



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

Nadjet Hicher

Le : Lundi 8 juillet 2019

Étude des propriétés microstructurales et mécaniques d'un acier (BS2) soudé

Jury :

Mme. Cherifi Nedjma	MCA	Université de Biskra	Président
Mme. Digheche Kelthoum	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Mme. Hamdi Ines	MCA	Université de Biskra	Examineur



Dédicace

À l'esprit de mon cher père

À ma chère mère

À ma seule sœur

À ma famille

À mes amis

... pour tous mes chers, je dédie ce modeste travail.

Hicher Madjet

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout d'abord à « Dieu » pour la santé et le courage qu'il m'a a donnés pour terminer ce modeste travail.

*Mes sincères et profonds remerciements pour mon enseignante et mon encadreur Madame **Digheche Kelthoum** qui n'a épargné aucun effort pour me diriger durant la réalisation de ce travail, je suis très reconnaissante pour la patience dont elle a fait preuve le long de ce projet.*

*Je remercie également Mme. **Cherifi Nedjma** (Président de jury) et Mme. **Hamdi Ines** (Examineur), qu'ils ont accepté de présider, examiner et évaluer le contenu scientifique de ce mémoire.*

*J'aimerais également remercier Mlle **Farida Khamouli** et tous les membres du laboratoire métallurgie.*

*Je remercie tous les membres des laboratoires de recherche en physique, en particulier le professeur **Ouhabab**.*

Sommaire

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Partie bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les aciers

I.1. Introduction.....	5
I.2. Historique sur les aciers.....	5
I.3. Définition de l'acier.....	5
I.4. Classification des aciers.....	6
I.4.1. Les aciers alliés et non alliés.....	7
I.4.1.1. Les aciers non alliés.....	7
I.4.1.2. Les aciers alliés.....	7
I.4.2. Les aciers au carbone.....	8
I.4.2.1. Les aciers à faible teneur en carbone.....	9
I.4.2.2. Aciers à moyenne teneur en carbone.....	9
I.4.2.3. Les aciers à haute teneur en carbone.....	9
I.5. Influence de l'élément d'addition.....	10
I.5.1. Le carbone.....	10
I.5.2. Le chrome.....	10
I.5.3. Le nickel.....	10
I.5.4. Le soufre.....	11
I.5.5. Le cuivre.....	11
I.5.6. Le manganèse.....	11
I.5.7. Le titane.....	11
I.5.8. Le niobium.....	11
I.5.9. Le silicium.....	12
I.5.10. Le molybdène.....	12

I.5.11. Le vanadium.....	13
I.5.12. Le zirconium.....	13
I.6. Diagramme de phase fer-carbone.....	13
I.6.1. Diagrammes de phases fer-carbone.....	13
I.6.2. Les principaux phase de diagramme de phase.....	15
I.6.2.1. La ferrite.....	15
I.6.2.2. La cémentite.....	15
I.6.2.3. La perlite.....	16
I.6.2.4. L'austénite.....	17
I.6.2.5. La martensite.....	17
I.6.2.6. Le point eutectoïde.....	18
I.7. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers.....	18
I.7.1. La dureté.....	18
I.7.2. L'essai de traction.....	19
I.7.3. La résilience.....	19
I.7.4. Les essais de fluage.....	19
I.7.5. Les essais d'endurance.....	19

Chapitre II : Soudage des aciers

II.1. Introduction.....	21
II.2. Historique sur le soudage.....	21
II.3. Définition du soudage.....	22
II.4. Caractéristique de soudage.....	23
II.4.1. Métal de base (MB).....	23
II.4.2. Zone affectée thermiquement (ZAT).....	23
II.4.3. La zone de fusion (ZF) mélange homogène.....	23
II.4.4. La zone de fusion (ZF) non mélangée.....	23
II.4.5. Zone de fusion partielle (ZFP).....	23

II.5. Le principe.....	24
II.6. Les procédés de soudage.....	25
II.7. Classification des techniques de soudage.....	28
II.8. Soudage à l'arc électrique.....	28
II.8.1. Définition de l'arc électrique.....	28
II.8.2. Les procédés de soudage à l'arc électrique.....	29
II.8.2.1. Soudage sous flux en poudre (SAW).....	29
II.8.2.1.1 Définition.....	29
II.8.2.1.2. Le principe.....	29
II.8.2.1.3. Domaines d'applications.....	30
II.8.2.1.4. Avantages et inconvénients du procédé.....	30
II.9. Effet de vitesse et courant de soudage.....	31
II.9.1. Vitesse de soudage.....	31
II.9.2. Courant de soudage.....	32
II.10. Les défauts de soudage.....	33
II.10.1. Le collage ou le manque de fusion.....	33
II.10.2. Les inclusions gazeuses.....	33
II.10.3. Les inclusions solides.....	34
II.10.4. Défauts de pénétration.....	34
II.10.5. Fissurations.....	35
II.11. Contaminants dégagés lors des différents procédés de soudage.....	36
II.11.1. Les fumées de soudage.....	36
II.11.2. Les gaz de soudage.....	36

Partie pratique

Chapitre III : Partie expérimentale

III.1. Introduction.....	40
III.2. Matériaux étudiés.....	40

III.2.1. Compositions chimiques de l'acier étudié.....	40
III.2.2. Caractérisation mécanique.....	40
III.3. Métal d'apport.....	41
III.4. Procédé de soudage (SAW (soudage automatique à arc électrique immergé sous flux solide)).....	41
III.5. Vitesse de soudage.....	42
III.6. Présentation schématique de la bouteille à gaz et des zones de prélèvement des échantillons étudiées.....	42
III.7. Présentation des soudures étudiées.....	43
III.8. Prélèvement des échantillons et éprouvette.....	44
III.8.1. Découpage.....	44
III.8.2. Polissage.....	44
III.8.3. L'attaque chimique.....	45
III.9. Moyens utilisés.....	45
III.9.1. Microscope optique.....	45
III.9.2 Mesure de la résistance mécanique.....	46

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction.....	49
IV.2. Caractérisation Structurale.....	49
IV.2.1. La micrographie de l'acier BS2 (métal de base).....	49
IV.2.2. La micrographie de métal de base (MB).....	49
IV.2.3. La micrographie de zone affectée thermiquement (ZAT).....	51
IV.2.4. La micrographie de zone fondue (ZF).....	53
IV.3. Caractérisation de micro-dureté et résistance.....	61
Conclusion générale.....	67
Références bibliographiques.....	69

Liste des figures

Figure	Titre	Page
I.1	Mailles élémentaires des structures cristallines (CC et C.F.C)	6
I.2	Diagramme d'équilibre fer-carbone	14
I.3	Structure ferritique	15
I.4	Structure cémentite	16
I.5	Structure perlitique	16
I.6	Structure austénitique	17
I.7	Structure martensitique.	18
II.1	Les zones de soudage	22
II.2	Le principe de soudage	24
II.3	Assemblage de deux pièces par soudage	25
II.4	Principaux types d'assemblage	25
II.5	Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie	27
II.6	Le principe de soudage (SAW)	30
II.7	Schéma des différents collages ou manque de fusion	33
II.8	Les inclusions gazeuses	34
II.9	Les inclusions solides	34

II.10	Défauts de pénétration	35
II.11	Fissuration du joint de liaison	35
III.1	Procédé de soudage SAW	42
III.2	Schéma de la bouteille spécifiant la zone de prélèvement des échantillons	43
III.3	Repère de référence	43
III.4	Type d'échantillon prélevé de la bouteille à gaz B11/13	44
III.5	Les échantillons	44
III.6	Polisseuse de type MECAPOL P 310	45
III.7	Microscope Optique type UNITRON MS	46
III.8	Micro-duromètre de type Wolpert Wilson Instruments Micro-vicker hardness tester digital auto turret	47
IV.1	Microstructure de la tôle d'acier BS2 a l'état de réception	49
IV.2	Microstructure de métal de base de la tôle soudée (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min) (X500)	50
IV.3	Microstructure de zone affectée thermiquement de la tôle soudée (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min) (X500)	52

IV.4	Microstructure de la zone fondue (haut) de la tôle soudée (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min) (X500)	54
IV.5	Microstructure de la zone fondue (milieu) de la tôle soudée (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min) (X500)	57
IV.6	Microstructure de la zone fondue (basse) de la tôle soudée (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min) (X500)	60
IV.7	Profils de la micro-dureté (A : v= 30mm/mn, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min, E : la comparaison)	63
IV.8	Profils de la résistance mécanique (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min, E : la comparaison)	64

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	Page
II.1	Protections gazeuses utilisées en soudages MIG et MAG	32
II.2	Le rôle d'enrobage	35
III.1	Analyse chimique de l'acier	47
III.2	Caractérisation mécanique	47
III.3	Compositions chimiques de métal d'apport	48
III.4	Vitesses de soudage utilisés	49
IV.1	Résultats de la micro-dureté	72
IV.2	Résultats de la résistance mécanique	72

Introduction générale

Introduction générale

Parmi les matériaux métalliques utilisés, l'acier est le métal le plus largement utilisé dans tous les secteurs industriels, mécanique, pétrochimique, médical, ...etc. Cela est dû à ses propriétés chimiques, physiques et mécaniques appropriées.

Le soudage fait partie des méthodes utilisées pour préparer l'acier à une utilisation appropriée, ce qui 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 but de ce travail est l'étude de la variation des vitesses de soudage sur le joint soudé par l'arc électrique et la détermination de la vitesse optimale.

Cette mémoire contient quatre chapitres, précédé par une introduction générale pour préparer ce qui sera traité :

- Chapitre I : Généralités sur les aciers.
- Chapitre II : Soudage des aciers.
- Chapitre III : Partie expérimentale.
- Chapitre IV : Résultats et discussions.

Et en fin nous avons résumé ce travail par une conclusion générale.

Partie
bibliographique

Chapitre 1 :
Généralités sur les
aciers

I.2. Introduction

Les matériaux métalliques constituent la base du développement technologique. Ceci est également valable pour la construction des outils, des machines, des installations et des automobiles que pour l'aéronautique et l'aérospatial et la médecine. Les alliages à base de fer, aciers et fontes, constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques.

Les aciers, en particulier, constituent une classe de ces matériaux très vaste possédant une large panoplie de caractéristiques mécaniques. Ils jouent et continuent de jouer un rôle capital sur le plan technologique. Les aciers sont des matériaux de l'armement, de construction, de transport (trains, automobiles), de composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), d'outillage de frappe (marteaux, burins, etc.) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), etc. Ils sont aussi très présents dans des produits destinés au grand public (meubles, ustensiles de cuisine). Plusieurs facteurs expliquent cette importance : sur le plan mécanique, les aciers ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique, et à cause de leurs meilleures propriétés aussi physicochimiques que mécaniques qu'ils possèdent, ils se prêtent facilement à une production en masse. L'acier demeure le seul matériau capable tout à la fois de soutenir des efforts et des charges considérables, de conserver ses vertus à haute et basse température et de résister à la corrosion. On peut modifier également leur propriété en ajoutant d'autres éléments [2].

I.1. Historique sur les aciers

D'aciers extrêmement ancienne qui est probablement la première forme d'utilisation des métaux ferreux. C'est en effet vers 1000 ans avant J.C. que semble remonter la découverte de ces aciers grâce à la technique de la cémentation et à l'art de la trempe, qui ont été trouvés par hasard, le fer absorbant du carbone au contact des matière organique qui servaient à le chauffer pour le marteler [1].

I.3. Définition de l'acier

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments outre

le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage [3] la figure I.1 présente les mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C).

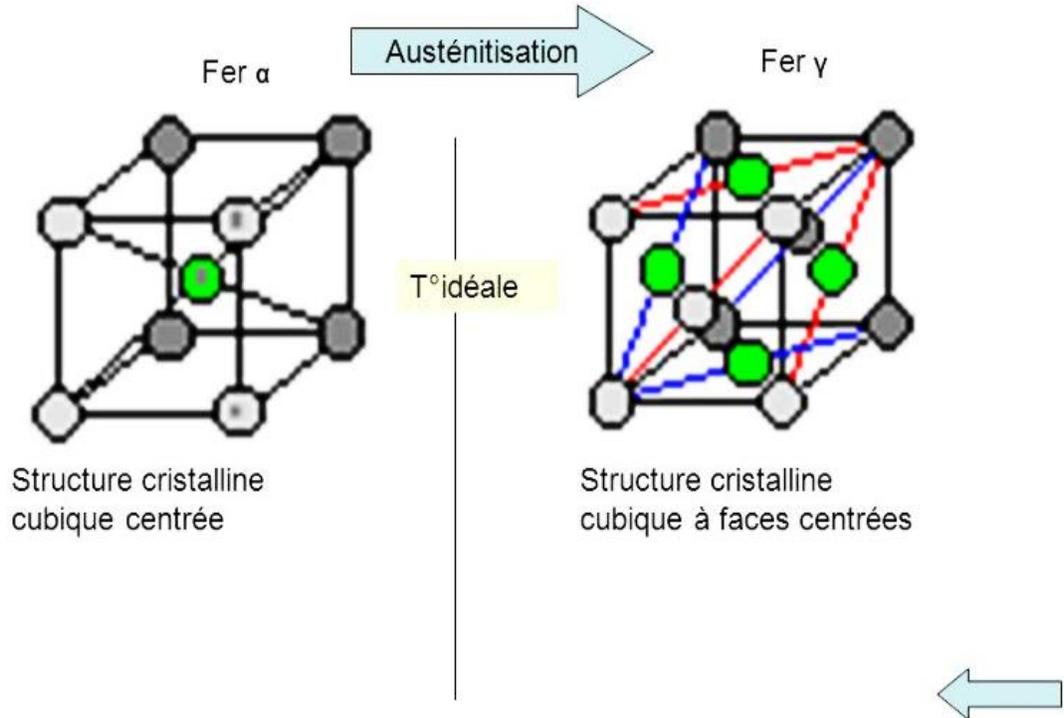


Figure I.1 : Mailles élémentaires des structures cristallines (C.C et C.F.C) [4].

I.4. Classification des aciers

Les aciers peuvent être classifiés selon:

- La composition, telle que le carbone, faiblement allié, ou les aciers inoxydables...
- Les méthodes de fabrication, telles que le four Thomas, processus de base de l'oxygène, ou méthodes de four électrique
- La méthode de finition, telle que le laminage à chaud ou laminage à froid
- La forme de produit, telle que la barre, le plat, la feuille, la bande, la tuyauterie, ou la forme structurale.
- L'utilisation des désoxydants, telle que l'acier calmé, semi calmé, couvert, ou bordé
- La microstructure, telle que de ferrite, perlitique, et martensitique...
- Le niveau exigé de force, comme indiqué dans des normes d'ASTM
- Le traitement thermique, tel que le recuit, et le traitement thermomécanique. .

Des systèmes de classification mentionnés ci-dessus, la composition chimique est le plus largement utilisée internationalement et sera soulignée comme suit.

Plus on a de carbone, plus l'acier est dur. On a donc initialement classé l'acier en catégories [4].

I.4.1. Les aciers alliés et non alliés

I.4.1.1. Les aciers non alliés

En faisant abstraction des impuretés, l'acier peut être considéré comme un alliage binaire fer-carbone (jusqu'à 1,7 % de carbone). Les mélanges hétérogènes fer-carbone sont caractérisés par la présence de grains de ferrite (solution solide fer-carbone) et de grains de perlite (agrégat perlite + cémentite (Fe_3C)). La cémentite est un composé dur et fragile qui se dispose en fines lamelles alternées sur les grains. A l'examen au microscope optique, ces lamelles de cémentite présentent un aspect nacré à l'origine du nom de cette structure particulière: la perlite. Au dessus de 0,85 % de carbone (eutectoïde), l'acier n'est plus composé que de perlite. De plus, la cémentite supplémentaire s'accumule aux joints de grains. On doit noter que ces structures correspondent à un état recuit (non trempé) de l'acier. Mais nous rappelons que la trempe des aciers consiste à faire subir au matériau un cycle particulier de variation de la température et surtout un refroidissement qui permet la création d'une nouvelle structure appelée martensite : ceci permet d'augmenter les caractéristiques de dureté, de limite élastique...etc. Les différentes structures des aciers en fonction de la température sont représentées dans le diagramme d'équilibre fer-carbone . Il traduit la composition de phases et la structure des alliage dont la concentration varie du fer pur à la cémentite (6.67% C) [4].

I.4.1.2. Les aciers alliés

Pour améliorer certaines propriétés d'un acier (limite élastique, résilience, ...), on lui ajoute de faibles proportions d'éléments comme le chrome, le nickel, le vanadium, le zirconium, ...etc. Un acier est faiblement allié si les teneurs en éléments d'addition restent inférieures à un certain seuil. Par contre pour une teneur supérieure à 5% pour l'un quelconque des éléments d'addition, l'acier est dit fortement alliés sont nettement différentes de celles des aciers non alliés. La trempabilité est généralement supérieure et des structures martensitiques peuvent être obtenues par des trempes à l'huile ou à l'air (aciers autotrepants) [1].

➤ **Les aciers microalliés**

Les aciers microalliés sont des aciers à haute résistance mécanique caractérisés par de faibles additions de niobium (Nb), de vanadium (V) et/ou de titane (Ti). Ces éléments de microalliage (≈ 0.1 % massique) s'associent avec des éléments interstitiels (carbone, et/ou azote) pour former des précipités : nitrures, carbones et/ou carbonitrures. Cette précipitation conduit à un accroissement des propriétés mécaniques par rapport aux aciers de base au carbone manganèse. Ces niveaux de propriétés mécaniques sont garantis par l'affinage des grains austénitiques et le durcissement structural induit par la précipitation de dispersive. Les effets spécifiques de telles additions peuvent être affectés par l'addition d'autres éléments d'alliage (B, Si, Cr, etc.) d'une part, et par la maîtrise des paramètres de traitements thermiques et/ou thermomécaniques, d'autre part, vers la fin des années soixante, les aciers microalliés occupaient une place importante parmi les aciers. Ils ont gagné rapidement l'intérêt des fabricants grâce à la possibilité d'utiliser des procédés de semi-calmage dans leur production, de par la faible affinité du niobium et du vanadium pour l'oxygène [1].

➤ **Aciers fortement alliés**

On désigne par acier fortement allié un métal dans lequel un des éléments d'addition au moins a une teneur égale ou supérieure à 5 %.

Il se distingue par une lettre majuscule Z, indiquant que ce métal est fortement allié, suivie de 100 fois la teneur en carbone suivie elle-même du symbole des éléments d'addition et des pourcentages exacts de ceux-ci.

Dans les aciers fortement alliés la teneur en molybdène n'est pas spécifiée, celui-ci entrant dans l'alliage a moins de 1 % [4].

I.4.2. Les aciers au carbone

On appelle acier un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2% massique. Cette teneur limite vient de la limite de solubilité du carbone, à haute température, dans la phase cubique à faces centrées (C.F.C) du fer, appelée austénite. Des éléments d'alliages sont généralement ajoutés à un alliage Fe-C afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et les propriétés des aciers [5].

I.4.2.1. Les aciers à faible teneur en carbone

Ce type d'aciers contiennent jusqu'à 0,30% C. La catégorie la plus importante de cette classe d'acier est de produits plats laminés (feuille ou bande), habituellement dans l'état laminé à froid et recuite. La teneur en carbone de ces aciers qui sont à haute aptitude à la déformation est très faible, moins de 0,10% de C, jusqu'à 0,4% de Mn. Les utilisations typiques de cette classe sont dans les panneaux de carrosserie automobile, plaque d'étain, et les produits métalliques.

Pour l'acier laminé à plaques structurales et sections, la teneur en carbone peut être augmentée, environ de 0,30%, avec une plus grande teneur en manganèse jusqu'à 1,5%. Ces matériaux peuvent être utilisés pour les pièces embouties, pièces forgées, tubes sans soudure, et plaque de la chaudière [4].

I.4.2.2. Aciers à moyenne teneur en carbone

La concentration en carbone de ces aciers varie de 0.25% à 0.60%. Leurs propriétés mécaniques s'améliorent par austénitisation, trempe, puis revenu. On les utilise le plus souvent à l'état revenu, auquel cas ils ont une microstructure de martensite revenue.

Les aciers à moyenne teneur en carbone ont une faible trempabilité et leur traitement thermique n'est efficace que si leur section est très mince et si la vitesse de refroidissement est très élevée.

L'ajout de chrome (Cr), de nickel (Ni) ou de molybdène (Mn) facilite l'application de traitements thermiques à ces alliages et offre un large éventail de combinaisons résistance ductilité.

Les traitements thermiques produisent des aciers plus résistants que les aciers au carbone ordinaires, mais d'une ductilité et d'une ténacité moindres. Parmi les pièces faites d'acier à moyenne teneur en carbone, mentionnons les roues de train et les voies ferrées, les engrenages, les vilebrequins ainsi que d'autres pièces de machine et des composants structuraux alliant haute résistance, résistance à l'usure et ténacité [6].

