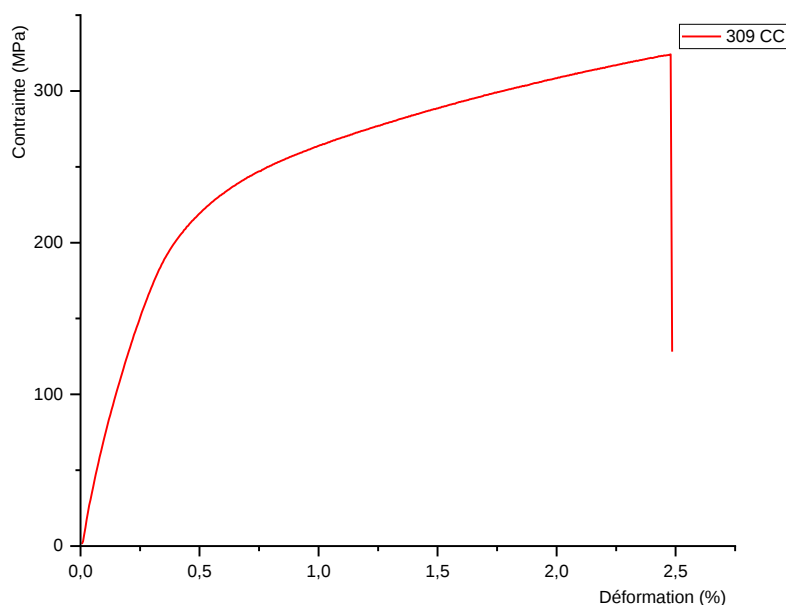


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-1. La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).

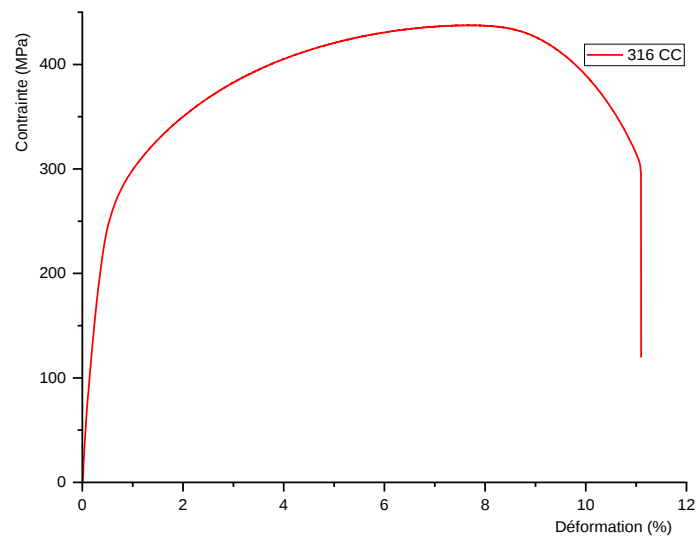


Fig.VI. 55 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).

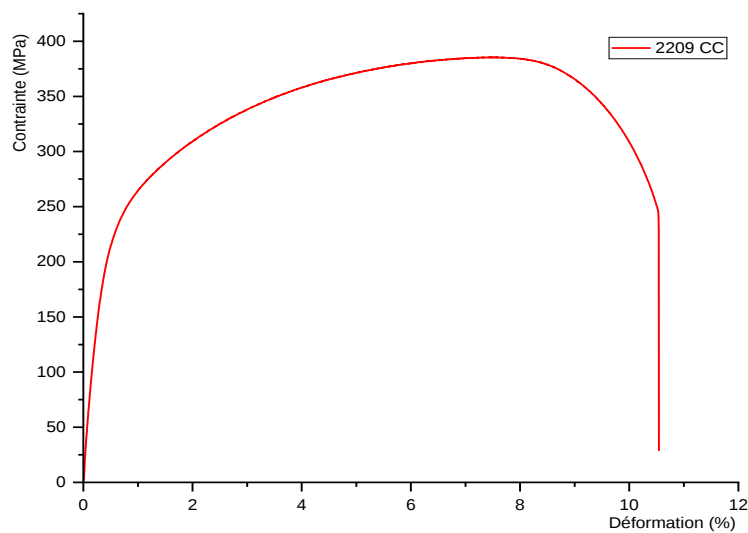


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-2. La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austenito-ferritique 2209).

