

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE de Technologie

DEPARTEMENT : Génie Mécanique

N°



DOMAINE : science et technologie

FILIERE : Génie Mécanique

OPTION : fabrication mécanique
et productive

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: BOUCHAREB Elyamine

LALMI Khalil

Intitulé

**INVESTIGATION DES MICROSTRUCTURES
D'ACIER SOUDÉ À L'ARC**

**APPLICATIONS AUX CHASSIS - ACI – DE
M'SILA**

Soutenu devant le jury composé de:

Zammamouche R	Université de M'sila	Président
Makri H	Université de M'sila	Encadreur
Moussaoui N	Université de M'sila	Examineur
Daoudari A	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017 /2018

Résumé

L'objectif de notre travail était de réaliser une étude par prospection microstructurale des joints soudés au niveau du complexe ACI M'sila. Dans cette perspective nous avons réalisé plusieurs échantillons à partir de produits plats de différentes épaisseurs tous utilisés dans la construction de châssis de semi-remorques ACI. Nous avons varié les conditions de soudage par la variation de l'intensité du courant et le potentiel.

Les éprouvettes sont des échantillons soudés puis découpés depuis des zones différentes (métal de base, au milieu du joint, à proximité du joint) ensuite les échantillons sont enrobés puis préparés par polissage et traités pour subir l'analyse métallographique, et une mesure de micro dureté. L'observation microstructurale a été menée par microscopie optique, et la caractérisation mécanique par micro dureté Vickers, les essais ont été faits de façon à balayer la structure en partant du milieu du joint allant vers le métal de base.

Les résultats de l'observation microscopique de la microstructure révèle la présence de deux zones affectées thermiquement voisines limitées d'un côté par le métal fondu et de l'autre par le métal de base, Les profils de micro dureté mesurés montrent une évolution sensible de la micro dureté.

DEDICACE

Nous avons l'honneur de dédie ce modeste travail à nos

très chères parents

*A mes amis **bouterra seyf eddine**, et*

Kasmi Abdelhak

*A nos pères qui nous ont aidés moralement et
matériellement pour ses conseils et encouragement.*

A tous nos amis de la promotion.

REMERCIEMENTES

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, notre créateur de m'avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Premièrement et avant tout, nous tenons à remercier notre directeur de recherche, **Dr : Makri Hocine** pour ses conseils et ses directives. C'est grâce à ses conseils, encouragement et a son soutien moral et financier que nous avons pu mener à bien ce travail de recherche.

Nous n'oublierions jamais de remercier assez tous les enseignants du département de mécanique de l'université de M'sila d'avoir contribué à notre formation, ainsi que à toute l'équipe administrative du département de génie mécanique

Nous tenons également à remercier tous nos amis qui nous ont aidés dans notre travail.

Enfin, un grand merci à toute ma famille pour leur grand soutien.

SOMMAIRE

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Introduction générale

CHAPITRE I : LE SOUDAGE METHODES ET MOYENS.....05

I-Introduction.....06

I.1. Bref historique du soudage.....06

I.2. Définitions et classification des procédés de soudage07

I.3. Soudage à l'arc électrique10

I.3.1. Les procédés de soudage à l'arc.....10

CHAPITRE II : ASPECTS THERMIQUES ET METALLURGIQUE DU SOUDAGE..... 13

II-1. Aspects thermiques du soudage.....14

II-1-1 Cycle et répartition thermique lors du soudage multipasse14

II-1-2 Paramètres thermiques et métallurgiques de soudage15

II-1-2-1 Définition de la zone affectée par le cycle thermique de soudage.. 16

II-1-2-2 Transformations dans la Z.A.T..... 17

II-1-2-3 Microstructures de la ZAT.....20

II-1-3 Points à retenir21

II-2 Aspects métallurgiques du soudage.....	21
II.2.1 Elaboration de la zone fondue.....	24
II.2.1.1 Comportement physico-chimique des éléments présents.....	24
II.2.1.2 Solidification de la zone fondue.....	25
II.2.1.3 Transformation en phase solide au cours du soudage (échauffement)....	29
II.2.1.4 Transformation en phase solide au cours du soudage (refroidissement)...	31
II.2.1.5 Particularités de la transformation perlitiques en soudage	33
II.2.1.6 Soudure en plusieurs passes.....	35
II.2.2 A retenir.....	35

CHAPITRE III : APERCU TECHNOLOGIQUE DU SOUDAGE

MIG/MAG.....	38
III.1 présentation du procédé	39
III.2 L'arc électrique.....	41
III.3 Les principaux modes de transfert de métal en MIG.....	42
III.4 Les paramètres opératoires du soudage MIG/MAG.....	45
III.5 synthèse de quelque travail relatif au soudage MIG-MAG	45

Chapitre IV: Procédure expérimentale..... 47

IV.1. Introduction	48
IV.2- Les Matériaux utilisés.....	49
IV.2.1. Métal de base.....	49
IV.2.2. Composition chimique.....	50
IV.2.3. Caractéristiques mécaniques.....	50

IV.3. Métal d'apport.....	50
IV.3.1. Compositions chimiques.....	50
IV.3.2. Caractéristiques mécaniques.....	50
IV.4. Matériel de soudage.....	50
IV.4.1. Paramètres de soudage.....	53
IV.5. Préparation des éprouvettes	56
IV.5.1. Caractérisation microstructurale	57
IV.5.1.1. Préparation des échantillons	57
IV.5.1.2 Polissage	57
IV.6 Observation microscopique.....	60
IV.6.1 Examen macrographique	60
IV.6.2 Examen micrographique	60

Chapitre V : Résultats et interprétations..... 64

V- Etude microstructurale	65
V-1 La Macrostructure	65
V-2 La Microstructure	66
V-3 Discussion.....	70

Conclusion général..... 72

Références bibliographiques

LISTE DES FIGURES

- **Figure (I.1)** : exemple d'assemblage soudé..... 6
- **Figure (I.2)** : Cordon de soudure..... 8
- **Figure (I.3)** : Classification des procédés de soudage..... 10
- **Figure (I.4)** : Représentation schématique des procédés TIG 11
- **Figure (I.5)** : Représentation schématique des procédés MIG/MAG... 12
- **Figure (I.6)** : soudage à arc submergé sous flux solide..... 12
- **Figure (II.1)** : Modification de l'action thermique en fonction du nombre de passes exécutées..... 14
- **Figure (II.2)** : Schéma du cycle thermique de la zone avoisinant la soudure lors de dépôts en passes multiples par petits cordons15
- **Figure (II.3)** : Cycle thermique de soudage et principaux paramètres de refroidissement..... 16
- **Figure (II.4)** : Cycle thermique et transformations métallurgiques le long de la ligne de fusion..... 16
- **Figure (II.5)** : Diagramme de transformation en chauffage continu de l'acier 34CrMo4 (0.34%C, 1.07%Cr, 0.1 7%Mo) 17
- **Figure (II.6)** : Diagramme de T.R.C. en condition de soudage 18
- **Figure (II.7)** : Zone affectée thermiquement au voisinage d'un cordon de soudure. 19
- **Figure (II.8.1)** -Transformations structurales dans la ZAT : Représentation schématique et micrographies. Dans la *Zone1* : $\theta < 600^\circ$ et dans la *Zone3* : $Ac3 > \theta > Ac1$ et dans la (zone de liaison) *Zone2* : $\theta > 1200^\circ$ structure à gros grains..... 23
- **Figure (II.8.2)** - structure de weidmannstaten..... 23
- **Figure (II.9)** : Sens de croissance sélective des grains. (Épitaxie).....26
- **Figure (II.10)** - Sens privilégié de croissance des grains au dépend des autres qui disparaissent.....26
- **Figure (II.11)** - Cinétique de refroidissement.....27
- **Figure (II.12)** : Cinétique de refroidissement..... 27
- **Figure (II.13)** : influence de la vitesse sur l'épitaxie.....27
- **Figure (II.14)** : coupe longitudinale d'une soudure montrant le sens de croissance..... 28
- **Figure (II.15)** coupe transversale montrant le sens privilégié de croissance..... 28
- **Figure II.16-** représentation des modifications structurales au cours du

chauffage.....	30
➤ Figure (II.17) -Effet de la recristallisation et la surchauffe sur la structure d'un acier écroui.....	30
➤ Figure (II.18) : phénomènes survenant lors de l'échauffement et du refroidissement en soudage.	32
➤ Figure (II.19) –diagramme TRC.....	33
➤ Figure (II.20) - Transformation perlitique en soudage.....	34
➤ Figure (II.21.a) - ferrite aux joints.....	37
➤ Figure (II.21.b) - ferrite polygonale.....	37
➤ Figure (II.21.c) - Bainite inférieure.....	37
➤ Figure (II.21.d) - Bainite supérieure.....	37
➤ Figure (II.21.e) – Martensite.....	37
➤ Figure (III.1) : Installation de soudage MIG	40
➤ Figure (III.2) : Représentation schématique de l'arc électrique et de la variation de tension	41
➤ Figure. (III.3) : Transfert par court-circuit	42
➤ Figure (III.4) : Transferts de métal par pulvérisation	43
➤ Figure (III.5) : Transfert globulaire	44
➤ Figure (III.6) : Carte des modes de transfert de métal en soudage MIG	44
➤ Figure (IV-1) : Métal de base en tôles découpe.....	49
➤ Figure (IV-2) : metal d'apport.....	51
➤ Figure (IV-3) : matériel utilisé pour le soudage.....	52
➤ Figure (IV-4) : dimensions des tôles a souder.....	56
➤ Figure (IV-5) : tôles soudes pour en extraire les échantillons.....	56
➤ Figure (IV-6) : la scie mécanique	57
➤ Figure (IV-7) : la tronçonneuse à Refroidie à l'eau.....	57
➤ Figure (IV-8) : découpage d'un échantillon à partir d'une tôle.....	58
➤ Figure (IV-9) . Préparation de l'enrobage par coulée de la résine.....	58
➤ Figure (IV-10) . Echantillons sec démoules.....	59
➤ Figure (IV-11) . Polisseuse a disques rotatifs.....	59
➤ Figure (IV-12) . Nettoyage à l'acétone.....	59
➤ Figure (IV-13) . Séchoir air chaud.....	60
➤ Figure (IV-14) . Microscope a faible grossissement.....	60
➤ Figure (IV-15) : plan général de l'observation microscopique.....	61
➤ Figure (IV-16) : microscope métallographique a réflexion dot de camera Toupcam.....	61

- **Figure (IV-17)** : interface du logiciel Toup view..... 62
- **Figure (V.1)** : Macrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF..... 64
- **Figure (V-2)** : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500..... 65
- **Figure (V-3)** : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500..... 66
- **Figure (V.4)** : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500..... 67
- **Figure (V.5)** : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500..... 68

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Il existe aujourd'hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété du procédés à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l'heure actuelle, le soudage compte parmi les modes d'assemblage les plus répandus dans l'industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables, notamment dans l'univers de la construction mécanique, pour fabriquer des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyauteries, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

Le soudage est le moyen d'assemblage le plus fréquemment utilisé pour la fabrication en atelier mais sur le chantier ou son emploi est moins généralisé à cause des difficultés de mise en œuvre liées souvent à des conditions climatiques pas toujours favorables. Pour les charpentes courantes, on préfère l'emploi de boulons. Néanmoins, pour des structures fortement sollicitées (ponts) ou pour des constructions particulières (réservoirs), le soudage est régulièrement employé.

Le soudage offre pas mal d'avantages qui justifient son extension si remarquable, parmi les plus cités on compte :

- Possibilité de réalisation d'assemblages rigides (peu déformables) au moindre cout.
- Diminution du temps de préparation des pièces de l'assemblage, par rapport au principal concurrent le boulonnage, notamment (absence de trous à percer, réduction du nombre de couvre-joints et de plaques de tête).
- Simplicité des assemblages.
- Côté esthétique de l'édifice, offre une amélioration de l'apparence de la construction.
- Réalisation d'assemblages étanches.

Elle nécessite par contre certaines précautions de mise en œuvre notamment :

- Exige un personnel qualifié.
- Impose une protection des soudures sur le chantier vis-à-vis des intempéries.
- Nécessite l'utilisation de procédés de contrôles de qualité sur le chantier.

Introduction générale

L'objectif de ce mémoire, est de constituer un outil commode sous une présentation simplifiée des notions fondamentales nécessaires à l'analyse microscopique des microstructures des joints soudés par de à cet effet. L'intérêt particulier est porté sur les caractéristiques micrographiques qui seront discutées et interprétées en détails.

Le premier chapitre est destiné aux méthodes et moyens de soudage du point de vu général, Le deuxième est dédié à l'aspect thermique et métallurgie du soudage, ou on traite ici les changements microstructuraux des joints soudés en fonction de la variation de température. Dans le troisième chapitre, on traite l'aperçu technologique du soudage MIG-MAG. Le quatrième chapitre est réservé à l'expérimentation, ici on essaye de caractériser un joint soudé du point vu microstructural à l'aide d'un microscope optique. On achève par une discussion et une conclusion.

CHAPITRE I : LE SOUDAGE METHODES ET MOYENS

I-Introduction :

Les moyen d'assemblage tels que les soudures permettent de solidariser entre elles les pièces élémentaire de formes diverses, constituant un édifice métallique. Les assemblages soudés (fig.I.1) par son cout réduit par rapport aux autres moyens représentent ainsi une composante essentielle de toute structure et méritent de ce fait une attention particulière.

La connaissance des propriétés physiques et mécaniques des matériaux ainsi que les caractéristiques technologiques des méthodes de soudage est indispensable pour choisir le type de soudage et les conditions opératoires les mieux adaptés à une situation.

Le but de ce chapitre est de traiter d'introduire le soudage de manière à définir un champ d'entente utilisé la suite du mémoire et pour pouvoir par la suite discuter sur la conception et de la résistance des joints soudés.

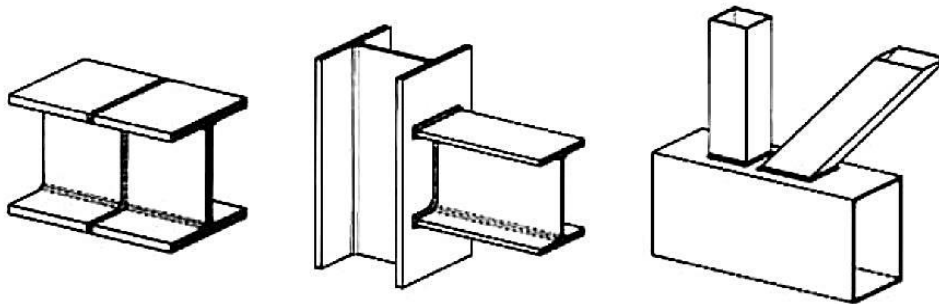


Figure I.1 exemple d'assemblage soudé. [1]

I.1. Bref historique du soudage

Avant la naissance du soudage au 19^{me} siècle et son passage rapide aux mains des techniciens, l'assemblage des matériaux était réalisé principalement par forgeage. Les premières techniques de soudage utilisaient l'électricité comme source d'énergie, tel que le soudage à l'arc avec électrode enrobée, dont l'invention date de 1904, ou le soudage par résistance. Vers la même période, l'arrivée du soudage oxyacétylénique (soudage aux gaz), utilisant l'acétylène et l'oxygène pour produire une flamme dont la température atteint 3100°C, permet de constituer un joint entre les parties à assembler par mélange du métal à l'état liquide puis solidification.

En 1930, l'introduction de fils-électrodes fusibles facilite l'automatisation de l'apport de métal, et conduit au développement du procédé de soudage à l'arc submergé. Dès 1940, des scientifiques américains ont essayé de maintenir l'arc électrique, amorcé à l'aide d'une électrode non fusible en tungstène, au sein d'un gaz inerte afin de protéger le métal chauffé de l'oxydation, ce qui conduit au développement du procédé TIG (Tungsten Inert Gas).

Le procédé MIG (Metal Inert Gas) apparaît quelques années plus tard, vers 1950. Il utilise comme électrode un fil de métal d'apport fusible à dévidage continu et de l'argon ou de l'hélium comme gaz de protection. Le remplacement de ces gaz par du CO₂ donne ensuite naissance du procédé MAG (Metal Active Gas). L'invention du soudage par faisceau d'électrons, en 1958, permet de souder en une seule passe de fortes épaisseurs, grâce à la vaporisation localisée du métal qui permet de réaliser des joints étroits et profonds.

Avec l'introduction du procédé laser dans les années 1980, les opérations de soudage deviennent encore plus rapides. [2]

I.2. Définitions et classification des procédés de 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. Le champ d'application du soudage ne se limite pas aux matériaux métalliques puisque l'on soude du verre, des céramiques ou des matières plastiques

Dans le cas le plus courant des matériaux métalliques, on peut distinguer

- le soudage autogène : assemblage de deux matériaux de base de même composition sans métal d'apport,
- le soudage homogène : les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature,
- le soudage hétérogène : l'un au moins des trois matériaux, d'apport ou de base, est différent des autres.

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à assembler est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leur bord. On obtient ainsi, après solidification un joint homogène aux caractéristiques plus ou moins proches de celle du métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération

locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones (fig.I.2) :

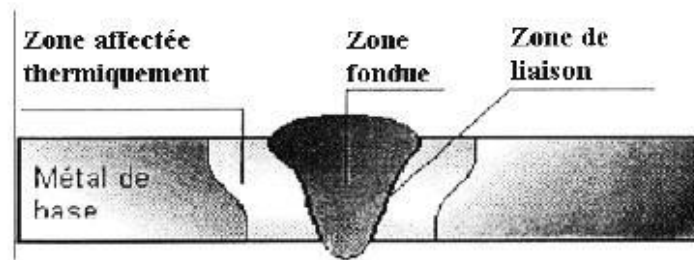


Figure I.2: Cordon de soudure. [3]

La zone fondue : (nommée ZF) zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On peut distinguer, au sein de cette zone, des gradients de concentration (ségrégation).

La zone affectée thermiquement : (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue, de largeur variable, ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique sont causées par le cycle de chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone.

La zone de liaison : cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

Le métal de base : au-delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée. [3]

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. La classification de ces différents procédés (Figure I.2) peut s'effectuer selon le mode d'apport de l'énergie nécessaire pour réaliser la jonction. Pour certains, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, sans action mécanique volontaire, en utilisant une source de chaleur telle qu'une flamme ou un arc électrique. Pour d'autres, la continuité métallique est obtenue par une action mécanique (frottement, pression), éventuellement associée à une fusion ou un échauffement localisé.

Selon le mode d'apport d'énergie pour réaliser la jonction et les mécanismes

physiques de liaison, on définit :

- **le brasage** : consiste à lier les surfaces de deux pièces métalliques dans un joint à recouvrement avec jeu contrôlé (inférieur à 0,5 mm) par capillarité d'un métal d'apport fondu. Le métal d'apport utilisé doit avoir un point de fusion inférieur à celui des métaux de base, qui ne fondent pas pendant l'opération ;
- **le soudo-brasage** : se rapproche du soudage par son mode opératoire (le joint est réalisé en position bout à bout ou en angle), et du brasage par l'utilisation d'un métal d'apport dont la température de fusion est plus basse que celle de l'un au moins des métaux de base.
- **Soudage par pression** : Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d'apport, par l'application d'une pression ou d'une friction suivie d'une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure.
- **Soudage par pression et fusion** : On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l'aide d'une décharge électrique avant d'appliquer une pression de contact, et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l'application d'une pression à l'aide d'électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l'endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion.
- **Soudage par fusion sans pression** : La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés. (Figure I.3)[2]

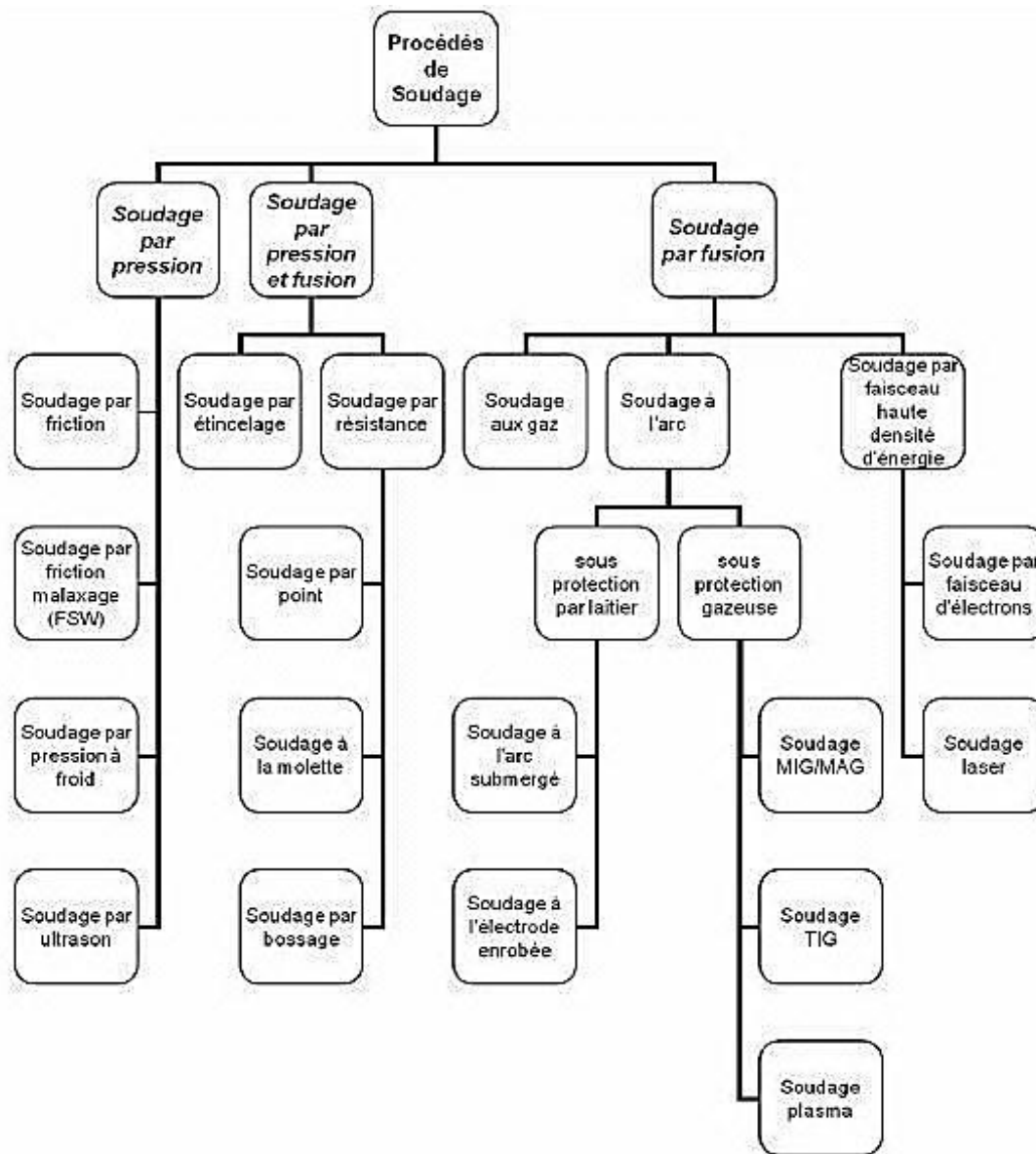


Figure I.3 : Classification des procédés de soudage. [2]

I.3. Soudage à l'arc électrique :

Le soudage à l'arc est un terme générique au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler afin de conduire à une fusion superficielle et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure.