I.4.2.3. Les aciers à haute teneur en carbone

Ils sont caractérisés par une grande dureté, une grande résistance et une faible ductilité. Étant résistants à l'usure, ils sont, utilisés dans la fabrication d'outils de coupe, des lames de scies et de matrices. On associe souvent à ces aciers des éléments d'addition tels que le chrome, le vanadium et le tungstène afin d'obtenir des composés de carbures pour améliorer leur dureté [1].

I.5. Influence de l'élément d'addition

Les éléments d'addition (éléments d'alliage) sont en général des "métaux" surtout dans les aciers mais ce peut être des "non métaux" ou des "gaz". En général, les éléments d'alliage améliorent les propriétés de ces métaux. Les éléments d'addition dans les aciers sont nombreux (une trentaine). Ces éléments ont une action spécifique dans les aciers [2] :

I.5.1. Le carbone

Après refroidissement lent, la structure d'un acier comporte deux phases : ferrite et cémentite.

La quantité de la cémentite est directement proportionnelle à la teneur en carbone.

Les particules dures et fragiles de la cémentite augmentent la résistance aux déplacements des dislocations, c'est-à-dire la résistance à la déformation tout en dégradant la plasticité et la ductilité.

Il en résulte que l'augmentation de la teneur de l'acier en carbone accroît, la charge de rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience [7].

I.5.2. Le chrome

Cet élément d'addition augmente la trempabilité de l'acier. Il améliore la résistance à l'abrasion, diminue le grossissement du grain lors de l'austénisation, retarde l'adoucissement lors du revenu et contribue à la réduction de l'oxydation à haute température, augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique). Suite à son rôle alphagène pour des teneurs supérieures à 7 %, il renforce la résistance à la fissuration à chaud lors de solidifications rapides (telles que celles rencontrées dans des opérations de soudage) [6].

I.5.3. Le nickel

Le nickel, qui ne forme pas de carbures, agit principalement sur les propriétés de la ferrite augmentation de la résistance mécanique et de la ténacité. Les aciers qui contiennent plus de 0.5% de nickel conservent une bonne résilience, même à des températures très basses (aciers à 9 % de nickel utilisés pour les réservoirs cryogéniques).

Le nickel freine en outre la croissance des grains austénitiques (aciers de cémentation) et il exerce une action moyenne sur la trempabilité (facteur d'augmentation de la trempabilité de 1,4/1 % Ni) [2].

I.5.4. Le soufre

C'est un élément nuisible pour l'acier, il diminue surtout sa forgeabilité. Il peut exister sous forme de MnS et de FeS. A froid le soufre amène également une diminution importante de la résistance la teneur limite en soufre doit être inférieure à (0.035 – 0.06%). Parfois on utilise des aciers de décolletage riches en soufre (0,015 - 0,025) % afin de faciliter la fragmentation des copeaux. Un minimum de soufre (0,02%) est toujours nécessaire pour des raisons d'usinabilité [8].

I.5.5. Le cuivre

Dans les aciers, le cuivre se trouve uniquement en solution solide. Son rôle essentiel est d'améliorer la résistance à la corrosion atmosphérique [7].

I.5.6. Le manganèse

On l'utilise surtout pour améliorer les propriétés des aciers d'usage général et la trempabilité des aciers de traitements thermiques, et ce a un faible cout. Le manganèse se retrouve rarement seul comme élément d'alliage, car il entraîne plusieurs inconvénients : sensibilité à la surchauffe au cours de l'austénitisation, sensibilité qui provoque une croissance des grains ; augmentation de la fragilité au revenu ; diminution de la ductilité et de la résistance mécanique mesurées selon une direction perpendiculaire au laminage (sens travers) [2].

I.5.7. Le titane

Titane est employé essentiellement en raison de leur très grande affinité pour le carbone. Il évite l'altération des structures métallurgiques lors du travail à chaud, en particulier lors des travaux de soudure où il prend la place du chrome pour former un carbure de titane (TiC) évitant de ce fait la perte du caractère d'inoxydabilité dans les zones affectées par la chaleur (ZAC) du fait de la captation du chrome [6].

I.5.8. Le niobium

Le niobium (Nb), anciennement appelé columbium (Cb) aux États-Unis, est principalement utilisé (75%) comme élément d'alliage dans les aciers faiblement alliés. Une proportion de 20 à 25 % est utilisée comme additif dans les superalliages à base de nickel et les aciers résistants à la chaleur. Seulement 1 à 2 % est utilisé sous la forme de niobium pur et d'alliages à base de niobium résistants aux hautes températures. Le niobium est l'élément d'alliage le plus efficace pour les

aciers alliés, il est ajouté dans le but d'avoir un affinement supplémentaire des grains ainsi qu'un durcissement par précipitation.

Le niobium est utilisé dans une variété de produits en aciers à moyenne et à forte teneur en carbone tels que les plaques, les bandes, les barres, les profilés et les pièces forgées. Les caractéristiques uniques de la métallurgie et les aspects technologiques de l'affinage de grains que le niobium fournit contribuent à l'évolution de composants d'automobile (bielle, vilebrequin...). Le mécanisme d'affinage structural crée la possibilité d'aider la chimie de conception de produits afin de répondre avec succès aux propriétés mécaniques requises [9].

I.5.9. Le silicium

Le silicium, autre élément alpha gène, améliore les propriétés d'emploi à haute température mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage. Avec une teneur voisine de 0.3% en masse, il est utilisé comme désoxydant dans l'acier liquide au stade final de l'élaboration. Des teneurs d'environ 1 % entraînent une augmentation de la limite élastique, de la résistance à l'oxydation au-dessus de 1000° C et de la trempabilité par effet de synergie avec d'autres éléments d'alliages comme le molybdène. Il permet aussi de diminuer la stabilité des carbures M_2C , ce qui abaisse la fragilité du métal.

Comparativement au chrome et à l'aluminium, l'addition de silicium influe d'une manière plus importante sur la résistance à l'oxydation entre 500 et 700°C. L'effet du silicium dans les alliages Fe-Al-Si, est d'établir une couche d'oxyde riche en silicium au-dessus de la couche d'oxyde d'aluminium. L'oxyde formé est plus protecteur que l'oxyde d'aluminium et renforce l'effet protecteur de la couche d'alumine [10].

I.5.10. Le molybdène

- accroît fortement la trempabilité davantage que le chrome et trois fois plus que le nickel.
- le molybdène élève la température de grossissement de l'austénite
- supprime la sensibilité des aciers Ni-Cr au chauffage prolongé vers 700°C ou au refroidissement lent entre 600 et 400°C.
- augmente la résistance à la corrosion dans les inoxydables
- forme des particules résistantes à l'abrasion [7].

I.5.11. Le vanadium

Le vanadium est un élément carburigène dont l'affinité avec le carbone est plus grande que celle du molybdène ou du chrome. On constate la formation des carbures de vanadium VC de structure cubique à faces centrées même pour des teneurs en vanadium extrêmement faibles, de l'ordre de 0,1%. Pour des températures élevées, la stœchiométrie des carbures de vanadium en équilibre avec l'austénite est V_4C_3 [5].

I.5.12. Le zirconium

Générateur de carbures; utilisation métallurgique en tant qu'élément additionnel de désoxydation, dénituration et désulfuration car laissant peu d'impuretés. Les additions de Zr dans des aciers de décolletage sulfureux et entièrement calmés exercent une influence favorable sur la formation de sulfures et évitent ainsi une cassure au rouge.

Il accroît la longévité des matériaux de confection des conducteurs chauffants et provoque une striction de la zone γ [6].

I.6. Diagramme de phase fer-carbone

I.6.1. Diagrammes de phases fer-carbone

Le plus important de tous les systèmes d'alliages binaires est probablement celui du fer et du carbone. Les aciers et les fontes, matériaux structuraux essentiels dans toute société technologiquement avancée, sont essentiellement des alliages fer-carbone. La présente section est axée sur l'étude du diagramme d'équilibre de ce système et sur la formation de plusieurs microstructures possibles.

La figure I.2 présente les températures importantes pour l'acier et la fonte. Ce diagramme est très important pour les opérations de production, formage, soudage, et traitement thermique des aciers et des fontes. Avant de l'utiliser, il est nécessaire d'en comprendre parfaitement chaque région [8].

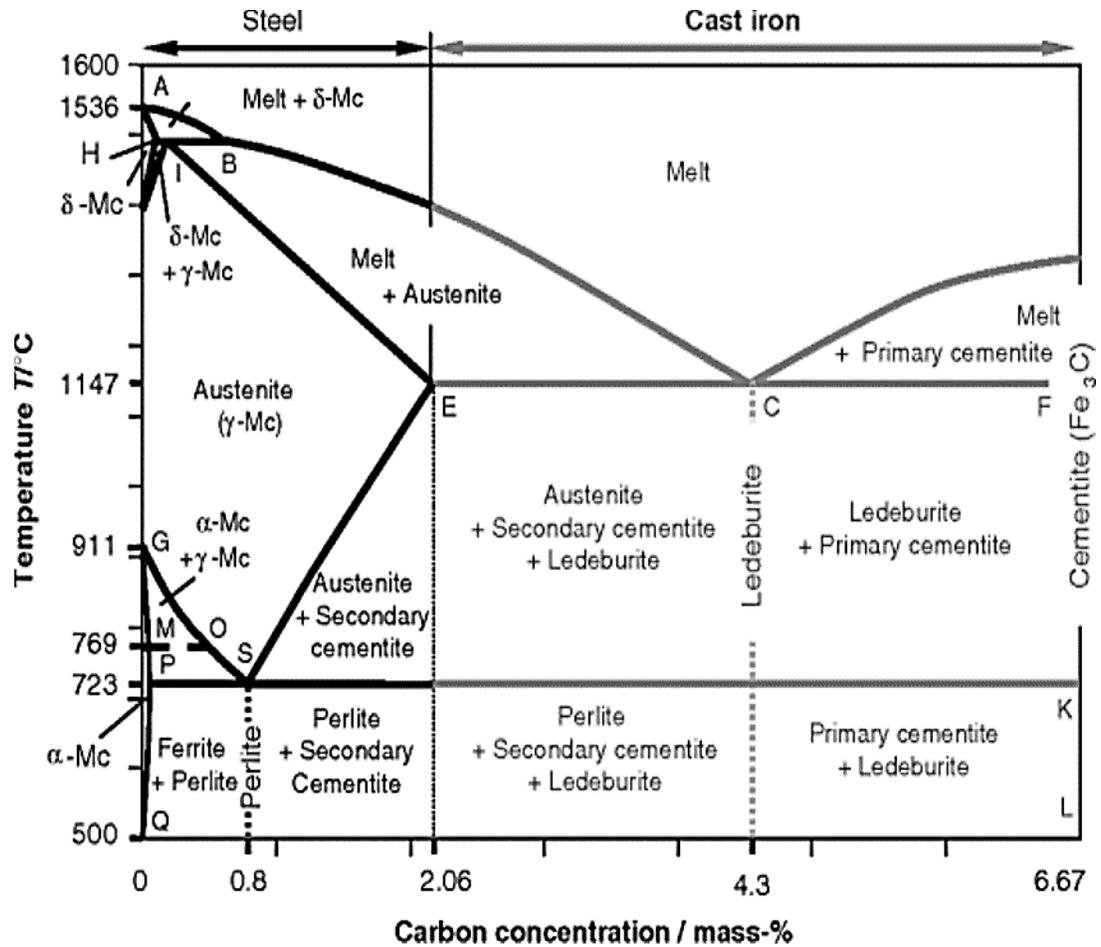


Figure I.2 : Diagramme d'équilibre fer-carbone [8].

➤ **Teneur de carbone**

À partir du diagramme Fer –Carbone on aura :

- ✓ (0,022 à 0,77 % de carbone) sont les aciers Hypoeutectoïdes. Ils sont le plus Malléables.
- ✓ (0,77 % de carbone) c'est l'acier eutectoïde.
- ✓ (0,77 à 2,14 % de carbone) : les aciers hypereutectoïde qui sont les plus durs et ne sont pas réputé soudables.
- ✓ 2,14 % de carbone correspond à la zone d'influence de l'eutectique (lédéburite) ; il existe toutefois des aciers lédéburitiques [11].

I.6.2. Les principaux phase de diagramme de phase

I.6.2.1. La ferrite

Cette phase contient une très petite quantité de carbone. La ferrite est aussi connue sous le terme de ferrite alpha ou fer alpha. Cette phase contient un maximum de 0.02% de carbone à 727°C (1341°F). Lorsque la température augmente jusqu'à 912°C (1674°F), la teneur en carbone dans la ferrite tend vers zéro. Aussi, lorsque la ferrite est refroidie à température ambiante, la quantité de carbone diminue. La formation de la ferrite commence dès qu'un acier ou une fonte est refroidie en dessous de 727°C (1341°F). La structure ferritique est cubique centrée et est à la fois ductile et tenace (figure I.3) [11].

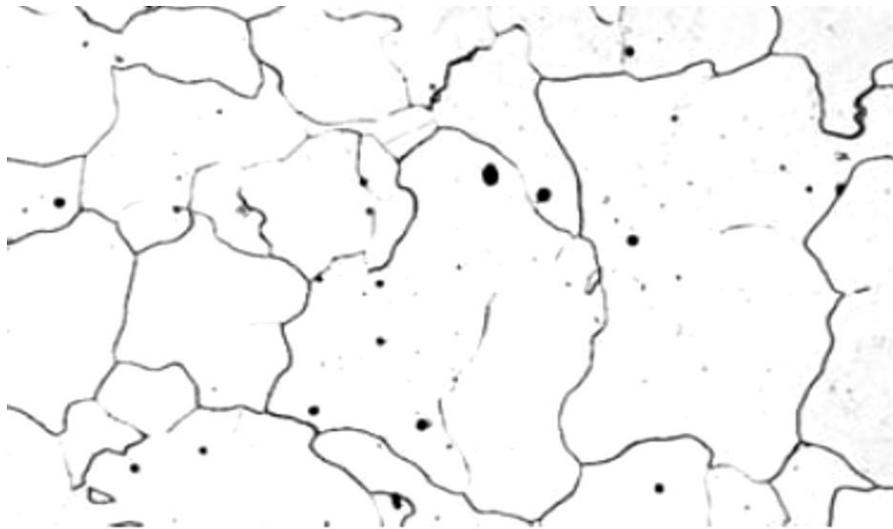


Figure I.3 : Structure ferritique [11].

I.6.2.2. La cémentite

La cémentite pure a la formule moléculaire Fe_3C . Elle contient 6.69% de carbone, a cause de cette haute teneur en carbone, la cémentite pure n'est pas indiquée sur la figure I.4. Comme mentionné auparavant, une concentration forte en carbone s'accompagne d'une augmentation de la dureté et de la fragilité. La cémentite, avec sa forte teneur en carbone, est dure et fragile. Cette phase est aussi connue sous le terme carbure de fer [8].

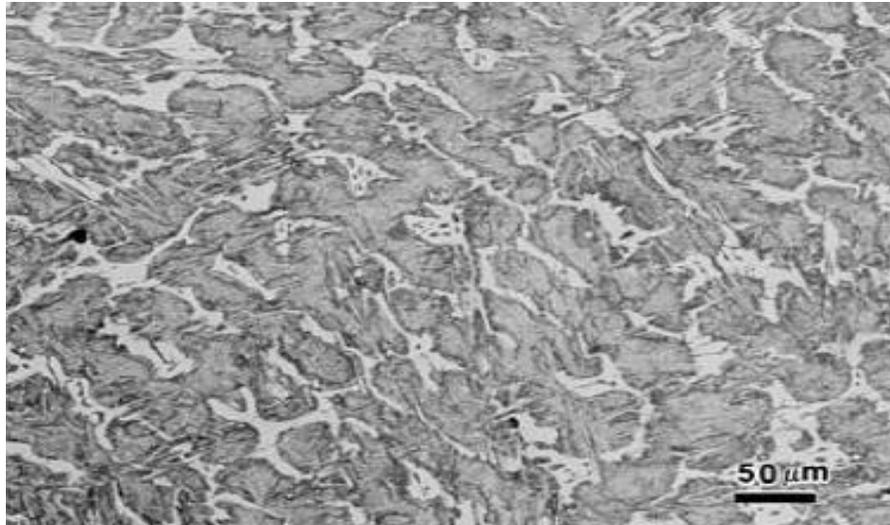


Figure I.4 : Structure cémentite [11].

I.6.2.3. La perlite

La perlite est une combinaison de ferrite et de cémentite. Ces deux phases se trouvent en couches alternées dans la microstructure.

La perlite pure se forme à 727°C (1341°F), et contient 0.77% de carbone. Cette phase comporte toujours 0.77% de carbone. Pour un acier ou de la fonte contenant plus de 0.77% de carbone, la perlite se forme avec de la cémentite (figure I.5) [11].



Figure I.5 : Structure perlitique [11].

I.6.2.4. L'austénite

L'austénite est une solution solide présente à partir de 660°C dans les conditions thermodynamiques (chauffage lente), elle a une structure cubique face centrée (4 atomes par mailles). Le paramètre de maille de cette structure est de 3,58 Å (10^{-10} m) et elle est compacte à 74 % (26 % de vide par maille). Le paramètre de maille est plus grand que celui de la ferrite (2,87 Å) qui a une structure cubique centrée (2 atomes par maille, compacte à 68 %). Quand le changement de phase commence, il y a un changement de coefficient directeur de la droite de dilatation (coefficient thermoélastique) qui entraîne un changement de volume jusqu'à la fin de la transformation vu que l'austénite à une structure plus compacte que la ferrite (figure I.6) [12].

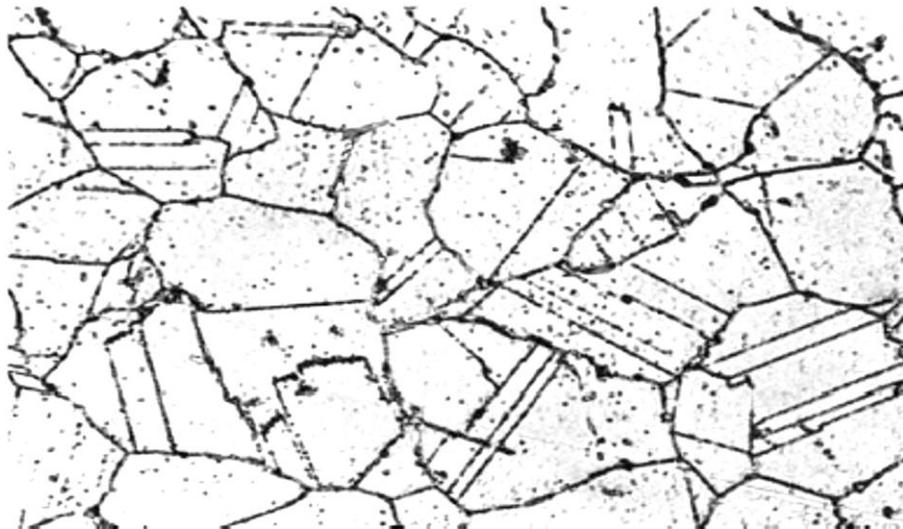


Figure I.6 : Structure austénitique [11].

I.6.2.5. La martensite

La martensite est une phase obtenue à partir de l'austénite par refroidissement. En effet, à partir d'une maille d'austénite C.F.C (structure Cubique a Face Centrée), une maille de martensite quadratique centrée est obtenue avec les atomes de carbones qui se placent entre les atomes de fer pour le modèle de Bain (figure I.7) [12].

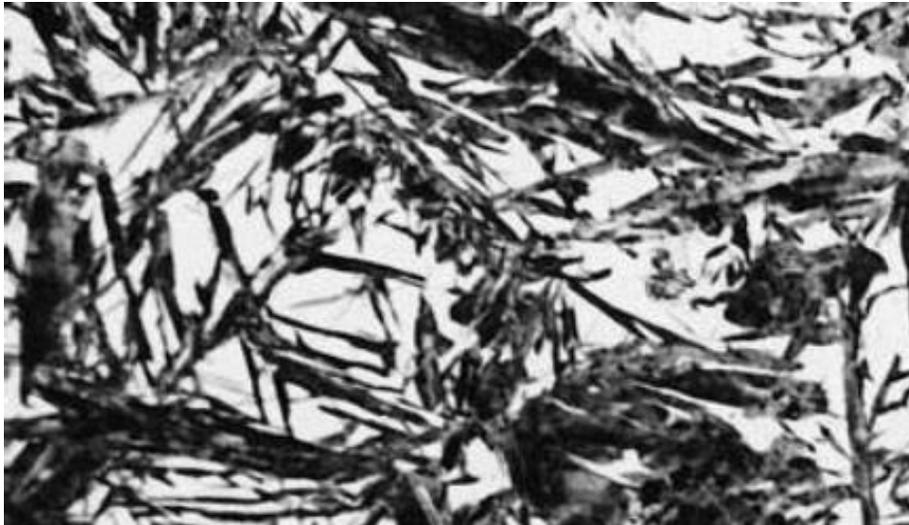


Figure I.7 : Structure martensitique [11].