Influence du métal d'apport sur la résistance à la traction (TIG Pulsé)

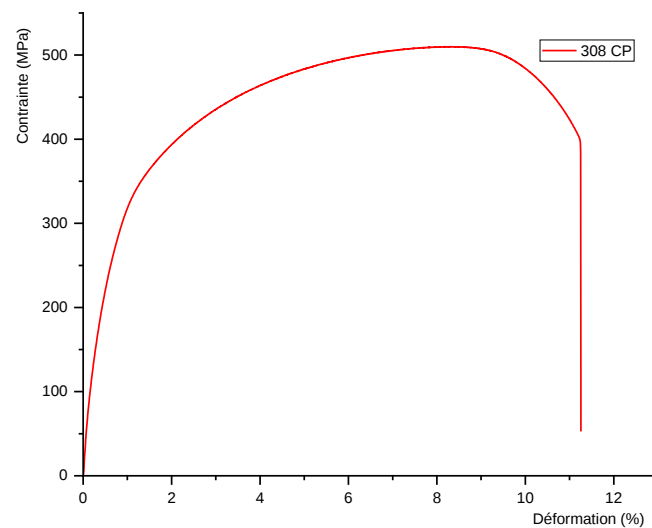


Fig.VI. 56 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 308).

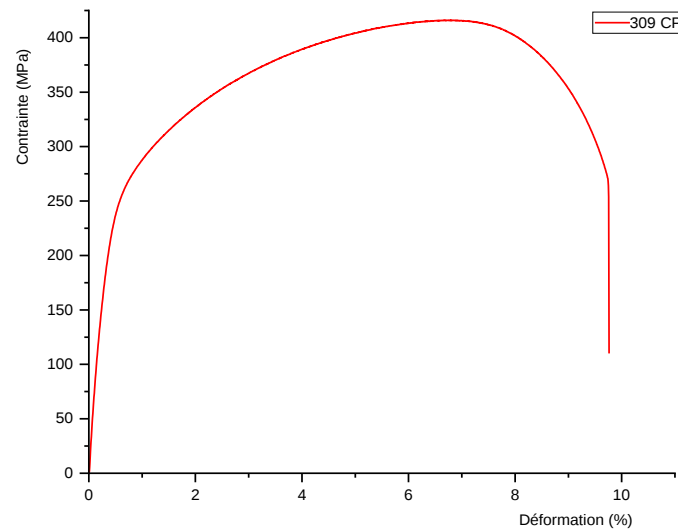


Fig.VI. 57 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 309).

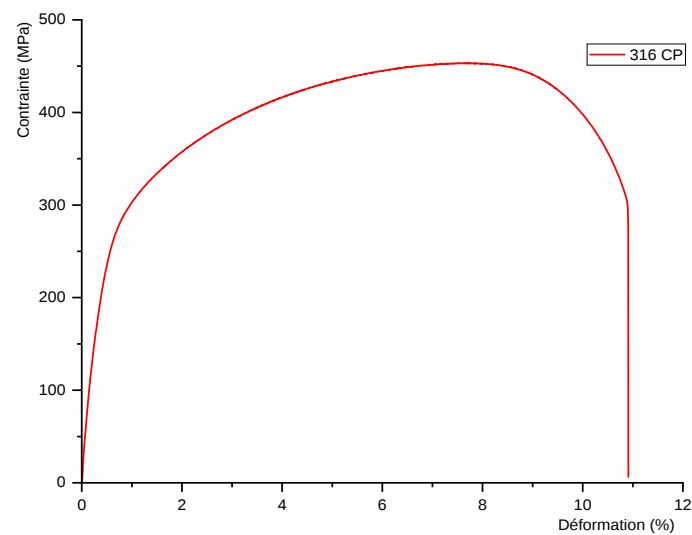


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document.-3. La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austénitique 316).