I.3.1. Les procédés de soudage à l'arc :

Selon la technologie et les moyens utilisés, Le soudage à l'arc regroupe quatre procédés :

1. Le soudage à l'électrode enrobée : Afin de limiter l'oxydation et la nitruration du métal, l'âme métallique de l'électrode est enrobée par un oxydant, un acide, un basique ou un

cellulosique selon les besoins. Il a pour but de faciliter l'amorçage, de protéger le métal et le cordon contre un refroidissement trop rapide, ainsi que de guider l'arc grâce à un retard à la fusion. Suivant les propriétés recherchées pour le cordon ou le laitier, différents modèles d'électrode enrobée existent.

2. Le soudage avec fils pleins (GMAW) : L'électrode est composée d'un fusible continu, servant de métal d'apport et se dévidant automatiquement sous protection gazeuse (Ar ou CO₂). (Figure I.4)

3. Le soudage avec une électrode réfractaire : L'électrode non consommable est constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire d'un gaz protecteur actif « Gaz Metal Arc Welding » ou inerte « Tungstène Inert Gaz ». (Figure I.5)[2]

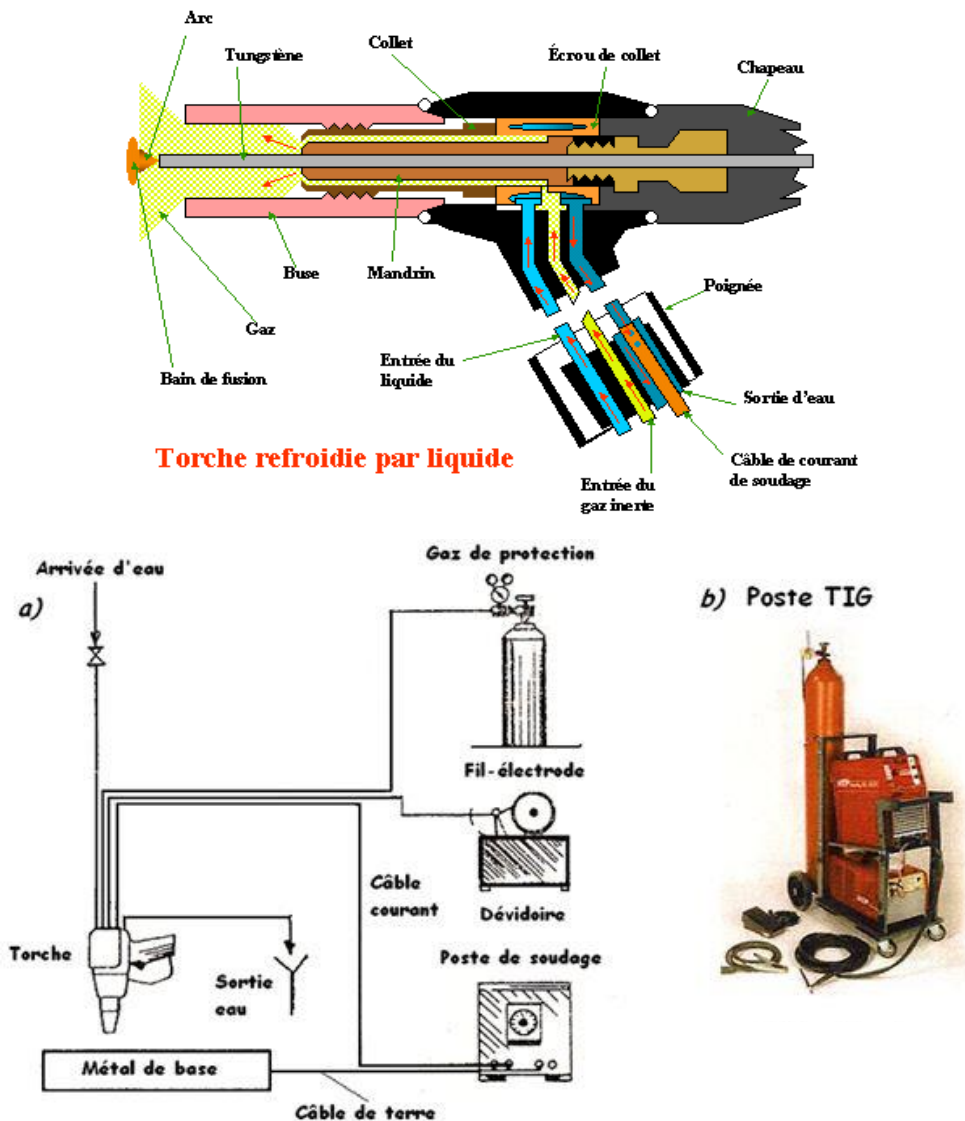


Figure I.4 : Représentation schématique des procédés TIG [2]

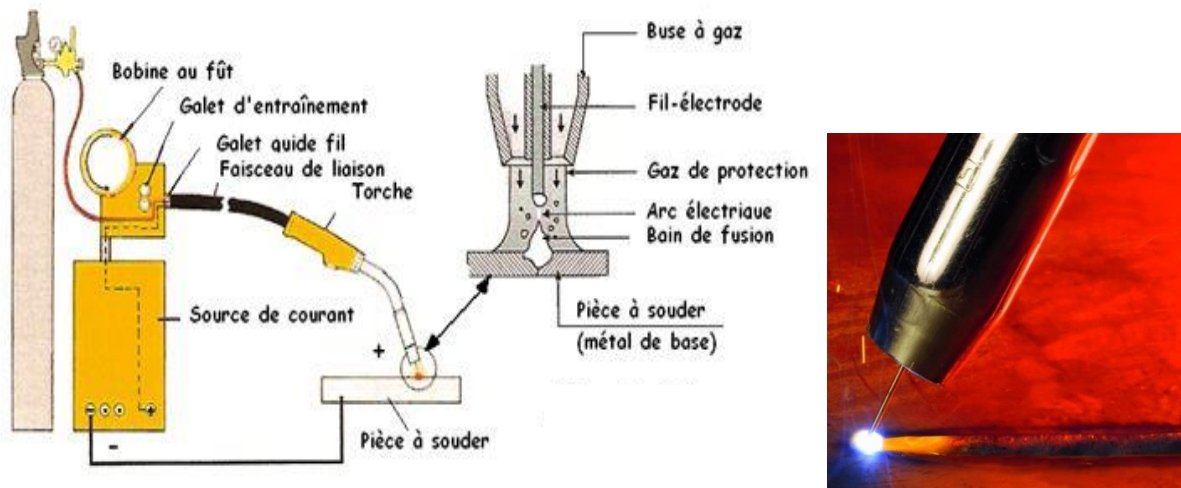


Figure I.5: Représentation schématique des procédés MIG/MAG

4. Le soudage à arc submergé sous flux solide : Un flux en poudre est versé en talus autour de l'électrode. L'arc jaillissant à l'intérieur du flux est ainsi protégé de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide. (Figure I.6)

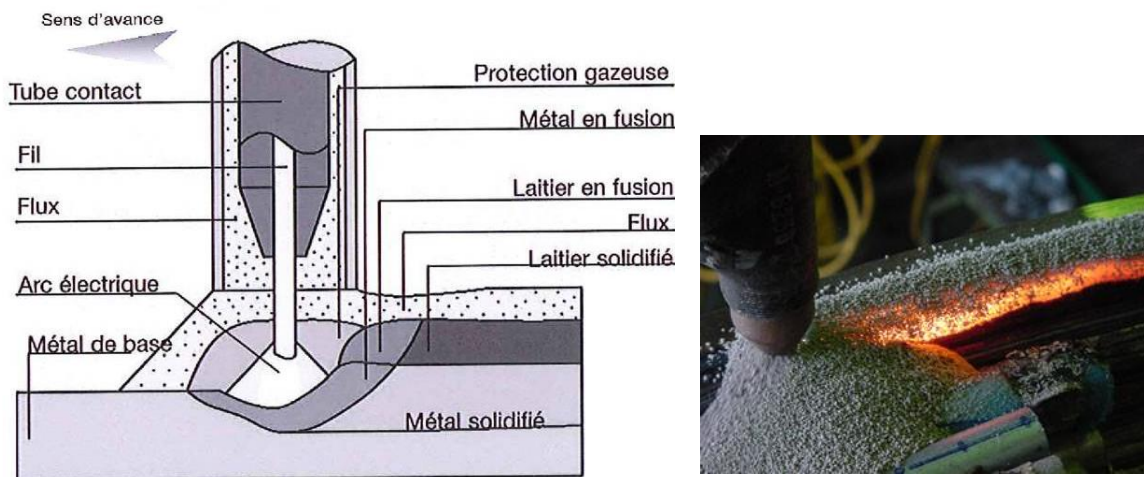


Figure I.6: soudage à arc submergé sous flux solide [2]

**CHAPITRE II : ASPECTS THERMIQUES ET
METALLURGIQUE DU SOUDAGE**

II-1. ASPECTS THERMIQUES DU SOUDAGE

Le soudage est un processus qui nécessite un apport important d'énergie pour obtenir des températures très élevées en un temps très court. On classe usuellement l'apport d'énergie en deux catégories:

- le soudage dit à "faible énergie" : $E < 30 \text{kJ/cm}$
- le soudage dit à "forte énergie" : $E > 30 \text{kJ/cm}$

Dans un très large intervalle de températures allant de la température ambiante jusqu'aux températures de vaporisation du métal, il se développe différentes actions physiques et chimiques telles que:

- la fusion du métal de base et du métal d'apport,
- les réactions chimiques dans un bain liquide, échange métal-laitier
- la cristallisation du métal fondu,
- les modifications de structure et de volume dans le métal déposé et dans le métal de base au cours du chauffage et du refroidissement.

II-1-1 Cycle et répartition thermique lors du soudage multi passe :

Le cycle thermique concerne la variation de température en un point donné de la soudure ou de la zone avoisinante en cours de soudage.

Positionnement des thermocouples

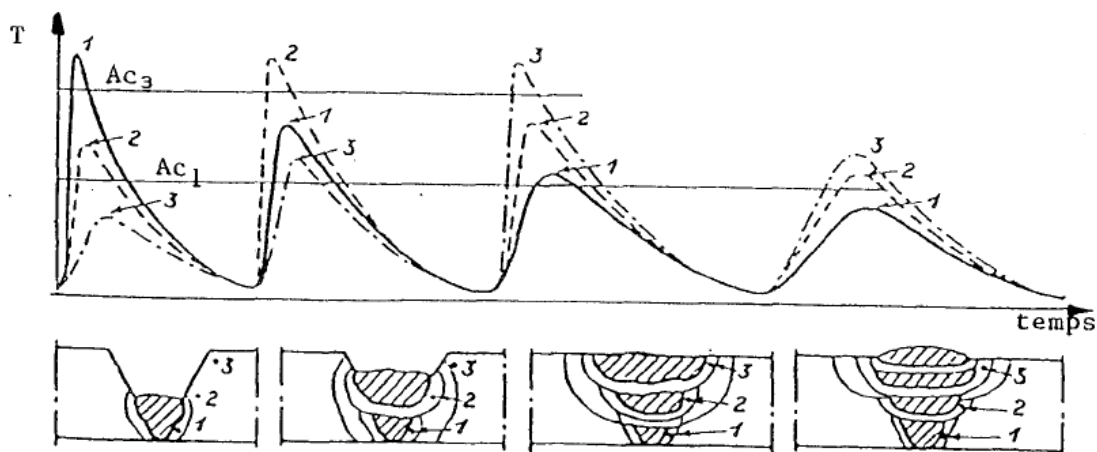


Figure II.1: Modification de l'action thermique en fonction du nombre de passes exécutées [4]

Dans le cas du soudage multipasse, chaque passe exécutée superpose son cycle Thermique à ceux des précédentes, provoquant une évolution des structures (Fig. II.2) [4] et des propriétés résultantes.

Selon la longueur du cordon, la température entre passes descend ou non jusqu'à la Température ambiante (Fig. II.2 a, b).

T_b - la température de la zone avoisinant le dépôt de la passe du fond

a) point 1 avoisinant la passe du fond,

b) point 2 avoisinant la dernière passe.

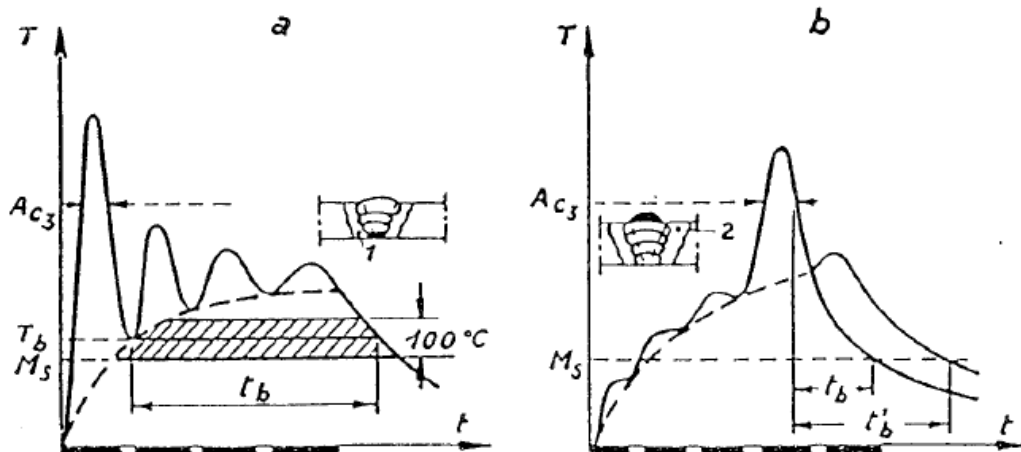


Figure II.2: Schéma du cycle thermique de la zone avoisinant la soudure lors de dépôts en passes multiples par petits cordons [4]

Le régime de soudage par petits cordons est caractérisé par deux paramètres dépendants:

- * la quantité de chaleur q/v apportée par unité de longueur et par passe.
- * la longueur l de chaque passe.

La longueur de la passe est choisie de façon que la température **T_b** de la zone avoisinant le dépôt de la passe de fond, au moment de la superposition de l'onde thermique de la passe suivante ne soit pas plus basse que la température du point **M_s** du début de la transformation martensitique ou d'une température à laquelle serait plus favorable la formation de fissures "froides".

II-1-2 Paramètres thermiques et métallurgiques de soudage

La connaissance du cycle thermique de soudage permet de prévoir les évolutions du métal de base et du métal fondu. Les paramètres les plus couramment utilisés pour caractériser le cycle thermique en condition de soudage sont [5] (Fig.II.3):

- le **tr 800/1500** ; temps de refroidissement entre 800' et 500°C, utilisé par l'Institut International de Soudure (I.I.S.). \
- le **Δt 700/300** ; temps de refroidissement entre 700' et 300°C utilisé par l'Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (I.R.S.I.D.),
- le **Δt 300/100** ; temps de refroidissement entre 300" et 100°C utilisé par la plupart des

laboratoires japonais,

- le **Vr 300**; vitesse de refroidissement instantanée à 300°C utilisée par certains aciéristes.

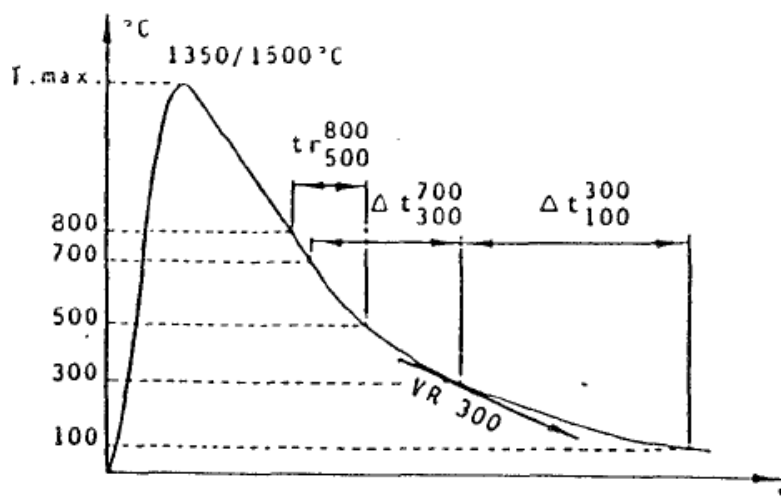


Figure II.3: Cycle thermique de soudage et principaux paramètres de refroidissement. [5]

Du point de vue métallurgique, le cycle thermique, près de la ligne de fusion se traduit Chronologiquement par:

- l'austénitisation de la structure initiale,
- la mise en solution des précipités,
- la croissance du grain austénitique,
- la transformation de l'austénite en refroidissement continu. (Figure II.4)

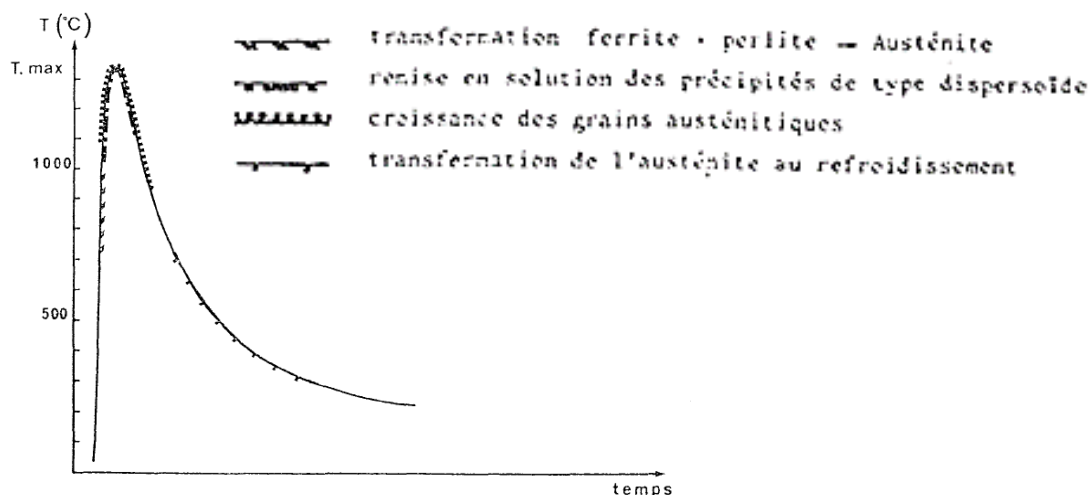


Figure II.4: Cycle thermique et transformations métallurgiques le long de la ligne de fusion [6].

II-1-2-1 Définition de la zone affectée par le cycle thermique de soudage

On rencontre trois termes pour désigner la zone où le cycle thermique du soudage provoque des modifications structurales du métal de base, au voisinage du métal fondu:

- Z.A.T. : Zone Affectée Thermiquement,
- Z.A.C. : Zone Affectée par la Chaleur,
- Z.T.A. : Zone Thermiquement Affectée.