I.6.2.6. Le point eutectoïde

Le point eutectoïde, est un point important sur le diagramme fer-carbone. Il se situe à 0.77% de carbone et 727°C (1341°F). Lorsque le refroidissement d'un acier passe par ce point, de la perlite se forme.

Très peu d'aciers ont une composition eutectoïde exacte. La plupart d'entre eux contiennent moins de carbone que le mélange eutectoïde et sont désignés par aciers hypoeutectoïdes. La microstructure de ces aciers est une combinaison de ferrite et de perlite. Ceux ayant une teneur en carbone supérieure à celle de l'eutectoïde sont appelés aciers hypereutectoïdes. La microstructure d'un acier hypereutectoïdes est une combinaison de cémentite et de perlite [8].

I.7. Propriétés et caractéristiques mécanique des aciers

I.7.1. La dureté

Elle s'exprime comme une résistance à l'enfoncement. En effet, à l'aide d'une bille, d'un cône ou d'une pyramide appliquée sur l'acier avec une force déterminée on peut calculer la dureté de l'acier, mais aussi mettre en évidence plusieurs propriétés de l'acier, comme sa résistance à la déformation, ou encore la capacité de durcissement par déformation (écrouissage). Les duretés des métaux ne peuvent être comparées que s'ils sont déterminés avec la même charge et la même méthode [13].

I.7.2. L'essai de traction

Il consiste à soumettre une éprouvette d'acier à une charge d'acier progressivement de plus en plus grande jusqu'au moment de la rupture. Le moment à partir duquel le métal subit une déformation est appelé la limite élastique. La rupture, qu'on appelle la charge de rupture, est la charge maximale que peut supporter un acier sans subir de modification. Une fois ces limites atteintes, on mesure la section initiale de l'éprouvette en méga Pascals (MPa). On mesure aussi l'allongement de l'éprouvette au moment de la rupture, et la striction qui est le rapport entre la section de l'éprouvette au niveau de la rupture et de sa section initiale. Un acier doux, qui est celui le plus répandu a une charge de rupture proche de 350MPa, mais il est courant d'utiliser des aciers dont la charge de rupture dépasse les 1000MPa. A l'heure actuelle, nous sommes capables de créer des aciers spéciaux résistant à des charges de plus de 3000Mpa [13].

I.7.3. La résilience

C'est une grandeur caractérisant la ductilité de l'acier, et plus particulièrement sa résistance au chocs. Elle exprime le travail en (J/cm^2) nécessaire pour rompre un acier, par flexion sous l'effet d'un choc [13].

I.7.4. Les essais de fluage

Ils permettent de déterminer les propriétés d'un acier à une température élevée, comme la déformation en fonction du temps et le temps de rupture sous une charge déterminée [13].

I.7.5. Les essais d'endurance

Cet essai est aussi très important, car il se peut que certaines structures en acier se rompent sous une charge étant bien inférieure à la charge de rupture, à cause de l'usure ou encore à cause de la vétuste de la structure [13].

Chapitre 11 :

Soudage des aciers

II.1. Introduction

Les procédés d'assemblage permanent des pièces métalliques sont : l'agrafage, le collage, le rivetage et le soudage.

L'assemblage par soudage est la technique utilisée dans les domaines de la fabrication (de produits en métal et de produits électriques) et des assemblages métalliques à partir de la micro-électronique jusqu'à la fabrication de grands corps de presses hydrauliques. On peut souder aujourd'hui les éléments d'épaisseur de 0,01-100 mm et plus [14].

Est intervenue à la fin du XIX^e siècle, lorsqu'il est devenu possible d'obtenir des températures de flammes suffisantes en mélangeant des gaz comme l'oxygène et l'acétylène désormais stockables en toute sécurité et que sont apparus des procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Avec ces procédés, la montée en température provoquée par une source thermique intense était bien plus rapide que la dissipation à l'intérieur de la pièce à souder. Le bain de métal en fusion obtenu se solidifiait en refroidissant pour constituer le joint unissant les deux pièces à souder [15].

II.2. Historique sur le soudage

Les origines du soudage moderne datent la fin du 19 siècle et du début de 20^{ème} siècle. A cette époque s'invente :

- Le soudage par aluminothermie (procédé chimique) : Goldsmith, Allemagne
- Le soudage avec électrode de charbonne : Bernardo et Olszewski, Russie
- Le soudage avec électrode fusible flue : Slavian, Russie
- Le soudage avec électrode enrobée Keller, Suède
- Le soudage par résistance Thompson, USA
- Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard, France

Le développement des procédés du soudage est devenu de plus en plus rapide avec l'invention du soudage avec les électrodes enrobées et le soudage au chalumeau Oxyacétylénique, ce dernier a rendu possible la réalisation des premiers œuvres importants comme les bateaux, les ponts le bâtiment et les chaudières (surtout aux USA et en Angleterre).

L'introduction massive du soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile et parmi les nouveaux procédés nous pouvons nommer :

- Le soudage avec électrode de tungstène : 1924 à l'USA
- Les soudages sous flux en 1935 à l'USA
- Le soudage vertical sous laitier en 1950 en URSS
- Le soudage sous la protection gazeuse de 1950 à 1960
- Le soudage avec fils fourre de 1950 à 1960
- Le soudage explosion de 1950 à 1960
- Le soudage par bombardement électronique en 1956 en France
- Le soudage au laser en 1965 [16].

II.3. Définition du soudage

Dans sa définition la plus générale, le soudage consiste à réunir de façon permanente deux ou plusieurs éléments, en assurant la continuité de la matière des parties assemblées soit par chauffage, soit par pression, soit par combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un matériau d'apport. L'utilisation d'un métal d'apport répond à deux besoins : il permet d'une part de combler le jeu entre les pièces assemblées, et d'autre part de changer la composition chimique et la structure cristalline de la zone fondue afin d'obtenir les performances recherchées. De manière générale, le terme « soudage » désigne l'ensemble des techniques mises en œuvre pour la réalisation d'un assemblage, et celui de « soudure » désigne le joint formé (figure II.1) [17].

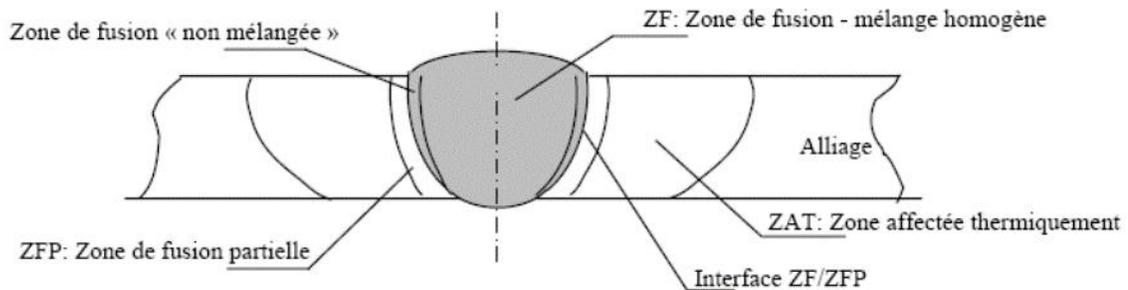


Figure II.1 : Les zones de soudage [14].

II.4. Caractéristique de soudage

II.4.1. Métal de base (MB)

Cette partie de la structure soudée est suffisamment loin de la source de chaleur pour qu'il n'y ait pas eu de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage. Le métal de base, tout comme le joint de soudure global est un lieu de concentration des contraintes résiduelles transversales et longitudinales dépendant du degré de rétreint imposé à la soudure [18].

II.4.2. Zone affectée thermiquement (ZAT)

La zone affectée thermiquement est la portion du métal de base immédiatement voisine de la zone de liaison ; c'est une région qui subit des transformations dues au soudage [18].

II.4.3. La zone de fusion (ZF) mélange homogène

Est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initial est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés [19].

II.4.4. La zone de fusion (ZF) non mélangée

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

Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base [19].

II.4.5. Zone de fusion partielle (ZFP)

Le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grains, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle [19].

II.5. Le principe

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimique et des paramètres qui rentrent en jeu. Dans le soudage, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation de la température dans les pièces. Les sources d'énergie utilisées sont de type électrique, chimique, mécanique (friction) ou optique (Laser) (figure II.2) [16].

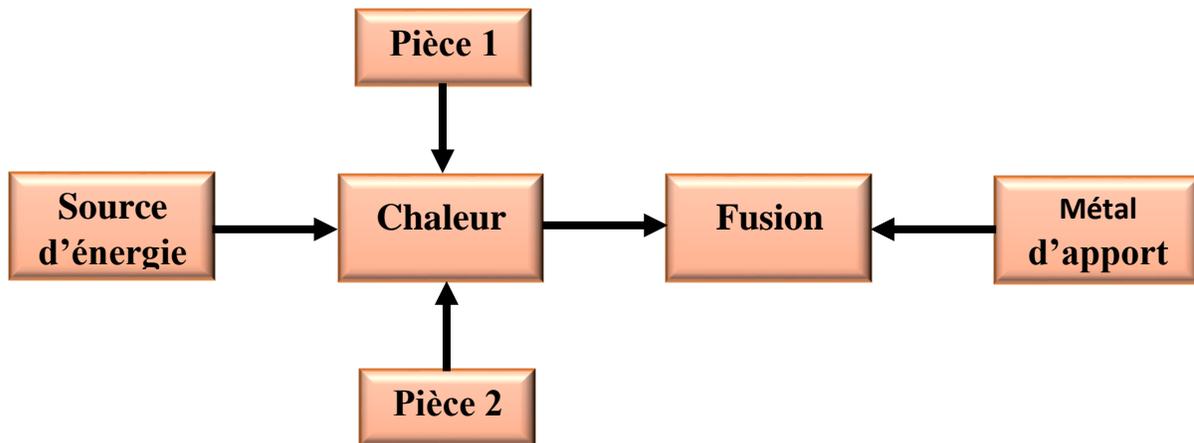


Figure II.2: Le principe de soudage [19].

D'après la théorie, le soudage consiste à assembler deux pièces de métal (A) en provoquant simultanément une fusion de leurs bords et en ajoutant d'un métal d'apport (il est dit (hétérogène)). La figure II.3 montre l'assemblage de deux pièces par soudage [20].

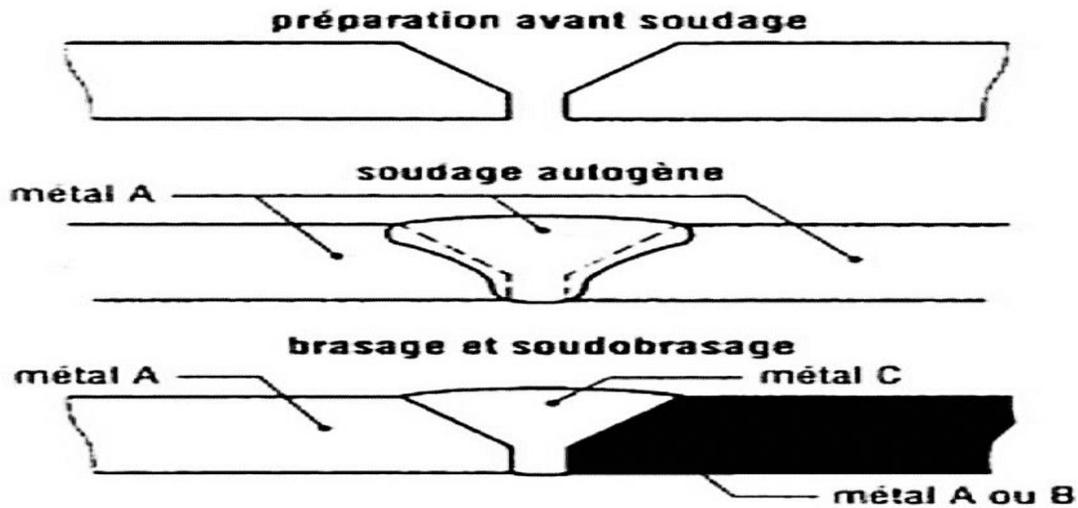


Figure II.3 : Assemblage de deux pièces par soudage [20].

Autogène : fusion du métal de base et du métal d'apport.

Hétérogène : le métal de base n'est pas fondu, il n'y a que le métal d'apport qui est fondu (soudo-brasage, brasage) [20].

- Il y a 3 principaux types d'assemblage (figure II.4).

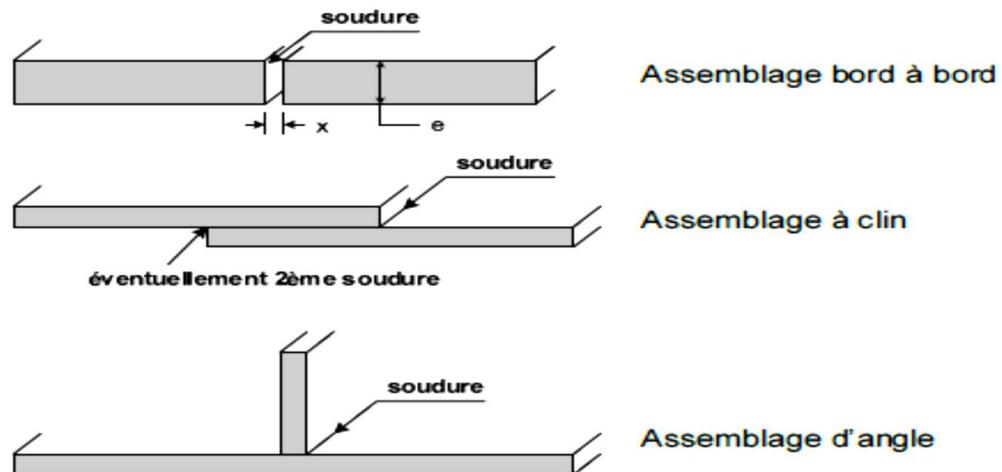


Figure II.4 : Principaux types d'assemblage [21].

II.6. Les procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour

d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergies utilisées dans le domaine du soudage sont de types chimiques, électriques, optiques ou mécaniques [22].

Les différents types du soudage ne peuvent s'effectuer que selon l'un des deux modes suivants:

- **En phase solide** : la continuité atomique entre les bords à joindre est assurée par une déformation à froid ou à chaud. Cette déformation est due soit à une pression soit à une friction suivie d'une pression.

- **En phase liquide** : liaison par fusion localisée des joints des pièces à assembler ou par ajout de métal d'apport en fusion. La majorité des procédés de soudage s'opèrent selon ce mode.

La classification des multiples variantes du soudage peut être faite selon la source d'énergie utilisée. Cette classification est présentée dans la figure II.5 [16].

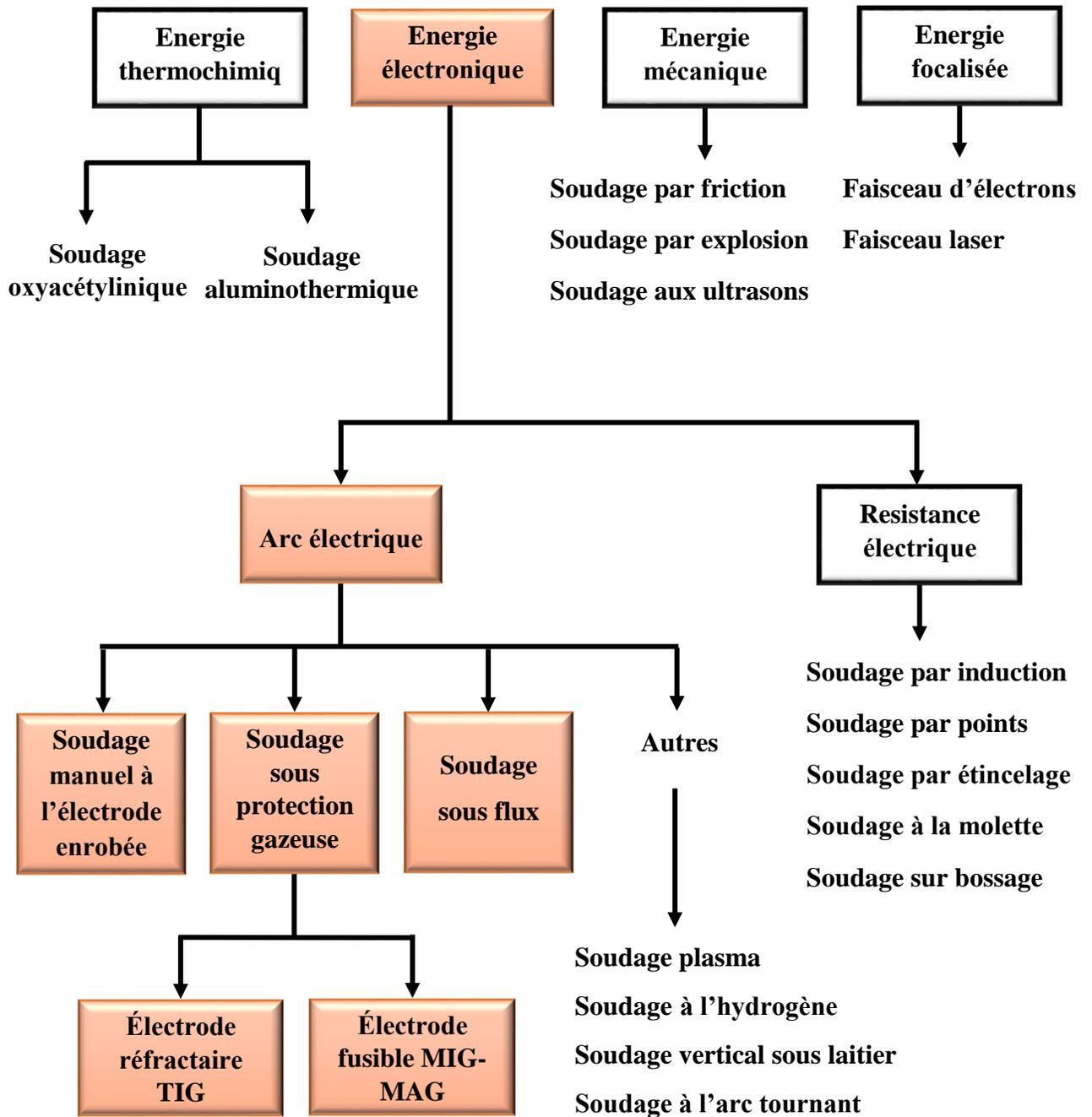


Figure II.5 : Classification des procédés de soudage en fonction d'énergie [22].

II.7. Classification des techniques de soudage [14]

Il y a trois techniques d'assemblages :

- **Le soudage** : c'est une opération qui consiste à provoquer la fusion de proche en proche des bords des pièces à assembler, généralement de natures très voisines. L'emploi d'un métal d'apport peut être utilisé.

- **Le brasage** : c'est une opération qui consiste à assembler deux pièces métalliques de natures identiques ou différentes par capillarité d'un métal d'apport dans un joint à recouvrement. Ce dernier a un point de fusion toujours inférieur à ceux des métaux de base qui ne fondent pas durant l'opération.

- **Le soudo-brasage** : technique qui se rapproche du soudage par son mode opératoire (joint réalisé de proche en proche) et du brasage (utilisation de métal d'apport dont le point de fusion est inférieur à ceux des deux métaux de base).

II.8. Soudage à l'arc électrique

C'est un procédé de soudure par fusion où la chaleur est produite par un arc électrique, formé entre le métal de base et l'électrode. Le contact puis le léger éloignement de l'électrode par rapport aux pièces provoque l'arc électrique. L'électrode est constituée d'un métal dont les caractéristiques mécaniques, chimiques et physiques sont très proches du métal des deux pièces à souder [23].

II.8.1. Définition de l'arc électrique

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur en dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques, essentiellement :

- Électriques, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs.

- Thermiques auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion [24].

II.8.2. Les procédés de soudage à l'arc électrique

II.8.2.1. Soudage sous flux en poudre (SAW)

II.8.2.1.1 Définition

Synonyme

Soudage à l'arc submergé.

Traduction

Submerged arc welding (SAW) [25].

Le soudage à l'arc sous flux en poudre constitue l'automatisation du soudage à l'électrode enrobée. Il associe un fil électrode fusible amené par un dévidoir à une protection obtenue par des vapeurs provenant d'une poudre composite. Cette dernière a des effets comparables au flux d'enrobage et est apportée directement dans la zone d'arc, mais indépendamment de l'électrode. Ce procédé est aussi appelé soudage à l'arc [29].

II.8.2.1.2. Le principe

Il s'agit d'un procédé entièrement automatisé dans lequel la tête de soudage se déplace de façon automatique le long du joint. L'électrode est constitué d'un fil nu dont l'avancement est commandé par un moteur asservi. Le flux, sous forme de particules, est déposé à la surface du joint.

