

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابه

Faculté des Sciences de l'ingéniorat

Département de Métallurgie et Génie des Matériaux

Année : 2016/2017

Thèse en vue de l'obtention d'un Diplôme de Doctorat 3ème Cycle (LMD)

Thème

**Influence du flux de soudage sur la qualité de la
soudure des Pipelines**

Option

Métallurgie et Génie des matériaux

Présentée par

KHAMOULI Farida

Soutenue publiquement le : 10/07/2017

DIRECTEUR DE THESE

Mr. ATOUI L'hadi

Professeur

Université Badji Mokhtar-Annaba

CO-DIRECTEUR DE THESE

Mr. ZIDANI Mosbah

Professeur

Université Mohamed Khider- Biskra

DEVANT LE JURY

PRESIDENT

Mr. BOUDEBENE Said

Professeur

Université Badji Mokhtar-Annaba

EXAMINATEURS

Mr. HADJI Ali

Professeur

Université Badji Mokhtar-Annaba

Mr. MIROUD Djamel

Professeur

Université UST Houari Boumediene-Alger

Sommaire

<u>Tableau de matière</u>	
Remerciements.....	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	vii
Liste des symboles	x
Introduction générale	01
<u>Chapitre I : Etude Bibliographique :</u>	
A.I.1. Soudage des aciers à faible teneur en carbone	3
I.1. Introduction.....	3
I.1.1.Transport par pipelines.....	4
I.1.2. Laminage des pipelines.....	5
I.1.2.1.Les aciers utilisés pour fabriquer les pipelines.....	5
I.1.2.2.Procédés de fabrication des tubes de pipelines.....	6
I.1.3.Procèdes et Aspects de soudage	6
I.1.4.La soudabilité.....	7
I.1.5.La soudabilité de l'acier.....	7
I.1.6.La trempabilité.....	8
I.1.7.Carbone équivalent.....	8
I.1.8.Phénomènes métallurgiques de soudage.....	9
I.1.9.Caractéristiques de la soudure	10
I.1.9.1.La zone de fusion.....	10
I.1.9.2.La zone affectée thermiquement	10
I.1.9.3.La zone liaison(Z.L)	10
I.1.9.4.Le métal de base (M.B)	10
I.1.10.Evaluation de la qualité d'une soudure.....	11
I.1.11.Evolution de la composition chimique	12
I.1.12.Aspects métallurgiques du soudage.....	13
I.1.12.1.Mécanisme de solidification pendant le soudage	13

I.1.12.2. Morphologie de la zone de fusion.....	15
I.1.12.3. Effet de la vitesse de refroidissement.....	16
I.1.13. Classification des microstructures des aciers soudés	17
I.1.13.1. Ferrite de Widmenstätten (FW)	19
I.1.13.2. Ferrite aciculaire (FA)	19
I.1.13.3. Bainite supérieure (BS)	20
I.1.13.4. Bainite inférieure (BI)	20
I.1.13.5. Martensite (M)	21
I.1.14. Procédé Soudage à l'arc manuel à l'électrode enrobée (SMAW).....	22
I.1.14.1. Principe du procédé	22
I.1.14.2. Avantages et inconvénients.....	24
B.I.2. Les rôles et les caractéristiques des flux de soudage	25
I.2. Introduction	25
I.2.1. Définition.....	25
✓ Le rôle métallurgique sur le cordon	25
✓ Les rôles mécaniques sur le bain de fusion	26
✓ Le rôle électrique sur l'arc.....	26
✓ Le rôle physique	26
I.2. 2. Caractéristiques des flux	27
I.2.3. Types d'enrobage (flux).....	27
I.2.4. Composants des enrobages (flux)	29
I.2.5. Caractéristiques des gaz protecteurs	31
I.2. 6. Applications de flux.....	33
I.3. Métaux d'apport.....	33
I.3.1. Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport.....	34
I.3.2. Normalisation des métaux d'apport	34
I.4. Caractéristiques du couple flux / l'électrode (enrobée)	35
I.4.1. Choix des électrodes	35
I.4.2. Classification des électrodes.....	36
I.4.2.1. Classification électrodes enrobées.....	36
I.4.4. Les différents types des électrodes enrobées	39

I.4.5. Exemples d'électrodes et de leur composition typique.....	40
Conclusion	42
<u>Chapitre II : Techniques et Méthodes de Caractérisations</u>	
Introduction.....	43
II.1. Le procédé de soudage à COSIDER.....	43
II.2. Type des flux.....	46
II.3. Identification du métal de base et métal d'apport.....	47
II.3.1. Métal de base	47
II.3.2. Métaux d'apports (les électrodes)	47
II.3.3. Condition de soudage.....	48
II.4. Préparation d'échantillons en poudre des flux et des laitiers.....	49
II.5. Spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX).....	50
II.6. Prélèvement de l'échantillon soudé.....	51
II.7. Spectrométrie par absorption atomique	54
II. 8. Microscope optique	55
II.9. Microscope optique à balayage MEB.....	56
II.10. Mesure de micro-dureté.....	57
II.11. Caractérisations structurales	58
II.11.1. Diffraction des rayons X	58
II.11.2 .Taille des grains	61
Conclusion	63
<u>Chapitre III : Influence des flux sur les joints soudés</u>	
Introduction	64
III.1. Composition chimique des flux, des laitiers et de la zone fondue par la spectrométrie FRX, absorption atomique et par l'EDAX	64
III.1.1. Composition chimique des flux et des laitiers par la spectrométrie FRX.....	64
III.1.2.Composition chimique de la zone fondue par l'absorption atomique...	71
III.1.3.Composition chimique des flux, des laitiers et de la zone fondue par l'EDAX.....	76

Sommaire

III.2. Etude métallographique du métal de base et métal d'apport des différentes électrodes par microscopie optique.....	83
III.3. Microstructure de la zone fondue(ZF) en première passe	85
III.4. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) en première passe.....	88
III.5. Microstructure de la zone fondue (ZF) en deuxième passe.....	89
III.6. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) en deuxième passe.....	91
III.7. Microstructure de la zone fondue (ZF) en troisième passe.....	91
III.8. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) en troisième passe.....	93
III.9. Microstructures du métal de base et les joints soudés en multi-passes par la microscopie électronique à balayage (MEB).....	94
III.10. Micro-dureté Vickers	98
III.10.1. Les mesures de micro-dureté :HV0.5	98
III.10.2. Profil de la micro-dureté Vickers	98
III.11. Analyses des phases pour les différents flux , laitiers , métal de base X42, métaux d'apports et de la zone fondue en multi-passes par diffraction des rayons X (DRX)	102
III.11.1. Analyses des phases des différents flux et laitiers par diffraction des rayons X (DRX)	102
III.11.2. Effet des phases cristallines et des éléments sur le comportement du flux et la formation du laitier.....	113
III.11.3. Analyses des phases formées entre le métal de base X42, métaux d'apports et de la zone fondue en multi-passes par diffraction des rayons X (DRX)	115
Conclusion	133
<u>Chapitre IV : Etude des joints soudés avec des électrodes sans flux</u>	
Introduction	135
IV.1. Composition chimique de la zone fondue par spectrométrie absorption atomique et par l'EDAX.....	135

Sommaire

IV.1.1. Composition chimique de la zone fondue déposée sans flux par absorption atomique	135
IV.1.2. Composition chimique de la zone fondue en multi-passes déposées sans flux (Em, En et Eo) par l'EDAX.....	137
IV.2. Microstructure de la zone fondue(ZF) déposée sans enrobage	142
IV.3. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) déposée sans flux	144
IV.4. Micro-dureté de la zone fondue déposée sans enrobage	147
IV.5. Analyses des phases des joints soudés par diffraction des rayons X (DRX).....	148
Conclusion	152
Conclusion générale	153
Références Bibliographiques	156

Remerciements

Je remercie mon Dieu, le tout Puissant, pour tout.

Mes remerciements les plus particuliers s'adressent à mon directeur de thèse monsieur **L'HADI ATOUI**, Professeur au Département de Métallurgie et Génie des Matériaux à l'université Badji Mokhtar-Annaba, d'avoir bien voulu assurer la direction de cette thèse, de me proposer ce sujet et de m'orienter pour réaliser ce travail.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à monsieur le professeur **ZIDANI MOSBAH**, co-directeur de thèse, Professeur au Département de Génie Mécanique à l'Université Mohamed Khider-Biskra, d'avoir bien voulu assurer la co-direction de cette thèse et qui m'orienter pour réaliser ce travail.

Je remercie Monsieur **SAID BOUDEBANE**, Professeur au Département de Métallurgie et Génie des Matériaux de la Faculté des Sciences de l'ingénieur de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, pour l'honneur qu'il m'a fait de bien vouloir accepter la présidence de ce jury.

Mes vifs remerciements à Monsieur **ALI HADJI**, Professeur au Département de Métallurgie et Génie des Matériaux de la Faculté des Sciences de l'ingénieur de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, qui a bien voulu accepter de faire partie du jury et d'examiner mon travail.

Mes vifs remerciements sont distingués aussi vers Monsieur **DJAMEL MIROUD**, Professeur au Département de Génie Mécanique et Génie des Procédés de l'Université UST Houari Boumediene-Alger, qui a bien voulu accepter de faire partie du jury et d'examiner mon travail.

Je remercie également tous les responsables de l'entreprise **COSIDER - BISKRA** pour leurs accueils, aides, et efforts pour la réalisation de ce sujet et en particulier l'équipe de l'atelier de soudage par SMAW qui ont effectués la totalité des prélèvements des échantillons au cours de la production.

Je remercie également tous les responsables de l'équipe de l'atelier du Département de Génie Mécanique, BISKRA pour leurs accueils, aides et efforts surtout les ingénieurs de l'atelier.

Je suis également très reconnaissante à Monsieur **GHASMI** ingénieur responsable du laboratoire des DRX et MEB de l'université Mohamed Khider –Biskra.

Je suis également très reconnaissante à Monsieur **SAMIR** ingénieur responsable du laboratoire de Métallurgie et Madame **SAIDA** ingénieur responsable du laboratoire de physique de l'université Mohamed Khider –Biskra.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire MEB et FRX, Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico- Chimiques (CRAPC) Bou-Ismaïl-Algérie, tout particulièrement Mr. **RACHID** et Mme. **BENSALAME**.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire de la société BCR, Ain El Kebira Sétif, tout particulièrement le chef personnel Mr. **RIAD**.

Je remercie également toute l'équipe du laboratoire **TREFISOUD** -EL EULMA, Sétif, tout particulièrement Mr. **SALEH**.

Je ne serais terminé sans remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont m'encouragé pour finir cette thèse, notamment Monsieur **ADEL SAOUDI**, chercheur dans le centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico- Chimiques (CRAPC), Mrs. **SALIM MESSAOUDI**, **CHEMS-EDDINE DERFOUF**, **YAZID MOSTEFA**, **HAKIM BAGAR** : Enseignants au Département de Génie Mécanique, Université de Biskra, Mesdames, **KELTHOUM DIGHECHE**, **NEDJEMA CHÉRIFI**, Enseignantes au Département de chimie industrielle, Université de Biskra, et Mesdemoiselles, **LAMIA**, **SAMIHA MERZAG**, **HIND MOUSSI** et **HANA MOUSSI** pour leurs précieuses aides et pour les riches discussions scientifiques sur les différents aspects de cette étude.

Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des Figures

Liste des Figures

<u>Chapitre I : Etude Bibliographique</u>		
Figure I.1.	Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion	10
Figure I.2.	Profil de la température réelle et la température d'équilibre du liquidus, effet du gradient de température G et le ΔT_c sur le mode de solidification des sous structures.	14
Figure I.3.	Schéma du gradient de température en fonction de la vitesse de solidification montre les modes de solidification possibles.	16
Figure I.4.	Micrographies optiques montrant plusieurs constituants microstructuraux trouvés dans les aciers soudés faiblement alliés et à faible pourcentage en carbone.	18
Figure I.5.	Microstructure typique de la ferrite aciculaire (α) dans un acier faiblement allié (0.06 % C, 0.51% Si, 1.11% Mn, 0.48% Cr), métal de soudure avec des additions minimales de Titane d'Oxygène et d'Aluminium.	19
Figure I.6.	Micrographie optique montrant la formation de bainite supérieur dans la région du grain colonnaire d'un acier soudé.	20
Figure I.7.	Micrographie MET montrant la formation de bainite inférieur dans le ZAT d'un acier faiblement allié e à faible pourcentage en carbone.	21
Figure I.8.	Soudage à l'arc avec électrodes Enrobées SMAW : Schéma de Principe.	22
Figure I.11.	Comparaison des électrodes et des fils-électrodes pour les procédés SMAW, GMAW, FCAW et MCAW.	33
Figure I.10.	Schéma d'une électrode enrobée.	35
<u>Chapitre II : Techniques et Méthodes de Caractérisations</u>		
Figure II.1.	Assemblages de deux tube d'acier X42 pour le procédé de soudage à l'arc avec des électrodes enrobées(SMAW).	44
Figure II.2.	Appareillage de soudage des pipelines au niveau de COSIDER.	45
Figure. II.3.	Enchaînement des passes de soudure.	46

Liste des Figures

Figure II.4.	Préparation d'un échantillon en poudre des Flux et des laitiers	49
Figure II.5.	Appareil de spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) de type Rigaku ZSX Primus II	51
Figure II.6.	Etapes de prélèvement du premier échantillon.	52
Figure II.7.	Echantillons de l'étude	53
Figure II.8.	Polisseuse PHOENIX ALPHA d'ANALIS	54
Figure II.9.	Spectrométrie (SPECTRO Analytical instrument)	55
Figure II.10.	Microscope optique de type (Olympus BX J1M).	56
Figure II.11.	Microscopie électronique à balayage (MEB et EDAX).	57
Figure II.12.	Microduromètre Wolprtt Wilson instruments	58
Figure II.13.	Points réellement considérés par la mesure de micro-dureté	58
Figure II.14.	Diffractomètre BRUKER D8 ADVANCE AXS (XRD).	59
Figure II.15.	Schéma le principe de travail du diffractomètre.	60
Figure II.16	Illustration d'un pic de diffraction.	62
<u>Chapitre III : Influence des flux sur les joints soudés</u>		
Figure III.1.	Histogrammes des pourcentages par (FRX) des oxydes des flux (FA , FB, FC) et des laitiers (LA, LB et LC)	68
Figure III.2.	Spectre par FRX du flux (FA, FB et FC)	69
Figure III.3.	Spectre par FRX du laitier (LA, LB et LC)	70
Figure III.4.	Histogrammes des concentrations massiques entre des différents flux (FA, FB et FC) et laitiers (LA, LB et LC).	79
Figure III.5.	Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans la zone fondue avec flux (FA) en passe (PA).	80
Figure III.6.	Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans la zone fondue en multi-passes avec les flux (P1 :E6010 et P2 , P3 :E8010-P1).	81
Figure III.7.	Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans de la zone fondue en multi-passe avec les flux (P1 :E6010 et P2 ,P3: E8018-G).	82
Figure III.8.	Microstructure de l'acier X42 (F : ferrite , P : perlite)	84
Figure III.9.	Microstructure optique du métal d'apport E6010	84

Liste des Figures

Figure III.10.	Microstructure optique du métal d'apport E8010-P1	84
Figure III.11.	Microstructure optique du métal d'apport E8018-G	85
Figure III.12.	Schéma de toutes les passes du joint soudé dans le procédé SMAW.	85
Figure III.13.	Macrographies en première passe de soudage (PA, PB, PC et PD).	86
Figure III.14.	Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZF en première passe (PA, PB, PC et PD).	87
Figure III.15.	Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZAT en première passe (PA, PB, PC et PD)	89
Figure III.16.	Macrographies en deuxième passe de soudage (PE et PF).	89
Figure III.17.	Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZF en deuxième passe (PE et PF).	90
Figure III.18.	Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZAT en deuxième passe (PE et PF).	91
Figure III.19.	Macrographies en troisième passe de soudage (PJ,PK et PL).	92
Figure III.20.	Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZF en troisièmes passes (PJ, PK et PL) .	92
Figure III.21.	Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZAT en troisièmes passes (PJ, PK et PL).	94
Figure III.22.	Microstructures MEB du métal de base(MB) et de la zone de fusion en multi-passes (première passe (PA ,PB,PC,PD) , deuxième passe (PE,PF) et troisième passe (PJ,PK,PL).	96
Figure III.23.	Microstructures MEB la ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3)	97
Figure III.24.	Profil de la micro-dureté Vickers (0.5) en premières passes (PA, PB, PC et PD).	99
Figure III.25.	Profil de la micro-dureté Vickers (0.5) dans de la zone fondue en multi-passe avec les flux (FA : E6010 et FB : E8010-P1).	99
Figure III.26.	Profil de la micro-dureté Vickers (0.5) dans de la zone fondue en multi-passe avec les flux (FA: E6010 et FB : E8018-G).	101
Figure III.27.	Diffractogrammes des flux (FA, FB, FC)	103
Figure III.28.	Diffractogrammes des laitiers (LA, LB et LC)	103

Liste des Figures

Figure III.29.	Diagramme de phase du système (Ti-O)	105
Figure III.30.	Diagramme de phase du système (Mn-O)	105
Figure III.31.	Diagramme de phase du système (Na ₂ O-SiO ₂ -Al ₂ O ₃)	106
Figure III.32.	Diagramme de phase du système (CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂)	107
Figure III.33.	Diagramme de phase du système (CaO-MnO-SiO ₂)	107
Figure III.34.	Diagramme de phase du système (SiO ₂ -Al ₂ O ₃)	108
Figure III.35.	Diagramme de phase du système (CaO- SiO ₂)	108
Figure III.36.	Diagramme de phase du système (CaO-MgO-SiO ₂)	109
Figure III.37.	Diagramme de phase du système (CaO-FeO-SiO ₂)	110
Figure III.38.	Diagramme de phase du système (MgO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃)	110
Figure III.39.	Comparaison par la diffraction des rayons X entre les flux (FA, FB et FC) et les laitiers (LA, LB et LC).	112
Figure III.40.	Superposition des diffractogrammes du métal de base X42 et des métaux d'apports (E6010, E8010-P1 et E8018-G).	115
Figure III.41.	Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la métal de base X42 et les métaux d'apports	117
Figure III.42.	Superposition des diffractogrammes, (a) dans les zones fondues (ZF) et (b) dans les zones affectées thermiquement (ZAT) en première passe (PA, PB, PC et PD).	118
Figure III.43.	Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en passe (PA, PB, PC et PD) avec les différents flux.	121
Figure III.44	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues (a), et les zones affectées thermiquement (b) en multi-passes (P1, P2, et P3) avec les flux (FA : E6010 et FB : E8010-P1).	122
Figure III.45	Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (FA: E6010 et FB : E8010-P1).	124
Figure III.46	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zone affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (FA : E6010 et FB : E8018-G).	125

Liste des Figures

Figure III.47	Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3), avec les flux (FA : E6010 et FC : E8018-G).	128
Figure III.48	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec le flux (E8018-G).	129
Figure III.49	Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3), avec le flux (E8018-G).	132
<u>Chapitre IV : Etude des joints soudés avec des électrodes sans flux</u>		
Figure IV.1.	Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans de la zone fondue avec l'électrode sans flux (P1 : E6010).	139
Figure IV.2.	Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans de la zone fondue en multi-passes avec les électrodes sans flux (P1 :E6010 et P2, P3 : E8010-P1).	140
Figure IV.3.	Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans de la zone fondue en multi-passes avec les 'électrodes sans flux (P1 :E6010 et P2, P3 :E8018-G).	141
Figure IV.4.	Macrographies des échantillons (Em, En, et Eo)	142
Figure IV.5.	Microstructure de la zone fondue (ZF) en passe (P1) sans flux (Em).	143
Figure IV.6.	Microstructure de la zone fondue (ZF) en multi-passes (P1, P2 et P3) sans flux (En).	143
Figure IV.7.	Microstructure de la zone fondue (ZF) en multi-passes (P1 , P2 et P3)sans flux (Eo)	144
Figure IV.8.	Microstructure de la ZAT obtenue sans flux (Em, En et Eo).	146
Figure IV.9.	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues (a) et les zones affectées thermiquement (b) obtenues sans flux (Em, En, et Eo).	148
Figure IV.10.	Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT avec les différentes électrodes sans flux (Em, En, et Eo).	151

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

<u>Chapitre I : Etude Bibliographique</u>		
Tableau I.1.	Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier	9
Tableau I.2.	Indicateur de la soudure	11
Tableau I.3.	Caractéristiques générales des flux	27
Tableau I.4.	Différents types d'enrobage (flux)	28
Tableau I.5.	Différents types de l'épaisseur de l'enrobage (flux)	29
Tableau I.6.	Valeurs moyennes de l'épaisseur des pièces à souder	29
Tableau I.7.	Éléments entrant dans la composition des flux	30
Tableau I.8.	Propriétés de différents gaz de protection	32
Tableau I.9.	Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport	34
Tableau I.10.	Normalisation des métaux d'apports	34
Tableau I.11.	Classification des électrodes enrobées	37
Tableau I.12.	Electrodes communes classifiées à EN499 et à AWS A 5.1/5.5	38
Tableau I.13.	Correspondance des normes pour électrodes enrobées	38
<u>Chapitre II : Techniques et Méthodes de Caractérisations</u>		
Tableau II.1.	Compositions Chimiques des flux commerciaux (FA, FB et FC)(Fiche technique de l'Enterprise COSIDER , Voir Annexe).	47
Tableau II.2.	Composition chimique du métal de base X42 (d'aciers faiblement alliés et à faible pourcentage en carbone) (Fiche technique de l'Enterprise COSIDER Voir Annexe)	47
Tableau II.3.	Composition chimique des électrodes utilisées (Fiche technique de l'Enterprise COSIDER, Voir Annexe).	48
Tableau II.4.	Procédure de soudage ligne SMAW Ø 8	48
Tableau II.5.	Paramètres des passes	49
<u>Chapitre III : Influence des flux sur les joints soudés</u>		
Tableau III.1.	Analyse chimique des éléments des flux (FA, FB et FC) condensés.	65

Liste des Tableaux

Tableau III. 2.	Pourcentage pondéral des oxydes dans les flux (FA, FB et FC).	65
Tableau III.3.	Analyse chimique des éléments des laitiers (LA, LB et LC) condensés.	66
Tableau III.4.	Pourcentage pondéral des oxydes dans les laitiers (LA, LB et LC).	66
Tableau III.5.	Echantillons soudés avec les passes étudiés	71
Tableau III.6.	Composition chimique des éléments des zones fondues en passe (PA, PB, PC et PD) de l'acier X42.	71
Tableau III.7.	Passes étudiées (PB, PE et PJ) des échantillons soudés	73
Tableau III.8.	Composition des éléments chimiques des zones fondues en multi-passes (P1, P2 et P3) avec les différents flux cellulosiques de l'acier X42.	73
Tableau III.9.	Passes étudiées (PC, PF et PK) des échantillons soudés	75
Tableau III.10.	Composition chimique des zones fondues en multi-passes (P1, P2 et P3) de l'acier X42.	75
Tableau III.11.	Analyse chimique par l'EDAX des différents flux (FA, FB et FC) et laitiers (LA, LB et LC).	77
Tableau III.12.	Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments dans la zone fondue en passe (PA) avec le flux (E6010)	77
Tableau III.13.	Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments dans la zone fondue en multi-passes avec les flux (E6010 et E8010-P1).	78
Tableau III.14.	Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments dans la zone fondue en multi-passes avec les flux (E6010 et E8018-G).	78
Tableau III.15.	Valeurs moyennes de la micro dureté dans le métal de base X42 et les différents métaux d'apport.	98
Tableau III.16.	Phases cristallines et leur structure cristalline dans les flux (FA, FB, FC) et les laitiers (LA, LB, LC).	104
Tableau III.17.	Caractéristiques de spectre du métal de base X42 et des métaux d'apports.	116

Liste des Tableaux

Tableau III.18.	Caractéristiques des spectres des zones fondues et les zones affectées thermiquement en première passe (PA , PB , PC et PD) avec les différents flux.	119
Tableau III.19.	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement en multi-passe (P1, P2, et P3), avec les flux (E6010 et E8010-P1).	123
Tableau.III.20.	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zone affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (E6010, E8018-G).	126
Tableau.III.21.	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec le flux (E8018-G).	130
<u>Chapitre IV : Etude des joints soudés avec des électrodes sans flux</u>		
Tableau IV.1.	Echantillons soudés sans enrobage (Em, En et Eo)	135
Tableau IV.2.	Composition chimique du métal de base, des électrodes sans flux et de la zone fondue (Em , En ,Eo) .	136
Tableau IV.3.	Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments de la zone fondue obtenue sans flux en passe (P1:E6010).	137
Tableau IV.4.	Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments de la zone fondue en multi-passes sans flux (P1: E6010 et P2, P3 :E8010-P1).	137
Tableau IV.5.	Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments de la zone fondue en multi-passes sans enrobage (P1 : E6010 et P2, P3 :E8018- G).	138
Tableau IV.6.	Valeurs moyennes de la micro-dureté de Vickers et du carbone équivalent par les différentes électrodes sans flux.	147
Tableau IV.7.	Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement avec les différentes électrodes sans flux (Em, En, et Eo).	149

NOMENCLATURE	
Symboles	Notations
MB	Métal de base
MA	Métal d'apport
ZF	Zone fondue
ZAT	Zone affectée thermiquement
SMAW	Shielded metal arc welding
API	America petrol industries
FRX	Spectrométrie de Fluorescence des Rayons X
MO	Microscope optique
MEB	Microscope électronique à balayage
EDX	Analyse de dispersion d'énergie aux rayons X
HV0.5 (500g)	Micro-dureté Vickers
DRX	Diffraction des rayons X
(hkl)	Famille de plans
FA	Flux Cellulosique (E6010)
FB	Flux Cellulosique (E8010-P1)
FC	Flux Basique (E8018-G)
P1	Première passe (Passe 1)
P2	Deuxième passe (Passe 2)
P3	Troisième passe (Passe 3)
ZF (PA)	Zone fondue en première passe (PA)
ZF (PB)	Zone fondue en première passe (PB)
ZF (PC)	Zone fondue en première passe (PC)
ZF (PD)	Zone fondue en première passe (PD)
PB	Première passe (E6010), P1 : (passe B)
PE	Deuxième passe (E8010-P1), P2 : (Passe E)
PJ	Troisième passe (E8010-P1), P3 : (passe J)
PC	Première passe (E6010), P1: (passe C)
PF	Deuxième passe (E8018-G), P2 : (Passe F)
PK	Troisième passe (E8018-G), P3 : (passe K)
Em	Echantillon soudé sans flux (E6010)
En	Echantillon soudé sans flux (E6010 et E8010-P1)
Eo	Echantillon soudé sans flux (E6010et E8018-G)
F	Ferrite
P	Perlite
LA	Laitier cellulosique E6010
LB	Laitier cellulosique E8010-P1
LC	Laitier basique E8018-G
a (A°)	Paramètre cristallin moyen
t (A°)	Taille moyenne des grains

Introduction générale

Introduction générale

Le principe de soudage est de mettre une énergie pour constituer la liaison entre deux matériaux. L'augmentation de température s'accompagne, au-delà d'une certaine limite, de modifications métallurgiques ou physico-chimiques nuisibles à l'intégrité du matériau. Ce principe de base est à l'origine des nombreuses difficultés rencontrées lors de l'assemblage de pièces. Parmi les développements apportés depuis de nombreuses années pour pallier ces limitations inhérentes au soudage, l'utilisation de flux est une solution appliquée à de nombreux procédés [1].

Le flux se définit comme un matériau utilisé au cours du soudage, brasage ou soudobrasage pour décaper chimiquement les surfaces du joint, pour prévenir l'oxydation atmosphérique et pour réduire les impuretés ou les dégager du bain. Dans le cas du soudage à l'arc, d'autres substances qui remplissent des fonctions spécifiques sont ajoutées à la composition du flux [2]. On peut attribuer au flux un rôle métallurgique, électrique ou mécanique [3].

Un flux universel pour lequel chacun des rôles est accompli n'existe pas. Suivant les propriétés du matériau et les paramètres opératoires, des mélanges sont développés afin de répondre pleinement à une ou plusieurs fonctions [1]. Les flux ont contribué au développement de nombreux procédés de soudage. En particulier, ils sont à l'origine du procédé de soudage à l'arc submergé dans les années 1930. Ils peuvent également être disponibles sous forme d'enrobage ou de fourrage du métal d'apport respectivement pour les procédés de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) et MIG-MAG (Fil fourré) [4].

L'objectif de notre travail est l'étude de l'influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des pipelines. Les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de COSIDER CANALISATION où deux tubes d'acier de nuance X42 ont été assemblés par (soudage en multi-passes manuel à l'arc électrique) soudage à l'arc électrique, selon le procédé de soudage avec électrodes enrobées (SMAW).

Pour la réalisation de notre thèse, nous avons utilisé différentes techniques de caractérisations telles que la spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX), la spectrométrie par absorption atomique, la microscopie optique (MO), la microscopie électronique à balayage (MEB) associé à l'EDAX, la micro-dureté (HV) et la diffraction des rayons X (DRX).

La présente thèse est organisée comme suit :

- ✓ Le premier chapitre rassemble des informations bibliographiques sur le soudage des aciers à faible teneur en carbone, et les rôles et les caractéristiques des flux de soudage .
- ✓ Le deuxième chapitre présente le matériau étudié, les différents flux appliqués, l'identification du métal de base, les métaux d'apports et la description des méthodes de caractérisations utilisées.
- ✓ Le troisième chapitre rassemble les résultats expérimentaux obtenus par les différentes techniques expérimentales sur l'influence des flux sur les joints soudés d'acier X42.
- ✓ Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à partir de l'étude des joints soudés avec des électrodes sans enrobage.

La thèse se termine avec une conclusion générale, et une annexe.

Chapitre I : Etude Bibliographique

Chapitre I : Etude Bibliographique

A. I.1. Soudage des aciers à faible teneur en carbone

I.1. Introduction

Les pipelines sont considérés comme le moyen le plus sécurisé et économique pour le transport des hydrocarbures depuis le début du siècle dernier. Ce domaine reconnu, il se développe d'avantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie et l'apparition de nouveaux consommateurs d'hydrocarbures sur le marché [5].

La partie de conduite d'un pipeline est une construction mécano- soudée, ainsi la soudabilité des aciers des tubes a des répercutions sur le coût de réalisation et sur la fiabilité de la conduite [6].

Il faut citer qu'il s'agit de centaines de kilomètres de soudures qui sont réalisées sur les chantiers de construction de conduites. Ainsi, toute modification importante au niveau de la composition chimique de l'acier ou les dimensions des tubes demande et nécessite de nouvelles mesures techniques, technologique et beaucoup de précautions à réaliser afin d'obtenir des joints de soudure fiables. Au delà de la soudabilité locale ou métallurgique, la recherche de nouveaux aciers pour les conduites doit être entreprise par d'autres aspects qui intègrent le procédé de soudage et son environnement opératoire. Après la corrosion, Les défauts des joints de soudure constituent la deuxième cause de défaillances des pipelines. C'est ainsi que durant la fabrication des tubes en usine et la construction des conduites, le soudage est une étape très importante et décisive. Le développement du réseau mondial des canalisations de transports des hydrocarbures doit suivre l'accroissement des besoins énergétiques mondiaux. La préoccupation primordiale du constructeur doit être la définition des assemblages soudés qui permettent de faire passer les efforts avec un maximum de sécurité et réaliser la soudure au moindre coût, tout en prenant en considération l'accroissement de la quantité du métal à déposer en fonction de l'augmentation des dimensions des conduites, l'emploi de nouveaux aciers à composition chimique de plus en plus complexe et les conditions difficiles d'exécution des soudures d'assemblage des tubes sur chantier [5]. Ainsi l'évolution de

la technologie et des techniques de soudage doit suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques des aciers des tubes et des dimensions des conduites afin de répondre aux besoins des constructeurs et aux exigences des utilisateurs [7].

I.1.1. Transport par pipelines

Le transport par pipelines est reconnu comme étant le moyen le plus sûr et le plus économique et ne cesse de se développer d'avantage suite à l'accroissement continu du besoin mondial en énergie [5]. Un pipeline étant une construction mécano-soudée, la soudabilité des tubes d'aciers a des répercussions sur la fiabilité de la conduite ainsi que sur le coût de réalisation [8].

Au vu des centaines de kilomètres de soudures réalisées sur les chantiers de construction, toute modification au niveau de la composition chimique de l'acier ou des dimensions des tubes devrait se faire avec beaucoup de précaution dans un souci majeur d'obtention de joints de soudure fiables.

Mis à part la considération du caractère métallurgique de la soudure, toute recherche de nouveaux aciers pour les pipelines doit être entreprise en intégrant des procédés de soudage avec un environnement opératoire spécifique.

Après le phénomène de corrosion, les défauts des joints de soudure constituent quant à eux la deuxième cause de défaillances des conduites .C'est pourquoi que durant la fabrication des tubes en usine, le soudage devient une étape très importante et décisive. Ainsi, la principale préoccupation du constructeur doit se focaliser sur des assemblages soudés devant être obtenus avec un moindre coût tout en prenant en compte la quantité du métal de dépôt en fonction des dimensions des conduites, ainsi que l'emploi de nouveaux aciers à composition chimique de plus en plus complexe [5].

C'est ainsi que l'évolution de la technologie de soudage doit suivre l'évolution des caractéristiques mécaniques des aciers des tubes et des dimensions des conduites afin de répondre aux exigences des utilisateurs [7].

I.1.2.Laminage des pipelines

Les tubes de transport de gaz ou de pétrole sont appelés gazoducs et oléoducs obtenus à partir de tôles obtenues par laminage à chaud, dit "laminage contrôlé". Ce procédé consiste à optimiser les conditions de laminage en imposant certains paramètres du procédé de mise en forme et de traitement thermique, dit "traitements thermomécaniques" [9].

I.1.2.1.Les aciers utilisés pour fabriquer les pipelines

Le transport à grande distance de quantités importantes d'hydrocarbures a nécessité l'emploi des tubes de grande résistance capables de résister à des pressions très élevées.

On a eu recours à de nouvelles nuances à caractéristiques mécaniques améliorées.

C'est ainsi qu'on a vu apparaître les nuances X60, X65, X70, X80 et même X100.

Les types d'aciers utilisés pour les tubes peuvent être divisés en deux groupes :

- aciers au carbone faiblement alliés
- aciers à faible teneur en carbone.

Dans le premier groupe, on trouve les aciers dits ferrito-perlitique tels que le X42 jusqu'au X52 selon les normes API) renfermant jusqu'à 0,3 %C, 1,6 %Mn, 0,7 %Si. Dans le deuxième groupe on trouve les aciers ferrito-perlitiques faiblement micro-alliés à plus basse teneur en carbone tels que le : X56, X50, X65, X70 et X80 renfermant 0,12 %C, 0,45 %Si, 0,25 %S, 1,9 %Mn, 0,1 %V, 0,1 %Nb, 0,015 %Al.

Pour les conduites de diamètre supérieur à 1020 mm, destinées à fonctionner sous des pressions élevées, on utilise généralement des tubes en acier obtenu par laminage contrôlé. Les propriétés mécaniques peuvent être modifiées en jouant sur la structure en affiant entre autre la structure des tôles laminées (affinement des grains). Ce procédé est reconnu comme permettant d'améliorer à la fois les caractéristiques de traction R_e et/ou R ainsi que la température de transition. Ces dernières années le procédé du laminage contrôlé a été complété par le refroidissement accéléré (arrosage à l'eau à des vitesses de refroidissement suffisamment élevées [10]) afin d'améliorer

les caractéristiques mécaniques des tôles, permettant d'accroître ainsi la résistance de l'acier jusqu'à 700 MPa.

I.1.2.2. Procédés de fabrication des tubes de pipelines

La multiplicité des dimensions des tubes (diamètres et épaisseurs) et le développement de leurs techniques de fabrication sont la première cause de la diversité du réseau de transport gazier algérien [11].

On retrouve :

- Les tubes soudés sous la forme en spirale
- Les tubes soudés sous forme longitudinale
- Les tubes formés sans soudure

I.1.3. Procèdes et Aspects de soudage

La réalisation d'assemblages indémontables, en fabrication mécanique, utilise le soudage comme un procédé primordial. Les techniques de soudage sont en pleine évolution pour assurer la continuité des pièces à assembler contrairement au rivetage, sertissage, collage ou boulonnage qui présentent des discontinuités physiques ou chimiques. Au fur et à mesure de la diversification et de l'évolution des procédés [12,13].

L'opération de soudage se caractérise par trois aspects [14] :

- ❖ Aspect thermique : le soudage est caractérisé par l'intervention d'une source de chaleur, le plus souvent mobile qui provoque des échauffements rapides, des refroidissements rapides et des gradients thermiques entre les différentes zones du joint soudé ;
- ❖ Aspect chimique : durant le séjour à l'état liquide, des réactions chimiques peuvent se produire :
 - Entre les éléments présents, qu'ils proviennent du métal de base ou du métal d'apport mis en œuvre ;
 - Entre le métal fondu et le milieu gazeux environnant.

- ❖ Aspect thermomécanique : le passage par l'état fondu suivi d'une solidification fait intervenir deux comportements physiques importants : le retrait à la solidification et la dilatation thermique. Ces deux phénomènes agissent simultanément pour engendrer des déformations et des contraintes résiduelles au niveau des joints soudés.

Chaque procédé possède une soudabilité spécifiques détermine la procédure de soudage à utiliser. Cette procédure doit tenir compte des principaux risques de défauts de soudage, du procédé de soudage ainsi que du métal d'apport utilisé.

I.1.4. La soudabilité

En dehors de contraintes relatives au mode opératoire (capacité à assurer la continuité physique du joint) ou à la conception de l'ensemble soudé (répartition des masses, déformations), la notion de soudabilité l'aptitude d'un métal (ou d'un alliage) à être assemblé par un procédé de soudage en assurant la continuité métallique du matériau.

Toutefois, sur le plan métallurgique, il est observé qu'il y a dilution du métal d'apport dans le métal de base ainsi que certains effets de l'enrobage des électrodes ou du flux de protection, tandis que sur le plan thermique, l'énergie spécifique de la source et les propriétés thermiques du métal de base définissent l'importance des zones affectées thermiquement [15].

I.1.5. La soudabilité de l'acier

Il est bien connu que l'acier est le matériau le plus utilisé en soudage et est cependant, il peut présenter certains défauts liés aux phénomènes et/ou facteurs suivants :

- Soufflures
- Rigidité de l'assemblage
- Fissuration à froid en raison de la présence d'hydrogène.
- Fissuration à chaud en raison de la présence de soufre [14].

Les principaux facteurs qui influencent la soudabilité des aciers sont :

- La trempabilité.
- Le carbone équivalent.
- Le préchauffage.
- Les phénomènes de fissuration

I.1.6. La trempabilité

C'est le principal facteur qui a un effet important sur la soudabilité des aciers. C'est une caractéristique du durcissement de l'acier par transformation martensitique lors d'un refroidissement rapide.

Plus le refroidissement est rapide, plus la dureté augmente ce qui aura pour effet d'accroître la fragilité de la pièce tout en augmentant les risques de fissuration.

I.1.7. Carbone équivalent

C'est le rapport entre le carbone et les autres éléments d'alliage et détermine ainsi la soudabilité de l'acier. En effet, le carbone constitue l'élément principal qui favorise le plus la trempabilité de l'acier au devant des autres éléments présents dans l'acier.

On détermine l'effet du carbone et des éléments d'alliage sur la trempabilité de l'acier en appliquant la formule suivante :

$$\text{Carbone équivalent} = \%C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/40 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{V}/4 \dots \dots \dots (I.1) [16].$$

Avec ;

C : carbone

Mn : manganèse

Si : silicium

Mo : molybdène

V : vanadium

Ni : nickel

Cu : cuivre

Plus la valeur du carbone équivalent est élevée, plus l'acier est trempable, les risques de fissuration à froid dans la zone atteinte sont d'autant plus élevés [17].

Le Tableau II.1 indique le rapport entre le carbone équivalent de l'acier et sa soudabilité [17].

Tableau I. 1. Influence du carbone équivalent sur la soudabilité de l'acier [17].

Carbone équivalent	Indice de soudabilité	Types d'électrodes	Préchauffage
<0.40	Excellent	Tous les types	Aucun
0.40-0.50	Bon	Basique Autres	Aucun De 100 à 300 °C
0.50-0.60	Moyen	Basique Autres	De 100à 300 °C De 200à400°C
0.60-0.70	Médiocre	Basiques	De 300à400°C
>0.70	Mauvais	Non soudable	

I.1.8. Phénomènes métallurgiques de soudage

Métallurgiquement parlant, il est bien connu que les caractéristiques mécaniques et physiques des aciers sont fonction de leurs structures (nature, dimension, morphologie, et répartition des constituants) ainsi que de leur composition chimique. Si la structure étant elle-même est liée à la composition chimique et aux traitements thermiques que subit l'acier [15].

On est appelé à obtenir, après solidification soit un joint homogène de même composition que le métal de base soit un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion utilisé, la structure typique d'une soudure d'un alliage est composée de quatre zones principales (Fig I.1) [15,18].

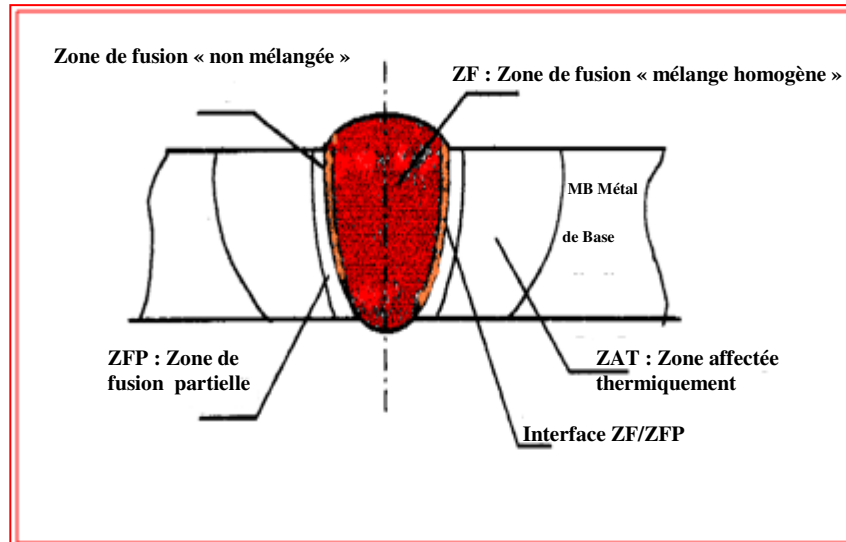


Figure I. 1. Variété de microstructures dans un cordon de soudure par fusion

[15,18].

I.1.9.Caractéristiques de la soudure

I.1.9.1.La zone fondue :(nommée Z.F) zone dans laquelle l'état liquide a été atteint. La structure métallurgique qui sera obtenue après solidification, dépendra du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, et ce de la partie la plus chaude vers la moins chaude. Il devient donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté [19].

I.1.9.2.La zone affectée thermiquement :(nommée Z.A.T) est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et des modifications de la structure du métal de base [19].

I.1.9. 3. La zone liaison : (nommée Z.L) c'est une zone marquant la frontière entre la zone fondue (Z.F) et la zone affectée thermiquement (Z.A.T). Autrement dit En quelque sorte, c'est la limite entre le métal qui s'est solidifié après être fondu et le métal qui est resté à l'état solide au cours de l'opération de soudage [14].

I.1.9.4. Le métal de base : (nommée M.B) Cette partie de la structure du métal soudée est suffisamment loin de la source de chaleur et ne subit pas ainsi de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage. Il est à

signaler que le métal de base, tout comme le joint de soudure global, peut être un site de concentration des contraintes résiduelles (transversales et longitudinales), dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure [20].

I.1.10. Evaluation de la qualité d'une soudure

Par ailleurs, la couleur d'une soudure caractérisant le degré d'oxydation de la surface peut aussi être utilisée comme indicateur de la qualité de la protection: si des teintes d'interface jaune ou bleu clair peuvent à la rigueur être admises, toute trace d'oxyde blanc doit entraîner l'élimination de la soudure car un rechargement éventuel ne pourrait lui restituer une qualité correcte, l'absorption d'oxygène et d'azote étant irréversible (Tab I.2)[21].

Tableau I.2. Indicateur de la soudure [21].

Couleur de la soudure	Origine du traitement
Jaune paille claire Jaune paille foncé Bleu claire	Oxydation de surface. Eliminer par un brossage avec une brosse métallique neuve à fil inox.
Bleu foncé Gris bleu Gris Blanc (dépôts poudreux)	Contamination du métal. La soudure doit être entièrement éliminée et refaite après correction des protections gazeuses

Les essais de dureté comparatifs entre le cordon et le métal de base sont aussi parfois utilisés comme critère de qualité de la soudure. La variation de dureté entre un cordon non contaminé et le métal de base ne doit pas dépasser 30 points sur l'échelle des duretés Vickers ou Brinell (5 points pour Rockwell B). Selon les normes ASME, il est suggéré que si la dureté diffère de plus de 40 points Vickers, il y a contamination excessive de la soudure qui doit être alors complètement supprimée et refaite [15].

Enfin, le code de construction, impose que chaque soudure subisse un ressuage ainsi qu'une analyse radiographique pour détecter la présence de porosités [15].

I.1.11. Evolution de la composition chimique

La recherche de produits qui possèdent, à résistance égale, une teneur en carbone plus faible que celle des produits où n'interviennent que le carbone s'est traduit par l'apparition d'aciers au (C-Mn) ou (C-Mn-Si).

Pour de tels aciers livrés à l'état normalisé (c'est-à-dire refroidis à l'air après laminage) l'influence des éléments Mn et Si s'exerce, d'une part, sur la transformation de l'austénite au refroidissement, d'autre part sur la résistance des constituants de sorte que l'addition de ces éléments en quantité modérée permet, à résistance égale, d'abaisser la teneur en carbone.

En outre, l'influence du manganèse sur le pouvoir trempant de ces aciers peut se manifester aussi lors du soudage ce qui a motivé l'introduction du coefficient attribué à cet élément dans la formulation du carbone équivalent (par exemple $C + Mn/6$), si bien que la teneur maximale en manganèse retenue avoisine le 1, 2 %.

Afin de remédier à cette restriction et ce sans perturber le pouvoir trempant, il fallait faire intervenir un mécanisme de renforcement de l'acier remplaçant partiellement celui fourni par le diagramme (Fe-C).

La solution se situe sous la forme des aciers dits « dispersoïdes » ou « micro-alliés » qui comportent en très faibles proportions (quelques centièmes pour cent) des éléments d'additions tels que (Al, Nb, V, Ti). Le mécanisme de l'action de ces éléments s'explique par leur affinité pour le carbone ou l'azote, avec lesquels ils forment des composés du type carbures, nitrures ou carbonitrures, composés qui sont insolubles dans l'austénite au-dessous de 900°C. Cette variation de solubilité rend possible un mécanisme de durcissement de la ferrite d'où un gain de limite d'élasticité.

Cependant, il est à noter que la quantité de perlite se trouve réduite par rapport à celle que l'on trouve dans un acier ordinaire, pour lequel tout le carbone participe à la transformation de l'austénite au refroidissement. En même temps, ce mécanisme contribue à un affinage du grain, surtout si le produit considéré a été obtenu par laminage contrôlé, ce qui se traduit par une amélioration de la ductilité [15,22].

I.1.12. Aspects métallurgiques du soudage

Au cours du soudage par fusion la structure de solidification en zone de fusion se réalise à partir de la structure du métal solide des zones voisines [23]. La solidification s'établit à l'interface solide-liquide à partir des grains qui se trouve à cette interface. Ces grains servent de substrats à partir desquels la croissance débute et se développe selon la direction du gradient maximum de température. Cette direction de croissance est celle de l'avancée du front de solidification afin de dissiper la chaleur latente de solidification vers le métal solide avoisinant. La structure d'une soudure est fortement influencée par les cycles thermiques du soudage [24]. La taille et la forme des anciens grains ainsi que les transformations de phase qui se produisent lors du refroidissement sont des caractéristiques essentielles pour définir les propriétés mécaniques des assemblages. Selon la nature des métaux de base à assembler et les cycles thermiques appliqués, les microstructures des cordons de soudure des zones de fusion et des zones affectées thermiquement, présentent des différences de morphologies et des caractéristiques mécaniques.

I.1.12.1. Mécanisme de solidification pendant le soudage

Les conditions de solidification, hors équilibre, pendant le soudage par fusion impliquent la déstabilisation du front plan solide-liquide avec la formation d'une sous-structure de solidification [15, 20,25].

Chaque grain colonnaire de la structure d'une soudure d'un alliage est composé d'une sous-structure de solidification sous forme cellulaire ou dendritique. Même si la composition globale de la soudure est homogène, les sous-structures cellulaires ou dendritiques renferment des formes de micro-ségrégations. Ces dernières sont caractérisées par une différence de composition entre le cœur et la périphérie des cellules individuelles ou des dendrites cellulaires. Ces cellules sont des protubérances de métal solide microscopiques en forme de crayon qui refroidissent sur le front de l'interface solide-liquide. Il est à retenir que les dendrites sont plus développées que les cellules et ont une forme d'arbre avec un bras de dendrite primaire et des branches orthogonales appelées bras de dendrite secondaires. Généralement, les paramètres importants contrôlant les sous-structures planaires, cellulaires ou dendritiques et la

quantité de surfusion constitutionnelle produites lors du refroidissement des soudures sont l'effet du gradient de température G et la vitesse de solidification R :

Le coefficient de partage à l'équilibre K qui indique le potentiel de ségrégation d'un alliage.

$$K = C_s * C_L \dots\dots\dots (I. 2)$$

C_s : Concentration du soluté à l'interface solide-liquide,

C_L : Concentration du liquide à l'interface solide-liquide,

$$dT / t = G.R \text{ (en } ^\circ\text{C/s)} \dots\dots\dots (I. 3)$$

G : Gradient de température (G) dans le liquide à l'interface (en $^\circ\text{C/mm}$).

R : Vitesse de croissance ou vitesse d'avance du front de solidification à l'interface (R) (en mm/s).

dT/t : Rapport de différentiel thermique sur le temps de soudage.

La zone de surfusion constitutionnelle est la région du liquide où la température réelle est inférieure à la température d'équilibre à cause des variations de compositions et des gradients thermiques. Si une soudure est réalisée à vitesse constante, la vitesse d'avance du front de solidification R est fixe (Fig .I. 2).

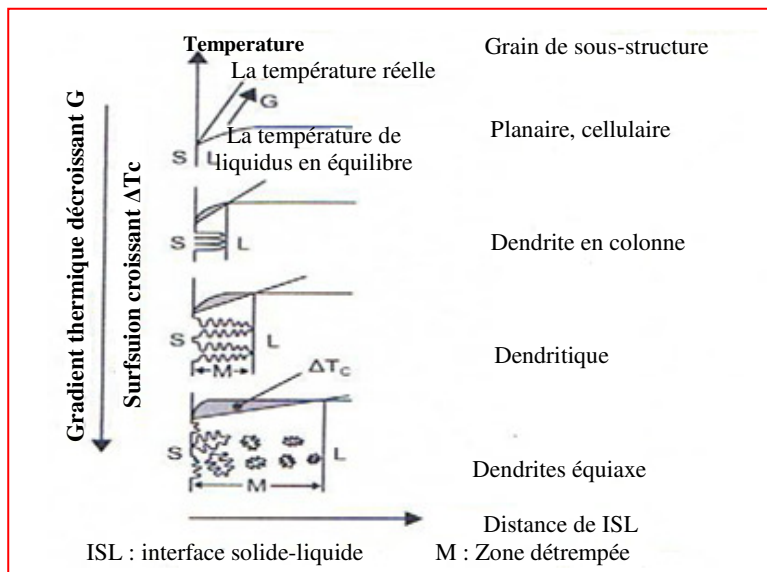


Figure I. 2. Profil de la température réelle et la température d'équilibre du liquidus, effet du gradient de température G et le ΔT_c sur le mode de solidification des sous structures [26].

En induisant un gradient de température extrêmement élevé (pente importante) il n'y a pas de surfusion constitutionnelle et la structure de solidification est plane. Quand le gradient décroît légèrement, les protubérances du métal solide à l'interface croissent plus vite que l'interface plate restante car le solide croît dans une zone de liquide en surfusion. De ce fait les protubérances solides sont présentes à une température en dessous du liquidus de l'alliage. Il en résulte une sous-structure cellulaire dans chaque grain à croissance épi-taxique. Si la valeur du gradient de température décroît encore, la zone de surfusion est si importante que des bras secondaires se forment et une croissance dendritique cellulaire ou dendritique colonnaire est observée. Dans une sous structure dendritique cellulaire chaque grain contient plusieurs dendrites cellulaires alors que dans une structure dendritique colonnaire, un grain est occupé par une seule dendrite [15,20].

I.1.12.2. Morphologie de la zone de fusion

La forme et la constitution du bain de fusion dépendent de multiples facteurs tels que la nature du matériau à souder, les caractéristiques de l'arc ou du plasma permettant la fusion du métal qui sont eux-mêmes liées aux paramètres technologiques du procédé, ainsi que des mouvements du bain de fusion. Les bains de fusion créés lors des opérations de soudage sont le siège de processus thermophysiques très complexes mettant en jeu des phénomènes thermiques [27,28], convectifs, chimiques et électromagnétiques indépendamment du procédé utilisé [29]. Ces mouvements de convection du métal liquide ou gazeux influencent de façon importante la forme du cordon. En outre, les transferts de chaleur peuvent induire des hétérogénéités (ségrégations) ou la présence de défauts tels que les inclusions ou porosités. D'une façon globale le bain de fusion est en équilibre sous l'action de forces aux effets variables. Ces forces d'origine différentes sont [30]:

- Les forces de gravité (ou flottabilité),
- Les tensions superficielles (forces de Marangoni),
- La pression du plasma ou de l'arc en surface,
- Les forces électromagnétiques (forces de Lorentz) pour les procédés de soudage à l'arc.

I.1.12. 3.Effet de la vitesse de refroidissement

L'effet cumulé de G et de R gouverne le mode de croissance et donc la forme de la sous-structure de solidification. Le produit ($G \times R$) est équivalent à une vitesse de refroidissement exprimé en $^{\circ}/s$ et par conséquent plus ($G \times R$) est important plus les structures cellulaires, dendritiques colonnaires ou même dendritiques équiaxes seront fines.

L'espacement entre les bras des dendrites est aussi influencé par R, à savoir qu'une faible vitesse favorise un espacement plus grand et donc un effet de grossissement de la sous structure. Les effets de G et de R sur la morphologie de la sous structure sont résumés dans le schéma suivant (Fig. I.3) [15].