Par la suite nous utiliserons uniquement le terme Z.A.T

II-1-2-2 Transformations dans la Z.A.T.

La cinétique de chauffage propre au soudage (montée rapide jusqu'à la température de fusion), conduit à des décalages importants des points A_{c1} , A_{c3} par rapport aux niveaux considérés habituellement [II.5]

A titre d'exemple la (figure II.5) relative l'acier **34Cr Mo4**, donne les décalages des points A_{c1} et A_{c3} en fonction de la vitesse de chauffage.

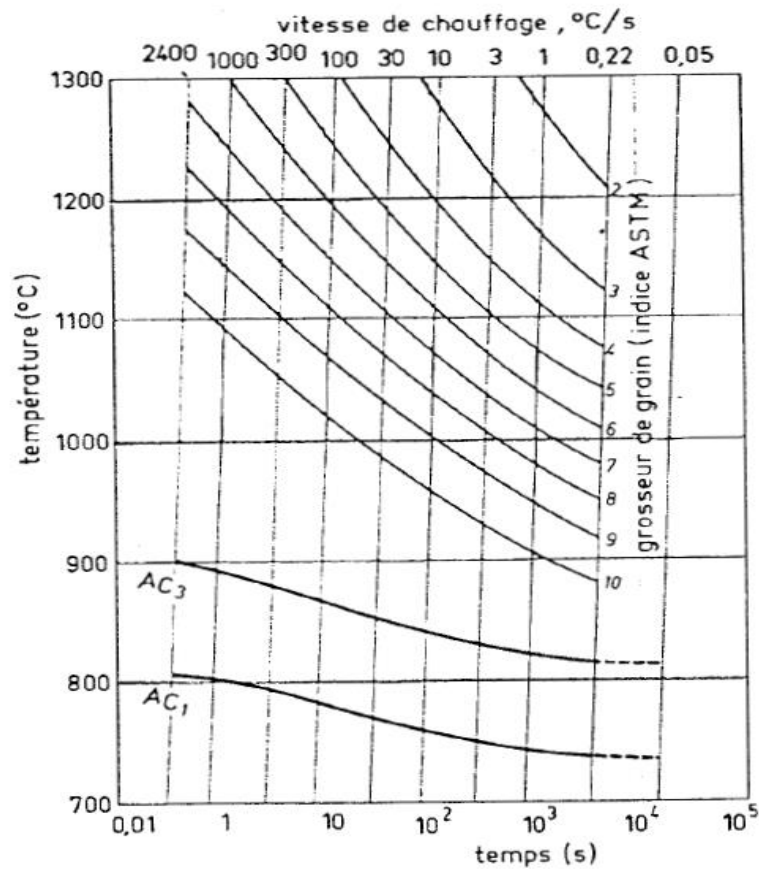


Figure II.5: Diagramme de transformation en chauffage continu de l'acier 34CrMo4
(0.34%C, 1.07%Cr, 0.1 7%Mo) [7]

Il est donc nécessaire de définir des courbes T.R.C. en condition de soudage. Un exemple de diagramme T.R.C. concernant le soudage en une seule passe est donné sur la (figure II.6) [8]

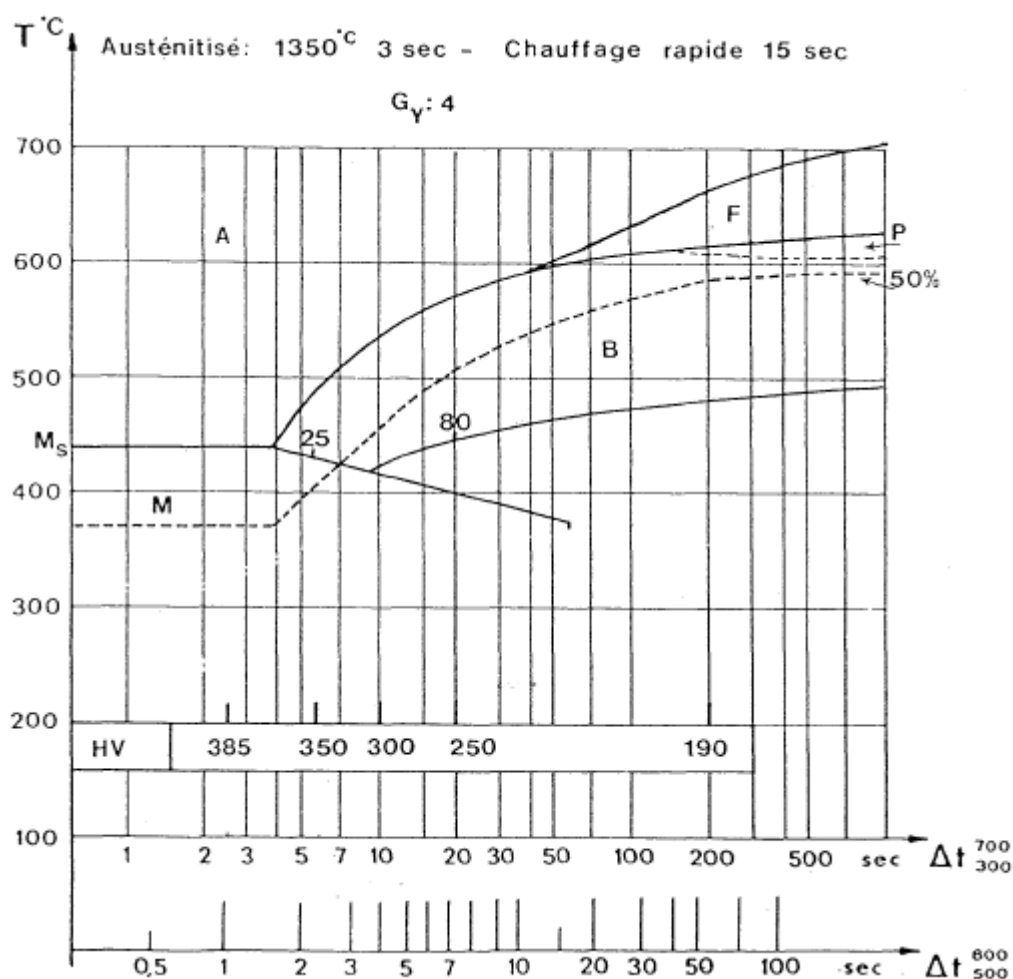


Figure II.6: Diagramme de T.R.C. en condition de soudage [8]

De façon classique les refroidissements les plus rapides conduisent à des structures martensitiques. En allant vers les refroidissements plus lents on rencontre successivement les structures mixtes (mélange de martensite et de bainite), le cas échéant les structures bainitiques et enfin les structures de type ferrite carbures.

La dureté de ces structures décroît depuis les structures les plus trempées (correspondant aux refroidissements les plus rapides) jusqu'à celles correspondant aux refroidissements les plus lents.

La cinétique de refroidissement de la Z.A.T. dépend de la position du point de celle-ci par rapport à la source chaude. Les changements structuraux résultants de l'opération de soudage nous amènent à considérer trois zones (Fig.II.7), [9]

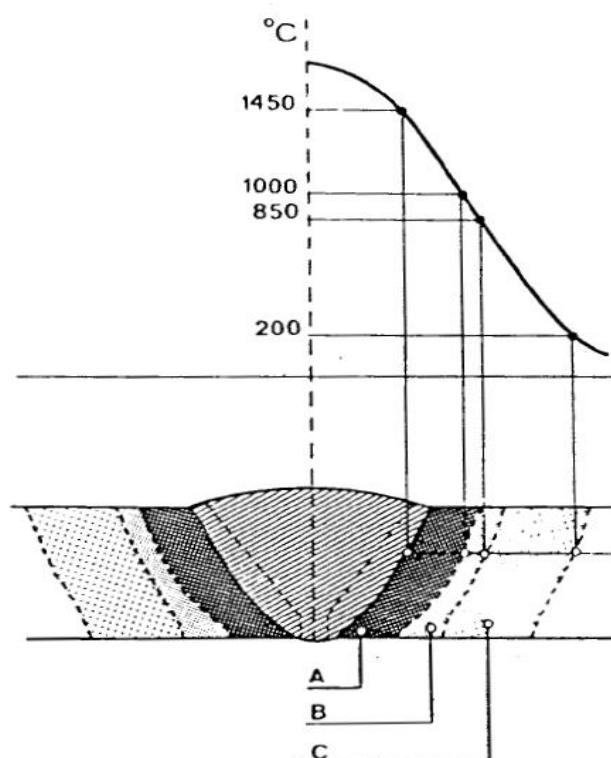


Figure II.7: Zone affectée thermiquement au voisinage d'un cordon de soudure. [9]

Zone A : pour laquelle la température maximale est nettement supérieure à Ac_3

Dans cette partie la mise en solution des carbures préalablement précipités peut être soit complétée, soit incomplète. Au plus près du métal fondu, la température élevée atteinte provoque un grossissement des grains austénitiques (surchauffe). L'épaisseur de cette partie appelée "zone à gros grains" est d'autant plus élevée que l'énergie de soudage est importante. La transformation de l'austénite en refroidissement continu est d'écrite par les courbes T.R.C., en conditions de soudage (Fig.II.7). La cinétique de refroidissement (DT/Dt) est d'autant plus faible que l'énergie de soudage est élevée.

Zone B : dans laquelle la température maximale est comprise entre Ac_1 et Ac_3 .

Dans cette région, l'austénitisation est incomplète; une partie de la structure initiale n'est donc pas austénitisée. La transformation des grains austénitiques provoque une formation des zones ferritiques à grains très fins.

Zone C : dans laquelle la température maximale est inférieure à Ac_1 . Cette zone se divise en deux parties:

- la première où la température maximale est telle qu'une évolution se produit dans le métal durant l'échauffement (Ex: coalescence de carbures précipités, recristallisation);
- la deuxième où la température est telle qu'aucune évolution ne se produit. Cette partie

conserve donc les propriétés du métal de base.

II-1-2-3 Microstructures de la ZAT

Dans ce paragraphe nous allons décrire les structures le plus fréquemment rencontrées dans la **Z.A.T.**

Cette description a pour but de définir le vocabulaire concernant les structures que nous allons utiliser par la suite. Il existe parfois une certaine ambiguïté quant à la dénomination de micro constituant de la Z.A.T.

Un premier effort de clarification a été fait par Levine et Hill [10] qui distinguent ainsi trois constituants:

1. Ferrite aux joints de grain (ferrite proeutectoïde)
2. Constituant lamellaire
3. Constituants M+A (martensite + austénite)

Dans ce travail nous utiliserons la terminologie retenue par **I.I.S.** et Levine, Hill.

Ferrite proeutectoïde intergranulaire : Cette ferrite est obtenue après refroidissement lent. Elle correspond à des cristaux allotriomorphes de ferrite formés à haute température (650°C) à l'aplomb des joints de grains austénitiques. Ces cristaux forment un réseau qui dessine la structure austénitique.

Ferrite proeutectoïde polygonale : Une seconde forme de ferrite proeutectoïde correspond aux cristaux idiomorphes de ferrite ayant germé de manière intragranulaire. Il présente une forme équiaxe de taille importante.

Bainite supérieure : Une structure en lattes résultant de la croissance de cristaux de ferrite à partir de ferrite proeutectoïde ou des joints de grains austénitiques suivant le mécanisme de Widmanstätten, est appelée bainite supérieure. La largeur des lattes atteint 1 µm.

Ce mécanisme s'accompagne d'une diffusion du carbone de l'interface alpha/gamma vers l'austénite. Ceci conduit à la formation de zones interlattes riches en carbone. Le carbone qui subsiste à basse température sous forme d'une microphase appelée M.A.C. est constituée d'austénite résiduelle, de martensite ou de carbures. Suivant les auteurs, la bainite obtenue est appelée "ferrite en lattes avec alignement de M.A.C." ou bainite supérieure en lattes. Le rapport de forme de lattes de ferrite est supérieur à 4.

- **Bainite inférieure :** Aux températures inférieures où la diffusion du carbone est limitée, les structures obtenues sont constituées de ferrites en lattes, dont la largeur est inférieure à 1 µm. Le carbone est en sursaturation dans la ferrite. La présence de M.A.C. est très faible. Cette phase est appelée bainite inférieure.

- **Martensite :** Au vitesse de refroidissement élevé, la transformation de l'austénite conduit à

une structure de type martensitique.

II-1-3 Points à retenir :

La structure de la **Z.A.T.**, pour une composition chimique du métal de la base donnée,

Dépend de:

- la température maximale atteinte lors du soudage,
- conditions de refroidissement ($Dt_{800/500}$ ou $Dt_{700/300}$) au point considéré.

Ces deux paramètres sont fonction des conditions opératoires tels que:

- l'énergie de soudage (kJ/cm),
- la température de préchauffage T_p ou la température entre passes (cas du soudage multipasse),
- l'épaisseur de la pièce soudée,
- le nombre de passes avec lequel la soudure est réalisée.

L'augmentation de la température de pic conduit à un grossissement très important du grain austénitique et par conséquent à l'apparition de la structure appelée "à gros grains". Celle-ci occasionne une dégradation de la ténacité de la **Z.A.T.**

Les éléments de micro-alliages augmentent la trempabilité de l'acier.

II-2 Aspects métallurgiques du soudage:

Les caractéristiques d'un acier sont fonction de sa nature et de sa composition chimique, la structure étant elle-même liée à la composition chimique et au traitement thermique que subit l'acier. Les principes généraux de la métallurgie (édifice cristallin, composition chimique, transformation d'état de structure, modifications chimiques), s'appliquent aux caractéristiques mécaniques et chimiques, de la zone fondue des soudures.

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

Parce que le bain de fusion a un volume relativement restreint, son refroidissement est rapide et les cristaux qui se solidifient sont orientés dans la direction du gradient de température. Leur dimension dépend de la température et de la cinétique de refroidissement. Qui donne une représentation schématique d'un joint soudé perpendiculairement à la ligne de fusion. [13], [12]. On distingue plusieurs zones : fig.II.8.a [11].

1) Zone de fusion (structure basaltique) : Qui pour une soudure multi passes est constituée

par une alternance de zones thermiquement régénérés et de zones brutes de solidification à grains orientés.

2) Zone surchauffée : A granulation grossière où la température maximale atteinte est très élevée (entre 1200 et 1500). Le refroidissement rapide de l'austénite surchauffée, dont le grain atteint des dimensions importantes, donne la structure de « Widmannstaetten », structure très fragile. (Figure II.8.b)

Dans ce cas, la ferrite ou la cémentite pro-eutectoïde précipite isolement au cours de leur migration en direction des joints des grains d'austénite. Leur précipitation s'effectue alors le long des plans de clivage du cristal d'austénite où elle se trouve facilitée. Le constituant pro-eutectoïde précipite le long de ces plans sous forme de plages de grandes dimensions. La section de celle-ci par le plan duquel s'effectue l'observation du métal au microscope donne lieu à l'apparition d'aiguilles plus ou moins allongées, orientées dans des directions déterminées (fig.II.8.2). Les structures de Widmannstaetten doivent être effacées par un traitement de normalisation, car sinon elles sont la source de la plupart des problèmes soulevés par le soudage des aciers.

3) Zone de normalisation : Où la granulation est plus fine que dans le métal de base. La température atteinte est légèrement supérieure à Ac_3 .

4) Zone à température maximale comprise entre Ac_1 et Ac_3 : C'est une zone de transformations incomplètes. L'austénite résiduelle se transforme en perlite fine, et les grains de ferrite pro-eutectoïde ne se modifient pas. La granulation dans cette zone n'est pas très homogène. L'austénitisation partielle du métal conduit pour cet acier à une structure à grains très fins.

5) Zone de recristallisation: Où la température maximale atteinte est comprise entre 500 et Ac_1 . Certaines modifications métallurgiques peuvent déjà avoir lieu dans cette zone : précipitations et coalescence en présence d'éléments dispersifs, sur revenu dans certains aciers trempés revenus, légère globularisation de la perlite dans les aciers normalisés.

6) Métal de base : Où la température maximale atteinte resta inférieure à environ 500°C, dans laquelle on ne détectera pas de modifications structurales visibles.

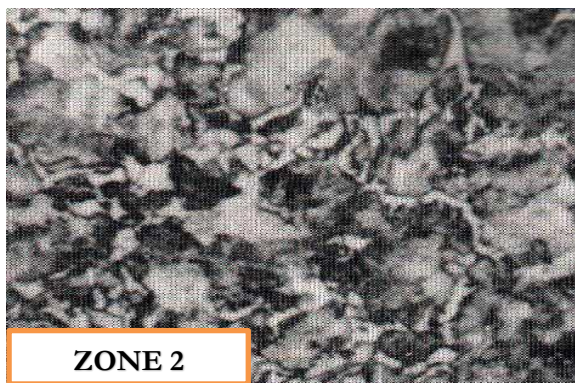
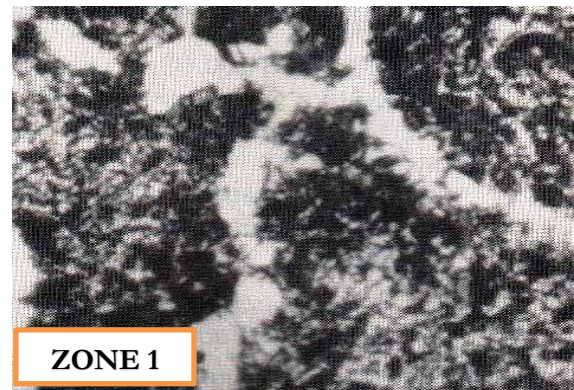
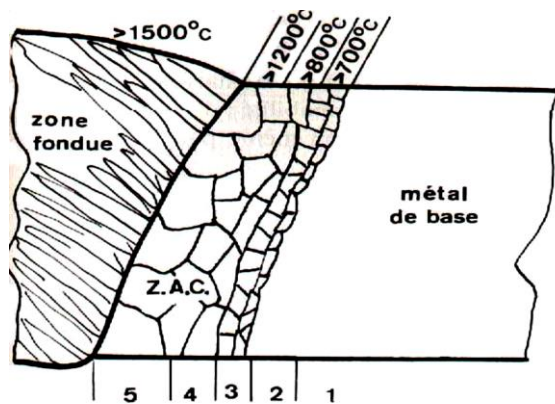


Fig.II.8.a- Transformations structurales dans la ZAT : Représentation schématique et micrographies. Dans la **Zone1** : $\theta < 600^\circ$ et dans la **Zone3** : $Ac3 > \theta > Ac1$ et dans la (zone de liaison) **Zone2** : $\theta > 1200^\circ$ structure à gros grains



Fig.II.8.b- structure de weidmannstatten.

II.2.1 Elaboration de la zone fondue :

Nous pouvons parler du soudage comme une opération d'élaboration, à condition de tenir compte des conditions particulières dans lesquelles cette opération se déroule, qui sont :

Le comportement physico-chimique des éléments présents dans la phase liquide (métal d'apport ou métal de base) qui peuvent être sujets à la volatilisation ou réagir entre eux. L'influence du milieu environnant, qu'il soit gazeux (atmosphère ou autre), liquide (laitier) ou solide (métal de base). Le cas particulier de la zone de liaison.

II.2.1.1 Comportement physico-chimique des éléments présents :

Plusieurs phénomènes peuvent accompagner l'opération de soudage, on peut en citer :

1) La volatilisation :

Elle est susceptible d'intervenir au cours du soudage pour un élément donné, lorsque la température de fusion de cet élément est largement dépassée, on peut citer le cas du zinc qui est nocif pour la santé (fond à 419°C). En soudage à la pression atmosphérique, outre le zinc, la fumée de soudage à l'arc est formée de métaux d'addition des aciers alliés ou non alliés, tel que le fer, le manganèse, le chrome, le titane et l'aluminium. Mais le fer constitue la part la plus importante des fumées de soudage à l'arc. Le manganèse subit aussi la volatilisation durant le soudage à l'arc et qui pose un problème pour l'organisme, Normalement, le phénomène de volatilisation est limité à cause de la rapidité du processus de soudage, alors qu'il est beaucoup plus important en soudage MIG. [17]

La solution est d'utiliser un produit d'apport à très bas carbone ou stabilisé au niobium, qui lui n'est pas volatil mais l'inconvénient c'est la fissuration à chaud et la fragilisation en particulier.

2) Influence du milieu Gazeux :

Lors du soudage à l'arc, la nécessité d'une protection s'est imposée en raison des caractéristiques très faibles obtenues, la recherche de meilleures propriétés a motivé, en même temps que d'autres effets, la mise au point d'électrodes enrobées qui fournissent une double protection par un dégagement gazeux et un laitier liquide ou un flux en poudre ou par l'emploi d'un gaz protecteur (soudage MAG) ou inerte (soudage MIG).

En soudage avec électrode enrobée ou fil fourré l'hydrogène en solution sursaturée tend à quitter le métal en fusion vers l'extérieur [16]. Mais il est aussi à même d'évoluer par diffusion en phase solide, dans la zone fondue ZF comme dans la zone affectée thermiquement ZAT. Cette diffusion commence dès le refroidissement et se poursuit ultérieurement, est influencée d'une part par la teneur initiale en hydrogène à la fin du refroidissement, d'autre part par la différence de coefficient de diffusion entre l'austénite et la

ferrite, car l'hydrogène diffuse mieux dans cette dernière [15].