L'arc électrique est immergé sous la surface du flux dont il fond une partie pour former un laitier qui se solidifie immédiatement, le flux non fondu est récupéré et peut être réutilisé pour la soudure suivante. Le soudage à l'arc sous flux en poudre nécessite généralement des intensités comprises entre (400 et 1000) Ampère.

La machine de soudage (ou les pièces à souder) se déplace, assurant la vitesse de soudage, l'amenée du fil de l'électrode se fait automatiquement.

Dans certains cas nous utilisons deux fils d'électrode alimentés soit par le même générateur (arcs jumelés), soit par des générateurs différents. Il s'en suit, pour une même énergie de soudage un dépôt de métal plus important et une vitesse de soudage plus grande (figure II.6) [33].

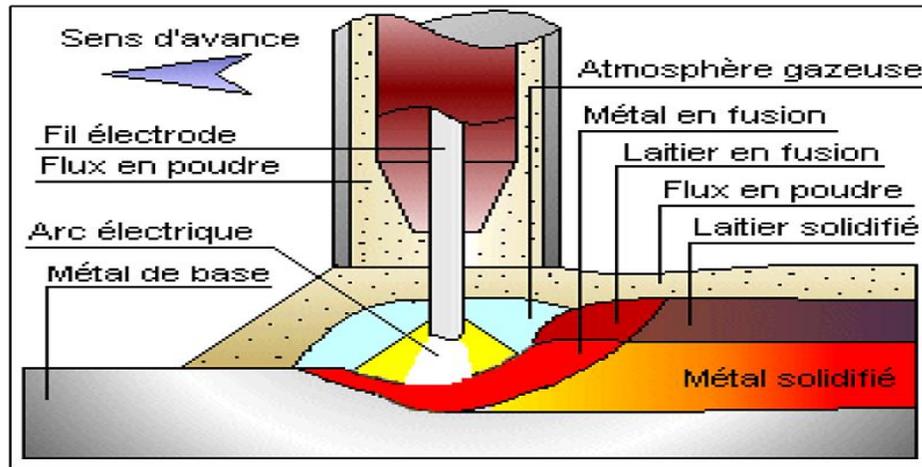


Figure II.6 : Le principe de soudage SAW [23].

II.8.2.1.3. Domaines d'applications

- Industrie légère et lourde (aciers non alliés).
- Appareils à pression (aciers faiblement alliés).
- Pipemills (tous grades d'aciers).
- Offshore (aciers faiblement alliés).
- Industrie pétrochimique (aciers inoxydables/base nickel) [34].

II.8.2.1.4. Avantages et inconvénients du procédé

✓ Les avantages

- Une énergie très élevée de soudage qui permet une pénétration importante
- Une vitesse d'exécution supérieure à 2 m/min.
- Une qualité du cordon déposé qui est de grade qualité et qui ne nécessite pas d'usinage.
- Très bonnes caractéristiques (chimique et mécanique) du joint de souder, le confort d'utilisation pour l'opérateur et l'entourage du fait que l'arc soit caché.
- Enfin le prix de revient du mètre de soudure est bas, comparativement à d'autres procédés [33].
- Un autre avantage de cet arc non visible est que l'on n'a pas à craindre les rayonnements (I.R. et U.V.), et qu'il convient donc bien aux chantiers.
- Comme le cordon de soudure est sous le flux, il y a peu ou pas de dégagement de fumées [25].

✓ **Les inconvénients**

- L'importance du bain de fusion
- Risque de fissuration à chaud, exige un respect du rapport largeur/profondeur u bain noté $(1/p)$ est de valeur $(1/p < 1.5)$.
- Le procédé ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontale (sauf un dispositif particulier), le procédé s'applique pour les aciers exclusivement.
- Le procédé ne s'applique pratiquement qu'aux soudures en position horizontal (sauf un dispositif particulier), le procédé s'applique pour les aciers exclusivement.
- Le cout de l'Equipment est assez élevé, d'où la nécessité de travaux en série pour assurer l'amortissement des matériels [33].

II.9. Effet de vitesse et courant de soudage [35]

II.9.1. Vitesse de soudage

L'influence de la vitesse de soudage peut être évaluée par son effet sur l'apport calorifique linéaire de soudage. L'apport calorifique est lié à la vitesse de soudage par la relation :

$$Q = I.U/V \dots \dots \dots \text{ II.1}$$

Avec :

Q : Apport calorifique (Kj/cm).

I : Courant (A).

U : Tension (V).

V : Vitesse de soudage (cm/min).

Une augmentation de la vitesse de soudage diminue la quantité de chaleur par unité de longueur de soudure, ce qui aboutit à une diminution de la section de la zone fondue. Cependant, plusieurs auteurs ont constaté que le rendement d'arc est supérieur quand la vitesse de soudage est relativement élevée.

Un chercheur appelé UPTAK remarque que la diminution de la vitesse de soudage favorise la pénétration. Il précise cependant, que cette diminution doit être très importante pour que l'augmentation de la pénétration puisse être obtenue.

La vitesse de soudage gère aussi la température maximale ainsi que le gradient thermique dans le bain de fusion. L'influence de la vitesse sur la température a été étudiée par Un chercheur appelé SUNDELL. En soudage d'un acier laminé à froid.

Ils ont remarqué qu'avec le même apport calorifique, l'augmentation de la vitesse de soudage diminue la température maximale et le gradient de température à la surface de la soudure. Ils ajoutent, cependant, que cette diminution peut être également due à l'élargissement de la distribution thermique de l'arc, dépendant lui-même d'un courant de soudage volontairement augmenté en vue de maintenir le même apport calorifique.

II.9.2. Courant de soudage

Le courant de soudage est un paramètre qui détermine largement la morphologie du bain de fusion. Un courant de plus en plus fort entraîne un accroissement de l'apport calorifique, ce qui favorise l'augmentation du volume du métal fondu. La force électromagnétique, dont le rôle sur la pénétration du cordon est très important, est en fait fonction de la densité de courant.

L'influence du courant de soudage sur la forme du cordon a fait l'objet de nombreuses études. Leurs résultats sont en désaccord dans la mesure où l'augmentation du courant peut augmenter ou diminuer le rapport P/l.

Deux chercheurs appelés NILES et JACKSON, en effectuant des essais de soudage avec différents courants d'arc, ont montré que l'augmentation du courant provoque un accroissement de l'aire de cordon. Et ceci est valable pour plusieurs vitesses de soudage et plusieurs types de gaz de protection.

Le chercheur SUNDELL et al ont constaté, lors du soudage AISI 8630 avec différentes valeurs du courant, que la pénétration et la largeur du cordon augmentent avec le courant. Ils ajoutent cependant que, malgré l'augmentation de la pénétration, le rapport P/L diminue lorsque le courant est élevé. Ils expliquent que cette diminution est due à l'étalement de la distribution thermique de l'arc qui favorise davantage l'accroissement de la largeur du cordon que celui de la pénétration.

Deux chercheurs appelés BURGARDT et HEIPLE ont montré également que l'accroissement du courant d'arc entraîne un accroissement de l'aire du cordon. Quant au rapport P/L, il varie selon

la présence ou non dans le métal d'éléments tensio-actifs comme le soufre, l'oxygène, l'hélium etc... Lorsque la teneur de ces éléments est faible, le rapport P/L diminue légèrement quand le courant croît. Par contre, lorsque le métal contient une quantité suffisante de ces éléments, l'augmentation du courant de soudage dans une certaine plage augmente le rapport P/L.

II.10. Les défauts de soudage

II.10.1. Le collage ou le manque de fusion

Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure (figure II.7).

Ce type de problème risque de survenir si le courant de soudage est trop faible ou si la vitesse est trop grande.

Un bon préchauffage des pièces épaisses permet de prévenir ce défaut [34].

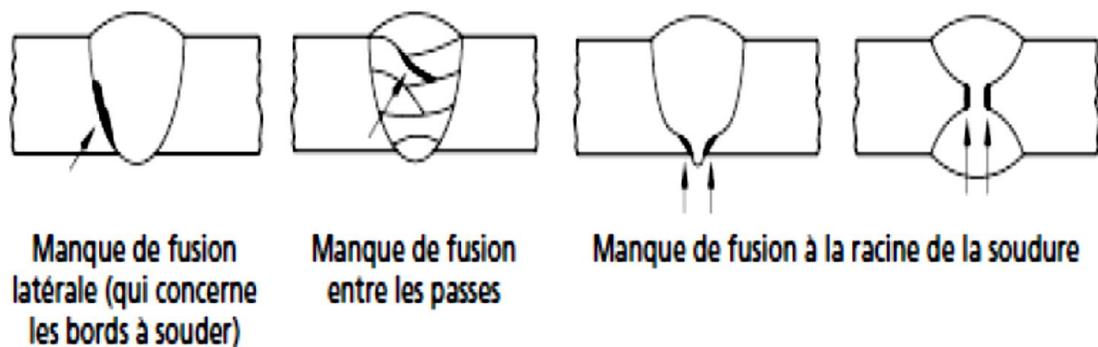


Figure II.7 : Schéma des différents collages ou manque de fusion [34].

II.10.2. Les inclusions gazeuses

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes (figure II.8) [36].

Peuvent se présenter sous forme :

- Des soufflures sphériques.
- Des soufflures vermiculaires se disposant les unes à la suite des autres [37].

Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- ✓ Utilisation d'aciers calmés.

- ✓ Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation.
- ✓ Séchage des pièces avant soudage.
- ✓ Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage [36].

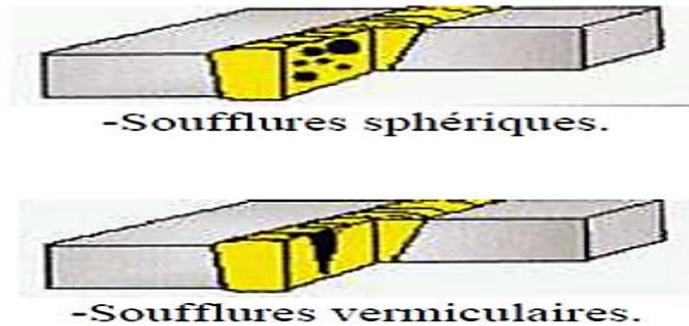


Figure II.8 : Les inclusions gazeuses [37].

II.10.3. Les inclusions solides

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures. Pour les éviter, il faut un nettoyage convenable des cordons, et un choix d'électrodes d'un diamètre correspond à l'épaisseur des pièces dessouder (figure II.9) [36].



Figure II.9 : Les inclusions solides [37].

II.10.4. Défauts de pénétration

Ils sont dus à une absence de métal à la racine des chanfreins, à cause d'utilisation d'électrode de diamètre trop important, intensité trop faible du courant de soudage, mauvaise préparation des pièces à souder. Pour les éviter, il faut un bon choix de l'intensité du courant de la vitesse d'avancement, et une préparation adaptée aux conditions de soudage (figure II.10) [36].

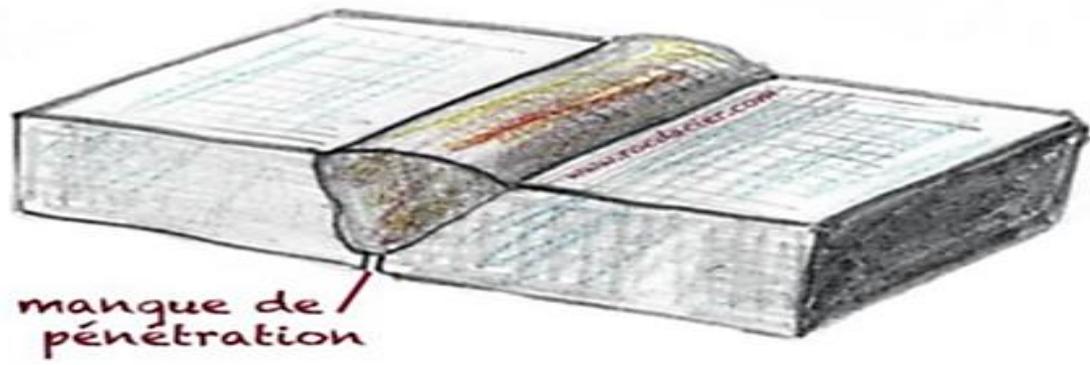


Figure II.10 : Défauts de pénétration [34].

II.10.5. Fissurations

Elles sont définies par la présence de fissures dans le métal fondu ou dans la zone affectée thermiquement (ZAT), Ou dans la zone de liaisons (figure II.11) à la jonction de la zone fondue (ZF) et du métal de base, on trouve trois types de fissuration :

- **Dans le métal de base** : l'arrachement lamellaire.
- **Dans la ZAT** : La fissuration à froid survient après que le métal est refroidi (aussi appelée fissuration différée) et la fissuration au réchauffage.
- **Dans la zone fondue** : Les fissurations à chaud, surviennent aux températures élevées sont relatifs à la solidification. Pour réduire ou écarter le risque de fissuration, le niveau de contraintes résiduelles doit être réduit au minimum en agissant sur les séquences de soudage, le taux d'hydrogène diffusible dans le bain de fusion aussi bas que possible et la durée de refroidissement (ΔT 800 - 500) suffisante pour l'obtention d'une structure favorable [36].

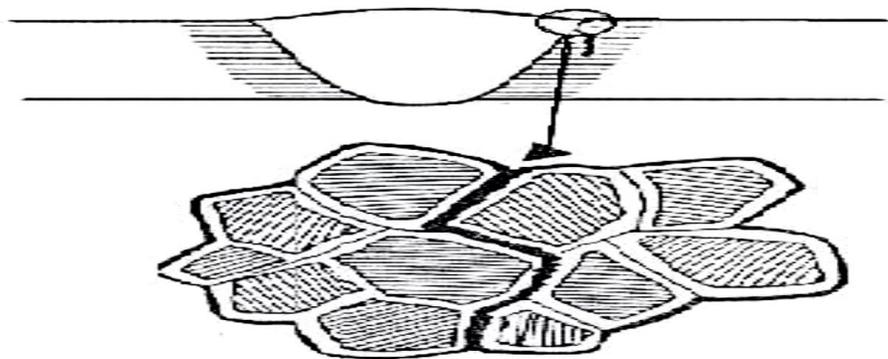


Figure II.11 : Fissuration du joint de liaison [19].

II.11. Contaminants dégagés lors des différents procédés de soudage [25]

Nous croyons important d'expliquer les sources des différents contaminants émis lors du soudage à l'arc électrique. Ces sources sont sensiblement les mêmes pour tous les procédés de soudage à l'arc.

II.11.1. Les fumées de soudage

La production d'un arc électrique provoque de violentes transformations physiques et chimiques des matières qui traversent l'arc. Le métal et l'enrobage subissent alors une fusion rapide et dans une certaine mesure, ils se vaporisent. L'oxydation des vapeurs et la réaction des composants de l'enrobage sont suivies par la condensation et l'agglomération pour aboutir à la production de fines particules de fumée.

Selon des études, le métal de base contribue peu à la production totale des fumées. Cette dernière proviendrait en grande partie de l'enrobage et du fil à souder. Donc, en connaissant la composition de ces deux paramètres, on peut prévoir qualitativement les composants éventuels de la fumée.

En milieu industriel, les oxydes métalliques retrouvés dépendront du type d'électrodes utilisées spécifiquement pour le soudage sur divers métaux de base. Le soudage sur acier doux produit plus de fumées. On retrouve surtout des oxydes de fer et de manganèse. Les travaux de soudage sur acier inoxydable produisent moins de fumées que ceux sur acier doux. On retrouve les mêmes métaux principaux, mais également du chrome (avec une forte proportion de chrome hexavalent) et du nickel. D'autres métaux principaux pourront être retrouvés lors du soudage sur d'autres métaux.

II.11.2. Les gaz de soudage

En plus des fumées, le soudage engendre des gaz qui peuvent provenir des produits de décomposition des revêtements d'électrodes, des réactions au gaz protecteur, de l'oxydation à température élevée des éléments présents dans l'arc, de la décomposition des revêtements du métal de base (peinture, dépôt plastique ou métallique, décapant) et des effets photochimiques.

Les principaux gaz produits lors du soudage et qui présentent des effets sur la santé sont l'ozone et les oxydes d'azote.

L'ozone est produit par l'action des rayons ultra-violetés émis par l'arc électrique sur l'oxygène atmosphérique. La réaction de transformation de l'oxygène en ozone se produit pour les longueurs d'onde situés entre 130 et 175 nm.

L'ozone est une molécule très instable et se décompose sous l'action de la chaleur dégagée par l'arc, de certaines poussières contenues dans les fumées de soudage et de la réaction avec les oxydes d'azote.

Les oxydes d'azote (NO , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4) sont produits par la combinaison de l'oxygène et de l'azote atmosphérique sous l'action de la chaleur dégagée par l'arc électrique. La première réaction à se produire implique la formation de NO . Après dilution dans l'air ambiant, le NO réagit avec l'oxygène pour former le NO_2 . La transformation du NO en NO_2 est suffisamment lente par contre pour que les deux contaminants soient présents en même temps dans l'air ambiant.

Partie pratique

Chapitre III :
Partie
expérimentale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons le matériau étudié et les différentes techniques expérimentales utilisées pour notre étude.

III.2. Matériaux étudiés

Pour réaliser cette étude nous avons choisi l'acier de nuance BS2 (P265NB) conforme à la norme EN 10120, l'épaisseur de matériau 2.5 ± 0.5 mm. L'acier utilisé dans l'industrie de bouteilles à gaz B13, à l'entreprise (SNS) Batna [38].

III.2.1. Compositions chimiques de l'acier étudié

La composition chimique de l'acier étudié est classée dans le tableau suivant (tableau III.1):

Tableau III.1 : Analyse chimique de l'acier [38].

Nuance d'acier		C	Si	Mn	P	S	Al	N	Nb	Ti
Désignation Symbolique	Désignation Numérique	Max	Max	Min	Max	Max	Min	Max	Max	Max
P265NB	1.0423	0.19	0.25	0.40	0.025	0.015	0.020	0.009	0.050	0.03

III.2.2. Caractérisation mécanique

Les caractéristiques mécaniques sont indiquées dans le tableau suivant (tableau III.2) :

Tableau III.2 : Caractérisation mécanique [38].

Acier		Limite supérieure d'écoulement R_{eH} min MPa	Résistance à la Traction R_m min Mpa	Allongement après rupture pour une épaisseur t de produit (en mm) $T < 3$ ($L_0 = 80$ mm) %	Température normalisation (à titre indicatif) °C
Désignation Symbolique	Désignation Numérique				
P265NB	1.0423	265	410 – 500	24	890 - 930

III.3. Métal d'apport

Le métal d'apport est fil d'acier cuivré EN756-S1 le diamètre du matériau d'apport est 1.6 mm, La composition chimique de métal d'apport est classée dans le tableau suivant (tableau III.3) :

Tableau III.3 : Compositions chimique de métal d'apport [38].

Elements	Teneur en pourcentage %	
	Minimum	Maximum
C	0,06	0,12
Mn	0,40	0,60
P	-	0,025
S	-	0,025
Si	-	0.01

III.4. Procédé de soudage (SAW (soudage automatique à arc électrique immergé sous flux solide))

Le soudage circulaire de deux embouts de la bouteille à gaz est effectué par procédé automatique, l'arc créé entre le fil et la pièce à souder est protégé par une couche de flux. Cette couche de flux protège le bain de fusion de la contamination (oxydation du bain) et concentre l'apport d'énergie dans le joint. Le flux fond, se mêle intimement au bain de fusion, avec une action des oxydantes, purifiante et enrichissante sur le métal en fusion, puis remonte à la surface du bain de métal pour former le laitier (figure III.1) [38].



Figure III.1 : Procédé de soudage SAW [38].

- **Caractéristiques d'arc**

Le diamètre des fils utilisés en procédé arc submergé est 1.6 mm, le type de courant de soudage et le courant contenu avec une polarité positive (500A, 31V) [38].

III.5. Vitesse de soudage

Pour cette étude nous avons utilisés quatre vitesses d'avance de soudage circulaire sur le diamètre extérieur de deux embouts du bouteille à gaz (300 mm) (tableau III.4) [38].

Tableau III.4 : Vitesses de soudage utilisés [38].

v1	v2	v3	v4
30 mm/min	35 mm/min	40 mm/min	45 mm/min

III.6. Présentation schématique de la bouteille à gaz et des zones de prélèvement des échantillons étudiées

La figure III.2 montre clairement la zone de prélèvement dans la bouteille de nos échantillons.