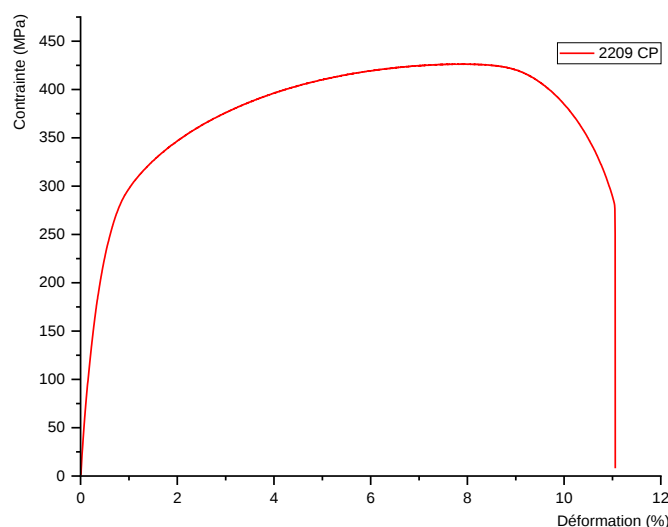


Fig.VI. 58 La courbe de traction de la zone de liaison des soudures hétérogène (métal de base ferritique (AISI 430) avec un métal d'apport austenito-ferritique 2209).

Les courbes généralement observées montrent une rupture ductile dans le diagramme contrainte-déformation. Le matériau subit une décomposition progressive, avec l'apparition possible d'une fissure stable à l'intérieur. Les dommages peuvent être répandus et relativement importants. Au début, la déformation est élastique, ce qui se traduit par une courbe de traction linéaire. La pente de cette droite représente le module de Young E . À partir d'un certain allongement, la courbe commence à fléchir, indiquant le début de la déformation plastique. La transition peut être nette, marquant un changement de pente et permettant une détermination facile de la limite d'élasticité R_e . La courbe de traction atteint ensuite un maximum correspondant à la contrainte de rupture conventionnelle en traction R_m . Au-delà de ce point, la déformation est concentrée dans une zone appelée la striction, et la rupture se produit dans cette zone, à une contrainte nettement supérieure à la valeur conventionnelle. Les essais de traction monotone montrent généralement une bonne résistance mécanique. Il est important de noter que la rupture lors des essais de traction se produit en dehors du cordon de soudure, ce qui témoigne de la qualité de la soudure réalisée.

En outre, les figures (VI.23) correspondant à l'échantillon soudé avec un métal d'apport 309 et au procédé TIG continu, présentent une rupture fragile. On observe un allongement beaucoup plus faible par rapport à l'autre échantillon soudé avec le même métal d'apport mais avec un courant pulsé, mettant en évidence l'influence des paramètres de soudage et du métal d'apport sur les propriétés mécaniques du matériau.

VI.4.2.1. Résultats de la caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB) [examen des faciès de rupture]

Les échantillons sollicités en traction ont été analysés à l'aide d'un microscope électronique à balayage au laboratoire de l'ENSMM pour examiner leurs faciès de rupture. Les figures ci-dessous illustrent les divers types de ruptures observées lors des essais.

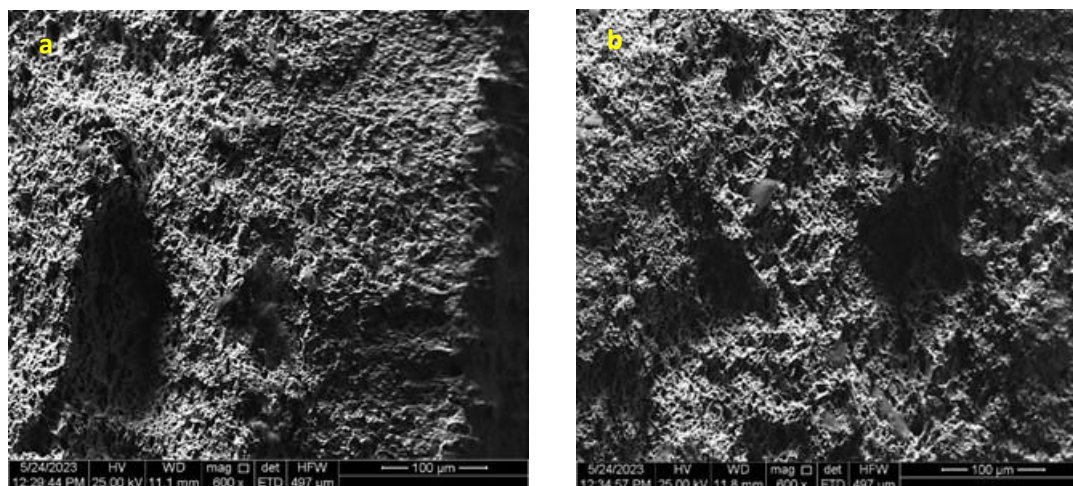


Fig.VI. 59 Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 308. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé

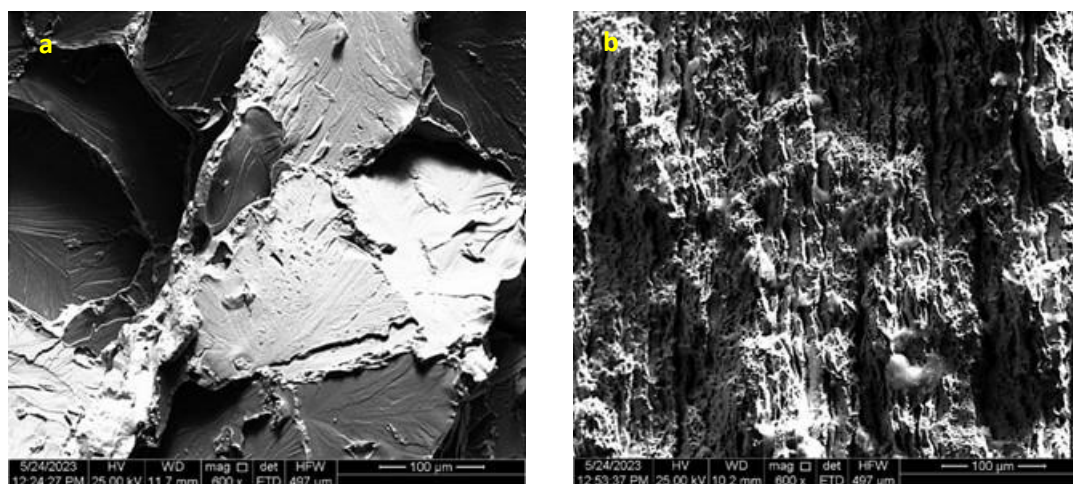


Figure VI.61. Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 309. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé.

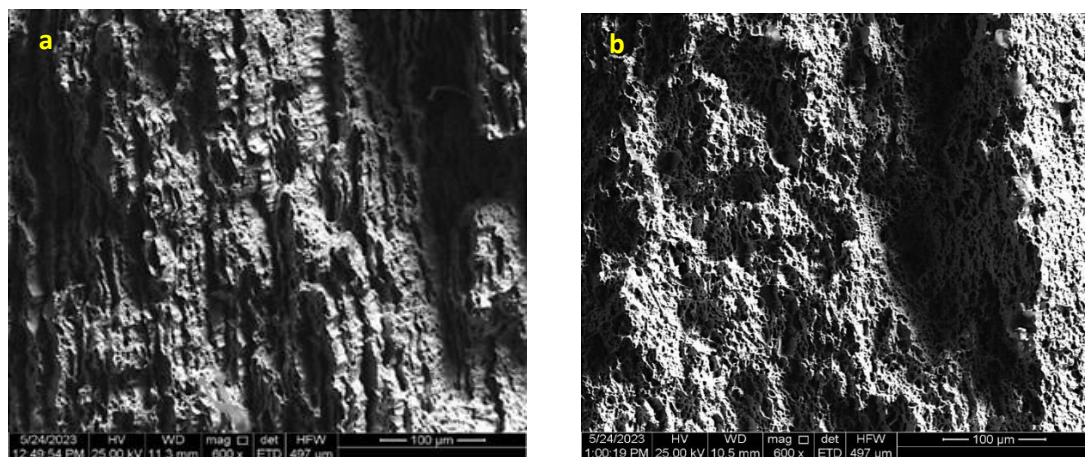


Fig.VI. 60 Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 316. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé

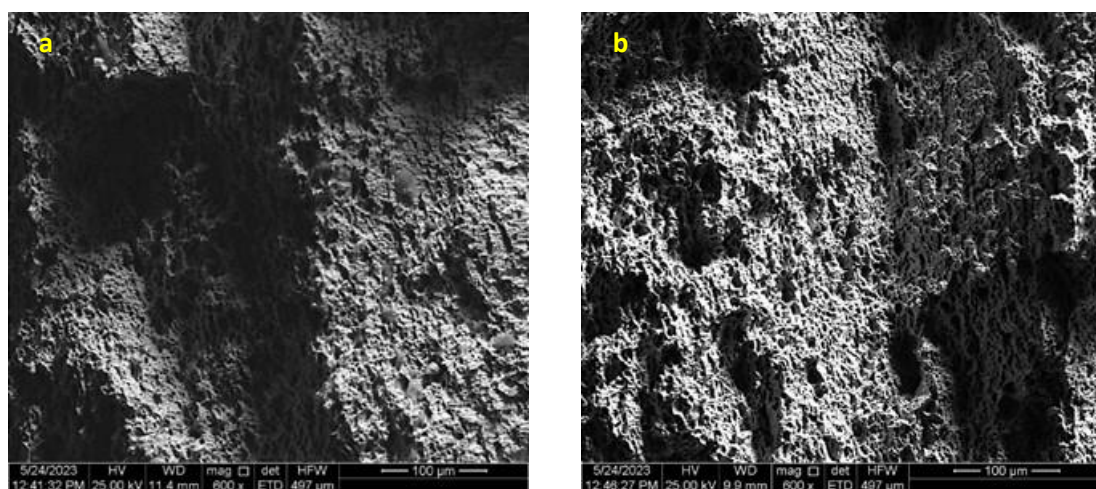


Fig.VI. 61 Fractographie d'échantillons soudé avec métal d'apport 2209. (a) avec courant continue et (b) avec courant pulsé

Lors de l'analyse des faciès de rupture, tous les échantillons, à l'exception de celui soudé avec le métal d'apport 309 et par le procédé de soudage TIG continu, présentent des caractéristiques distinctives. Les images révèlent une surface rugueuse qui occupe la majeure partie de l'échantillon. Cette rugosité témoigne d'une déformation plastique significative qui s'est produite avant la rupture. De plus, des cupules sont clairement visibles, correspondant à des cavités résultant de l'arrachement de matière. La présence de ces cupules confirme le phénomène de déformation plastique à une échelle macroscopique. Ces observations indiquent sans équivoque que la rupture est de nature ductile, où le matériau a subi une déformation plastique importante avant de se rompre. Ces résultats sont cohérents avec les précédentes courbes de traction. Il est important de noter que la rupture des échantillons se produit au niveau du métal de base, ce qui confirme la mauvaise qualité du cordon de soudure.

L'échantillon soudé avec le métal d'apport 309 et par le procédé de soudage TIG continu présente une rupture de nature fragile-plastique. La majeure partie de sa surface présente une coloration prédominante grise, tandis que l'absence significative de cupules témoigne d'une rupture transgranulaire fragile-plastique, se produisant à travers les joints de grains de la structure, caractérisée par des grains de petite taille. Ces résultats sont en accord avec la courbe de traction précédemment obtenue pour cet échantillon. Il est essentiel de noter que la rupture de l'échantillon se produit au niveau de la zone affectée thermiquement, qui présente une microstructure composée d'une matrice ferritique avec de la martensite intergranulaire. Cette composition confère à l'assemblage une sensibilité à la rupture fragile.

Conclusion générale

Cette étude contribue à l'ensemble des recherches en cours sur la soudabilité de l'acier inoxydable ferritique AISI 430. Elle se distingue en examinant de manière approfondie les aspects opérationnels et métallurgiques liés à ce sujet. Son objectif primordial était de proposer une solution innovante aux problèmes rencontrés lors du processus de soudage des aciers ferritiques de la nuance AISI 430, en particulier en ce qui concerne la croissance excessive des grains de ferrite à des températures élevées et la formation de martensite intergranulaire.

Cette étude vise à identifier les paramètres de soudage optimaux et le choix approprié du métal d'apport pour l'acier ferritique AISI 430. Divers métaux d'apport ont été évalués, notamment des métaux d'apport austénitiques tels que les types 308, 309 et 316, ainsi qu'un métal d'apport à la fois austénitique et ferritique de type 2209. L'objectif est de déterminer le métal d'apport le plus adapté pour obtenir des soudures de haute qualité sur l'acier ferritique AISI 430.

Sur le plan opérationnel, cette étude s'est concentrée sur les défis du soudage de faibles épaisseurs tout en assurant une pénétration satisfaisante, élément clé d'une opération de soudage réussie. Grâce à une sélection méticuleuse des paramètres de soudage, nous avons réussi à maintenir une continuité métallique constante.