La présence de l'hydrogène a pour conséquences la fragilisation de la ferrite ou de la martensite, par insertion des ions H⁺ dans le réseau cristallin de ses deux constituants, qui se déplace à la faveur du mouvement de dislocation. Cette insertion a pour effet : La fragilisation de la ferrite est liée au mécanisme de formation de la tache blanche : appelé œil de poisson lors des essais de traction statique. [16]

Celle de la martensite est à l'origine de la fissuration à froid. De ce fait nous pouvons retenir que l'hydrogène est un facteur de fissuration en soudage [18].

II.2.1.2 Solidification de la zone fondue :

Le bain de fusion peut être défini comme étant, à un instant donné, constitué par un certain volume en déplacement de métal à l'état liquide produit par la fusion du métal de base et éventuellement alimenté par un apport extérieur, il est limité ;

- A l'avant par la surface de l'isotherme de fusion du métal de base.
- A l'arrière par l'interface liquide/solide résultant de son avancement.
- Surmonté, selon le procédé de soudage, par le gaz protecteur ou le laitier liquide provenant du flux ou de l'enrobage.

Cette surface n'est pas uniforme, car elle subit l'impact de la source de chaleur dont l'effet dynamique n'est pas négligeable, ainsi que celui du gradient de température, qui crée des mouvements de convection. Enfin, le déplacement de la source de chaleur se traduit par celui du bain de fusion qui engendre un mouvement de métal liquide depuis l'avant, où il se forme, vers l'arrière où il se solidifie et ceci latéralement et en profondeur. Le bain de fusion conserve donc sa forme si l'état quasi stationnaire des températures est maintenu, ainsi que le régime de l'apport éventuel de métal.

1) Orientation cristalline à la zone de liaison (Epitaxie) :

La solidification s'amorce sur l'interface métal fondu/métal de base, à l'endroit où sa section transversale est maximale, sur cette interface dont le déplacement constituera la zone de liaison, la cristallisation du métal en cours de solidification se fait suivant le mode épitaxial fig.II.9 [19], [16]. Selon lequel les cristaux du solide en formation adoptent l'orientation des cristaux du métal de base sur lequel ils reposent ou le métal sou adjacent. Cela veut dire qu'on doit voir les joints de grains du métal de base traverser la zone de liaison et trouver sans discontinuité leurs prolongements dans les joints de grains du métal fondu solidifié. Telle est la position de départ des grains de solidification, qui se trouvent modifiés plus tard par un autre phénomène, dit de croissance sélective. Fig.II.10 qui fait que, pour les

métaux industriels ou les alliages, certains grains se développent au dépend des autres ou apparaissent à leur place et ont une direction de croissance privilégiée selon laquelle la vitesse de croissance y est maximale. Tandis que, dans le cas d'un métal pur un cristal naissant au sein de la phase liquide est susceptible de se développer à la même vitesse dans toutes les directions permises par sa structure.

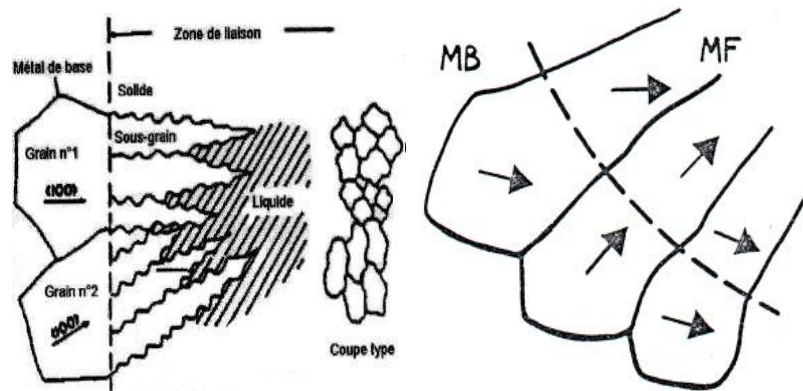


Figure II.9 Sens de croissance sélective des grains. (Épitaxie)

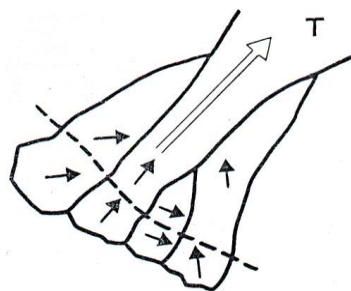


Figure II.10 - Sens privilégié de croissance des grains au dépend des autres qui disparaissent.

2) Influence de la vitesse de soudage :

Considérons une passe de soudage avec l'hypothèse d'un régime de solidification 2D dans le plan comprenant les sens travers de soudage. La forme du bain de fusion correspond alors à celle schématisée sur la fig.II.11 et fig.II.12 forme du bain de fusion. La vitesse de solidification R est liée à la vitesse de soudage V_s par la relation :

$$R = V_s \cdot \cos \Theta \quad \text{Equ (1)}$$

Θ : est défini comme l'angle entre la normale aux isothermes et la direction de soudage.

R : est alors minimale sur les bords du bain de fusion et maximale et égale à V_s au centre du bain (à l'opposé, le gradient thermique est maximal sur les bords (croissance planaire) et minimal au centre (croissance dendritique)).

La solidification se produit à l'arrière du bain, entre les points A et B ($\Theta = 90^\circ$) et le

point C ($\Theta = 0^\circ$). Toutefois il existe une vitesse limite de solidification R_{Limite} .

- Si $R < R_{Limite}$: (vitesse de soudage lente et bain arrondi) les grains se développent bien perpendiculairement aux isothermes et leur direction d'élongation est parallèle au sens de soudage dans le centre du bain (cas a), fig.II.13
- Si la vitesse de soudage augmente mais reste inférieure à R_{Limite} , la forme du bain de fusion est plus allongée et les grains se développent jusqu'à la partie centrale quasi-transversalement par rapport à la direction de soudage (cas b) fig.II.13
- Si la vitesse de soudage est encore plus importante et devient supérieure à R_{Limite} , la solidification orientée perpendiculairement aux isothermes n'est plus possible et la cristallisation se fait alors d'une manière équiaxe (cas c) fig.II.13

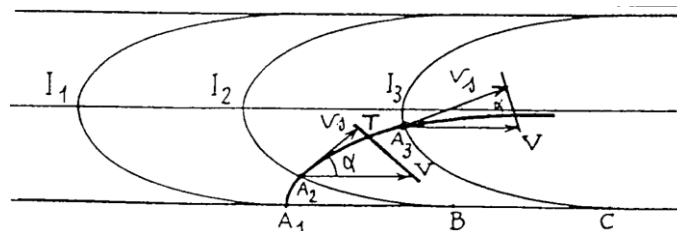
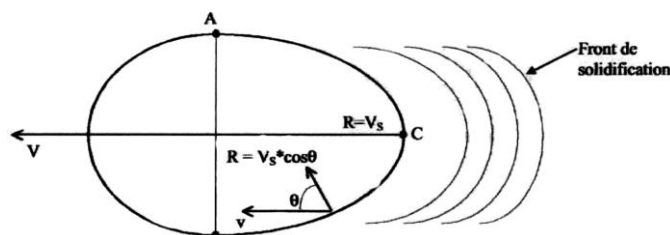
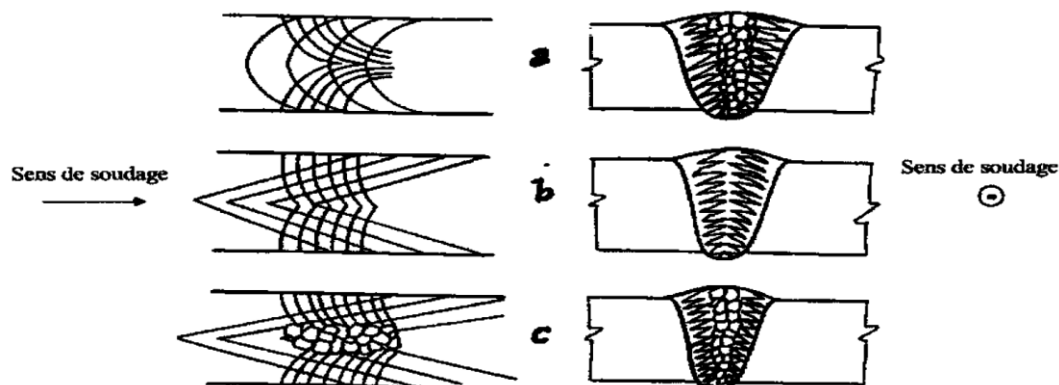


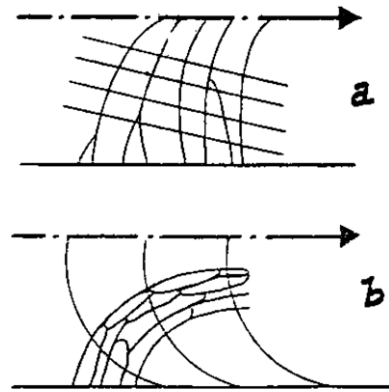
fig.II.11 - Cinétique de refroidissement



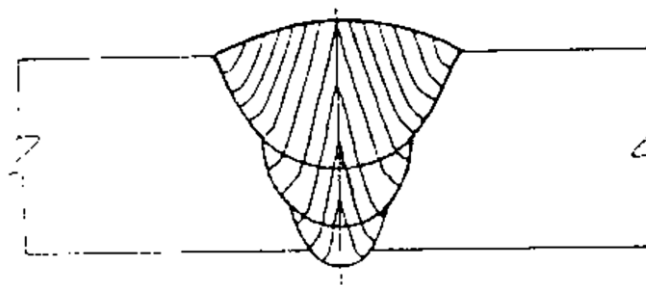
FigII.12 Cinétique de refroidissement.



FigII.13 - influence de la vitesse sur l'épitaixie



FigII.14 coupe longitudinale d'une soudure montrant le sens de croissance.



FigII.15 coupe transversale montrant le sens privilégié de croissance.

3) Influence de l'énergie de soudage :

L'énergie de soudage E , ramenée à une unité de longueur, est déterminée par l'équation :

$$E = U \cdot I / V_s \quad \text{Equ (2)}$$

U : la tension.

I : l'intensité du courant.

V_s : la vitesse de soudage.

C'est le régime thermique produit, dépendant entre autres de l'énergie fournie, qui va agir sur la vitesse de solidification. En principe, une forte énergie de soudage entraîne une plus forte pénétration des passes et donc une plus grande hétérogénéité de la structure. [19]

L'étendue de l'arc et la quantité d'énergie apportée par rapport aux dimensions de la pièce à assembler et en fonction du temps jouent un rôle très important dans la détermination de la structure après solidification dans le métal fondu et au voisinage et peut aider à conclure en ce qui est des modifications de structure dans le métal de base.

Les soudages MIG ou MAG couvre le domaine d'énergie 5 à 30 J/cm, ce qui correspond à des temps de refroidissement entre 800 à 500°C de l'ordre de 30 à 40 secondes selon l'épaisseur et selon la température initiale de plus ils sont caractérisées d'un effet

thermique localisé s'étendant sur une zone limitée.

II.2.1.3 Transformation en phase solide au cours du soudage (échauffement) :

Le métal de base subit des transformations en phase solide, (dans le cas du soudage à plusieurs passes) et éventuellement le métal fondu lors de l'échauffement qui accompagne le soudage. Un acier à l'état recuit est constitué à froid par de la ferrite α et de la cémentite **Fe₃C**, selon des proportions indiquées par le diagramme d'équilibre **Fe-C**, la constitution est fonction de la température, les changements de constitution sont réversibles si les variations de température sont compatibles avec l'état d'équilibre. Si tel n'est pas le cas, le retour à l'ambiante se traduit par l'apparition en état hors d'équilibre de constituants différents des constituants initiaux, à la limite, par le maintien de la constitution à la température atteinte au cours du chauffage.

Dans le cas d'un acier, les constituants $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ existants à l'ambiante font place, à partir de A3 (à 900°C selon la teneur en carbone) à la solution γ dite austénite. Si le refroidissement qui suit est suffisamment lent, on retrouvera à l'ambiante la ferrite et la cémentite dans les proportions initiales, on les retrouve dans l'agrégat appelé perlite, ou les deux constituants sont disposés en lamelles alternées (structure); si non, les conditions de l'équilibre ne sont pas respectées et la constitution finale sera différente en raison de la trempe qui peut conduire à la martensite.

D'après la figure II.16, si un métal à l'état écroui 1 est soumis à un chauffage, on assiste à une recristallisation. On voit apparaître, au voisinage de la température de recristallisation θ_R , des germes 2 qui se développent en une structure équiaxe 3 dont les grains sont d'autant plus fins que le degré d'écrouissage initial est élevé. Cette structure est dite recristallisation primaire, se stabilise avec un léger grossissement du grain jusqu'à θ_s . À θ_s commence la surchauffe (recristallisation secondaire), les propriétés mécaniques évoluent en sens inverse des effets de l'écrouissage à savoir, le métal retrouve sa capacité d'allongement et la résistance que lui avait conférée l'écrouissage diminue.

Dans le cas d'un acier non ou faiblement allié, à cause de l'intervention de la transformation α/γ , qui a lieu à la température du point A3, légèrement au-dessus de θ_R α de recristallisation de la ferrite est limitée entre θ_R α et A3, car à partir de cette dernière température, la réaction α/γ produit un autre mécanisme, l'effet de normalisation qui limite la largeur de la zone adoucie. On montre dans la fig.II.17 que à cause de l'évolution du grain qui se trouve interrompue par la transformation α/γ , on trouve une structure à grains fins

encadrée par deux structures grossières, l'une résultant de la recristallisation et le début de la surchauffe de la ferrite, l'autre de la surchauffe de l'austénite qui engendre héréditairement un gros grain de ferrite au refroidissement

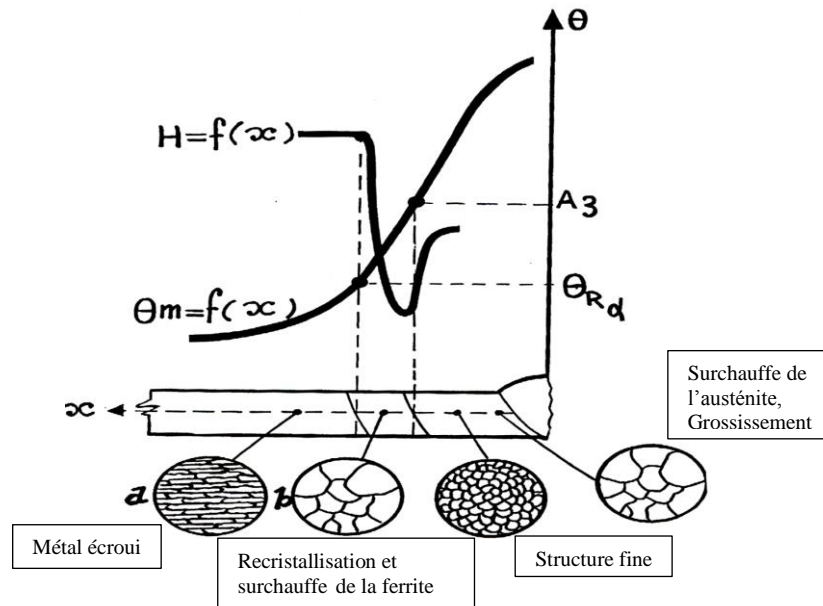


Figure II.16- représentation des modifications structurales au cours du chauffage.

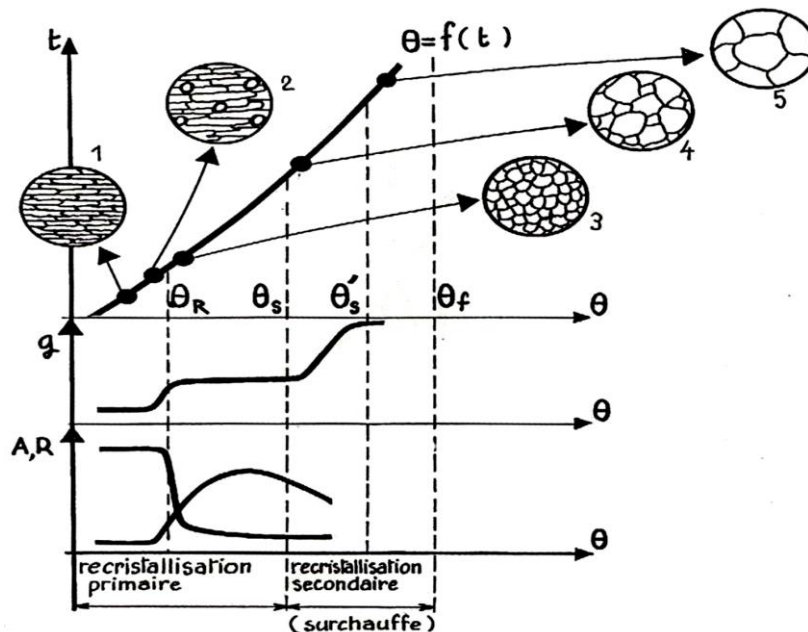


Fig.II.17 - Effet de la recristallisation et la surchauffe sur la structure d'un acier écaillé.

II.2.1.4 Transformation en phase solide au cours du soudage (refroidissement) :

Le diagramme de la figure. II.18 [16] représente aussi la succession des phénomènes au cours du refroidissement à partir de l'état austénitique obtenu à haute température, état qui, à l'état d'équilibre, se maintient jusqu'à la température de A1, de la ferrite, dite pro-

eutectoïde, qui dissout très peu de carbone, l'austénite s'enrichit en cet élément, jusqu'à atteindre la teneur eutectoïde (0.85%) à la température de A1, à laquelle elle donne naissance à un ensemble ferrite perlite constitué de ferrite pro-eutectoïde et de la perlite à 0.85%.

Ces constituants et leurs proportions ne sont conformes aux indications du diagramme Fe-C qu'en condition d'équilibre c'est à dire refroidissement lent, tout changement de ces conditions se traduit par des écarts par rapport aux indications du diagramme Fe-C, écarts qui peuvent affecter la proportion ou la nature des constituants ainsi que leur structure.

Pour rendre compte de l'influence de la loi de refroidissement à partir de l'état austénitique à une température donnée, le diagramme TRC ou pour un ensemble donné de lois de refroidissement à partir d'une même température d'austénitisation.

Ces diagrammes sont inutilisables pour les causes suivantes et qui sont des particularités du soudage :

- Les températures d'austénitisation variables, mais atteignent des valeurs élevées supérieures aux traitements thermiques.
- Le temps de chauffage est très court qu'en traitement thermique.

Il a fallu tracer des TRC spécialement pour le soudage, directement lisibles en fonction des conditions de soudage (énergie), elle mêmes souvent transposées en termes de temps de refroidissement correspondant aux diverses épaisseurs et températures initiales. Fig.II.19 [8] [II-14] représente les diagrammes TRCS

Les diagrammes TRC fig.II.19 [16] font apparaître pour chaque acier, trois modes distincts de transformation de l'austénite, dont l'apparition dépend pour un acier donné de la loi de refroidissement, à savoir :

1) Un mode dit perlitique : (ou Ar') Les constituants qui apparaissent sont conformes au diagramme Fe-Fe₃C et apparaissent dans l'ordre indiqué par ce dernier, à savoir, successivement : ferrite pro-eutectoïde puis agrégats ferrite cémentite qui résulte d'un mécanisme de germination et croissance de la cémentite. Ce mode qui, met en oeuvre la diffusion prévaut pour les refroidissements lents (partie droite du diagramme TRC).

2) Un mode dit bainitique : (ou Ar'') Dans ce mode intervient la diffusion dont la constitution finale (ferrite et cémentite) qui est ici, conforme (aux proportions près) à celle du diagramme Fe -Fe₃C mais de chronologie différente, la ferrite (par germination et croissance) à partir de l'austénite en retenant momentanément le carbone en solution sursaturée, puis ce carbone précipite sous forme finement dispersée. Ce mode à lieu pour les lois de refroidissement intermédiaires, il présente plusieurs variantes structurales dont certaines la rattachent à la transformation perlitique (bainite supérieure, ferrite aciculaire), d'autres à la

transformation martensitique (bainite inférieure).

3) Un mode dit martensitique : (ou Ar'') Se traduit par la précipitation directe, sans diffusion d'un constituant appelé martensite, dont la teneur en carbone est la même que celle de l'austénite mère et qui apparaît brutalement, par fractions échelonnées en fonction de température décroissante, à partir de Ms jusqu'à Mf.

La transformation martensitique se produit pour les lois de refroidissement les plus rapides (partie gauche du diagramme TRC) ces modalités de refroidissement se produisent dans des domaines délimités par des «lois critiques » FigII.18 diagrammes classiques de refroidissement, où «temps de refroidissement critiques » diagrammes TRC soudage.

Le mode perlitique intervient au niveau le plus élevé (en dessous A1)

Le mode bainitique au niveau moyen

Le mode martensitique au niveau inférieur

C'est la raison pour laquelle en soudage, les études sont consacrées aux transformations perlitiques et martensitiques.