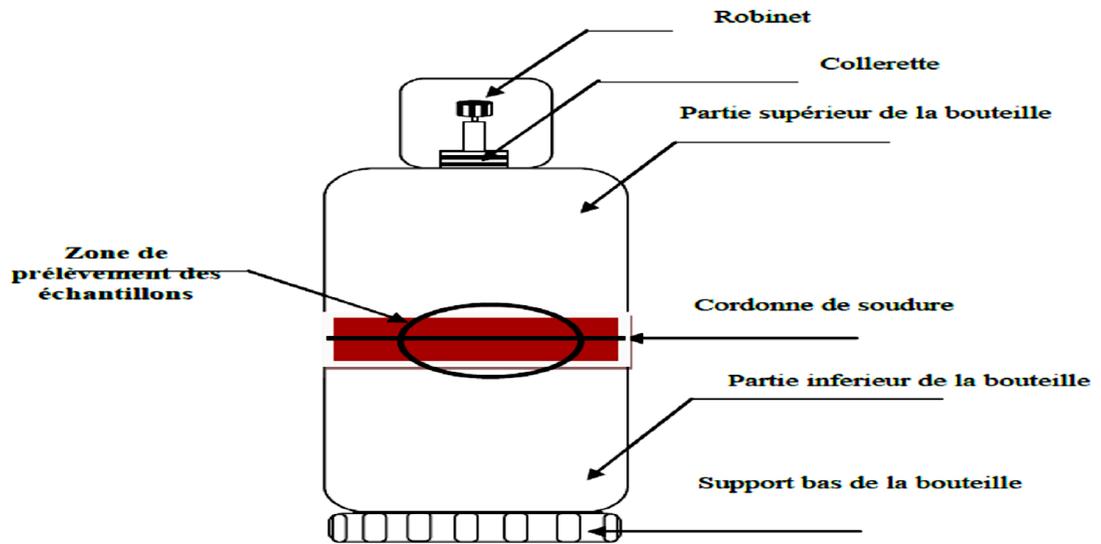


Figure III.2 : Schéma de la bouteille spécifiant la zone de prélèvement des échantillons [38].

III.7. Présentation des soudures étudiées

Les soudures étudiées le long de toutes les expérimentations engagées dans ce présent manuscrit ont été réellement réalisées selon le repère de la figure III.3 [38].

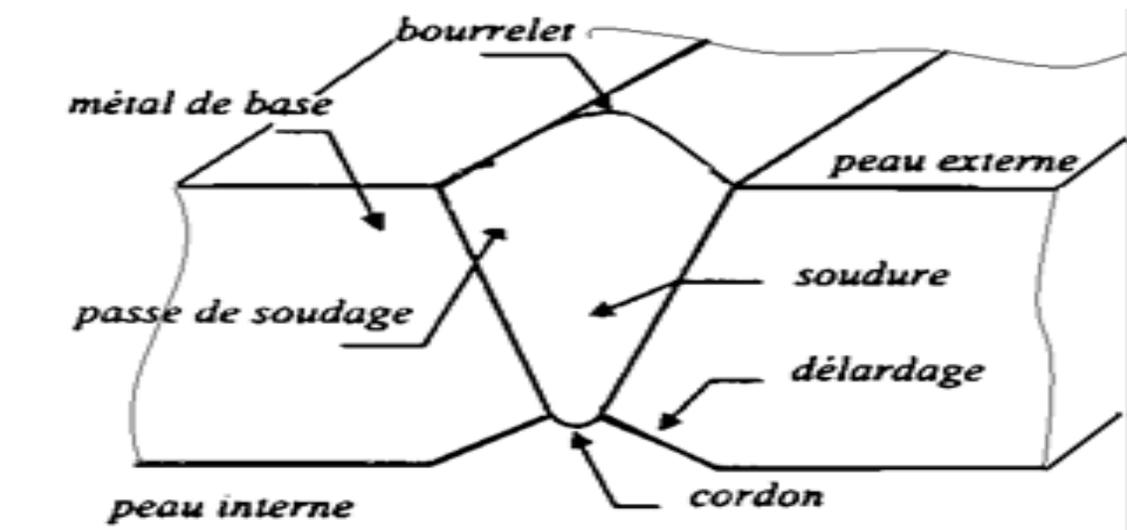


Figure III.3 : Repère de référence [38].

III.8. Prélèvement des échantillons et éprouvette

Le découpage et usinage des échantillons pour les observations métallographiques, les mesures de micro-dureté et éprouvettes des essais traction a été effectué au niveau des ateliers d'usinage de BAG Batna [38].

III.8.1. Découpage

Le découpage s'effectue à froid à l'aide d'une scie pour éviter tout échauffement qui pourrait modifier les propriétés et caractéristiques du matériau. Les échantillons sont découpés de manière transversales de longueur 5 cm (figure III.4 et 5).

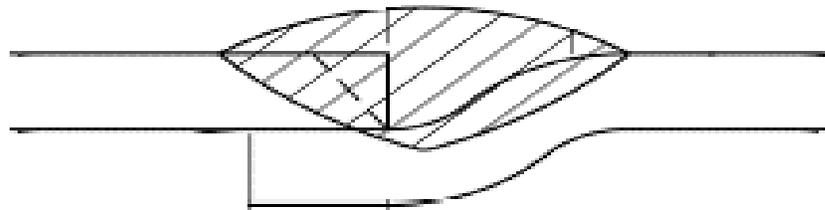


Figure III.4 : Type d'échantillon prélevé de la bouteille à gaz B11/13 [38].



Figure III.5 : les échantillons.

III.8.2. Polissage

C'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable et celui d'un miroir. Dans cette opération on utilise une polisseuse de type (MECAPOL P 310) (figure III.6), et collé les papiers abrasifs sur les disques tournants ; pour éviter le frottement d'échantillon sur les papiers abrasifs qu'il provoque l'échauffement local on jet l'eau.

Ce polissage s'effectue par l'utilisation des papiers abrasif de différents granulométrie (80, 100, 120, 180, 240, 320, 600, 800, 1000 et 1200).

La durée de polissage à chaque granulométrie est 6-8 minutes.

Si le polissage est fin on terminé la finition par un papier tissu et la pâte diamantée. et chaque fois nettoyées les échantillons par l'éthanol [11].



Figure III.6 : Polisseuse de type MECAPOL P 310.

III.8.3. L'attaque chimique

Pour les observations aux microscopes optiques. Nous avons attaqué chimiquement la surface polie par le Nital (solution alcoolique-nitrique) de composition :

- 4 ml d'acide nitrique HNO_3 .
- 96 ml d'éthanol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

La durée d'attaque varie entre 20 et 45 secondes.

Les échantillons ont ensuite lavé par l'eau distillée et bien séchés pour l'observation.

III.9. Moyens utilisés

III.9.1. Microscope optique

L'utilisation du microscope optique nous a permis de suivre l'évolution de la microstructure des échantillons. Les observations métallographiques sont effectuées sur un microscope type (UNITRON MS) (figure III.7). Cette technique nous permet d'observer les phases et de commenter leurs morphologies respectives. L'appareil utilisé est un microscope optique type (UNNITRON) avec un grandissement (X500) [38].



Figure III.7 : Microscope Optique type UNITRON MS.

III.9.2 Mesure de la résistance mécanique

Chaque acier est caractérisé par leur résistance mécanique (résistance des efforts extérieurs), suivant la nature de ces efforts on distingue : la résistance la traction, à la compression...etc.

À partir de la mesure de micro-dureté et par le même instrument (figure III.8) nous avons mesurés la résistance mécanique de notre acier [11].



Figure III.8 : Micro-duromètre de type Wolpert Wilson Instruments Micro-vickers hardness tester digital auto turret.

Chapitre IV :
Résultats et
discussions

IV.1. Introduction

Ce chapitre, sera présentée les résultats de l'étude du 'effet de variation des vitesses de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des joints soudés.

IV.2. Caractérisation Structurale

IV.2.1. La micrographie de l'acier BS2 (métal de base)

L'observation microscopique de l'acier BS2 à l'état de réception, elle montrée l'existence d'une structure en ferrite-perlitique (figure IV.1) [38].

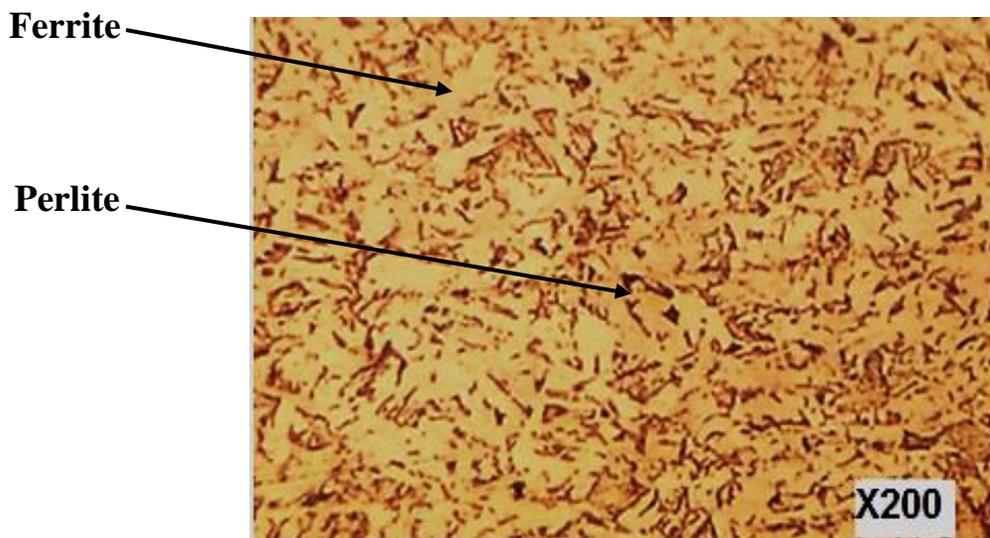


Figure IV.1 : Microstructure de la tôle d'acier BS2 a l'état de réception [38].

IV.2.2. La micrographie de métal de base (MB)

L'observation au microscope optique du métal de base (figure IV.2) a montré une structure ferrite-perlitique pour les échantillons soudés à $v= 30\text{mm/min}$, $v= 35\text{mm/min}$, $v= 40\text{mm/min}$ (figure IV.2.A, B et C), mais la micrographie de métal de base de l'échantillon soudé à $v= 45\text{mm/min}$ (figure IV.2.D) présente une microstructure de ferrite equiaxe. La matrice de base est composée de grains ferritiques. 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 est à faible pourcentage au carbone (0,064%).

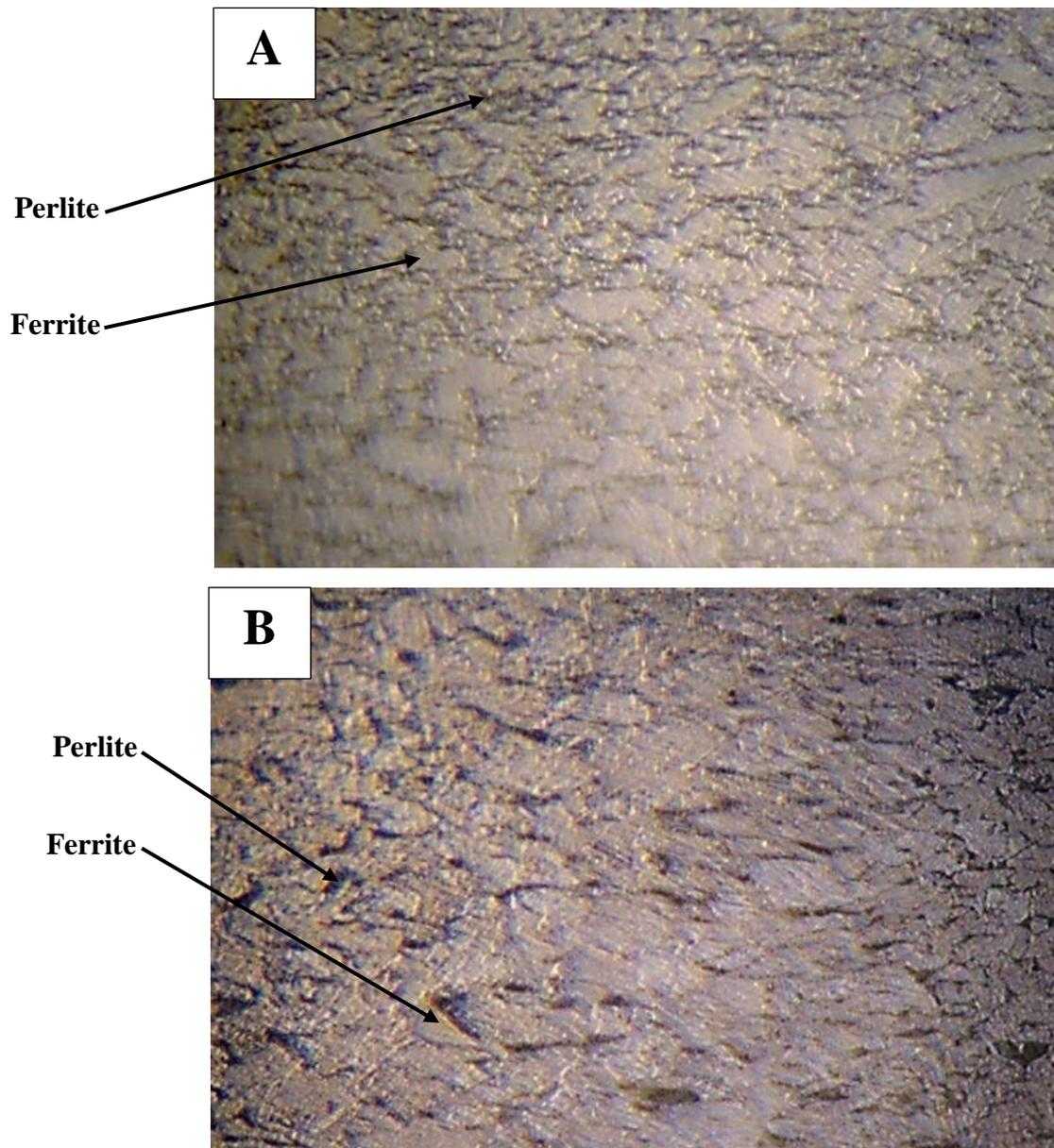


Figure IV.2 : Microstructure de métal de base de la tôle soudée (A : $v= 30\text{mm/min}$, B : $v= 35\text{mm/min}$, C : $v= 40\text{mm/min}$, D : $v= 45\text{mm/min}$) (X500).

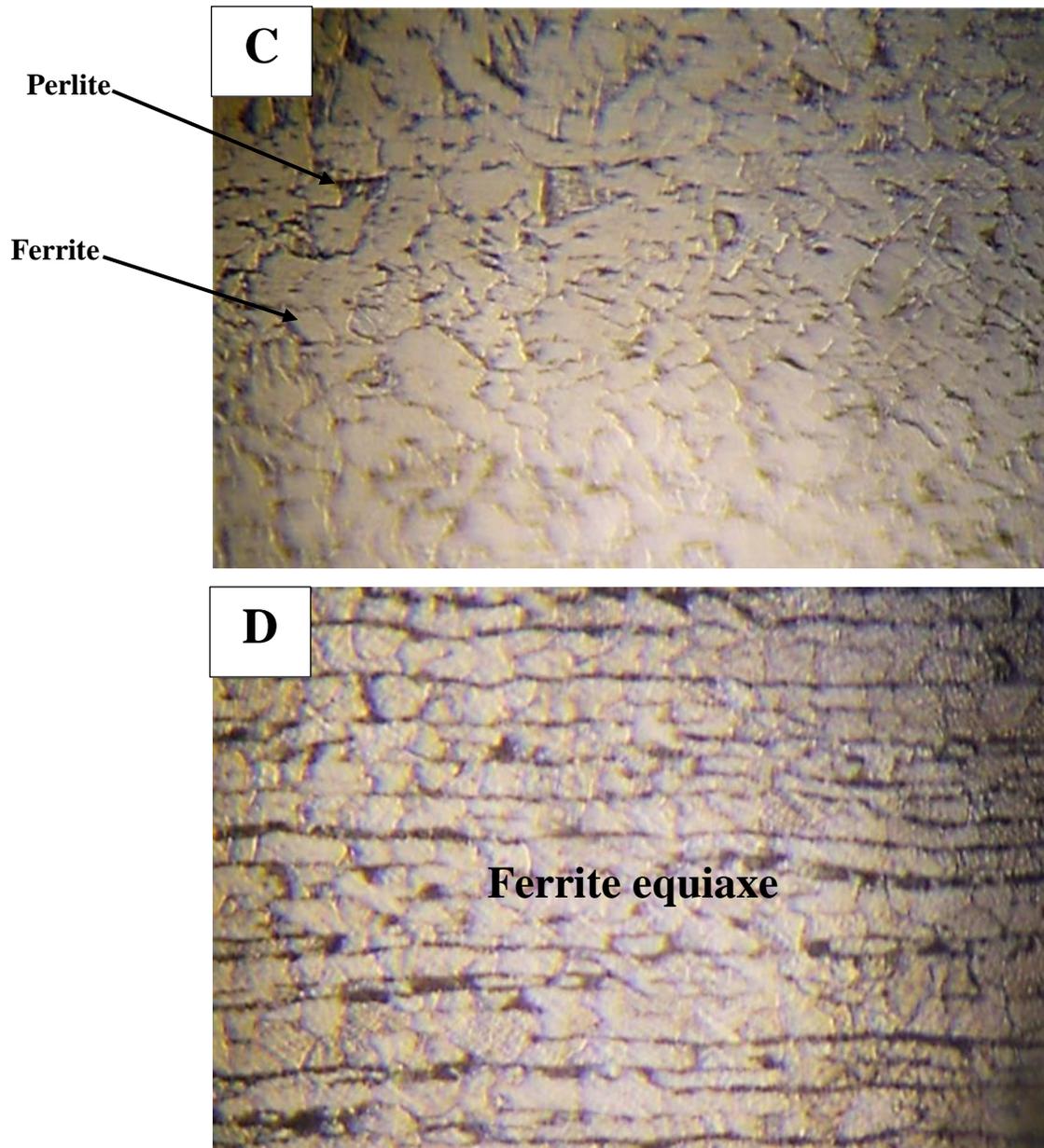


Figure IV.2 (suite) : Microstructure de métal de base de la tôle soudée (A : $v= 30\text{mm/min}$, B : $v= 35\text{mm/min}$, C : $v= 40\text{mm/min}$, D : $v= 45\text{mm/min}$) (X500).

IV.2.3. La micrographie de zone affectée thermiquement (ZAT)

Les figures IV.3 présente les microstructures de la zone affectée thermiquement de différentes vitesses de soudage utilisées (30, 35, 40 et 45 mm/min).

La figure IV.3.A, montre la présence d'une nouvelle morphologie qui est la ferrite aciculaire [39, 40]. Avec une présence des grains ferritique plats qui s'appellent (ferrite proeutectoïde) ou bien la ferrite de joint de grain (grain boundary ferrite (GBF)) [41, 40].

La figure IV.3.B et C représente une structure ferritique avec une faible proportion de perlite, on remarque aussi l'existence des gros grains et des grains fins ferritique.

La figure IV.3.D illustre la micrographie de la zone affectée thermiquement de l'échantillon soudé à $v= 45\text{mm/min}$, cette figure présente une microstructure fine de ferrite equiaxe. Les microstructures très fines présentent d'excellentes propriétés mécaniques (bonne ténacité des joints soudé) [42, 40].