Après une analyse approfondie des résultats obtenus et une interprétation minutieuse des diverses observations significatives réalisées au cours de cette étude, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats mettent en évidence l'importance du choix du métal d'apport sur la microstructure de solidification ainsi que sur les propriétés mécaniques des soudures. Il est clairement établi que l'utilisation d'un métal d'apport austénitique de type 308 conduit à des propriétés mécaniques supérieures. Ces résultats soulignent l'importance de sélectionner avec soin le métal d'apport approprié pour garantir des soudures de haute qualité.
- Les paramètres de soudage exercent une influence significative sur la microstructure de solidification ainsi que sur les propriétés mécaniques des joints de soudure. Les résultats obtenus mettent en évidence que l'utilisation du procédé de soudage TIG pulsé à basse fréquence se traduit par une amélioration notable des propriétés mécaniques. Cette constatation souligne l'importance de choisir et d'optimiser les paramètres de soudage pour obtenir des soudures présentant des caractéristiques mécaniques supérieures.

- Il est possible de restreindre la croissance des grains dans les soudures réalisées par le procédé TIG en accélérant le cycle thermique et en utilisant une énergie réduite pendant le soudage. Cette approche permet de maintenir une taille de grain plus fine dans les soudures continues. En contrôlant attentivement les paramètres thermiques, il est ainsi possible de prévenir ou de limiter le grossissement excessif des grains, ce qui contribue à améliorer la qualité des soudures obtenues par le procédé TIG.

Après avoir mené cette étude approfondie, nous formulons les recommandations suivantes pour le soudage de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 :

- Contrôler l'énergie apportée : Il est recommandé de limiter la quantité d'énergie utilisée pendant le processus de soudage afin de réduire autant que possible le grossissement des grains.
- Utiliser le procédé de soudage TIG pulsé à basse fréquence : L'utilisation du procédé de soudage TIG pulsé avec des basses fréquences est recommandée pour améliorer les résultats du soudage et obtenir des soudures de meilleure qualité.
- Utiliser un métal d'apport austénitique de type 308 : Il est préconisé d'utiliser un métal d'apport de type 308 de nature austénitique, car il offre de meilleures propriétés mécaniques dans les soudures.
- Éviter l'apport d'azote lors du soudage : Pour éviter la formation de martensite et préserver la ductilité du métal fondu, il est recommandé d'éviter tout apport d'azote pendant le processus de soudage. L'utilisation d'argon pur comme gaz de protection est recommandée, tandis que l'argon industriel doit être évité.

En suivant ces recommandations, il sera possible de minimiser le grossissement des grains, d'améliorer la qualité des soudures et de maintenir les propriétés mécaniques optimales de l'acier inoxydable ferritique AISI 430.

Références bibliographiques :

Chapitre 01

- [1] M4540 Aciers inoxydables Critères de choix et structure par Pierre-Jean CUNAT Directeur technique EURO-INOX
- [02] Guy. DAVID. Les aciers inoxydables. Techniques et documentations Lavoisier, Les éditions de physique, 1990
- [03] Mast Jack mars 14, 2015 par Technique Grément
- [04] Quentin AUZOUX, thèse doctoral, « Fissuration en relaxation des aciers inoxydables austénitiques - influence de l'écrouissage sur l'endommagement intergranulaire », l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris Spécialité "Sciences et Génie des Matériaux", 2004
- [05] M. McGUIRE. "Stainless Steels For Design Engineers". ASM International. (2008)
- [06] LACOMBE P., BAROUX B., BERANGER G, Les aciers inoxydables, Les éditions de Physique, 1990
- [07] Michel Colombie et coll, « matériaux métalliques », 2e édition, 2008 Michel Dupeux
- [08] THE IRON AND STEEL SOCIETY. "Steel products manual: Stainless Steels". (1999)
- [09] G. MURRY. "Aciers : généralités". Techniques de l'ingénieur, fasc M300, (Octobre 1993)
- [10] Michel Dupeux. « aide-mémoire sciences des matériaux », édition Dunod, 2005
- [11] J. Barralis, G. Mader. Précis de Métallurgie, élaboration, structures- propriétés et normalisation.
- [12] L. J. Swartzendruber, "The Fe-Ni (Iron-Nickel) System," Journal of Phase Equilibria, vol. 12, no. 3, pp. 288-312, 1991
- [13] <https://forums.futura-sciences.com>
- [14] C. Pierre-Jean, Acier inoxydable, Critère de choix et structure, In : Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques, Vol, MB4, dossier M4540, Paris (2000).
- [15] A. VALLINI « Joints soudés, contrôle, métallurgie, résistance »