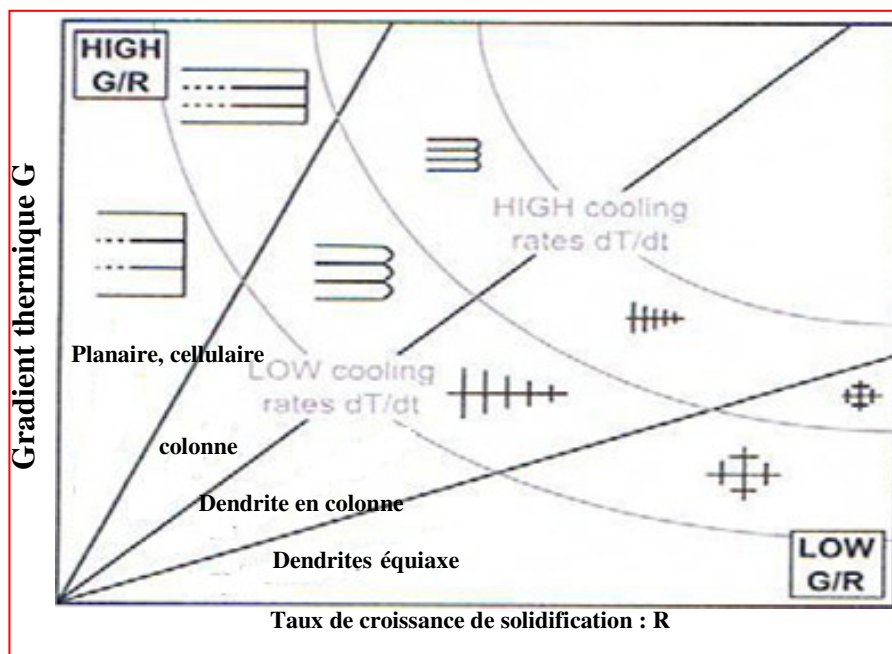


Figure I. 3. Schéma du gradient de température en fonction de la vitesse de solidification montre les modes de solidification possibles [26].

En pratique, les sous structures cellulaires et dendritiques cellulaires sont les plus fréquemment observées dans les structures de soudage. De plus, il est très difficile de contrôler G et R indépendamment lors du processus de soudage car en règle générale une vitesse de soudage importante, et donc une vitesse d'avance de l'interface R grande, produira un gradient thermique élevé. De ce fait la sous-structure de

solidification d'un alliage donné dépendra des concentrations en soluté, du degré de partage, à l'équilibre des éléments d'alliage et des paramètres de soudage [20].

I.1.13. Classification des microstructures des aciers soudés

La classification détaillée des différents constituants existant dans les microstructures obtenues par opération de soudage des aciers à bas carbone et faiblement alliés, est effectuée particulièrement à partir de la transformation de l'austénite en ferrite. C'est ainsi qu'une large variété de microstructures peuvent se développer fonction du degré de refroidissement et de la composition chimique de l'acier en question.

Après transformation, la microstructure formée à partir d'un grain austénitique (primaire) devient une mixture de deux ou plusieurs constituants arrangés approximativement dans un ordre de transformation thermiquement décroissant et bien défini [15] :

Selon O. Grong [31], l'ordre des transformations thermiquement décroissant est come suit :

1. Grain de Ferrite ou ferrite aliotriomorphique notée FG en anglais (GF)
2. Ferrite Polygonale ou ferrite Equiaxe Notée FP en anglais (PF)
3. Ferrite de Widmenstätten notée FW en anglais (WF)
4. Ferrite aciculaire notée FA en anglais (AF)
5. Bainite Supérieure notée BS en anglais (UB)
6. Bainite Inférieure noté BI en anglais (LB)
7. Martensite notée M en anglais (M).

Les microstructures citées ci-dessous sont représentées dans la Figure I. 4.

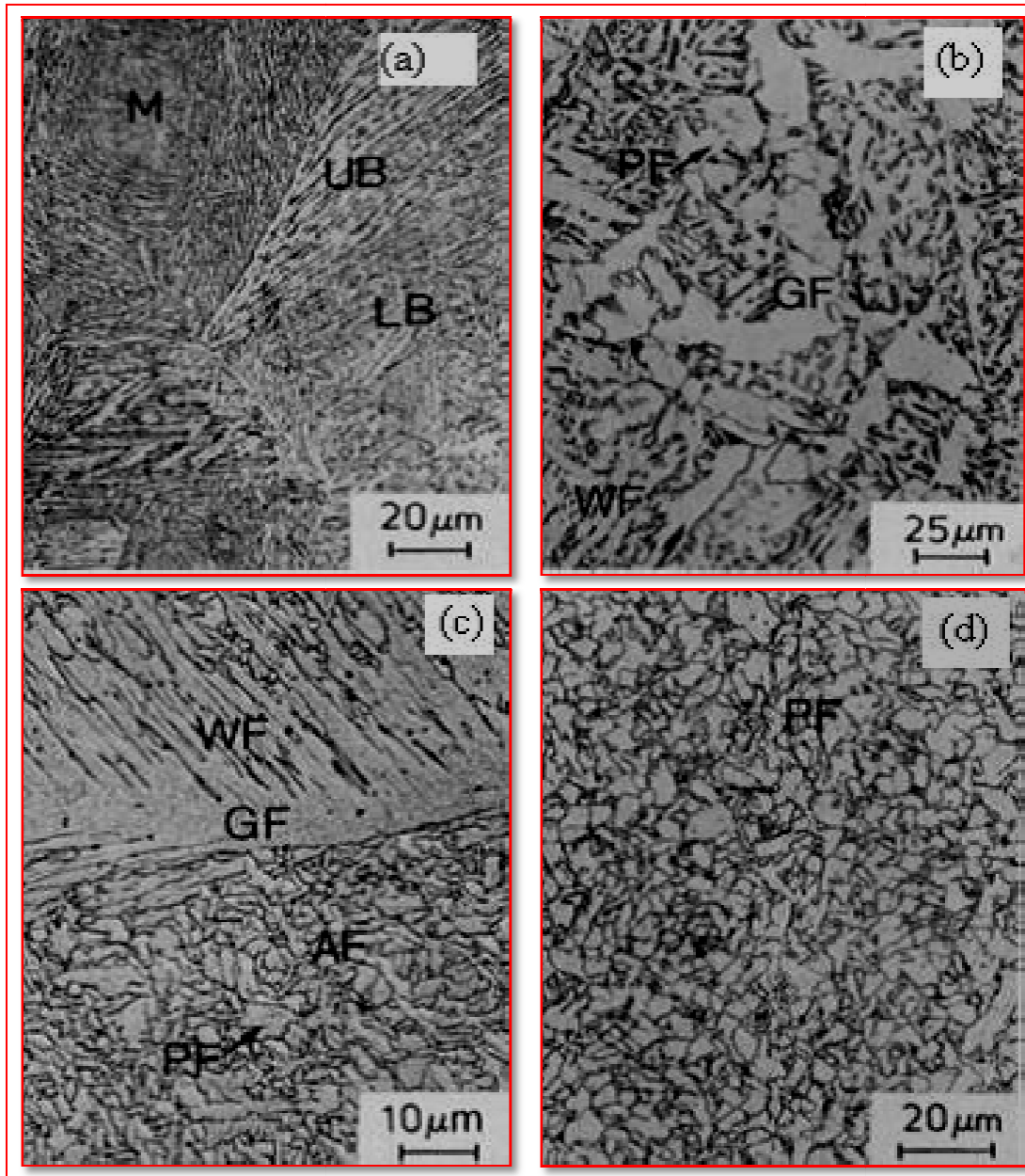


Figure I.4. Micrographies optiques montrant plusieurs constituants microstructuraux trouvés dans les aciers soudés faiblement alliés et à faible pourcentage en carbone [31]. (a) Grain grossier de la ZAT (soudage réalisé à basse chaleur), (b) Grain grossier de la ZAT (soudage réalisé à haute chaleur), (c) Dépôts du métal soudé (soudage réalisé à basse chaleur) et (d) Réchauffage du métal soudé (soudage réalisé à basse chaleur).

I.1.13.1. Ferrite de Widmenstätten (FW) :

Avec l'élévation du degré de refroidissement des aciers soudés faiblement alliés et à bas carbone, la distribution de carbone devient insuffisante pour maintenir le même mode de croissance plane de la FG. Selon la relation de Kurjumov-Sachs relative à l'orientation entre l'austénite et la ferrite cette dernière ne prend place que dans les interfaces à faible énergie, et devient ainsi une caractéristique de l'existence de la ferrite de Widmenstätten qui est donc, la seconde phase de croissance de la ferrite après la saturation de distribution en carbone nécessaire à la germination de grain de la ferrite FG [15].

I.1.13.2. Ferrite aciculaire (FA) :

Selon Grong [31], simultanément avec ou immédiatement après la formation de la ferrite de Widmenstätten dans les joints des grains austénitiques, la ferrite aciculaire commence à germer intra-granulairement dans les inclusions non métalliques. La fine dispersion des inclusions oxydées crée des sites favorables pour la germination hétérogène de la ferrite aciculaire, possédant un optimum de propriétés mécaniques des aciers soudés, par conséquent la formation particulière de micro-constituants a une valeur commerciale importante, ouvrant ainsi la porte à beaucoup de travaux de recherche dans le domaine (Fig I.5).

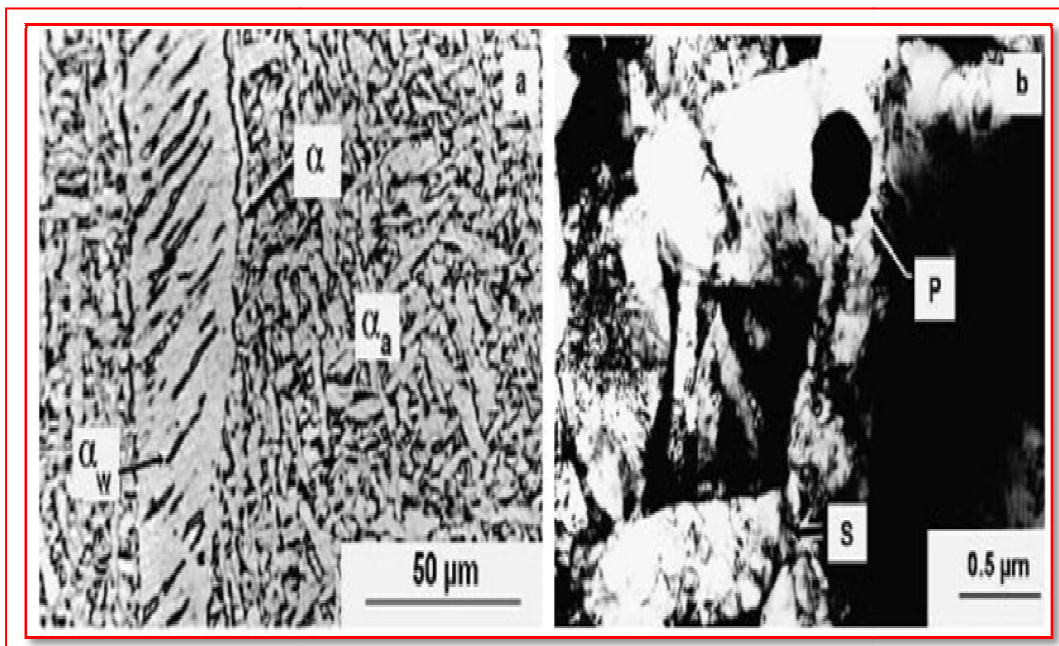


Figure I. 5. Microstructure typique de la ferrite aciculaire (α_a) dans un acier faiblement allié (0.06 % C, 0.51% Si, 1.11% Mn, 0.48% Cr), métal de soudure avec des additions minimales de Titane d'Oxygène et d'Aluminium, [31].

I.1.13.3. Bainite supérieure (BS):

Toujours selon Grong [31], la morphologie de la bainite supérieure à une ressemblance très proche celle de la ferrite de Widmenstätten, sachant que sa cristallographie est la même que celle de la martensite des aciers à faible pourcentage en carbone (le rapport d'orientation Kurjumov-Sachs est habituellement moins précis que pour la Ferrite de Widmenstätten, (Fig I. 6).

Structure avec des faces ressemblantes par contre sa cristallographie est celle de la martensite à faible pourcentage en carbone [15].

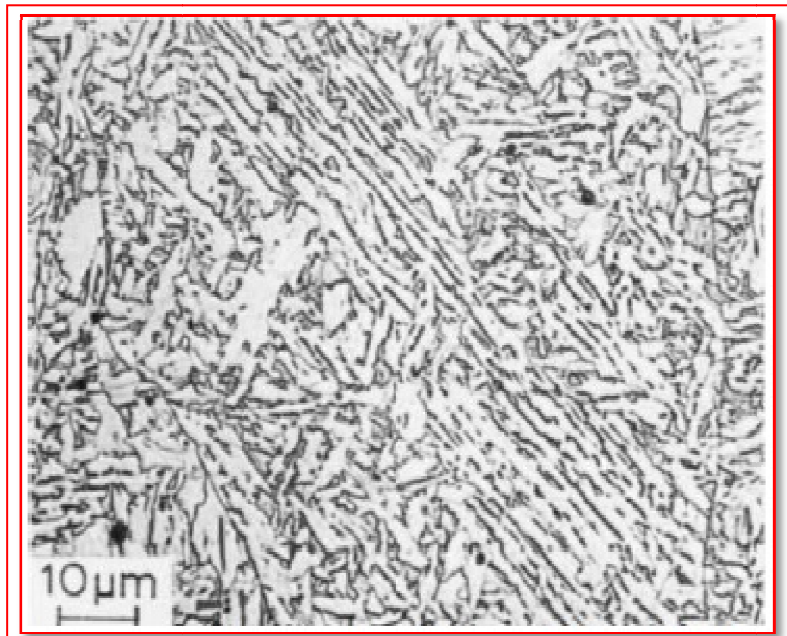


Figure I.6. Micrographie optique montrant la formation de bainite supérieure dans la région du grain colonnaire d'un acier soudé [31].

I.1.13.4. Bainite inférieure (BI):

Selon Grong [31], un refroidissement plus rapide entraîne la formation de la bainite inférieure qui, examinée au microscope optique, ressemble beaucoup à la martensite à faible pourcentage en carbone et peut ainsi ne pas être suffisamment identifiée comme telle d'où le recours aux observations au MET qui peut montrer aisément la similarité entre les plates de la bainite inférieure et supérieure présentant cependant des cristallographies différentes et complexes (Fig I.7).

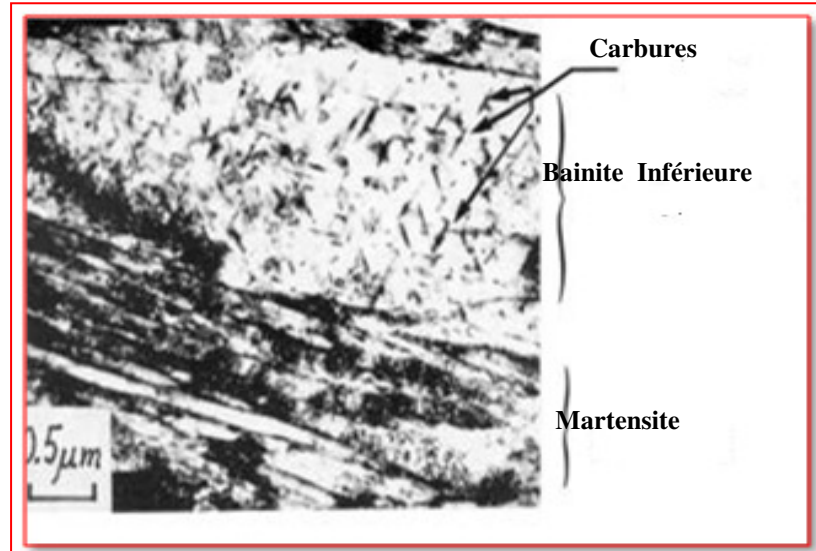


Figure I. 7 .Micrographie MET montrant la formation de bainite inférieure dans ZAT d'un acier faiblement allié e à faible pourcentage en carbone [31].

I.1.13.5. Martensite (M):

Aussi d'après O. Grong [31], pour une vitesse de refroidissement encore plus rapide, l'austénite se décompose en martensite par l'approche des contraintes planes de déformations par conséquent la composition chimique de l'acier reste inchangée, le produit obtenue sera des lattes martensitiques ou des plaques martensitiques (jumelées) selon le niveau de l'élément allié.

Les lattes martensitiques sont généralement trouvées dans les aciers ordinaires au carbone (0.5 wt % C) faiblement allié, mais quand le pourcentage de carbone dépasse ce seuil, la transformation de la martensite se produit plutôt par la formation de plaques jumelées par déformation.

La structure du cristal de la plaque martensitique est TC (tétraogonale - centrée), mais la latte martensitique révèle une structure CC (cubique - centrée). Les deux produits de la transformation exposent le rapport d'orientation caractéristique de Kurdjumov - Sachs avec l'austénite, mais ce rapport à tendance à être moins précis pour les grands pourcentages de carbone [15].

I.1.14. Procédé Soudage à l'arc manuel à l'électrode enrobée (SMAW) :

I.1.14.1. Principe du procédé

Le soudage à l'électrode enrobée (shielded metal arc welding «SMAW») est l'un des plus simples procédés de soudage à l'arc. L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte électrode, un câble de liaison et un câble de masse. Sa simplicité fait remonter son utilisation dans le secteur industriel aux années 1900.

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte électrode qui elle-même est reliée au câble de sortie de poste de soudage. Le connecteur de pièce est relié au générateur et est placé sur la pièce à souder (Fig I.8). L'arc électrique est amorcé par contact électrode-pièce et entraîne instantanément la fusion de l'électrode et la formation du cordon. Ce dernier se présente après solidification recouvert de laitier provenant de l'enrobage fondu que l'on élimine ultérieurement. Les caractéristiques des soudures réalisées ainsi dépendent de deux facteurs principaux : la technologie d'élaboration de l'électrode et l'habileté de l'opérateur [32,33, 34].

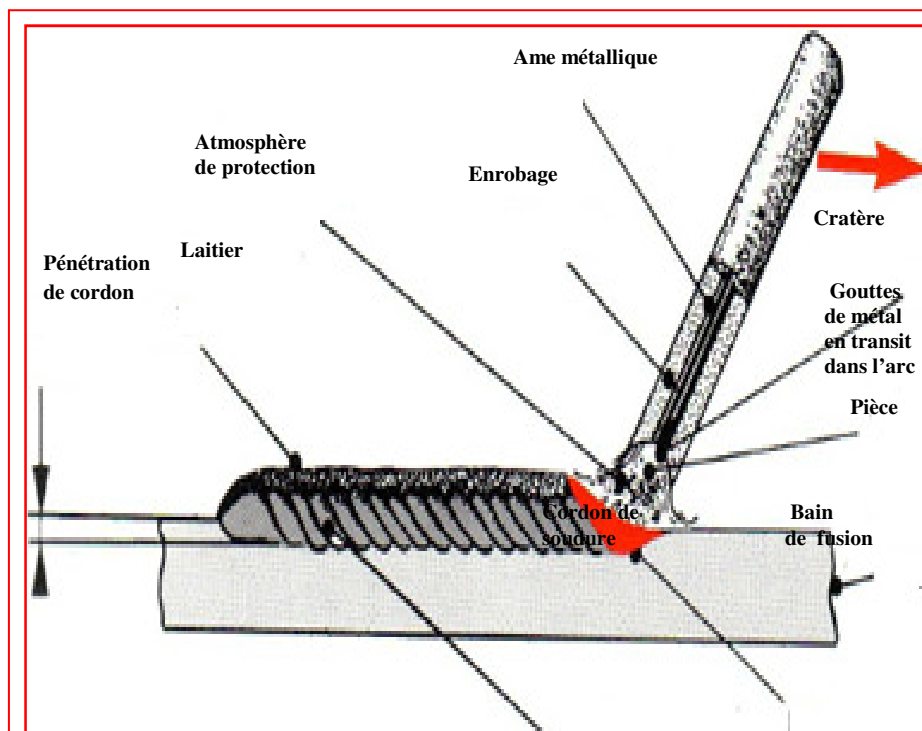


Figure .I.8 . Soudage à l'arc avec électrodes Enrobées SMAW : Schéma de principe [35].

Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobées permet d'assembler ou de recharger des éléments ou des pièces métalliques au moyen de cordons de soudure (Fig I.9) L'opérateur amorce l'arc électrique en grattant la surface d'une des pièces à souder avec l'extrémité de l'électrode qu'il éloigne ensuite pour obtenir la longueur d'arc désirée [36].

Le principe de base du soudage à l'arc est de conserver un écartement constant entre l'électrode et la pièce à souder pour créer l'arc électrique. Si l'électrode touche la pièce, le courant circulant entre eux ne permet pas de fort dégagement de chaleur et l'électrode colle à la pièce. Si en revanche on éloigne trop l'électrode de la pièce, il n'y aura pas de passage d'électricité et l'étincelle amenée à provoquer la soudure serait alors absente [37].

Le soudage manuel à l'arc électrique et électrode enrobée concerne surtout les postes de tuyauteurs pour des tubulures de diamètre et d'épaisseur importante. Conférant une bonne résistance mécanique aux soudures. Il convient aux aciers doux (enrobage de l'électrode type O), aux aciers faiblement alliés, aux aciers inoxydables et réfractaires, à la fonte grise, aux métaux non ferreux : nickel (après décapage à l'acide et neutralisation), cuivre et cupro-aluminium. Il est préféré au procédé TIG pour les soudures sur tuyauterie transportant du gaz, car il supprime le risque gaz lié à la présence du gaz protecteur.

La rapidité de sa mise en œuvre est aussi appréciable ; sous arc électrique la température idéale de soudage qui est atteinte rapidement reste stable tout au long du soudage. Sur le plan financier son intérêt réside aussi dans le coût minime et la simplicité du matériel mis en œuvre : onduleur, porte électrode, électrode, meuleuse, brosse. Néanmoins la technique de l'arc électrique n'est pas facile, elle nécessite une bonne maîtrise. Avec un appui constant de l'électrode enrobée. Ceci en maintenant une distance constante de 2mm avec la zone de fusion. Le métal d'apport est alternativement poussé puis tiré au niveau de la zone de soudure.

Ce type de procédé de soudage se pratique en général à l'extérieur, en effet il rend possible le soudage quelques soient les conditions météo, de température, de vent....C'est le procédé de soudage idéal par tous temps. Par contre, son utilisation en

atelier ou en lieu clos nécessite une aspiration directe indispensable ainsi que le port d'EPI adaptées. Car la production de fumées est importante, de même que la projection de particules métalliques. Ces fumées sont issues de la mise en fusion des différents métaux, base à souder, âme et enrobage de l'électrode. L'exposition aux risques des fumées de soudage (fièvre des métaux, irritation ORL avec enrrouement dès la première journée) projections de particules métalliques, UV et coup d'arc est important dans ce type de procédé de soudage [36,38, 39].

I.1.14.2 Avantages et inconvénients du soudage SMAW

- Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux.
- Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.
- Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V [40].

B.I.2. Les rôles et les caractéristiques des flux de soudage

I.2. Introduction

En soudage, l'énergie mise en œuvre pour constituer la liaison entre deux matériaux se présente sous forme de chaleur. L'augmentation de température s'accompagne, au delà d'une certaine limite, de modifications métallurgiques ou physico-chimiques nuisibles à l'intégrité du matériau. Ce principe de base élémentaire est à l'origine des nombreuses difficultés rencontrées lors de l'assemblage de pièces par ce procédé. Parmi les développements apportés depuis de nombreuses années pour pallier ces limitations inhérentes au soudage, l'utilisation de flux en est une solution [1]. Cette contribution repose sur des principes thermodynamiques ou électriques variés. Un grand nombre d'éléments ou de composés, très souvent d'origine minérale, sont recensés et regroupés sous le nom de flux (ou flux- pâtes) [41]. La participation de ces éléments lors du soudage est une contrainte supplémentaire qui nécessite une étude approfondie des flux et de leur action.

I.2.1. Définition et rôles des flux

Une définition du "British Standard" décrit le flux de manière tout à fait générale [2]. Le flux est un matériau utilisé au cours du soudage, brasage ou souda-brasage pour décaper chimiquement les surfaces du joint, prévenant ainsi l'oxydation atmosphérique en réduisant les impuretés ou en les dégageant du bain. Dans le cas du soudage à l'arc, d'autres substances qui remplissent des fonctions spécifiques sont aussi ajoutées à la composition du flux. Cette interprétation est volontairement non-restrictive de manière à englober les différentes fonctions qu'un flux est susceptible de remplir. Selon les procédés pour lesquels il intervient, on peut lui attribuer un rôle métallurgique, électrique ou mécanique [3].

➤ Le rôle métallurgique des flux sur le cordon :

Le bain de fusion est confiné dans une atmosphère protectrice en oxygène et en azote pour assurer l'intégrité du matériau et une bonne tenue mécanique par l'absence de porosités ou de ségrégations dans le cordon. On distingue deux types de protection, la plus représentée industriellement est solide ; le bain de fusion est recouvert d'un laitier, souvent à base de rutil (oxyde de titane), de silice (oxyde de

silicium), de talc ou d'oxydes de fer. Ces éléments organiques créent une barrière physique inaltérable par les éléments de l'air ambiant mais aussi jouent le rôle d'un isolant thermique qui ralentit le refroidissement postopératoire, favorisant ainsi la formation d'une structure stable et le dégagement des gaz [1].

D'autres éléments tels que les carbonates ou les fluorures forment également une protection gazeuse en se décomposant, mais leur effet thermique est moins prépondérant.

Dans certains cas, les flux ont également une fonction d'agent décapant ou désoxydant ; des éléments interviennent dans la chimie du bain pour réduire les impuretés, d'une part, et éviter la dissolution de l'oxygène, d'autre part.

➤ **Le rôle électrique des flux sur l'arc :**

Les flux doivent assurer l'initiation et/ou la stabilisation de l'arc ; lors de leur dissociation, des composés ioniques interviennent dans "l'entrefer" pour favoriser la circulation électrique. En effet, l'échange entre l'électrode et la tôle est de nature thermo-ionique, la contribution du milieu est d'autant plus forte que celui-ci est chargé [1].

➤ **Les rôles mécaniques des flux sur le bain de fusion :**

L'apport d'éléments extérieurs contribue à la variation des propriétés volumiques et surfaciques du matériau. Certains composés tels que les oxydes de manganèse, de magnésium, le rutile, la silice et l'alumine s'associent avec le fluorure de calcium afin de modifier la température de fusion de l'alliage, l'intervalle de solidification ou la fluidité du métal liquide. Les éléments interviennent sur la tension de surface du bain de fusion qui caractérise le profil de la zone fondue. On note, enfin, l'importance de la solidification d'un éventuel laitier qui est directement liée à l'aspect en surface du cordon. Un laitier lisse évite la formation de protubérances ou de discontinuités marquées qui sont nuisibles pour des sollicitations mécaniques futures [1].

➤ **Le rôle physique des flux :**

Protéger le bain de fusion de l'oxygène et de l'azote contenus dans l'air ambiant afin d'éviter que les propriétés mécaniques du métal déposé soient dégradées

(désoxydation et dé-nitruration) et protéger le soudeur du rayonnement UV en masquant l'arc électrode et produire un gaz de protection sous l'effet de la chaleur de l'arc [40]. Il n'existe pas de flux universel pour lequel chacun des rôles est accompli. Suivant les propriétés du matériau et les paramètres opératoires, des mélanges sont développés afin de répondre pleinement à une ou plusieurs fonctions [1].

I.2.2. Caractéristiques des flux

Le flux forme le laitier qui, une fois déposé, protège la soudure contre l'oxydation pendant le processus de solidification et de refroidissement. Certains éléments contenus dans le flux facilitent aussi l'enlèvement du laitier, en affectant son adhérence au cordon. La nature du flux a une influence sur la pénétration et le taux de dépôt. Selon le flux sélectionné, on peut accroître aussi les positions de soudage possibles, l'apparence et la composition du cordon, l'intensité du courant nécessaire et les propriétés mécaniques du cordon de soudure. On reconnaît généralement trois types de flux (basique, rutile (ou acide) et cellulosique) (Tab I.3) [40].

Tableau I. 3. Caractéristiques générales des flux

Propriété ou condition d'application	Basique	Rutile	Cellulosique
Profondeur de pénétration	2	3	1
Passes de remplissage	2	1	3
Aspect du cordon	2	1	3
Facilité d'amorçage	3	1	2
Facilité d'exécution à plat	2	1	3
Facilité d'exécution /autres positions	1	2	3
Faible teneur en humidité	1	2	3
Soudabilité sur aciers trempés	1	2	3
Propriétés mécanique (en général)	1	3	2
Disponibilité pour le soudage d'aciers allés	1	non	2
1= excellent 2=bien 3= passable			

I.2.3. Types d'enrobage (flux)

Selon les réactions intervenant dans le bain de soudure, on ramène les différents types d'enrobage à cinq grandes classes qui, du fait de certains composants, présentent chacune des caractéristiques majeures (NF A 81-300) et dont les plus importantes sont [42,43] :

- **R** : rutile
- **A** : acide
- **C** : cellulosique
- **B** : basique
- **O** : oxydant
- **V** ou **S** : autres types ou spéciaux [44].

Pour retenir facilement ces lettres utilisez ce terme mnémotechnique (Tab I.4) : « COBRA » [45].

Tableau I.4 . Les différents types d'enrobage (flux) [44].

Enrobage	Constituants	Caractéristiques	Domaines d'utilisation
Rutile	Principalement composé de : -Bioxyde de titane TIO ₂ -Cellulose -Ferro-alliages FeMn -Spath fluor -Silicate de fer	Caractéristiques : -Facile utiliser -Tension d'amorçage faible U _o ≥ volts- pole -Fusion douce -Bonnes caractéristiques mécaniques Soudage en toutes positions -Enrobage généralement Semi-épais	Serrurerie, charpente, légère, menuiserie métallique, entretien, chantier.
Basique	-Carbonate de chaux, de calcium ou de Potassium -Ferro-alliages Mn ,Ti, Cr, Si -Spath fluor -Silicates -Poudre de fer pour les électrodes	-Excellentes caractéristiques mécaniques -Très bonne protection du bain de fusion -Soudage en toutes positions -Sauf vertical descendant PG -Tension d'amorçage forte U >60 volts –pole -Taux d'hydrogène très faible -Etuvage indispensable	Soudage des aciers au carbone et faiblement alliés, assemblages de haute qualité soumis à des sollicitations mécaniques importantes, structures spatiales , chaudières , construction navale , mécano-soudure
Cellulosique	-Cellulose -Bioxyde de titane TIO ₂ -Ferro-alliages -Silicates -Aluminium	-Particulièrement réservé soudage en vertical descendant PG -Enrobage mince et très volatile qui laisse peu de laitier - Tension d'amorçage volts –pole -Bonnes caractéristiques mécaniques -Demande une intensité Légèrement plus forte qu' en rutile	L'enrobage cellulosique est spécialement élaboré pour le soudage en position et plus Particulièrement en PG de tôlerie , tuyauterie , chantier et serrurerie , Quand l'esthétique et la finesse du cordon sont nécessaires : ferronnerie , serrurerie menuiserie métallique
Oxydant	-oxyde de fer -Oxyde de Mn , Ti	-Uniquement réservé au travail à plat -bonne apparence du cordon -tension d'amorçage U _o ≥ 50 volte –pole	Réservé aux travaux de tôlerie, serrurerie , il est de moins en moins utilisé .
Acide	-Oxyde de fer -Oxyde de Mn -Mn, Si -Ferro-alliages	-Très bon rendement 160 à 200% -Soudage en (PA)ou (PB) -Cordon de bel aspect -Tension d'amorçage U _o ≥ 60 -Volts pole +ou- -Etuvage nécessaire	Soudage à plat BW , PA et en angle FW ,PB, de tôlerie type de construction navale et grosse chaudronnerie Uniquement sur aciers non allés ou faiblement alliés

Tableau I.5. Différents types de l'épaisseur de l'enrobage (flux)[44] .

Ø D(diamètre)	Enrobage mince	Enrobage semi –épais	Enrobage épais
1.6	25A	30	35
2	40	50	55
2.5	60	70	75
3.15	95	105	115
4	130	150	160
5	175	190	200
6.3	230	250	275

Chaque type d'enrobage (pour un diamètre donné) nécessite une intensité comprise entre l'intensité minimale (instabilité de l'arc) et l'intensité maximale (échauffement excessif de l'électrode). Le Tableau I.6 ci-dessus donne des valeurs moyennes. I en A. de l'épaisseur des pièces à souder :

Tableau I.6. Valeurs moyennes de l'épaisseur des pièces à souder [44].

Epaisseur	Diamètre						
	Ø1.6	Ø2	Ø2.5	Ø3.15	Ø4	Ø5	Ø6.3
1	25						
2	35	45	55				
3		60	70	90			
5			90	110	130	160	
6				125	140	160	
8				130	150	170	
12					170	200	250
15					180	210	270
25					200	230	320
50						250	350
80						250	350
100						250	350

I.2.4. Composants des enrobages (flux) :

- a) La composition exacte des flux est généralement connue des fabricants seulement. Cependant, certains éléments s'y retrouvent fréquemment et remplissent une fonction particulière (Tab I.7).

Tableau I.7. Éléments entrant dans la composition des flux [40].

Elément	Principaux rôles
aluminium	Désoxydant
Calcium	Procure la protection gazeuse et forme le laitier
Carbone	Augmente la dureté et la résistance à la traction
Chrome	Augmente la dureté et la résistance à la corrosion
Fer	Est la base des alliages ferreux
Manganèse	Désoxydant, empêche la fissuration à chaud
Molybdène	Augmente la résistance à la traction, y compris à chaud.
Nickel	Améliore la résilience, la résistance à la corrosion.
Potassium	Stabilise l'arc et forme le laitier
Silicium	Désoxydant, forme le laitier
Sodium	Stabilise l'arc et forme le laitier
Titane	Désoxydant et dénitrurant, forme le laitier
Zirconium	Désoxydant
Vanadium	Augmente la résistance à la traction.

b) Les compositions chimiques des enrobages (flux) présents sont :

- **Le rutile** : De couleur brune ou noire, elle permet un arc stable et lisse.
- **La chaux carbonate de calcium** : Composé important des tiges à bas hydrogène. Elle enlève les impuretés permettant un dépôt plus pur de métal. Elle est utilisée dans les enrobages basiques; elle peut être remplacée par des carbonates de magnésium.
- **La cellulose** : Sert de base au mélange. Ses fibres retiennent le mélange, facilite l'extrusion et sa combustion produit du CO₂ qui empêche l'oxydation.
- **Le ferromanganèse** : Un mélange de manganèse à 80% avec de la chaux; sert à enlever l'oxygène de l'atmosphère en le transformant en oxyde qui passe dans le

laitier au lieu d'aller dans le métal d'apport. Le manganèse améliore les propriétés mécaniques du métal en annulant l'effet du soufre en trace dans le métal d'apport.

- **Les oxydes de fer (magnétites, hématites et autres) :** Utilisés pour faire des laitiers lourds pouvant retenir en solution solide plusieurs oxydes formés dans la soudure. Utilisés dans les enrobages acides.
- **Le silicate de sodium :** Avec de l'eau, il forme un liquide visqueux qui sert de liant aux composés.
- **La poudre de fer :** Dans des proportions de 10 à 50% dans l'enrobage, il stabilise l'arc et se dépose comme le métal d'apport, augmentant le taux de dépôt et améliorant l'apparence [46].

I.2.5. Caractéristiques des gaz protecteurs

Les gaz servent généralement à protéger le bain de fusion de l'air ambiant, notamment en évitant le phénomène d'oxydation.

On utilise différents types de gaz dont les gaz neutres (comme l'argon ou l'hélium) et les gaz actifs (comme le gaz carbonique (CO₂), l'hydrogène (H₂) ou l'azote (N)), chaque gaz ayant des propriétés spécifiques (Tab I.8). Les gaz neutres sont inertes (ne réagissent pas chimiquement avec d'autres éléments) et ont notamment l'avantage de neutraliser les émissions de vapeurs toxiques causées par certains procédés (comme le GTAW).

Tableau I.8. Propriétés de différents gaz de protection [40].

Gaz	Propriétés du gaz protection
Argon (Ar)	-Potentiel d'ionisation bas -Permet de souder avec une forte intensité (à 80 % et plus) -Beaucoup de soufflage de l'arc -Peu de projections -Pénétration étroite -Bonne stabilité de l'arc
Hélium (He)	- Potentiel d'ionisation élevé (haute tension) -Stabilité de l'arc moins grande qu'avec l'argon -Cordon de soudure large -Bon mouillage avec des plaques épaisses d'aluminium
Gaz carbonique (CO₂)	-Se mélange à l'argon (à un maximum de 25%) -Bonne densité de soudure -Peu de soufflage de l'arc -Beaucoup de projections -Grande surépaisseur du cordon -Bonne mouillage du cordon -Soluble dans les métaux en fusion - Oxydant et carburant (il forme de l'oxygène (O ₂) et du monoxyde de carbone(CO) : ces deux gaz réagissent avec les métaux libérés dans la fumée.) -Diminue la stabilité de l'arc . -S'utilise seulement avec l'acier au carbone et faiblement allié. - Ne s'utilise qu'avec les procédés GMAW , FCAW ou MCAW.
Hydrogène (H)	-Soluble dans les métaux en fusion -S'emploie avec l'argon et l'acier au inoxydable . -Réducteur
Oxygène (O)	-Bon mouillage pour le soudage de l'acier -Très soluble dans les métaux en fusion -Peut diminuer les éléments d'alliage dans l'acier. -Se combine à l'argon (à un maximum de 5%)

Les gaz de protection influent, notamment, sur les propriétés suivantes d'une soudure :

- La composition chimique
- Les propriétés mécaniques
- Le profil du cordon de soudure (pénétration et surépaisseur)
- La compacité
- Le mouillage
- La présence ou l'absence d'oxydation de surface

I.2.6.Applications de flux

La première utilisation des flux concerne des revêtements de protection en brasage [4]. Depuis, les flux ont contribué au développement de nombreux procédés de soudage. En particulier, ils sont à l'origine du procédé de soudage à l'arc submergé (dans les années 1930). Ils peuvent également être disposés sous forme d'enrobage ou de fourrage du métal d'apport [1], respectivement, pour les procédés de soudage à l'arc avec électrode enrobée et MIG-MAG (Fil fourré).

➤ Soudage à l'arc avec électrode enrobée

Le cordon est obtenu à partir d'un arc électrique s'établissant entre les pièces à souder et une électrode fusible. Le montage est réalisé de telle manière que les électrons circulent de la tôle vers l'électrode, c'est à dire en polarité indirecte [1].

I.3. Métaux d'apport

Le métal d'apport provient généralement d'une électrode enrobée (pour le procédé SMAW), d'un fil-électrode (dans le cas des procédés GMAW, FCAW et MCAW) (Fig I.9) ou d'une baguette (procédé GTAW). La classification des métaux d'apport permet de connaître leur résistance à la traction, leur composition chimique, la résilience du métal déposé et les positions de soudage possibles [40].

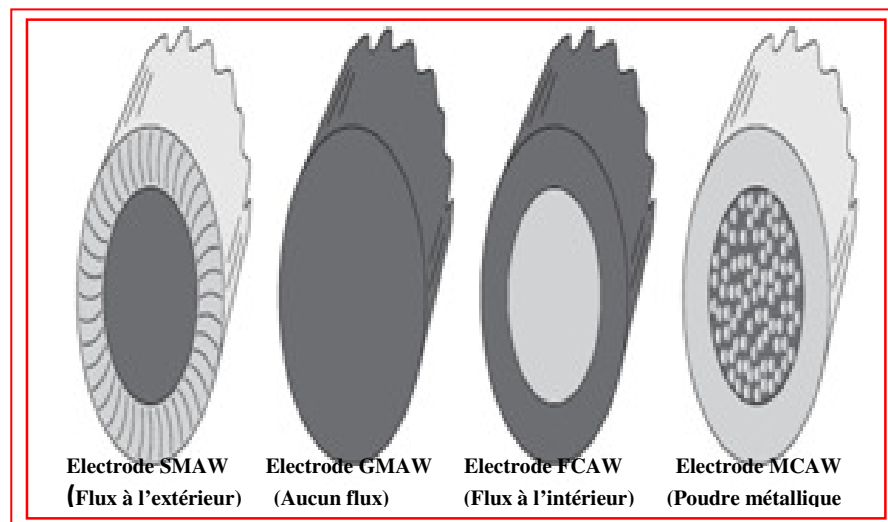


Figure I.9 : Comparaison des électrodes et des fils-électrodes pour les procédés SMAW, GMAW, FCAW et MCAW [40].

I.3. 1.Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport

Le Tableau I.9 présente certains des principaux facteurs à considérer lors du choix d'un métal d'apport [40].

Tableau I.9. Principaux facteurs influant sur le choix d'un métal d'apport [40].

Facteur	Impact sur le choix d'un métal d'apport
Composition du métal de base	On recherche un métal d'apport de même nature.
Dimensions de l'assemblage	Pour les très gros assemblages, les taux de dépôt doivent être élevés.
Genre de courant disponible	Plusieurs électrodes sont conçues pour le courant continu.
Position du joint à souder	En fonction de la fluidité du métal d'apport
Propriétés requises pour le cordon de soudure	Absence de fusion d'hydrogène (surtout pour l'acier). On considère aussi le nombre de passe, le diamètre de l'électrode et l'intensité de courant.

I.3.2.Normalisation des métaux d'apports

Le Tableau I.10. Ci-dessous donne des Normalisations des métaux d'apport [47] :

Tableau I.10. Normalisations des métaux d'apports.

Normes AWS pour Métaux d'Apport	
AWS A5.1	Spécification pour électrode en acier au carbone enrobée pour le procédé SMAW .
AWS A5.2	Spécification pour fil en acier au carbone et faiblement allié pour le procédé de soudage par oxyacétylène.
AWS A5.3	Spécification pour électrode en aluminium et alliages d'aluminium pour le procédé SMAW.
AWS A5.4	Spécification pour Electrodes en Acier Inoxydable Enrobées – Procédé SMAW.
AWS A5.5	Spécification pour Electrodes en Acier Faiblement Allié Enrobée - Procédé SMAW.
AWS A5.6	Spécification pour Electrodes en cuivre et alliages de cuivre Enrobées pour soudage à l'arc.
AWS A5.7	Spécification pour fils et électrodes en cuivre et alliages de cuivre.

I.4. Caractéristiques du couple flux / électrode (enrobée)

Une électrode enrobée se présente sous la forme d'une baguette (d'où les expressions courantes de baguette de soudage et de soudage à la baguette) comportant une âme métallique conductrice et un enrobage composite généralement non conducteur (Fig I.10). L'électrode doit correspondre aux matériaux et aux épaisseurs à souder, mais également aux caractéristiques métallurgiques et mécaniques que l'on désire pour les soudures. C'est pourquoi il en existe un grand nombre de types différents finement répertoriés et normalisés (NF A 81-300).

On donne ci-après quelques données générales concernant l'âme métallique et son enrobage [14].

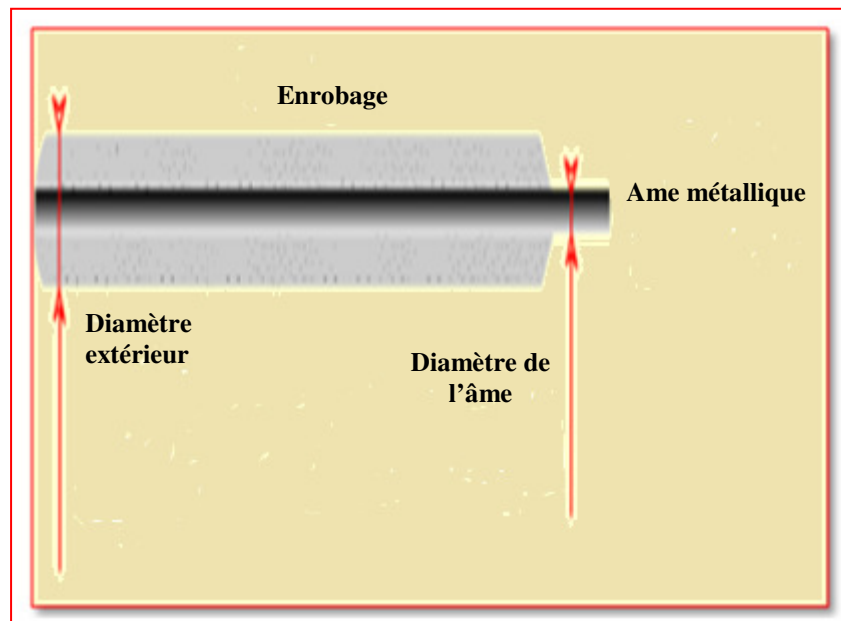


Figure I.10. Schéma d'une électrode enrobée [35,48].

I.4.1. Choix des électrodes

Le choix des électrodes est conditionné par [35]:

- La nature et les caractéristiques du métal à souder.
- Les facilités d'exécution du travail.
- Les propriétés d'enrobages.
- Les facteurs d'ordre économique.

Une fois la nature de l'acier fixée, le soudeur se trouve en présence d'une grande variété d'électrodes qui se distinguent par de nombreux facteurs dont les principaux peuvent être résumés ainsi :

- Nature du courant (alternatif ou continu).
- Postes dont on dispose (tension à vide).
- Position de soudage.
- Faciliter d'amorçage.
- Pénétration.
- Forme du cordon
- Facilité d'enlèvement du laitier.
- Caractéristiques du métal déposé

I.4.2. Classification des électrodes

Les normes pour les électrodes qui sont utilisées pour la soudure sont [49] :

- **EN 499** : Électrodes couvertes pour la soudure à l'arc électrique manuelle en métal des aciers de grain non allié et fin.
- **AWS A5.1** : Spécifications pour des électrodes d'acier du carbone pour la soudure à l'arc électrique protégée en métal.
- **AWS A5.5** : Spécifications pour les électrodes en acier faiblement alliées pour la soudure à l'arc électrique protégée en métal.

I.4.2.1. Classification électrodes enrobées

Les classifications Electrodes Enrobées en Acier au Carbone- Procédé SMAW sont indiquées dans le Tableau I .11 suivant :

Tableau I. 11. Classification des électrodes enrobées [47]

Partie 1 Type Electrode	Partie 2 propriété mécanique	Partie 3 position de soudage	Partie 4 : type d'Enrobage, courant et Pénétration			
			No	Enrobage , Laitier et (Utilisation)	Courant	Pénétration
E Electrode Enrobée	60 Rr = 60 ksi (430 N/mm ²) Re = 48 ksi (340 N/mm ²) A% min =22	1 Toutes positions	0	Cellulosique au sodium Laitier fin et fiable	DC+	Profonde
			1	Cellulosique au sodium Laitier fin et fiable	AC et DC+	Profonde
			2	Rutile au sodium Laitier dense	AC et DC+ ou-	Moyenne
			3	Rutile au potassium Laitier dense et fluide	AC et DC+ ou-	Moyenne
	70 Rr = 70 ksi (500 N/mm ²) Re = 58 ksi (240 N/mm ²) A% min =22	2 plat , angle H/V (en gouttière)	4	Rutile à poudre de fer Laitier auto éliminable	AC et DC+ ou -	Faible
			5	Basique au sodium Laitier basique lourd et friable	DC+	Moyenne
		4 Toutes positions (spécialement vers descendante)	6	Basique au potassium (Bas hydrogène) Laitier basique lourd et friable	AC et DC+	Moyenne
			8	Basique à poudre de fer (Bas hydrogène) Haut rendement	AC et DC+	Moyenne
			8M	Basique à poudre de fer (Bas hydrogène) « applications militaires»	DC+	Moyenne
			Pour plus de détails (symboles / exigences additionnels, résilience , analyse chimique , etc) voir Norme AWS A5.1			

D'autre part, on peut déduire quelques classifications d'électrodes enrobées (Tab I.12) ci-dessous.

Tableau I.12. Electrodes communes classifiées à EN499 et à AWS A 5.1/5.5 [49].

Description générale	EN 499	AWS A5.1 / 5.5
Électrodes cellulosiques	E 38 3 C 21 E 42 3 Z C 21 E 46 3 Z C 21 E 42 3 C 25 E 46 4 1Ni C 25	E6010 E7010-G E8010-G E7010-P 1 * E8010-P 1 *
Électrodes rutiles	E 38 2 R 12 E 42 0 R 12	E6013 E6013
Électrodes enduites de rutile	E 42 0 RR 13 E 42 0 RR 74	E6013 E7024
Électrodes basiques	E 42 2 B 12 H10 E 42 4 B 32 H5 E 46 6 Mn1Ni B 12 H5 E 55 6 Mn1Ni B 32 H5 E 46 5 1Ni B 45 H5* E 55 5 Z 2Ni B 45 H5* E 62 5 Z 2Ni B 45 H5*	E7016 E7018 E 7016-G E8018-C1 E8018-G E9018-G E10018-G
* P = électrodes de tuyauterie avec désignation spéciale, * Electrodes à bas H (hydrogène) sens de soudage : descendant		

Le Tableau I.13. Correspondance des normes pour électrodes enrobées [47,50].

Type D'électrode	NF (Française)	AWS (Américaine)	DIN (Allemande)	BS (Anglaise)	EN (Européenne)	ISO (Internationale)
Aciers non alliés SMAW	NF A81.309	AWS A5.1	DIN 1913	BS 639	EN 499	ISO 2560
Aciers HLE SMAW	NF A81.340	AWS A5.5	DIN 8529		EN 757	
Aciers C/Mo et Cr/Mo SMAW		AWS A5.5	DIN 8575		EN 1599	ISO 3580
Aciers inoxydables SMAW	NF A 83-343	AWS A 5.4	DIN 8556	BS 2926	EN 1600	ISO 3581

I.4.4. Les différents types des électrodes enrobées

Les différents types des électrodes enrobées pour le procédé SMAW sont :

- **Enrobage Acide (A) :** Cet enrobage contient du ferro-manganèse, de l'oxyde de fer et de l'oxyde de manganèse. Le laitier est très fluide et abondant. Cet enrobage convient pour le soudage à plat et en gouttière. Il convient mal au soudage en position. La soudabilité du métal de base doit être bonne sinon le métal constituant le joint est sensible à la fissuration à chaud pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression).
- **Enrobage Basique (B) :** Cet enrobage contient principalement du spath-fluor et du carbonate de calcium. Il fournit un laitier calcaire dont l'effet désulfurant est favorable au soudage des aciers ferritiques diminue le risque de fissuration à chaud du métal déposé. Ces électrodes nécessitent dans la plupart des cas un étuvage effectué au minimum à 350°C pendant 2 heures sauf prescriptions contraires du fournisseur. La majeure partie de ces électrodes fonctionnent en courant continu avec une polarité inverse (+ à l'électrode). Certaines peuvent fonctionner en courant alternatif à condition d'utiliser un générateur de soudage avec une tension à vide suffisamment élevée $U_0 > 60 \text{ V}$.
- **Enrobage Cellulosique (C) :** L'enrobage contient une grande quantité de substances organiques comme la cellulose. Il donne peu de laitier mais un souffle à forte teneur en CO_2 . Celui-ci favorise le soudage rapide en position descendante et améliore la pénétration. Comme pour les électrodes basiques, les cellulosiques fonctionnent en courant continu en polarité inverse. La tension à vide doit être au moins égale à 60 Volts. Pour les soudures à forte pénétration en position descendante.
- **Enrobage Oxydant (O) :** L'enrobage contient principalement des oxydes de fer et des oxydes de manganèse. Il correspond à des électrodes faciles à amorcer avec un laitier en général auto-détachable. Il s'utilise en courant continu ou alternatif pour des travaux ordinaires sur aciers doux. Les caractéristiques mécaniques du métal déposé étant très médiocres, il ne supporte aucune déformation de l'assemblage à chaud ou à froid.

- **Enrobage Rutile (R)** : Il contient une quantité importante d'oxyde de titane. Le laitier obtenu s'élimine facilement. Il permet de souder aisément en toutes positions en courant continu ou alternatif. Les caractéristiques du métal déposé sont bonnes lorsque les aciers de base sont de bonnes qualités et ont des teneurs en carbone ainsi qu'en soufre limitées [43,47, 51].

I.4.5. Exemples d'électrodes et de leur composition typique

D'autre part, nous pouvons déduire quelques exemples d'électrodes et de leur composition typique sont [46] :

- **E6010** : L'enrobage est blanc-gris. Un taux élevé de cellulose produisant du $\text{CO}_2 \gg \text{CO}$ et H_2O faisant enveloppe, peut être utilisé pour souder du galvanisé.
- **E6011** : L'enrobage est bas en cellulose et les matériaux ionie-sables comme les composés de potassium sont introduits pour stabiliser l'arc.
- **E6012** : De couleur brune. L'enrobage est composé de rutile, d'argiles, de silicium, de Fields par, peu de cellulose.
- **E6013** : Le même enrobage que 6012, plus de cellulose; il y a plus de rutile en pourcentage, des composés de potassium (titane et Fields par).
- **E7014** : Le même enrobage que 6012 et 6013 mais avec 302 en poids de poudre de fer.
- **E7015, E7016** : Bas hydrogène. Elles sont du type bas hydrogène utilisé pour les aciers durs à souder (avec plus de 0.3% de C ou faiblement alliés) qui ont tendance à fissurer. Ceci est dû à l'hydrogène contenu dans le métal d'apport et le métal à souder. À ce moment, il n'y a pas d' H_2 dans l'enrobage. Le composé principal est la chaux, les fluors par et des alliages ferreux pour désoxyder.

- **C7016** : Le même que 7015 mais contient des composés de potasse en plus.
- **C7018** : Très populaire. Mêmes composés que 7015 et 7016 avec haute teneur de poudre de fer (25 à 40% en poids).
- **E6020** : Enrobage noir ou rouge dépendant de l'oxyde de fer utilisé. Composé d'oxyde de fer, d'oxyde de manganèse et de composés de silicium. Il réabsorbera les oxydes contenus dans le métal d'apport. Il est délaissé pour des types à poudre de fer.
- **E7024, E6027** : L'enrobage est constitué de poudre de fer en pourcentage appréciable (plus de 30%). Ce métal se dépose comme du métal d'apport. L'enrobage est du même type de 6012, 6013. Le poids de l'enrobage est de 50%. La tige centrale est du même type que E6012.
- **E6027** : Enrobage similaire au 6020 avec haut pourcentage de poudre de fer, très fort enrobage, 50% de métal d'apport égal au E6010, E6012. Est remplacé par le bas hydrogène à poudre de fer comme E7028.
- **E7028** : Comme E7018, sauf l'enrobage est plus épais, 50% du poids; plus de poudre de fer, 50% du poids d'enrobage [45].

Conclusion

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

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Le soudage à l'arc l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique et la pièce à souder.

Le joint soudé comporte en trois parties : le métal de base, la ZAT et la ZF. Le flux forme le laitier qui, une fois déposé, protège la soudure contre l'oxydation pendant le processus de solidification et de refroidissement.