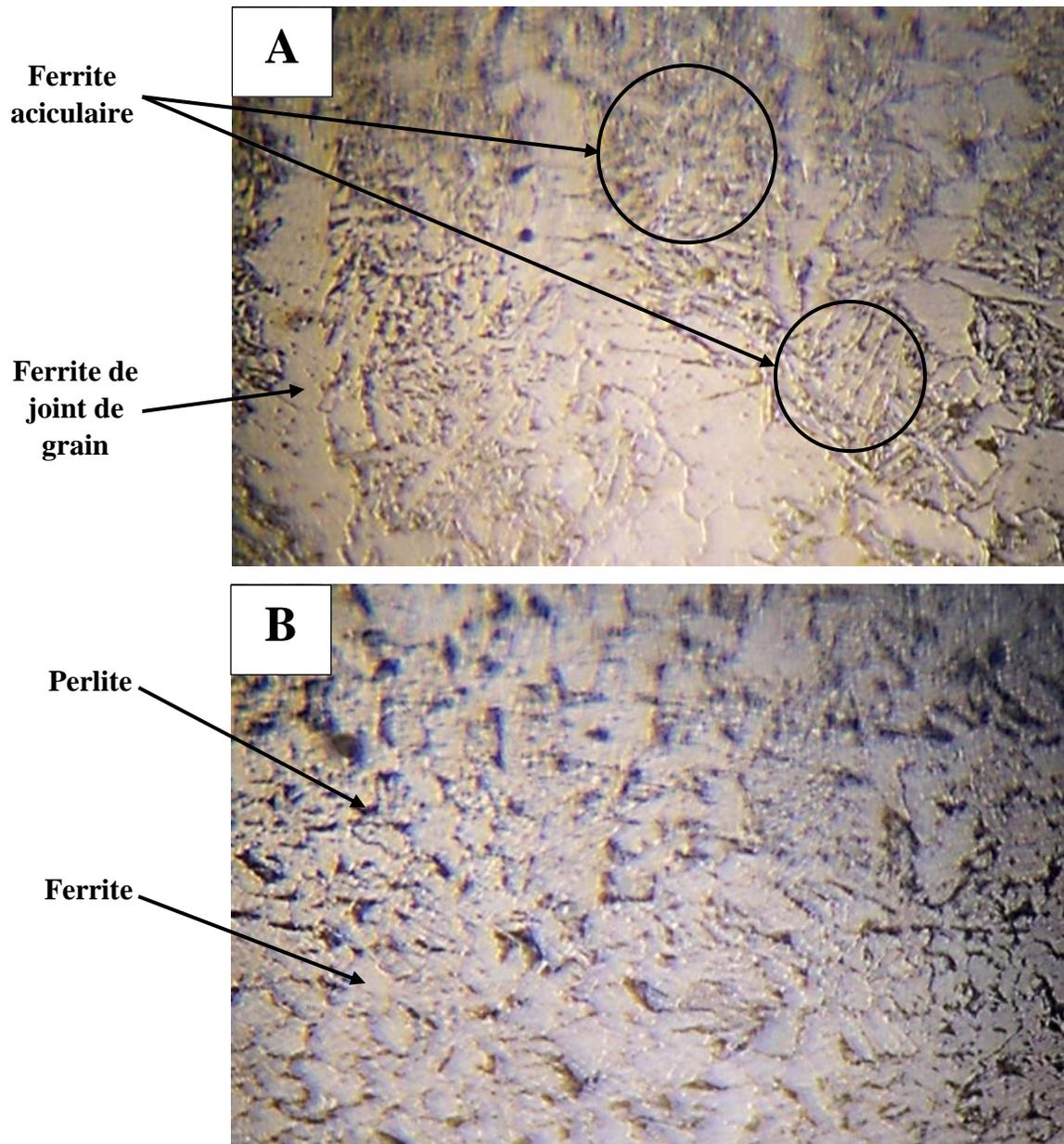


Figure IV.3 : Microstructure de zone affectée thermiquement de la tôle soudée (A : $v= 30\text{mm/min}$, B : $v= 35\text{mm/min}$, C : $v= 40\text{mm/min}$, D : $v= 45\text{mm/min}$) (X500).

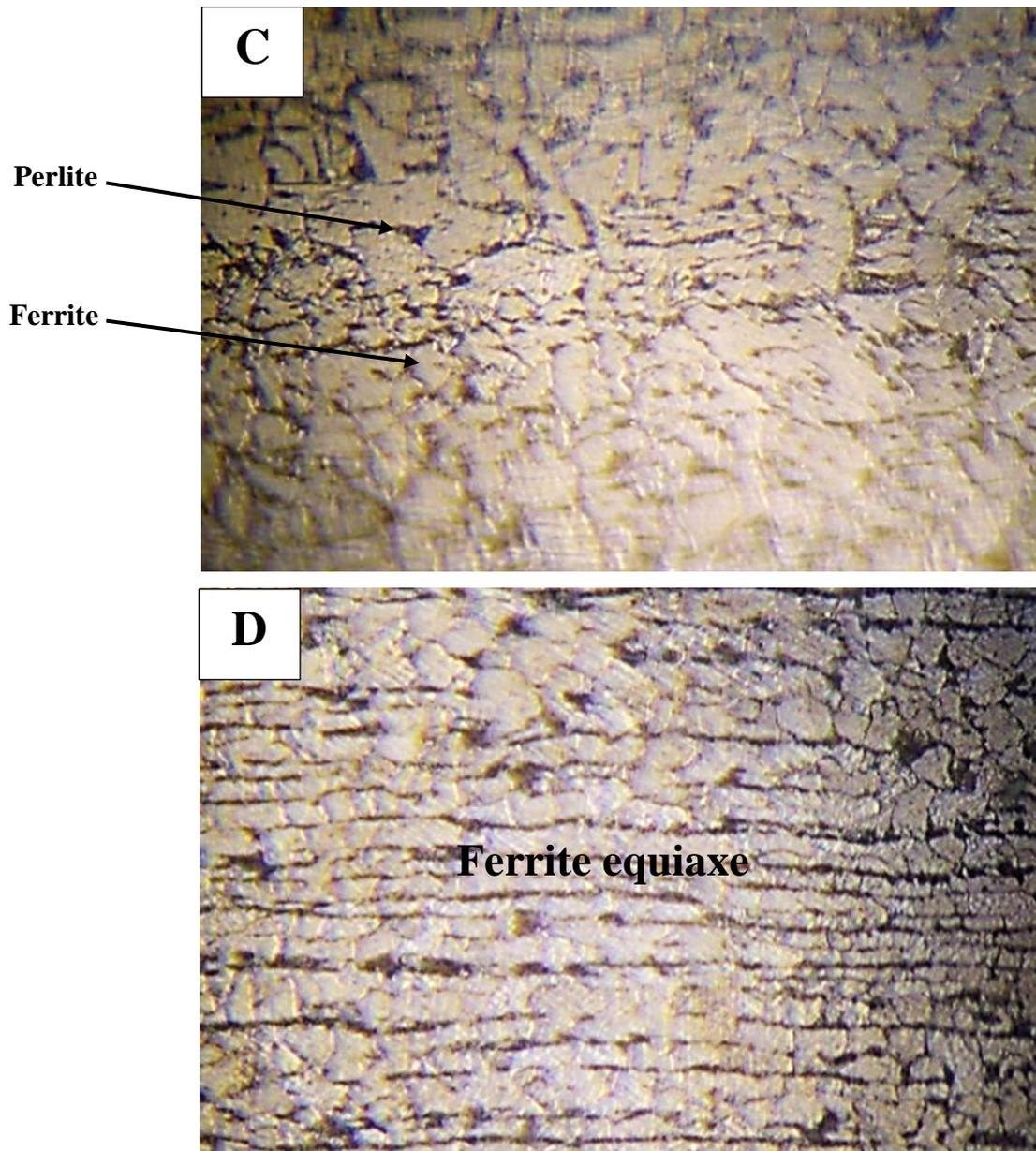


Figure IV.3 (suite) : Microstructure de zone affectée thermiquement de la tôle soudée (A : $v= 30\text{mm/min}$, B : $v= 35\text{mm/min}$, C : $v= 40\text{mm/min}$, D : $v= 45\text{mm/min}$) (X500).

IV.2.4. La micrographie de zone fondue (ZF)

On note qu'au centre du joint soudé se trouve la zone fondue. C'est elle qui est passée à l'état liquide durant l'exécution de la soudure. Dans la zone fondue, nous avons vu plusieurs microstructures nous les appelons ZF haut et milieu de la tôle originale et ZF bas de la tôle additive par le soudage.

Les microstructures des zones fondues des tôles soudées pour différentes valeurs de vitesse sont représentées ci-dessous (figure IV.4, 5 et 6).

La figure IV.4 illustre les principales microstructures du métal fondue (ZF haut)

La figure IV.4.A illustre une microstructure montre la présence de la ferrite aciculaire (FA) [43, 40]. Avec une présence des grains ferritique plats qui s'appellent (ferrite proeutectoïde ou ferrite de joint de grain et la ferrite polygonale (FP) [41, 40].

La figure IV.4.B illustre une microstructure qui la présence de la ferrite aciculaire (FA) et la ferrite proeutectoïde, avec l'apparition d'une nouvelle morphologie qui s'appelle la ferrite de widmanstätten (FW).

La figure IV.4.C a montré une structure ferrito-perlitique pour les échantillons soudés à $v=40\text{mm/min}$.

La figure IV.4.D a montré une structure de ferrite equiaxe pour les échantillons soudés à $v=45\text{mm/min}$.

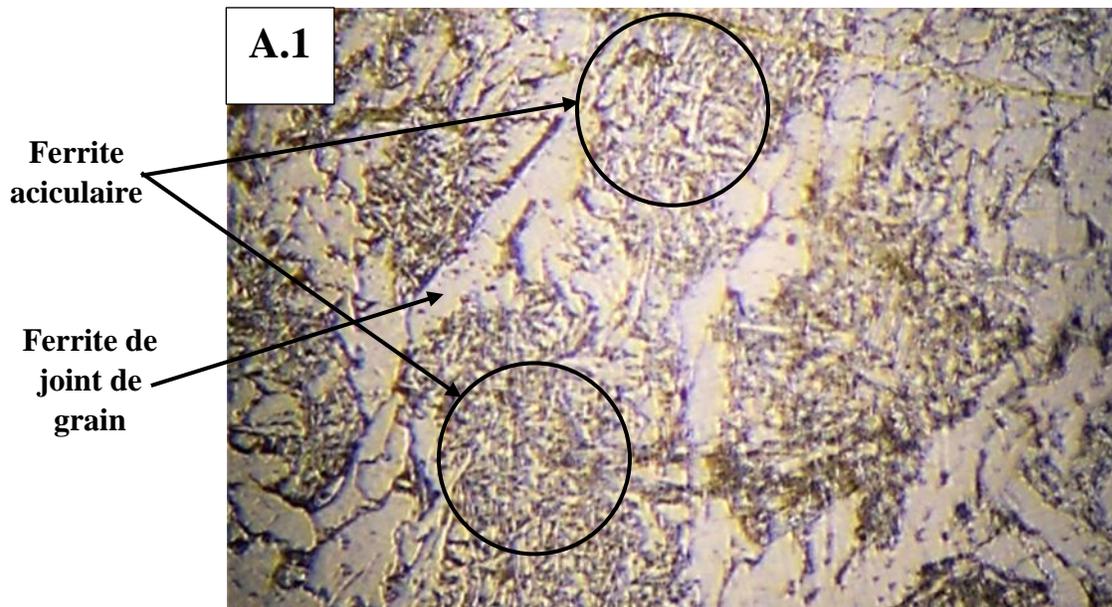


Figure IV.4 : Microstructure de la zone fondue (haut) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

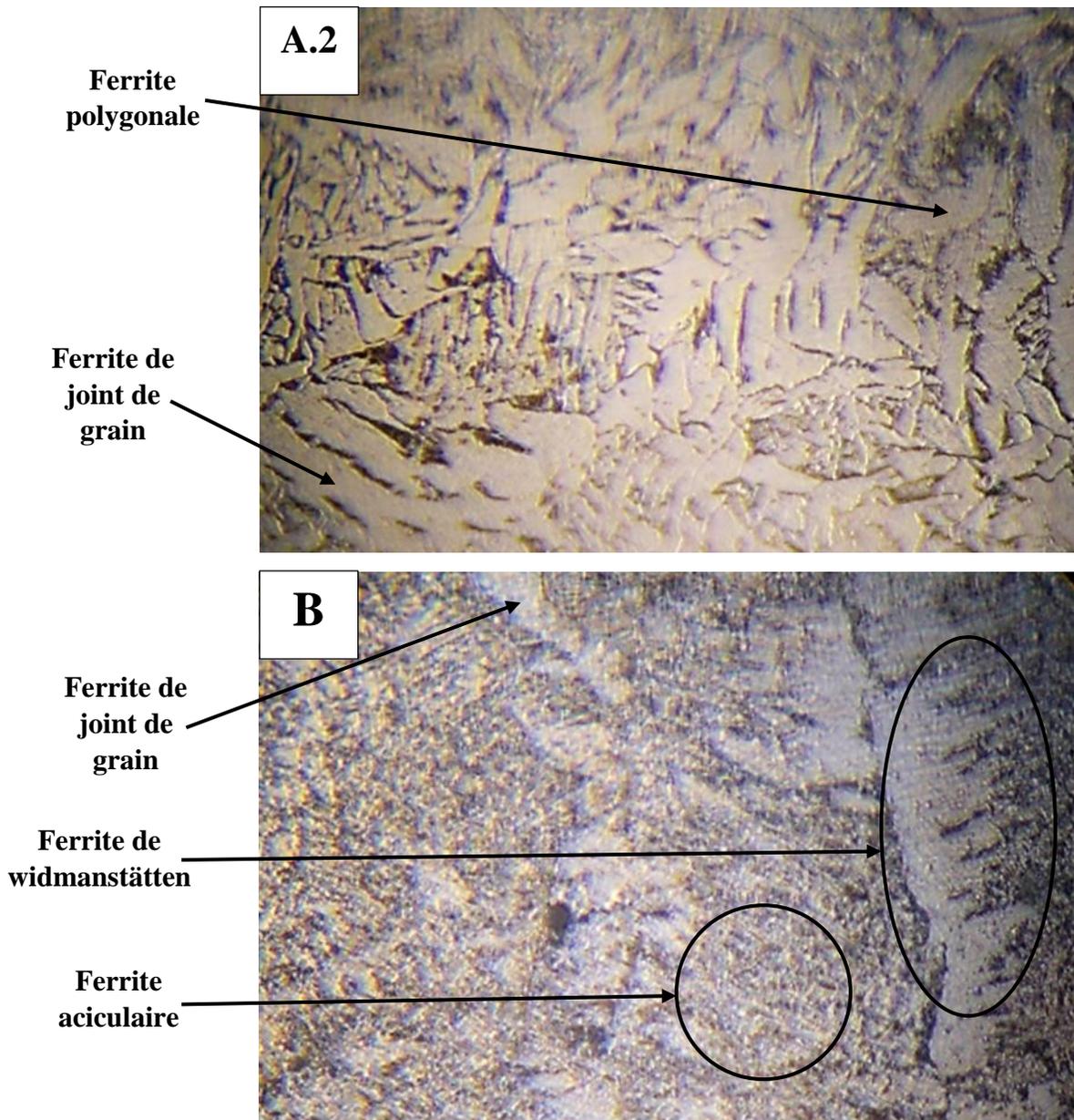


Figure IV.4 (suite) : Microstructure de la zone fondue (haut) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

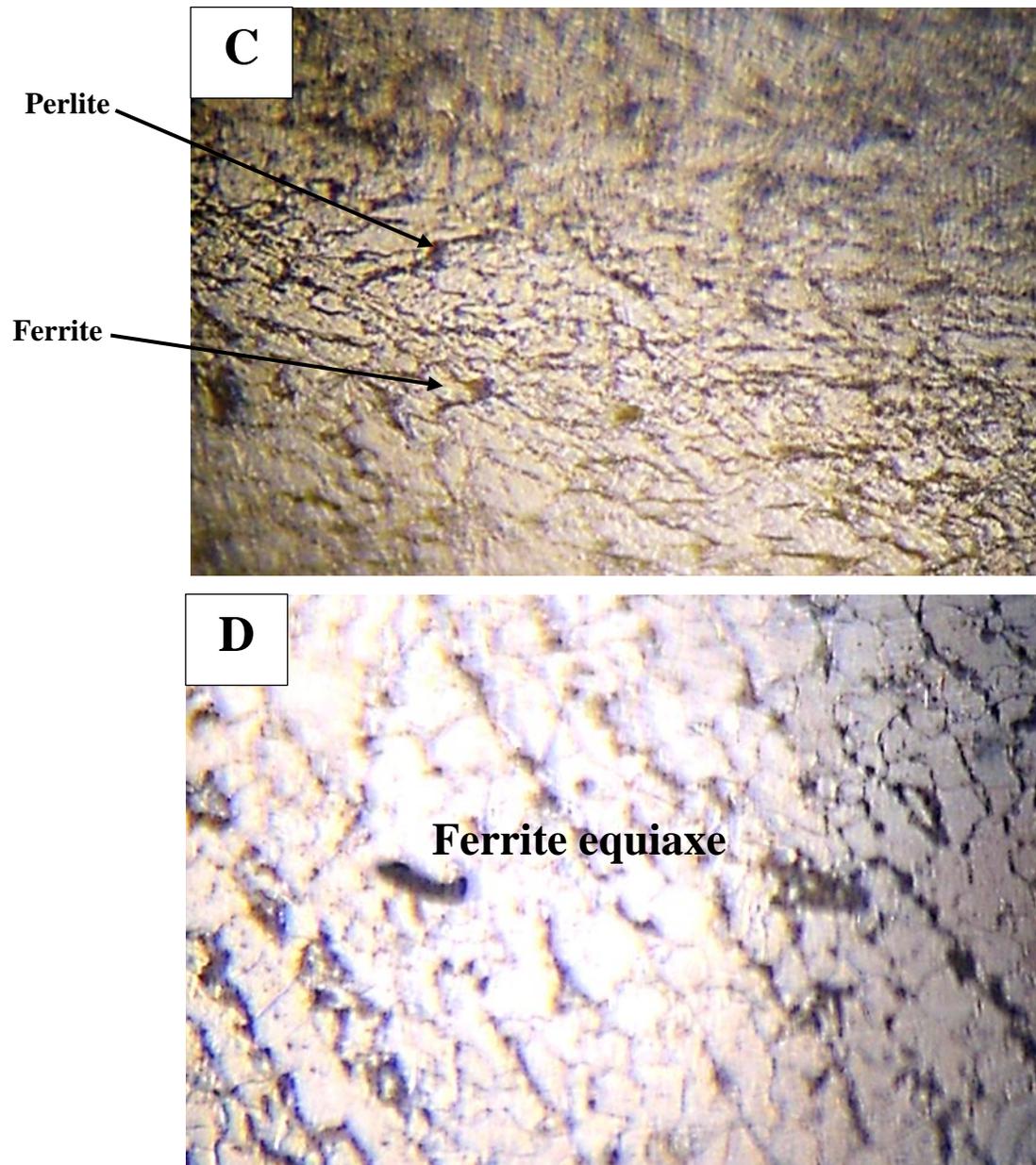


Figure IV.4 (suite) : Microstructure de la zone fondue (haut) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

La figure IV.5 illustre les principales microstructures du métal fondue (ZF milieu)

La microstructure de la zone fondue de l'échantillon soudée a vitesse 30 mm/min est représenté dans la figure IV.5.A ou la microstructure est très riche au ferrite aciculaire (FA) avec la ferrite de joint de grain, et la ferrite polygonale (FP) il est très connue que ferrite aciculaire (FA) donne des bonnes propriétés mécaniques au joint soudé.

La figure IV.5.B présente la zone fondue de l'échantillon soudée à vitesse 35 mm/mn. Cet échantillon illustre les mêmes morphologies que l'échantillon qui précède, mais avec l'apparition d'une nouvelle morphologie qui s'appelle la ferrite de widmanstätten (FW).

La figure IV.5.C illustre présente une micrographie riche en ferrite de widmanstätten (FW) avec une faible proportion de la ferrite aciculaire (FA).

La figure IV.5.D a montré une structure ferrito-perlitique pour les échantillons soudés à $v=45\text{mm/min}$.