- [16] P. J. CUNAT. Aciers inoxydables : Critères de choix et structure. Techniques de l'Ingénieur. M4540. Traité Des Matériaux. 2003
- [17] R. N. GUNN. Duplex Stainles Steels. 2000
- [18] Guy. DAVID. Les aciers inoxydables. Techniques et documentations-Lavoisier, Les éditions de physique, 1990
- [19]
https://www.researchgate.net/publication/330383386_Different_Types_and_New_Applications_of_Stainless_Steel
- [20]
https://www.researchgate.net/publication/330383386_Different_Types_and_New_Applications_of_Stainless_Steel
- [21] M. Colombie et coll. "Matériaux Métalliques". Dunod. Paris. (2000).
- [22] P. Lacombe, G. Beranger. « Conséquences sur les traitements thermiques », dans les aciers inoxydables, Editions de physique, les Ulis, 1990.
- [23] Boutaghane.A « Contribution à l'évaluation du champ thermique relatif à l'arc électrique de soudage »
- [24] ASCE/SEI. Specification for the Design of Cold-Formed Stainless Steel Structural Members, ASCE/SEI 8-02 ; 2002
- [25] AS/NZS 4673. Australian/New Zealand Standard : Cold-formed stainless steel structures. Sydney Australia ; 2001
- [26] EN 1993-1-4. Eurocode 3. Design of steel structures: Part 1-4: General rules — Supplementary rules for stainless steels. CEN ; 2006.
- [27] EN 1993-1-2. Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1-2: General rules — Structural fire design. CEN; 2005
- [28] EN 1993-1-8. Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints. CEN ; 2005
- [29] EN 1993-1-9. Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1-9 : Fatigue. CEN ; 2005
- [30] EN 1993-1-9. Eurocode 3. Design of steel structures, Part 1-9 : Fatigue. CEN ; 2005

[31] Structural Applications of Ferritic Stainless Steels (SAFSS). Research Fund for Coal and Steel Final Report, 2014 (to be published). Downloadable from www.steelstainless.org/ferritics (from April 2014)

[32] Article internet « Les techniques de soudage à l'arc des aciers »

[33] [A.Tahar encadré par Mr.MERAKEB « mémoire de fin d'étude sur la structure d'aciers inoxydables 18-10 élaboré par arc électrique »

Chapitre 02

[01] R. BLONDEAU PROCEDES ET APPLICATIONS INDUSTRIELLES DU SOUDAGE, PARIS, HERMES SCIENCE PUBLICATIONS (2001).

[02] S. zohir Influence de la vitesse de refroidissement sur les transformations structurales d'un acier inoxydable austénitique (304L) traité à hautes températures, ENSP (2006).

[03] Damien BOREL : Etude numérique et expérimentale des transferts thermiques dans un plasma d'arc.

[04] K.H.LO,C.H.shek,J.K.L.Lai : Recent developpement instainless steels,Materials science and engeneering R65 (2009)

[05] Ouvrage mécano soudage, conception (livre I-Rappels sur les procédés de soudage

[06] Guy David. "Les Aciers Inoxydables" (1990)

[07] Klas Weman. "Aide-mémoire. Procédés de soudage". Edition DUNOD. (2003)

[08] A. Chehaïbou, Soudage laser : les bénéfices des procédés hybrides, Soudage et techniques connexes (2004) P33-38.

[09] Roland CAZES, Soudage à l'arc. Techniques de l'Ingénieur. B7730.

[10] Barralis.J, Maeder.G. "Précis de métallurgie". Edition NATHAN. (1995)

[11] Soudage et soudabilité métallurgique des métaux. Auteur : Guy MURRY. Techniques de l'ingénieur M715 année 2008.

[12] Maecker H: Plasma tromungen in lichtbogen in folge eigenmagnetishcketKompression Zeitschrift fur physik, 1955, vol 141, pp198.

[13] Mechev V.S: Magnétic fields set up by current flow through electrodes, Svar-Proiz 1969.

Chapiter 03

[01] L. Rodrigue, Étude d'alliages granulaires Cu-Fe-Co, corrélation microstructure, comportements magnétiques propriétés magnéto-résistives, thèse doctorat, université de Rouen 2005

[02] Michael F. Ashby et David R. H. Jones-matériaux ,propriétés et applications-Edition DUNDO ,paris (1998)pages(115-117)