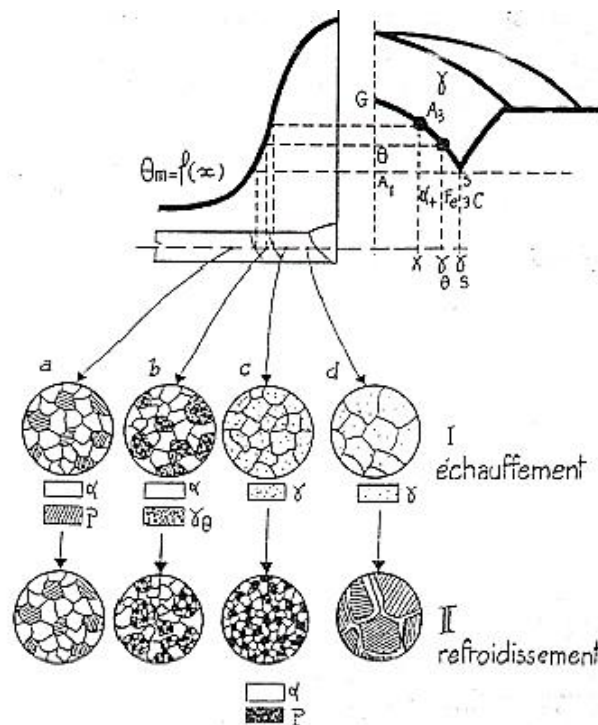


Figure.II.18 phénomènes survenant lors de l'échauffement et du refroidissement en soudage.

[16].

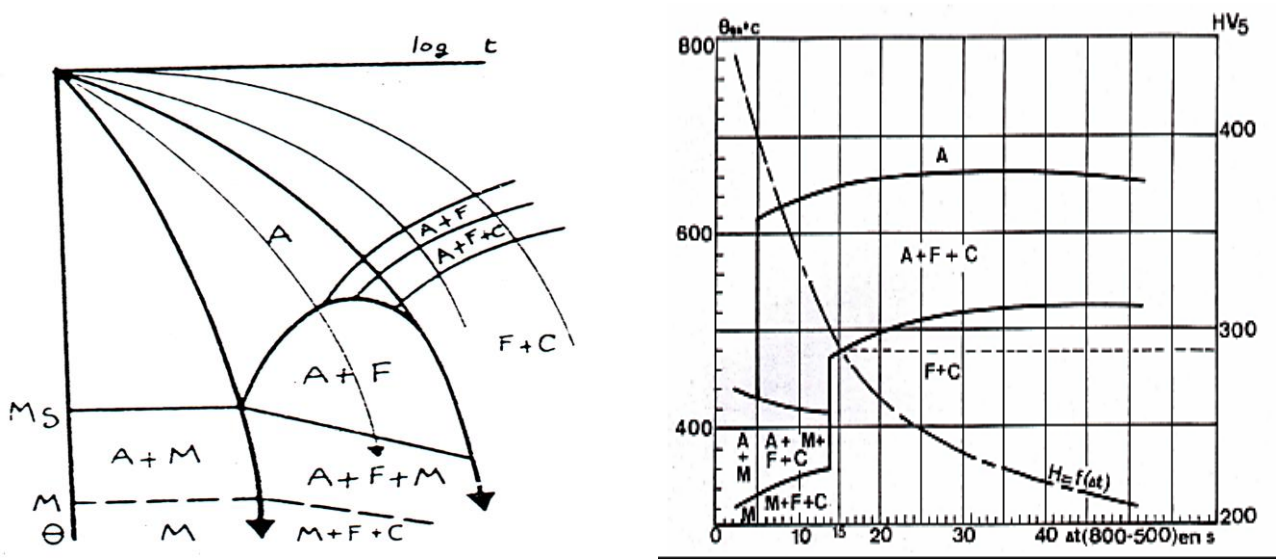


Figure. II.19 –diagramme TRC.

II.2.1.5 Particularités de la transformation perlitiques en soudage :

1) Soudage en une seule passe:

Les conditions qui permettent au mode perlitique d’intervenir au refroidissement sont; la vitesse de refroidissement et e la grosseur initiale du grain de l’austénite qui se transforme.

Si ce grain est relativement fin, comme c’est le cas à la périphérie de la zone austénitisée par diffusion qui donne lieu à la séparation de la ferrite pro-eutectoïde puis à la formation de la perlite lamellaire (agrégat $Fe \alpha + Fe_3C$) voir FigII.20 a [10] [5], qui conduisent à une structure a grains, comparable, dans le cas des soudures, à celle du métal de base (ou même, éventuellement, plus fine) si ce dernier était initialement à l’état recuit. On constate que l’espace inter lamellaire (distance entre lamelles $Fe \alpha$ et Fe_3C) est plus faible dans la ZAT que dans le métal de base qui s’est refroidi lentement car l’espace diminue si la vitesse de refroidissement augmente, donc en résulte un durcissement modéré par rapport au métal de base.

Si le grain de l’austénite est grossier, comme c’est le cas dans la zone de surchauffe, le processus de diffusion se trouve gêné et la séparation de la ferrite pro-eutectoïde tend a se faire aux joints de grains de l’austénite et à l’intérieur des grains, ou elle se dispose suivant le plan de plus grande densité atomique, l’agrégat lamellaire ($Fe \alpha + Fe_3C$) colmatant ensuite le volume délimité par ces plans voir FigII.20 b. Ainsi se forme une structure apparentée à la structure de widmanstaetten caractérisée par la disposition géométrique des plages de ferrite, qui résulte de leur orientation selon des plans cristallographiques de l’austénite mère. Ce processus de transformation entraîne l’hérédité structurale.

Les limites des grains d'austénite surchauffée qui ont donné naissance à cette structure sont soulignées par le réseau intergranulaire de ferrite pro-eutectoïde, cependant que les plages intra granulaires héritent de celle des grains d'austénite mère.

Dans le métal fondu la transformation ne donne jamais naissance à une structure pareille à celle décrite plus haut même lorsqu'elle a lieu selon le mode perlitique. L'orientation des grains de solidification, ainsi que leurs dimensions, leur hétérogénéité chimique fournissent les conditions pour qu'apparaissent une structure de zone de surchauffe à savoir apparition de ferrite pro-eutectoïde aux joints et à l'intérieur des grains d'austénite et cela se produit compte tenu de l'épitaxie. (FigII.20 c).

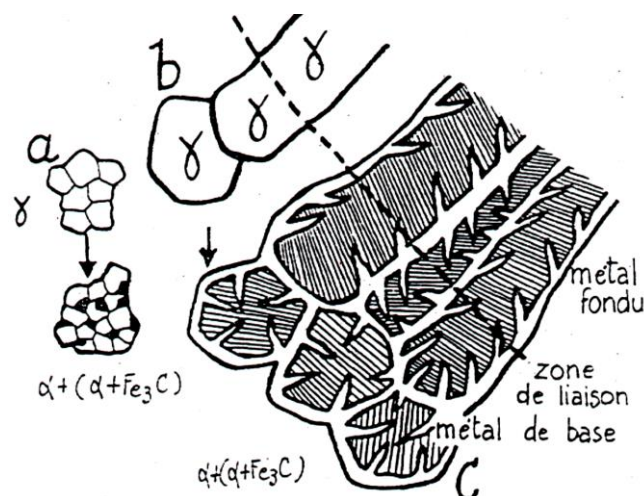


Figure. II.20 - Transformation perlitique en soudage.

2) Effets sur les propriétés mécaniques:

Les transformations à l'échauffement puis au refroidissement dans la ZAT se traduisent par une variation des propriétés mécaniques par rapport à celles du métal de base. Si ce dernier est à l'état initial (recuit) : la diminution de l'espace inter lamellaire de l'agrégat perlitique s'accompagne d'une augmentation de la dureté (limite élastique, résistance à la traction) et d'une diminution de la résilience (augmentation de la température de transition) dans la zone de surchauffe.

Cette relative fragilisation, qu'accompagne une certaine fragilité de la zone fondue est due à la ferrite pro-eutectoïde, est d'autant plus marquée que la surchauffe est plus intense (énergie de soudage plus élevée).

3) Solution vis à vis de la fragilisation:

Il y a deux possibilités qui aboutissent au même résultat à savoir, éviter la précipitation de ferrite pro eutectoïde massive aux joints de grains ou à l'intérieur des grains d'austénite en la remplaçant par une ferrite plus fine (ferrite aciculaire) très apparentée à la bainite

supérieure. Normalisation à une température supérieure légèrement à A3 suivie d'un refroidissement à l'air, cette austénitisation efface la structure antérieure dans la ZF ainsi que dans la zone surchauffée. Pour éviter le traitement thermique, on utilise des éléments d'addition qui réduisent le grossissement du grain d'austénite dans la ZF et/ou on modifie le processus de précipitation de la ferrite au cours du refroidissement.

II.2.1.6 Soudure en plusieurs passes:

Le cycle thermique en soudage en plusieurs passes, provoque une ré-austénitisation, dans toute une partie du métal déposé et transformé ainsi que dans la ZAT, et par suite une nouvelle transformation au refroidissement ; ce qui peut se produire une ou plusieurs fois en un seul point donné, selon la disposition et l'importance des passes, jusqu'à ce que la température A3 n'y soit plus atteinte.

Chaque ré-austénitisation, entraîne, si l'acier et les conditions de soudage le permettent, une régénération structurale qui se traduit par un affinage des grains de ferrite et de perlite résultant de la passe antérieure, cet effet est favorisé dans le métal fondu par une tendance de ce dernier à la surchauffe [16] [14].

Propriétés mécaniques: La résilience est supérieure à celle d'une seule passe car le métal se transforme dans le domaine perlitique.

II.2.2 A retenir :

La microstructure de la ZAT dans le cas de la soudure multi passe dépend :

- Des pics de température.
- De la cinétique de refroidissement.
- De la composition chimique du matériau à souder.
- Du nombre de passes.
- Des conditions de soudage (vitesse de soudage, intensité de soudage).

Les constituants structuraux qui existent dans la ZAT d'une soudure pour le cas des aciers ferritiques, On distingue :

1) Ferrite pro-eutectoïde :

a) Ferrite aux joints des grains: La précipitation de la ferrite s'effectue à partir des joints des anciens grains austénitiques. Ces cristaux forment un réseau qui dessine la structure primaire.

b) ferrite pro-eutectoïde polygonale: C'est une seconde forme de ferrite pro-eutectoïde

correspond aux cristaux de ferrite ayant germé de manière intra granulaire. Il présente une forme équiaxe. La transformation de l'austénite en ferrite polygonale est accompagnée d'un important affinage du grain (un grain austénitique donne naissance à plusieurs grains ferritiques)

c)-. Ferrite aciculaire : Cette ferrite à un aspect plus équiaxe et elle s'obtient pour des vitesses de refroidissement et des teneurs en carbone croissantes de l'austénite. Ces aiguilles de ferrite croissent à partir des anciens joints austénitiques vers le centre et se présentent avec des orientations très marquées.

De telles structures où les cristaux de la phase précipitée ont une orientation définie par rapport à ceux de la matrice dont ils proviennent, sont des structures du type de Widmannstaetten (Fig. II.8.2)

2) Bainite :

a). Bainite supérieure : (fig. d), Elle se forme aux températures intermédiaires de la transformation bainitique .dans les aciers de composition voisine de l'eutectoïde, la bainite apparaît sous la forme d'un agrégat de ferrite et de cémentite. La cémentite se présente en petits bâtonnets très différents de lamelles de la perlite.

On admet que la ferrite qui se forme la première croît sous la forme d'une aiguille, rejetant le carbone en excès sur ses flancs et donnant lieu à l'apparition de cémentite qui précipite dans l'austénite adjacente. La cellule ferritique se développe ensuite latéralement au détriment de l'austénite appauvrie en carbone. Une nouvelle aiguille ferritique, adjacente à la première, se développe à son tour et ainsi de suite.

b) Bainite inférieure : (fig. c), C'est une phase qui apparaît à une température inférieure à la transformation bainitique isotherme et est formée de plaquettes beaucoup plus fines que celles définies ci-dessus.

3) Martensite : (fig. e), La martensite est un constituant qui est obtenu à partir de l'austénite par un refroidissement très rapide et la réaction ne nécessite aucune diffusion atomique. la martensite fragilise la structure La microstructure de la zone fondue elle dépend de la teneur en carbone en premier lieu et de la cinétique de refroidissement. On peut aboutir dans le cas des aciers à faible taux de carbone à une structure martensitique si le refroidissement est rapide ou de ferrite aciculaire dans d'autres cas, mais à une ferrite régénérée complètement si le refroidissement est lent.

Les propriétés mécaniques évoluent en faveur d'une augmentation de la dureté (limite élastique, résistance à la traction) et d'une diminution de la résilience (augmentation de la température de transition) dans la zone de surchauffe s'accompagne d'une fragilité de la zone

fondu t due à la ferrite pro-eutectoïde.



Fig.21.a - ferrite aux joints

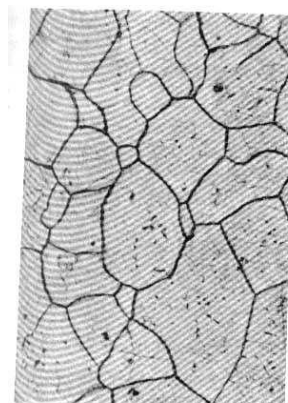


Fig.21.b - ferrite polygonale



Fig.21.c - Bainite inférieure

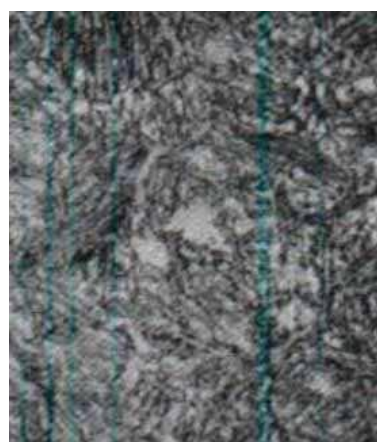


Fig.21.d - Bainite supérieure



Fig.21.e. - Martensite

CHAPITRE III : APERCU TECHNOLOGIQUE DU SOUDAGE MIG/MAG.

III.1 présentation du procédé :

Les principaux éléments constituant une installation de soudage MIG sont représentés sur la figure III.1 La bobine de fil-électrode (3), qui constitue aussi le métal d'apport, est placée dans un dévidoir motorisé (4) entraînant le fil vers la sortie de la buse à gaz (11) de la torche à travers la gaine guide-fil jusqu'au tube contact (9), relié à l'une des bornes du générateur de soudage. Une alimentation en gaz de protection est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur. En configuration manuelle (on parle alors de soudage semi-automatique car le dévidage de fil d'apport est automatique), le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche, et le dévidage du fil-électrode commence jusqu'à ce qu'il entre en contact avec la pièce à souder, reliée à la seconde borne du générateur de soudage. Sous l'effet de la différence de potentiel imposée entre les bornes du générateur, un courant électrique traverse le fil électrode lorsqu'il entre en contact avec la pièce. Du fait de l'échauffement par effet joule, l'extrémité du fil fond puis se vaporise, produisant un plasma de vapeurs métalliques, remplacé par un plasma de gaz de soudage.

Une fois amorcé, l'arc électrique, constitué d'une colonne de gaz ionisé, doit être entretenu en maintenant un courant suffisant. On parle de polarité directe ou négative lorsque la torche est reliée à la borne négative (cathode) du générateur, et de polarité inverse ou positive lorsque l'électrode est l'anode. C'est cette dernière polarité qui est le plus souvent utilisée en soudage MIG. La longueur de la partie terminale du fil (2) située entre le tube contact et l'extrémité de l'arc électrique, couramment désignée par le terme anglais "stick-out", doit être suffisante pour éviter un échauffement excessif du tube contact par l'arc électrique. Le soudage MIG présente l'avantage d'être facilement automatisable et utilisable en robotique.

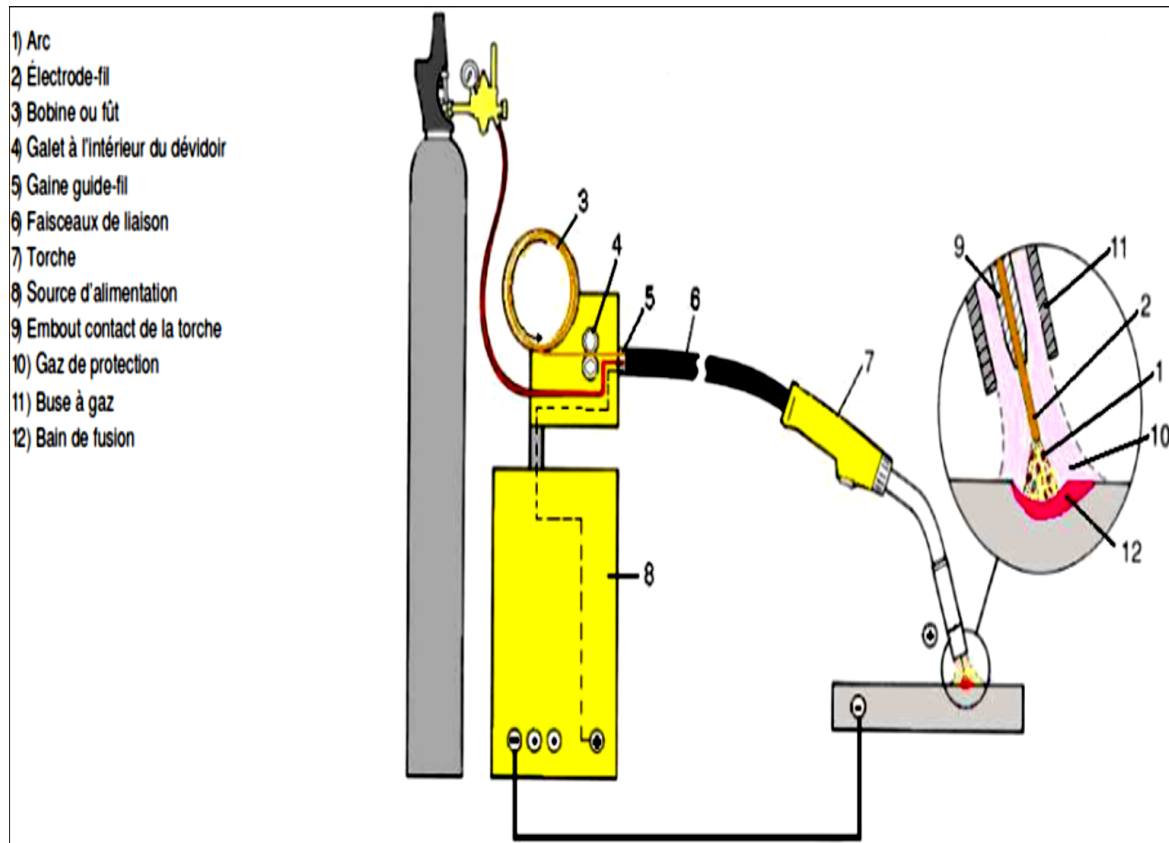


Figure III.1 : Installation de soudage MIG [2].

Le soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients qui sont synthétisés dans le tableau suivant (Tableau 1) :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Forte productivité. - Grande vitesse de soudage (gain de temps). - Taux de dépôt de métal important. - Limitation des déformations. - Nombre de reprises de soudure limité. - Pas de laitier à enlever. - Large gamme d'épaisseur. - Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques. - Soudage dans toutes les positions. - Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit. - Aspect de cordon correct. - Procédé automatisable. - Fatigue moindre du soudeur 	<ul style="list-style-type: none"> - Entretien fréquent et minutieux. - Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures. - Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate. En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail

III.2 L'arc électrique

L'arc électrique est constitué d'une colonne de gaz ionisé qui est le siège de mouvements de particules chargées entre deux électrodes, portées à des potentiels différents adaptés [2]. L'arc électrique est composé de trois zones distinctes (Figure III.2).

La cathode est le siège d'une émission électronique d'autant plus importante que l'intensité du courant est élevée. Les électrons émis ionisent les atomes du gaz, formant des ions positifs ou négatifs, selon la nature des atomes. La zone cathodique, appelée " zone de transition cathodique ", est le siège d'une chute de potentiel importante, associée à l'énergie d'extraction des électrons, qui dépend peu de l'intensité ou de la différence de potentielle totale entre les électrodes. La partie centrale de l'arc électrique, la colonne d'arc, se comporte comme un conducteur gazeux. Le potentiel varie linéairement dans cette zone. Pour une hauteur d'arc fixée, la différence de potentiel dans la colonne d'arc est liée au potentiel d'ionisation du gaz.

Enfin, la zone de transition anodique, proche de l'anode, est également le siège d'une chute de potentiel, indépendante de la longueur de l'arc électrique. L'anode (généralement le fil d'apport en soudage MIG) est soumise au bombardement électronique et s'échauffe sous l'effet de la chaleur de condensation des électrons.