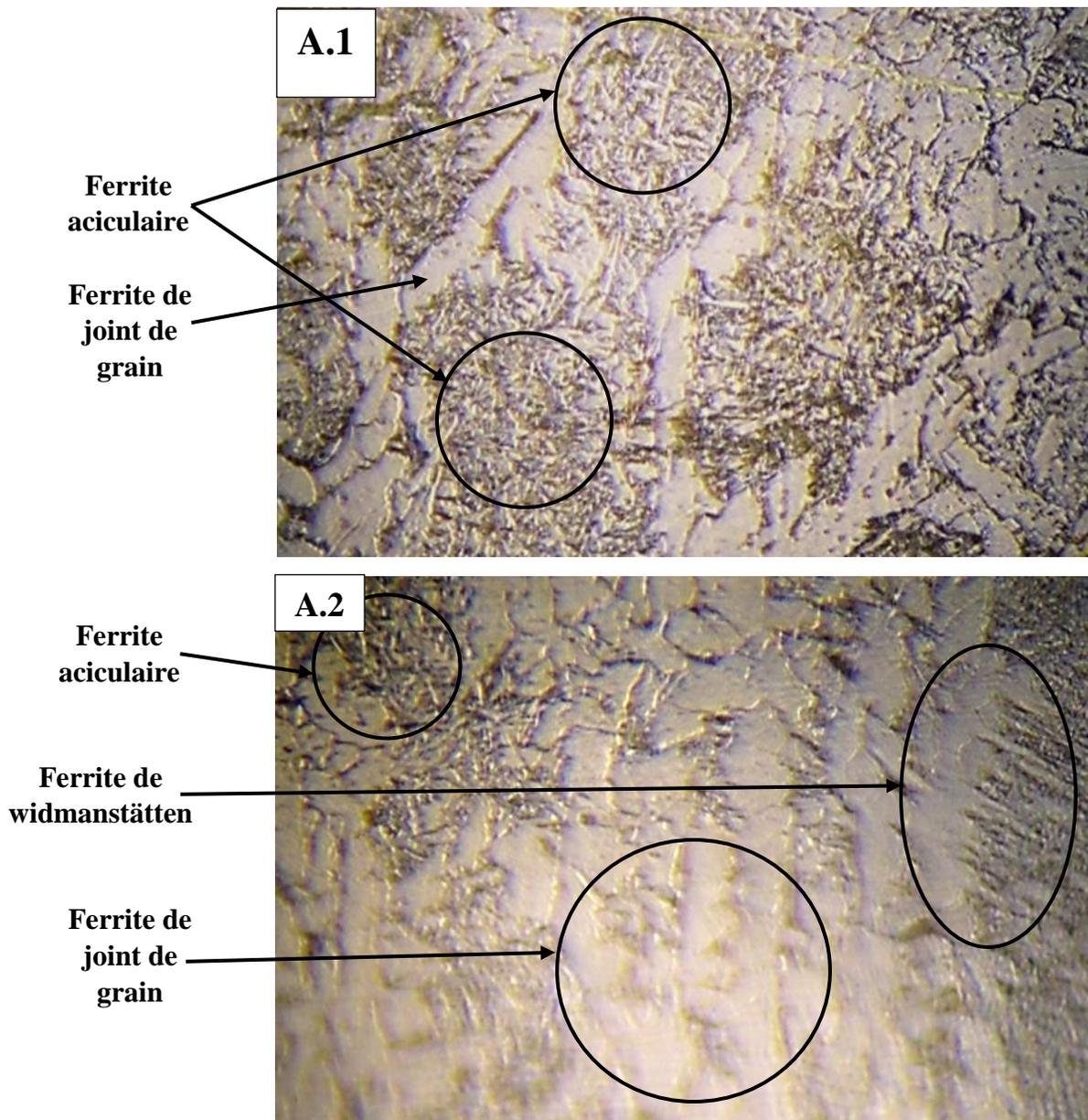


Figure IV.5 : Microstructure de la zone fondue (milieu) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

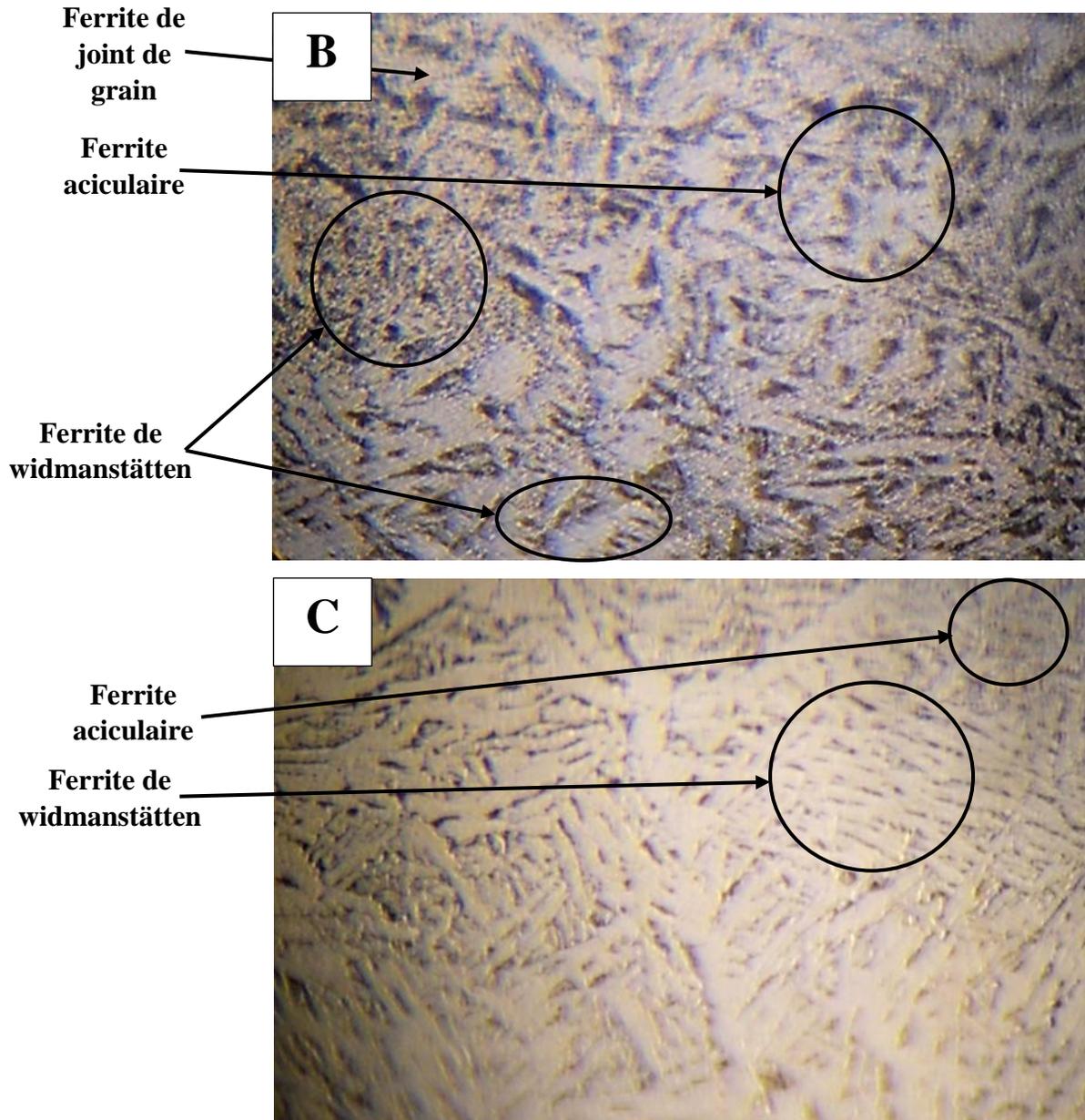


Figure IV.5 (suite) : Microstructure de la zone fondue (milieu) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

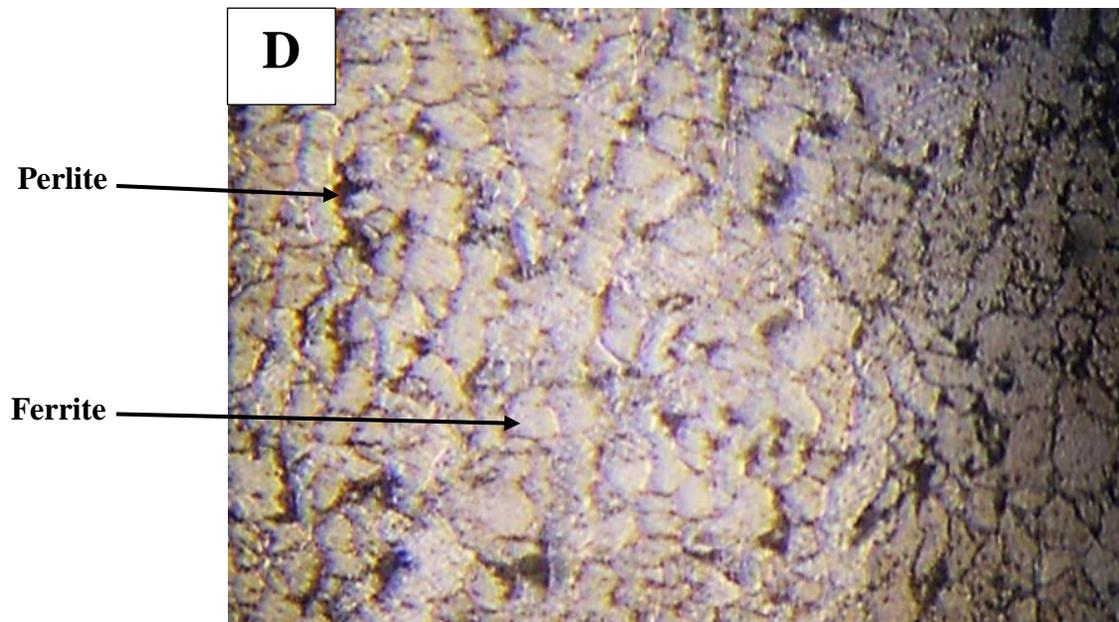


Figure IV.5 (suite) : Microstructure de la zone fondue (milieu) de la tôle soudée (A : $v=30$ mm/min, B : $v=35$ mm/min, C : $v=40$ mm/min, D : $v=45$ mm/min) (X500).

La figure IV.6 illustre les principales microstructures du métal fondue (ZF basse)

La microstructure de la zone fondue de l'échantillon soudée a vitesse 30 mm/min est représenté dans la figure IV.6.A. La figure a présente une microstructure très riche au ferrite aciculaire (FA) avec la ferrite de joint de grain, il est très connu que ferrite aciculaire (FA) donne des bonnes propriétés mécaniques au joint soudé.

La figure IV.6.B présente la zone fondue de l'échantillon soudée a vitesse 35 mm/mn. Cet échantillon illustre une microstructure de grains très fins ferritique de type equiaxe totalement.

La figure IV.6 C a montré une structure ferrito-perlitique pour les échantillons soudés à $v=40$ mm/min.

La figure IV.6.D a montré une microstructure fine de ferrite equiaxe pour les échantillons soudés à $v=45$ mm/min.

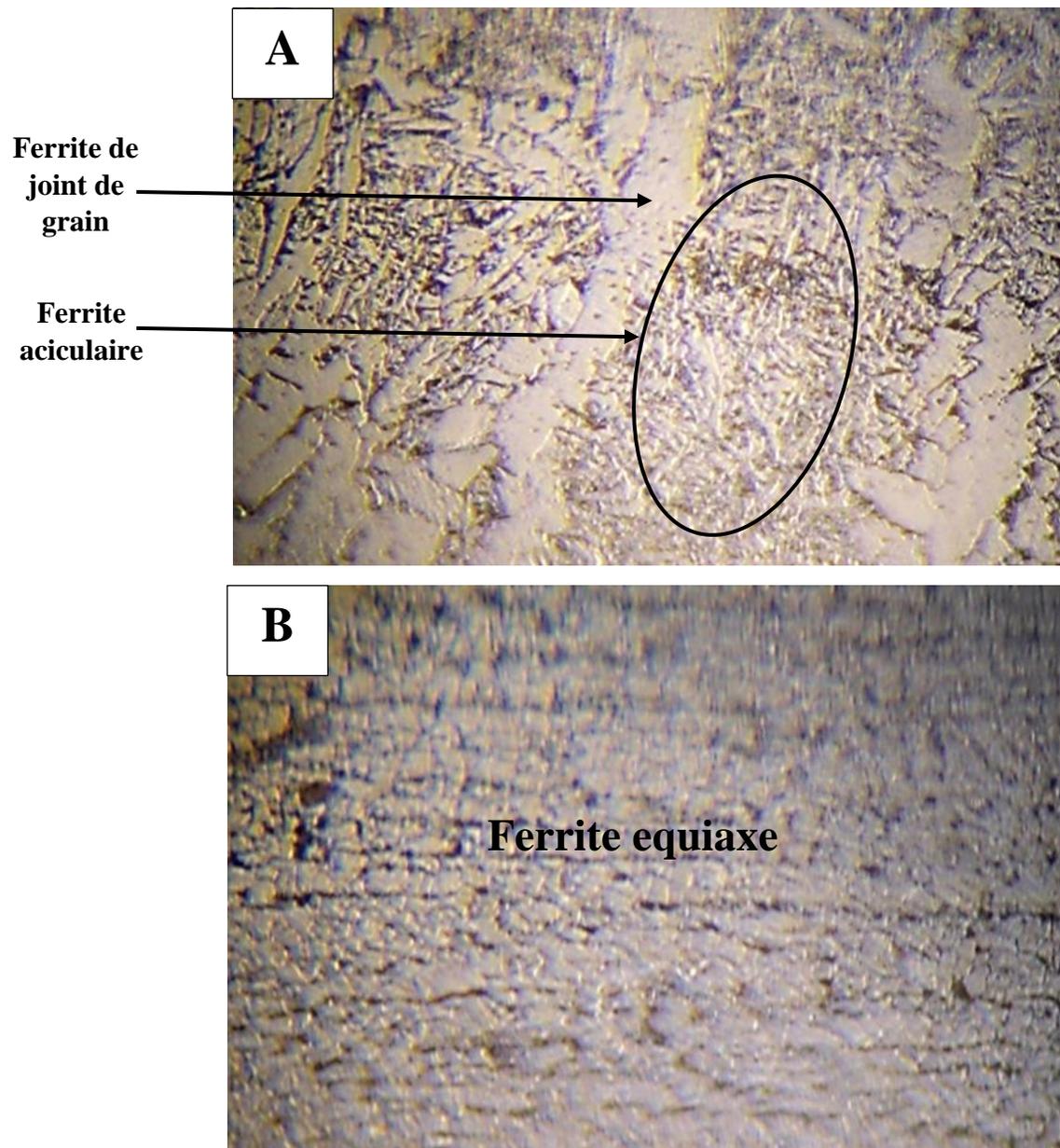


Figure IV.6 : Microstructure de la zone fondue (basse) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

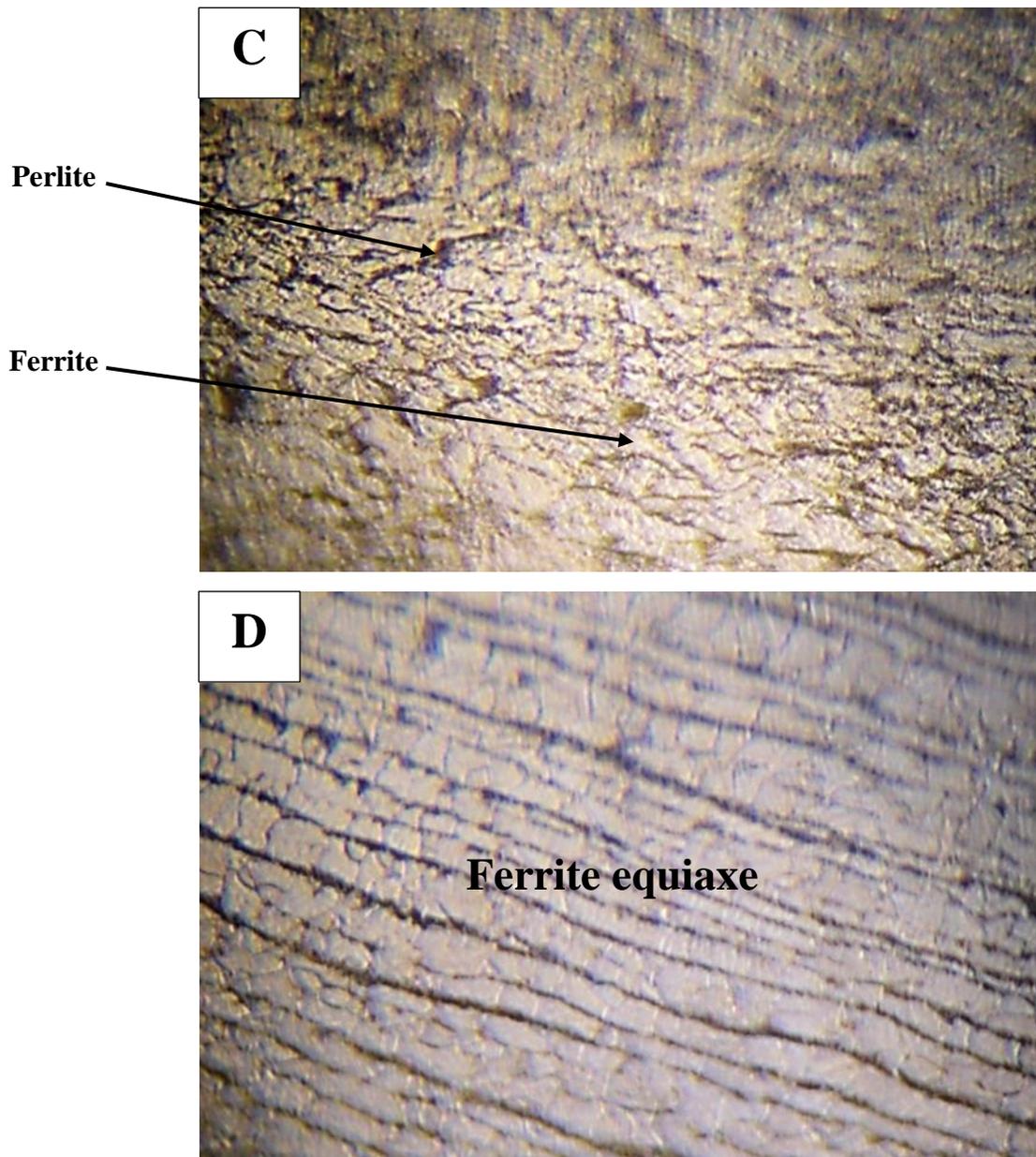


Figure IV.6 (suite) : Microstructure de la zone fondue (basse) de la tôle soudée (A : $v=30\text{mm/min}$, B : $v=35\text{mm/min}$, C : $v=40\text{mm/min}$, D : $v=45\text{mm/min}$) (X500).

IV.3. Caractérisation de micro-dureté et résistance

Les essais de la micro-dureté ont été réalisés sur les éprouvettes dans le sens de la coupe transversale (métal de base, zone affectée thermiquement, zone de fusion)

Dans la figure IV.7 et le tableau IV.1 des tôles soudées à la vitesse de 30 mm/min, 40 mm/min et 45 mm/min nous remarquons une augmentation de la dureté dans la Zone Fondue par rapport à la ZAT qui apparemment présente une diminution de la dureté à cause de l'effet de diffusivité de

chaleur de l'énergie de soudage qui se dissipe de manière progressive relativement à l'éprouvette réalisée à la vitesse de soudage de 35 mm/mn, celle-ci manifeste une diminution de la dureté dans la Zone Fondue par rapport la Zone Affecte Thermiquement qui présente une augmentation de la dureté.

Notre résultats sont en bonne agreement avec la littérature, parce que Gural et al [44] and Boumerzoug et al [45], ont été trouvés que les grandes valeurs de la micro-dureté sont mesurées au niveau de la zone fondue. La variation des propriétés de la zone soudé peut s'influer par plusieurs facteurs, comme les contraintes résiduelles après soudage. D'autre coté, la diminution de la taille, la présence des inclusions métalliques et la présence de quelques morphologies ferritique comme la ferrite de widmanstätten (FW) et la ferrite aciculaire (FA) [45, 46, 47]. La diminution de la micro-dureté peut être provoqué par réduction des défauts de réseau cristallin générés après soudage, l'augmentation de la taille des grains, et la formation de la ferrite dans la microstructure [48]. Les résultats de la résistance mécanique sont présenté dans le tableau IV.2 et les profiles IV.8. Il est connu que la résistance mécanique est inversement proportionnel avec la micro-dureté, c'est-à-dire quand la micro dureté augmente la résistance mécanique diminue et l'inverse.

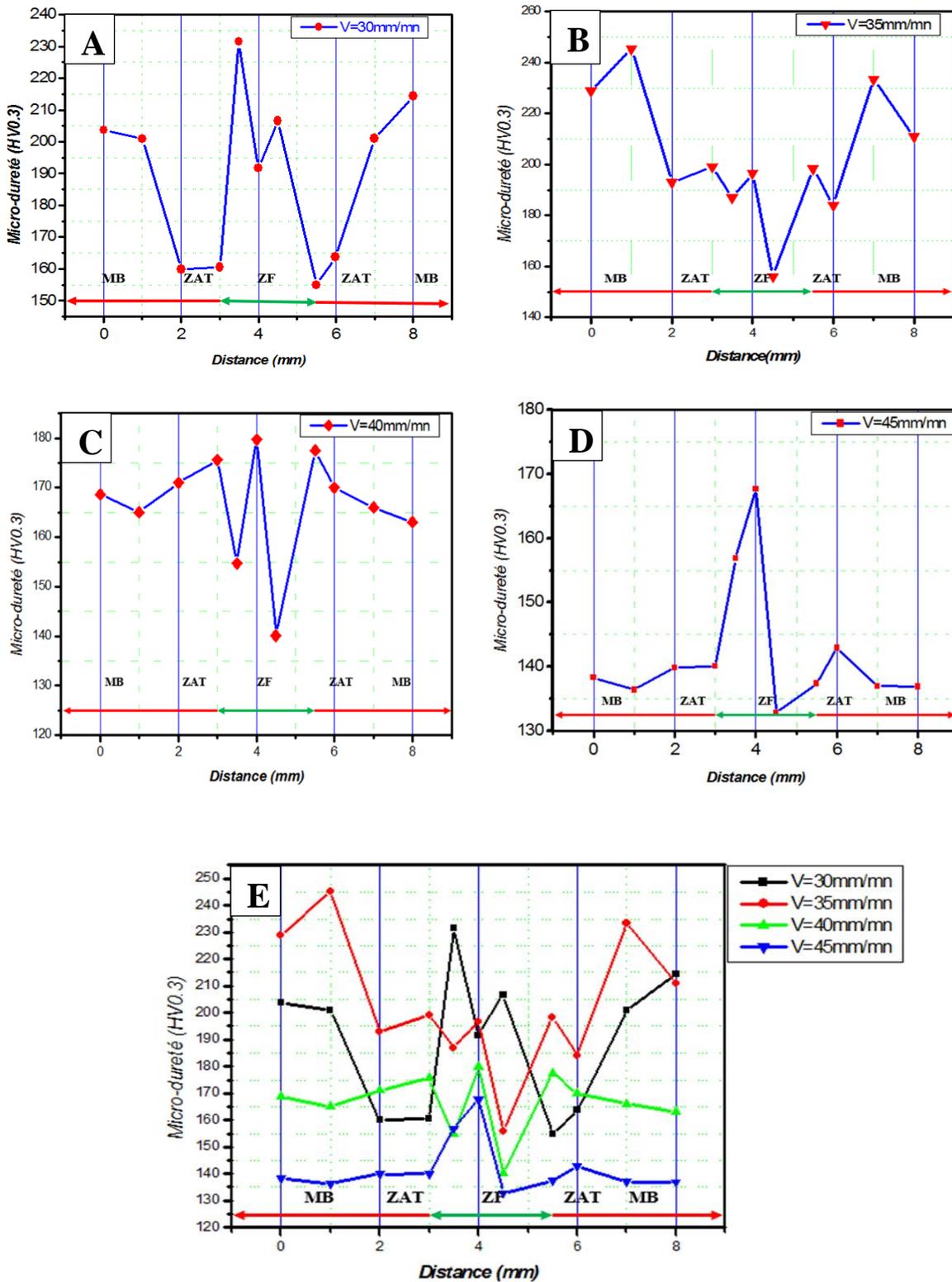


Figure IV.7 : Profils de la micro-dureté (A : v= 30mm/min, B : v= 35mm/min, C : v= 40mm/min, D : v= 45mm/min, E : la comparaison).