On reconnaît généralement deux types de flux (cellulosique et basique) pour le soudage des pipelines. Le métal d'apport provient généralement d'une électrode enrobée (pour le procédé SMAW). Selon les procédés pour lesquels il intervient, on peut lui attribuer un rôle électrique, métallurgique ou mécanique : un rôle électrique, assure la stabilité et la continuité de l'arc par son action ionisante et un rôle métallurgique, il permet d'apporter les éléments chimiques spéciaux d'addition nécessaires.

*Chapitre II : Techniques et Méthodes des
Caractérisations*

Chapitre II : Techniques et Méthodes de Caractérisations

Introduction

Cette partie de la thèse est consacrée à la démarche expérimentale. On y présente les procédures et les moyens expérimentaux mis en place à savoir l'analyse chimique quantitative et qualitative par une spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX), la spectrométrie par absorption atomique, la microstructure par la diffraction des rayons X (DRX), la microscope optique (MO), la microscope électronique à balayage (MEB/EDAX), et la Micro-dureté (HV). Ce chapitre est composé de :

- L'étude de l'effet de soudage à l'arc électrique utilisant des électrodes enrobées (SMAW) sur un acier à faible pourcentage de carbone (X 42) ainsi que l'influence des flux sur les joints soudés et l'étude des joints soudés avec les électrodes sans flux.
- La simulation expérimentale de deux types de flux : Flux Cellulosiques (E6010, E8010-P1) et Flux Basique (E 8018-G) en zone fondue (ZF), sur des éprouvettes d'acier X 42, afin de pouvoir étudier leurs conséquences sur la composition chimique, la microstructure et micro-dureté de l'acier étudié.

II.1. Le procédé de soudage à COSIDER BISKRA

Les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de COSIDER CANALISATION où deux tubes d'acier de nuance X42 ont été assemblés par soudage à l'arc électrique (SMAW) (Fig II .1).



Figure II.1. Assemblages de deux tubes d'acier X42 pour le procédé de soudage à l'arc avec des électrodes enrobées (SMAW).

Ce procédé utilise un appareillage qui comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode, un câble de liaison et un câble de masse. L'électrode enrobée est placée sur la pince porte-électrode qui est reliée au câble de sortie de poste de soudage tandis que le connecteur de pièce est quant à lui relié au générateur et placé sur la pièce à souder (Fig II.2).



Figure II.2. Appareillage de soudage des pipelines au niveau de COSIDER.

A noter toutefois que l'assemblage est effectué en plusieurs passes (soudage multi-passes). voir (Fig II.3).

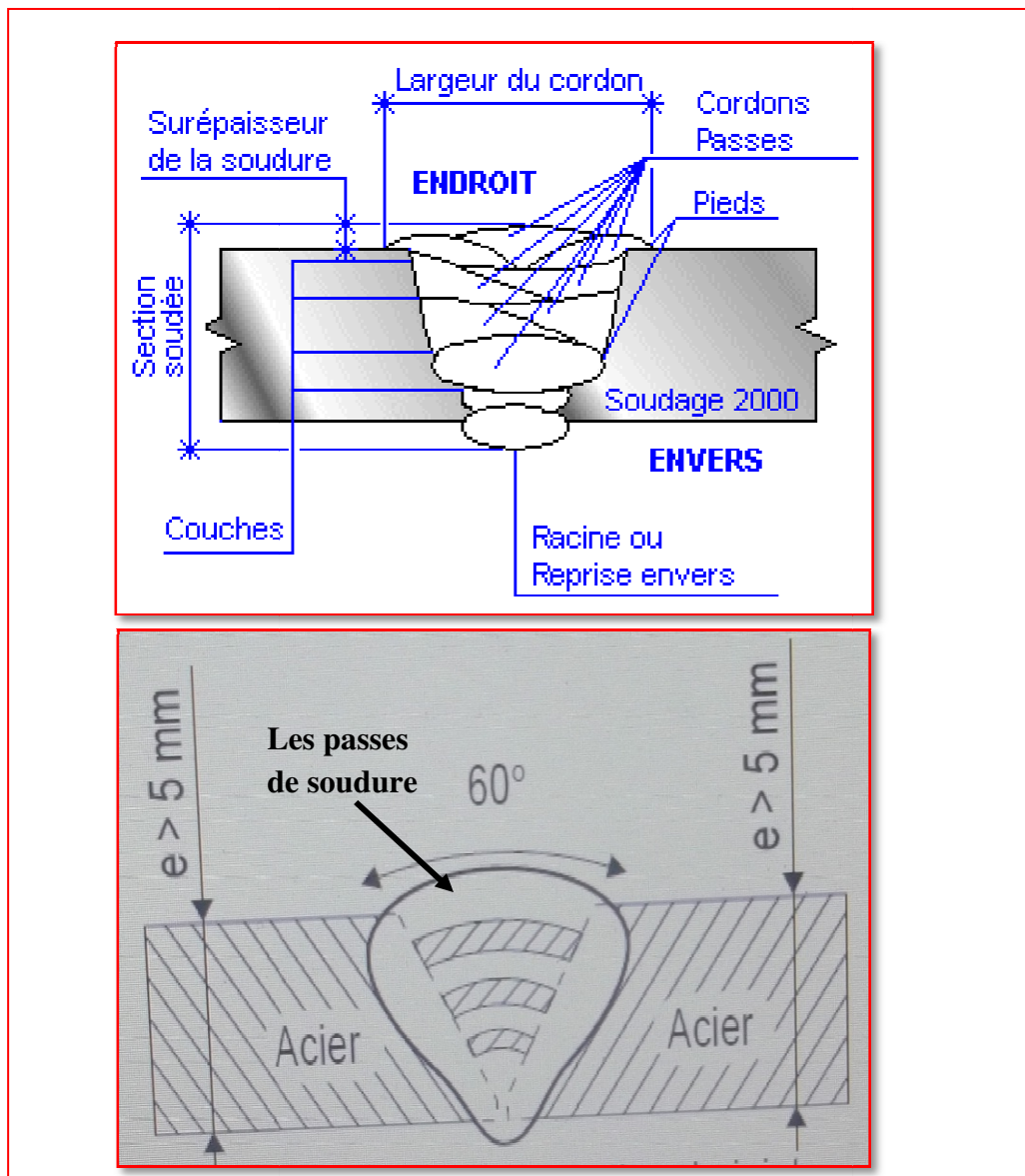


Figure. II.3. Enchaînement des passes de soudure [52,53].

II.2. Type de flux

On a utilisé trois types flux : (Flux cellulosique (E6010), Flux cellulosique (E8010-P1) et Flux basique (E8018-G))

Les compositions chimiques de constituants de base des flux sont présentées dans le tableau II. 1.

Tableau II.1. Compositions Chimiques des flux commerciaux (FA, FB et FC)
(Fiche technique de l'Entreprise COSIDER, Voir Annexe).

Flux	Pourcentage Wt %											
	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	C ₁₈ H ₂₀ O ₆	TiO ₂	MgCO ₃	CaCO ₃	CaF ₂	Ni ₂ O ₃	CrO ₂	MoO ₃
Cellulosique E6010(FA)	70-90	1-5	---	<5	<5	<10	<2	---	----	---	---	----
Cellulosique E8010-P1(FB)	70-90	1-5	< 2	----	<5	<5	<1	5-10	---	<2	----	<1
Basique E8018-G(FC)	60-90	1-5	<5	-	<5	<5	<1	5-10	4-15	<5	<9	<2

II.3. Identification du métal de base et du métal d'apport

II.3.1. Métal de base :

Le métal de base est un acier au carbone du type 5L grade X 42 selon la norme API.

Le tableau II .2. Illustre la composition chimique de cet acier.

Tableau II.2 .Composition chimique du métal de base X42 (acier faiblement allié et à faible pourcentage en carbone) (Fiche technique de l'Entreprise COSIDER Voir Annexe).

Eléments(%)	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu
Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	0.200	-	1.30	0.030	0.030	-	-	-	-
Coulée	0.177	0.29	0.85	0.003	0.010	0.06	0.06	0.013	0.150
Produit	0.18	0.29	0.85	0.003	0.010	0.06	0.06	0.013	0.150
Elément(%)	V	Al	Ti	Sn	Ca	N	B	Nb	CE
Min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Coulée	0.001	0.026	0.001	0.009	0.0013	0.0056	0.0006	0.0010	0.35
Produit	0.001	0.026	0.001	0.009	0.0013	0.0056	0.0006	0.0010	0.35

II.3.2. Métaux d'apports (les électrodes):

La composition chimique des électrodes (cellulosique et basique) utilisées sont rassemblées dans le tableau II.3 [54].

Tableau II. 3. Composition chimique des électrodes utilisées (Fiche technique de l'Enterprise COSIDER, Voir Annexe).

Eléments(%)	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	V	Ni
E6010	0.15	0.41	-	-	0.16	-	0.07	0.01	0.09
E8010-P1	0.15	0.71	0.008	0.013	0.21	-	0.05	0.01	0.68
E8018-G	0.05	0.87	0.013	0.006	0.32	0.039	0.03	0.01	0.71
Eléments(%)	Al	Ti	Mo	Nb	Co	B	W	Sn	Mg
E6010	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-
E8010-P1	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-
E8018-G			0.01						

II.3.3 Conditions de soudage

La technique et les paramètres de soudage sont résumés dans les deux tableaux II.4 et II.5.

Tableau II. 4. Procédure de soudage SMAW Ø 8 [52,55].

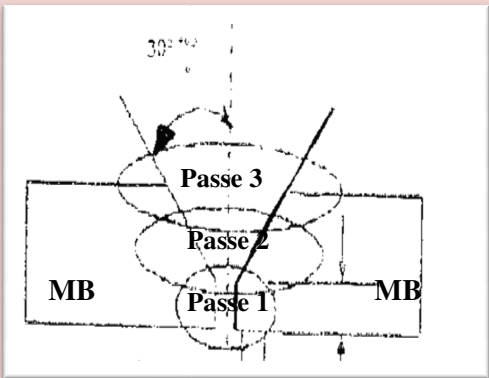
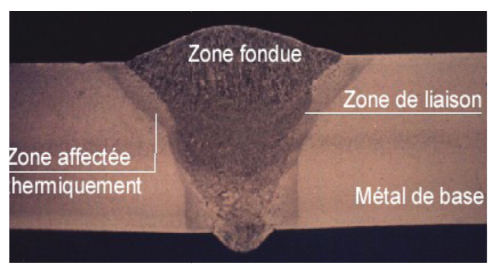
Procédé	API.1104 soudage à l'arc manuel Électrode enrobée	Configuration du joint
Matériaux	API. Spec.5L.X42	
Diamètre	8" 5/8(219.1mm)	
Epaisseur	6.4mm (-8%+19.5%)	
Métal d'apport	Spec. AWS. A5.1 E6010 1 ^{ère} Passe E8010-P1 et E8018-G autres passes	
Position	5G. Fixe.,	
Sens	1 ^{er} passe V Montante Autre passe V Descendante	
Nombre de soudeurs	Un (01) ou deux	
Préchauffage	Brûleurs à gaz propane à 100-120°C Contrôle au crayon thermochrome	
Type de joint	Chanfrein API Standard en V	
Alignement Enlèvement du clamp	Clamp intérieur autopropulseur ou extérieur Après exécution 1ere passe à 100%(clamps intérieurs) Après exécution 1ere passe à 60%(clamps extérieurs)	
Nettoyage Laps de temps entre passes	Meule / Brosse électrique 05 min max. entre 1ere passe et 2 éme passe 72 heures maxi pour exécution de passe de finition	

Tableau II.5. Paramètres des passes [52].

Paramètres	Passes		
	1 ^{ère} Passe	2 ^{ème} Passe	3 ^{ème} Passe (finition)
Type d'électrode	E6010	E8010	E8010
Diamètre d'électrode (mm)	2.5-3.25 mm	3.25-4 mm	4-4.8 mm
Polaire	CC(-)	CC(+)	CC(+)
Tension (V)	25-27	27-29	26-28
Intensité (A)	105-110	130-140	140-160
Vitesse de soudage (mm/s)	01+10	9+15	10+15

Information particulières :

1. Configuration du joint (ci –joint)
2. Consommable selon SFA 5.1 AWS E6010 et SFA 5.5 AWS E8010-P1
3. Meulage à blanc entre 1 et 2^{ème} passe.

II.4. Préparation d'échantillons en poudre des flux et des laitiers

Les échantillons ont été préparés en utilisant un broyeur manuel (Mortier Céramique), une presse manuelle de type SPECAC (Fig II.4a) après cela les poudres ont été aggloméré sous forme de pastille de 32 mm sans l'ajout d'un liant (Fig II.4.b, c).



Figure II.4. Préparation d'un échantillon en poudre des Flux et des laitiers (a : Presse, b : Mortier , c : Echantillons sous forme de pastille)

II.5. Spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX)

La FRX est une méthode d'analyse spectroscopique de la matière , sur la base du principe de la fluorescence des rayons X. Elle est l'une des méthodes les plus couramment utilisés pour la détermination qualitative et quantitative de la composition élémentaire d'un échantillon, c'est une technique non destructive (Fig II.5).

ZSX Primus II. Spectromètre de tube par-dessus à fluorescence des Rayons X à longueur d'onde propagée (WDXRF).

- **Rigaku ZSX Primus II :** délivre une rapide identification et détermination quantitative des éléments atomiques majeurs et mineurs , du béryllium(Be) à l'uranium (U) , dans une grande variété de types d'échantillons .
- **Conditions analytiques :**

Les conditions analytiques utilisées dans l'appareil FRX sont les suivants :

- ✓ Type d'échantillon : Oxyde Powder
- ✓ Gamme d'analyse : B-U.
- ✓ Diamètre : 20mm (laitier) et 30mm(Flux).
- ✓ Temps de mesure : Normal (laitier), Long(Flux)

Les analyses en spectrométrie de fluorescence des rayons X ont été effectués au Laboratoire du Centre de Recherche Scientifique et technique en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) Bou Ismaïl- Algérie.



Figure II.5. Appareil de spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) de type Rigaku ZSX Primus II.

II.6. Prélèvement de l'échantillon soudé

La procédure de découpage dépend de nombreux facteurs : nature et caractéristiques du matériau, volume des pièces, nombre d'échantillons ou pièces à préparer, etc.

La découpe des échantillons a été réalisée en deux étapes et ce dans le sens transversal de la soudure.

➤ **Première étape :**

On prélève un échantillon de (30*20 cm) de longueur comme il est illustré ci-dessous (Fig. II.6) :

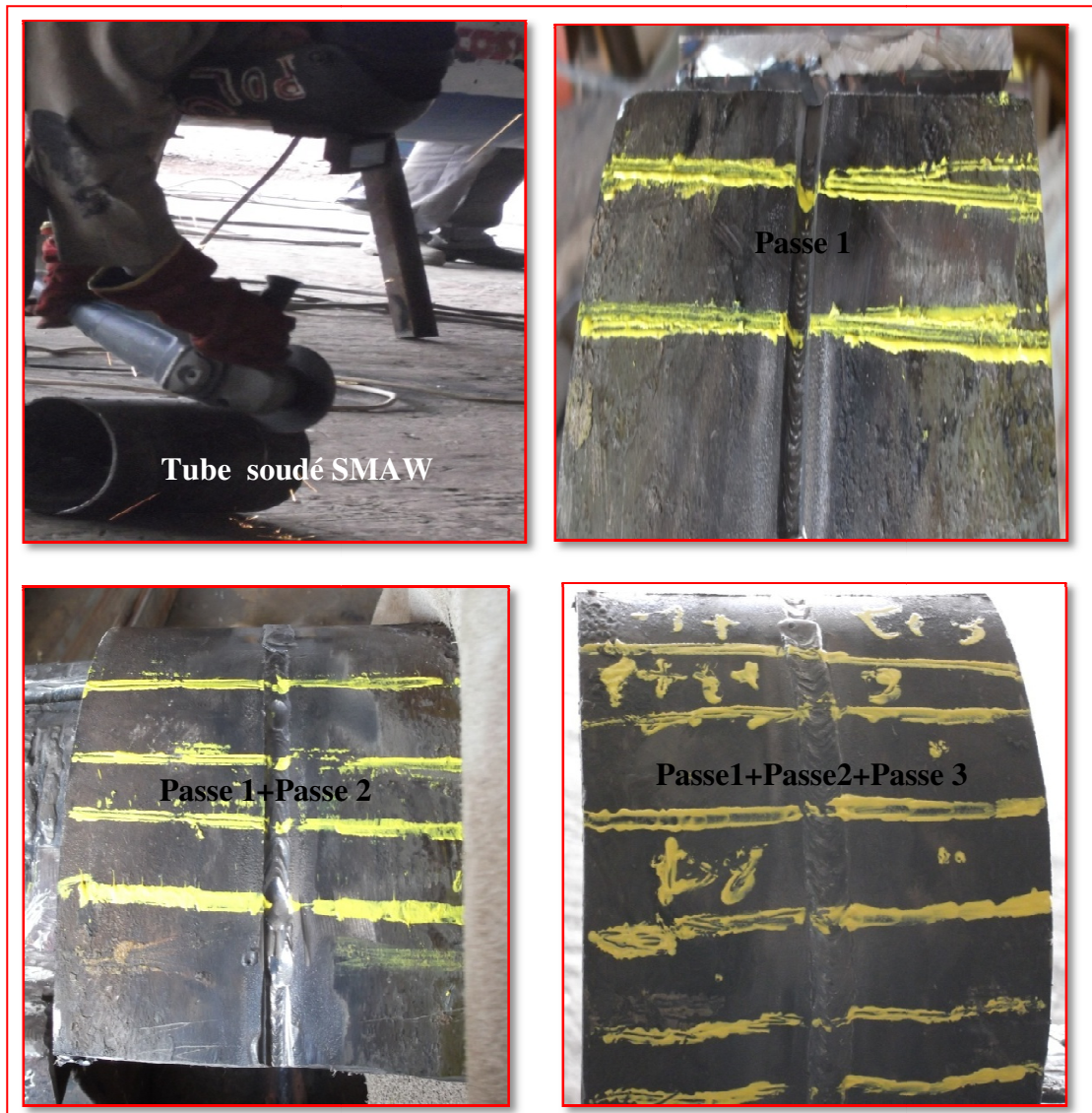


Figure II.6. Etapes de prélèvement du premier échantillon.

➤ **Deuxième étape :**

On découpe le premier échantillon en plusieurs morceaux de (4cm) de longueur à l'aide d'une scie électrique, en versant de l'eau pour éviter l'échauffement et la modification structurale de l'échantillon. (Fig. II.7).

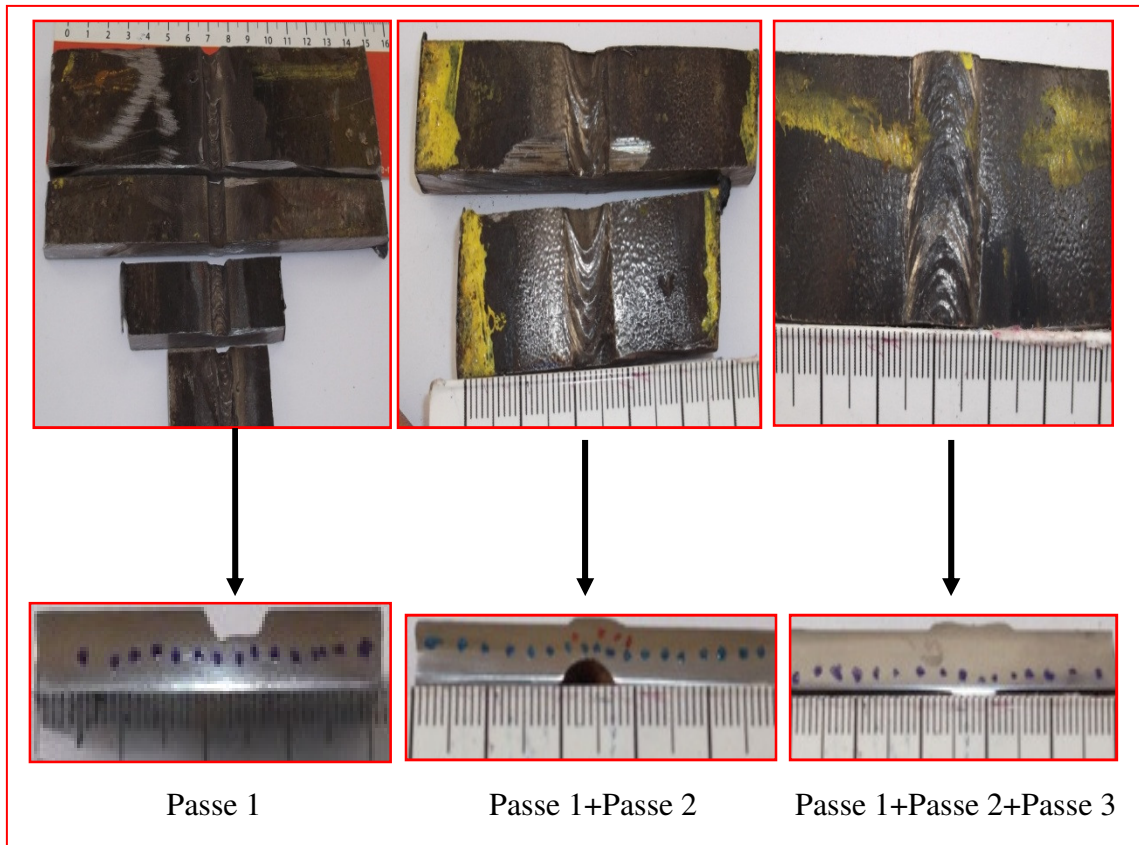


Figure. II. 7. Echantillons de l'étude

Le polissage est effectué au Laboratoire de Génie Mécanique au sein de la Faculté des Sciences et de Technologie à l'Université Mohammed Khider, Biskra sur une polisseuse de type PHOENIX ALPHA de marque ANALIS (Fig. II.8).

Les faces de ces échantillons soudés ont été polies aux disques abrasifs de granulométries (grades 120, 180, 400, 600, 800, 1200 puis 2000) avec lubrification à l'eau, puis à une phase de finition au disque en feutre avec l'addition du lubrifiant et de la pâte diamantée de granulométrie 6 μm , dans le but d'obtenir des faces miroir. A la fin, les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée et séchés. Après polissage, les échantillons soudés sont attaqués chimiquement pour révéler les macros, et les microstructures des différentes zones.

Pour révéler la microstructure, l'échantillon est attaqué par un réactif d'attaque très utilisé pour les aciers qui est le **Nital**. C'est une solution composée de 96% d'éthanol et de 4% d'acide nitrique, la durée d'attaque varie entre 20 et 45 secondes, et ceci selon l'état initial de l'échantillon soudé.



Figure II.8. Polisseuse PHOENIX ALPHA d'ANALIS

II.7. Spectrométrie par absorption atomique :

Afin de mieux identifier et vérifier la composition chimique réelle des échantillons utilisés pour la soudure et établir les proportions des éléments d'alliage se trouvant de part et d'autre de la zone soudée après soudage SMAW.

On a utilisé une spectrométrie de type (SPECTRO, D5034 013) assisté à un micro-ordinateur (Fig II.9).

Les Analyses par Spectrométrie par Absorption Atomique ont été effectuées au Laboratoire de la société BCR, Ain El Kebira, Sétif.



Figure II.9. Spectrométrie (SPECTRO Analytical instrument).

II.8. Microscope optique :

La microscopie optique est la technique de base dans notre étude. Cette technique nous permet d'observer les différentes structures et phases des aciers. L'appareil utilisé, est un microscope optique qui atteint des grossissements de 1000 fois de type (**Olympus BX J1M**) (Fig II.10).

La microscopie optique est effectuée au Laboratoire de Génie Mécanique au sein de la Faculté des Sciences et de Technologie à l'Université Mohammed Khider, Biskra.



Figure II.10. Microscope optique de type (Olympus BX J1M).

II.9. Microscope électronique à balayage MEB:

C'est une technique de microscopie électronique capable de visualiser des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons matière, un faisceau d'électrons balaye la surface de l'échantillon à analyser qui en réponse, réémet certaines particules de différents détecteurs permettent d'analyser ces particules et de reconstruire l'image de la surface. Dans la pratique les microscopes électronique à balayage actuels les plus conventionnels, c'est-à-dire équipés de détecteurs d'électrons secondaires permettent d'atteindre une résolution de l'ordre de 15 et 20 nm et un grossissement qui peut aller jusqu'à 300000 fois le max.

Pour les analyses, on a utilisé le microscope électronique à balayage (MEB) de type : **JEOL JSM-6390 LV** du Laboratoire de Génie Mécanique au sein de la Faculté des Sciences et de Technologie à l'Université Mohammed Khider, Biskra et le microscope électronique à balayage : **Quanta FEC 250** du Laboratoire de Centre

de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico- Chimiques (CRAPC) Bou Ismaïl- Algérie. (Fig II.11).



Figure II.11.Microscope électronique à balayage (MEB et EDAX).

II.10. Mesure de micro-dureté

Pour compléter l'essai des micrographies, une série de mesures de micro-dureté ont été effectuées sur les échantillons soudés. La Figure II .12 montre l'appareil de micro-dureté utilisé dans notre étude, des mesures micro-dureté Vickers (HV) déterminées sous une charge de 500g (HV0.5) pendant 15 secondes. Un profil de micro-dureté Vickers à été réalisé. Ce profil de dureté comporte le métal de base, la ZAT et la zone fondue comme le montre la figure. II.13.

La micro-dureté est effectuée au Laboratoire de Physique au sein de la Faculté des Sciences de la Matière à l'Université Mohammed Khider, Biskra.



Figure II.12 .Microduromètre Wolprt Wilson instruments

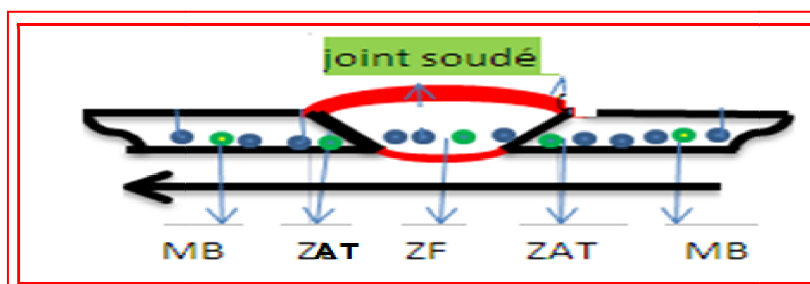


Figure II.13. Points réellement considérés pour la mesure de micro-dureté

II.11. Caractérisations structurales :

II.11.1. Diffraction des rayons X (DRX) :

On a utilisé le diffractomètre automatisé (D8 ADVANCE08), du Laboratoire de Rayons X au sein de la Faculté des Sciences et de Technologie à l'Université Mohammed Khider, Biskra. La diffraction des rayons X est caractérisé par la source de la radiation $\text{CuK}\alpha$, ayant une longueur d'onde de $1,541838 \text{ \AA}$, avec une tension

de 40 KV, un courant de 40 mA et une anticathode de cuivre en filtre de Nickel (Fig II .14) [46].

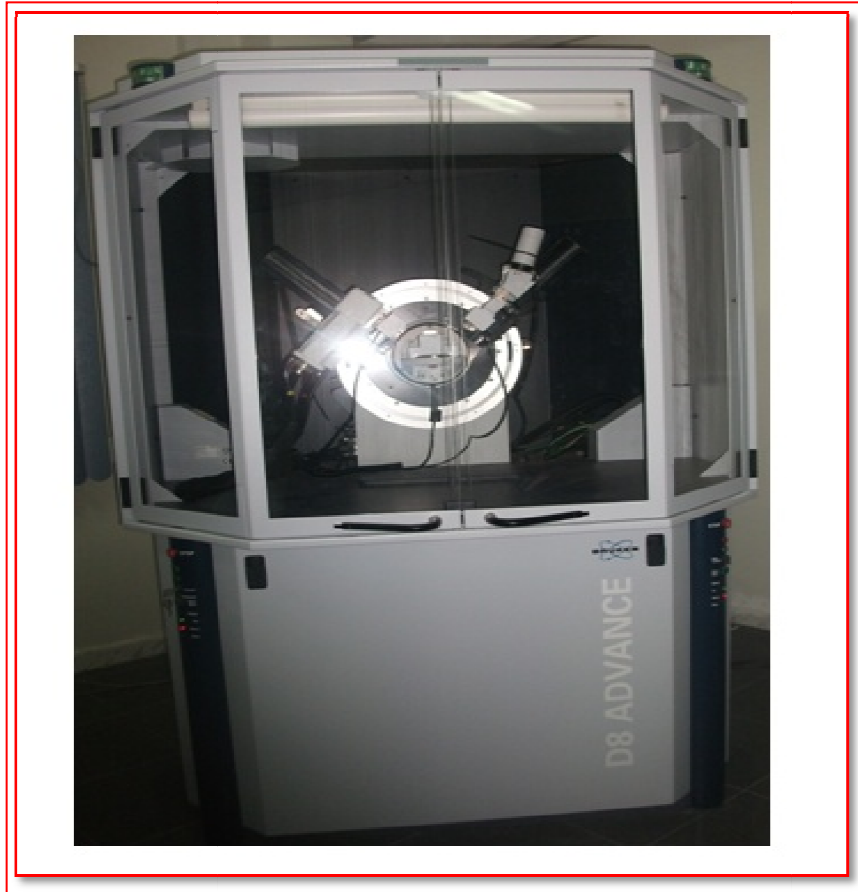


Figure II.14. Diffractomètre BRUKER D8 ADVANCE AXS (XRD).

Lors d'une analyse par cette technique, un faisceau de rayons X, émis par une source, est envoyé sur l'échantillon à analyser sous un angle θ et un détecteur reçoit le faisceau de rayons X diffracté par cet échantillon et enregistre l'intensité en fonction de l'angle de diffraction 2θ [56]. Le principe est présenté dans le schéma suivant (Fig II.15) :

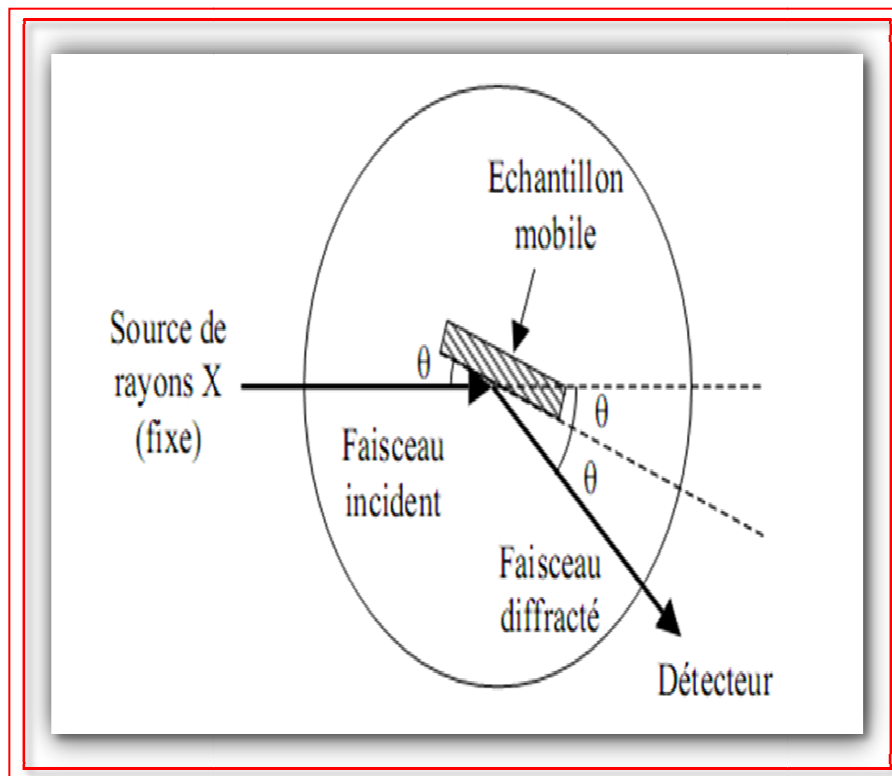


Figure II.15. Schéma le principe de travail du diffractomètre.

L'analyse des spectres de rayons X permet d'obtenir des informations sur :

- La ou les phases cristallines (position des pics);
- La taille des cristallites (largeur des pics à mi-hauteur);
- Les défauts d'empilement (forme de pics)
- L'orientation des cristallites (absence ou présence de réflexions).

Cette technique est donc particulièrement intéressante pour l'investigation structurale des matériaux polycristallins.

Un matériau polycristallin est formé d'une multitude de grains, chacun d'entre eux étant en fait un monocristal constitué d'un empilement régulier d'atomes. Cet empilement peut être décrit par des ensembles de plans cristallins définis par une distance d_{hkl} qui dépend des indices de MILLER. Cette distance d_{hkl} est mesurable par la diffraction des rayons X grâce à la loi de BRAGG [57].

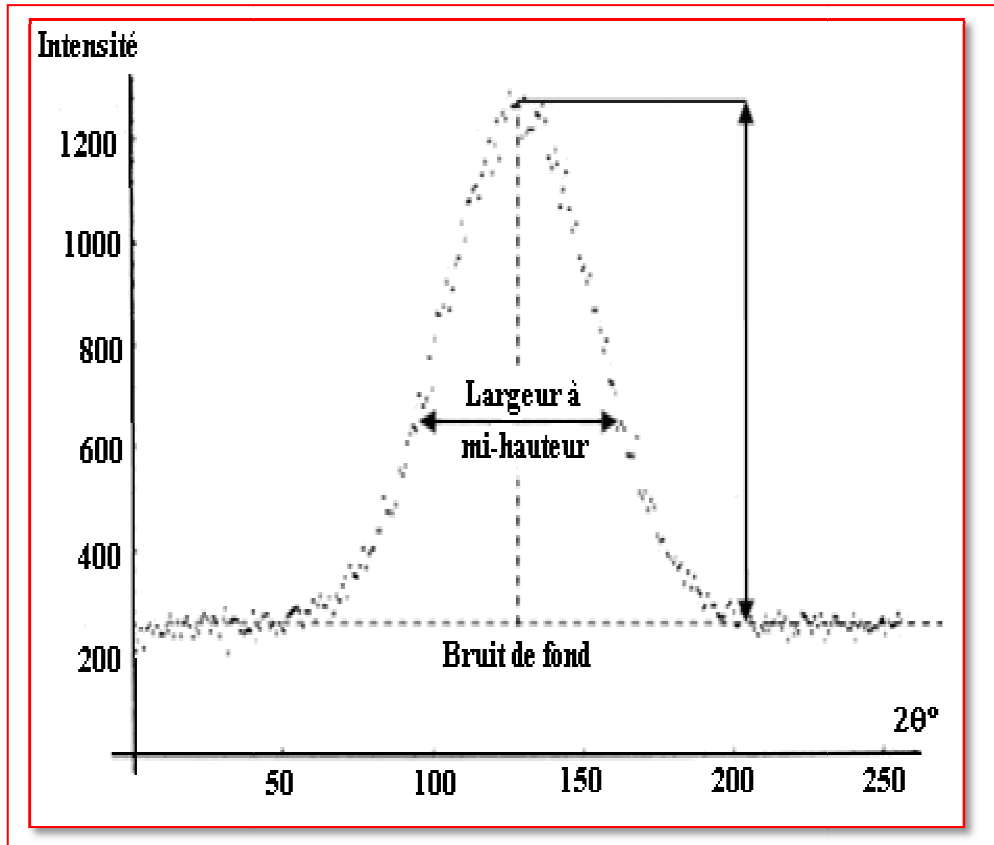


Figure II.16. Illustration d'un pic de diffraction.

Conclusion

En conclusion, les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de COSIDER CANALISATION où deux tubes d'acier X42 ont été assemblés par le procédé de soudage SMAW. Le soudage est effectué sur un acier API X42 en trois passes, avec ajout du métal d'apport relativement de même composition chimique. La composition chimique des flux utilisés est : enrobages cellulose E6010, E8010-P1 et enrobage basique E8018-G, avec des électrodes à faible teneur en carbone. Les conditions de soudure ne sont pas constantes. Pour la caractérisation des flux d'enrobage, des laitiers de métal de base, le métal d'apport et de la zone fondue, on a utilisé différentes techniques de caractérisation telles que le spectromètre de fluorescence des Rayons X (FRX), le spectromètre par absorption atomique, la microscopie optique (MO), la microscopie électronique à balayage (MEB et EDAX), la micro-dureté (HV) et la diffraction des rayons X (DRX).

Chapitre III : Influence des flux sur les joints soudés

Chapitre III : Influence des flux sur les joints soudés

Introduction :

Le chapitre III regroupe les résultats expérimentaux obtenus avec différentes techniques de caractérisation.

- **La première partie** regroupe les résultats obtenus par l'analyse chimique des soudures qui ont été exécutées par des techniques expérimentales telles que les deux types de spectrométrie (une Spectromètre de Fluorescence des Rayons X(FRX) et une spectrométrie par absorption atomique) et un équipement d'EDAX associé au MEB. On note que l'EDAX avait pour but d'étudier les compositions chimiques des différents flux utilisés avant et après le soudage de la zone fondue en multi-passes.
- **La deuxième partie** des résultats concerne l'analyse microstructurale des joints soudés d'acier X42 étudié par la microscopie optique (MO) et la microscopie électronique à balayage (MEB). Cette analyse est pour identifier les différentes phases de la zone fondue en multi-passes et l'effet des différents flux utilisés sur la zone fondue.
- **La troisième partie** est consacrée aux résultats obtenus par d'autres techniques expérimentales telles que la micro-dureté Vickers et la diffraction des rayons X(DRX). On note que le DRX avait pour but d'étudier les phases dans les différents flux utilisés avant et après le soudage.

III.1. Composition chimique des flux, des laitiers et de la zone fondue par la spectrométrie FRX, absorption atomique et par l'EDAX :

III.1.1. Composition chimique des flux et des laitiers par la spectrométrie FRX :

Les tableaux III. 1, 2 ,3 et 4 montre l'analyse chimique par FRX des éléments et leur oxyde pour les flux (FA, FB et FC) et les laitiers (LA, LB et LC).

Tableau III. 1. Analyse chimique des éléments des flux (FA, FB et FC) condensés.

N°	Elements (wt%)	Flux E6010 (FA)	Flux E8010-P1 (FB)	Flux E8018-G (FC)
1	Fe	2.71	2.30	2.06
2	Mn	0.735	2.01	0.773
3	Si	7.25	8.12	6.13
4	Al	0.160	0.755	0.692
5	C	16.5	14.2	9.92
6	Ti	3.85	6.23	1.05
7	Mg	0.205	1.18	0.0680
8	Ca	2.75	0.246	20.4
9	Ni	0.0012	0.351	0.243
10	Cr	0.0054	-	0.0030
11	Mo	-	0.142	0.191
12	Na	5.87	7.22	1.51
13	K	0.0268	0.0433	1.42
14	Zn	0.0203	0.0182	0.0294
15	Cu	0.0440	0.0414	0.0655
16	P	0.0042	0.0075	0.0069
17	S	0.0118	0.0099	-
18	Zr	0.0370	0.0042	0.0030
19	F	-	-	10.4

Tableau III.2. Pourcentage pondéral des oxydes dans les flux (FA, FB et FC).

N°	Oxydes (wt%)	Flux E6010 (FA)	Flux E8010-P1(FB)	Flux E8018-G(FC)
1	Fe ₂ O ₃	3.88	3.2889	2.9514
2	MnO	0.949	2.5995	0.9986
3	SiO ₂	15.5	17.3620	13.1222
4	Al ₂ O ₃	0.303	1.4269	1.3080
5	CO ₂	60.6	52.0290	36.3619
6	TiO ₂	6.43	10.3966	1.7520
7	MgO	0.340	1.9616	0.1128
8	CaO	3.85	0.3439	28.5296
9	NiO	0.0015	0.4460	0.3094
10	Cr ₂ O ₃	0.0079	-	0.0043
11	MoO ₃	-	0.2127	0.2869
12	Na ₂ O	7.91	9.7326	2.0356
13	K ₂ O	0.0323	0.0522	1.7132
14	ZnO	0.0252	0.0226	0.0366
15	CuO	0.0551	0.0518	0.0820
16	P ₂ O ₅	0.0096	0.0173	0.0157
17	SO ₃	0.0292	0.0248	-
18	ZrO ₂	0.0500	0.0057	0.0040

Tableau III.3. Analyse chimique des éléments des laitiers (LA, LB et LC) condensés.

N°	Elements (wt%)	Laitier E6010 (LA)	Laitier E8010-P1 (LB)	Laitier E8018-G (LC)
1	Fe	11.6	7.76	2.27
2	Mn	8.02	10.9	3.16
3	Si	8.39	9.12	8.05
4	Al	0.466	0.611	0.786
5	C	3.85	4.08	3.03
6	Ti	15.7	15.0	1.89
7	Mg	0.385	0.638	0.116
8	Ca	5.30	3.98	28.3
9	Ni	0.0068	0.0428	0.0173
10	Cr	0.0248	0.0261	-
11	Mo	-	-	0.0200
12	Na	3.78	5.22	0.763
13	K	0.0875	0.0609	0.805
14	Zn	0.0169	0.0281	0.0276
15	Cu	0.0319	0.0386	0.0553
16	P	0.0111	0.0197	-
17	S	0.0345	0.0310	0.0164
18	Zr	0.270	0.0878	0.0138
19	F	-	-	17.7

Tableau III.4. Pourcentage pondéral des oxydes dans les laitiers (LA, LB et LC).

N°	Oxydes (wt%)	Laitier E6010 (LA)	Laitier E8010-P1 (LB)	Laitier E8018-G (LC)
1	Fe ₂ O ₃	16.5	11.0	3.2408
2	MnO	10.3	14.1	4.0795
3	SiO ₂	17.9	19.5	17.2185
4	Al ₂ O ₃	0.877	1.15	1.4852
5	CO ₂	14.4	15.2	11.1175
6	TiO ₂	26.1	24.9	3.1555
7	MgO	0.636	1.06	0.1916
8	CaO	7.40	5.55	39.5821
9	NiO	0.0086	0.0542	0.0220
10	Cr ₂ O ₃	0.0361	0.0376	-
11	MoO ₃	-	-	0.0299
12	Na ₂ O	5.08	7.02	1.0286
13	K ₂ O	0.105	0.0731	0.9698
14	ZnO	0.0209	0.0348	0.0343
15	CuO	0.0397	0.0480	0.0692
16	P ₂ O ₅	0.0253	0.0451	-
17	SO ₃	0.0824	0.0772	0.0411
18	ZrO ₂	0.362	0.118	0.0187

- ✓ En comparant les résultats du tableau II.1 avec ceux du tableau III.2, on peut noter qu'il y avait une augmentation du pourcentage de (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO et TiO_2) dans le flux (FA) et de (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO et TiO_2) dans le flux (FB) et de (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO) dans le flux (FC).
- ✓ La quantité de Na_2O est faible dans les laitiers (LA et LB), par rapport à celle dans les flux (Fig III.1). Na_2O est issu de la décomposition du Carbonate de sodium Na_2CO_3 dans les flux (FA et FB), mais est une partie a été utilisé pour la formation de silicate de sodium, Na_2SiO_4 lors du dans processus d'agglomération.
- ✓ Dans le procédé SMAW, la température de l'arc électrique provoque la dissociation des oxydes. [58,59]. La température dans le bain de soudage atteint $1560\text{-}2300^\circ\text{C}$ dans l'acier à faible teneur de carbone et la température calculée pour le bain de soudage des aciers doux est au dessus de 2500°C [58,60]. Ces informations sont valables pour la plupart des oxydes, avec des points de fusion très élevés comme MgO (de $2500 - 2800^\circ\text{C}$), CaO (2572°C) et ZrO_2 (2720°C) ne sont pas fondus. Autrement dit, il est important que la composition chimique des flux permette à tous les oxydes de fondre, afin d'éviter la présence d'inclusions dans la soudure [58].

En comparant les résultants du tableau II.1 avec ceux du tableau III. 4, c'est-à-dire la différence des compositions chimiques entre les oxydes des flux et les laitiers, on peut noter :

- ✓ Une augmentation du pourcentage de (MnO , SiO_2 , CaO et TiO_2) dans le laitier (LA) et de (MnO , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO et TiO_2) dans le laitier (LB) et de (Al_2O_3 , SiO_2 et CaO) dans le laitier (LC).

En comparant les résultants du tableau III.2, avec ceux du tableau III. 4. on peut remarquer :

- ✓ Une augmentation du pourcentage de Fe_2O_3 , MnO SiO , CaO et TiO_2 dans les laitiers (LA, LB et LC) (Fig III.1.). On remarque que la teneur de MnO dans les laitiers (LA, LB et LC) a augmenté, alors qu'elle est constante dans les flux (FA et FC). Dans les laitiers (LA, LB et LC) , les teneurs de SiO_2 et

TiO₂ sont élevées, par rapport à leur teneur dans les flux (FA, FB et FC) .
 La teneur de Al₂O₃ diminue dans le laitier (LB), par rapport au flux (FB).
 On note aussi que la teneur du Cr₂O₃ augmente dans les laitiers (LA et LB)
 par rapport à sa teneur dans les flux (FA et FB) .

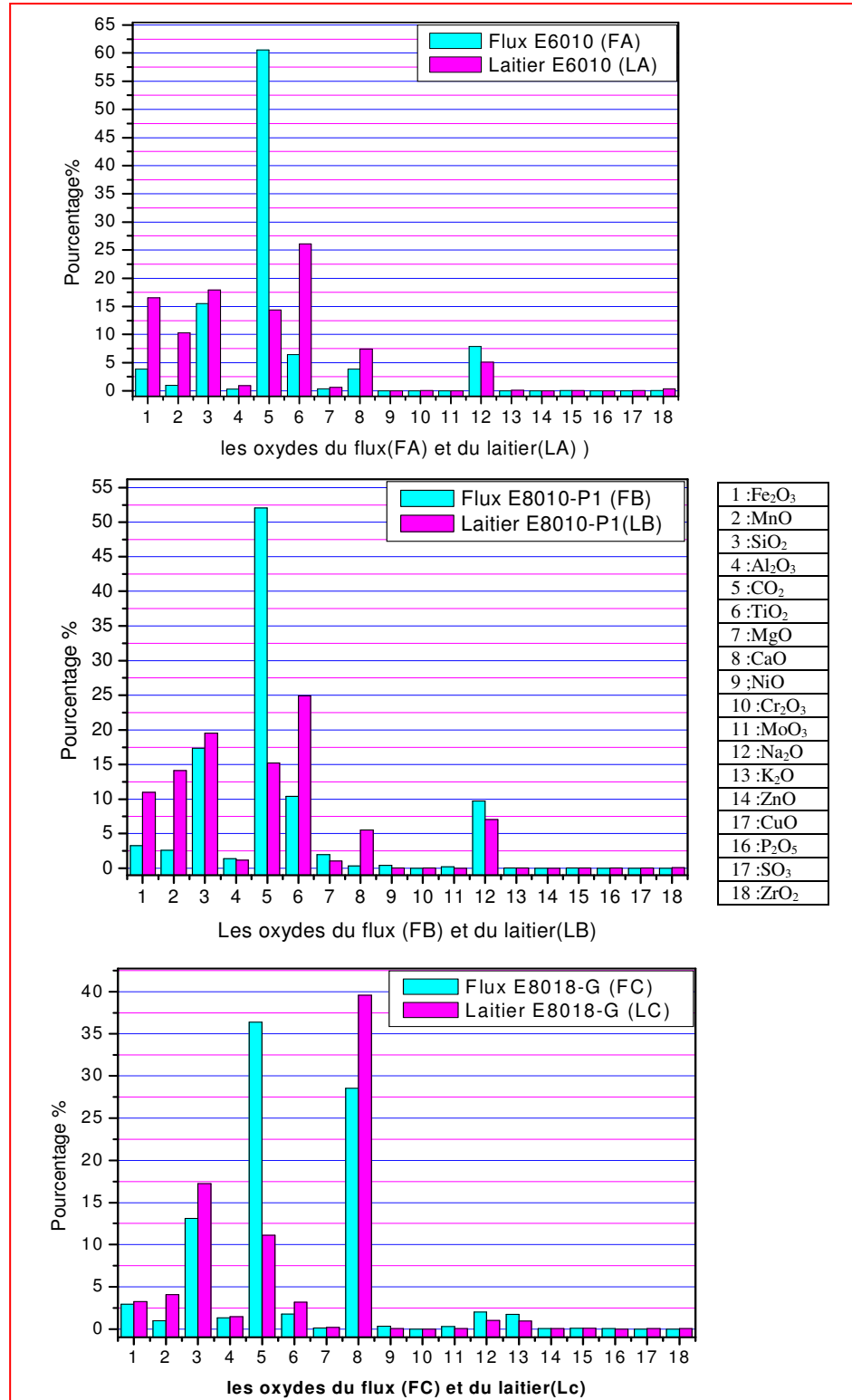


Figure III.1. Histogrammes des pourcentages par (FRX) des oxydes des flux (FA , FB et FC) et des laitiers (LA, LB et LC)

Les figures III.2 et 3. représentent les spectres par FRX des flux (FA, FB et FC) et des laitiers (LA, LB et LC).

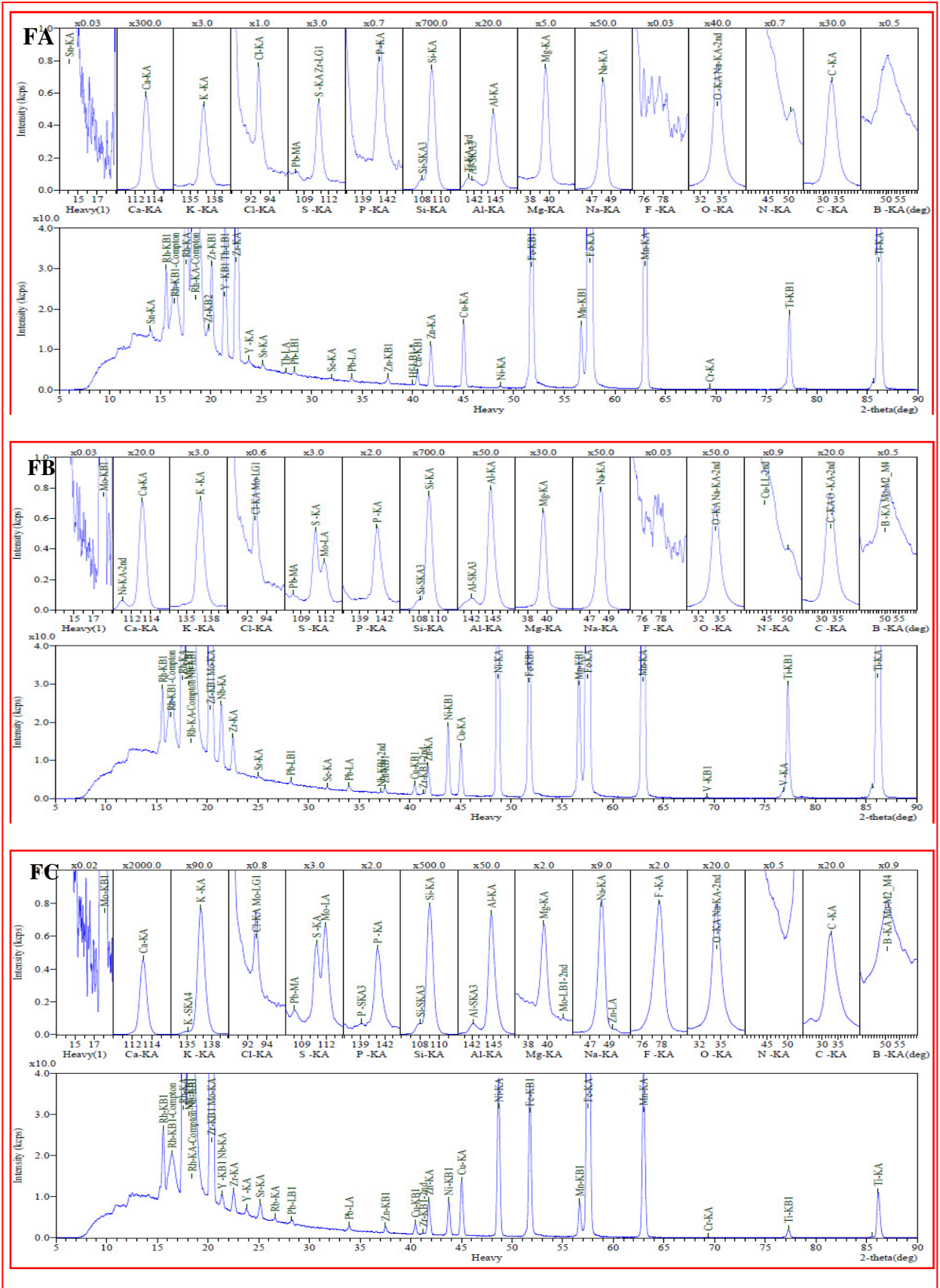


Figure III.2. Spectre par FRX du flux (FA, FB et FC)

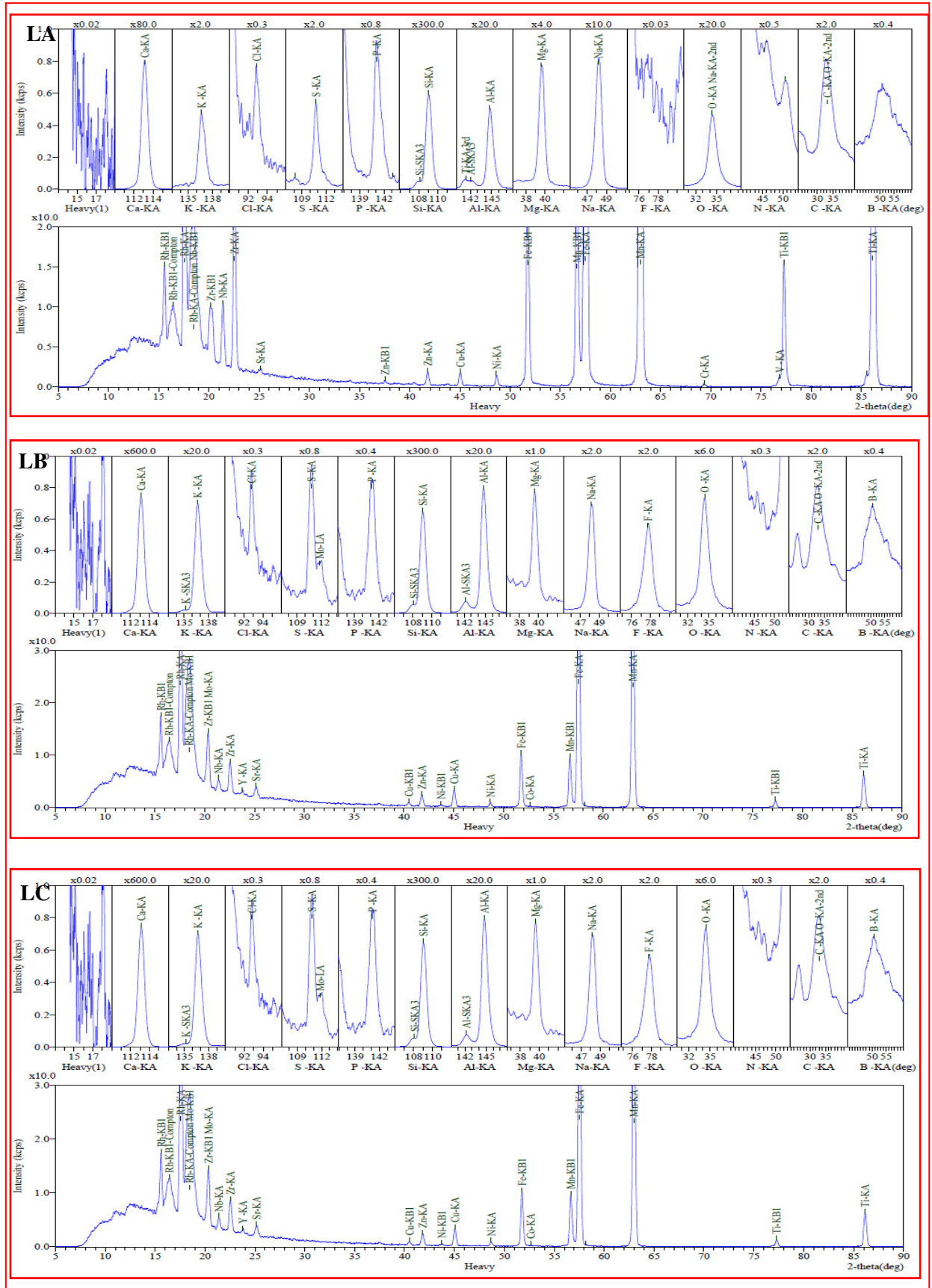


Figure. III.3. Spectre par FRX du laitier (LA, LB et LC)

III.1.2. Composition chimique de la zone fondue par l'absorption atomique :

- 1) Le **tableau III.5.** présente la première passe des échantillons soudés (A, B, C, D) avec les différents flux utilisés (E6010 et C : E8018-G). Le **tableau III.6.** montre la composition chimique de la zone fondue en passe (P1) de chaque échantillon.