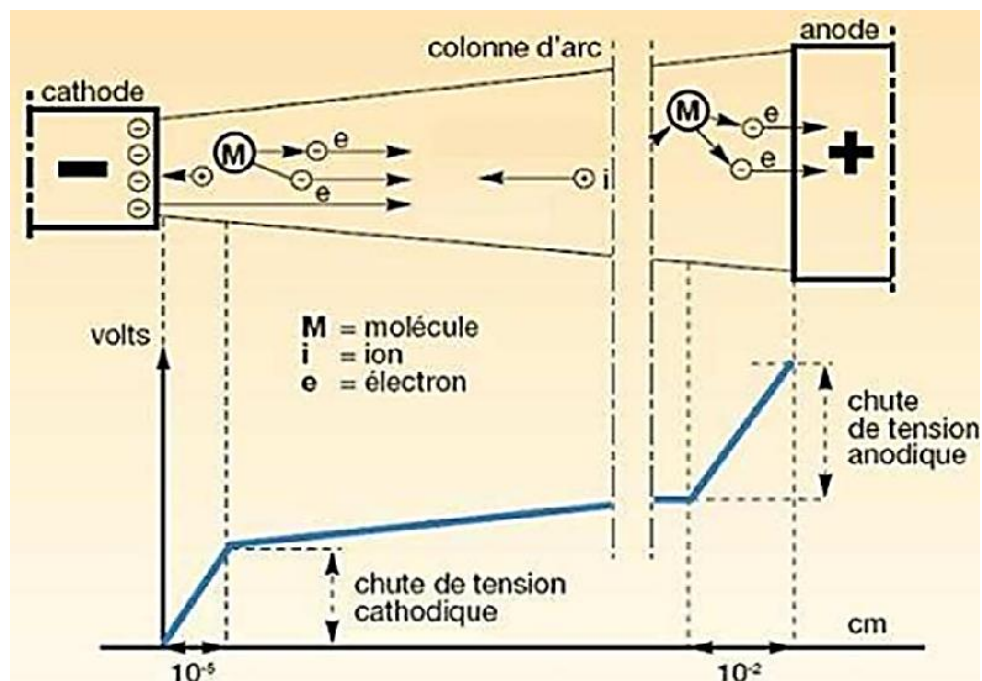


Figure III.2 : Représentation schématique de l'arc électrique et de la variation de tension [2].

III.3 Les principaux modes de transfert de métal en MIG

En soudage MIG, le métal d'apport fond à l'extrémité du fil et est ensuite "transféré" dans le bain fondu de la soudure. Selon le niveau d'énergie (tension et intensité), les mécanismes de transfert du métal d'apport fondu diffèrent. On retrouve généralement trois principaux modes de transfert en courant lisse.

Transfert par court-circuit (short arc) :

Pour de faibles intensités (50-200 A) et tensions (15-20 V) de soudage, l'arc formé est très court et le transfert de métal du fil électrode vers la pièce se fait de manière discontinue, par une succession très rapide de courts-circuits (50 à 200 par seconde) entre le fil et le bain de fusion (Figure III.3).

La goutte formée sous l'effet du bombardement électronique de l'extrémité du fil et de l'échauffement par effet Joule de la partie terminale du fil grossit jusqu'à venir en contact avec le bain de fusion, produisant un court-circuit et l'extinction de l'arc.

La tension chute alors, tandis que l'intensité augmente, produisant sous l'effet des forces de Lorentz un pincement de la partie liquide du fil métallique, dont la section diminue jusqu'au détachement de la goutte liquide. La tension augmente alors brusquement et l'intensité diminue à nouveau, et l'arc se rétablit jusqu'au court-circuit suivant.

L'énergie apportée à la pièce étant assez limitée avec ce mode de transfert, il convient donc bien pour souder les tôles minces et réduire les déformations dues à l'échauffement.



Figure. III.3: Transfert par court-circuit [2].

Transfert par pulvérisation (spray arc) :

Pour des énergies de soudage plus élevées (intensité supérieure à 200 A et tension comprise entre 20 et 40 V), l'arc devient plus long et stable, et l'extrémité du fil fondu prend une forme conique allongée (Figure III.4).

Sous l'effet de l'augmentation des forces électromagnétiques, le métal fondu subit un fort pincement qui conduit au détachement de fines gouttelettes, de diamètre inférieur ou égal à celui du fil, qui sont projetées à grande vitesse dans le bain de fusion en suivant l'axe du fil. On parle alors de transfert par pulvérisation axiale (Figure III.4a). Le cordon résultant est

généralement plus large et plus pénétrant qu'en régime de transfert par court-circuit.

Si l'intensité du courant augmente encore, l'extrémité du fil-électrode peut prendre la forme d'une veine liquide droite (streaming spray) orientée vers le bain de fusion, au bout de laquelle de fines gouttelettes se forment et se détachent à une fréquence supérieure à celle rencontrée en régime de transfert par pulvérisation axiale (Figure III.4b).

Pour de très fortes intensités, la veine liquide devient de plus en plus fine et les forces électromagnétiques, très importantes, induisent un mouvement de rotation de la veine liquide, produisant beaucoup de projections (Figure III.4c). On appelle ce régime le transfert par veine liquide rotative (rotating spray).

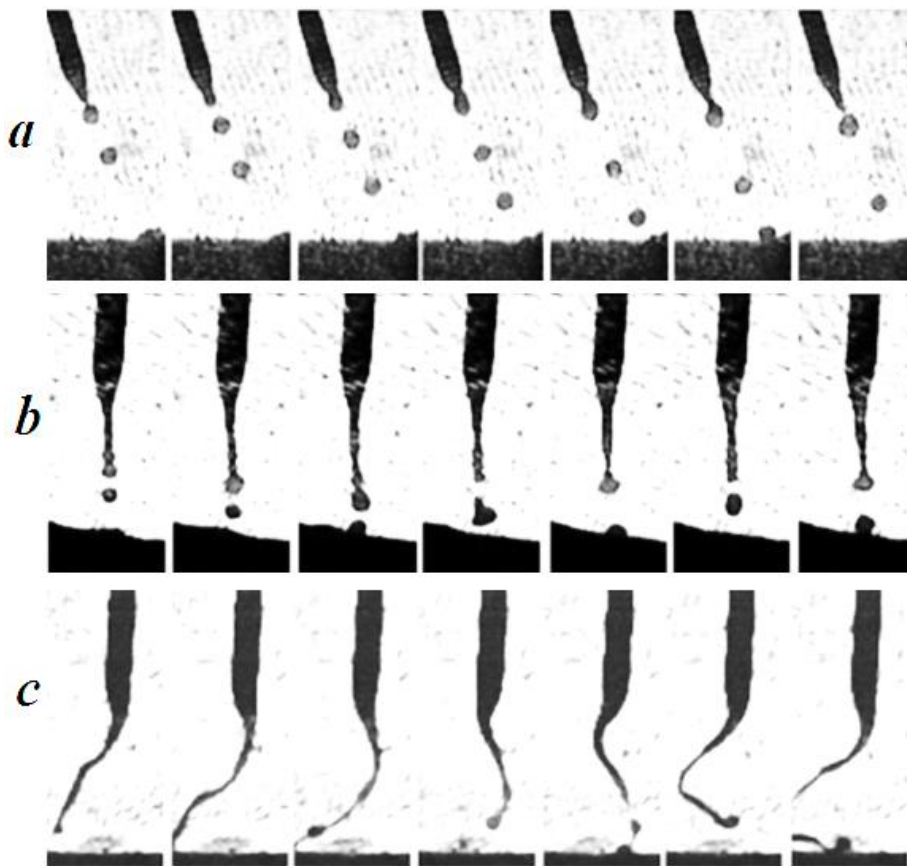


Figure III.4: Transferts de métal par pulvérisation [2] :

Transfert par pulvérisation axiale, (b) Transfert par veine liquide droite, (c) Transfert par veine liquide rotative.

Transfert globulaire (globular Transfer) :

Ce régime est obtenu avec une intensité inférieure à celle produisant le transfert par pulvérisation, et une tension supérieure à celle du transfert par court-circuit. Il se caractérise par le transfert de larges gouttes de métal, de diamètre égal à 1,5 à 3 fois le diamètre du fil d'apport, à faible fréquence (1 à 10 gouttes par seconde). Les gouttes formées à l'extrémité du

fil d'apport grossissent lentement jusqu'à leur détachement lorsque les effets de la gravité et des forces de Lorentz deviennent supérieurs aux forces de tension superficielle qui maintiennent la goutte au bout de fil (Figure III.5). La goutte suit alors une trajectoire irrégulière qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Ce mode instable génère de nombreuses projections et une faible profondeur de pénétration.

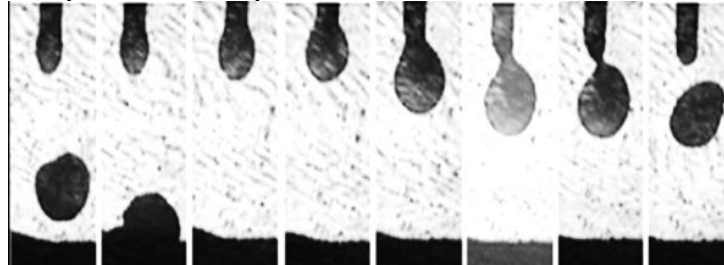


Figure III.5: Transfert globulaire [2].

La figure III.6 montre une cartographie des différents modes de transfert cités en fonction des intensités et tensions de soudage

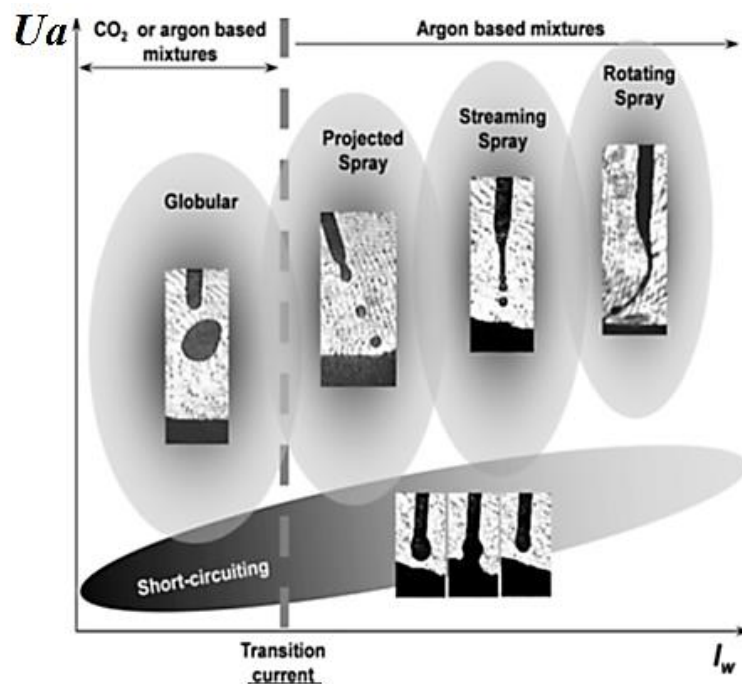


Figure III.6: Carte des modes de transfert de métal en soudage MIG [2].

Il faut ajouter à ces différents modes de transfert en courant lisse le transfert en régime de courant pulsé. Dans ce régime, une courte pulsation à haute intensité produit la fusion et le détachement par pincement électromagnétique d'une gouttelette de métal d'apport, qui transite ensuite dans l'arc sous un niveau d'intensité plus faible. Ce régime permet d'avoir un transfert aussi régulier qu'en régime de pulvérisation axiale (Figure III.4a), mais avec des niveaux d'énergie moyens plus faibles, ce qui permet de souder des pièces de faible épaisseur

ou de minimiser les distorsions.

III.4 Les paramètres opératoires du soudage MIG/MAG

Pour le procédé de soudage MIG-MAG, différents paramètres opératoires peuvent être ajustés pour une optimisation des performances. Ces paramètres ont une influence sur la géométrie des cordons de soudure:

- **Vitesse de soudage** : l'augmentation de la vitesse de soudage à une intensité fixe conduit à des bains fondus moins pénétrés. En augmentant la vitesse de soudage, on diminue aussi la largeur du cordon, la surépaisseur et la dilution.
- **Courant** : l'augmentation du courant de soudage conduit à une élévation de la température à la surface de la pièce ce qui induit une influence sur les caractéristiques géométriques du cordon de soudure.
- **Tension** : l'augmentation de la tension de soudage entraîne une modification de la géométrie des cordons de soudure. On peut noter que la tension d'arc doit être maintenue constante et/ou réglée avec précision.
- **Matériau et diamètre du fil d'apport** : le matériau du fil de soudage correspond au métal de base de la pièce et est défini en fonction des caractéristiques du métal déposé. Le diamètre du fil est défini par la quantité de matière que l'on souhaite apporter.
- **Vitesse d'avance du fil d'apport** : la vitesse d'avance du fil d'apport définit la quantité de matière apportée.
- **Nature du gaz de protection et son débit** : le gaz de protection va permettre de définir les différentes phases de mode du détachement du fil (court-circuit, globulaire et spray). Par exemple, la composition du gaz va permettre de diminuer la phase de régime globulaire qui est un mode instable de l'arc. La composition du gaz joue aussi un rôle sur la protection du matériau à souder (éviter l'oxydation).
- **Angle d'inclinaison de la torche** : l'inclinaison de la torche de soudage influence essentiellement la géométrie de l'arc.
- **Distance entre la buse de sortie de fil et la pièce à souder** : cette distance définit la hauteur d'arc qui influe sur la répartition de l'arc.
- **Sens de déplacement de la torche** : tiré ou poussé (Figure III.1).[20]

III.5 synthèse de quelques travaux relatifs au soudage MIG-MAG

Nous avons souligné que les paramètres opératoires et phénomènes physiques intervenant lors du procédé de soudage MIG-MAG sont nombreux. L'influence de ces

différents phénomènes physiques sur la géométrie du cordon et sur les caractéristiques de l'arc a été étudiée à travers des travaux expérimentaux et numériques. Les paramètres rendement d'arc, pression d'arc et l'étude du transfert de métal d'apport ont fait part d'une attention particulière au vu de l'importance de ces données dans la mise en place de la modélisation numérique du soudage MIG-MAG. L'objet de cette section n'est pas d'en faire une liste exhaustive mais de présenter les articles les plus récents et présentant un intérêt particulier.

Les articles traitant majoritairement de résultats expérimentaux sont détaillés dans une première partie, ceux traitant essentiellement de la modélisation de l'arc dans une seconde partie.

Chapitre IV: Procédure expérimentale

IV.1. Introduction:

Les essais mécaniques ont pour but le contrôle des assemblages du point de vue des caractéristiques mécaniques dans les différentes zones de soudage. Les essais sont conduits dans le respect des normes relatives et sont complétés par les examens macrographiques pour la pénétration et micrographiques pour l'étude des transformations structurales dans la ZF et la ZAT.

Parmi les objectifs de notre travail on peut citer, en premier lieu, la compréhension des modifications structurales causées par le phénomène thermique accompagnant le processus de soudage, en deuxième, l'étude d'un phénomène post-soudage qui est la fissuration, qu'on aborde de deux manières différentes, la première liant les caractéristiques du métal au phénomène de fissuration, la deuxième relevant du contrôle industriel.

Cela se traduit par l'étude micrographique du joint, de la zone affectée thermiquement et du métal de base, étude complétée par le relevé de la micro-dureté dans les mêmes zones pour confirmer les modifications structurales et par les essais de résilience, on doit pouvoir connaître la ténacité du métal d'apport et en savoir sur l'aptitude à la fissuration et ses mécanismes.

La partie relative au contrôle non destructif sera purement quantitative, reliant la taille de la fissure par rapport à l'épaisseur de la pièce au signal récupéré au niveau des récepteurs seulement on est confronté à deux problèmes, le premier est relatif à l'interprétation des signaux, car on ne peut différencier une fissure d'un autre obstacle en soudage surtout s'il est minuscule, cela dépend des compétences de l'opérateur, le deuxième c'est que l'obtention d'une fissure est purement du sort du hasard qu'on ne peut dimensionner selon nos besoins non plus. Pour surmonter ces obstacles on a pensé à travailler sur des fissures de formes facilement perceptibles qu'on dimensionne selon les besoins de notre étude et l'objectif serait donc de valider une technique de perception et dimensionnement des défauts, qu'il faut penser à l'améliorer dans des travaux futurs.

IV.2- Les Matériaux utilisés :**IV.2.1. Métal de base :**

Le métal de base choisi est le E36-3 (NFA 36-201), acier ordinaire normalisé, largement employé dans la construction dans l'industrie des châssis, vases, structures de machines. Les éprouvettes sont découpées dans le brut présenté sous forme de tôles laminées à chaud au niveau du service de débitage du Complexe "ACI" M'sila.

Les informations techniques relatifs aux matériaux utilisées dans la préparation des éprouvettes sont données par le fournisseur et sont ensuite corroborés par l'analyse chimique (spectrométrie et carbométrie) au niveau les laboratoires Algal+ ex Metanof.

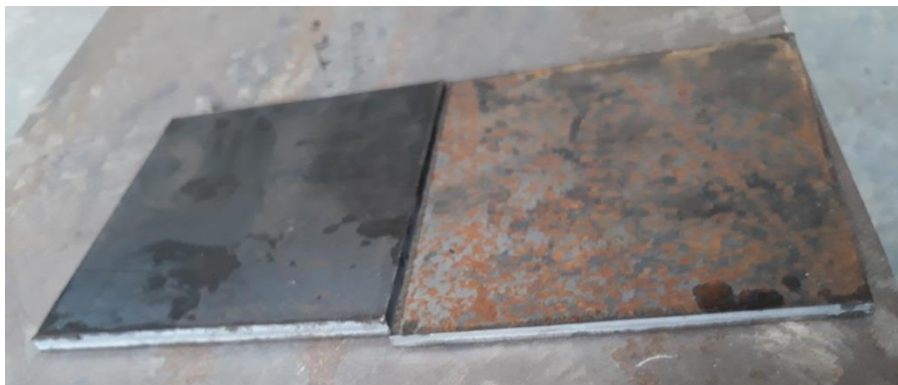


Figure IV-1: Métal de base en tôles découpées

Analyse chimique :

- Carbométrie
- Spectroscopie

a- La Carbométrie :

L'essai consiste en un prélèvement de copeaux de la nuance à analyser. Ceux –ci sont introduits sur une nacelle en céramique dans un four à induction maintenu à 1300°C. Un passage d'oxygène purifié dans deux flacons laveurs, l'un contenant de l'acide sulfurique (H₂SO₄) à 96% et l'autre de la potasse (KOH) à 50%, permet alors l'oxydation des copeaux d'aciers ainsi que la formation de dioxyde de carbone. Pour le dosage de carbone, les gaz de combustion ainsi que l'oxygène en excès sont recueillis et mesurés dans une burette à gaz (sur laquelle est fixée une réglette graduée de 0 à 1.5)

Le dioxyde de carbone est ensuite absorbé dans une lessive de potasse (L'introduction du gaz dans une burette à deux reprises est indispensable afin de garantir une absorption complète de CO₂).

Le pourcentage en carbone dans la nuance analysée est alors obtenu par la relation suivante :

$$\%C = F \times V \quad \text{Eq (IV.1)}$$

Où :

V : Valeur lue sur la colonne et qui représente la différence de volume sur la réglette graduée

F : Facteur de correction qui tient compte de deux paramètres P et T

P : Pression atmosphérique régnant au sein du laboratoire obtenu sur un baromètre gradué en torr.

T : Température dans le laboratoire.

Il faut signaler qu'un étalonnage de l'appareil est nécessaire avant de procéder à l'analyse des nuances. Pour cela un essai a été effectué sur un échantillon dont le taux de carbone est connu (1,30%) cette opération donne une valeur de 1,32 % ce qui indique que l'appareil est calibré à 0,02% près.

b- La Spectroscopie :

L'analyse spectrale prend une part exceptionnelle à côté des examens mécaniques et chimiques. En peu de temps, elle livre des informations sur l'échantillon en déterminant avec certitude aussi bien les concentrations importantes en éléments d'alliages, que pour les petites teneurs en impuretés indésirables. Elle est l'un des moyens les plus rationnels pour le contrôle des nuances en usine.

IV.2.2. Composition chimique: La composition chimique du métal de base est présentée dans le tableau suivant :

Eléments	C %	Mn %	Si %	P %	Cr %	Mo %	V %	Al %	Ti %	Zr %	Ni %
pourcentages	0.22 max	1.33 max	1.5 max	0.05 max	0.022 max	-	-	-	-	-	0.01 max

IV.2.3. Caractéristiques mécaniques: Les caractéristiques mécaniques du métal de base sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	σ_m (N/mm ²)	σ_e (N/mm ²)	A % min	HB ₃₀	Kv min (J) $\pm 0^\circ\text{C}$
Valeur	520 – 620	360	16	155 - 185	27

IV.3.Métal d'apport:

Le métal d'apport est un fil de soudure SG2 en bobine de 1,2 mm de diamètre et 15kg (ISO 14341-A(2008)) ou (AWS A5.18), présenté selon le producteur ;

- Fil de soudure pour acier
- Gaz de protection à utiliser: gaz mixte
- Fil cuivré alliage SG2
- Poids: 15 kg
- Epaisseur: 1,2 mm
- Dia.: 300 mm



Figure IV-2 : métal d'apport

IV.3.1. Compositions chimiques : La composition chimique du métal d'apport est présentée dans le tableau suivant :

Eléments	C	Mn	Si	P	Cr	Mo	Ni	Al	Ti	Cu	S %
pourcentage %	0,074	1,475	0,863	0,018	N/A	-	N/A	-	-	0,26	0,020

IV.3.2. Caractéristiques mécaniques : Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	σ_m (MPa)	σ_e (MPa)	Allongement de rupture A%	Résistance aux entailles Kv min. (J) -30°C
Valeur	535	426	29	88

IV.4. Matériel de soudage :

Le poste de soudage utilisé pour la réalisation des cordons de soudure est un générateur **POWERTEC 425S** de LINCOLN ELECTRIC. C'est un générateur de courant de soudage continu à tension constante développant 420Ampères.