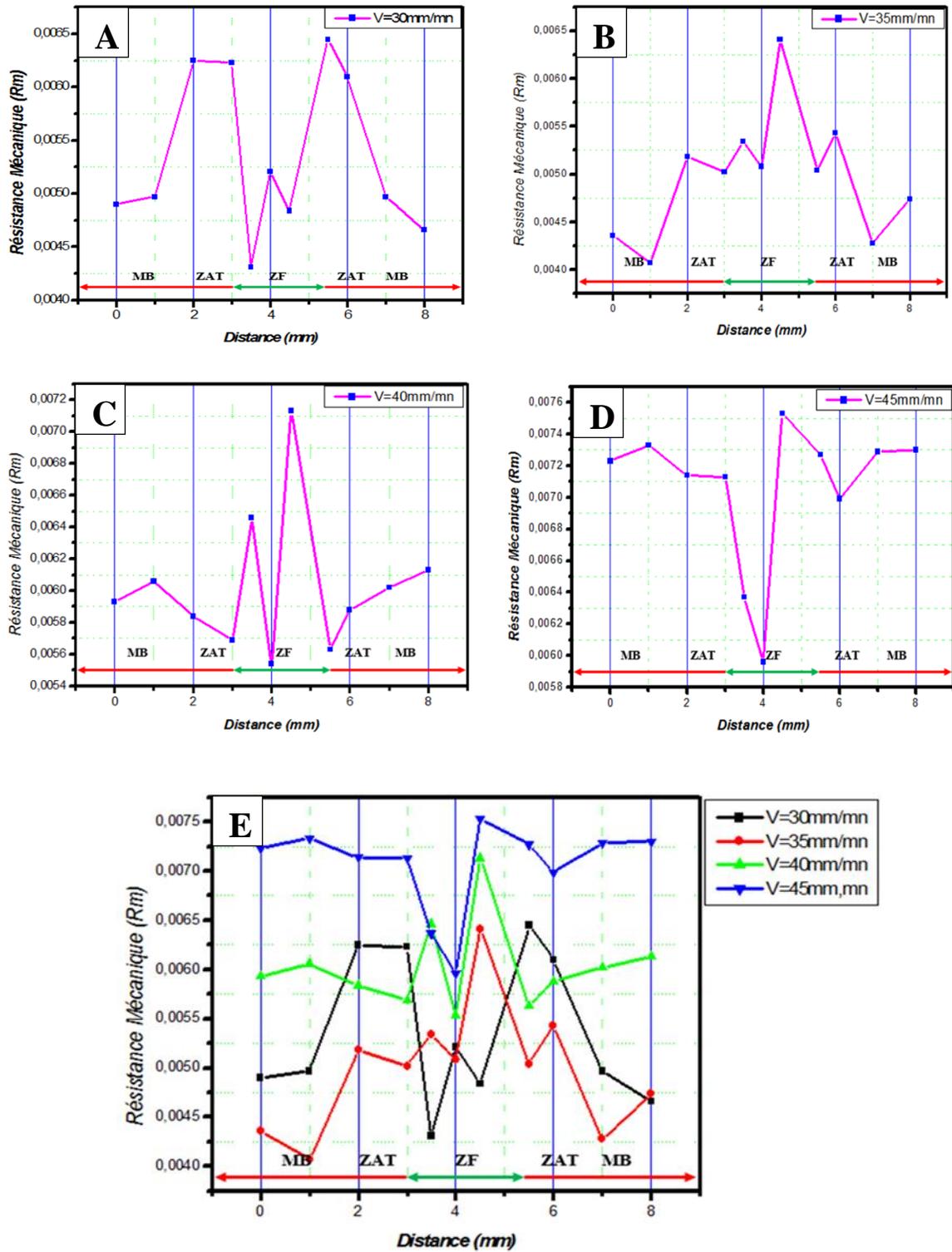


Figure IV.8 : Profils de la résistance mécanique (A : $v= 30\text{mm/min}$, B : $v= 35\text{mm/min}$, C : $v= 40\text{mm/min}$, D : $v= 45\text{mm/min}$, E : la comparaison).

Tableau IV.1 : Résultats de la micro-dureté.

Distance (mm)	v = 30 mm/min	v = 35 mm/min	v = 40 mm/min	v = 45 mm/min
0	203.7	229	168.6	138.3
1	200.9	245.3	165	136.4
2	159.9	193	171	139.9
3	160.5	199.2	175.6	140.06
3.5	231.5	187	154.7	156.9
4	191.7	196.5	179.7	167.7
4.5	206.6	156	140.1	132.8
5.5	154.9	198.3	177.5	137.4
6	163.7	184	170	142.9
7	201.02	233.5	166	137
8	214.3	210.9	163	136.9

Tableau IV.2 : Résultats de la résistance mécanique.

Distance (mm)	v = 30 mm/min	v = 35 mm/min	v = 40 mm/min	v = 45 mm/min
0	0.00490	0.00436	0.00593	0.00723
1	0.00497	0.00407	0.00606	0.00733
2	0.00625	0.00518	0.00584	0.00714
3	0.00623	0.00502	0.00569	0.00713
3.5	0.00431	0.00534	0.00646	0.00637
4	0.00521	0.00508	0.00554	0.00596
4.5	0.00484	0.00641	0.00713	0.00753
5.5	0.00645	0.00504	0.00563	0.00727
6	0.00610	0.00543	0.00588	0.00699
7	0.00497	0.00428	0.00602	0.00729
8	0.00466	0.00474	0.00613	0.00730

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet de variation de la vitesse de soudage de l'arc électrique sur les propriétés microstructurales et mécaniques de l'acier BS2.

Ainsi, suite aux multiples caractérisations expérimentales réalisées pour les différentes éprouvettes mises en évidence avec l'acier utilisé dans la fabrication de la bouteille à gaz en usage du procédé de soudage à l'arc électrique qui est l'acier BS2 dans son état avant et après soudage, ces caractérisations expérimentales sont essentiellement :

- ✓ La microscopie optique.
- ✓ La micro-dureté et la résistance mécanique.

Les principaux résultats obtenus se résument comme suit :

L'observation au microscope optique du métal de base a montré une structure ferrito-perlitique pour tous les échantillons soudés à $v= 30\text{mm/min}$, $v= 35\text{mm/min}$, $v= 40\text{mm/min}$, sauf l'échantillon soudé à $v= 45\text{mm/min}$ présente une microstructure de ferrite équiaxe.

L'observation au microscope optique de la zone affectée thermiquement de l'échantillon soudé à $v= 30\text{mm/min}$, a montré la présence d'une nouvelle morphologie qui est la ferrite aciculaire avec la présence des grains ferritiques plats qui s'appellent (ferrite proeutectoïde) ou bien la ferrite de joint de grain (grain boundary ferrite (GBF)), mais pour l'échantillon soudé à $v= 30\text{mm/min}$, illustre la micrographie de la zone affectée thermiquement de l'échantillon soudé à $v= 45\text{mm/min}$, présente une microstructure fine de ferrite équiaxe. Il est bien connu que les microstructures obtenues présentent d'excellentes propriétés mécaniques.

L'observation au microscope optique de la zone fondue (en haut) a montré une microstructure très riche en ferrite aciculaire pour tous les échantillons soudés à $v= 30\text{mm/min}$, $v= 35\text{mm/min}$, $v= 40\text{mm/min}$, sauf l'échantillon soudé à $v= 45\text{mm/min}$ présente une microstructure de ferrite équiaxe. La ferrite aciculaire donne de bonnes propriétés mécaniques aux aciers. Pour la zone fondue (en milieu) a montré les mêmes microstructures comme la zone fondue (en haut), sauf les échantillons soudés à $v= 35\text{mm/min}$, $v= 40\text{mm/min}$ sont caractérisés par l'apparition d'une nouvelle morphologie qui s'appelle la ferrite de Widmanstätten (FW). Cette microstructure donne de mauvaises propriétés mécaniques aux aciers. Pour la zone fondue (en bas) a montré une microstructure très riche en ferrite aciculaire pour les échantillons soudés à $v= 30\text{mm/min}$. Mais pour les échantillons soudés à $v= 35\text{mm/min}$, $v= 45\text{mm/min}$, présente une microstructure fine de ferrite équiaxe. Les

Conclusion générale

microstructures très fines présentent d'excellentes propriétés mécaniques (bonne ténacité des joints soudé).

Nous remarquons une augmentation de la dureté dans la Zone Fondue par rapport à la ZAT qui apparemment présente une diminution de la dureté à cause de l'effet de diffusivité de chaleur de l'énergie de soudage qui se dissipe de manière progressive relativement à l'éprouvette réalisée à la vitesse de soudage de 35 mm/mn, celle-ci manifeste une diminution de la dureté dans la Zone Fondue par rapport la Zone Affecte Thermiquement qui présente une augmentation de la dureté. Notre résultats sont en bonne agreement avec la littérature, car les grandes valeurs de la micro-dureté sont mesurées toujours au niveau de la zone fondue. La variation des propriétés de la zone soudé peut s'influer par plusieurs facteurs, comme les contraintes résiduelles après soudage. D'autre coté, la diminution de la taille, la présence des inclusions métalliques et la présence de quelques morphologies ferritique comme la ferrite de widmanstätten (FW) et la ferrite aciculaire (FA). La diminution de la micro-dureté peut être provoqué par réduction des défauts de réseau cristallin générés après soudage, l'augmentation de la taille des grains, et la formation de la ferrite dans la microstructure. Les résultats de la résistance mécanique sont inversement proportionnel avec la micro dureté, c'est-à-dire quand la micro dureté augmente la résistance mécanique diminue et l'inverse.

On conclu que les meilleurs propriétés microstructurales et mécaniques sont obtenu à vitesse de soudage 30mm/min et le 45mm/min.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] Y. Guettaf Temam. « Étude microstructurale des zones affectées thermiquement d'un acier soudé », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2016.
- [2] O. Taâmallah. « Effet de traitement mécaniques de surface (TMS) sur l'érouissage et la ténacité d'un acier », mémoire de magister, université Badji Mokhtar-Annaba 2012.
- [3] H. Bouhafis. « Contribution à l'étude des causes de dégradation des conduites du transport d'eau industrielle », mémoire de master, université Badji Mokhtar-Annaba 2016.
- [4] Y. Barkat. « Étude comparative entre deux procédés de soudage des pipelines », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2016.
- [5] M. Hantcherli « Influence d'éléments d'addition sur les transformations de la martensite revenue dans les aciers faiblement alliés », thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines-Saint Étienne 2010.
- [6] N. Guelai, F. Boutarfif. « Comportements mécaniques des aciers faiblement alliés avant et après cémentation », mémoire de master, université de Tébessa 2016.
- [7] A. Touahri, A. Chaouche. « Optimisation des paramètres des traitements thermiques d'austénitisation de l'acier de construction mécanique 25 CrMo4. Effet sur la dureté et la résistance aux chocs », mémoire de master, université Abderrahmane Mira-Bejaia 2014.
- [8] F. Bounab. « Évolutions microstructurales lors des traitements thermiques imposés à un acier faiblement allié (53MnSi4) », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2013.
- [9] M-H. Taktek. « Optimisation du traitement thermomécanique de pièces d'acier fabriquées par métallurgie des poudres », mémoire de magister, université Laval-Québec Canada 2016.
- [10] B. Guebli, H. Gassarellil. « Étude des phénomènes de corrosion liés à la détérioration des aciers pour tubes galvanisés », mémoire de master, université Arbi Tbessi-Tebessa 2016.
- [11] A. Achouri. « Caractérisations mécaniques et structurelles d'un acier de construction des pipelines (API 5LX60) », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2017.

- [12] L. Aussiel. « Méthodes de caractérisation des propriétés thermomécaniques d'un acier martensitique », mémoire de magister, école technologie supérieure-Québec 2016.
- [13] CH. Si Hadj Mohand. « Modélisation et influence des paramètres de cisaillement sur la réponse des structures », mémoire de magister, université mouloud Mammeri-Tizi Ouzou 2010.
- [14] H. Daoui « Contribution à l'étude du comportement fluide de plasma lors de l'interaction des torches à plasma avec les métaux », mémoire de magister, université Kasdi Merbah-Ouargla 2008.
- [15] K. Weman. « Procédés de soudage », Éditeur de savoirs. Dunod, Paris, 2012.
- [16] H. Mahdi, D. Hasnaoui. « Inspection et contrôle des assemblages soudés par méthodes non destructives », mémoire de master, université de M'sila 2018.
- [17] B. Mezrag. « Étude de l'influence des paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique des assemblages acier-aluminium obtenus par soudage à l'arc MIG-CMT », thèse de doctorat, université Montpellier, université Abou Beker Belkaid-Tlemcen 2015.
- [18] N. Chérifi. « Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A », thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra 2015.
- [19] H. Marouf. « Caractérisation structurale et mécanique du joint soudé de la liaison bimétallique Acier Ordinaire E36/ Acier anti-usure NAXTRA70 utilisé par l'Unité Grue de Bejaïa dans l'assemblage de la pelle chargeuse et godet d'excavation », mémoire de magister, université mouloud Mammeri-Tizi Ouzou 2012.
- [20] M. Silem, H. Saidani. « Étude de soudage par friction », mémoire de master académique, université Mohamed Boudiaf-M'sila 2017.
- [21] J-P. Planckaert. « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc », thèse de doctorat, université Henri Poincaré-Nancy 1 2008.
- [22] A. Kechaou. « Étude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage », thèse de doctorat, université de Liège 2013.

- [23] A. Akachat. « Étude de procédé de soudage semi-automatique MIG-MAG d'un joint soudé en acier ST37 », mémoire de master, université Larbi Ben M'hidi-Oum El-Bouaghi 2018.
- [24] J. Chapuis. « Une approche pour l'optimisation des opérations de soudage à l'arc », thèse de doctorat, université Montpellier II-français 2011.
- [25] M. Beausoleil, L. Binette, A. Chabot, M. Côté, A. Deschamps, C. Larose. « Fumées de soudage : facteurs contributifs et moyens de contrôle », institut national de sante publique de Québec centre de documentation Montréal-Canada 1988.
- [26] M. Beneddeb. « Étude les défauts de soudage de pipeline », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2012.
- [27] E. Le Guen. « Étude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique », thèse de doctorat, université Bretagne sud-français 2010.
- [28] H. Makhoulf. « Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers », thèse de doctorat, école nationale supérieur des Mines-Paris 2008.
- [29] M. Stadler. « Étude expérimentale du mouvement hydrodynamique d'un bain métallique et de sa production de vapeurs sur une configuration de soudage TIG », thèse de doctorat, université Toulouse 3 Paul Sabatier 2016.
- [30] A. Baari. « Étude de soudage à l'état solide « soudage par friction », étude de cas : soudage d'une TIG de forage », mémoire de master professionnel, université Kasdi Merbah-Ouargla 2018.
- [31] D. Allou. « Élaboration et caractérisation d'un Bi-Matériau AISI 4130- ENiCrFe-3 obtenu par rechargement SMAW. Application : vanne d'obturation de tête de puits de pétrole », mémoire de magister, université Houari Boumediene-Alger 2014.
- [32] M. Clergé. « Simulation numérique du soudage à l'électrode enrobée d'assemblages d'angle en acier 5355 », thèse de doctorat, université de Mines 2013.
- [33] H. Bekouche. « Optimisation de la vitesse de soudage à l'arc électrique des aciers », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2013.

[34] Y. Boumelita. « Dégradation des propriétés mécaniques du cordon de soudure d'un acier API X70 en fonction de la succession des réparations .Application dureté », mémoire de master, université Badji Mokhtar-Annaba 2017.

[35] D. Kerrich. « Contribution à l'étude du paramétrage du procédé de soudage TIG (sans métal d'apport et avec apport de fil chaud) : Application aux cas des éprouvettes tubulaires », thèse de doctorat, université de Lille 1997.

[36] S. Ben Naa. « Étude de l'effet des réparation successives sur l'état d'une construction soudée », mémoire de master, université de M'sila 2016.

[37] B. Belacel, S. Bouchria. « Contrôle des joints de soudure des pipelines par ultrasons », mémoire de master, université M'hamed Bougara-Boumerdes 2017.

[38] O. Bezziou. « Effet de la variation des vitesses de soudage à l'arc électrique sur les propriétés mécanique et la structure métallurgie de l'acier BS2 », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2018.

[39] C. DERFOUF. « Effet de la soudure sur la structure de l'acier », thèse de doctorat, université Mohamed Khider-Biskra 2011.

[40] KH. Saadi. « Étude de l'effet thermique sur une soudure d'un pipeline », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2012.

[41] K. Khalil, M. Ben Machiche. « Soudage des pipelines », mémoire de master, université Mohamed Khider-Biskra 2010.

[42] A. Bilat. « Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en acier à haute grade », thèse de doctorat, Ecole de mines-Paris 2007.

[43] Fichier ASTM. 1997.

[44] Z. Boumerzoug, C. Derfouf and T. Baudin. « Effect of welding on microstructure and mechanical properties of an industrial low carbon steel », Journal of Engineering, Vo. 2, No. 7, 2010, p. 502-506, Doi : 10.4236/eng.2010.27066.

- [45] Z. Boumerzoug, K. Digheche, V. Ji « Advanced Materials Research », Vol. 936, 2014, p. 2011-2016, DOI: 10.40 28/ www. Scientific .net /AMR .936.2011.
- [46] A. Güral, B. Bostan, A. T. Özdemir « Materials and Design », Vol. 28, 2007, No. 3, p.897-903, DOI : 10.1016/j.matdes.2005.10.005.
- [47] P. Sathiya, M. K. Mishra, B. Shanmugarajan. « Materials and Design », Vol. 33, 2012, p.203-212, DOI : 10.1016/j.matdes.2011.06.065.
- [48] S. Bordbar, M. Alizadeh, S. H. Hashemi. « Materials and Design », Vol. 45, 2013, p. 597–604, DOI.org/10.1016/j.matdes.2012.09.051.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est l'étude de la variation des vitesses de soudage à l'arc électrique sur les propriétés mécanique et la structure métallurgie de l'acier BS2 et la détermination de la vitesse optimale de soudage.

Pour ce faire nous avons utilisé des techniques expérimentales : la micro-dureté, la résistance mécanique et le microscope optique.

Tous les essais effectués sur les échantillons ont donné les résultats suivants :

- ✓ Le meilleurs propriétés microstructurales et mécaniques sont obtenues à vitesse de soudage 30 mm/min et le 45 mm/min.

Mots clés : vitesses de soudage, Arc électrique, La structure métallurgie, Acier BS2.

تلخيص

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير تباين سرعات اللحام بالقوس الكهربائي على الخواص الميكانيكية والبنية المعدنية للفولاذ BS2 وتحديد سرعة اللحام المثالي. من أجل هذا استخدمنا التقنيات التجريبية: قياس درجة الصلادة، المقاومة الميكانيكية والمجهر الضوئي. أعطت جميع الاختبارات التي أجريت على العينات النتائج التالية:

✓ يتم الحصول على أفضل الخصائص المجهرية والميكانيكية بسرعة لحام تبلغ 30 ملم / دقيقة و45 ملم/ دقيقة.

الكلمات المفتاحية: سرعة اللحام، القوس الكهربائي، البنية المعدنية، الفولاذ BS2