Tableau III.5. Echantillons soudés avec les passes étudiés

Echantillons soudés	Passes			Passes étudiées
	P1	P2	P3	
Echantillon: A	E6010	-	-	P.1 (Comme Référence)(passe: PA)
Echantillon B	E6010	E8010-P1	E8010-P1	P.1 (passe : PB)
Echantillon C	E6010	E8018-G	8018-G	P1 (passe : PC)
Echantillon D	E8018-G	E8018-G	8018-G	P.1 (passe : PD)

Tableau III.6. Composition chimique des éléments des zones fondues en passe (PA, PB , PC et PD) de l'acier X42.

Eléments %	Métal de base X 42	Métal d'apport cellulosiq ue E6010	Métal d'apport cellulosiq ue E8010- P1	Métal d'apport basique E8018-G	passe 1 enrobage (PA)	% passe 1 enrobage (PB)	passe 1 enrobage (PC)	passe 1 enrobage (PD)
C	0.18	0.15	0.15	0.05	0.17	0.17	0.17	0.10
Si	0.20	0.16	0.21	0.32	0.14	0.15	0.15	0.30
Mn	0.80	0.41	0.71	0.87	0.59	0.57	0.55	1.19
P	0.000	0.000	0.008	0.013	0.000	0.000	0.000	<0.001
S	0.000	0.000	0.013	0.006	0.000	0.000	0.000	<0.001
Cr	0.02	0.07	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02
Mo	0.01	0.01	0.10	0.01	0.04	0.05	0.02	0.27
Ni	0.02	0.09	0.68	0.71	0.11	0.12	0.9	0.72
Al	0.0164	0.00	-	-	0.0005	0.0005	0.0006	<0.0010
Co	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	<0.00
Cu	0.06	-	-	-	0.02	0.01	0.02	0.04
Nb	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.00	<0.00
Ti	0.0013	-	-	-	0.0104	0.0101	0.0107	0.0039
V	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
W	0.00	-	-	-	0.00	0.00	0.00	<0.00
Sn	0.004	-	-	-	0.003	0.003	0.003	0.002
As	0.004	-	-	-	0.004	0.003	0.004	0.002
Ca	0.0020	-	-	-	0.0006	0.0005	0.0004	<0.0010
Ce	0.000	-	-	-	0.000	0.000	0.000	<0.001
Se	0.0000	-	-	-	0.0000	0.0000	0.0000	<0.0015
B	0.0020	-	-	-	0.0019	0.0019	0.0019	0.0021
N	>0.0240	-	-	-	≈0.0231	≈0.0210	≈0.0224	0.0071
Fe	98.64	99.1	98.069	97.98	98.87	98.84	97.89	97.34

En comparant les résultats du tableau III.6 avec ceux du tableau III.2, on constate la différence dans la composition chimique entre la zone fondue et le flux utilisé.

- La teneur de Mo, Cr, et Ni augmente dans les zones fondues en première passe (PA, PB et PC) avec le flux (FA : E6010). La teneur des oxydes correspondant à ces éléments est faible dans le flux (E6010). Mais on a constaté l'augmentation de la teneur en Mo et Si dans la zone fondue en première passe (PD). Car la teneur des oxydes correspondant est élevée dans le flux (FC : E8018-G). Les flux (E6010, E8018-G) ont la teneur élevée respectivement en TiO_2 (6.43%) et SiO_2 (13.12%). Cette teneur élevée en Ti et Si a été également détecté dans les zones fondue en première passe (PA, PB, PC et PD). L'oxyde MnO dans les flux (E6010, et E8018-G) est constant (0.94%-0.99%). Alors que le Mn augmente dans les zones fondues en première passe (PD, PA, PB et PC).
- En comparant la composition chimique (Tab III.6) du métal de base, de la zone fondue et du métal d'apport, on constate que : Les zones fondues en première passe (PA, PB et PC) contiennent en moyenne 0.15 % de C, mais elle est de 0.05% de C du métal d'apport basique et 0.10% de C de la zone fondue (PD). La teneur de Si demeure entre 0.14- 0.32 % pour le métal d'apport (PA, PB, PC et PD) et les zones fondues. La teneur en Mn dans le métal d'apport est supérieure à 0.41%, alors qu'elle varie dans la zone fondue entre 0.55% et 1.19%.
- En plus, on peut constater qu'il y a une diminution du pourcentage de carbone dans les zones fondues en première passe (PA, PB, PC et PD) par rapport au métal de base estimé à 0,18% C. On remarque aussi une diminution du pourcentage de Si et Mn dans les zones fondues en première passe (PA, PB et PC) et une augmentation du pourcentage de ces éléments dans de la zone fondue en première passe (PD) par rapport au métal de base. Mais, on a constaté une augmentation du pourcentage de Ti dans les zones fondues en première passe (PA, PB, PC et PD) par rapport au métal de base.

2) Le tableau III.7. présente les passes étudiées (PB, PE et PJ) des échantillons soudés en multi-passes et leur composition chimique avec les différents flux cellulosiques (FA : E6010 et FB : E8010-P1). Le tableau III.8 montre les compositions chimiques de la zone de fusion en multi-passes (P1, P2 et P3).

Tableau III.7. Passes étudiées (PB, PE et PJ) des échantillons soudés

Echantillons soudés avec flux cellulosique	Passes			Passes étudiées
	P1 interne	P2	P3 externe	
Zone fondue en multi-passes	E6010	E8010-P1	E8010-P1	P1 : (passe : PB) P2 : (Passe : PE) P3 : (passe : PJ)

Tableau III.8. Composition des éléments chimiques des zones fondues en multi-passes (P1, P2 et P3) avec les différents flux cellulosiques de l'acier X42.

Eléments %	Métal de base X 42	Métal d'apport cellulosique E6010	Métal d'apport cellulosique E8010-P1	passé 1 enrobage (P1)B	passé 2 Enrobage(P2)	passé 3 enrobage (P3)
C	0.18	0.15	0.15	0.17	0.17	0.21
Si	0.20	0.16	0.21	0.15	0.13	0.16
Mn	0.80	0.41	0.71	0.57	0.50	0.61
P	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000
S	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000
Cr	0.02	0.07	0.05	0.01	0.01	0.01
Mo	0.01	0.01	0.10	0.05	0.02	0.01
Ni	0.02	0.09	0.68	0.12	0.06	0.01
Al	0.0164	0.00	-	0.0005	0.0000	0.0022
Co	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00
Cu	0.06	-	-	0.01	0.03	0.03
Nb	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00
Ti	0.0013	-	-	0.0101	0.0105	0.0128
V	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
W	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00
Sn	0.004	-	-	0.003	0.003	0.006
As	0.004	-	-	0.003	0.003	0.003
Ca	0.0020	-	-	0.0005	0.0005	0.0007
Ce	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000
Se	0.0000	-	-	0.0000	0.0000	0.0000
B	0.0020	-	-	0.0019	0.0019	0.0019
N	>0.0240	-	-	≈0.0210	0.0089	0.0000
Fe	98.64	99.1	98.069	98.84	99.05	98.93

En comparant le tableau III.8, au tableau III.2, on constate la différence de la composition chimique entre la zone fondue en multi passes et le flux.

- La teneur en Mo et Ni augmente dans la passe interne de la zone fondue du flux (FA). Les oxydes correspondant ont une faible teneur dans le flux (FA). La teneur du Ti et Si diminue dans la passe interne de la zone fondue du flux (FA). les oxydes correspondant ont une teneur élevée dans le flux (FA). La teneur du Mo et Ni diminue dans la passe externe. Les oxydes correspondant ont une teneur élevée dans le flux (FB). La teneur du Ti diminue dans la passe externe du flux (FB) mais l'oxyde correspondant a une teneur élevée dans le flux (FB). La teneur du Si augmente dans la passe externe, ainsi que l'oxyde correspondant a une teneur élevée dans le flux (FB). Les flux (FA et FB) ont une teneur élevée en TiO_2 et SiO_2 et une faible teneur du Ti et Si a été également détecté dans les passes interne et externe. On a vu que les teneurs du Ca, Si, Mn, et Ti augmentent en passe (P3 : externe) par rapport à la passe (P2 : mitoyenne) avec le même flux (FB).
 - En comparant la composition chimique (Tab III.8) du métal de base, de la zone fondue en multi-passes et du métal d'apport on constate que : Les passes (P1, P2 et P3) contiennent en moyenne 0.18% de C ceci est lié à la teneur constante en carbone dans des métaux d'apports.
 - En plus, on peut constater une diminution du pourcentage de carbone dans la zone fondue en multi-passes (P1 et P2) par rapport au métal de base estimé à 0,18 % C, On remarque aussi une diminution du pourcentage de Si et Mn dans la zone fondue en multi-passes (P1, P2 et P3), par rapport au métal de base , mais il y a une augmentation du pourcentage de Ti dans la zone fondue en multi passes (P1,P2 et P3) par rapport au métal de base .
- 3) **Le tableau III.9**, présente les passes étudiées (PC, PF et PK) des échantillons soudés et la composition chimique d'un échantillon soudé en multi-passes (P1, P2 et P3) avec les différents flux (FA : E6010 et FC : E8018-G). Le tableau III.10. montre la composition chimique de la zone fondue.

Tableau III.9. Passes étudiées (PC, PF et PK) des échantillons soudés

Echantillons Soudés avec flux cellulosique et basique	Passes			Passes étudiées
	P1 interne	P2	P3 externe	
Zone de fusion multi-passes	E6010	E8018-G	E8018-G	P1 : (passe : PC) P2 : (Passe : PF) P3 : (passe : PK)

Tableau III.10. Composition chimique des zones fondues en multi-passes (P1, P2 et P3) de l'acier X42.

Eléments %	Métal de base X 42	Métal d'apport cellulosique E6010	Métal d'apport basique E8018-G	passe 1 enrobage (P1) C	passe 2 enrobage (P2)	passe 3 enrobage (P3)
C	0.18	0.15	0.05	0.17	0.14	0.14
Si	0.20	0.16	0.32	0.15	0.23	0.23
Mn	0.80	0.41	0.87	0.55	1.06	1.01
P	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000
S	0.000	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000
Cr	0.02	0.07	0.03	0.01	0.02	0.02
Mo	0.01	0.01	0.01	0.02	0.18	0.17
Ni	0.02	0.09	0.71	0.9	0.052	0.49
Al	0.0164	0.00	-	0.0006	0.0000	0.0000
Co	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00
Cu	0.06	-	-	0.02	0.08	0.04
Nb	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00
Ti	0.0013	-	-	0.0107	0.0035	0.0040
V	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
W	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00
Sn	0.004	-	-	0.003	0.004	0.003
As	0.004	-	-	0.004	0.004	0.004
Ca	0.0020	-	-	0.0004	0.0006	0.0004
Ce	0.000	-	-	0.000	0.000	0.000
Se	0.0000	-	-	0.0000	0.0000	0.0000
B	0.0020	-	-	0.0019	0.0022	0.0022
N	>0.0240	-	-	≈0.0224	>0.0240	≈0.0227
Fe	98.64	99.1	97.98	97.89	97.73	97.86

En comparant le tableau III.10 au tableau III.2, on constate la différence de la composition chimique entre la zone fondue en multi passe et le flux utilisé.

- La teneur du Mo, Cr, et Ni augmente dans la zone fondue (P1) du flux (FA). Les oxydes correspondant ont une faible teneur dans le flux (FA). La teneur du Ni diminue dans la zone fondue (P2) du flux (FC). L'oxyde correspondant a une teneur élevée dans le flux (FC). Les flux (FA et FC) ont une teneur élevée respectivement en TiO_2 et SiO_2 . La teneur élevée respectivement en Ti et Si a été également détecté dans les zones fondues (P1 et P2, P3). L'oxyde de MnO dans les flux (E6010, et E8018-G) est constant (0.94%-0.99%). Cependant, le Mn augmente dans les zones fondues (P3 et P1). Le flux (FA) contient une teneur élevée en TiO_2 . La teneur élevée en Ti a été également détecté en passe interne (P1). La teneur du Mo, Ni et Si augmente dans les passes (P2 et P3) de la zone fondue du flux (FC). Les oxydes correspondant ont une teneur élevée dans le flux (FC).
- En comparant la composition chimique (Tab III.10) du métal de base et de la zone fondue en multi-passes, on constate:
- Une diminution du pourcentage de carbone dans de la zones fondue en multi-passes (P1, P2 et P3) par rapport au métal de base estimé à 0,18 % C.
- La teneur la plus élevée et la plus basse du Si et Mn dans les passes externe (P3) et interne (P1) est respectivement dans la zone fondue par rapport au métal de base.
- Une augmentation du pourcentage de Ti dans les différentes passes (P1, P2 et P3) dans la zone fondue par rapport au métal de base.

III.1.3. Composition chimique des flux, des laitiers et de la zone fondue par l'EDAX :

Les tableaux III.11, III.12 et III.13. montrent les analyses chimiques par l'EDAX des flux, des laitiers et de la zone fondue en multi-passes.

Tableau III.11. Analyse chimique par l'EDAX des différents flux (FA, FB et FC) et laitiers (LA, LB et LC).

Eléments	Concentrations massique (wt) %cellulosiques FA : E6010, FB : E8010-P1 et Basique FC : E8018-G					
	Flux (FA)	Laitier (LA)	Flux (FB)	Laitier (LB)	Flux (FC)	Laitier (LC)
C	17.12	1.80	12.52	4.40	12.31	1.70
O	43.38	34.51	48.10	33.25	46.10	23.98
F	0.49	1.59	0.61	0.19	9.45	18.27
Mg	0.29	0.54	0.67	0.24	0.86	0.20
Al	0.35	0.52	0.66	0.09	1.43	0.85
Si	8.32	10.07	3.39	5.16	7.72	7.58
Ca	3.10	7.25	2.54	5.00	11.46	33.19
Ti	4.18	21.38	1.77	6.10	1.01	1.84
V	0.13	0.10	0.02	0.14	0.08	0.18
Cr	0.09	0.25	0.04	0.11	0.07	0.21
Mn	0.28	10.51	0.08	14.32	0.14	3.87
Fe	7.69	5.63	0.48	13.20	0.04	5.02

a) Le tableau III.11. montre la différence des analyses chimiques des éléments des flux (FA, FB et FC) et des laitiers (LA, LB et LC). On remarque que la teneur du Mn et du Ti augmente considérablement dans les laitiers (LA et LB), ainsi que le Ca augmente dans les laitiers (LA, LB et LC), pour le Si l'augmentation est relativement assez importante comparativement au Cr, ou son augmentation est faible dans les laitiers (LA, LB et LC).

Tableau III.12. Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments dans la zone fondue en passe (PA) avec le flux (FA : E 6010).

Eléments (W%)	ZF avec flux en passe (P1=PA)		
	Point 1: centre	Point 2	Point 3
Si	0,19	1,76	0,15
Mn	0,87	0,8	0,74
Cr	0,2	0,16	0,2
Ti	0,29	0,1	0,2

b) Le tableau III.12. montre la différence des analyses chimiques des éléments dans la zone fondue en passe (PA) avec le flux (E6010). On remarque que la teneur du

Mn, Cr et Ti augmente dans le centre (point 1), alors que le Si augmente dans point 2 de la zone fondue (FA) en passe (PA).

Tableau III.13. Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments dans la zone fondue en multi-passes avec les flux (FA : E6010 et FB : E8010-P1).

Eléments (W%)	ZF avec flux passe 1(P1)			ZF avec flux passe 2(P2)			ZF avec flux passe 3(P3)		
	Point 1: centre	Point 2	Point 3	Point 1: centre	Point 2	Point 3	Point 1: centre	Point 2	Point 3
Si	0,08	0,14	0,22	0,83	0,32	0,24	0,27	11,93	1,29
Mn	0,74	0,91	1,1	1,08	1,17	0,81	0,83	16,96	0,42
Cr	0,12	0,27	0,19	0,13	0,19	0,19	0,31	0,27	0,13
Ti	0,16	0,25	0,19	0,43	0,21	0,23	0,28	4,83	0,17

c) **Le tableau III.13.** montre la différence des analyses chimiques des éléments de la zone fondue en multi-passes avec les différentes électrodes (P1 : E6010 et P2, P3 : E8010-P1). On remarque que la teneur du Si, Mn, Cr et Ti diminue dans le centre (point 1) de la zone fondue (FA) en passe (P1), alors que le Si, Mn et Ti augmente dans le point 2 en passe (P3) par rapport au point 3 de la zone fondue (FB) en passe (P2).

Tableau III.14. Analyse par l'EDAX des concentrations massiques des éléments dans la zone fondue en multi-passes avec les flux (FA: E6010 et FB: E8018-G).

Eléments (W%)	ZF avec flux passe 1(P1)			ZF avec flux passe 2(P2)			ZF avec flux passe 3(P3)		
	Point 1: centre	Point 2	Point 3	Point 1: centre	Point 2	Point 3	Point 1: centre	Point 2	Point 3
Si	0,25	2,74	0,23	0,37	0,2	0,38	0,32	0,35	0,32
Mn	1,29	0,46	0,73	1,26	0,93	1,38	1,33	1,35	2,7
Cr	0,14	0,15	0,24	0,28	0,09	0,31	0,18	0,15	0,2
Ti	0,17	0,15	0,3	0,33	0,16	0,28	0,29	0,19	0,74

d) **Le tableau III.14.** montre la différence des analyses chimiques des éléments de la zone fondue en multi-passes avec les différentes électrodes (P1 : E6010 et P2, P3 : E8018-G). On remarque que la teneur du Si et Mn augmente dans le point 2 et le point 1 respectivement de la zone fondue (FA) en passe (P1), alors que le Si, Mn, Cr et Ti diminuent dans le point 2 en passe (P2) par rapport au point 3 de la zone fondue (FB) en passe (P3).

La figure III 4, présente les histogrammes des concentrations massiques par l'EDAX des flux (FA, FB et FC) et des laitiers (LA, LB et LC).

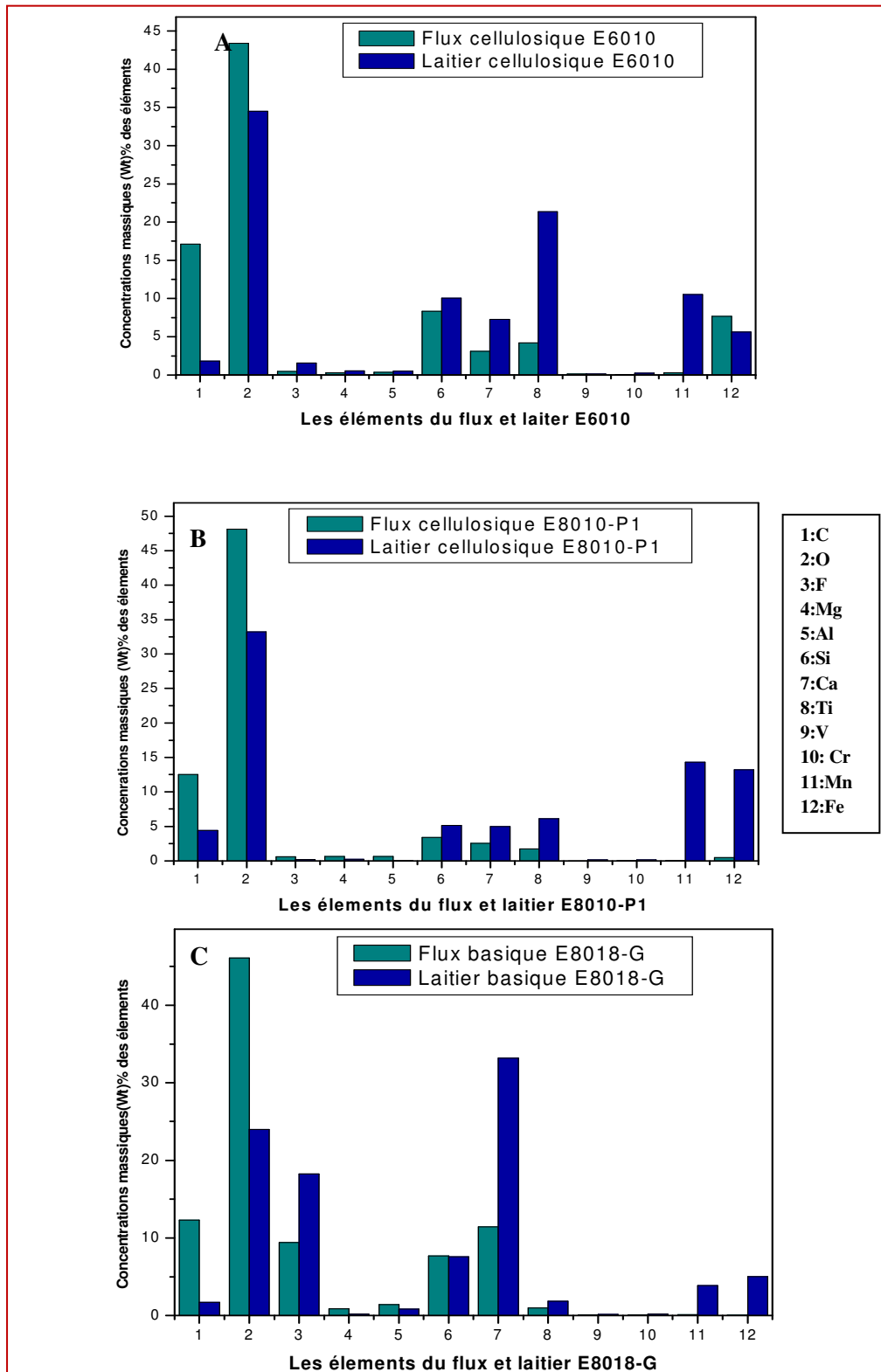


Figure III.4. Histogrammes des concentrations massiques entre des différents flux (FA, FB et FC) et laitiers (LA, LB et LC).

- La différence des concentrations massiques entre les flux et les laitiers (figure III.4). montre que les histogrammes des concentrations massiques entre les différents flux et laitiers résument bien le comportement physico-chimique du transfert des éléments (**C**, **O**, **F**, **Mg**, **Al**, **Si**, **Ca**, **Ti**, **V**, **Cr**, **Mn** et **Fe**) entre le métal de base, le métal d'apport, le flux et la formation du laitier lors du soudage des pipelines par le procédé SMAW.

Les figures III.5, III.6 et III.7. présentent les profils des concentrations massiques des éléments (W%) par l'EDAX de la zone fondue en multi-passes avec les différentes électrodes (FA, FB et FC).

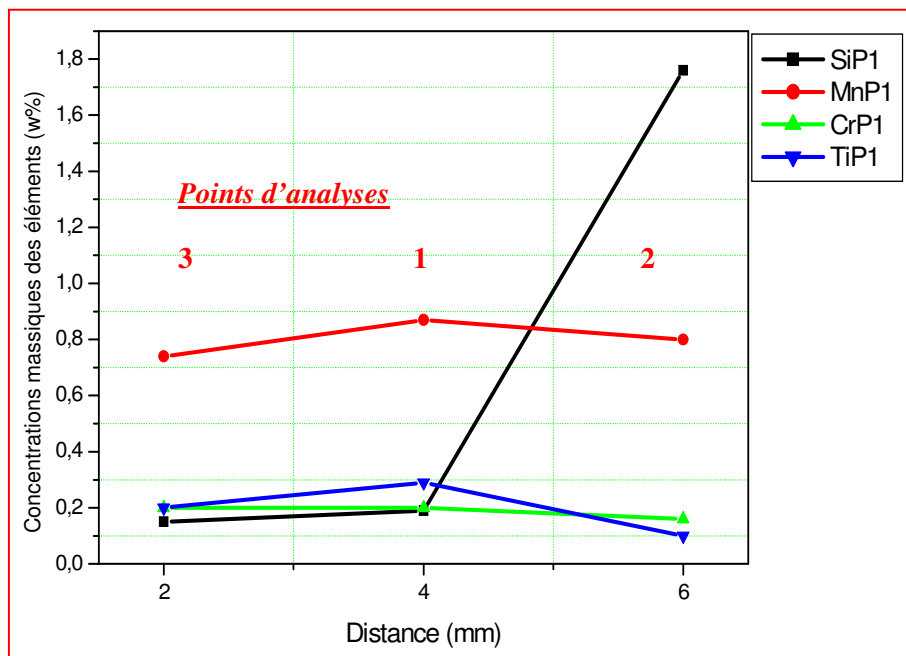


Figure III.5. Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans la zone fondue (FA) en passe (PA).

- La différence des concentrations massiques de la zone fondue (FA) en passe (PA) (Fig III.5.). montre que les profils des concentrations massiques résument bien le même comportement des éléments (**Mn**, **Cr** et **Ti**), avec une légère variation au centre de la zone fondue en passe (PA) avec le flux (FA).

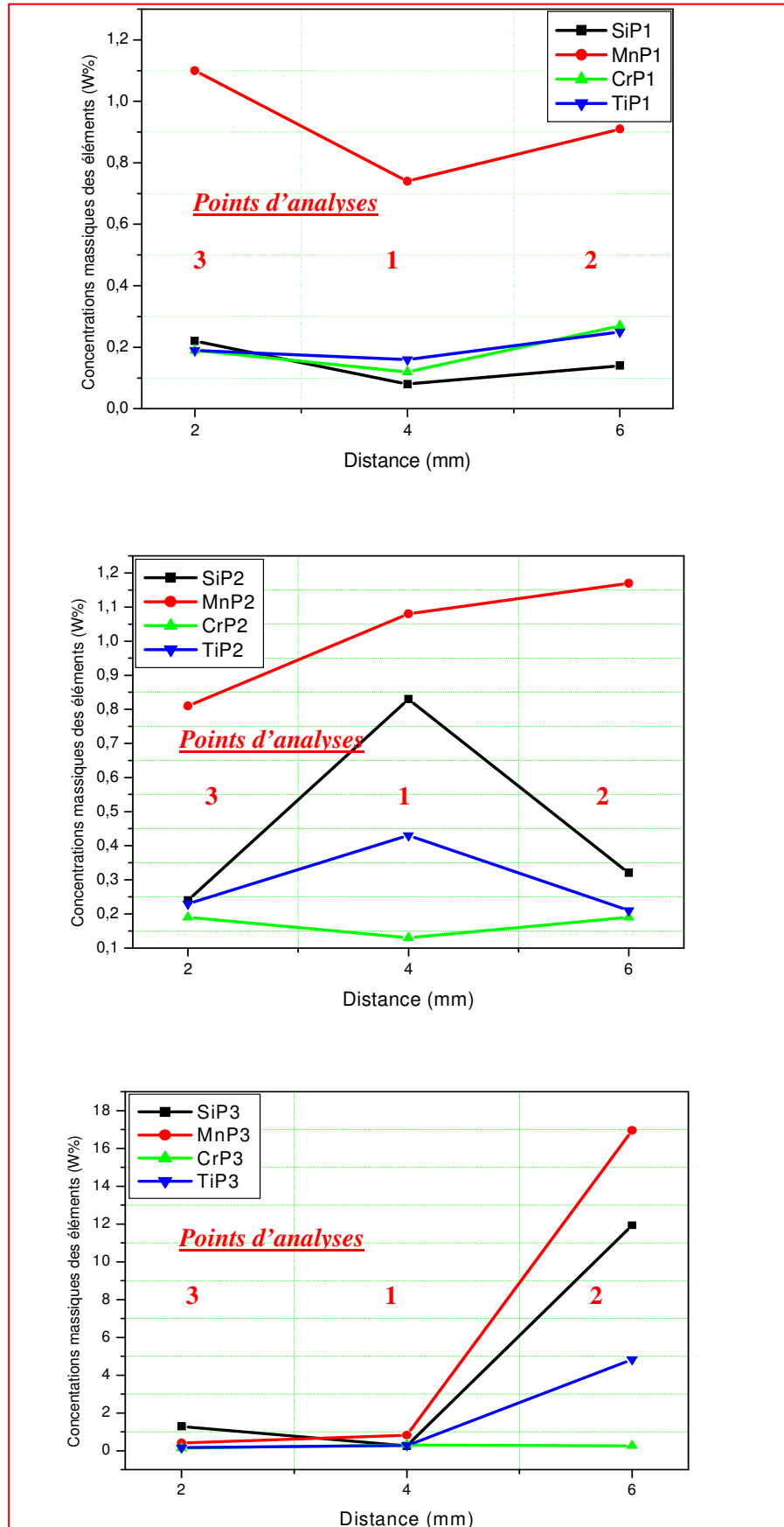


Figure III.6. Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans la zone fondue en multi-passes avec les flux (P1 :E6010 et P2, P3 :E8010-P1).

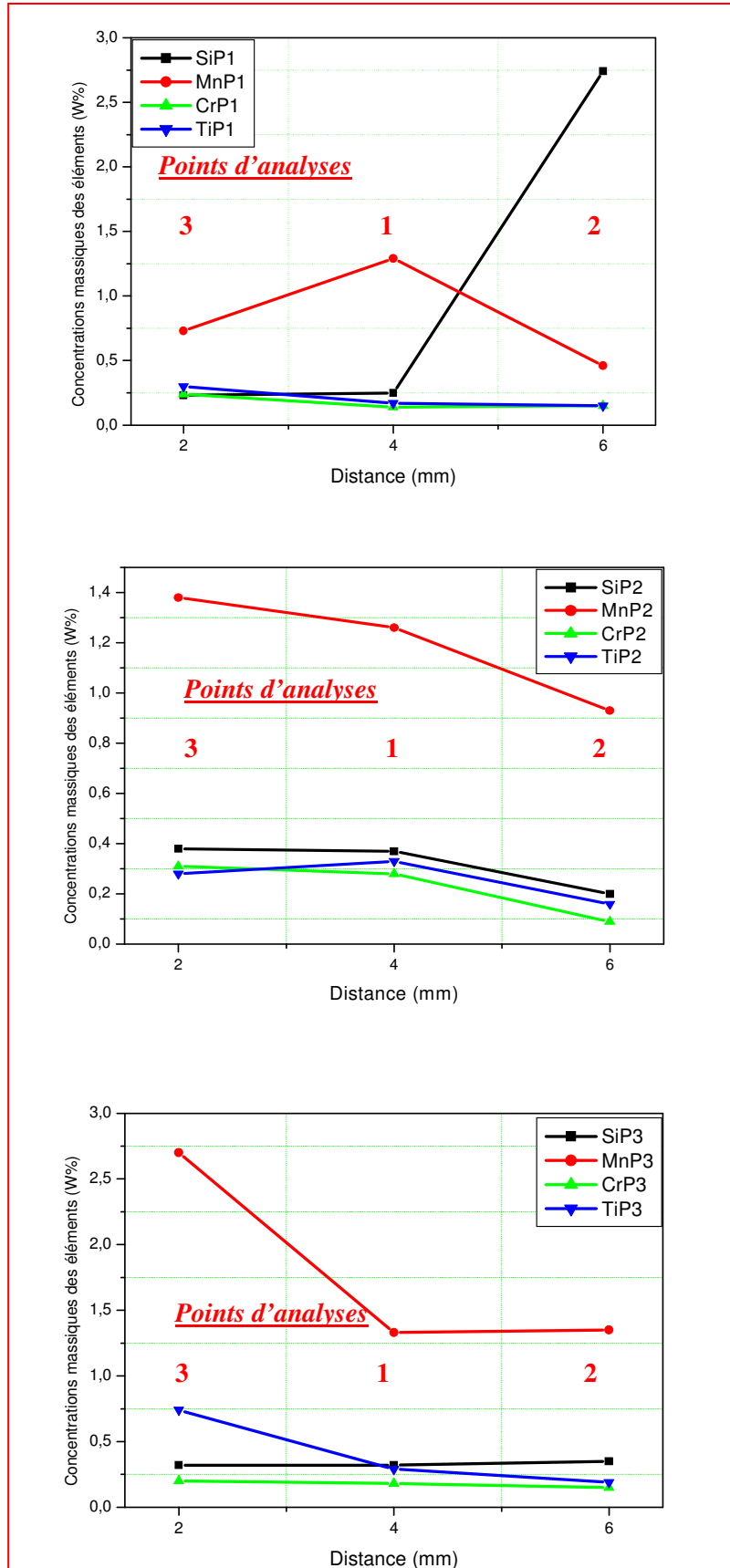
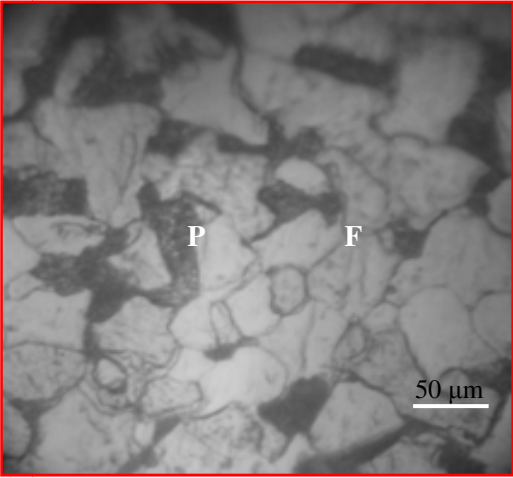
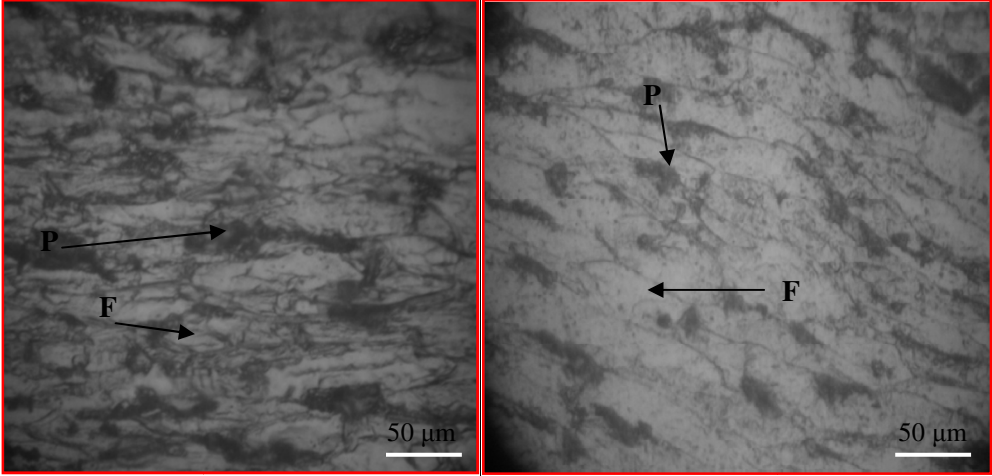
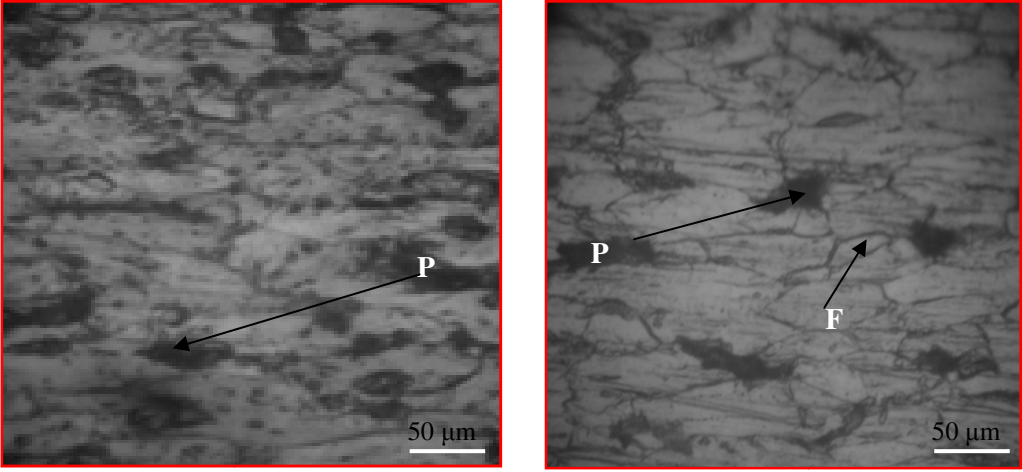


Figure III.7. Profils des concentrations massiques des éléments (W%) dans la zone fondue en multi-passe avec les flux (P1 :E6010 et P2, P3 :E8018-G).

- La différence des concentrations massiques de la zone fondue en multi-passes avec les électrodes (FA et FB) (Fig III.6.). montre que les profils des concentrations massiques résumant bien le comportement homogène des éléments (**Si, Mn, Cr et Ti**) à travers les trois points dans la zone fondue en passes (P1 et P3) avec flux (FA et FB). Alors que dans la zone fondue en passe (P2) avec le flux (FB) la variation des concentrations massiques des éléments montre une perturbation sur les trois points.
- La différence des concentrations massiques de la zone fondue en multi-passes avec les électrodes (FA et FC) (Fig III.7.). montre que les profils des concentrations massiques ont un même comportement des éléments (**Si, Mn, Cr et Ti**) à travers les trois points dans la zone fondue en passe (P2) avec le flux (FC). Alors que dans la zone fondue en passes (P1 et P3) la variation des concentrations massiques des éléments montre une variation contradictoire sur les trois points.

III.2. Etude métallographique du métal de base et du métal d'apport des différentes électrodes par microscopie optique

- L'observation au microscope optique du métal de base a montré une structure ferrito-perlitique. D'autre part, on constate bien des colonies de perlite mais avec une quantité plus faible par rapport à la phase ferritique car notre acier a un faible pourcentage du carbone (Fig III.8) [61,62].
- L'observation des métaux d'apport avant l'exécution des passes de soudage (Fig III.9,10 et 11) montre une structure ferritique avec une faible proportion de grains perlitiques en bande. On a remarqué aussi que les grains sont orientés dans un seul sens, c'est le sens de tréfilage.

Echantillons	Microstructures
<p>Métal de base X42</p>	
<p>Figure III.8. Microstructure de l'acier X42 (F : ferrite , P : perlite)</p>	
<p>Métal d'apport cellulosique E6010</p>	
<p>Figure III.9. Microstructure optique du métal d'apport avec flux E6010</p>	
<p>Métal d'apport cellulosique E8010-P1</p>	
<p>Figure III.10. Microstructure optique du métal d'apport avec flux E8010-P1</p>	

Métal
d'apport
basique
E8018-G

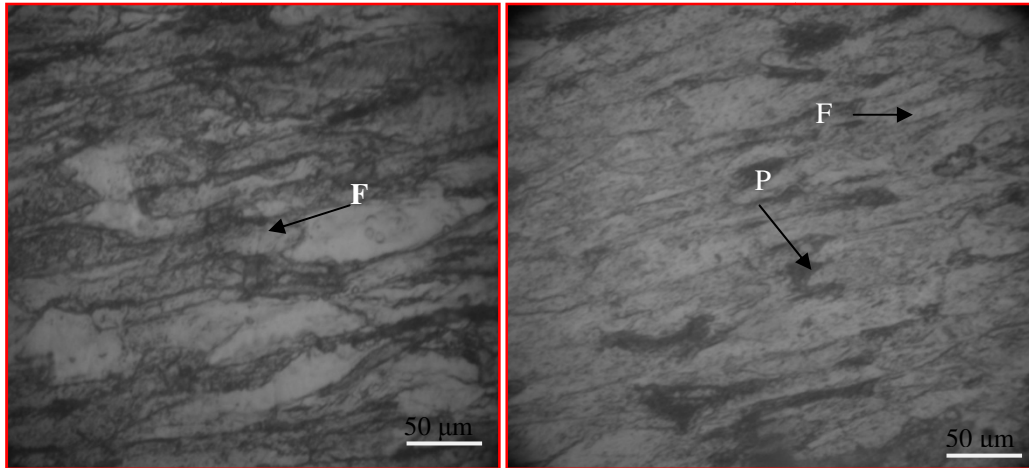


Figure III.11. Microstructure optique du métal d'apport avec flux E8018-G

III.3. Microstructure de la zone fondue (ZF) en première passe

Dans cette partie, on va présenter le schéma de toutes les passes du joint soudé dans le procédé SMAW par la figure III.12. [63]. Une macrographie de l'un de nos échantillons soudés, où on observe les principales zones du joint soudé (métal de base (MB), zone affectée thermiquement (ZAT) et zone fondue (ZF)).

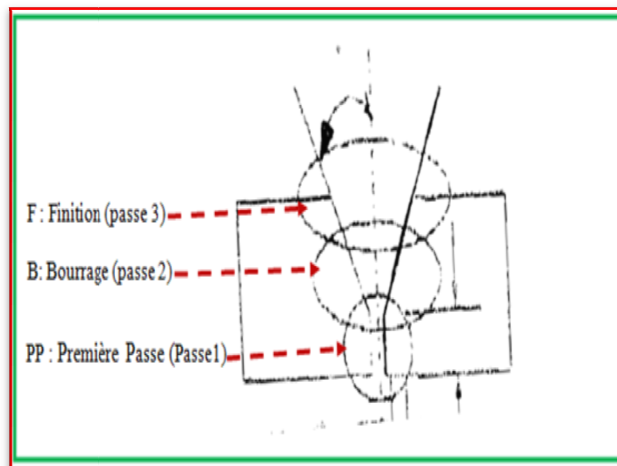


Figure III. 12. Schéma de toutes les passes du joint soudé dans le procédé SMAW [63].

La Figure III.13. représente les échantillons soudés de la première passe (PA, PB, PC, et PD).

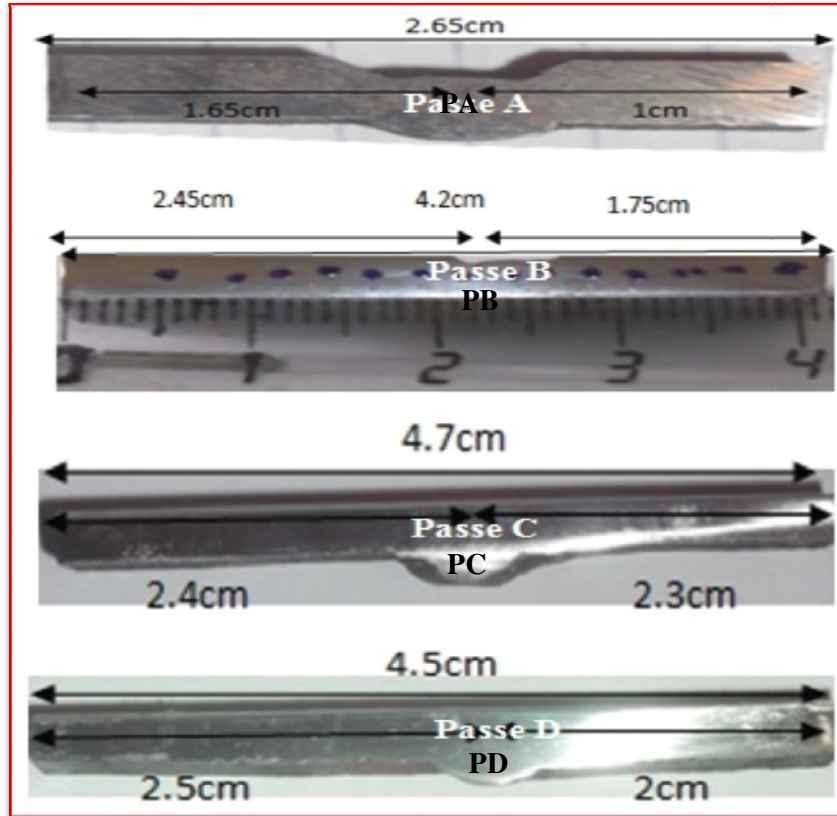


Figure III.13. Macrographies en première passe de soudage (PA, PB, PC et PD).

On note qu'au centre du joint soudé se trouve la zone fondue .c'est elle qui est liquide durant l'exécution de la soudure. Dans le cas de soudage multi-passes, on a observé plusieurs microstructures durant l'exécution des passes successives. Les microstructures apparaissant lors de la première passe peuvent changées de façon notable par les passes suivantes. La figure III.14. représente les principales microstructures de la zone fondue en première passe (PA, PB, PC et PD).

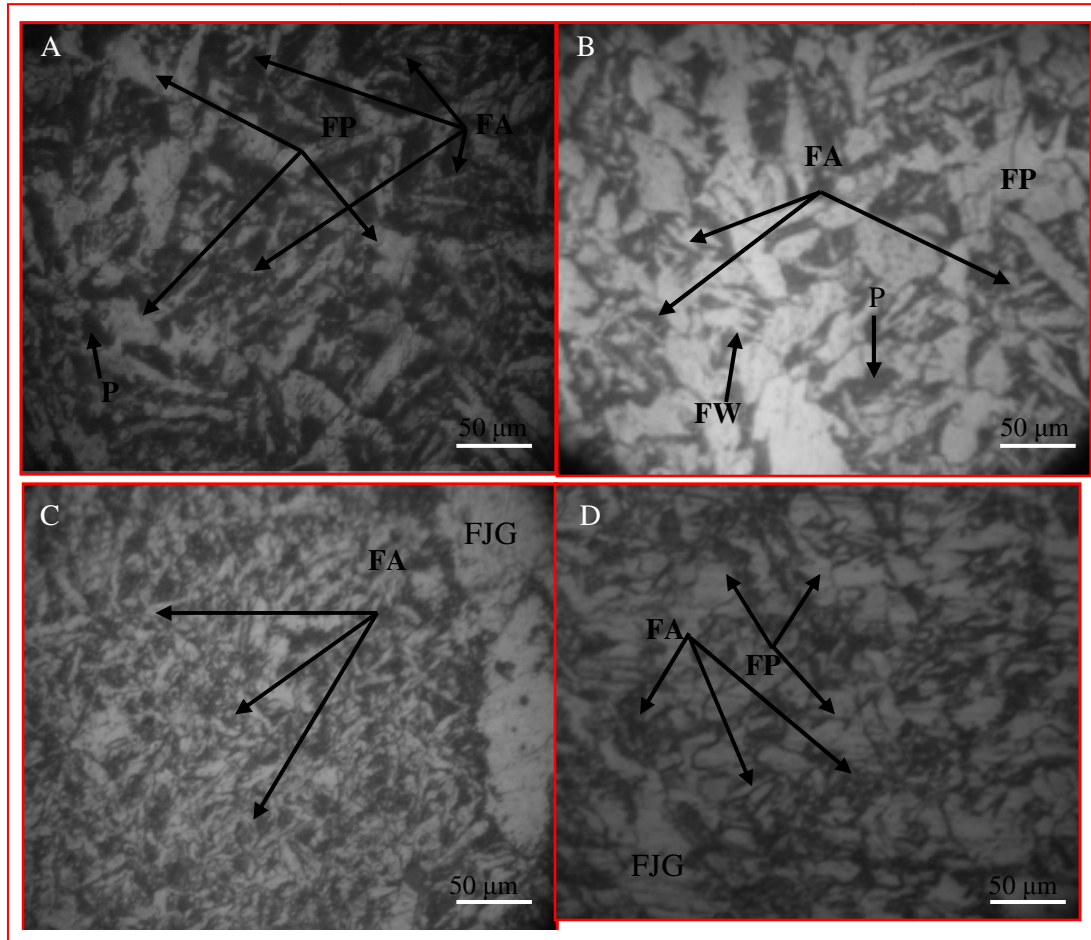


Figure III .14. Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZF en première passe (PA, PB, PC et PD).

-L'observation microscopique, (Fig III.14.PA) représente les principales microstructures de la zone fondue en passe (PA : référence) de l'acier soudé a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

- L'observation microscopique, (Fig III.14.PB) représente les principales microstructures de la zone fondue en passe (PB) de l'acier soudé a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Ferrite de joint de grain (FJG)

- ✓ Ferrite aciculaire (FA)
- ✓ Ferrite de Widmanstätten, (FW)

- L'observation microscopique, (Fig III.14.PC) représente les principales microstructures de la zone fondue en passe (PC) de l'acier soudé a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

- L'observation microscopique : (Fig III .14.PD) représente les principales microstructures de la zone fondue en passe (PD) de l'acier soudé a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

III.4. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) en première passe

La zone affectée thermiquement, au même titre que la zone fondue, les microstructures apparaissantes lors de la première passe peuvent changer de façon notable par les passes suivantes (PA, PB, PC et PD). La figure III.15 représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement en première passe (PA, PB, PC et PD).

-L'observation microscopique, (Fig III.15) représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement dans la première passe (PA, PB, PC et PD) de l'acier soudé. Les passes ont révélé les phases suivantes:

- ✓ Ferrite Equiaxe (FE)
- ✓ Perlite(P)
- ✓ Ferrite polygonale (FP)

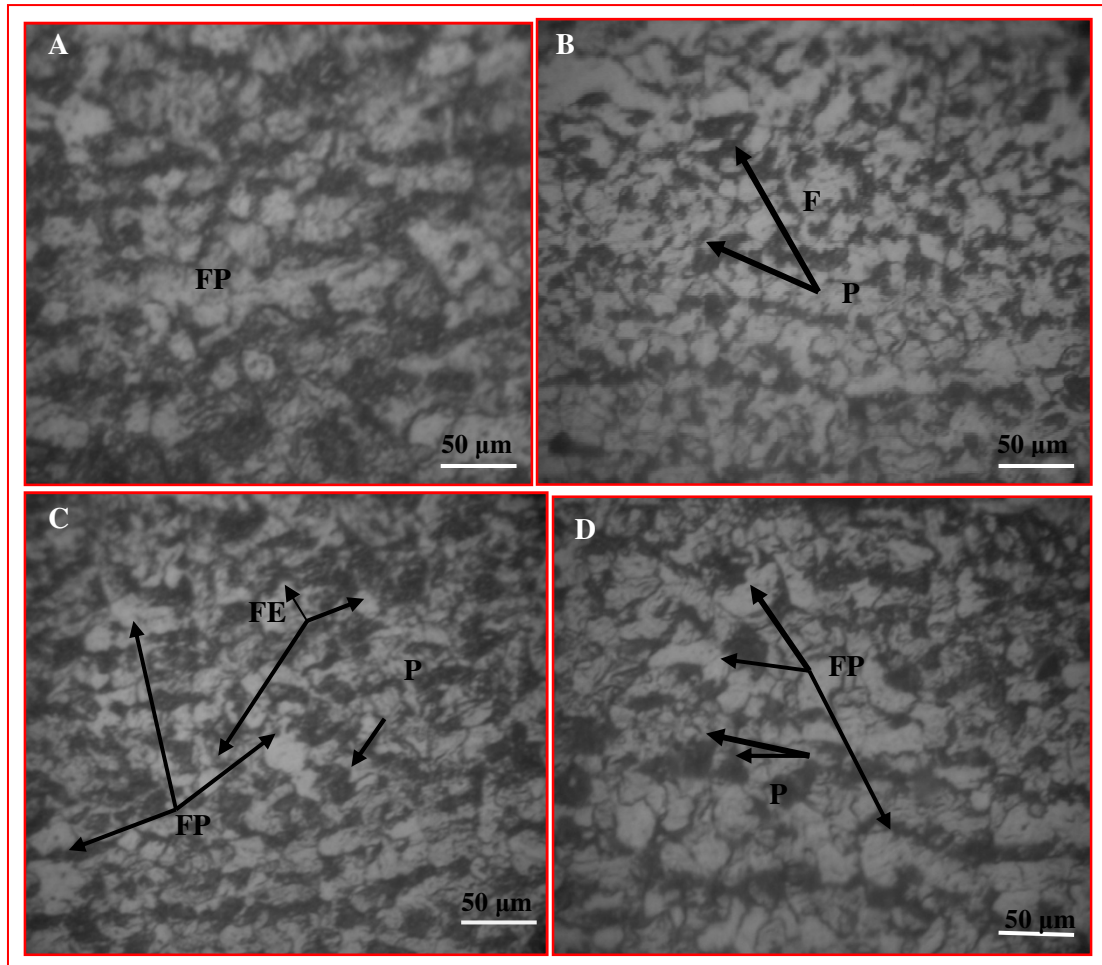


Figure III.15. Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZAT en première passe (PA, PB, PC et PD).

III.5. Microstructure de la zone fondue (ZF) en deuxième passe

La Figure III.16. représente les échantillons soudés de la deuxième passe (PE et PF).

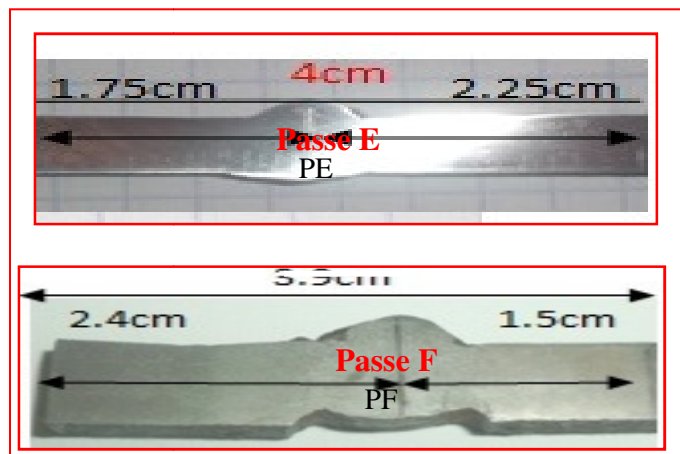


Figure III.16. Macrographies en deuxième passe de soudage (PE et PF).