Il fonctionne à une alimentation triphasée, que ce soit avec les dévidoirs LF-22, LF-24M ou LF-24MPRO, le générateur POWERTEC 425S est conçu pour le soudage MIG/MAG semi-automatique pour des applications lourdes sur acier, inox et Aluminium ainsi que l'utilisation de fil fourré sous mélange gazeux Argon/CO2 ou avec 100% CO2.

Il offre de nombreuses positions pour un réglage précis de la tension grâce au self de réglage pour un meilleur comportement de l'arc. Il est fabriqué conformément aux normes de sécurité et de fiabilité **IEC974-1 et CE**.



Figure IV-3 : matériel utilisé pour le soudage.

IV.4.1. Paramètres de soudage :

Le choix des variables de soudage dépend du procédé de soudage et des exigences de l'ensemble soudé. A chaque procédé de soudage correspond des variables qu'il faut respecter qui sont :

- Energie de soudage (courant et tension)
- Dimensions du fil de soudage $\varnothing = 1.2\text{mm}$
- Vitesse de soudage. (Réglable selon le poste de soudage)
- Dimensions du cordon.

Pour notre travail nous avons préparé 4 morceaux de tôles d'épaisseurs différentes auxquelles nous avons varié les conditions de soudage. Il faut rappeler que nous réglons les paramètres initiaux avant d'entamer le soudage mais le poste est doté de système de self réglage qui intervient pour faire varier le courant et la tension durant le soudage pour garantir un soudage idéal.

Les variables pour chaque échantillon préparé sont présentes dans les tableaux ci-dessous :

Echantillon N°1 : épaisseur de la tôle =4mm

Vitesse du poste : position B. Vitesse de défilement du fil : 4m/min, Conditions initiales :
A=202 ; V= 0.7

Ébauche :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
250	0.9
131	0.5
240	0.8
230	0.9
234	0.9
222	0.9
235	0.9
244	0.9
276	1.0

Finition :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
52	0.3
207	0.7
13	0.1
204	0.7
240	0.9
241	0.9
246	0.9

Echantillon N°2 : épaisseur de la tôle =6mm

Vitesse du poste : C3, vitesse de défilement du fil : 5m/min, Conditions initiales : A=243 ;
V=0.99

Ébauche :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
868	0.9
68	0.4
159	0.6
241	0.8
119	0.5
216	0.8

Finition :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
259	0.9
119	0.5
60	0.3
255	0.9
254	0.9
262	1.0
249	0.9
257	1.0
255	0.9
247	0.9
251	0.9
243	0.9

Echantillon N°3 : épaisseur de la tôle =6mm

Vitesse du poste : C3, vitesse de défilement du fil :5.5m/min, Conditions initiales : A=216 ;
V=0.8

Ébauche :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
56	0.2
262	1.0
272	1.0
270	1.0
264	1.0
269	1.0
260	1.0
262	0.9
264	0.9

Finition :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
85	0.4
272	0.8
260	0.9
267	0.9
293	1.0
277	1.0

Echantillon N°4 : épaisseur de la tôle = 4mm

Vitesse du poste : A10, vitesse de défilement du fil : 2 m/min. Conditions initiales : A=105 ; V= 0.5

Ébauche :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
02	0.1
118	0.4
133	0.6
74	0.3
131	0.6
120	0.5
76	0.3
108	0.5
99	0.5

Finition :

Courant (Ampères)	Tension (Volts)
94	0.5
93	0.6
84	0.3
86	0.5
95	0.4

IV.5. Préparation des éprouvettes :

La qualité du joint dépend du soin apporté à la préparation des pièces à souder. Une bonne préparation ne doit pas altérer sensiblement ; ni les propriétés mécaniques, ni les propriétés métallurgiques des pièces.

L'origine des échantillons est de produits plats de laminage à chaud de 6mm et de 12mm d'épaisseur préparés par découpage puis chanfreinés et soudés selon la figure ci-dessous.

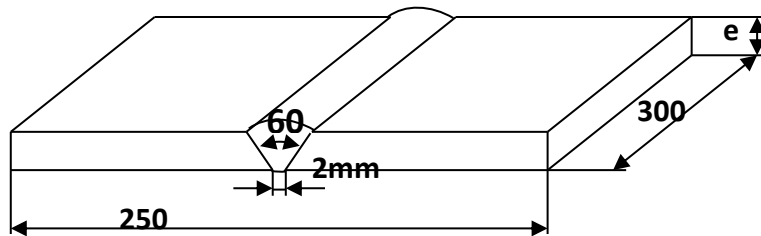


Figure IV-4 : dimensions des tôles à souder

La préparation des pièces se fait selon les étapes suivantes :

- La mise à dimension est faite par : oxycoupage ou découpage au chalumeau.
- cisailage à la guillotine,
- Soudage.
- sciage des tôles soudés pour avoir les dimensions en formes d'éprouvettes.

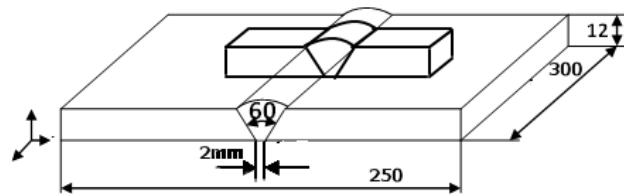


Figure IV-5 : tôles soudées pour en extraire les échantillons

IV.5.1. Caractérisation microstructurale :**IV.5.1.1. Préparation des échantillons :**

La préparation des échantillons pour l'observation microscopique est un processus lent qui se fait en plusieurs étapes qui sont indiqués ci-dessous :

- Découpage
- Enrobage
- Polissage
- Attaque chimique
- Observation microscopique :

1- Découpage des échantillons :

Le découpage doit être fait de manière à ne pas altérer la microstructure des soudures pour ce il faut bien refroidir à l'eau abondante durant la coupe.

Dans le cas des soudures exécutées avec déplacement de la source de chaleur, les prélèvements le plus souvent sont effectués perpendiculairement à la ligne de soudure. Un tel prélèvement est représentatif de toute la portion de soudure. L'examen sur des coupes longitudinales peut donner d'avantage d'informations sur la morphologie. Quel que soit l'objet de la découpe, il importe que la technique de prélèvement et de préparation mise en œuvre n'altère pas l'aspect macro et micrographique des zones auxquelles on s'intéresse.

On procède d'abord au découpage à la scie mécanique pour réduire la taille des tôles soudées

Ensuite on découpe les échantillons à la taille souhaitée à l'aide d'une tronçonneuse à disque refroidie à l'eau.



Figure IV-6 : la scie mécanique



Figure IV-7 : la tronçonneuse à disque
Refroidie à l'eau.



Figure IV-8 : découpage d'un échantillon à partir d'une tôle

2- Enrobage :

On procède d'abord à la préparation des moules qui a l'origine sont des morceaux de tubes de PVC d'origine commerciale découpés. On dépose nos échantillons au milieu des morceaux de tube et on verse la résine d'enrobage préalablement préparée on laisse sécher pendant quelque heure à l'air libre

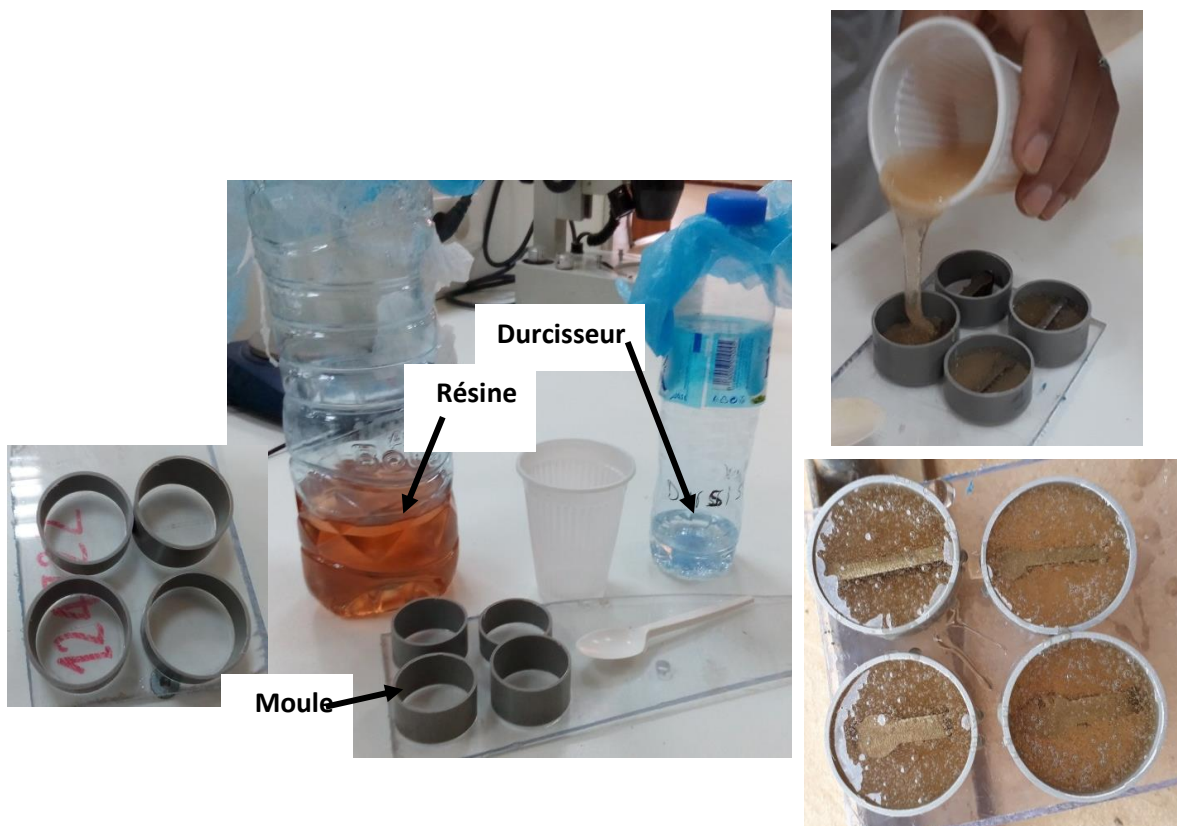


Figure IV-9. Préparation de l'enrobage par coulée de la résine.
Aussitôt la résine a séché, On procède au démoulage des échantillons



Figure IV-10. Echantillons sec démoules.

IV.5.1.2 Polissage :

La préparation des surfaces concerne la face qui fait l'objet de l'observation microstructurale, on procède de la manière suivante :

- Polissage à l'eau par des papiers abrasifs d'indices (200, 400, 800, 1000, 1200, 2000, 2500, 5000) sur une polisseuse a disques rotatifs
- Nettoyage à l'eau distillé et à l'acétone puis séchage par air chaud d'un séchoir.
- Polissage final à la pâte diamantée d'alumine déposée sur du papier feutre.
- Attaque chimique par une solution chimique de NITAL 3% préparée à la base de 5% d'acide nitrique diluée dans 95% d'éthanol.
- Nettoyage de la surface traitée et séchage



Figure IV-11. Polisseuse a disques rotatifs



Figure IV-12. Nettoyage à l'acétone



Figure IV-13. Séchoir air chaud

IV.6. Observation microscopique :

L'examen métallographique est à la base de l'étude métallurgique des soudures, la macrographie et la micrographie sont appliquées à l'examen des soudures, à des fins de recherche, de mise au point, de contrôle et aussi d'enseignement.

L'examen métallographique s'effectue sur des prélèvements, il est donc destructif ou au mieux semis destructif. Chaque fois que cela est possible, on préfère que ces prélèvements comportent toutes les zones intéressantes de la soudure examinée.

IV.6.1 Examen macrographique :

En un premier lieu, on doit procéder à un examen des surfaces des échantillons pour s'assurer de leur intégrité



Figure IV-14. Microscope à faible grossissement

IV.6.2 Examen micrographique :

L'observation micrographique est menée en balayant la surface de l'éprouvette de l'extrémité de l'éprouvette MB vers le centre du joint ZF passant par la ZAT et de la racine à

la tête afin de mettre en évidence l'influence de la température sur la structure du métal de base ainsi que celle du métal déposé.

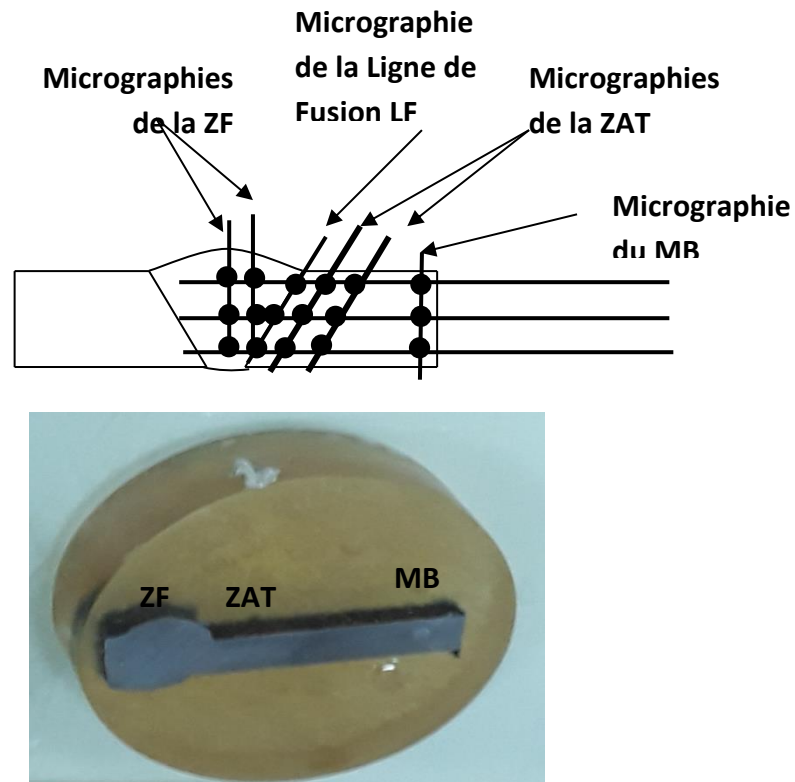


Figure IV-15 : plan général de l'observation microscopique.

Pour cette fin nous effectuons plusieurs prises micrographiques de grossissements 100, 200, 500, 1000fois à l'aide d'un microscope doté de camera LCD ToupCam USB et d'un logiciel d'acquisition et de traitement d'image Toup tek view



Figure IV-16 : microscope métallographique a réflexion dot de camera Toup cam.

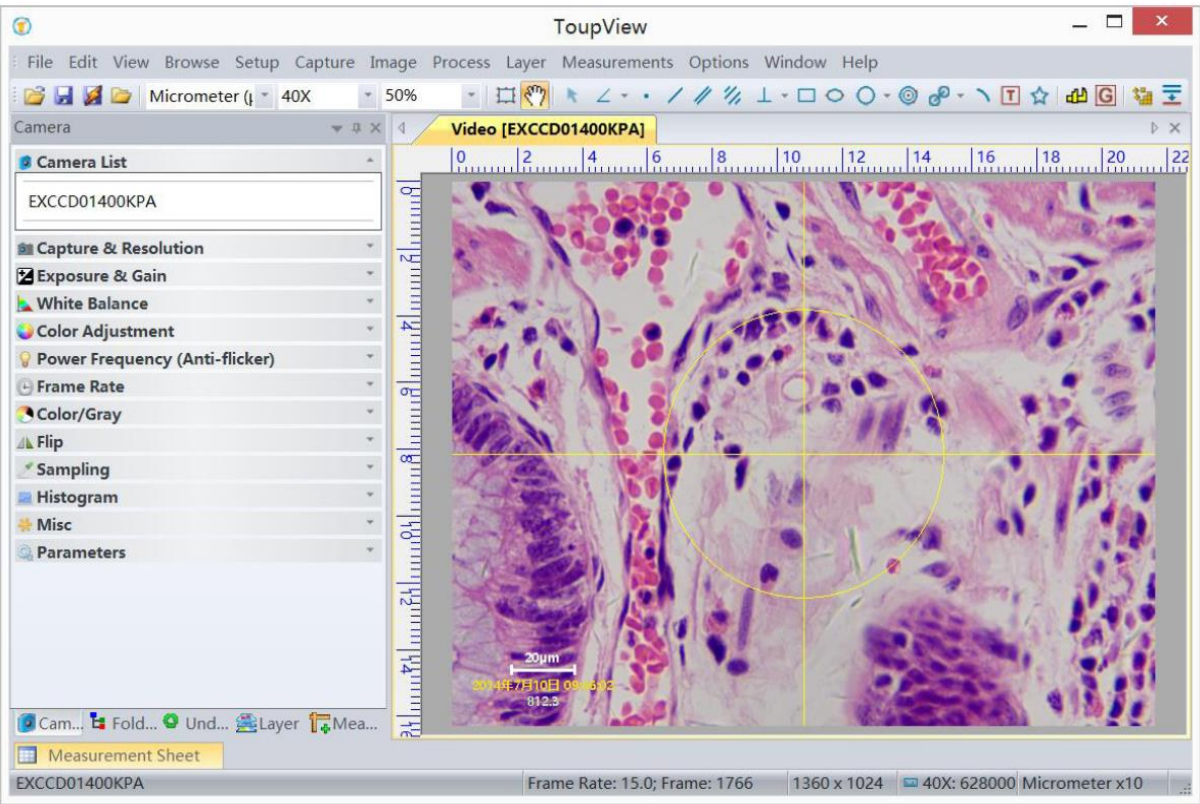


Figure IV-17: interface du logiciel Toup view.

Chapitre V : Résultats et interprétations

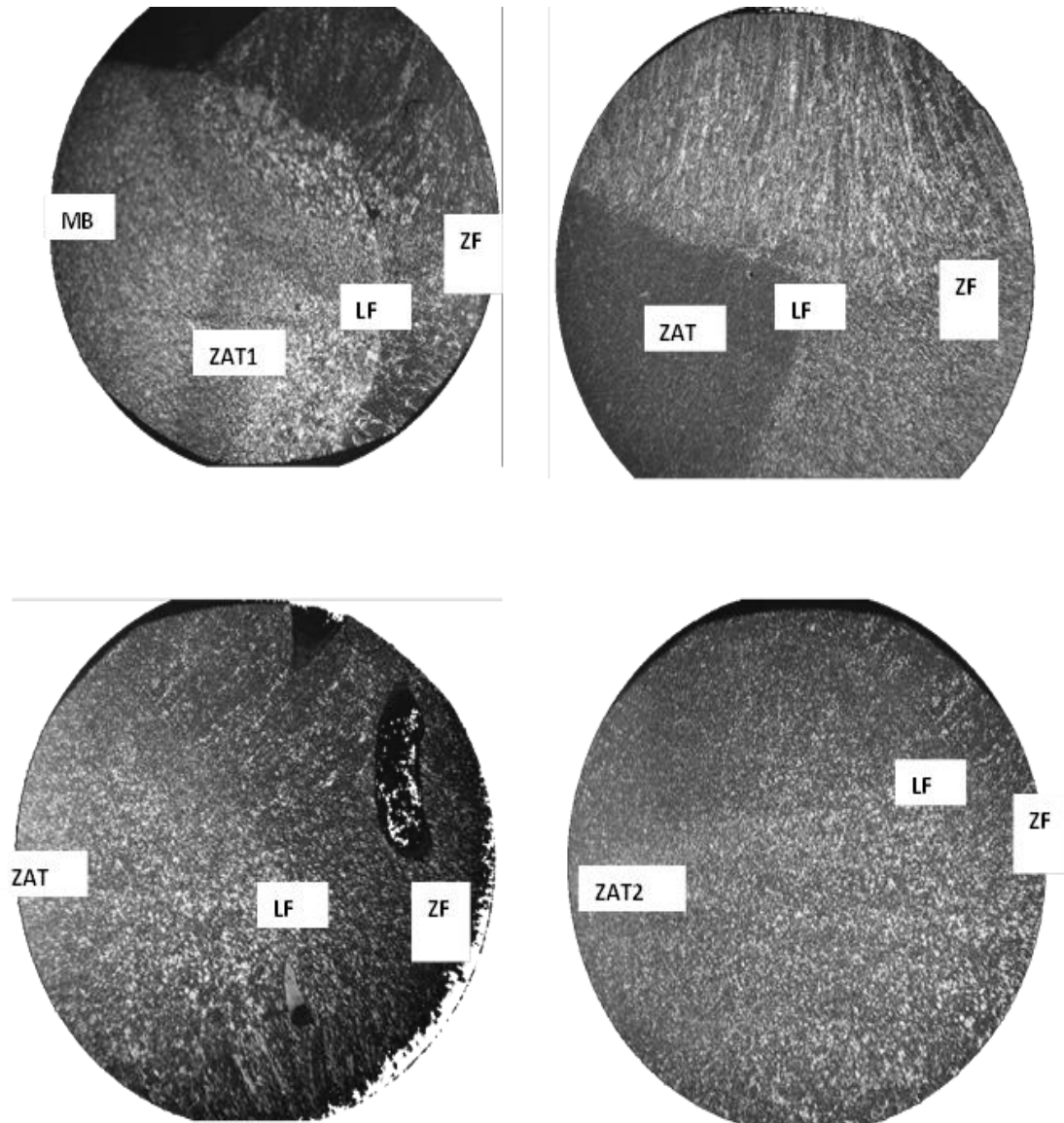
V- Etude microstructurale :**V-1 La Macrostructure :**

Fig.V.1 : Macrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF.