La figure III.17. présente les principales microstructures de la zone fondue en deuxième passe (PE et PF).

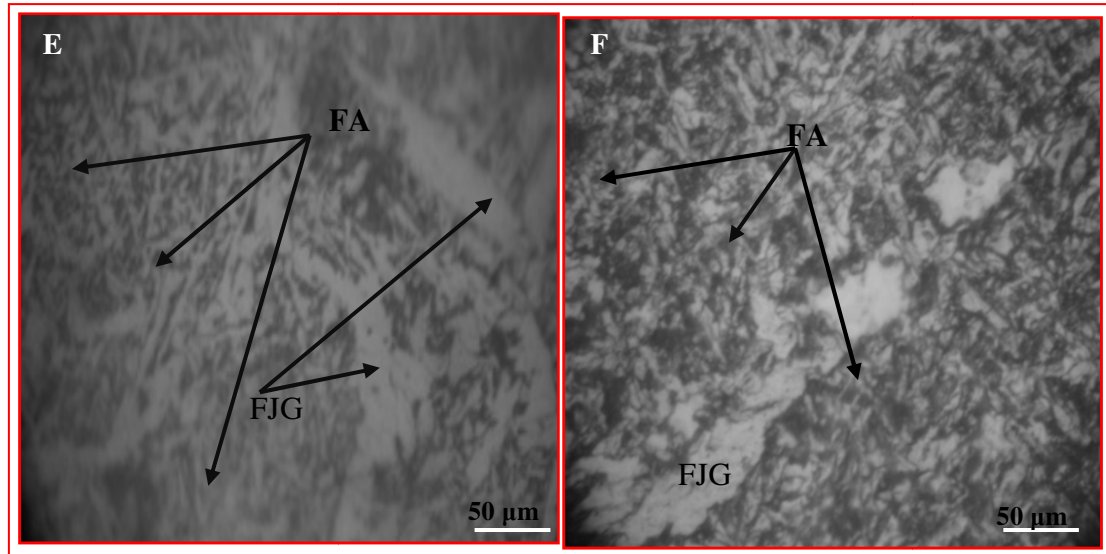


Figure III. 17. Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZF en deuxième passe (PE et PF).

- L'observation microscopique (Fig III.17.PE) représente les principales microstructures de la zone fondue en deuxième passe de l'acier soudé et a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

- L'observation microscopique : (Fig III.17.PF) représente les principales microstructures de la zone fondue dans la deuxième passe de l'acier soudé et qui a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

III.6. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) en deuxième passe

La figure III.18 représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement en deuxième passe (PE et PF).

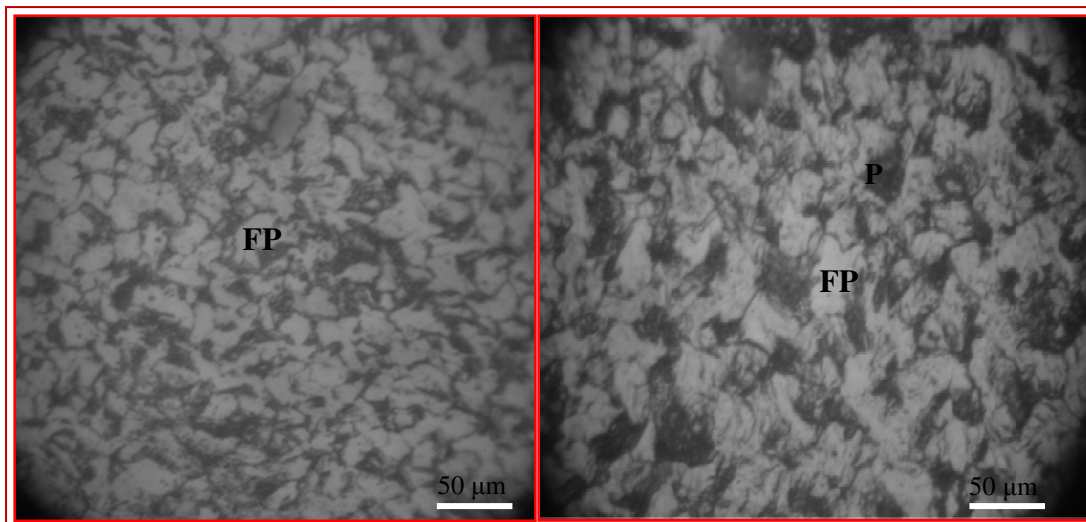


Figure III. 18. Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZAT en deuxième passe (PE et PF).

- L'observation microscopique, (Fig III.18) représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement (ZAT) en deuxième passe (PE et PF) de l'acier soudé a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Perlite (P)

III.7. Microstructure de la zone fondue (ZF) en troisième passe

La figure III.19 représente les échantillons soudés en troisième passe (PJ, PK et PL).

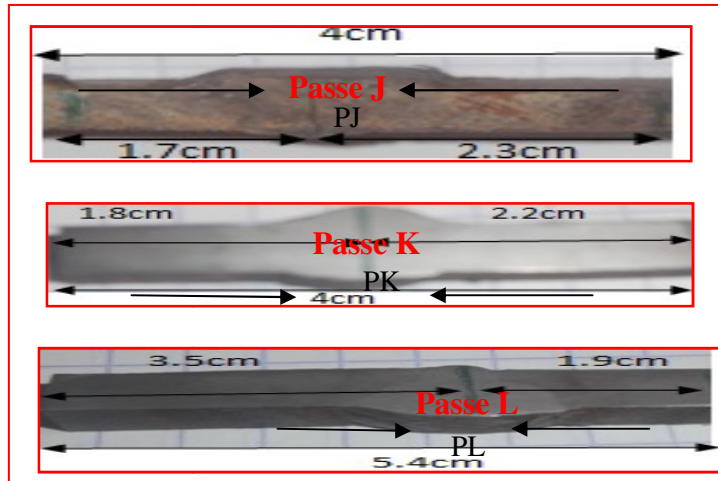


Figure III.19. Macrographies en troisième passe de soudage (PJ, PK et PL).

La figure III.20 représente les principales microstructures de la zone fondue en troisième passe (PJ, PK et PL).

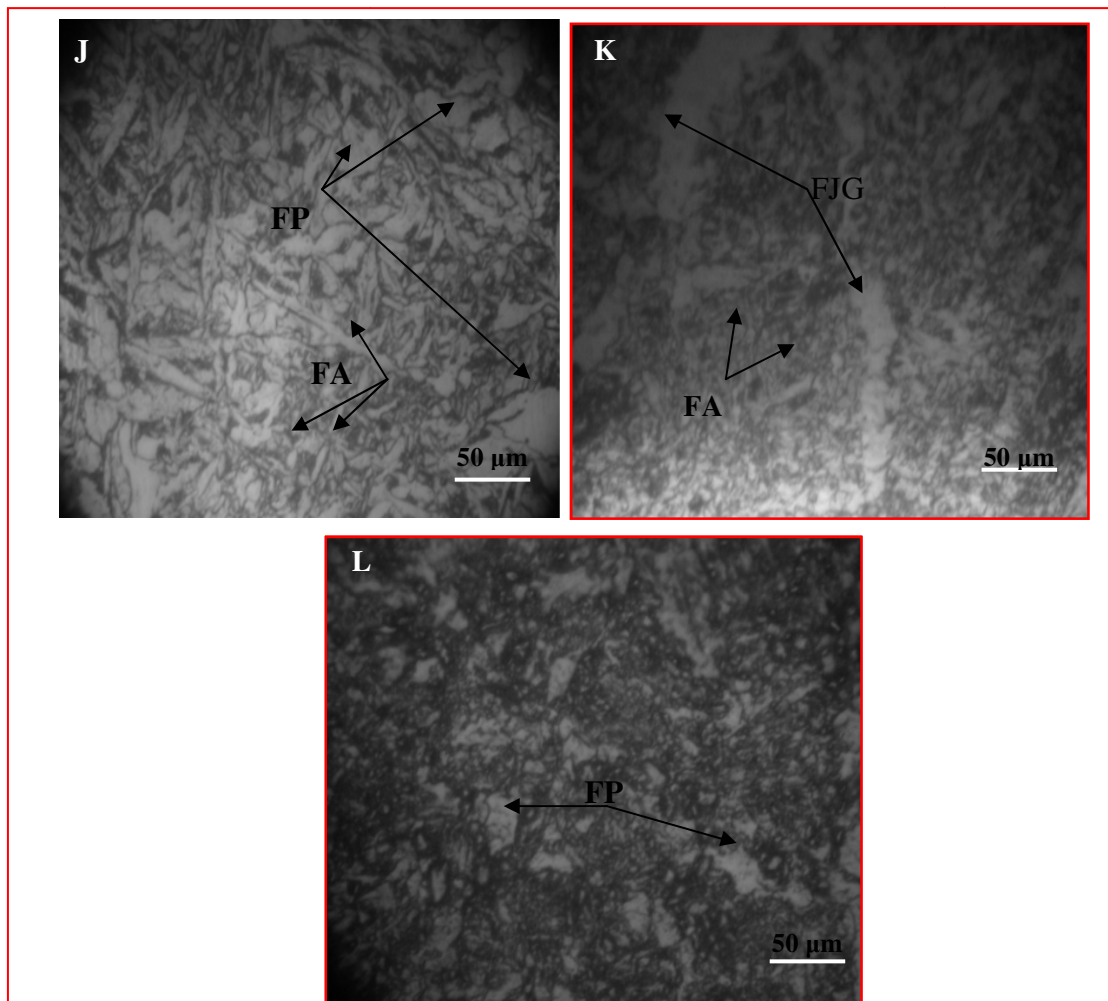


Figure III.20. Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZF en troisième passe (PJ, PK et PL).

- L'observation microscopique, (Fig III. 20.PJ) représente les principales microstructures de la zone fondue en troisième passe (PJ) de l'acier soudé.

L'observation microscopique a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

- La figure III. 20 PK. représente les principales microstructures de la zone fondue en troisième passe (PK) de l'acier soudé. L'observation microscopique a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite de joint de grain(FJG)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

- La figure III. 20 PL. représente les principales microstructures de la zone fondue en troisième passe (PL) de l'acier soudé. L'observation microscopique, a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Ferrite aciculaire (FA)

III.8. Microstructure de la zone affectée thermiquement (ZAT) en troisième passe

La figure III.21 représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement en troisième passe (PJ, PK et PL).

-L'observation microscopique, (Fig III.21) représente les principales microstructures de la zone affectée thermiquement en troisième passe (PJ, PK et PL) de l'acier soudé et a révélé les phases suivantes :

- ✓ Ferrite polygonale (FP)
- ✓ Perlite (P)
- ✓ Ferrite Equiaxe (FE)

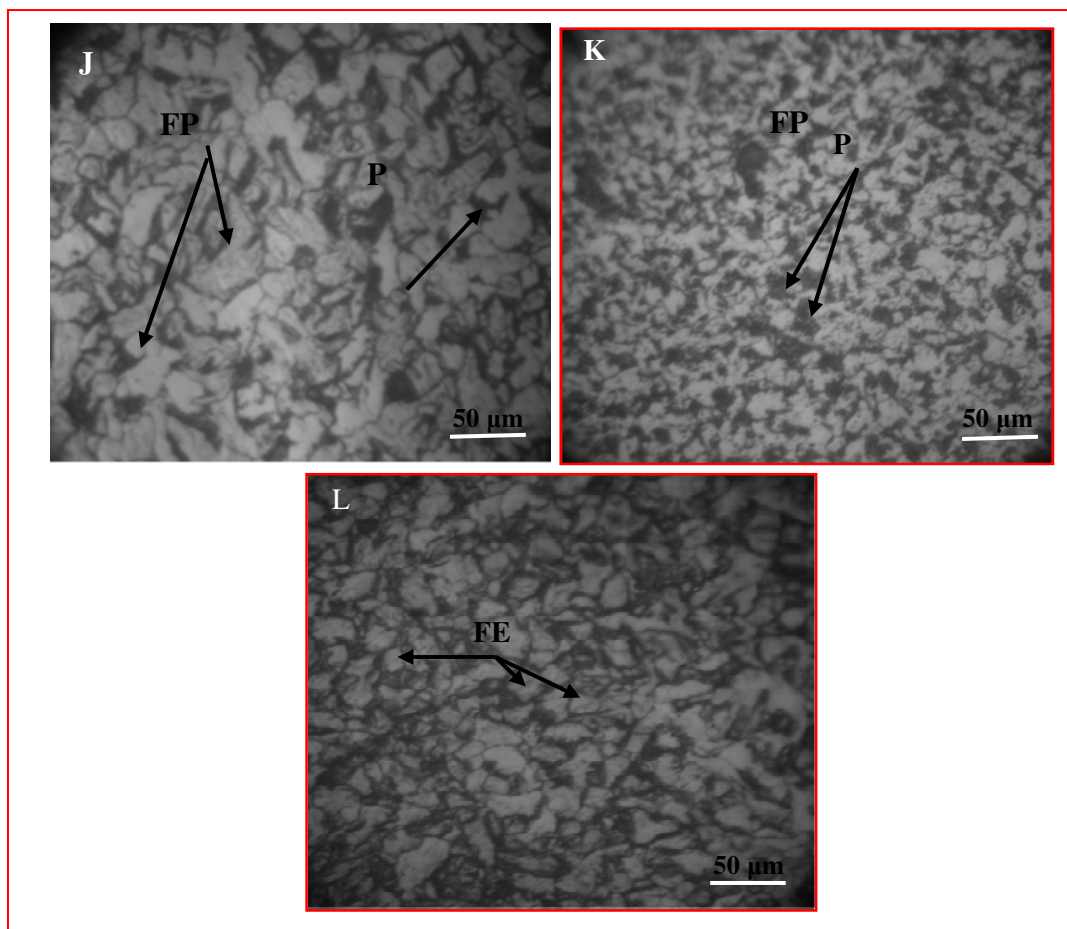
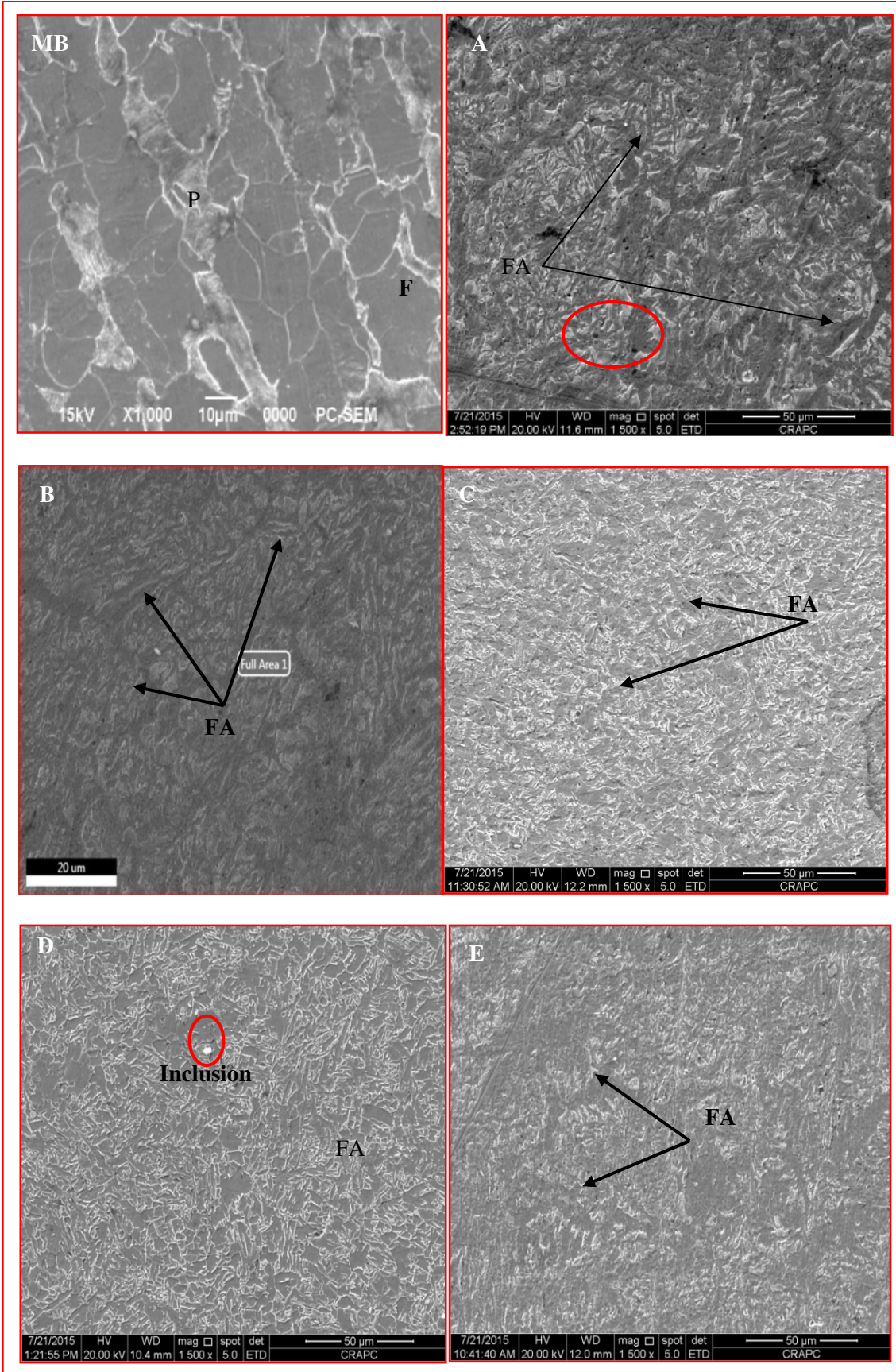


Figure III.21 .Microstructure de l'acier X42 après soudage dans la ZAT en troisième passe (PJ, PK et PL).

III.9. Microstructures du métal de base et les joints soudés en multi-passes par la microscopie électronique à balayage (MEB)

La figure III.22, présente les microstructures du métal de base, la zone affecté thermiquement (ZAT) et de la zone fondue (ZF) en multi-passe avec les différents flux utilisés. La microstructure du métal de base montre les phases ferritiques (F) et perlitiques (P). Mais on remarque que la microstructure dans la zone fondue est principalement de la Ferrite aciculaire (FA) et Ferrite de joint de grain(FJG), ce qui est compatible avec la métallographie optique (Fig III.22). L'observation au MEB confirme l'observation optique. On observe également la présence des différentes inclusions sous forme de petites sphères blanches et noires dans la zone fondue en multi-passe avec les différents flux utilisés (cellulosiques E6010, E8010-P1 et basique E8018-G).



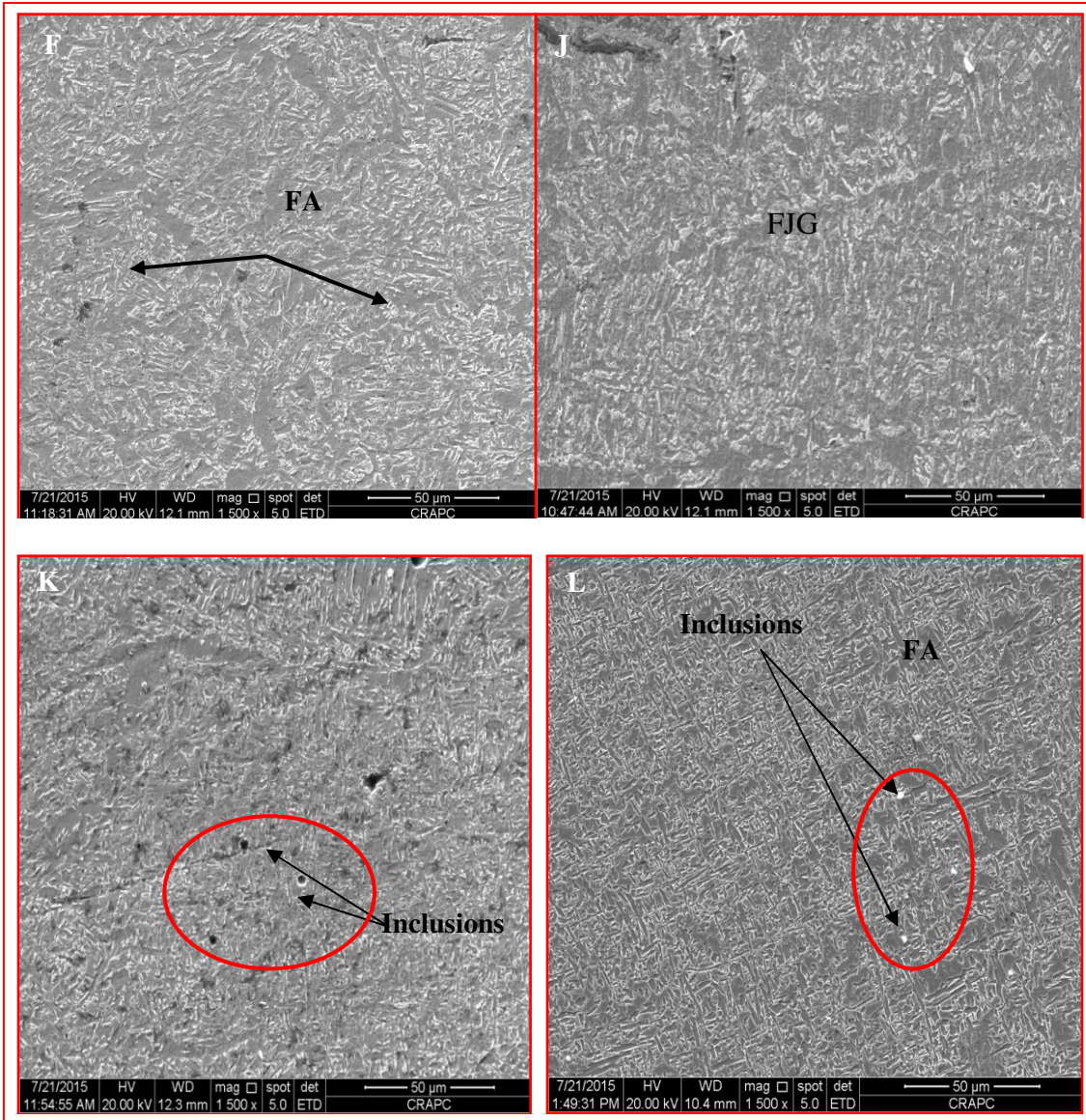


Figure III .22. Microstructures MEB du métal de base et de la zone fondue en multi-passe (première passe (PA, PB, PC et PD), deuxième passe (PE et PF) et troisième passe (PJ, PK et PL).

La figure III.23, présente la microstructure de la zone affectée thermiquement en multi-passes montre les phases de ferrite polygonale (F), Ferrite Equiaxe (FE) et perlite (P).

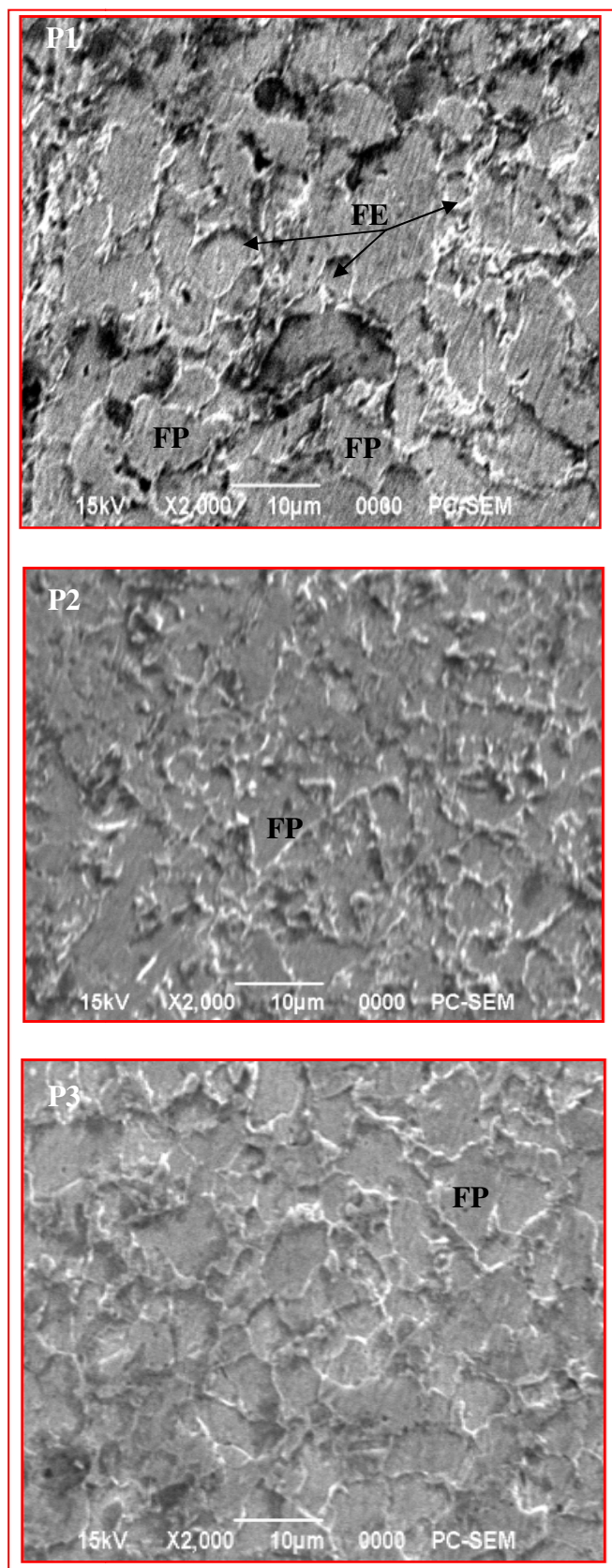


Figure III.23: Microstructures MEB de la ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3).

III.10. Micro-dureté Vickers :

III.10.1. Les mesures de micro-dureté : HV0.5

Les résultats de l'essai de micro-dureté Vickers dans le métal de base X42 et les différents métaux d'apport sont présentés dans le tableau III.15:

Tableau III.15. Valeurs moyennes de la micro-dureté dans le métal de base X42 et les différents métaux d'apport.

Métal étudié	HV moyenne
Métal de Base X42	178.8
Métal d'apport 6010	210.17
Métal d'apport 8010	231.66
Métal d'apport 8018	221.5

L'essai de micro-dureté est une approche habituelle pour déterminer les propriétés mécaniques du métal de base et les différents métaux d'apport [64]. Dans ce contexte, on a mesuré les valeurs moyennes de la micro-dureté sur MB et MA avant la soudure : La valeur de la micro-dureté du métal de base est 178.8 HV alors que celles des métaux d'apport, sont 210.17, 231.66 et 221.5 HV pour respectivement E6010, E8010-P et E8018-G.

III.10.2. Profil de la micro-dureté Vickers :

Le profil de la micro dureté montre une augmentation à partir du centre de la zone fondue en multi-passes, de largeur d'environ 4 mm, puis une stabilisation jusqu'au métal de base. Le profil de la micro-dureté de la soudure SMAW est étudié pour le choix des paramètres de soudage [65,66].

- **Profil de la micro-dureté en première passe :** Le profil de la micro- dureté est l'approche habituelle pour déterminer les propriétés mécaniques des différentes zones du joint soudé en première passe (PA, PB, PC et PD) et de connaître la limite de chaque zone dans le joint soudé [67 ,68]. La figure III.24 montre que la

plus haute valeur de la micro-dureté (220 HV0.5) est obtenue dans la ZF pour les premières passes (PA, PB, PC et PD), on remarque aussi que la micro-dureté augmente de (195-180 HV0.5) dans la ZAT et dans le métal de base entre (165-170 HV0.5).

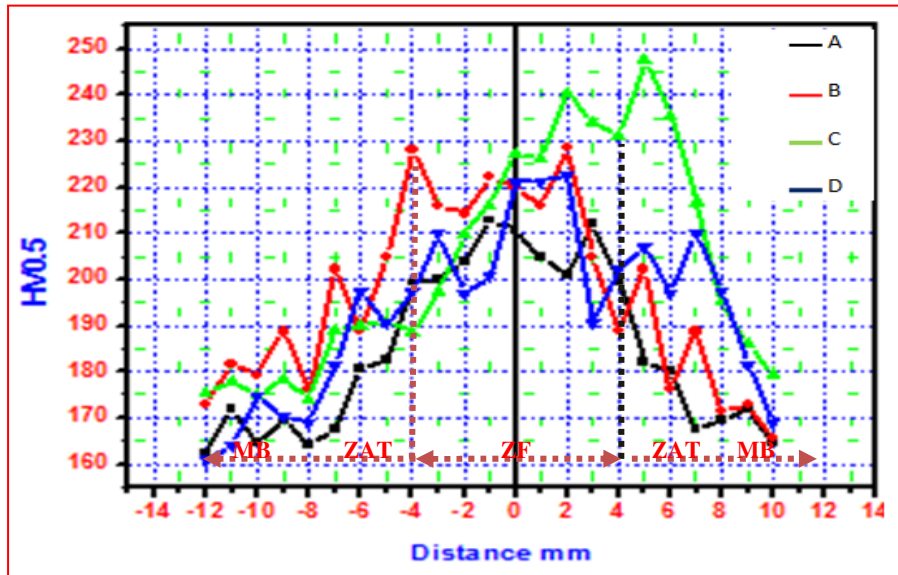


Figure III.24. Profil de la micro-dureté Vickers (HV0.5) en première passe (PA, PB, PC et PD).

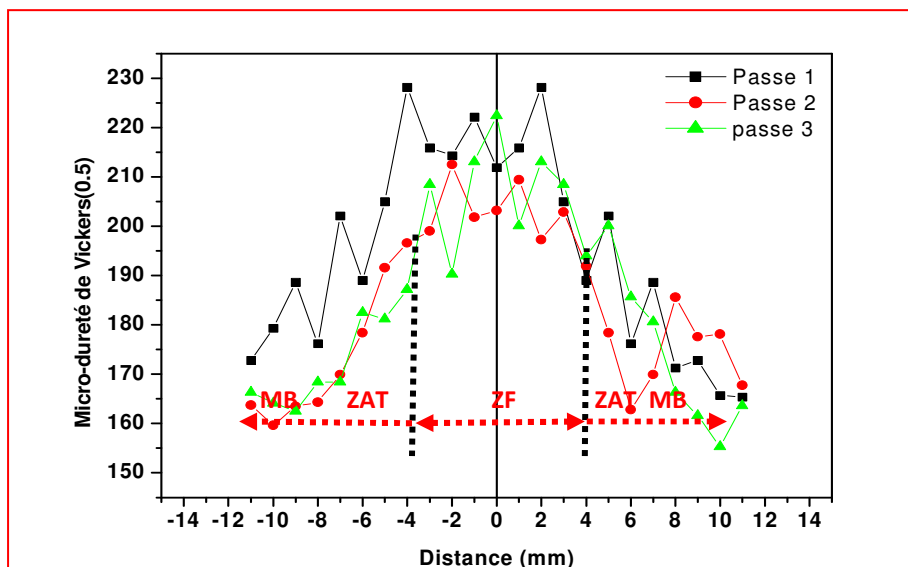


Figure III.25. Profil de la micro-dureté Vickers (HV0.5) dans de la zone fondue en multi-passes avec les flux (FA : E6010 et FB : E8010-P1).

- **Profil de la micro-dureté en trois passes cellulosiques (P1 : FA et P2, P3 : FB)**
: a montré qu' il y a augmentation de la micro-dureté à travers les différentes passes internes (P1) et externes (P3) avec une micro-dureté de 211.9 HV, 222.4 HV au centre de la zone fondue avec les flux (E6010, E8010-P1) et une diminution de la micro-dureté de 203.2 HV dans le centre de la zone fondue en passe (P2) (Fig III.25). On remarque aussi que la micro-dureté en zone fondue en multi-passes avec les flux (E6010, E8010-P) varie en fonction de la variation du carbone équivalent dans les différents métaux d'apports. En passe (P1) avec un carbone équivalent 0.28, la micro-dureté est : 211.9 HV, en passe (P2) avec un carbone équivalent 0.26 , la micro-dureté est : 203.2 HV et en passe (P3) avec un carbone équivalent 0.32, la micro-dureté est : 222.4 HV .

- **Profil de la micro-dureté en trois passes (P1 cellulosique et P2, P3 basiques):**
a montré qu' il y a augmentation de la micro-dureté à travers les différentes passes internes et externes avec une micro-dureté de 204.8 HV et 255.8 HV au centre de la zone fondue avec les flux (E6010, E8018-G) et une diminution de la micro-dureté de 234.8 HV dans le centre de la zone fondue en passe (P2) par rapport au centre de la zone fondue en passe (P3) et avec le même flux (Fig. III.26). On remarque aussi que la micro-dureté en zone fondue en multi-passe avec les flux (E6010, E8018-G) varie en fonction de la variation du carbone équivalent dans les différents métaux d'apports. En passe (P1) avec un carbone équivalent 0.29, la micro-dureté est 204.8 HV, en passe (P2) avec un carbone équivalent 0.36, la micro-dureté est 234.8 HV et en passe (P3) avec un carbone équivalent 0.38, la micro-dureté est 255.8 HV.

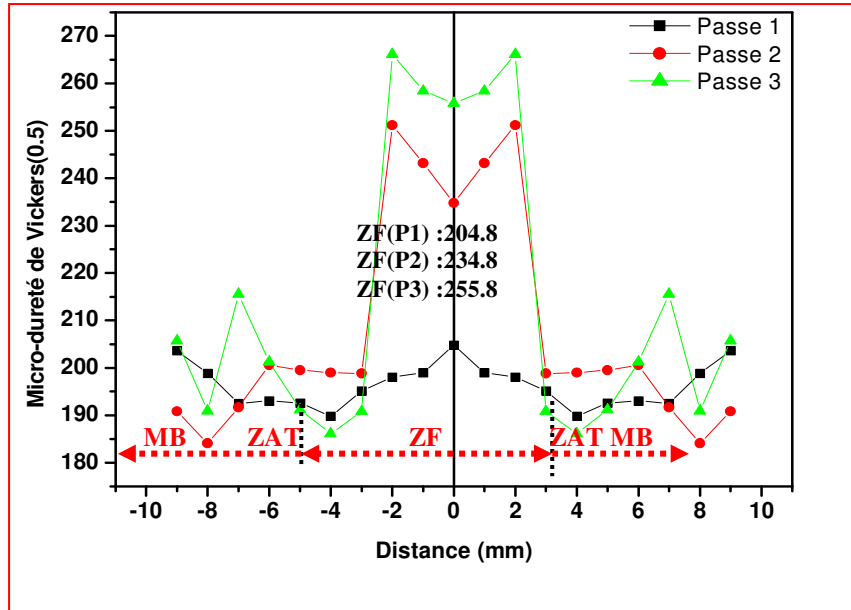


Figure III. 26. Profil de la micro-dureté Vickers (HV0.5) dans de la zone fondue en multi-passes avec les flux (FA: E6010 et FC : E8018-G).

- La micro-dureté la plus élevée et la plus basse ont été obtenues dans les centres de passe externe et interne en relation avec le carbone équivalent [69]. La valeur de la micro-dureté dans la zone fondue est liée à la formation de la structure ferrite aciculaire (FA). Au centre de la zone fondue (centre soudé) une variation de la micro-dureté est observée en accord avec la variation de composition chimique des éléments d'alliage pour les deux flux utilisés. Le carbone équivalent des zones fondues pour tous les flux est inférieur à 0.45. Un carbone équivalent supérieur à 0.45 a une susceptibilité élevée à la fissuration froide après soudure. En outre, la formation de la martensite est facilitée pendant le refroidissement des soudures [69,70].

III.11. Analyses des phases pour les différents flux, laitiers, métal de base X42, métaux d'apports et de la zone fondue en multi-passes par diffraction des rayons X (DRX)

Dans cette partie d'étude, on a essayé d'effectuer des analyses par diffraction des rayons X pour les différents flux utilisés avant et après le soudage sur le métal de base X42, les métaux d'apports et de la zone fondue en multi-passes.

Pour connaître les principales phases du métal de base et les différents métaux d'apport, on a utilisé le logiciel High Score. C'est un logiciel facile à utiliser pour l'identification des phases à partir des données de diffraction des rayons X. High Score compare le diagramme de diffraction de l'échantillon à une base de données (ICPD et fiches ASTM) contenant des modèles de référence afin d'identifier les phases qui sont présentes. On a utilisé une anticathode de cuivre qui émet trois types de rayonnements $K\alpha$, $K\beta$, $K\gamma$ avec des longueurs d'onde de respectivement 1.54 Å. Un filtre en Nickel coupe les ondes $K\alpha$.

III.11.1. Analyses des phases des différents flux et laitiers par diffraction des rayons X (DRX)

On a utilisé trois types de flux : (Flux cellulosique (E6010), Flux cellulosique (E8010-P1) et Flux basique (E8018-G)) pour le soudage des pipelines. Les compositions chimiques, les constituants ainsi que les caractéristiques des flux d'enrobage peuvent être montées [43,47,51]:

- **Flux cellulosique** : L'enrobage se compose de cellulose, Bioxyde de titane, TiO_2 , Ferro-alliages, Silicates, Aluminium. Ces enrobages nécessitent dans la plupart des caractéristiques particulièrement réservé pour le soudage en vertical descendant PG. L'enrobage est mince et très volatile qui laisse peu de laitier, la tension d'amorçage volts -pole, l'enrobage donne de bonne caractéristique mécanique et demande une intensité légèrement plus forte qu'en rutile.
- **Flux Basique** : L'enrobage se compose principalement de Carbonate de chaux, de calcium ou de Potassium, de Ferro-alliages Mn, Ti, Cr, Si, de Spath fluor (CaF_2), de Silicates et de Poudre de fer pour les électrodes. Ces enrobage ont d'excellentes caractéristiques mécaniques, une très bonne protection du bain de fusion, un soudage en

toutes positions, sauf vertical descendant PG, une tension d'amorçage forte $U > 60$ volts, un taux d'hydrogène très faible et un étuvage indispensable.

Les résultats de DRX des flux et laitiers sont présentés dans les figures III.27 et III.28. Il a été observé qu'un certain nombre de phases cristallines sont formées lors l'interaction des différents oxydes entre eux.

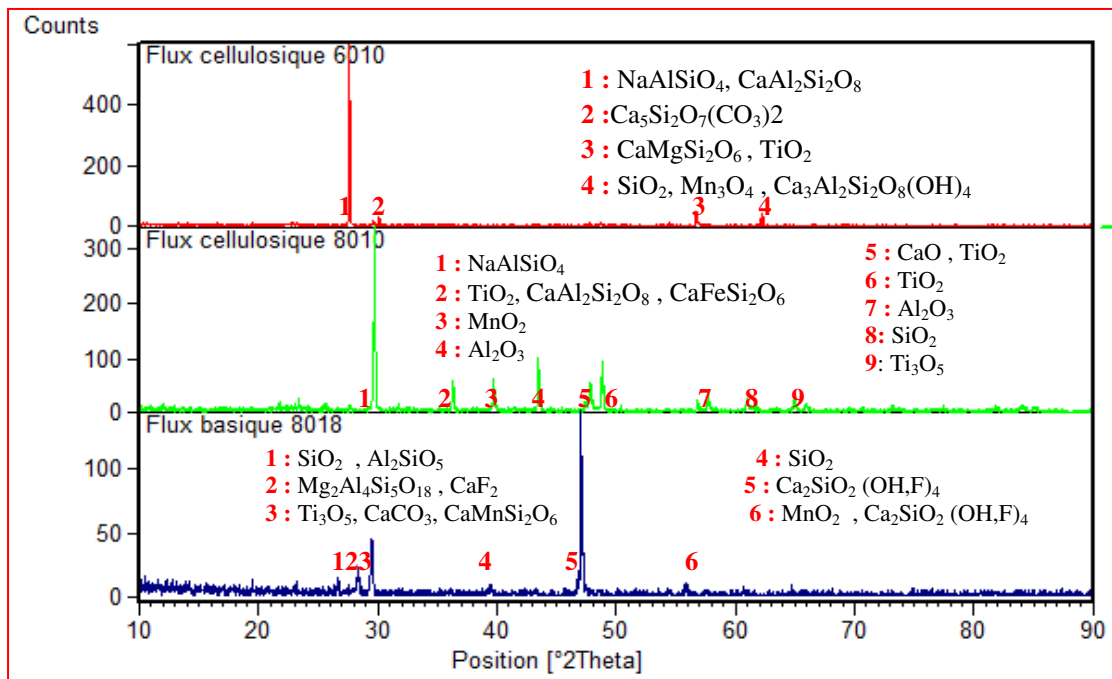


Figure III.27. Diffractogrammes des flux (FA , FB, FC)

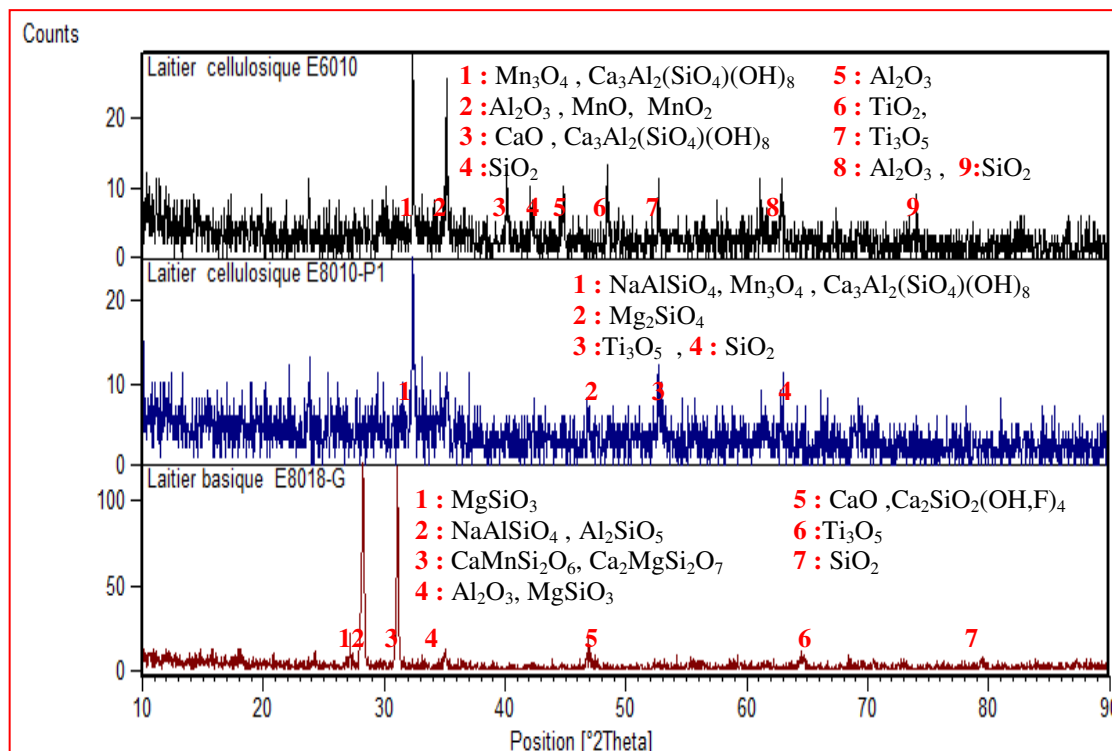


Figure III.28. Diffractogrammes des laitiers (LA, LB et LC)

- ✓ Les oxydes comme CaO ,MnO, MgO, SiO₂, Al₂O₃ et TiO₂ étaient sous forme de composé simple, ce qui signifie qu'ils ne réagissent pas l'un avec l'autre. Les noms des différentes phases cristallines observées dans l'analyse de diffraction des rayons X ainsi que leur structure cristalline sont présentés dans le tableau III .16 .
- ✓ On observe la présence des phases cristallines, comme NaAlSiO₄,Ca Al₂Si₂O₈, Ca₅Si₂O₇(CO₃), CaMgSi₂O₆, Ca₃Al₂Si₂O₈(OH)₄,CaFeSi₂O₆, Ca₂SiO₂(OH,F)₄ , Mg₂Al₄Si₅O₁₈, CaMnSi₂O₆, Al₂SiO₅ qui ont été formées à basse température (T< 1000°C) durant les traitements thermiques lors de la confection des flux (FA,FB et FC). Quant aux laitiers (LA,LB et LC) , on remarque la présence de nouvelles phases cristallines qui ont été formées à des températures élevées ,comme Ca₃Al₂(SiO₄)(OH)₈, Mg₂SiO₄, NaAlSiO₄, Al₂SiO₅ , Ca₂SiO₂(OH,F)₄, CaMnSi₂O₆, Ca₂MgSi₂O₇.

Tableau III.16. Phases cristallines et leur structure cristalline dans les flux (FA, FB, FC) et les laitiers (LA, LB, LC).

N°	Phases cristalline	Structure cristalline
1	Al ₂ O ₃ alumine	Rhomboédrique
2	SiO ₂ Silice	Hexagonal
3	MnO (Manganite)	Cubique
4	MnO ₂ (pyrolusite)	Orthorhombique
5	Mn ₃ O ₄ Hausmannite	Spinnelle
6	CaCO ₃ (Calcite)	Rhomboédrique
7	CaO chaux vive	Cubique
8	CaF ₂ (Fluorite)	Cubique
9	TiO ₂ (Rutile)	Orthorhombique
10	Ti ₃ O ₅ (pentoxyde de trititanium)	Monoclinique
11	Mg ₂ SiO ₄ (Forstérite)	Orthorhombique
12	MgSiO ₃ (Enstatite)	Orthorhombique
13	Al ₂ SiO ₅ (Kynite)	Triclinique
14	NaAlSiO ₄ (Néphéline)	Hexagonale
15	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ (Anorthite)	Triclinique
16	Ca ₃ Al ₂ Si ₂ O ₈ (OH) ₄ (Hydrogrossular)	Cubique
17	Ca ₅ Si ₂ O ₇ (CO ₃) ₂ (Tilleyite)	Monoclinique
18	Ca ₃ Al ₂ Si ₂ O ₈ (OH) ₈ (Katoite)	Cubique
19	CaMgSi ₂ O ₆ (Diopside)	Monoclinique
20	Ca ₂ SiO ₂ (OH,F) ₄ (Bultfonteinite)	Quadratique
21	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇ (Akermanite)	Tétragonale
22	Mg ₂ Al ₄ SiO ₁₈ (Iolite , Cordierite)	Orthorhombique
23	CaMnSi ₂ O ₆ (Johannsenite)	Monoclinique
24	CaFeSi ₂ O ₆ (Hedenbergite)	Monoclinique

- ✓ D'autres oxydes tels que l'oxyde de titane (TiO_2) et l'oxyde de manganèse (MnO) n'ont montré pratiquement aucune réactivité avec les autres oxydes, cependant, ils sont apparus avec un nouveau degré d'oxydation (Ti_3O_5 , Mn_3O_4) et une structure cristalline différente. Les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et CaO a cette température ne réagissent pas entre eux dans les flux (voir diagramme de phase (Ti-O) et (Mn-O) dans les figures III.29 et III.30).

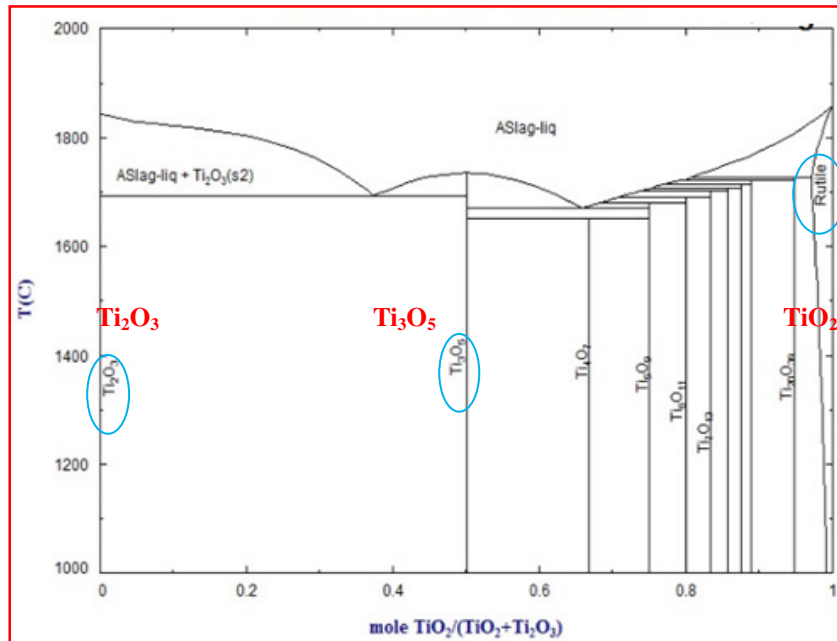


Figure.III.29. Diagramme de phase du système (Ti-O) [71].

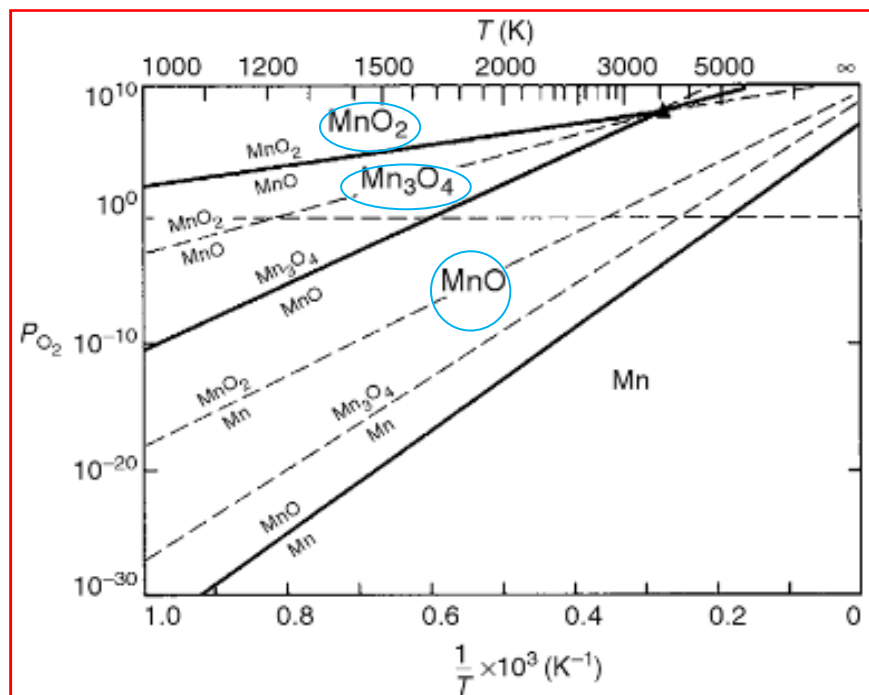


Figure .III.30. Diagramme de phase du système (Mn-O) [72].

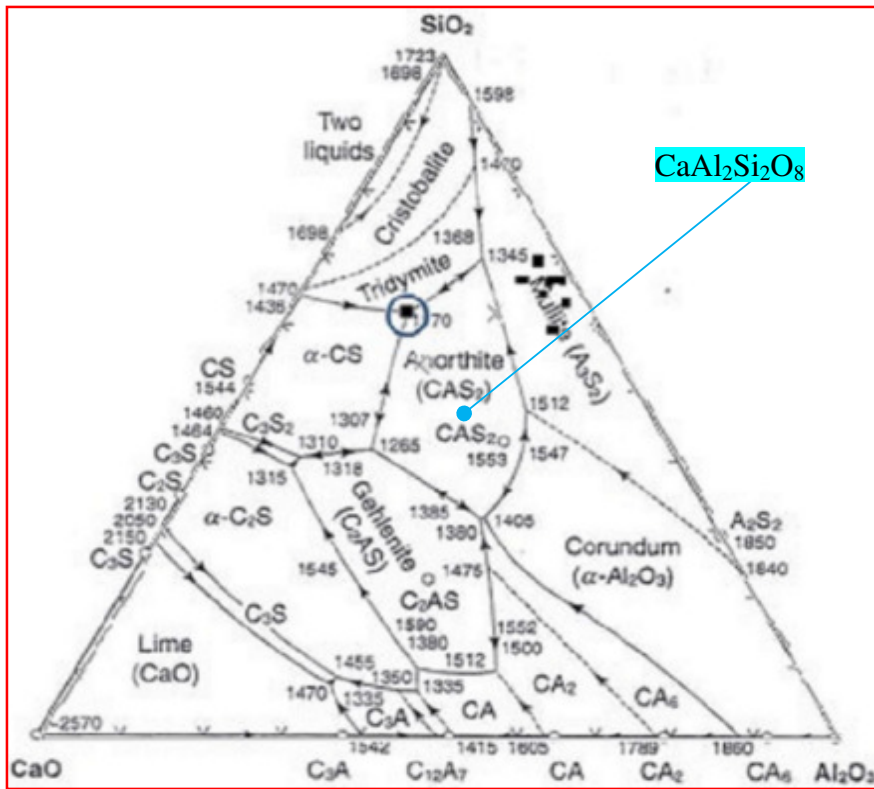


Figure .III.32. Diagramme de phase du système (CaO-Al₂O₃-SiO₂) [75].

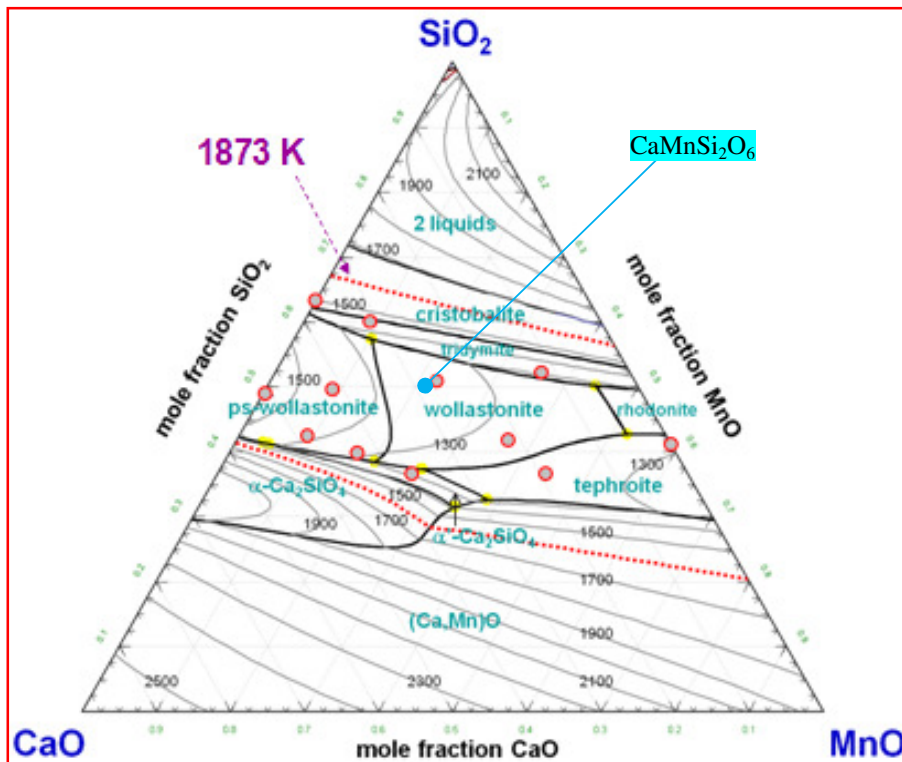


Figure .III.33. Diagramme de phase du système (CaO-MnO-SiO₂) [76].

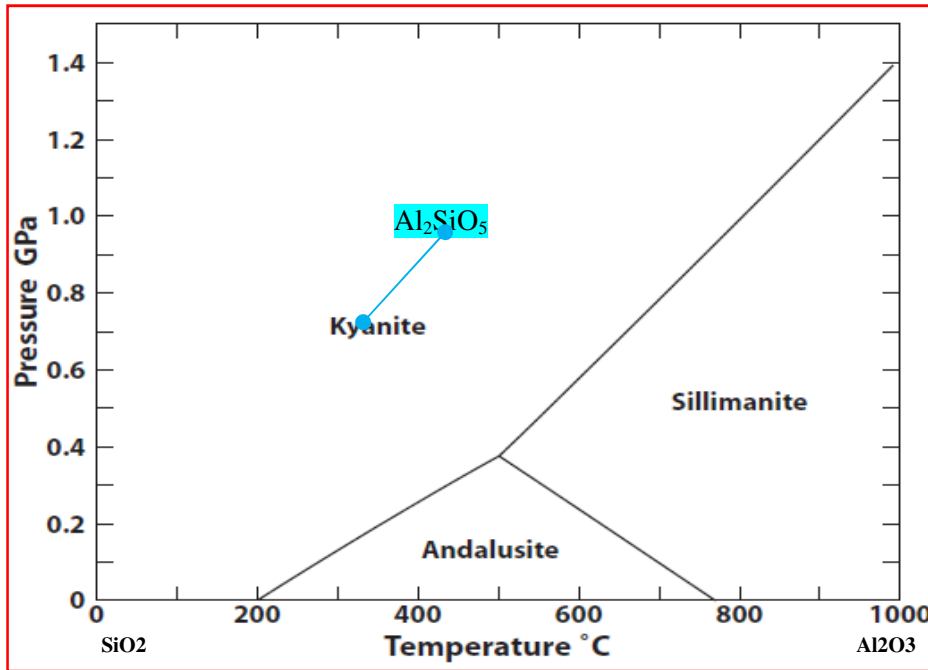


Figure .III.34. Diagramme de phase du système (SiO₂ -Al₂O₃) [77].

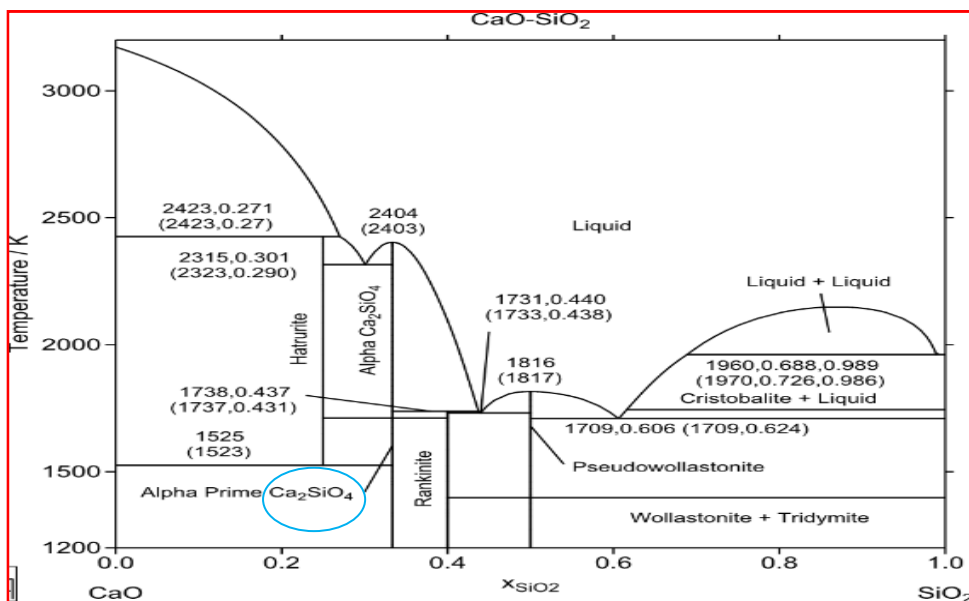


Figure .III.35. Diagramme de phase du système (CaO- SiO₂) [78].

- ✓ La phase $\text{CaMgSi}_2\text{O}_7$ a une température de fusion inférieure 1000°C et une structure cristalline tétragonale (voir diagramme de phase (CaO-MgO-SiO₂) dans la figure III.36b).
- ✓ Les phases de $(\text{Ca}_5\text{Si}_2\text{O}_7(\text{CO}_3)_2)$, $(\text{CaMgSi}_2\text{O}_6)$, $(\text{CaFeSi}_2\text{O}_6)$, et $(\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8)$ peuvent être en fusion à basse température et ont des

structures monocliniques et cubiques. Elles sont également apparues dans le flux (FA, et FB) et les laitiers (LA et LB). La phase $(Ca_3Al_2(SiO_4)(OH)_8)$ a été formé lorsque le produit de calcination a réagi avec les cendres volantes lors du soudage , contribuant ainsi à la résistance et à la compression élevée du produit solidifié (voir diagramme de phase $(CaO-MgO-SiO_2)$ et $(CaO-FeO-SiO_2)$ dans les figures III.36a et III.37).

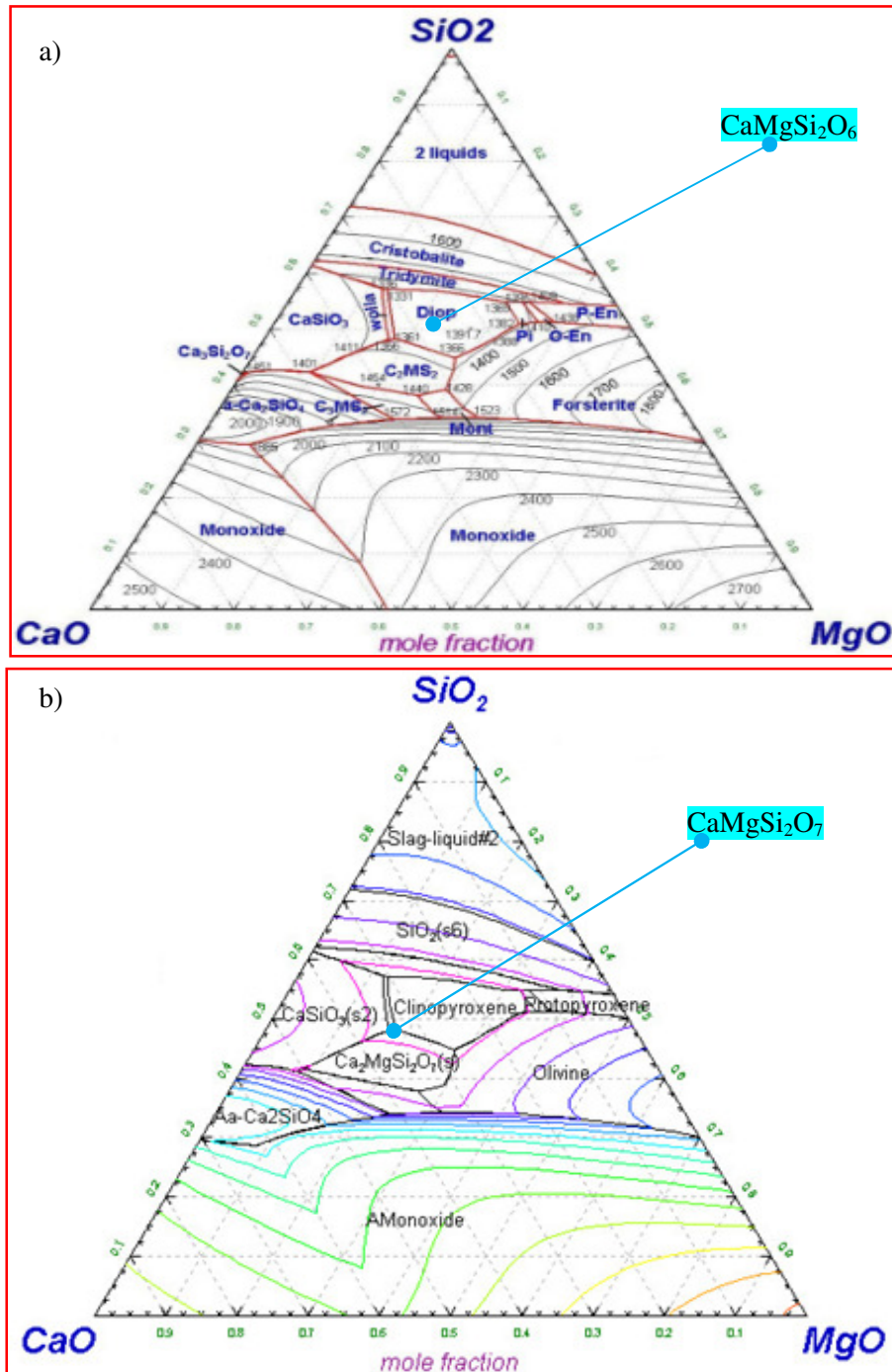


Figure .III.36. Diagramme de phase du système $(CaO-MgO-SiO_2)$ [79 ,80].

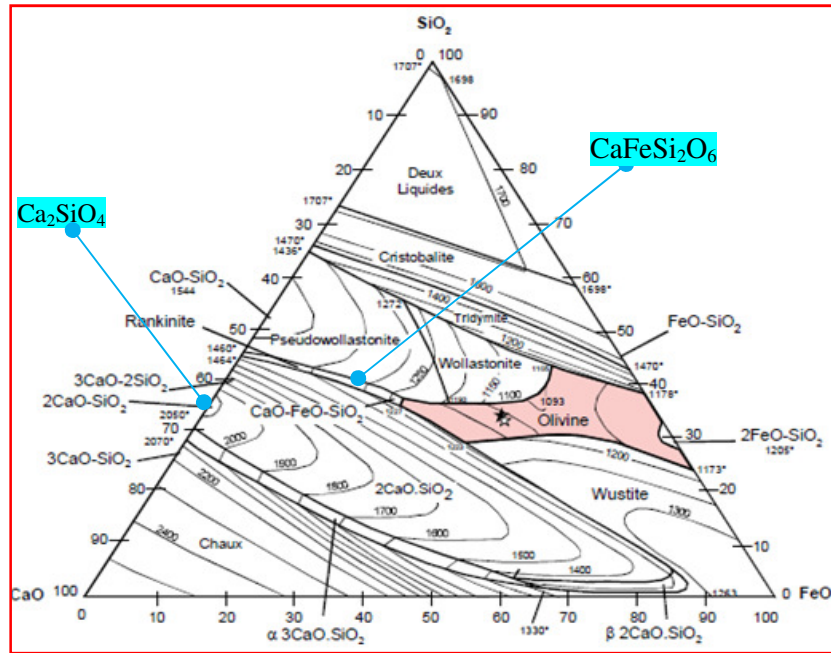


Figure .III.37. Diagramme de phase du système (CaO-FeO-SiO₂) [81].

- ✓ Les phases de (Mg₂Al₄Si₅O₁₈), (MgSiO₃) et (Mg₂SiO₄) peuvent être formées à basse température et ont des structures cristallines orthorhombiques dans le flux (FC) et le laitier (LC et LB) respectivement. L'intensité élevée des composés des phases cristallines et des éléments est représentée dans les figures (III.25, III.26 et III.2, III.3) (FC, LC et LB). Elle est représentée par les pics de XRD et FRX de (FC, LC et LB) (voir diagramme de phase (MgO-SiO₂-Al₂O₃) dans la figure III.38).

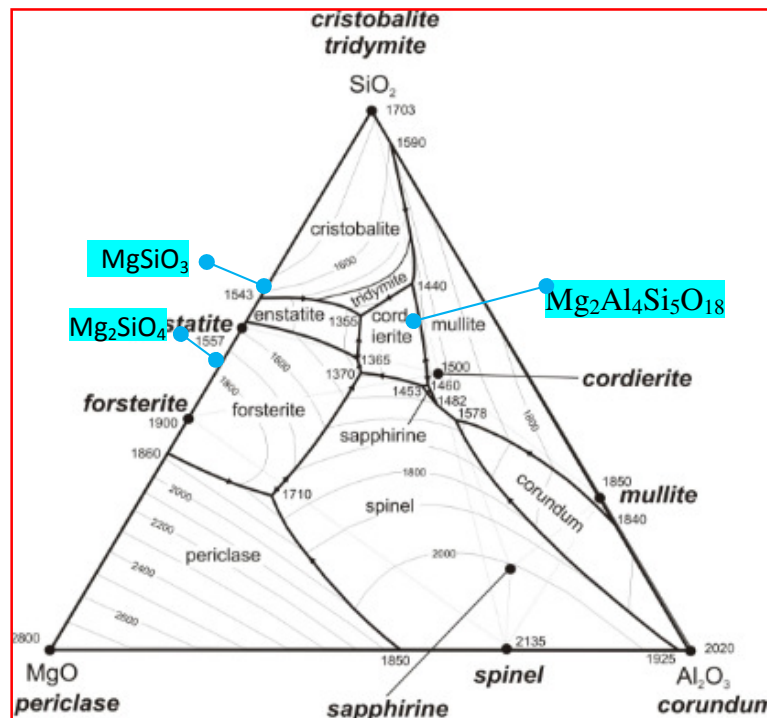


Figure .III.38. Diagramme de phase du système (MgO-SiO₂-Al₂O₃) [82].

- ✓ Les autres phases détectées sont la silice (SiO_2), et l'oxyde calcium (CaO). Tous ces composés n'ont montré pratiquement aucune réaction à la température de frittage du flux et de la formation de laitier à cause de leur teneur insuffisante pour la formation de nouvelles phases [58]. Ana Ma et M.L. Davis [58,83] ont montré qu'une petite quantité de silicium peut être formée par voie électrochimique, mais la majeure partie est formée au moyen d'une évaporation de calcium, ce qui peut réduire la SiO_2 dans le flux.

La figure III.39. montre les comparaisons de diffraction des rayons X entre les flux (FA, FB et FC) et les laitiers (LA, LB et LC) à partir des données d'oxyde de composé. On peut remarquer la présence des phases cristallines comme (Mn_3O_4 , SiO_2 , TiO_2), (SiO_2 , NaAlSiO_4) et (Ti_3O_5 , NaAlSiO_4 , $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH,F})_4$) entre (FA et LA), (FB et LB) et (FC et LC) respectivement.

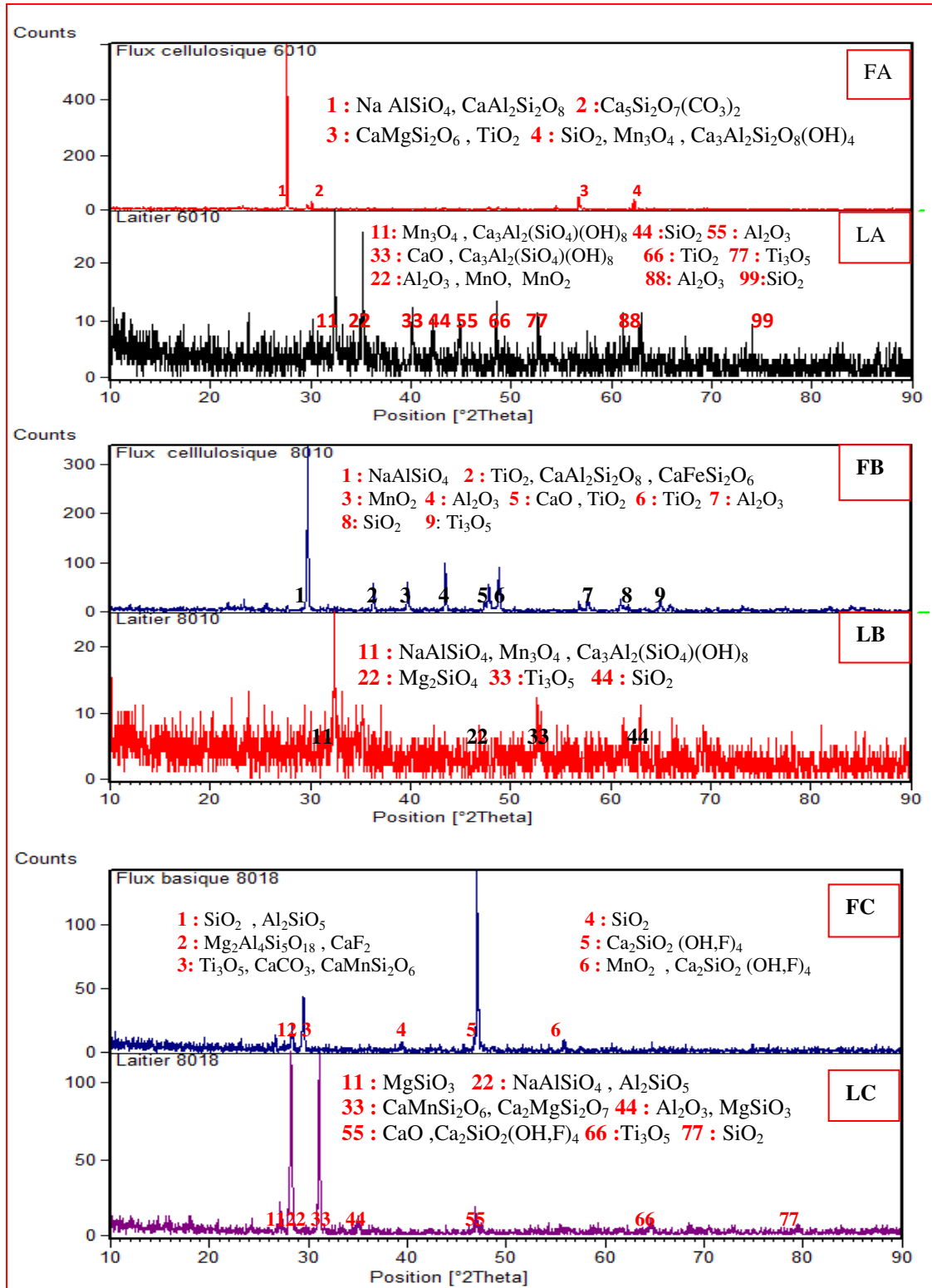


Figure III.39 . Comparaison des diffractogrammes entre les flux (FA, FB et FC) et les laitiers (LA , LB et LC) .

III.11.2. Effet des phases cristallines et des éléments sur le comportement du flux et la formation du laitier.

Les oxydes et les carbonates sont utilisés pour la fabrication des différents flux et la formation de laitier après la soudure, ils forment les différentes phases cristallines après la température de frittage et la température de fusion. D'après les analyses XRD, la silice, l'oxyde de manganèse (MnO), et l'oxyde de titane (TiO₂) sont les composés qui réagissent pendant le chauffage du flux et après soudage pour la formation du laitier. La silice a réagi pour former des espèces anioniques, tels que les silicates [58]. La quantification sous forme d'élément des différents oxydes et silicates observée dans le flux et le laitier sont montrés dans les tableaux III.1 et III.3.

- ✓ On a constaté que l' Hausmannite (Mn₃O₄) a été formée dans flux (FA). Elle a une structure spinelle avec des valences d'électrons, Mn⁺² et Mn⁺³. Ainsi, il est possible d'avoir des réactions différentes qui permettent la formation de plusieurs composés d'oxyde et les radicaux d'oxyde de MnO, formant des inclusions [58]. Les réactions les plus importantes entre l'arc électrique et le bain de soudage correspondent à celles où l'oxygène est impliqué. L'oxygène peut réagir avec toutes les espèces cationiques disponibles pour donner des inclusions non métalliques. Les silicates formés seront plus solubles dans le laitier que dans le bain de soudure. Le transfert de Mn, Si et Al du flux au bain soudure dépend des quantités dans le flux [58,83]. L'identification des phases des flux peut être utilisée pour connaître le comportement des flux et l'effet du flux au cours de leur processus de dépôt, ainsi que sur les propriétés mécaniques des soudures [58]. Dans les flux, la présence de Al₂O₃ peut être observée, ce qui a un effet sur la formation de laitier. Le même effet a été observé pour déterminer la présence de TiO₂ dans le flux [58,84]. Les ions de calcium dans les flux augmentent la stabilité de l'arc électrique [58,85]. Ces ions peuvent provenir soit de l'oxyde ou de composés fluorés.
- ✓ On a détecté une grande teneur en calcium dans les flux (FA et FC) et les laitiers (LA et LC), et une faible teneur dans le flux (FB) et le laitier (LB). Le calcium peut présenter un arc électrique instable pendant le soudage. Il est

également connu que la SiO_2 et Al_2O_3 augmentent la viscosité des flux et des laitiers, tandis que des additions de MnO , et TiO_2 réduisent la viscosité [58,84]. Ces derniers composés ont été détectés dans le flux (FB). Dans la plupart des flux, le calcium et le sodium sont présents ce qui augmente la stabilité de l'arc électrique et forme le laitier pendant le soudage. La viscosité des flux augmente par la présence d' Al_2O_3 et SiO_2 qui sont présents dans la plupart des flux et forme le laitier pendant le soudage. Dans la plupart des flux, il a été observé que le MnO et SiO_2 sont conjointement présents et augmentent le comportement thermomécanique du joint de soudure [86]. Les oxydes MnO_2 et SiO_2 ont été observés et peuvent avoir un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques des soudures [58,87]. Ils ont été inclus dans la formation des flux (FA, FB et FC). L'oxyde de titane a été observé pour favoriser la formation de ferrite aciculaire, qui est moins sensible à la fissuration [58,88].

- ✓ Les cations des flux comme Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Si^{4+} , Mn^{2+} et Mn^{3+} peuvent réagir avec l'oxygène et l'unité tétraèdre SiO_4^{-4} pour former des silicates dans les flux et les laitiers. Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , ont une grande énergie négative ($-\Delta H$) de ΔG_f d'énergie de formation, par conséquent, ils réagissent rapidement avec l'oxygène dans l'arc de soudage. Il y a des changements dans le nombre d'oxydation de certains constituants cationiques comme Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mn^{+2} , Mn^{+3} [86].

III.11.3 Analyses des phases formées entre le métal de base X42, métaux d'apports et de la zone fondue en multi-passes par diffraction des rayons X (DRX)

La Figure III.40. représente la superposition des diffractogrammes du métal de base X42 et les différents métaux d'apports.

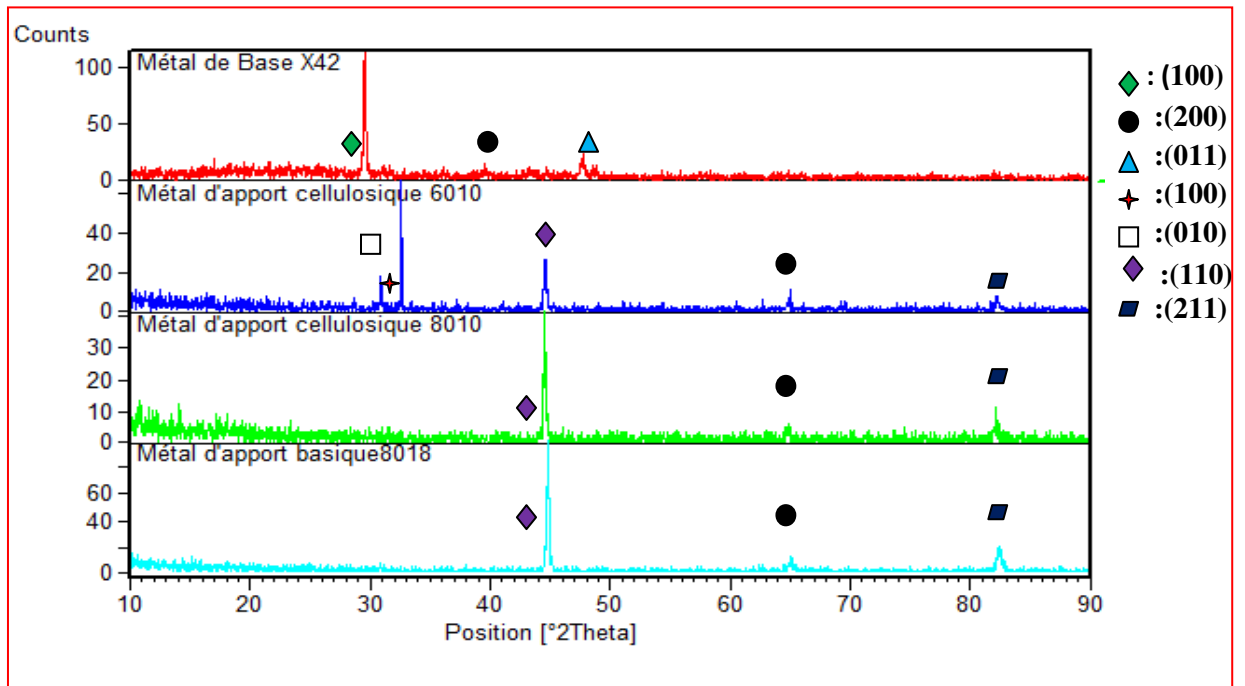


Figure III.40. Superposition des diffractogrammes du métal de base X42 et des métaux d'apports (E6010, E8010-P1 et E8018-G).

Le premier spectre de la figure III.40, correspond au métal de base X 42. Le second spectre correspond aux différents métaux d'apport. On remarque une différence entre les spectres de raies du métal de base et ceux des métaux d'apports ou des petits pics sont apparus.

Le tableau III.17. illustre les caractéristiques des pics les plus intenses telles que ; la position (2θ), l'intensité (I), le plan (hkl) et la distance entre les plans (d_{hkl}) dans le métal de base X42, et les métaux d'apports celluloseux (E6010, E8010-P1) et basique (E8018-G).

Tableau III .17 . Caractéristiques de spectre du métal de base X42 et des métaux d'apports.

Métal	2Theta (°)	Plan (hkl)	Intensité (I)	Distance d_{hkl}	Parametre moyenne(A°)	Taille moyenne des grains (A°)
Métal de base	2θ=29.6589	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0084$	4.934	5.613
	2θ=39.563	α (200)	13.25	$d_{hkl}=2.277$		
	2θ=47.578	α(011)	12.83	$d_{hkl}=1.906$		
Métal d'apport E6010	2θ=30.8946	α(100)	44.15	$d_{hkl}=2.890$	5.4379	4.974
	2θ=32.5821	α (010)	100.00	$d_{hkl}=2.744$		
	2θ=44.5688	α (110)	81.12	$d_{hkl}=1.9770$		
	2θ=64,9056	α(200)	10.83	$d_{hkl}=1.4349$		
	2θ=82,3002	α(211)	13.10	$d_{hkl}=1.170$		
Métal d'apport E8010-P1	2θ=44.4848	α(110)	100.00	$d_{hkl}=2.0342$	2.906	4.65
	2θ=64.6716	α(200)	9.92	$d_{hkl}=1.4395$		
	2θ=82.1388	α(211)	20.43	$d_{hkl}=1.1731$		
Métal d'apport E80108-G	2θ=44,77	α(110)	100.00	$d_{hkl}=2.0219$ 0	2.88	6.546
	2θ=64.9569	α(200)	8.59	$d_{hkl}=1.4339$		
	2θ=82.3509	α(211)	17.31	$d_{hkl}=1.1695$		

Le diffractogramme montre le métal de base en présence d'un grand pic correspondant à la ferrite (pic (100)) et deux pics d'une plus petite intensité. On remarque que :

- ✓ Seuls les pics de la ferrite (110), (200) et (211) sont présents sur les trois spectres de diffractions des rayons X dans les différents métaux d'apport [89]. Le pic d'intensité $2\theta = 29.6589 / I = 100$ est orienté vers la direction (100) dans le métal de base. Alors que le pic d'intensité $2\theta = 32.5821 / I = 100$ est orienté vers la direction (001) dans le métal d'apport cellulosique E6010, or les autres métaux d'apports ont trois pics d'intensités $2\theta = 44.4848 / I = 100$ orientés vers la direction (110).
- La Figure III.41. représente les histogrammes des paramètres cristallins moyens (a) et la taille moyenne des grains (b) dans le métal de base X42 et les métaux d'apports.

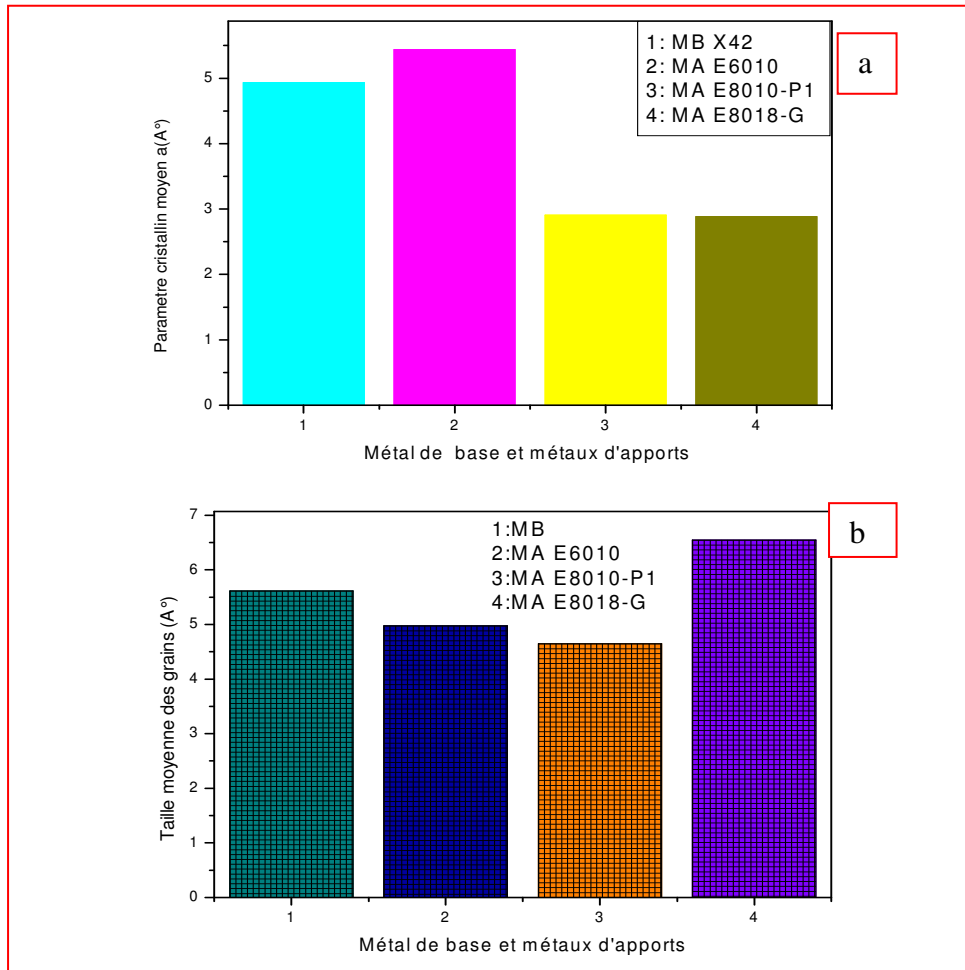


Figure III.41. Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans le métal de base X42 et les métaux d'apports.

- ✓ A partir des diffractions des rayons X et la loi de Bragg, on a calculé le paramètre cristallin moyen (a). La figure III.41a. représente la variation des paramètres cristallins moyens du métal de base et des métaux d'apports, on peut remarquer que les valeurs ne sont pas proches, lorsque le déplacement des pics correspond à un changement de paramètre cristallin. On a calculé la taille moyenne des grains par la formule de Scherrer, en mesurant la largeur à mi-hauteur (FWHM) des pics les plus intenses. Dans la figure III.41b, on a présenté l'évolution de la taille moyenne des grains du métal de base et des métaux d'apports. On a remarqué que la variation de la taille moyenne des grains est de 6.546Å pour le métal d'apport basique, alors que celle du métal de base est de 5.613Å et des métaux d'apports celluloseux : 4.974Å et 4.65Å .

a) La Figure III.42. représente la superposition des diffractogrammes obtenues dans les zones fondues (a) et les zones affectées thermiquement (b) en première passe (PA, PB, PC et PD).

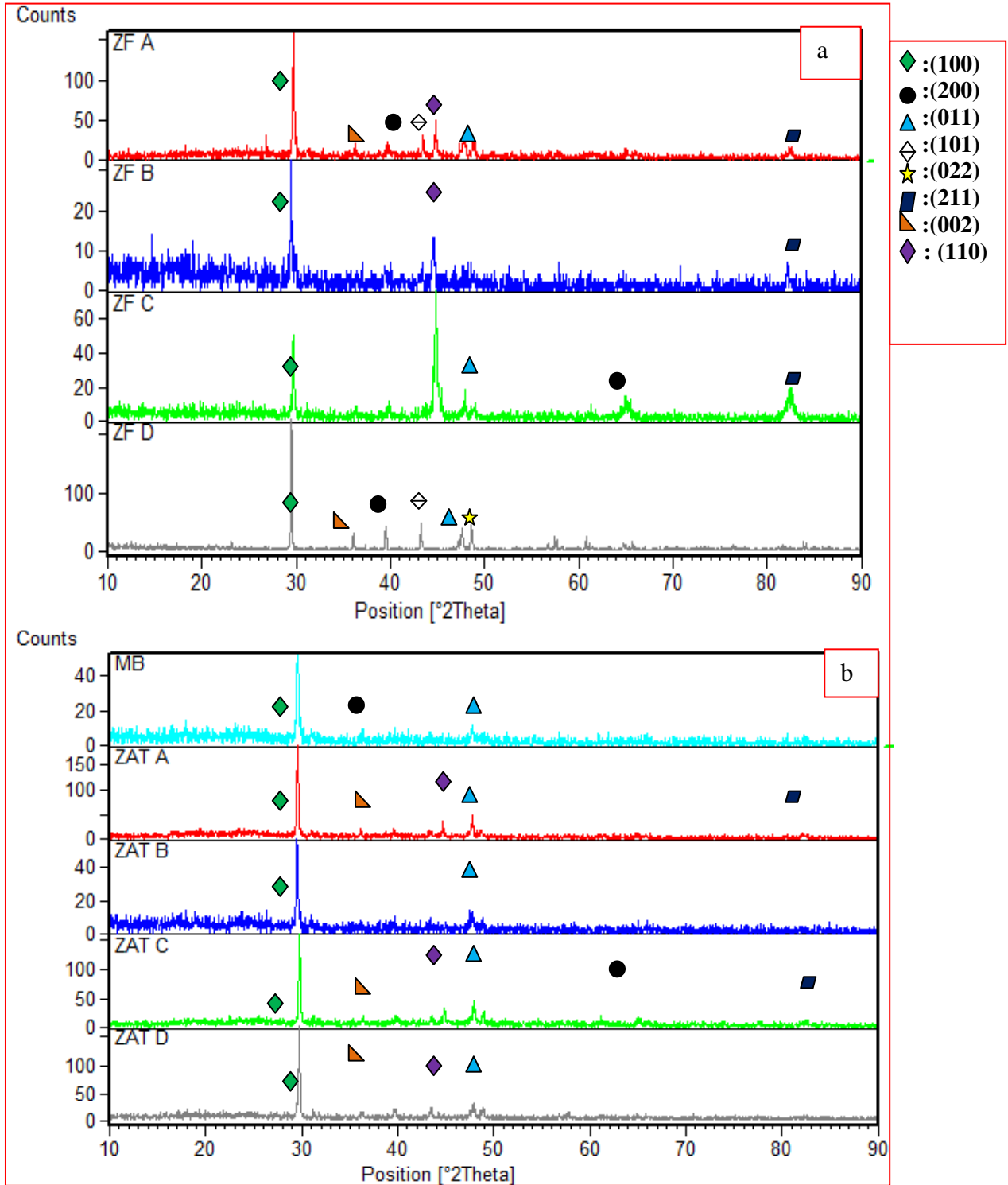


Figure III.42. Superposition des diffractogrammes. (a) dans les zones fondue (ZF) et (b) dans les zones affectées thermiquement (ZAT) en première passe (PA, PB, PC et PD).

- La figure III.42 a. montre les spectres de diffraction des rayons X des différentes zones fondues en première passe, on remarque :
 - ✓ Les trois pics d'intensités $2\theta = 29.734 / I = 100$ sont orientés vers la direction (100) en passes (PA, PB et PD), mais en passe (PC), le pic d'intensité $2\theta = 44,8382 / I = 100$ est orienté vers la direction (110). Une légère différence entre les spectres de raies de centre du cordon(ZF), ou des petits pics sont apparus en passes (PA et PD).

- La figure III.42 b. montre les spectres de diffraction de rayons X des différentes zones affectées thermiquement en première passe, On remarque que :
 - ✓ Seuls les pics de la ferrite (100) et (011) présents sur les quatre spectres dans les zones affectées thermiquement en première passe (PA, PB, PC et PD) sont presque identiques. Les quatre pics d'intensités $2\theta = 29.890 / I = 100$ sont orientés vers la direction (100) en passes (PA, PB, PC et PD).

Le tableau III.18, illustre les caractéristiques des pics les plus intenses telles que ; la position (2θ), l'intensité(I), le plan (hkl) et la distance entre les plans (d_{hkl}) dans les zones fondues (ZF) et les zones affectées thermiquement en première passe (PA,PB ,PC et PD) avec les différents flux.

Tableau III.18. Caractéristiques des spectres des zones fondues et les zones affectées thermiquement en première passe (PA, PB, PC et PD) avec les différents flux.

Zone fondue	2Theta (°)	Plan (hkl)	Intensité (I)	Distance d_{hkl}	Paramètre Moyen a (Å)	Taille Moyenne des grains (Å)
ZF 1(PA)	2θ=29.734	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0022$	5.19	13.61
	2θ=36.418	α(001)	5.92	$d_{hkl}=2.4651$	4.92	4.35
	2θ=39.837	α (010)	8.44	$d_{hkl}=2.2610$	4.52	4.39
	2θ=43.568	α (101)	12.72	$d_{hkl}=2.0757$	2.92	6.77
	2θ=44.811	α (110)	23.63	$d_{hkl}=2.0209$	2.84	6.80
	2θ=47.920	α(011)	13.95	$d_{hkl}=1.8968$	4.62	4.52
	2θ=49.008	α (110)	16.76	$d_{hkl}=1.8572$	4.53	4.54

	2 θ =65.172	α (200)	3.35	$d_{hkl}=1.4303$	2.85	5.20
	2 θ =82.580	α (211)	6.13	$d_{hkl}=1.1673$	2.84	2.24
					am=3.91244	tm= 5.8244
ZF passe 1(PB)	2 θ =29.579	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0176$	3.64	16.27
	2 θ =44.656	α (110)	31.64	$d_{hkl}=2.0276$		9.20
	2 θ =82.269	α (211)	23.70	$d_{hkl}=1.1710$		12.81
ZF passe 1(PC)	2 θ =29,6918	α (100)	69,24	3,00889	5.19	8.80
	2 θ =44,8382	α (110)	100,00	2,02145	2.84	5.39
	2 θ =47,8000	α (011)	16,40	1,90288	4.63	158.33
	2 θ =65,0910	α (200)	11,87	1,43305	2.01	2.45
	2 θ =82,4563	α (211)	22,73	1,16879	2.85	2.67
ZF passe 1(PD)	2 θ = 29.579	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0176$	5.22	13.61
	2 θ = 36.107	(001)	10.26	$d_{hkl}=2.4856$	4.97	8.95
	2 θ = 39.682	(010)	12.77	$d_{hkl}=2.2695$	4.53	6.69
	2 θ = 43.412	(101)	20.32	$d_{hkl}=2.0828$	2.93	14.16
	2 θ = 47.764	α (011)	14.52	$d_{hkl}=1.8684$	4.64	9.31
	2 θ = 48.697	α (110)	0.61	$d_{hkl}=1.8684$	4.55	9.34
ZAT passe 1(PA)	2 θ = 29.579	α (100)	I=100.00	$d_{hkl}=3.0176$	5.22	7.48
	2 θ = 36.418	α (001)	I=5.78	$d_{hkl}=2.4651$	a = 4.92	t=4.35
	2 θ = 39.682	(010)	I=4.36	$d_{hkl}=2.2695$	a =4.53	t=2.19
	2 θ = 43.412	α (101)	I=11.69	$d_{hkl}=2.0828$	a =2.93	t =6.77
	2 θ = 44.811	α (110)	I=16.35	$d_{hkl}=2.0209$	a = 2.84	t = 6.80
	2 θ = 47.764	α (011)	I=7.10	$d_{hkl}=1.9027$	a = 4.641	t=6.88
	2 θ = 82.28	α (211)	I=3.38	$d_{hkl}=1.170$	a=2.85	t=0.78
				am= 3.9901	tm= 5.0357	
ZAT passe 1(PB)	2 θ =29.579	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0176$	4.34	16.27
	2 θ = 47.609	α (011)	27.51	$d_{hkl}=1.9085$		10.54
ZAT passe 1(PC)	2 θ = 29.890	α (100)	I=100.00	$d_{hkl}=2.9869$	5.16	10.70
	2 θ = 36.418	(001)	I=8.64	$d_{hkl}=2.4651$	4.92	19.04
	2 θ = 39.837	(010)	I=0.66	$d_{hkl}=2.2442$	4.52	12.83
	2 θ = 43.723	(101)	I=5.91	$d_{hkl}=2.0687$	2.91	4.45
	2 θ = 44.966	α (110)	I=14.68	$d_{hkl}=2.0143$	2.83	6.80
	2 θ = 47.920	α (011)	I=17.43	$d_{hkl}=1.8968$	4.62	6.30
	2 θ =49.008	α (110)	I=7.31	$d_{hkl}=1.8572$	4.53	6.91
	2 θ =61.287	(020)	I=7.58	$d_{hkl}=1.5113$	5.25	168.24
	2 θ = 65.172	α (200)	I=5.11	$d_{hkl}=1.4303$	2.85	3.63
	2 θ = 82.33	α (211)	I=3.71	$d_{hkl}=1.170$	2.85	0.78
ZAT passe 1(PD)	2 θ = 29.890	α (100)	I=100.00	$d_{hkl}=2.9869$	5.16	10.70
	2 θ = 36.418	(001)	I=8.64	$d_{hkl}=2.4651$	4.92	19.04
	2 θ = 39.837	(001)	I=0.66	$d_{hkl}=2.2442$	4.52	12.83
	2 θ = 43.723	(101)	I=5.91	$d_{hkl}=2.0687$	2.91	4.45
	2 θ = 44.966	α (110)	I=14.68	$d_{hkl}=2.0143$	2.83	6.80
	2 θ = 47.920	α (011)	I=17.43	$d_{hkl}=1.8968$	4.62	6.30

La Figure III.43. représente les histogrammes des paramètres cristallins moyens (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et la ZAT en passes (PA, PB, PC et PD) avec les différents flux.

Dans la figure III.43 a, b. on remarque que :

- Les valeurs ne sont pas proches, lorsque le déplacement des pics correspond à un changement de paramètre cristallin. Les valeurs des paramètres cristallins moyens de la ZAT sont élevées en passes (PA, PB et PC), alors que le paramètre cristallin moyen est élevé dans la ZF de passe (PD). L'évolution de la taille moyenne des grains de la ZF et la ZAT en passes (PA, PB, PC et PD) est importante surtout en passe (PC).

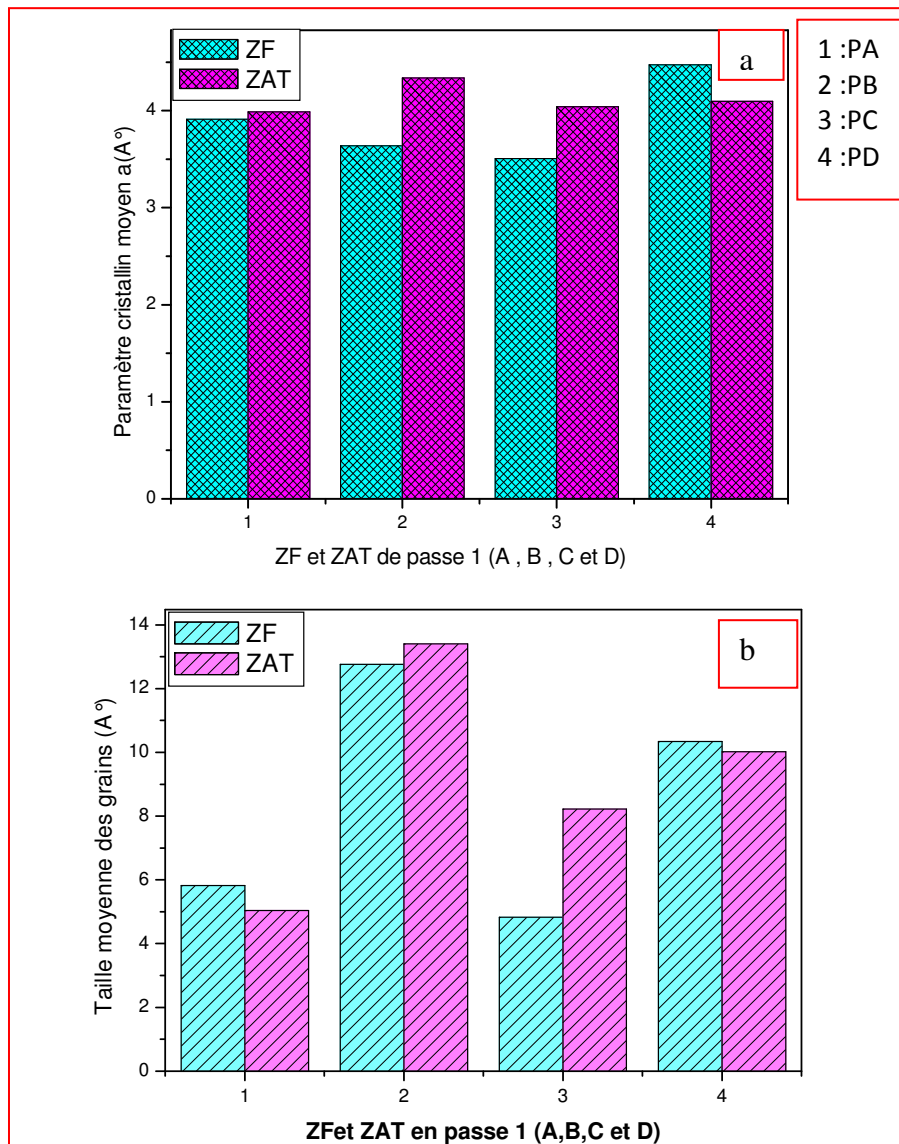


Figure III.43. Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en passes (PA, PB, PC et PD) avec les différents flux.

La Figure III.44. représente la superposition des diffractogrammes obtenus dans les zones fondue (a) et les zones affectées thermiquement (b) en multi-passes (P1, P2, P3), avec les différents flux (E6010 et E8010-P1).

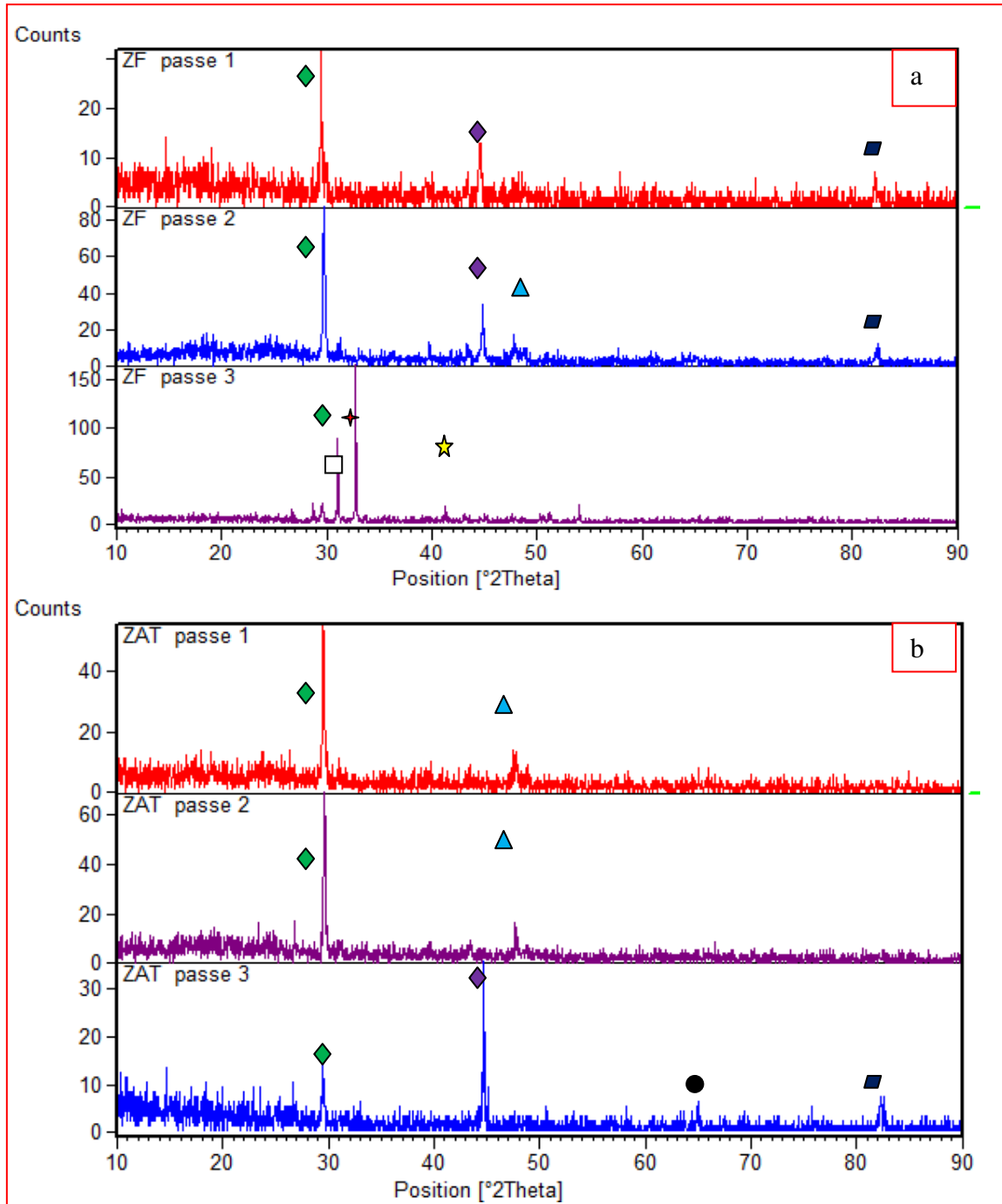


Figure III.44. Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues (a), et les zones affectées thermiquement (b) en multi-passes (P1, P2, etP3) avec les flux (E6010 et E8010-P1).

La figure III.44a, b. montre les spectres de diffraction des rayons X des différentes ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3), on remarque :

- ✓ Une légère différence entre les différents spectres de raies de ZF, et ZAT. Des petits pics sont plus apparents en passes (P2 et P3) avec le même flux utilisé (E8010-P1) dans la ZF. Les deux pics d'intensités $2\theta = 29.579 / I = 100$ sont orientés vers la direction (100) dans la ZF et ZAT en passes (P1 et P2), mais en passe (P3), les pics d'intensités $2\theta = 32.7626$, $2\theta = 44.6548 / I = 100$ sont orientés vers les directions (010), (110) dans la ZF et la ZAT respectivement.

Le tableau III.19. illustre les caractéristiques des pics les plus intenses telles que ; la position (2θ Thêtas), l'intensité (I), le plan (hkl) et la distance entre les plans (d_{hkl}) dans les zones fondues (ZF) et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1,P2,P3) avec les flux (E6010 et E8010-P1).

Tableau .III.19. Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (E6010 et E8010-P1).

Zone fondue	2Theta (°)	Plan (hkl)	Intensité (I)	Distance d_{hkl}	Paramètre Moyen a(A°)	Taille Moyenne des grains (A°)
ZF passe 1 (PB)	2θ=29.579	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0176$	am= 3.64	16.27
	2θ= 44.656	α (110)	31.64	$d_{hkl}=2.0276$		9.20
	2θ= 82.269	α(211)	23.70	$d_{hkl}=1.1710$		12.81
						tm= 12.76
ZF passe 2(PE)	2θ=29.5425	α (100)	100	$d_{hkl}=3.02125$	5.19	10.69
	2θ= 44.966	α (110)	32.65	$d_{hkl}=2.0143$	2.83	9.21
	2θ= 47.920	α(011)	11.83	$d_{hkl}=1.8968$	4.62	158.4
	2θ= 82.580	α(211)	7.73	$d_{hkl}=1.1673$	2.84	3.44
					am= 3.87	tm= 7.78
ZF Passe 3 (PJ)	2θ=28.6375	α (010)	I= 7.93	$d_{hkl}=3.113$	4.39	4.26
	2θ=29.5033	α(100)	I=14.54	$d_{hkl}=3.02400$	5.23	5.16
	2θ=31.7347	α(010)	I=78.91	$d_{hkl}=2.8656$	11.27	10.74
	2θ=32.7626	α (001)	I=100	$d_{hkl}=2.7302$	3.84	13.71
	2θ=41.2315	α(101)	I=8.49	$d_{hkl}=2.1868$	3.15	4.41
				am= 5.576	tm =7.656	
ZAT passe 1 (PB)	2θ=29.579	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0176$	am= 4.34	16.27
	2θ= 47.609	α(011)	27.51	$d_{hkl}=1.9085$		10.54
						tm=13.405
ZAT passe 2	2θ=29.8207	α(100)	100.00	$d_{hkl}=2.9936$	4.2320	0.1440
	2θ=47.9614	α(011)	17.07	$d_{hkl}=1.89686$	4.6406	0.2048

(E)					am=4.4363	tm=0.1744
ZAT passe 3 (PJ)	2 θ =29.4577	α (100)	28.68	d_{hkl} =3.0285	5.24	4.27
	2 θ =44.6548	α (110)	100.00	d_{hkl} =1.43616	2.85	6.80
	2 θ =64.8441	α (200)	12.73	d_{hkl} =1.43616	2.83	4.89
	2 θ =82.3264	α (211)	14.12	d_{hkl} =1.16984	2.85	3.37
					am=3.4425	tm= 4.844

La Figure III.45. représente les histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et la ZAT en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (E6010 et E8010-P1).

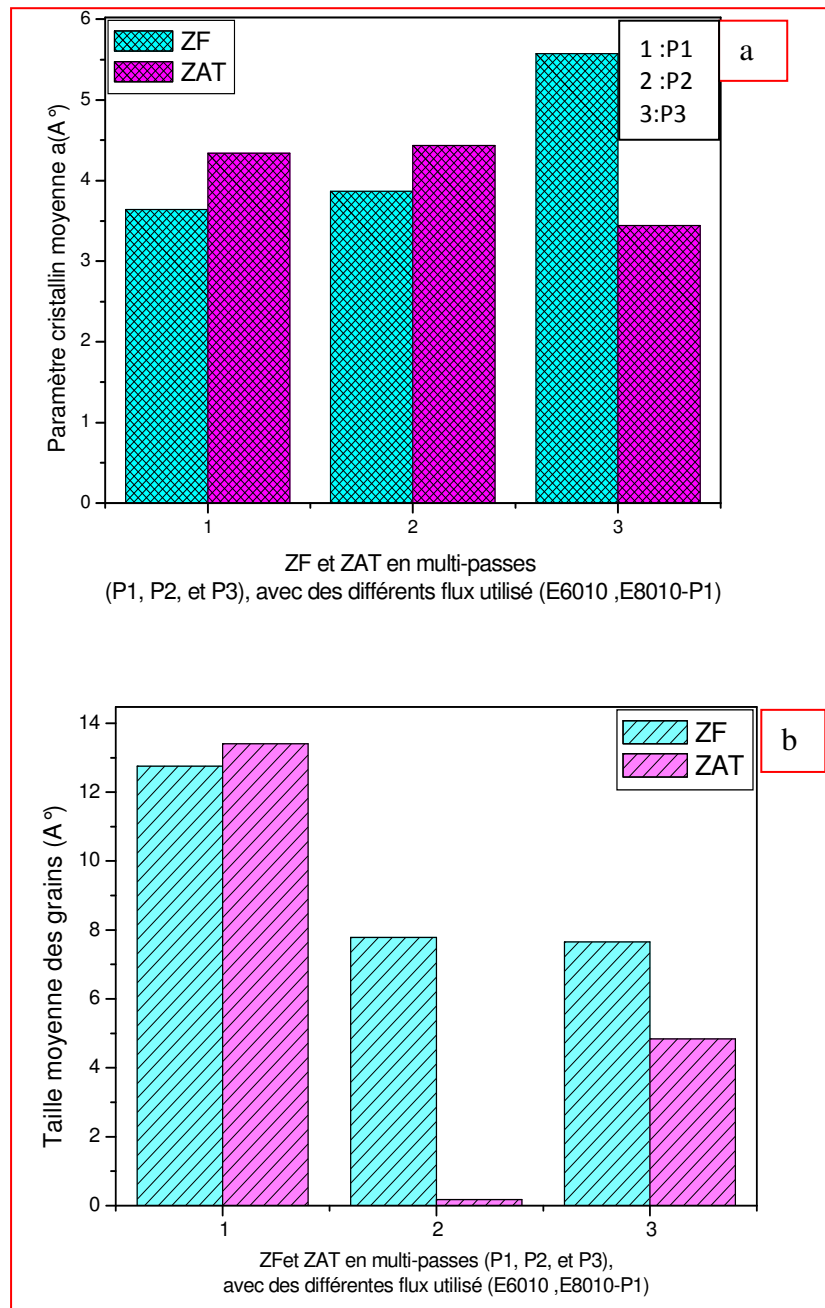


Figure III.45. Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (E6010 et E8010-P1).

Dans la figure III.45 a, b. on a remarqué que :

- Les valeurs du paramètre cristallin augmentent progressivement dans la ZF en multi-passes (P1, P2 et P3) par rapport à la ZAT avec les différents flux cellulosiques (FA : E6010 et FB : E8010-P1), lors d'un faible déplacement de pics correspondant à un changement de paramètre cristallin. L'évolution de la taille moyenne des grains en passe (P2) est de 7.78 en ZF et 0.1744 en ZAT par rapport aux passes (P1 et P3).

b) La Figure III.46. représente la superposition des diffractogrammes obtenus dans les zones fondues (a) et les zones affectées thermiquement (b) en multi-passes (P1, P2 et P3), avec les flux (E6010 et E8018-G).

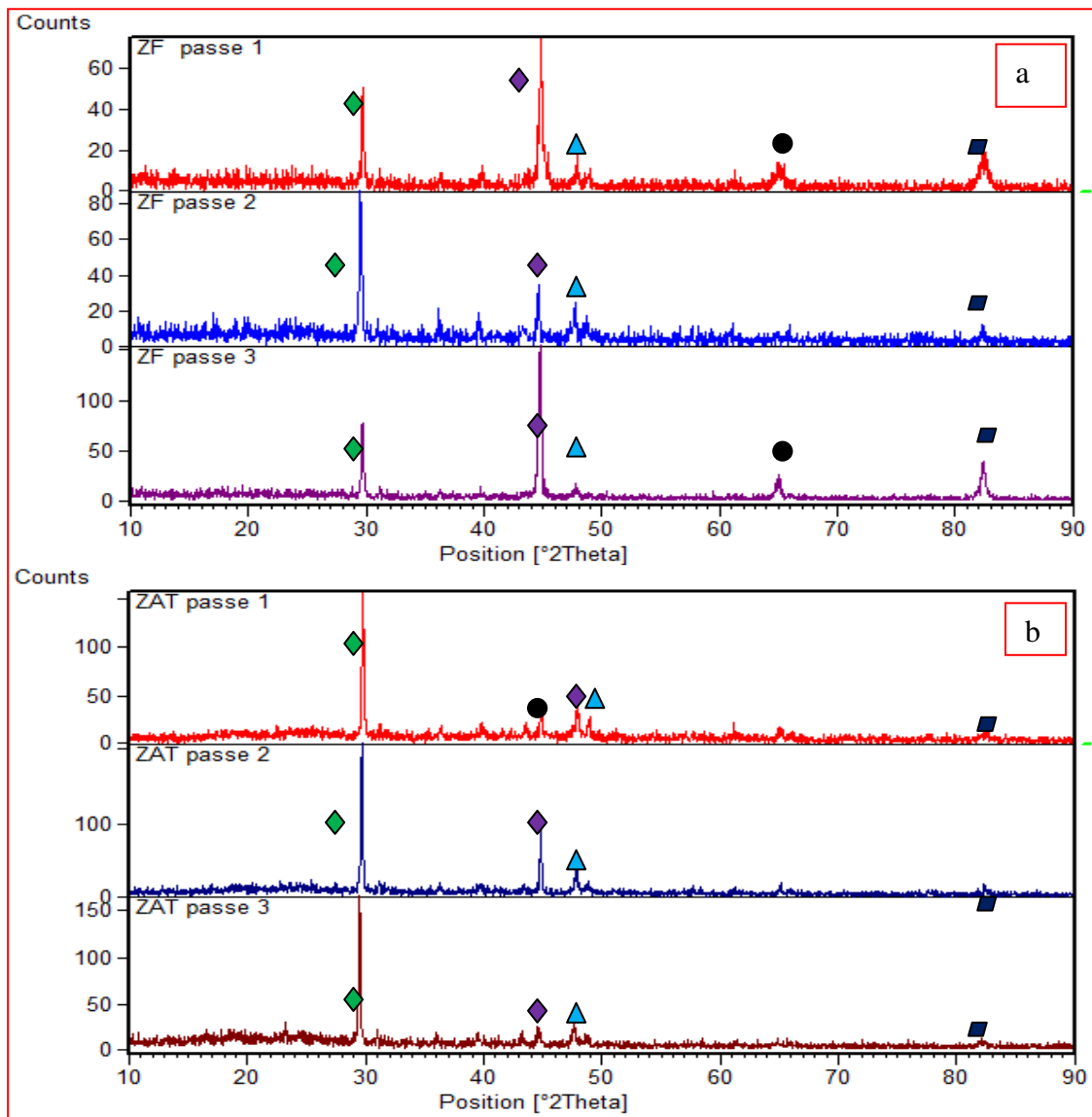


Figure III.46. Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zone affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (FA : E6010 et FB : E8018-G).

La figure III.46 a, b. montre les spectres de diffraction des rayons X des différentes ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3). On remarque :

- ✓ Une différence sensible entre les différents spectres de raies de ZF et ZAT. Des petits pics sont apparus dans la ZF et ZAT en passes (P1, P2 et P3). Deux pics d'intensités $2\theta = 44,8382 / I = 100$ sont orientés vers la direction (110) dans ZF en passes (P1 et P3), mais en passe (P2) le pic d'intensité $2\theta = 29.424 / I = 100$ est orienté vers la direction (100). Les trois pics d'intensités $2\theta = 29.890 / I = 100$ sont orientés vers la direction (100) dans la ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3).

Le tableau III.20. illustre les caractéristiques des pics les plus intenses telles que ; la position (2 Thêtas), l'intensité (I),le plan (hkl) et la distance entre les plans (d_{hkl}) dans les zones fondues (ZF) et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1,P2 et P3) avec les flux (FA : E6010 et FC : E8018-G).

Tableau. III.20. Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zone affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec les flux (FA :E6010 et FB : E8018-G).

Zone fondue	2Theta (°)	Plan (hkl)	Intensité (I)	Distance d_{hkl}	Paramètre moyen a (Å°)	Taille moyenne des grains (Å°)
ZF passe 1 (PC)	2 θ =29,6918	α (100)	69,24	3,00889	5.19	8.80
	2 θ =44,8382	α (110)	100,00	2,02145	2.84	5.39
	2 θ =47,8000	α (011)	16,40	1,90288	4.63	158.33
	2 θ =65,0910	α (200)	11,87	1,43305	2.01	2.45
	2 θ =82,4563	α (211)	22,73	1,16879	2.85	2.67
					am= 3.504	tm=4.8275
ZF passe 2 (PF)	2 θ =29.424	α (100)	100	d_{hkl} =3.0332	5.24	8.80
	2 θ =36.107	α (001)	8.98	d_{hkl} =2.4856	4.97	16.90
	2 θ =39.526	α (010)	3.87	d_{hkl} =2.2781	3.21	153.81
	2 θ = 43.257	α (101)	13.26	d_{hkl} =2.0899	2.94	7.41
	2 θ =44.656	α (110)	37.9	d_{hkl} =2.0256	2.85	7.82
					am=3.8144	tm=7.88
ZF passe 3 (PK)	2 θ =29.6038	α (100)	I=38.64	d_{hkl} =3.0139	5.21	8.80
	2 θ =44.6968	α (110)	I=100.00	d_{hkl} =2.02508	2.85	9.20
	2 θ =47.8494	α (011)	I=5.21	d_{hkl} =1.8987	4.63	4.52
	2 θ =64.9379	α (200)	I=10.80	d_{hkl} =1.4343	2.86	4.90
	2 θ =82.337	α (211)	I=19.84	d_{hkl} =1.1697	2.85	5.34

					am=3.68	tm= 6.552
ZAT passe 1 (PC)	2 θ =29.890	α (100)	I=100.00	d_{hkl} =2.9869	5.16	10.70
	2 θ =36.418	α (001)	I=8.64	d_{hkl} =2.4651	4.92	19.04
	2 θ =39.837	α (010)	I=0.66	d_{hkl} =2.2442	4.52	12.83
	2 θ =43.723	α (101)	I=5.91	d_{hkl} =2.0687	2.91	4.45
	2 θ =44.966	α (110)	I=14.68	d_{hkl} =2.0143	2.83	6.80
	2 θ =47.920	α (011)	I=17.43	d_{hkl} =1.8968	4.62	6.30
					am=4.044	tm=8.2264
ZAT passe 2 (PF)	2 θ =29.734	α (100)	100	d_{hkl} =3.0022	5.19	10.69
	2 θ =44.966	α (110)	31.47	d_{hkl} =2.0143	2.83	11.19
	2 θ =47.920	α (011)	16.00	d_{hkl} =1.8968	4.62	7.92
	2 θ =65.172	α (200)	4.99	d_{hkl} =1.4303	2.85	4.90
	2 θ =82.425	α (211)	4.72	d_{hkl} =1.1692	2.85	4.47
						am=3.2875
ZAT passe 3 (PK)	2 θ =29.4461	α (100)	I=100.00	d_{hkl} =3.02974	5.24	10.69
	2 θ =44.5966	α (110)	I=8.16	d_{hkl} =2.02936	2.86	4.47
	2 θ =47.5632	α (011)	I=11.66	d_{hkl} =1.9094	4.65	4.51
	2 θ =82.1116	α (211)	I=4.34	d_{hkl} =1.1723	2.860	1.90
						am=3.9025

La Figure III.47. représente les histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et la ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3), avec les flux (FA : E6010 et FC :E8018-G).

Dans la figure III.47 a, b. on a remarqué que :

- Les valeurs du paramètre cristallin moyen diminuent dans la ZF entre (P1) et (P2 et P3) par rapport la ZAT avec les flux (FA : E6010 et FC : E8018-G), lors d'un faible déplacement des pics correspondant à un changement des paramètres cristallins. L'évolution de la taille moyenne des grains en passe (P1) est de 4.82 en ZF et de 8.22 en ZAT par rapport aux passes (P2 et P3).

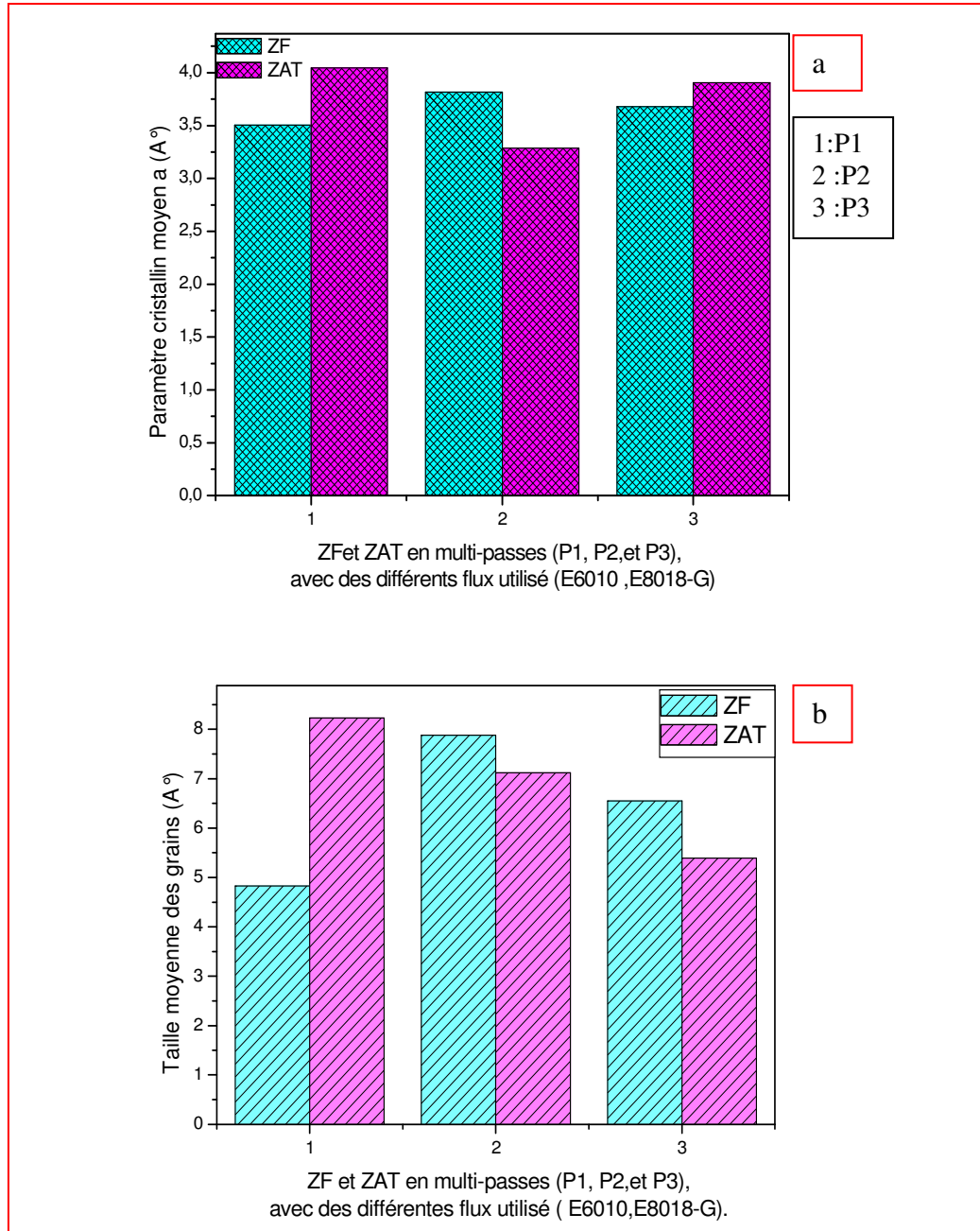


Figure III.47. Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2et P3), avec les flux (FA :E6010 et FC : E8018-G).

La Figure III.48. représente la superposition des diffractogrammes obtenus dans les zones fondues (a) et les zones affectées thermiquement(b) en multi passes (P1, P2 et P3) avec le flux (FC : E8018-G).

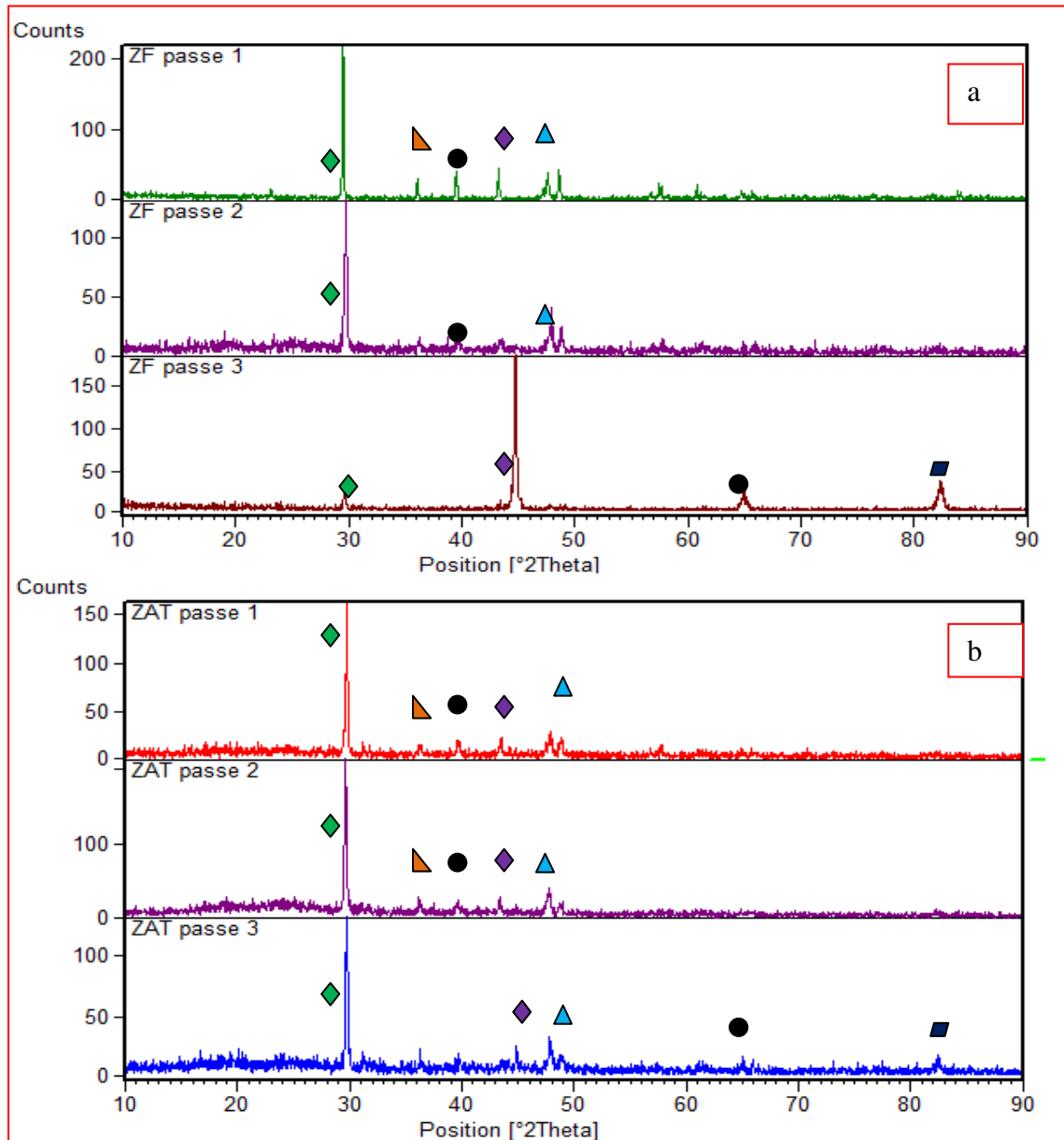


Figure III.48. Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2, et P3), avec le flux (FC/E8018-G).

La figure III.48. montre les spectres de diffraction des rayons X des différent ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3) on remarque :

- ✓ Une différence entre les spectres de raies de ZF, ou les petits pics sont apparus en passes (P1 et P2). Les deux pics d'intensités $2\theta = 29.7402 / I = 100$ sont orientés vers la direction (100) en passes (P1, P2) mais en passe (P3) le pic d'intensité $2\theta = 44,696 / I = 100$ est orienté vers la direction (110). Les

trois pics d'intensités $2\theta = 29.890 / I = 100$ sont orientés vers la direction (100) dans la ZAT en passes (P1, P2 et P3).

Le tableau III.21, illustre les caractéristiques des pics les plus intenses telles que ; la position (2θ Thêtas), l'intensité (I), le plan (hkl) et la distance entre les plans (d_{hkl}) dans les zones fondues (ZF) et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1,P2 et P3) avec le flux (E8018-G).

Tableau .III.21. Superposition des diffractogrammes dans les zones fondues et les zones affectées thermiquement en multi-passes (P1, P2 et P3), avec le flux (FC : E8018-G).

Zone fusion	2Theta (°)	Plan (hkl)	Intensité (I)	Distance d_{hkl}	Paramètre moyen $a(A^\circ)$	Taille moyenne des grains (A°)
ZF passe1 (PD)	2 θ =29.579	α (100)	100.00	$d_{hkl}=3.0176$	5.22	13.61
	2 θ =36.107	α (001)	10.26	$d_{hkl}=2.4856$	4.97	8.95
	2 θ =39.682	α (010)	12.77	$d_{hkl}=2.2695$	4.53	6.69
	2 θ =43.412	α (101)	20.32	$d_{hkl}=2.0828$	2.93	14.16
	2 θ =47.764	α (011)	14.52	$d_{hkl}=1.8684$	4.64	9.31
	2 θ =48.697	α (101)	0.61	$d_{hkl}=1.8684$	4.55	9.34
				am=4.4733	tm=10.343	
ZF passe2 (PI)	2 θ =29.7402	α (100)	100	$d_{hkl}=3.0041$	4.2432	8.457
	2 θ = 9.6975	α (010)	6.39	$d_{hkl}=2.27055$	4.5355	2.6067
	2 θ =47.8517	α (011)	16.06	$d_{hkl}=1.90095$	4.6506	4.4711
	2 θ =48.8151	α (101)	10.27	$d_{hkl}=1.86412$	5.2704	3.6797
				am=4.6749	tm=4.8036	
ZF passe3 (PL)	2 θ =29.6016	α (100)	12.38	$d_{hkl}=3.0141$	5.21	8.80
	2 θ = 44.696	α (110)	100.00	$d_{hkl}=2.0250$	2.85	9.20
	2 θ =64.9072	α (200)	9.90	$d_{hkl}=1.4349$	2.87	3.64
	2 θ =82,2918	α (211)	15.93	$d_{hkl}=1.17025$	2.85	4.47
	2 θ = 82.337	α (211)	I=19.84	$d_{hkl}=1.1697$	2.85	5.34
				$a_m= 3.326$	$t_m=6.29$	
ZAT passe1 (PD)	2 θ = 29.890	α (100)	I=100.00	$d_{hkl}=2.9869$	5.16	10.70
	2 θ = 36.418	α (001)	I=8.64	$d_{hkl}=2.4651$	4.92	19.04
	2 θ = 39.837	α (010)	I=0.66	$d_{hkl}=2.2442$	4.52	12.83
	2 θ = 43.723	α (101)	I=5.91	$d_{hkl}=2.0687$	2.91	4.45
	2 θ = 44.966	α (110)	I=14.68	$d_{hkl}=2.0143$	2.83	6.80
	2 θ = 47.920	α (011)	I=17.43	$d_{hkl}=1.8968$	4.62	6.30
				am= 4.1	tm=10.02	
ZAT passe2	2 θ =29.5998	α (100)	100	$d_{hkl}=3.01803$	4.2629	7.2472
	2 θ =36.2372	α (001)	6.70	$d_{hkl}=2.47902$	4.9520	4.3001

(PI)	2 Θ =39.7076	α (010)	4.10	d_{hkl} =2.2699	4.5344	2.1723
	2 Θ =47.7787	α (011)	14.79	d_{hkl} =1.90368	4.6573	6.7029
	2 Θ =48.7565	α (101)	6.18	d_{hkl} =1.86622	5.2764	3.6789
					am=4.7366	tm=4.82028
ZAT passe3 (PL)	2 Θ =29.4461	α (100)	I=100.00	d_{hkl} =3.02974	5.24	10.69
	2 Θ =44.5966	α (110)	I=8.16	d_{hkl} =2.02936	2.86	4.47
	2 Θ =47.5632	α (011)	I=11.66	d_{hkl} =1.9094	4.65	4.51
	2 Θ =82.1116	α (211)	I=4.34	d_{hkl} =1.1723	2.860	1.90
					am=3.614	tm=5.3925

La Figure III.49. représente les histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne de grain (b) dans la ZF et la ZAT en multi-passes (P1, P2 et P3), avec le flux (FC : E8018-G).

Dans la figure III.49a, b. on a remarqué que :

- Les valeurs des paramètres varient légèrement en ZF entre (P1, P2 et P3) par rapport à la ZAT avec le flux (FC : E8018-G), lors d'un faible déplacement de pics correspondant à un changement des paramètres cristallins. L'évolution de la taille moyenne des grains en ZF et en ZAT en passe (P2) est identique en passe (P2) et légèrement variable en passes (P1 et P3).

Les résultats obtenus par la DRX montrent que les échantillons sont composés principalement de ferrite, phase dominante dans le métal de base et les différents métaux d'apport. Les résultats des différentes ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2, P3) avec les différents flux indiquent la présence de la ferrite (α). Cette différence est due à la différence de microstructure déjà observée par de la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage.

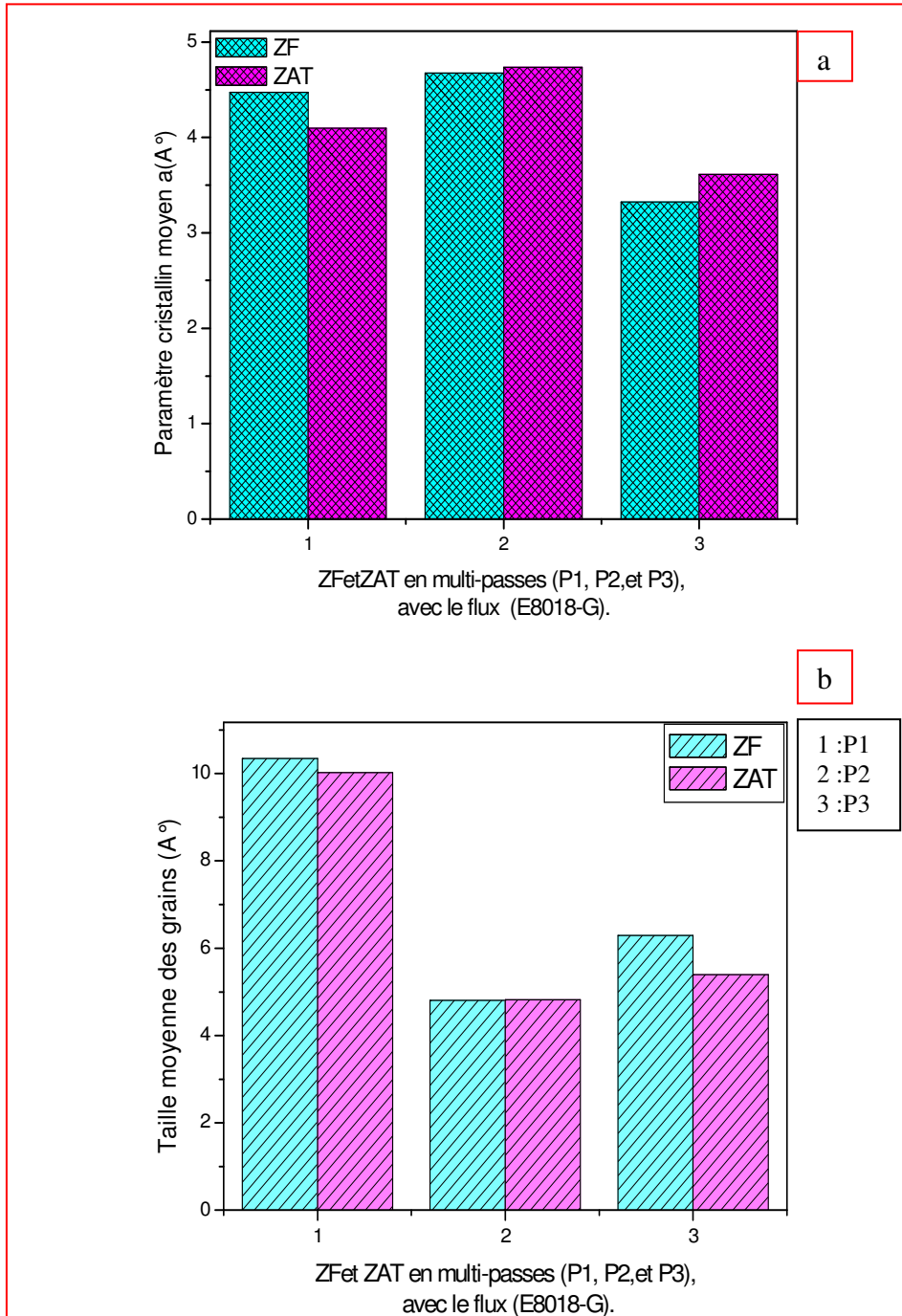


Figure III.49. Histogrammes du paramètre cristallin moyen (a) et la taille moyenne des grains (b) dans la ZF et ZAT en multi-passes (P1, P2, et P3), avec le flux (FC : E8018-G).

Conclusion

Ce chapitre constitue un recueil de résultats expérimentaux sur l'influence des flux sur les joints soudés d'acier X42. Les interprétations de ces résultats se résument comme suit:

Les résultats obtenus des analyses chimiques par spectrométrie de Fluorescence des rayons X(FRX), une spectrométrie par absorption atomique et un équipement d'EDAX associé au MEB montrent que :

- 1 -Les réactions chimiques intervenant dans le bain de soudage montrent une augmentation du pourcentage de MnO, SiO₂, CaO et TiO₂ dans le laitier (LA) et de MnO, Al₂O₃, SiO₂, MgO et TiO₂ dans le laitier (LB) et de Al₂O₃, SiO₂ et CaO dans le laitier (LC) par rapport à leur teneur dans les flux (FA, FB et FC).
- 2 - Les zones fondues en première passes (PA, PB, PC et PD) ont une teneur élevée en Ti et Si, sous flux (FA et FC), une faible teneur en Ti et Si a été également détecté en multi-passes en passes interne et externe sous flux (FA et FB). Une teneur élevée respectivement en Ti et Si a été également détecté en multi-passes (P1 et P2, P3) sous flux (FA et FC).
- 3 -Les zones fondues en première passe (PA, PB, et PC) contiennent en moyenne un pourcentage en C plus élevé que celui du métal d'apport basique et de la zone fondue (PD). Le pourcentage du carbone dans les zones fondues en première passe (PA, PB, PC et PD) et en multi-passes (P1, P2 et P3), ainsi que le pourcentage de Si et Mn dans la zone fondue en multi-passes (P1, P2 et P3) diminuent par rapport au métal de base.
- 4 -Les concentrations massiques entre des flux (FA, FB et FC) et laitiers (LA, LB et LC) résument bien le comportement physico-chimique du transfert des éléments entre le métal de base, le métal d'apport, le flux et la formation le laitier lors du soudage des pipelines par SMAW. Les profils des concentrations massiques résument bien le comportement homogène des éléments (**Si, Mn, Cr et Ti**) à travers les trois points dans la zone fondue en

passes (P1 et P3) avec flux (FA et FB) et en passe (P2) avec le flux (FC). Alors que dans la zone fondue en passe (P2) avec le flux (FB) et en passes (P1 et P3) avec les flux (FA et FC), la variation des concentrations massiques des éléments montre une perturbation et une variation contradictoire sur les trois points respectivement.

- 5 -Les microstructures du métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et de la zone fondue (ZF) en multi-passes avec les différents flux utilisés montrent des phases ferrito-perlitiques. La microstructure dans la zone fondue est principalement de la Ferrite aciculaire (FA) et Ferrite de joint de grain (GBF), ce qui est compatible avec la métallographie optique. La microstructure de la zone affectée thermiquement en multi-passes est de la ferrite polygonale (F), la ferrite equiaxe (FE) et la perlite (P).
- 6 -Le profil de la micro- dureté des différentes zones du joint soudé en première passe (PA, PB, PC et PD) avec les flux (FA et FC) montre que la plus haute valeur de la micro- dureté (220 HV0.5) est obtenue dans la ZF. Dans la ZAT, la micro-dureté augmente de (195-180 HV0.5) par rapport au métal de base (165-170 HV0.5). En multi-passes cellulosiques (P1 : FA et P2, P3 : FB) et cellulosique et basiques (P1 cellulosique et P2, P3 basiques), le profil de la micro-dureté a montré une augmentation de la micro-dureté à travers les différentes passes internes (P1) et externes (P3) et une diminution au centre de la zone fondue en passe (P2).
- 7 -L'Analyse des phases des différents flux et laitiers par diffraction des rayons X a permis de détecter la présence des phases cristallines, comme NaAlSiO_4 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{Ca}_5\text{Si}_2\text{O}_7(\text{CO}_3)$, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_4$, $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH},\text{F})_4$, $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$, $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$, Al_2SiO_5 qui ont été formées à basse température ($T < 1000^\circ\text{C}$) durant les traitements thermiques lors de la confection des flux (FA,FB et FC). Quant aux laitiers (LA, LB et LC), la présence de nouvelles phases cristallines qui ont été formées à des températures élevées, comme $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$, Mg_2SiO_4 , NaAlSiO_4 , Al_2SiO_5 , $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH},\text{F})_4$, $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$.

***Chapitre IV : Etude des joints soudés avec
des électrodes sans flux***

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail consiste à l'étude de l'influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des pipelines. Les soudures réalisées dans cette étude ont été effectuées au niveau de l'atelier de COSIDER CANALISATION où deux tubes d'acier de nuance X42 ont été assemblés par soudage à l'arc électrique, selon le procédé de soudage (SMAW) avec des électrodes enrobées de types : cellulosiques (E6010, E8010-P1) et basique (E8018-G).

Afin de connaître la qualité de la soudure et l'influence du flux, on a utilisé plusieurs techniques des caractérisations telles que : la spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX), la spectrométrie par absorption atomique, la microscopie optique (MO), la microscopie électronique à balayage (MEB) associé à l'EDAX, la microdureté (HV) et la diffraction des rayons X (DRX).

Les résultats de ce travail peuvent se résumer de la manière suivante :

- 1 - Les réactions chimiques intervenant dans le bain de soudage montrent une augmentation du pourcentage de MnO, SiO₂, CaO et TiO₂ dans le laitier (LA) et de MnO, Al₂O₃, SiO₂, MgO et TiO₂ dans le laitier (LB) et de Al₂O₃, SiO₂ et CaO dans le laitier (LC) par rapport à leur teneur dans les flux (FA, FB et FC).
- 2 - Les zones fondues en première passes (PA, PB, PC et PD) ont une teneur élevée en Ti et Si, sous flux (FA et FC), une faible teneur en Ti et Si a été également détecté en multi-passes en passes interne et externe sous flux (FA et FB). Une teneur élevée respectivement en Ti et Si a été également détecté en multi-passes (P1 et P2, P3) sous flux (FA et FC).
- 3 - Les zones fondues en première passes (PA, PB, et PC) contiennent en moyenne un pourcentage en C plus élevé que celui du métal d'apport basique et de la zone fondue (PD). Le pourcentage du carbone dans les zones fondues en première passe (PA, PB, PC et PD) et en multi-passes (P1, P2 et P3), ainsi que le pourcentage de Si et Mn dans la zone fondue en multi-passes (P1, P2 et P3) diminuent par rapport au métal de base. Par contre les zones fondues

Conclusion générale

- déposées sans enrobages (Em, En et Eo) contiennent 0.07%, 0.03% et 0.014 % respectivement de C, ceci est lié à la teneur du carbone dans le métal d'apport des électrodes (A, B et C). Une diminution du pourcentage de C dans les zones fondues déposées sans flux (Em, En et Eo) par rapport au métal de base estimé à 0,18 % C.
- 4 - Les concentrations massiques entre les flux (FA, FB et FC) et laitiers (LA, LB et LC) résument bien le comportement physico-chimique du transfert des éléments entre le métal de base, le métal d'apport, le flux et la formation du laitier lors du soudage des pipelines par SMAW. Les profils des concentrations massiques résument bien le comportement homogène des éléments (**Si, Mn, Cr et Ti**) à travers les trois points dans la zone fondue en passes (P1 et P3) avec flux (FA et FB) et en passe (P2) avec le flux (FC). Alors que dans la zone fondue en passe (P2) avec le flux (FB) et en passes (P1 et P3) avec les flux (FA et FC), la variation des concentrations massiques des éléments montre une perturbation et une variation contradictoire sur les trois points respectivement. Les profils des concentrations massiques ont un comportement identique des éléments **Si, Mn, Cr et Ti** aux trois points dans la zone fondue (Em) et (En) en passes (P1 et P2). Alors que ceux du Ti et Cr subissent des perturbations aux trois passes (P1, P2 et P3) de la zone fondue (Eo).
 - 5 - Les microstructures du métal de base, la zone affectée thermiquement (ZAT) et de la zone fondue (ZF) en multi-passes avec les différents flux utilisés montrent des phases ferrito-perlitiques. La microstructure dans la zone fondue est principalement de la Ferrite aciculaire (FA) et Ferrite de joint de grain (GBF), ce qui est compatible avec la métallographie optique. La microstructure de la zone affectée thermiquement en multi-passes est de la ferrite polygonale (F), la Ferrite Equiaxe (FE) et la perlite (P). Les principales microstructures de la zone fondue en multi-passes avec les différentes électrodes sans enrobage sont la ferrite polygonale (FP), la ferrite de joint de grain (GBF) et des petites colonies de perlite (P).
 - 6 - Le profil de la micro- dureté des différentes zones du joint soudé en première passe (PA, PB, PC et PD) avec les flux (FA et FC) montre que la plus haute valeur de la micro- dureté (220 HV0.5) est obtenue dans la Z. Dans la ZAT, la

Conclusion générale

micro-dureté augmente de (195-180 HV0.5) par rapport au métal de base (165-170 HV0.5). En multi-passes celluloses (P1 : FA et P2, P3 : FB) et cellulosique et basiques (P1 cellulosique et P2, P3 basiques), le profil de la micro-dureté a montré une augmentation de la micro-dureté à travers les différentes passes internes (P1) et externes (P3) et une diminution au centre de la zone fondue en passe (P2). La micro-dureté des échantillons (Em, En et Eo) en zone fondue déposée sans enrobage varie en fonction de la variation du carbone équivalent dans les différents métaux d'apports.

- 7 - L'analyse des phases des différents flux et laitiers par diffraction des rayons X a permis de détecter la présence des phases cristallines dans le flux (FA) : NaAlSiO_4 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{Ca}_5\text{Si}_2\text{O}_7(\text{CO}_3)_2$, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, TiO_2 , SiO_2 , Mn_3O_4 , $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{OH})_4$, le flux (FB): NaAlSiO_4 , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, MnO_2 , Al_2O_3 , CaO , TiO_2 , SiO_2 , Ti_3O_5 , et le flux (FC): SiO_2 , Al_2SiO_5 , $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$, CaF_2 , $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH},\text{F})_4$, Ti_3O_5 , CaCO_3 , $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$, MnO_2 . Quant aux laitiers la présence de nouvelles phases cristallines ont été formées à des températures élevées dans le laitier (LA) : Mn_3O_4 , $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$, Ti_3O_5 , le laitier (LB): NaAlSiO_4 , Mn_3O_4 , $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$, Mg_2SiO_4 , Ti_3O_5 , et le laitier (LC): MgSiO_3 , NaAlSiO_4 , Al_2SiO_5 , $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH},\text{F})_4$, Ti_3O_5 .

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1]	G. Rückert ; « Etude de la contribution des flux activant en soudage A-TIG: application de la silice au soudage de différents métaux et alliages », Thèse de Doctorat , génie mécanique, Ecole Centrale de Nantes , 2005.
[2]	L. Davi ; «An introduction to welding fluxes», Welding Institute, 1981.
[3]	N. Perry ; «Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables». Thèse de Doctorat, Université de Nantes , 2000.
[4]	M. Sapp ; «A history of welding», 1987 .
[5]	A Giraud , X. Boy ; «Géopolitique du Pétrole et du Gaz», 1987.
[6]	J.N.H.Tiratsoo ; «Pipeline pigging technology» , 1992.
[7]	Macro-economy and Sectoral Value Added by the Production and Application of Welding Technology , Rheinisch –Westfalisches – Institut Fuer Wirtschaftsforschung , 2001.
[8]	J.N.H. Tiratsoo ; «Pipeline paging technology », 1992
[9]	P.A.S. Reed, and J.F. Knott ; « Investigation of the role of residual stresses (WPS) part I: experimental. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures», pp 485, 1996.
[10]	R. Bouzid, E. Bouali, M. Gaceb ; « Analyse tendancielle et différentielle des interactions entre le procédé de soudage d'assemblage de gros Tubes et son environnement » ,18 ^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007.
[11]	A. Bouziane ; « Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression Intérieure », Thèse de Magistère ; Université Mhamed Bougara Boumerdes , 2008.
[12]	R. Cazes ; «Soudage à l'arc , Technique de l'Ingénieur», B7730, 1995.
[13]	B. Chassignole ; « Influence de la structure métallurgique des soudures en aciers inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason ». Thèse de Doctorat, Insa- Lyon. 2000.
[14]	H.Granjon ; « Bases métallurgiques de soudage », Publication du soudage et de ses applications, Paris ,1995.
[15]	C. E. Derfouf ; « Effet de la soudure sur la structure de l'acier», Thèse de Doctorat , génie mécanique, Université de Biskra , 2011.
[16]	M. Zhang, K. He, D.V. Edmons ; «Formation of acicular ferrite in C–Mn steels promoted by vanadium alloying elements », Proceedings of the International Conference on Solid–Solid Phase Transformations, JIMIC-3, Kyoto, Japan, 1999.
[17]	B.ABDI ; « Traité Matériaux métalliques, Techniques de l'Ingénieur», M305- M315, 2009.
[18]	W. F. Savage, E. F. Nippes ; «A study of weld interface phenomena in a low alloy steel» , Welding Journal Research Supplement , pp 260-268 ,1976.
[19]	S. Fricke, E. Keim, J. Schmidt ; «Numerical weld modeling - a method for calculating weld-induced residual stresses», Nuclear Engineering and Design 206, pp 139-150, 2001.
[20]	N. Chérifi ; « Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A », Thèse de Doctorat, chimie industrielle , Université de Biskra , 2015 .
[21]	Y. Ito, M. Nakanishi ; «Study on charpy impact properties of weld metals with submerged arc welding », Sumitomo Search , pp 42-62, 1976.
[22]	H.Grangon ;« Bases métallurgiques du soudage », 1979.

Références Bibliographiques

[23]	<i>S. Babu, H. K. D. H. Bhadeshia and L. E. Svenson</i> ; Journal of Materials Science Letters, vol. 10, pp 142-144, 1991.
[24]	<i>S. A. David, S. S. Babu and J. M. Vitek, Jom</i> ; vol. 55, N°06, pp 14, 2003.
[25]	<i>C. R. Heiple, J. R. Roper, R. T. Stagner and R. J. Aden</i> ; «Surface active element effect on the shape of GTA, laser, and electron beam welds», Welding Journal Research Supplement, pp 72-77, 1983.
[26]	<i>S. Kou</i> ; «Welding Metallurgy», Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.
[27]	<i>S. A. David and T. Deb Roy</i> ; Science, vol. 257, pp 497, 1992.
[28]	<i>T. Deb Roy and S. A. Davi</i> ; Reviews of Modern Physics, vol. 67, pp 85,1995.
[29]	<i>R. Blondeau</i> ; «Métallurgie et mécanique du soudage», Hermès Science Publication, Paris, pp 50-67, 2001.
[30]	<i>R.W. Messler</i> ; «Principles of Welding», John Willey & Sons Edition, New York, pp 50-55, 1999.
[31]	<i>O. Grong, D.K. Matlock</i> ; « Microstructural development in mild and low alloy steel weld metals», Int Met , pp 27-48,1986.
[32]	<i>R. Badji</i> ; «Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205 », Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Université Paris 13, Thèse de Doctorat en Métallurgie ,2008.
[33]	<i>Welding Handbook</i> ; «American Welding Society », Miami, FL, Vol. 3, 7th , 1980.
[34]	<i>ESDEP</i> ; «Métallurgie Appliquée, La soudabilité des aciers de construction », 2015.
[35]	<i>J. Kieffer, A. Iarozinsky</i> ; « Méthode des unités d'effort de Production », Méthodes et Outils Informatiques pour la Valorisation des Temps en Coûts, Université de Marseille ,1994.
[36]	<i>INRS ED 83</i> ; «Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobée», Fiche pratique de sécurité ,1999.
[37]	<i>Les Fiches Conseils</i> ; « La soudure au gaz, La soudure à l'arc», 2011.
[38]	<i>C.E.R. Ensam Angers</i> ; «Soudage à l'arc », Laboratoire Industriel de Déformation Plastique, 2003.
[39]	<i>Soudage Electrique A L'électrode Enrobée, 2010.</i> (source http://www.soudeur.com).
[40]	<i>Csmofmi</i> ; « soudage et assemblage-soudage, procédés de soudage manuels et semi-automatiques» ,2006 .
[41]	<i>D. Olson, S. Liu, R. Frost, G. Edwards, et D. Fleming</i> ; «Welding brazing and soldering», Chapter Nature and Behavior of Fluxes Used for Welding, Asm Handbook , vol 6, pp 55-63, 1993 .
[42]	<i>R. Cazes</i> ; « Soudage à l'arc», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, B 7 730 ,1995.
[43]	<i>M.K. Bencharif</i> ; «Procèdes de soudage –le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée » , Vinçotte International Algérie , 2007.
[44]	<i>B. Palissy</i> ; «Lycée des métiers de l'acier de l'aluminium et des services », 2012.
[45]	<i>R. Cazes</i> ; «Soudage MIG/MAG pulsés», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, BM 7 732, pp 2, 2008.
[46]	<i>M. BEAUSOLEIL. et Al</i> ; « Fumes de soudage », facteurs contributifs et moyens de contrôle, pp 6487, 1988.
[47]	<i>M. K. BENCHARIF</i> ; « Soudage – métaux d'apport » , Cosider , Biskra , 2011.
[48]	<i>D. Agbodan</i> ; « Nomination persistante dans un modèle paramétrique, identification non ambiguë et appariement générique d'entités topologiques », Thèse de Doctorat ;

Références Bibliographiques

	Université de Poitiers , France ,1992.
[49]	<i>Twi , World Centre For Materials Joining Technology</i> ; Welding Inspection Appendix 2 , 2006.
[50]	<i>R. CAZES</i> ; «Normalisation en soudage», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, BM 7 795 -2
[51]	<i>TWI</i> ; «Section15:Welding Consumables» , Senior Welding Inspection ,2008.
[52]	Document de l'industrie , Cosider ,Canalisation, Biskra ,2012.
[53]	<i>ENSPM</i> ; «Matériaux métalliques, métallurgie» ingénieurs en sécurité industrielle, formation industrie, IFP training C7, 2005.
[54]	Catalogue baguette soudeur de l'industrie, Cosider Canalisation, Biskra ,2012.
[55]	<i>Claud Philip</i> ; « soudabilité », ENSAM (CER de Bordeaux),2007.
[56]	<i>S. Rahman</i> ; « élaboration et caractérisation de couches minces par Spray Pyrolyse et Pulvérisation magnétron » ,Thèse de Doctorat, Université Mohamed kheider-Biskra, 2008.
[57]	<i>M.Ghimbeu</i> ; « Préparation et Caractérisation de couches minces d'oxydes métalliques semi-conducteurs pour la détection de gaz polluants atmosphériques » ; Thèse de Doctorat , Université Paul Verlaine de Metz , 2007.
[58]	<i>Ama Ma. Paniagua-Mercado a,b , Paulino Estrada-Diaz ,Victor M.Lopez- Hirata</i> ; «Chemical and structural characterization of the crystalline phases in agglomerated fluxes for submerged –arc welding» , Journal of Materials Processing Technology 141, pp 93-100, 2003.
[59]	<i>G.R. Belton, T.J .Moore ,E.S. Tankins</i> ; «Slag metal reactions in submerged- arc welding » , weld . J.Suppl , pp289-290,1963.
[60]	<i>N. Christensen , K. Gjermundsen</i> ; «Measurements of temperature outside and in weld pool in submerged- arc welding » , US Department of Army, European Research Office , Report No.27309, 1962.
[61]	<i>S. Lars-Eric</i> ; «Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds», Library of Congress Cataloging , 1994.
[62]	<i>B .Vargas-Arista, C.Angeles-Chavez, A .H .Albiter, and J.M. allen</i> ; «Metallurgical investigation of the aging process on tensile fracture welded joints in pipeline steel», Materials Characterization, pp1561-1568, 2009.
[63]	<i>Kishor P. Kolhe, C.K. Datta</i> ; «Prediction of microstructure and mechanical properties of multi-pass SAW», Journal of Materials Processing Technology , pp 241-249, 2008.
[64]	<i>Z. Boumerzoug, C. Derfouf and, T. Baudin</i> ; «Effect of welding on microstructure and mechanical properties of an industrial low carbon steel», Journal of Engineering, pp 502-506, 2010.
[65]	<i>A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian</i> ; «Anassessment of microstructure, hardness, tensile and impact strengthof friction stir welded ferritic stainless steel joints», Materials and Design , pp 4592-4600, 2010.
[66]	<i>S. Shanmugam, N.K. Ramiseti , R.D.K. Misra , J. Hartmann , S.G. Jansto</i> ; « Microstructure and high strength–toughness combination of a new 700MPa Nb-microalloyed pipeline steel», Materials Science and Engineering , pp 26-37, 2008.
[67]	<i>E.H. Raouache</i> ; « Cinétique et mécanisme des transformation de phase dans un acier soudé » , génie mécanique, Thèse de Doctorat , Université de Biskra ,2010.
[68]	<i>Z. Boumerzoug , K . Digheche, and V. Ji</i> ; «X-Ray Analysis of Residual Stress in Weld Region of X70 Pipeline Steel», Advanced Materials Research , pp 2011-2016, 2014.
[69]	<i>A.M , Paniagua-Mercado, V.M , L'opez-Hirata.,and M. L. , Saucedo Muñoz</i> ; «Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds», Journal of Materials Processing Technology 169 (3),

Références Bibliographiques

	pp 346-351, 2005.
[70]	J.F. Lancaster ; «Metallurgy of Welding», Alden Press Ltd, London, pp 25-50, 1980.
[71]	http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Ti-O_Ti2O3-TiO2.jpg&dir=FToxid
[72]	http://www.nanofinishcorp.com/Data%20Storage/Pourbaix-manganese.htm
[73]	C. Klein, C.S. Hurbult ; «Manual of Mineralogy», Wiley, New York, pp 566-567, 1999.
[74]	http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/FToxid/Al-Na-Si-O-SiO2-Na2O-Al2O3-Liquidus-projection.jpg
[75]	Aditi B. Khadilkar, Peter L. Rozelle and Sarma V. Pisupati ; «Effect of heterogeneity in coal ash chemical composition on the onset of conditions favorable for agglomeration in fluid beds», pp 12530-12545, 2015.
[76]	Park, ISIJ Int ; «Structure-Property Correlations of CaO-SiO ₂ -MnO Slag derived from Raman Spectroscopy», laboratory for high temperature Physico-chemical Processing of Materials, pp 1633-1642, 2012.
[77]	http://www.harpercollege.edu/~rschultz/Minerals.htm
[78]	Mtdata , «Phase diagram software from the national physical Laboratory (CaO-SiO ₂ phase diagram)», Updated, 2010.
[79]	http://www.crct.polymtl.ca/fact/download.php?lang=fr
[80]	http://www.crct.polymtl.ca/factsage/PJ/CaO-MgO-SiO₂_PJ_X.jpg
[81]	D. Deneele ; «Caractérisation, simulations expérimentales et thermodynamiques de l'altération de déchets vitreux les scories de première fusion de plomb et de zinc», Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2002.
[82]	Levin et al , «Phase Diagrams for Ceramicists, MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , these diagrams are based on those found», 1964.
[83]	M.L. Davis, N. Bailey ; «Evidence from inclusions chemistry of elements transfer during submerged-arc welding», Weld. J. Suppl, pp 61-65, 1991.
[84]	C.E. Jackson ; «Submerged-arc welding, Fluxes and relations among process variables», Metals Hand Book, ASM, Metals Park, pp 73-77, 1982.
[85]	C.A. Butler, C.E. Jackson ; «Submerged-arc welding characteristics of the CaO-TiO ₂ -SiO ₂ system», Weld. J. Suppl, pp 448-456, 1967.
[86]	A. Kumar, H. Singh, and S. Maheshwari ; «XRD and DAT analysis of developed agglomerated fluxes», Journal of Metallurgy, 2013.
[87]	J.F. Lancaster ; «Metallurgy of welding», Alden Press, London, pp 110-177, 1980.
[88]	G.M. Evans ; «Microstructure and properties of ferritic steel welds containing Ti and B», Weld. J. Suppl, pp 251-259, 1996.
[89]	C. Klein, C.S. Hurbult ; «Manual of mineralogy», Wiley, New York, pp 566-567, 1999.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1]	G. Rückert ; « Etude de la contribution des flux activant en soudage A-TIG: application de la silice au soudage de différents métaux et alliages », Thèse de Doctorat , génie mécanique, Ecole Centrale de Nantes , 2005.
[2]	L. Davi ; «An introduction to welding fluxes», Welding Institute, 1981.
[3]	N. Perry ; «Etude et développement des flux solides en vue d'application en soudage ATIG appliqué au titane et ses alliages ainsi qu'aux aciers inoxydables». Thèse de Doctorat, Université de Nantes , 2000.
[4]	M. Sapp ; «A history of welding», 1987 .
[5]	A Giraud , X. Boy ; «Géopolitique du Pétrole et du Gaz», 1987.
[6]	J.N.H.Tiratsoo ; «Pipeline pigging technology» , 1992.
[7]	Macro-economy and Sectoral Value Added by the Production and Application of Welding Technology , Rheinisch –Westfalisches – Institut Fuer Wirtschaftsforschung , 2001.
[8]	J.N.H. Tiratsoo ; «Pipeline paging technology », 1992
[9]	P.A.S. Reed, and J.F. Knott ; « Investigation of the role of residual stresses (WPS) part I: experimental. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures», pp 485, 1996.
[10]	R. Bouzid, E. Bouali, M. Gaceb ; « Analyse tendancielle et différentielle des interactions entre le procédé de soudage d'assemblage de gros Tubes et son environnement » ,18 ^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007.
[11]	A. Bouziane ; « Contribution à la détermination des critères des qualités des tubes soudés soumis à une pression Intérieure », Thèse de Magistère ; Université Mhamed Bougara Boumerdes , 2008.
[12]	R. Cazes ; «Soudage à l'arc , Technique de l'Ingénieur», B7730, 1995.
[13]	B. Chassignole ; « Influence de la structure métallurgique des soudures en aciers inoxydables austénitiques sur le contrôle non destructif par ultrason ». Thèse de Doctorat, Insa- Lyon. 2000.
[14]	H.Granjon ; « Bases métallurgiques de soudage », Publication du soudage et de ses applications, Paris ,1995.
[15]	C. E. Derfouf ; « Effet de la soudure sur la structure de l'acier», Thèse de Doctorat , génie mécanique, Université de Biskra , 2011.
[16]	M. Zhang, K. He, D.V. Edmons ; «Formation of acicular ferrite in C–Mn steels promoted by vanadium alloying elements », Proceedings of the International Conference on Solid–Solid Phase Transformations, JIMIC-3, Kyoto, Japan, 1999.
[17]	B.ABDI ; « Traité Matériaux métalliques, Techniques de l'Ingénieur», M305- M315, 2009.
[18]	W. F. Savage, E. F. Nippes ; «A study of weld interface phenomena in a low alloy steel» , Welding Journal Research Supplement , pp 260-268 ,1976.
[19]	S. Fricke, E. Keim, J. Schmidt ; «Numerical weld modeling - a method for calculating weld-induced residual stresses», Nuclear Engineering and Design 206, pp 139-150, 2001.
[20]	N. Chérifi ; « Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A », Thèse de Doctorat, chimie industrielle , Université de Biskra , 2015 .
[21]	Y. Ito, M. Nakanishi ; «Study on charpy impact properties of weld metals with submerged arc welding », Sumitomo Search , pp 42-62, 1976.
[22]	H.Grangon ;« Bases métallurgiques du soudage », 1979.

Références Bibliographiques

[23]	<i>S. Babu, H. K. D. H. Bhadeshia and L. E. Svenson</i> ; Journal of Materials Science Letters, vol. 10, pp 142-144, 1991.
[24]	<i>S. A. David, S. S. Babu and J. M. Vitek, Jom</i> ; vol. 55, N°06, pp 14, 2003.
[25]	<i>C. R. Heiple, J. R. Roper, R. T. Stagner and R. J. Aden</i> ; «Surface active element effect on the shape of GTA, laser, and electron beam welds», Welding Journal Research Supplement, pp 72-77, 1983.
[26]	<i>S. Kou</i> ; «Welding Metallurgy», Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003.
[27]	<i>S. A. David and T. Deb Roy</i> ; Science, vol. 257, pp 497, 1992.
[28]	<i>T. Deb Roy and S. A. Davi</i> ; Reviews of Modern Physics, vol. 67, pp 85,1995.
[29]	<i>R. Blondeau</i> ; «Métallurgie et mécanique du soudage», Hermès Science Publication, Paris, pp 50-67, 2001.
[30]	<i>R.W. Messler</i> ; «Principles of Welding», John Willey & Sons Edition, New York, pp 50-55, 1999.
[31]	<i>O. Grong, D.K. Matlock</i> ; « Microstructural development in mild and low alloy steel weld metals», Int Met , pp 27-48,1986.
[32]	<i>R. Badji</i> ; «Influence des traitements thermiques à haute température sur l'évolution de la texture et de la microstructure des soudures d'acier inoxydable duplex 2205 », Ecole Nationale Polytechnique d'Alger et Université Paris 13, Thèse de Doctorat en Métallurgie ,2008.
[33]	<i>Welding Handbook</i> ; «American Welding Society », Miami, FL, Vol. 3, 7th , 1980.
[34]	<i>ESDEP</i> ; «Métallurgie Appliquée, La soudabilité des aciers de construction », 2015.
[35]	<i>J. Kieffer, A. Iarozinsky</i> ; « Méthode des unités d'effort de Production », Méthodes et Outils Informatiques pour la Valorisation des Temps en Coûts, Université de Marseille ,1994.
[36]	<i>INRS ED 83</i> ; «Le soudage manuel à l'arc avec électrodes enrobée», Fiche pratique de sécurité ,1999.
[37]	<i>Les Fiches Conseils</i> ; « La soudure au gaz, La soudure à l'arc», 2011.
[38]	<i>C.E.R. Ensam Angers</i> ; «Soudage à l'arc », Laboratoire Industriel de Déformation Plastique, 2003.
[39]	<i>Soudage Electrique A L'électrode Enrobée, 2010.</i> (source http://www.soudeur.com).
[40]	<i>Csmofmi</i> ; « soudage et assemblage-soudage, procédés de soudage manuels et semi-automatiques» ,2006 .
[41]	<i>D. Olson, S. Liu, R. Frost, G. Edwards, et D. Fleming</i> ; «Welding brazing and soldering», Chapter Nature and Behavior of Fluxes Used for Welding, Asm Handbook , vol 6, pp 55-63, 1993 .
[42]	<i>R. Cazes</i> ; « Soudage à l'arc», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, B 7 730 ,1995.
[43]	<i>M.K. Bencharif</i> ; «Procèdes de soudage –le soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée » , Vinçotte International Algérie , 2007.
[44]	<i>B. Palissy</i> ; «Lycée des métiers de l'acier de l'aluminium et des services », 2012.
[45]	<i>R. Cazes</i> ; «Soudage MIG/MAG pulsés», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, BM 7 732, pp 2, 2008.
[46]	<i>M. BEAUSOLEIL. et Al</i> ; « Fumes de soudage », facteurs contributifs et moyens de contrôle, pp 6487, 1988.
[47]	<i>M. K. BENCHARIF</i> ; « Soudage – métaux d'apport » , Cosider , Biskra , 2011.
[48]	<i>D. Agbodan</i> ; « Nomination persistante dans un modèle paramétrique, identification non ambiguë et appariement générique d'entités topologiques », Thèse de Doctorat ;

Références Bibliographiques

	Université de Poitiers , France ,1992.
[49]	<i>Twi , World Centre For Materials Joining Technology</i> ; Welding Inspection Appendix 2 , 2006.
[50]	<i>R. CAZES</i> ; «Normalisation en soudage», Techniques de l'Ingénieur, traité génie mécanique, BM 7 795 -2
[51]	<i>TWI</i> ; «Section15:Welding Consumables» , Senior Welding Inspection ,2008.
[52]	Document de l'industrie , Cosider ,Canalisation, Biskra ,2012.
[53]	<i>ENSPM</i> ; «Matériaux métalliques, métallurgie» ingénieurs en sécurité industrielle, formation industrie, IFP training C7, 2005.
[54]	Catalogue baguette soudeur de l'industrie, Cosider Canalisation, Biskra ,2012.
[55]	<i>Claud Philip</i> ; « soudabilité », ENSAM (CER de Bordeaux),2007.
[56]	<i>S. Rahman</i> ; « élaboration et caractérisation de couches minces par Spray Pyrolyse et Pulvérisation magnétron » ,Thèse de Doctorat, Université Mohamed kheider-Biskra, 2008.
[57]	<i>M.Ghimbeu</i> ; « Préparation et Caractérisation de couches minces d'oxydes métalliques semi-conducteurs pour la détection de gaz polluants atmosphériques » ; Thèse de Doctorat , Université Paul Verlaine de Metz , 2007.
[58]	<i>Ama Ma. Paniagua-Mercado a,b , Paulino Estrada-Diaz ,Victor M.Lopez- Hirata</i> ; «Chemical and structural characterization of the crystalline phases in agglomerated fluxes for submerged –arc welding» , Journal of Materials Processing Technology 141, pp 93-100, 2003.
[59]	<i>G.R. Belton, T.J .Moore ,E.S. Tankins</i> ; «Slag metal reactions in submerged- arc welding » , weld . J.Suppl , pp289-290,1963.
[60]	<i>N. Christensen , K. Gjermundsen</i> ; «Measurements of temperature outside and in weld pool in submerged- arc welding » , US Department of Army, European Research Office , Report No.27309, 1962.
[61]	<i>S. Lars-Eric</i> ; «Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds», Library of Congress Cataloging , 1994.
[62]	<i>B .Vargas-Arista, C.Angeles-Chavez, A .H .Albiter, and J.M. allen</i> ; «Metallurgical investigation of the aging process on tensile fracture welded joints in pipeline steel», Materials Characterization, pp1561-1568, 2009.
[63]	<i>Kishor P. Kolhe, C.K. Datta</i> ; «Prediction of microstructure and mechanical properties of multi-pass SAW», Journal of Materials Processing Technology , pp 241-249, 2008.
[64]	<i>Z. Boumerzoug, C. Derfouf and, T. Baudin</i> ; «Effect of welding on microstructure and mechanical properties of an industrial low carbon steel», Journal of Engineering, pp 502-506, 2010.
[65]	<i>A.K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian</i> ; «Anassessment of microstructure, hardness, tensile and impact strengthof friction stir welded ferritic stainless steel joints», Materials and Design , pp 4592-4600, 2010.
[66]	<i>S. Shanmugam, N.K. Ramiseti , R.D.K. Misra , J. Hartmann , S.G. Jansto</i> ; « Microstructure and high strength–toughness combination of a new 700MPa Nb-microalloyed pipeline steel», Materials Science and Engineering , pp 26-37, 2008.
[67]	<i>E.H. Raouache</i> ; « Cinétique et mécanisme des transformation de phase dans un acier soudé » , génie mécanique, Thèse de Doctorat , Université de Biskra ,2010.
[68]	<i>Z. Boumerzoug , K . Digheche, and V. Ji</i> ; «X-Ray Analysis of Residual Stress in Weld Region of X70 Pipeline Steel», Advanced Materials Research , pp 2011-2016, 2014.
[69]	<i>A.M , Paniagua-Mercado, V.M , L'opez-Hirata.,and M. L. , Saucedo Muñoz</i> ; «Influence of the chemical composition of flux on the microstructure and tensile properties of submerged-arc welds», Journal of Materials Processing Technology 169 (3),

Références Bibliographiques

	pp 346-351, 2005.
[70]	J.F. Lancaster ; «Metallurgy of Welding», Alden Press Ltd, London, pp 25-50, 1980.
[71]	http://www.crct.polymtl.ca/fact/phase_diagram.php?file=Ti-O_Ti2O3-TiO2.jpg&dir=FToxid
[72]	http://www.nanofinishcorp.com/Data%20Storage/Pourbaix-manganese.htm
[73]	C. Klein, C.S. Hurbult ; «Manual of Mineralogy», Wiley, New York, pp 566-567, 1999.
[74]	http://www.crct.polymtl.ca/fact/documentation/FToxid/Al-Na-Si-O-SiO2-Na2O-Al2O3-Liquidus-projection.jpg
[75]	Aditi B. Khadilkar, Peter L. Rozelle and Sarma V. Pisupati ; «Effect of heterogeneity in coal ash chemical composition on the onset of conditions favorable for agglomeration in fluid beds», pp 12530-12545, 2015.
[76]	Park, ISIJ Int ; «Structure-Property Correlations of CaO-SiO ₂ -MnO Slag derived from Raman Spectroscopy», laboratory for high temperature Physico-chemical Processing of Materials, pp 1633-1642, 2012.
[77]	http://www.harpercollege.edu/~rschultz/Minerals.htm
[78]	Mtdata , «Phase diagram software from the national physical Laboratory (CaO-SiO ₂ phase diagram)», Updated, 2010.
[79]	http://www.crct.polymtl.ca/fact/download.php?lang=fr
[80]	http://www.crct.polymtl.ca/factsage/PJ/CaO-MgO-SiO₂_PJ_X.jpg
[81]	D. Deneele ; «Caractérisation, simulations expérimentales et thermodynamiques de l'altération de déchets vitreux les scories de première fusion de plomb et de zinc», Thèse de Doctorat, Université de Lille, 2002.
[82]	Levin et al , «Phase Diagrams for Ceramicists, MgO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ , these diagrams are based on those found», 1964.
[83]	M.L. Davis, N. Bailey ; «Evidence from inclusions chemistry of elements transfer during submerged-arc welding», Weld. J. Suppl, pp 61-65, 1991.
[84]	C.E. Jackson ; «Submerged-arc welding, Fluxes and relations among process variables», Metals Hand Book, ASM, Metals Park, pp 73-77, 1982.
[85]	C.A. Butler, C.E. Jackson ; «Submerged-arc welding characteristics of the CaO-TiO ₂ -SiO ₂ system», Weld. J. Suppl, pp 448-456, 1967.
[86]	A. Kumar, H. Singh, and S. Maheshwari ; «XRD and DAT analysis of developed agglomerated fluxes», Journal of Metallurgy, 2013.
[87]	J.F. Lancaster ; «Metallurgy of welding», Alden Press, London, pp 110-177, 1980.
[88]	G.M. Evans ; «Microstructure and properties of ferritic steel welds containing Ti and B», Weld. J. Suppl, pp 251-259, 1996.
[89]	C. Klein, C.S. Hurbult ; «Manual of mineralogy», Wiley, New York, pp 566-567, 1999.

Annexes

Annexes

Annexes

Annexe 01 : Composition chimiques de l'acier X42 industriel (fiche technique)

Arceor/Hitall South Africa Limited
 Pipes and Tubes
 273 General Hetrog Road
 P O Box 48 Vereeniging 1930
 South Africa

Telephone: +27 (0)16 438 4220
 Fax: +27 (0)16 423 4996

Arceor/Hitall

ATRIAL TEST CERTIFICATE
 SEAMLESS STEEL TUBE
 CERTIFICATE OF ANALYSIS - TUBES FABRIQUEES PAR
 ARCELORMITTAL - TUBES FABRIQUEES PAR ARCELORMITTAL

Customer: **IPS TRADE BELGIUM BVBA**
 Order No: 4000004810
 Certificate Reference No: 040001183454
 Material No: 1000000453
 Cast/Heat No: 7981287
 Page Number: 1 of 3

Customer Order/Contract No: 5828 121145
 Material No: 1000000453
 Cast/Heat No: 7981287
 Page Number: 1 of 3

Product: FULLY RILLED HOT FINISHED CARBON STEEL SEAMLESS TUBES
 Specifications: API 5L X42 (P2) ASTM A53B (A53) GRADE 42
 Product Marking: HITALL SA 5L X42 (P2) ASTM A53B (A53) GRADE 42

General Information

Tube ID	Dimensions	Dimensions	Total Length	Heat Treating Process	Heat Treating Operation
Number	Thickness	Length	Length	Temp	Temp
mm	mm	mm	mm		
7	7.110 (max)	12.000 (R)	84.000 (R)	Electric Arc	Final hot rolling operation finished above 800°C and cooled in still air.
	6.400 (P)	79.400 (R)	275.800 (R)		

Chemical Composition

Element (%)	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Ti	Sb	Ca	Nb	Bi	As	Se
Minimum	0.200	-	1.30	0.020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maximum	0.177	0.25	0.85	0.003	0.019	0.06	0.03	0.150	0.001	0.026	0.001	0.005	0.001	0.005	0.0006	0.0010	0.15
Heat	0.18	0.29	0.85	0.003	0.010	0.06	0.06	0.150	0.001	0.026	0.001	0.009	0.001	0.005	0.0006	0.0010	0.15

Product (ADD):

046

SONELGAZ TRANSPORT DU GAZ -GRTG

PROJET ALIMENTATION EN GAZ NATUREL DE LA VILLE DE TAKLENT (W.BATNA) 8 464 ML

PROCEDURE DES ESSAIS HYDROSTATIQUES

N° ID PROC : 013-EH-C14 Révision : A Date : 07.11.2009 Page 4 / 24

IV - NETTOYAGE ET CALIBRAGE DE LA CONDUITE.

Après la mise en fouille et le remblayage de la conduite, et avant le remplissage en eau pour les essais hydrostatiques, on doit procéder au nettoyage de la section à tester afin d'éliminer tout corps étranger pouvant traîner à l'intérieur de la canalisation. Le gazoduc sera nettoyé et calibré en même temps par tronçon, à l'aide de racleurs à coupelles à corps d'acier dont la progression est due à l'air refoulé par des compresseurs.

Le contrôle du gabarit intérieur de la conduite se fait à l'aide d'un racleur équipé d'une plaque de calibrage en acier doux ou en aluminium d'au moins 5 mm d'épaisseur et d'un diamètre égal à 95 % du diamètre intérieur nominal toléré, compte tenu des tolérances admises pour les tubes les plus épais et de la tolérance d'ovalisation pour les éléments cintrés, l'avancement du piston sera contrôlé à l'aide d'un manomètre et tout arrêt prolongé sera noté avec la pression correspondante.

♦ **Calcul du diamètre de la plaque de calibrage.**

- **Données de base.**

Diamètre extérieur (mm)	B'' = 219,075
Epaisseur nominale de la paroi (mm)	6,40
Spécification de l'acier	API 5LX 42
Tolérance sur l'épaisseur	+15 %, -12,5 %
Tolérance selon les normes API sur le diamètre	± 0,75 %
Coefficient limite de cintrage	2,5 %

Calcul du diamètre de calibrage.

- Diamètre extérieur nominal toléré :
 $D_{ext\ toléré} = 219,075 * (1 - 0,0075) \Rightarrow D_{ext\ toléré} = 217,43 \text{ mm}$
- Epaisseur maximale tolérée de paroi :
 $Ep_{max\ toléré} = 6,40 * (1 + 0,15) \Rightarrow Ep_{max\ toléré} = 7,36 \text{ mm}$
- Diamètre intérieur nominal toléré :
 $D_{int} = D_{ext\ toléré} - 2 * Ep_{max\ toléré}$
 $= 217,43 - 2 * 7,36 \Rightarrow D_{int\ toléré} = 202,71 \text{ mm}$

Direction Générale : Route de la Base Aérienne Chéraga - ALGER
Tél. : 021 36 39 90 - Fax : 021 36 39 79 - E-mail : cosider.canalisation.dg@gmail.com

CARACTERISTIQUES PIPELINES													
DESIGNATION	SYMBOLE	NUANCE	EPAISSEURS (mm)		Re	Rr		LINE CLASS	FLANGE RA TING CLASS	PRESSION DE CALCUL	CODE	CA	
			DIAMETRE	ZONE I (IA)		ZONE III	MPa						Ksi
Oil Export Pipeline	PL	X 65 - 24"	11,9	8,7	448	65	530	77	C 06 X	600 RTJ	90 Bars	ASME B 31.4	0,0
LP Oil Production Trunkline	PH	X 65 - 20"	11,9	11,1	448	65	530	77	A 03 X	300 RF	49 Bars	ASME B 31.4	6,0
LP / HP Oil Production Flowline	PH	X 65 - 10"	12,7	11,1	448	65	530	77	A 06 X	600 RTJ	92 Bars	ASME B 31.4	6,0
Gas Lift Trunkline	PG	X 65 - 6"	14,3	7,9	448	65	530	77	A 25 Y1	2500 RTJ	255 Bars	ASME B 31.8	0,0
Gas Lift Flowline	PG	X 65 - 4"	11,1	5,6	448	65	530	77					
Gas Injection Trunkline	PG	X 70 - 12"	31,8 - 34,1	19,1	482	70	586	85	A 25 Y2	2500 RTJ	386 Bars	ASME B 31.8	0,0
Gas Injection Flowline	PG	X 70 - 12"	31,8 - 34,1	19,1	482	70	586	85					
Gas Injection Flowline	PG	X 70 - 8"	22,2	13,5	482	70	586	85	A 25 X	2500 RTJ	250 Bars	ASME B 31.4	6,0
Water Dilution Trunkline	WS	X 65 - 6"	18,3	14,3	448	65	530	77					
Water Dilution Flowline	WS	X 65 - 2"	9,9	8,6	448	65	530	77	C 25 X	2500 RTJ	250 Bars	ASME B 31.4	6,0
Water Injection Trunkline	W	X 70 - 18"	31,8 - 32,4	23,8	482	70	586	85					
Water Injection Flowline	W	X 70 - 8"	19,1	15,9	482	70	586	85	A 01 X2	150 RF	13 Bars	ASME B 31.4	6,0
Water Injection Flowline	W	X 70 - 10"	22,2	18,3	482	70	586	85					
AB (Source) Water Trunkline	WS	X 42 - 24"	10,3	10,3	289	42	413	60	A 01 X1	150 RF	17 Bars	ASME B 31.4	3,0
AB (Source) Water Flowline	WS	X 42 - 20"	9,5	9,5	289	42	413	60					
AB (Source) Water Flowline	WS	X 42 - 8"	7,9	7,9	289	42	413	60	A 01 X1	150 RF	17 Bars	ASME B 31.4	3,0
MP (Process) Water Trunkline	WU	X 42 - 6"	4,5	4,5	289	42	413	60					
MP (Process) Water Flowline	WU	X 42 - 3"	4,0	4,0	289	42	413	60					

Annexe 02 : Composition chimiques des électrodes E6010, E8010-P1, E8018-G (fiche technique)

HOBART BROTHERS

Certificate of Conformance to Requirements for Welding Electrode

Product Type: PIPEMASTER PRO-60 3/32 500AH
E6010
AWS A5.1-91

Classification: AWS A5.1-91

Diameter Tested: 0.5/16/05

Diameter Shipped: 3/32X14 in

Customer: ITW WELDING SAS
Customer P.O. No.: 06062001
Order No.: J6113700
Stock Number: 5120132-035
Lbs. Shipped: 3000
Date Generated: 06/20/06
Lot Nos. Shipped: 25H636

This is to certify that the product named above and supplied on the referenced order number is of the same classification, manufacturing process, and material requirements as that which was used for the test that was conducted on the date shown, the results of which are shown below. All tests required by the specifications above for performance at that time and the material tested met all requirements. It was manufactured and supplied by the Quality System Program of Hobart Brothers, which meets requirements of ISO9000, ANSIAWS A5.01, and other specification and Military requirements, as applicable.

Test Settings

Size	1/8 X 14 in	Polarity	DCEP	Amps	100	Volts	27	Preheat F(C)	225 (107)
	5/32 X 14 in		DCEP	140		25-28		226 (107)	

Mechanical Properties - Tensile

Size / Polarity	Ref. No.	Testing Conditions	UR: Tensile Strength psi(MPa)	Yield Strength psi(MPa)	Elong %
1/8X14 in / DCEP	PA1095	Aged 48 Hrs 200F	84,000 (577)	65,000 (470)	22
5/32X14 in / DCEP	PA2030	Aged 48 Hrs 200F	77,000 (529)	65,000 (450)	24

Mechanical Properties - Impact

Size / Polarity	Ref. No.	Testing Conditions	Test Temp. F(C)	Individuals B.B.(J)	Average A.B.-(J)
1/8X14 in / DCEP	PA1886	As Welded	-20 F (-29 C)	24,37,31 (31,37,42)	27 (37)
5/32X14 in / DCEP	PA2030	As Welded	-20 F (-29 C)	45,16,40 (62,22,64)	34 (45)

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	V	Ni	Mo	AJ	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8X14 in / DCEP / PA1095	0.16	0.40			0.15		0.05	0.05	0.01	0.04									
5/32X14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48			0.27		0.09	0.01	0.06	0.01									

Steve Knosman

Steve Knosman, Quality Engineer

Stan Wes

Stan Wes, Development Engineer

**Certificate of Conformance
to Requirements for Welding Electrode**

Hobart



Customer: ITW WELDING S.A.S.
 Customer P.O. No.: 11032014
 Order No.: P6110/00
 Stock Number: S116751-035
 Lbs. Shipped: 177.50
 Date Generated: 5/6/2011
 Lot Nos. Shipped: 23N349

This is to certify that the product named above and supplied on the referenced order number is of the same classification, manufacturing process, and material requirements as the material which was used for the test that was concluded on the date shown, the results of which are shown below. All tests required by the specifications shown for classification were performed at that time and the material tested met all requirements. It was manufactured and supplied by the Quality System Program of Hobart Brothers, which meets the requirements of ISO9000, ANSI/AWS A5.01, and other specification and Military requirements, as applicable.

Product Type: PIPEMASTER 80 5/32 50 CAN
 Classification: E8010-P1
 Specifications: AWS A5.5/A5.5M:2006
 Diameter Tested: 06/01/10
 Diameter Shipped: 5/32X14 id

Test Settings

Size / Polarity	3/16X14 In / DCEP	3/32X14 In / DCEP	Polarity	DCEP	DCEP
Amps	165	140	Volts	27	27
Preheat F(C)	350 (177)	350 (177)	Interpass F(C)	350 (177)	350 (177)

Mechanical Properties - Tensile

Ref. No.	PB2677	PB2696	Testing Conditions	Aged 48 Hrs 220F	Aged 48 Hrs 220F
U.L. Tensile Strength psi(MPa)	71,000 (490)	75,000 (518)	Yield Strength psi(MPa)	71,000 (490)	75,000 (518)
Elong. % In 2"	22	26			

Mechanical Properties - Impact

Ref. No.	PB2677	PB2696	Testing Conditions	As Welded	As Welded
Test Temp. F(C)	-20 F (-29 C)	-20 F (-29 C)	Individuals ft. lb. (J)	47.54, 49 (64.73, 66)	50 (68)
Average ft. lb. (J)	40.45, 47 (54.61, 64)	44 (60)	Type	Charpy-V-Notch	Charpy-V-Notch
Horizontal:	Conforms	Conforms	Fillet Weld Test	Conforms	Conforms
Vertical:	Conforms	Conforms	Overhead:	Conforms	Conforms


Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	3/16X14 In / DCEP / PB2677	5/32X14 In / DCEP / PB2696	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	V	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb	N	Mg	Zn	Be
			0.15	0.71	0.008	0.013	0.21	0.05	0.01	0.68	0.10	0.12													
			0.18	0.96	0.010	0.009	0.26	0.03	0.01	0.80	0.12														

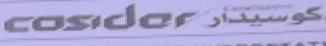
Steve Knostman

Steve Knostman, Quality Engineer

Certification and Limited Warranty - Data for the above supplied product are those obtained when welded and tested in accordance with the above specification. All tests for the above classification were satisfied. Other tests and procedures may produce different results. Hobart Brothers produces welding consumables under continuing quality assurance programs audited and approved by the American Bureau of Shipping ("ABS").



SONELGAZ TRANSPORT DU GAZ -GRTG



PROCEDURE DES ESSAIS HYDROSTATIQUES

PROJET ALIMENTATION EN GAZ NATUREL DE LA VILLE DE TAKLENT (W.BATNA) 8.464 ML

N° ID PROC : 013-EH-C14 Révision : A

Date : 07.11.2009 Page 4 / 24

IV - NETTOYAGE ET CALIBRAGE DE LA CONDUITE.

Après la mise en fouille et le remblayage de la conduite, et avant le remplissage en eau pour les essais hydrostatiques, on doit procéder au nettoyage de la section à tester afin d'éliminer tout corps étranger pouvant traîner à l'intérieur de la canalisation. Le gazoduc sera nettoyé et calibré en même temps par tronçon, à l'aide de racleurs à coupelles à corps d'acier dont la progression est due à l'air refoulé par des compresseurs.

Le contrôle du gabarit intérieur de la conduite se fait à l'aide d'un racleur équipé d'une plaque de calibrage en acier doux ou en aluminium d'au moins 5 mm d'épaisseur et d'un diamètre égal à 95 % du diamètre intérieur nominal toléré, compte tenu des tolérances admises pour les tubes les plus épais et de la tolérance d'ovalisation pour les éléments cintrés, l'avancement du piston sera contrôlé à l'aide d'un manomètre et tout arrêt prolongé sera noté avec la pression correspondante.

❖ **Calcul du diamètre de la plaque de calibrage.**

- **Données de base.**


Diamètre extérieur (mm)	B'' = 219,075
Epaisseur nominale de la paroi (mm)	6,40
Spécification de l'acier	API 5LX 42
Tolérance sur l'épaisseur	+15 %, -12,5 %
Tolérance selon les normes API sur le diamètre	± 0,75 %
Coefficient limite de cintrage	2,5 %

Calcul du diamètre de calibrage.

- Diamètre extérieur nominal toléré :
 $D_{ext\ toléré} = 219,075 * (1 - 0,0075) \Rightarrow D_{ext\ toléré} = 217,43 \text{ mm}$
- Epaisseur maximale tolérée de paroi :
 $Ep_{max\ toléré} = 6,40 * (1 + 0,15) \Rightarrow Ep_{max\ toléré} = 7,36 \text{ mm}$
- Diamètre intérieur nominal toléré :
 $D_{int} = D_{ext\ toléré} - 2 * Ep_{max\ toléré}$
 $= 217,43 - 2 * 7,36 \Rightarrow D_{int\ toléré} = 202,71 \text{ mm}$

Direction Générale : Route de la Base Aérienne Chéraga - ALGER

Tél. : 021 36 39 90 - Fax : 021 36 39 79 - E-mail : cosider.canalisation.dg@gmail.com



CARACTERISTIQUES PIPELINES													
DESIGNATION	SYMBOLE	NUANCE DIAMETRE	EPAISSEURS (mm)		Re MPa	Rr Ksi	LINE CLASS	FLANGE RA TING CLASS	PRESSION DE CALCUL	ICODE	CA		
			ZONE I (IA)	ZONE III									
Oil Export Pipeline	PL	X 65 - 24"	11,9	8,7	448	65	530	77	C 06 X	600 RTJ	90 Bars	ASME B 31.4	0,0
LP Oil Production Trunkline	PH	X 65 - 20"	11,9	11,1	448	65	530	77	A 03 X	300 RF	49 Bars	ASME B 31.4	6,0
LP / HP Oil Production Flowline	PH	X 65 - 10"	12,7	11,1	448	65	530	77	A 06 X	600 RTJ	92 Bars	ASME B 31.4	6,0
Gas Lift Trunkline	PG	X 65 - 6"	14,3	7,9	448	65	530	77	A 25 Y1	2500 RTJ	255 Bars	ASME B 31.8	0,0
Gas Lift Flowline	PG	X 65 - 4"	11,1	5,6	448	65	530	77					
Gas Injection Trunkline	PG	X 70 - 12"	31,8 - 34,1	19,1	482	70	586	85	A 25 Y2	2500 RTJ	386 Bars	ASME B 31.8	0,0
Gas Injection Flowline	PG	X 70 - 8"	22,2	13,5	482	70	586	85					
Water Dilution Trunkline	WS	X 65 - 6"	18,3	14,3	448	65	530	77	A 25 X	2500 RTJ	250 Bars	ASME B 31.4	6,0
Water Dilution Flowline	WS	X 65 - 2"	9,9	8,6	448	65	530	77					
Water Injection Trunkline	W	X 70 - 18"	31,8 - 32,4	23,8	482	70	586	85	C 25 X	2500 RTJ	250 Bars	ASME B 31.4	6,0
Water Injection Flowline	W	X 70 - 8"	19,1	15,9	482	70	586	85					
Water Injection Flowline	W	X 70 - 10"	22,2	18,3	482	70	586	85	A 01 X2	150 RF	13 Bars	ASME B 31.4	6,0
AB (Source) Water Trunkline	WS	X 42 - 24"	10,3	10,3	289	42	413	60					
AB (Source) Water Flowline	WS	X 42 - 20"	9,5	9,5	289	42	413	60	A 01 X1	150 RF	17 Bars	ASME B 31.4	3,0
AB (Source) Water Flowline	WS	X 42 - 8"	7,9	7,9	289	42	413	60					
MP (Process) Water Trunkline	WU	X 42 - 6"	4,5	4,5	289	42	413	60	A 01 X1	150 RF	17 Bars	ASME B 31.4	3,0
MP (Process) Water Flowline	WU	X 42 - 3"	4,0	4,0	289	42	413	60					

Annexe 02 : Composition chimiques des électrodes E6010, E8010-P1, E8018-G (fiche technique)

HOBART BROTHERS

Certificate of Conformance to Requirements for Welding Electrode

Product Type: PIPEMASTER PRO-60 3/32 500AH
E6010
AWS A5.1-91

Classification: AWS A5.1-91

Diameter Tested: 0.718/08

Diameter Shipped: 3/32X14 in

Customer: ITW WELDING SAS
Customer P.O. No.: 08062001
Order No.: J6113700
Stock Number: 5120132-035
Lbs. Shipped: 3000
Date Generated: 06/20/06
Lot Nos. Shipped: 25H636

This is to certify that the product named above and supplied on the referenced order number is of the same classification, manufacturing process, and material requirements as that which was used for the test that was conducted on the date shown, the results of which are shown below. All tests required by the specifications shown for performance at that time and the material tested met all requirements. It was manufactured and supplied by the Quality System Program of Hobart Brothers, which are requirements of ISO9000, ANSIAWS A5.01, and other specification and Military requirements, as applicable.

Product Type: PIPEMASTER PRO-60 3/32 500AH
E6010
AWS A5.1-91

Classification: AWS A5.1-91

Diameter Tested: 0.718/08

Diameter Shipped: 3/32X14 in

Test Settings

Size	Polarity	Amps	Volts	Preheat F(C)
1/8 X 14 in	DCEP	100	27	225 (107)
5/32 X 14 in	DCEP	140	25-28	226 (107)

Mechanical Properties - Tensile

Size / Polarity	Ref. No.	Testing Conditions	UR: Tensile Strength psi(MPa)	Yield Strength psi(MPa)	Elong %
1/8 X 14 in / DCEP	PA1896	Aged 48 Hrs 200F	84,000 (577)	65,000 (450)	22
5/32 X 14 in / DCEP	PA2030	Aged 48 Hrs 200F	77,000 (529)	65,000 (450)	24

Mechanical Properties - Impact

Size / Polarity	Ref. No.	Testing Conditions	Test Temp. F(C)	Individuals B.B.(J)	Average A.B.(J)
1/8 X 14 in / DCEP	PA1896	As Welded	-20 F (-29 C)	24.27.31 (31.37.42)	27 (37)
5/32 X 14 in / DCEP	PA2030	As Welded	-20 F (-29 C)	45.16.40 (62.22.64)	34 (45)

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.14	0.48	0.27	0.09	0.09	0.01	0.06	0.01	0.01									

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Overhead: Conforms
Overhead: Conforms

Flat Weld Test

Horizontal: Conforms
Vertical: Conforms

Chemical Analysis

Size / Polarity / Ref. No.	C	Mn	P	S	Si	Cr	V	Ni	Mo	Aj	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb
1/8 X 14 in / DCEP / PA1896	0.16	0.40	0.15	0.05	0.05	0.01	0.04	0.01	0.01									
5/32 X 14 in / DCEP / PA2030	0.																	

**Certificate of Conformance
to Requirements for Welding Electrode**

Hobart



Customer: ITW WELDING S.A.S.
 Customer P.O. No.: 11032014
 Order No.: P6110/00
 Stock Number: S116751-035
 Lbs. Shipped: 177.50
 Date Generated: 5/6/2011
 Lot Nos. Shipped: 23N349

This is to certify that the product named above and supplied on the referenced order number is of the same classification, manufacturing process, and material requirements as the material which was used for the test that was concluded on the date shown, the results of which are shown below. All tests required by the specifications shown for classification were performed at that time and the material tested met all requirements. It was manufactured and supplied by the Quality System Program of Hobart Brothers, which meets the requirements of ISO9000, ANSI/AWS A5.01, and other specification and Military requirements, as applicable.

Product Type: PIPEMASTER 80 5/32 50 CAN
 Classification: E8010-P1
 Specifications: AWS A5.5/A5.5M:2006
 Diameter Tested: 06/01/10
 Diameter Shipped: 5/32X14 id

Test Settings

Size / Polarity	3/16X14 In / DCEP	DCEP	DCEP	Amps.	165	Volts	27	Preheat F(C)	350 (177)	Interpass F(C)	350 (177)
	5/32X14 In	DCEP	DCEP		140		27		350 (177)		350 (177)

Mechanical Properties - Tensile

Size / Polarity	3/16X14 In / DCEP	Testing Conditions	Aged 48 Hrs 220F	U.L. Tensile Strength psi(MPa)	71,000 (490)	Yield Strength psi(MPa)	75,000 (518)	Elong. % In 2"	22
	5/32X14 In / DCEP		Aged 48 Hrs 220F		91,000 (625)				26

Mechanical Properties - Impact

Size / Polarity	3/16X14 In / DCEP	Testing Conditions	As Welded	Test Temp. F(C)	-20 F (-29 C)	Individuals ft. lb. (J)	47.54, 49 (64.73, 66)	Average ft. lb. (J)	50 (68)	Type	Charpy-V-Notch
	5/32X14 In / DCEP		As Welded		-20 F (-29 C)		40.45, 47 (54.61, 64)		44 (60)		Charpy-V-Notch
Size / Polarity	3/16X14 In / DCEP	Testing Conditions	As Welded	Horizontal:	Conforms	Fillet Weld Test	Conforms	Overhead:	Conforms	Vertical:	Conforms
	5/32X14 In / DCEP		Conforms		Conforms		Conforms		Conforms		Conforms

Chemical Analysis

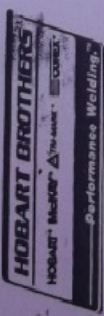
Size / Polarity / Ref. No.	3/16X14 In / DCEP / PB2677	C	Mn	P	S	Si	Cu	Cr	V	Ni	Mo	Al	Ti	Nb	Co	B	W	Sn	Fe	Sb	Mg	Zn	Be
	5/32X14 In / DCEP / PB2696	0.15	0.71	0.008	0.013	0.21	0.05	0.01	0.68	0.10	0.12												
		0.18	0.96	0.010	0.009	0.26	0.03	0.01	0.80	0.12													

Steve Knostman

Steve Knostman, Quality Engineer

Certification and Limited Warranty - Data for the above supplied product are those obtained when welded and tested in accordance with the above specification. All tests for the above classification were satisfied. Other tests and procedures may produce different results. Hobart Brothers produces welding consumables under continuing quality assurance programs audited and approved by the American Bureau of Shipping ("ABS").

Annexe 03 : Composition chimiques des flux commerciale



MSDS Number: 415804
REVISED: June 20, 2008
SE 3082

B

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

For U.S. Manufactured or Distributed Welding Consumables and Related Products. May be used to comply with OSHA's Hazard Communication Standard 29 CFR 1910.1200 and Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA) 1986 Public Law 99-499. Standard must be consulted for specific requirements.

SECTION 1 - IDENTIFICATION

Manufacturer/Supplier Name: HOBART BROTHERS COMPANY
 Address: 400 TRADE SQUARE EAST, TROY, OH 45373
 Telephone No. (937) 332-4000
 Trade Name For: "GROUP A": E6010, E6011, E6012, E6013, E6022, E7014, F1024-1
 "GROUP B": E7016, E7018, E7018-1, E7018-M
 "GROUP C": E7018-A1, E7018-G, E8018-D2, E8018-B2L, E8018-B6, E8018-B8, E8018-M, E10018-D2, E10018-M, E12018-M
 E8018-C3, E8018-G, E9018-B9, E9018-B3, E9018-B3L, E9018-M, E10018-D2, E10018-M, E12018-M
 "GROUP D": E7010-P1, E8010-P1, E9010-G, E9010-P1
 Product Type For: "GROUP A" SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW) CARBON STEEL
 "GROUP B" SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW) LOW HYDROGEN CARBON STEEL
 "GROUP C" SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW) LOW HYDROGEN LOW ALLOY STEEL
 "GROUP D" SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW) HIGH STRENGTH CELLULOSE CARBON STEEL

SECTION 2 - HAZARDOUS INGREDIENTS

IMPORTANT - This section covers the hazardous materials from which this product is manufactured. The fumes and gases produced during welding with normal use of this product are also addressed in Section 5. The term "hazardous" in this section should be interpreted as a term required and defined in OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR Part 1910.1200).

HAZARDOUS INGREDIENTS	GROUP - % WEIGHT			D _v	CAS NO.	EXPOSURE LIMIT (mg/m ³)		ACGIH TLV
	A	B	C			OSHA PEL	OSHA PEL	
IRON*	70-90	60-80	60-80	70-90	7439-89-6	5 R*, 10 (Oxide Fume)	5 R* (Fe ₂ O ₃) (A4)	5 R*
MANGANESE#	1-5	1-5	1-5	1-5	7439-96-5	1, 3 STEL***, 5 CL** (Fume)	0.2 (As Inorganic Compounds of Mn)	0.2 (As Inorganic Compounds of Mn)
ALUMINUM OXIDE#	<5	<5	1-5	<5	1344-28-1	5 R*	1 R* (A4)	1 R* (A4)
CALCIUM CARBONATE	<5	3-12	5-10	5-10	1317-65-3	5 R*, 5 (as CaO)	5 R*, 2 (as CaO)	5 R*, 2 (as CaO)
CELLULOSE	<5	<5	<5	<5	9004-34-6	5 R*	10	10
MICA	<5	<5	<5	<5	12001-26-2	3 R*	3 R*	3 R*
SILICA**	<5	<6	<5	<5	14808-60-7	0.1 R*	0.025 R* (A2)	0.025 R* (A2)
(Amorphous Silica Fume)	<5	<2	<5	<2	69012-64-2	0.8	3 R*	3 R*
SILICON+	<10	<10	<5	<5	7440-21-3	15 (Dust)	10 (A4)	10 (A4)
TITANIUM DIOXIDE	<5	<10	<5	<5	13463-67-7	2.5 (as F)	2.5 (as F)	2.5 (as F) (A4)
FLUORSPAR	<5	1-12	4-15	<5	7789-75-5	1 (Metal)	0.5 (Cr VI Soluble Compounds) (A1)	0.5 (Cr VI Soluble Compounds) (A1)
CHROMIUM# (1)	<5	<5	<9	<5	7440-47-3	0.005 (Cr VI Compounds)	0.005 (Cr VI Compounds)	0.01 (Cr VI Insoluble Compounds) (A1)
NICKEL# (2)	<5	<5	<5	<2	7440-02-0	1 (Metal)	1.5 (Elemental) (A5)	1.5 (Elemental) (A5)
MOLYBDENUM (2)	<5	<5	<2	<1	7439-98-7	1 (Soluble Compounds)	0.1 (Soluble Compounds) (A1)	0.1 (Soluble Compounds) (A1)
						1 (Insoluble Compounds)	0.2 (Insoluble Compounds) (A1)	0.2 (Insoluble Compounds) (A1)
						5 R*	10 R*, 3 R* (Elemental and Insoluble)	10 R*, 3 R* (Elemental and Insoluble)

Ce travail a fait l'objet de plusieurs travaux :

Publication internationale

- **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, H.FARH, A.SAOUDI, L.ATOUI**, *Effects of cellulosic and basic flux on the structure, composition and hardness of SMAW welds on steel X42*, International Journal of Engineering Research in Africa (**accepted 2016**).

Conferences Internationales

1. **F.KHAMOULI, L.ATOUI, M.ZIDANI**, *Etude et Caractérisation Structurale d'un Cordon de soudure à l'arc électrique : Application sur un Acier x42*. Première Workshop International sur la Mécanique des Structures et des matériaux, Batna-Algérie, 19-20 Novembre (**2014**)
2. **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, A.SAOUDI and L.ATOUI**, *Effet de la soudure sur la structure d'un acier industriel a faible teneur en carbone*. Congrès Algérien de Mécanique, El Oued-Algérie, 25-29 Octobre (**2015**)
3. **F.KHAMOULI, M. ZIDANI,A.SAOUDI et L.ATOUI**, Comportement métallurgique d'un acier faiblement allié après un soudage manuel a l'arc électrique, First Conference on Mechanical, Energy and Material (CMEME 2015), Biskra, 8-9 December (**2015**).
4. **F. Khamouli, A. Saoudi, M. Zidani, L. Atoui** , *CARACTERISATION DES JOINTS SOUDES PAR LE PROCEDE SMAW DES ACIERS POUR PIPELINES*, CONFERENCE (MATERIAUX 2015) Mahdia 22-26Mars (**2015**)
5. **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, A.SAOUDI , L.ATOUI**, *Etude et caractérisation de l'acier de type api x42 soude par le procédé de soudage SMAW*, Journées d'étude sur la fonderie et l'environnement JEFE '16, Annaba-Algérie, 10-12 Mai (**2016**)

Conferences Nationales

1. **F. KHAMOULI, L. ATOUI, M.ZIDANI, S.MESSAOUDI**, Influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des pipes, Journées d'étude sur les matériaux en génie mécanique, JEMGMII, Biskra-Algérie, 22,23 avril (2014).
2. **F. KHAMOULI, L. ATOUI, M. ZIDANI**, *Effet de la soudure sur la structure de l'acier x42*, Deuxièmes journées d'étude sur les matériaux en génie mécanique, JEMGM-II, 22,23 avril (2014). Biskra-Algérie.
3. **F. KHAMOULI, L. ATOUI, M. ZIDANI**, *Caractérisation de soudage manuel a l'arc électrique enrobage des aciers faiblement allié X 4*, 1^{ers} journée d'étude scientifiques (doctorants) JEJS Batna-Algérie, 28 avril (2014) .
4. **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, A.SAOUDI and L.ATOUI**, Investigation Métallurgique et Mécanique des Joints Soudés par le Procédé SMAW: Application sur des Aciers Utilisés dans la Construction des Gazoducs, Sixième Séminaire National sur les Matériaux, Procédés et Environnement , Boumerdès, 07 & 08 Novembre (2016).

Ce travail a fait l'objet de plusieurs travaux :

Publication internationale

- **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, H.FARH, A.SAOUDI, L.ATOUI**, *Effects of cellulosic and basic flux on the structure, composition and hardness of SMAW welds on steel X42*, International Journal of Engineering Research in Africa (**accepted 2016**).

Conferences Internationales

1. **F.KHAMOULI, L.ATOUI, M.ZIDANI**, *Etude et Caractérisation Structurale d'un Cordon de soudure à l'arc électrique : Application sur un Acier x42*. Première Workshop International sur la Mécanique des Structures et des matériaux, Batna-Algérie, 19-20 Novembre (**2014**)
2. **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, A.SAOUDI and L.ATOUI**, *Effet de la soudure sur la structure d'un acier industriel a faible teneur en carbone*. Congrès Algérien de Mécanique, El Oued-Algérie, 25-29 Octobre (**2015**)
3. **F.KHAMOULI, M. ZIDANI,A.SAOUDI et L.ATOUI**, Comportement métallurgique d'un acier faiblement allié après un soudage manuel a l'arc électrique, First Conference on Mechanical, Energy and Material (CMEME 2015), Biskra, 8-9 December (**2015**).
4. **F. Khamouli, A. Saoudi, M. Zidani, L. Atoui** , *CARACTERISATION DES JOINTS SOUDES PAR LE PROCEDE SMAW DES ACIERS POUR PIPELINES*, CONFERENCE (MATERIAUX 2015) Mahdia 22-26Mars (**2015**)
5. **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, A.SAOUDI , L.ATOUI**, *Etude et caractérisation de l'acier de type api x42 soude par le procédé de soudage SMAW*, Journées d'étude sur la fonderie et l'environnement JEFE '16, Annaba-Algérie, 10-12 Mai (**2016**)

Conferences Nationales

1. **F. KHAMOULI, L. ATOUI, M.ZIDANI, S.MESSAOUDI**, Influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des pipes, Journées d'étude sur les matériaux en génie mécanique, JEMGMII, Biskra-Algérie, 22,23 avril (2014).
2. **F. KHAMOULI, L. ATOUI, M. ZIDANI**, *Effet de la soudure sur la structure de l'acier x42*, Deuxièmes journées d'étude sur les matériaux en génie mécanique, JEMGM-II, 22,23 avril (2014). Biskra-Algérie.
3. **F. KHAMOULI, L. ATOUI, M. ZIDANI**, *Caractérisation de soudage manuel a l'arc électrique enrobage des aciers faiblement allié X 4*, 1^{ers} journée d'étude scientifiques (doctorants) JEJS Batna-Algérie, 28 avril (2014) .
4. **F.KHAMOULI, M.ZIDANI, A.SAOUDI and L.ATOUI**, Investigation Métallurgique et Mécanique des Joints Soudés par le Procédé SMAW: Application sur des Aciers Utilisés dans la Construction des Gazoducs, Sixième Séminaire National sur les Matériaux, Procédés et Environnement , Boumerdès, 07 & 08 Novembre (2016).

Résumé : Le contenu de cette thèse est l'étude de l'influence du flux de soudage sur la qualité de la soudure des Pipelines. L'assemblage des Pipelines est réalisé par le soudage (SMAW) en multi-passes à l'entreprise COSIDER de transport par canalisation, où l'acier utilisé est un acier faiblement allié de grade API 5L X42. Les électrodes utilisés sont : cellulosiques (FA : E6010 et FB : E8010-P1) et basique (FC: E8018-G). Les résultats obtenus de l'analyse chimique réalisée par spectrométrie à fluorescence des rayons X (FRX), l'EDAX et la diffraction des rayons X (DRX) ont montré que les laitiers (LA, LB et LC) ont des teneurs élevées en SiO_2 , MnO et TiO_2 , comparativement aux flux (FA, FB et FC). La concentration massique entre les différents flux et laitiers résumant bien le comportement physico-chimique du transfert des éléments entre le métal de base, le métal d'apport, le flux et la formation le laitier lors du soudage des pipelines par SMAW. La présence de nouvelles phases cristallines comme $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$, Mg_2SiO_4 , NaAlSiO_4 , Al_2SiO_5 , $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH},\text{F})_4$, $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ont été formées à des températures élevées dans les laitiers (LA, LB et LC) lors du soudage. L'analyse chimique des soudures a montré une diminution du pourcentage de C, Si et Mn dans la zone fondue sous l'influence de flux et sans flux par rapport au métal de base. Les microstructures de la zone fondue avec les différents flux sont principalement constituées de ferrite aciculaire. Alors que dans la zone fondue sans flux la phase dominante est la ferrite de joint de grain. La micro-dureté en zone fondue en multi-passes avec les différents flux augmente avec l'augmentation du carbone équivalent dans les différentes électrodes.

Mots clés : Acier X42, Flux cellulosique, Flux basique, Soudage SMAW, Composition chimique, Microstructure, Micro-dureté, Diffraction des rayons X.

Abstract: The content of this thesis is the study of the influence of the welding flux on the welding quality of the Pipelines. Pipelines are assembled by multi-passes (SMAW) welding in COSIDER Company that is specialized in pipeline transport network implementation. The steel used is a low alloy steel API 5L X42. The electrodes used are cellulosic (FA: E6010 and FB: E8010-P1) and basic (FC: E8018-G). The results obtained from chemical analysis carried out by X-ray fluorescence spectroscopy (FRX), EDAX and X-ray diffraction (XRD) showed that the slags (LA, LB and LC) had high SiO_2 , MnO and TiO_2 , compared to fluxes (FA, FB and FC). The mass concentration between different fluxes and slags summarizes well the physicochemical behavior of the elements transfer between the base metal, the filler metal, the flux and the slag formation during the welding of the pipelines by SMAW. New crystalline phases such as $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$, Mg_2SiO_4 , NaAlSiO_4 , Al_2SiO_5 , $\text{Ca}_2\text{SiO}_2(\text{OH},\text{F})_4$, $\text{CaMnSi}_2\text{O}_6$, $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ were formed at high temperatures in the slags (LA, LB and LC) during welding. The chemical analysis of welds showed a decrease in the percentage of C, Si and Mn in the molten zone under the influence of flux and without flux in comparison to the base metal. The microstructures of the molten zone with the different fluxes are mainly made up of acicular ferrite. While in the molten zone without flux, the dominant phase is grain boundary ferrite. The micro-hardness of the molten zone in multi-passes welds with the different fluxes increases with the increase of the equivalent carbon in the different electrodes.

Key words: Steel X42, Cellulosic flux, Basic flux, SMAW welding, Chemical composition, Microstructure, Micro-hardness, X-ray diffraction.

ملخص: إن محتوى هذه الأطروحة هو دراسة تأثير تغليف أسلاك اللحام على جودة لحام خطوط الأنابيب. حيث يتم تجميع خطوط الأنابيب عن طريق لحام (SMAW) متعددة الطبقات في شركة النقل عبر خطوط الأنابيب كوسيدار. للعلم فإن الفولاذ المستخدم هو فولاذ منخفض الكربون من فئة API 5L X42. من جهة أخرى، فقد استعملنا في هذه الدراسة نوعين من تغليف أقطاب اللحام و هما: السليلوزي (FA: E6010 و FB: E8010-P1) والقاعدي (FC: E8018-G). وأظهرت نتائج التحليل الكيميائي من قبل جهاز التحليل الطيفي للأشعة السينية (XRF) و EDAX وحيود الأشعة السينية (XRD) أن الخبث الناتج عن عملية التلحيم (LA، LB و LC) لديه محتويات عالية من SiO_2 ، MnO و TiO_2 مقارنة مع تغليف أقطاب اللحام (FA، FB و FC). حيث أنه قد تبين أن التركيز الكتلي بين مختلف أغلفة أقطاب التلحيم والخبث الناتج يلخص جيدا السلوك الفيزيوكيميائي لحركة العناصر الكيميائية بين المعادن الأساسية، معدن أقطاب اللحام ، تغليف أقطاب اللحام و الخبث المتشكل أثناء اللحام لخطوط الأنابيب بواسطة الطريقة SMAW. تبين أيضا أن تشكل بعض المكونات البلورية الجديدة في الخبث الناتجة مثل: $Ca_3Al_2(SiO_4)(OH)_8$, Mg_2SiO_4 , $NaAlSiO_4$, Al_2SiO_5 , $Ca_2SiO_2(OH,F)_4$, $CaMnSi_2O_6$, $Ca_2MgSi_2O_7$ و (LC). وأظهر التحليل الكيميائي للوصلات انخفاضا في نسبة الكربون والمنغنيز في المنطقة المنصهرة تحت تأثير تغليف أقطاب اللحام أو حتى من دون تغليف بالمقارنة مع المعادن الأساسية. كما أن البنية المجهرية للمنطقة المنصهرة الناتجة عن مختلف الأغلفة المستعملة في هذه الدراسة تتكون أساسا من الفريت الإبري. بينما المنطقة المنصهرة الناتجة عن انصهار أقطاب اللحام دون تغليف تتكون أساسا من الفريت. وقد أوضحت الدراسة أن الصلادة الدقيقة في المنطقة المنصهرة متعددة الطبقات الناتجة عن مختلف الأغلفة المستعملة تتزايد مع زيادة مكافئ الكربون في أقطاب المختلفة.

كلمات البحث: الفولاذ X42، التغليف السليلوزي ، التغليف القاعدي، لحام SMAW ، التركيب الكيميائي، البنية المجهرية، الصلادة الدقيقة ، حيود الأشعة السينية.