V-2 La Microstructure :

Echantillon 4 :

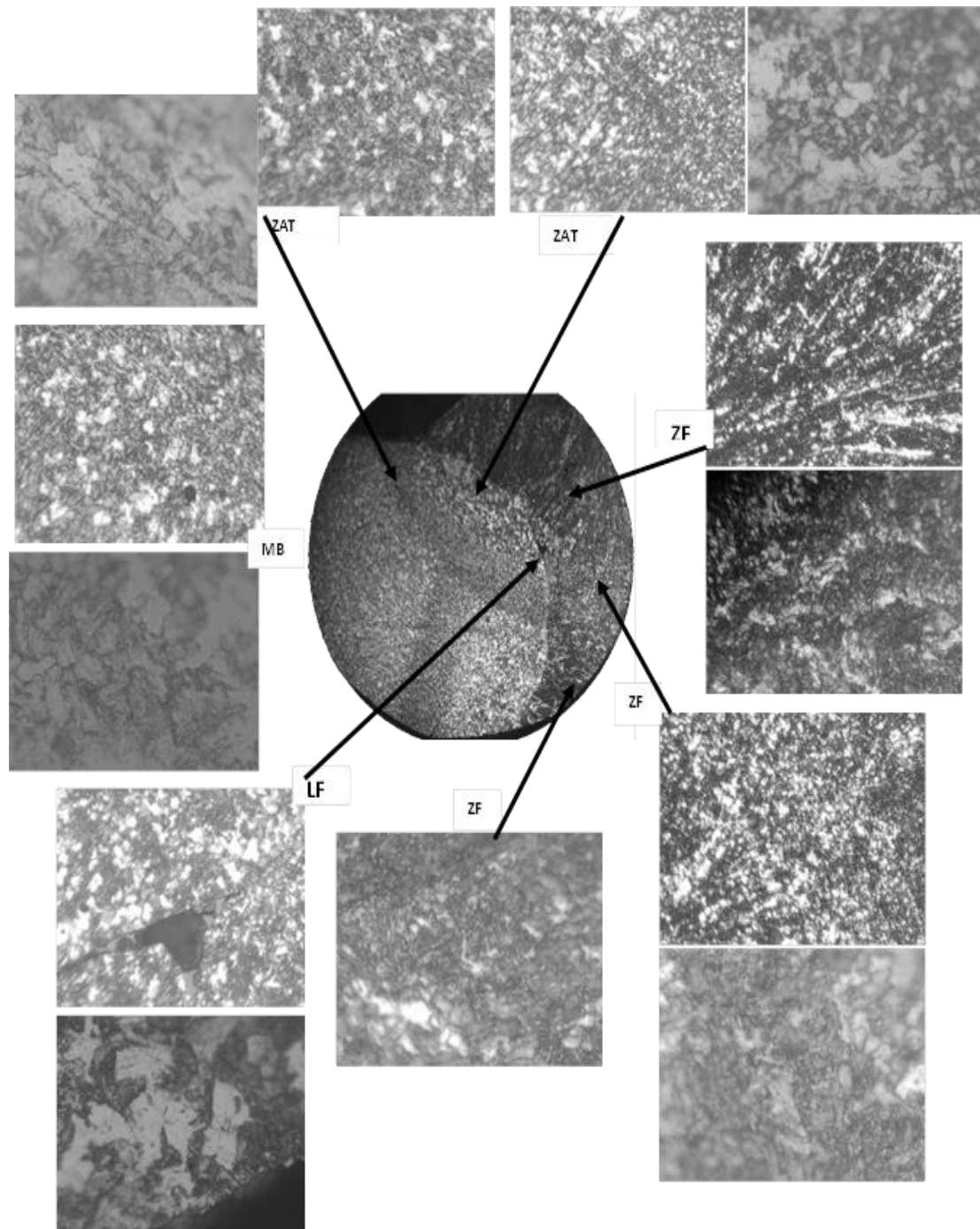


Fig.V-2 : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500.

Echantillon 1 :

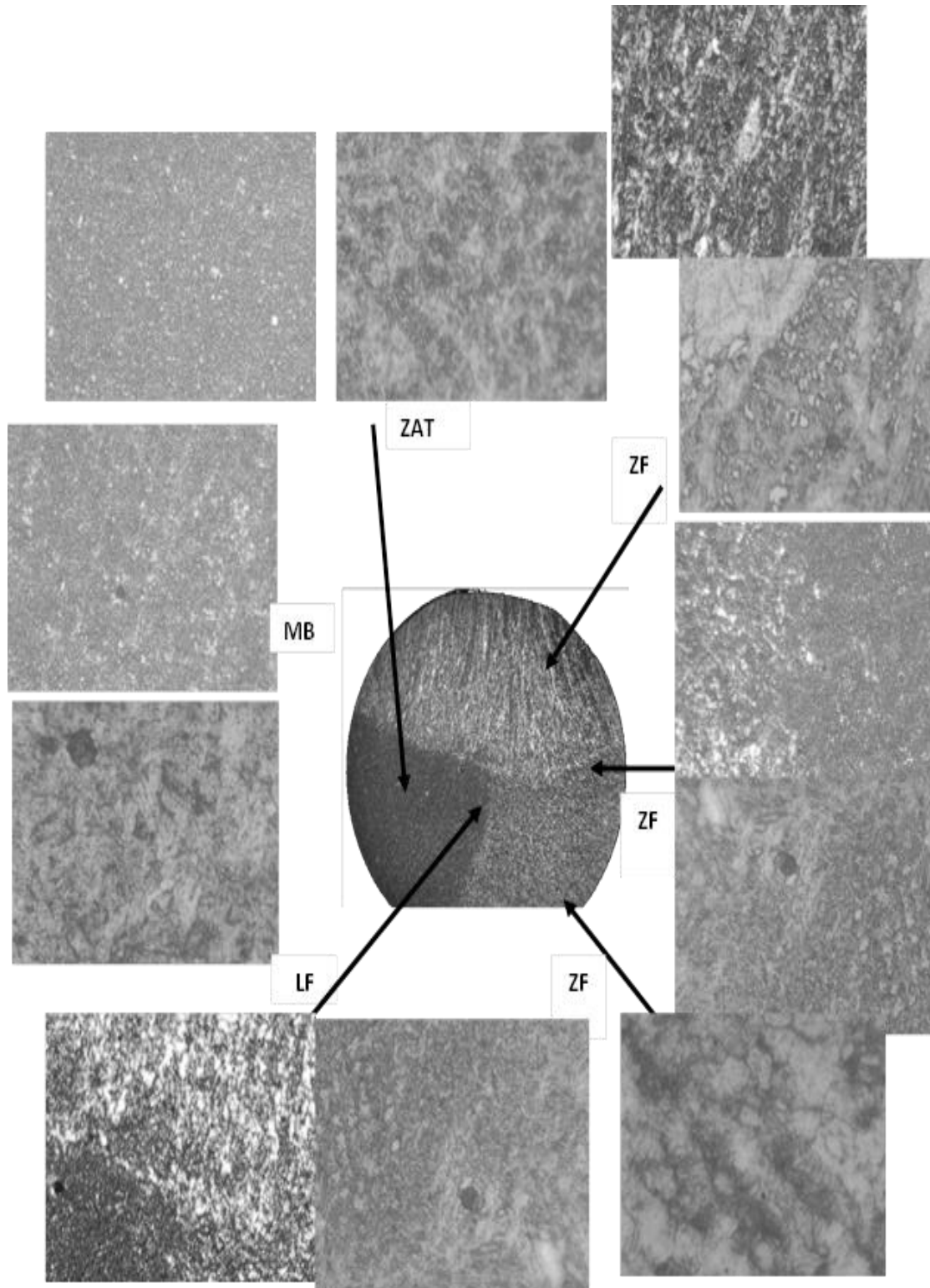


Fig.V-3 : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500.

Echantillon 3 :

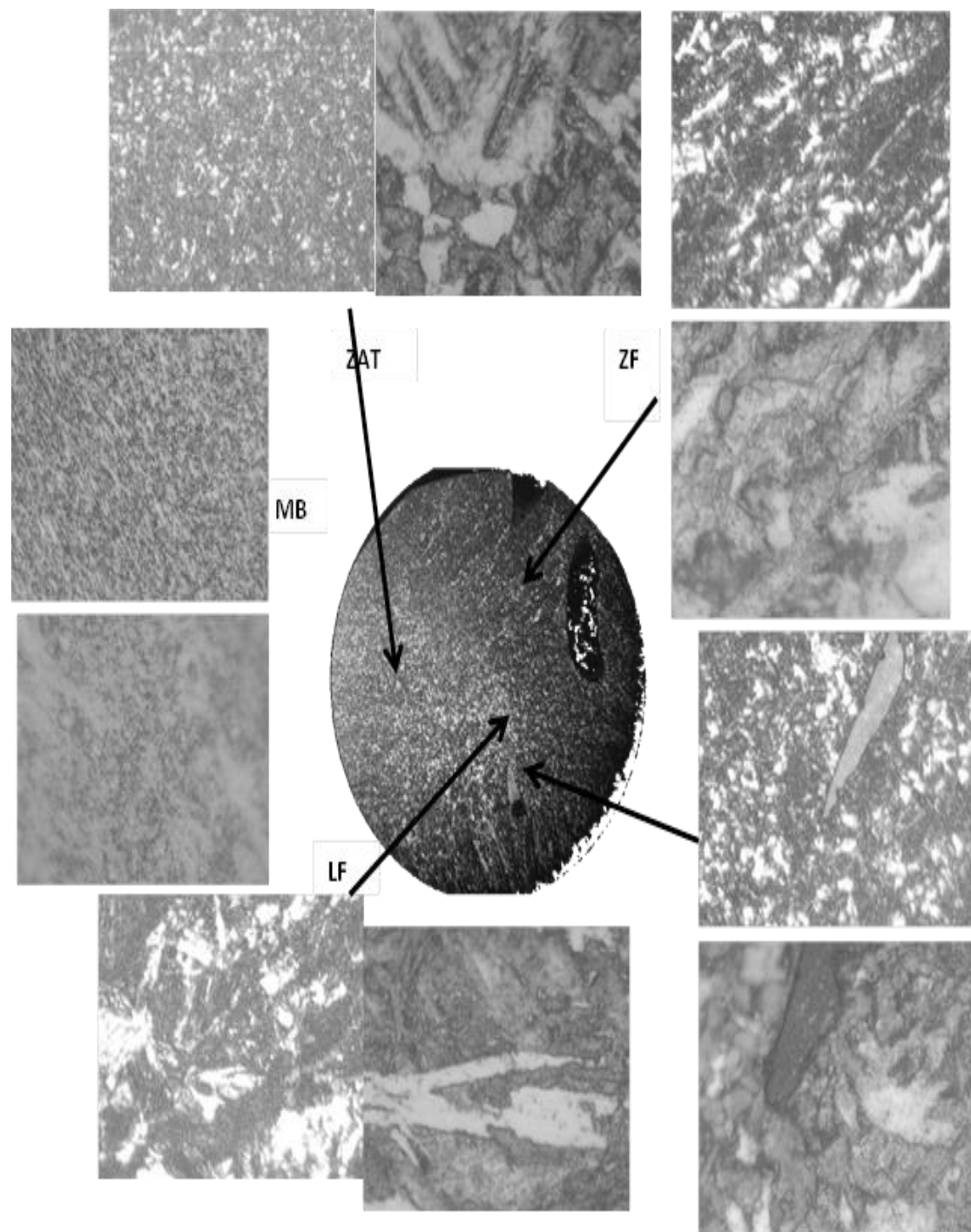


Fig.V.4 : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500.

Echantillon 2 :

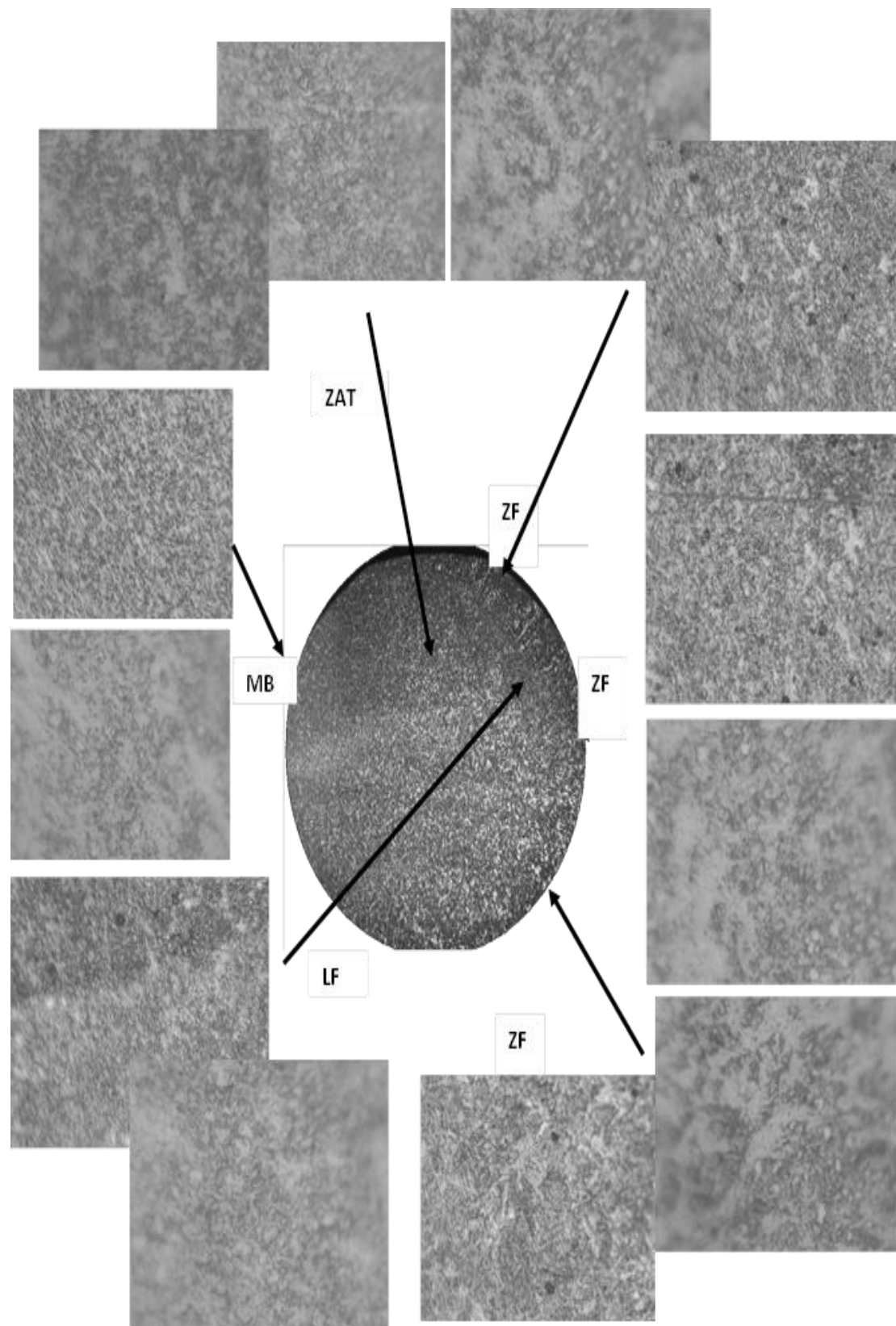


Fig.V.5 : Micrographies de la soudure allant du MB jusqu'à la ZF agrandissement x100 et x500.

V-3 Discussion

Les macrostructures mettent en évidence un gradient de taille des grains en se dirigeant du métal de base (MB) vers le joint de soudure. Les grains dans la zone fondue (ZF) semblent plus gros que celles dans la ligne de fusion (LF) qui sont aussi plus gros

Dans la ZAT, On peut facilement distinguer 2 zones. La première proche de la ligne de fusion, possède une microstructure grossière. La deuxième zone à grains plus petits que la zone précédente mais sont plus gros que celles du MB.

En comparant la ZAT et la ZF on constate que les grains ont changé de forme et d'orientation, de même, un contraste magnifique de forme de grains dans la ZF entre la racine et la tête de joint

Ces modifications microstructurales relatifs à la taille et l'orientation des grains ont été attribuées à l'effet de la chaleur.

La microstructure du métal de base présente une structure ferrito-perlitique constituée d'amas de ferrite blanc en claire séparés par des grains de perlite de teinte sombre colorés par le Nital. En se dirigeant de plus en plus vers le joint de soudure, la ferrite devient de plus en plus large et les grains prennent la même orientation ce qui laisse penser à une structure cellulaire.

Dans la ligne de fusion on constate une structure cellulaire constituée de gros grains de ferrite entourés par de la perlite fine. On peut expliquer cela par une surchauffe que subit cette partie de l'éprouvette ou peut être aussi à une décarburation par diffusion du carbone base vers le bain formé à la fois par le métal d'apport en fusion et le métal de base entraîné en fusion.

Les microstructures de la zone fondue fait ressortir 3 zones distinctes ; à la tête de la soudure, des lamelles de ferrite et de perlite alternées et dirigées par l'effet de la croissance dendritique dans les directions de la ligne médiane en partant du métal soudé structure aciculaire (structure hors d'équilibre). Par contre, en bas ou au milieu on peut observer une texture mixte, formées de gros grains allongés de ferrite allotriomorphe de frontière de grain entourant de fines lamelles perlite-ferrite. C'est la coalescence des lamelles de ferrite par l'effet thermique de la passe de finition sur la passe antérieure ce qui donne des grains de ferrite de tailles irrégulières c'est le retour vers l'équilibre (structure de weidmanstatten).

L'acier est formé de grains d'austénite; lors du passage de A3 et jusqu'à A1, il y a séparation progressive de ferrite fait que chaque grain d'austénite produit un ou

plusieurs grains de perlite, et la solution solide résiduelle s'enrichit en carbone pour se transformer en perlite. Cette séparation de la ferrite est influencée par la vitesse de refroidissement, grosseur initiale du grain et la teneur en certains éléments.

Si le refroidissement est trop rapide comme dans la tête de joint, le constituant proeutectoïde se sépare en donnant des aiguilles orientées dans diverses directions (structure en aiguilles ou aciculaire) cette structure en aiguilles ou si les grains sont gros peut engendrer une certaine fragilité de l'alliage. Mais si le grain est petit, ou le refroidissement est lent, la ferrite apparaît comme un réseau enveloppant des amas de perlite, le constituant proeutectoïde gagne les joints entre les grains de l'eutectoïde (structure cellulaire).

Ni L'épaisseur des échantillons ni la variation de l'énergie de soudage à travers la variation de l'intensité du courant et la différence de potentiel n'affectent la microstructure.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de notre travail était de réaliser une étude par prospection microstructurale des joints soudés au niveau du complexe ACI M'sila. Dans cette perspective nous avons réalisé plusieurs échantillons à partir de produits plats de différentes épaisseurs tous utilisés dans la construction de châssis de semi-remorques ACI. Nous avons varié les conditions de soudage par la variation de l'intensité du courant et le potentiel. A l'issue de l'analyse des résultats expérimentaux obtenus nous pouvons conclure comme suit :

Le métal de base utilisé est acier au carbone micro allié ferritique essentiellement. La zone de liaison est le siège d'un apport thermique bref et assez important conditionnant le grossissement des grains. Le produit de soudage est ferritique à structure dans la ligne de fusion et une structure cellulaire et aciculaire dans la zone de fusion.

Les passes extérieures de la zone de fusion où la vitesse de refroidissement est plus importante, aboutissent à une structure en aiguilles caractéristique de la ferrite hors d'équilibre.

La partie inférieure du joint correspond à des passes réchauffées plusieurs fois donc à des zones régénérées, possèdent une structure ferritique de Weidmanstätten avec des grains de plus en plus réguliers.

Les passes internes ayant subi des traitements de réchauffage donnent une structure de ferrite régulière, les aiguilles de ferrite coalescentes aboutissent à des structures plus proches de l'état d'équilibre ou à des textures mixtes.

Références Bibliographique :

[1] : manfred a hirt ,rolf bez ,alain nursbanmer " livre de construction métallique :notion fondamentales et méthode de dimensionnement " ,2006

[2] : Bachir 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 ". Matériaux.

Université de Montpellier; Université Abou Bekr BelKaid-Tlemcen, 2015.

[3] : Makhlouf Hamide. " Modélisation numérique du soudage à l'arc des aciers ". Mécanique. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.

[4] : RYKALINE N.N. "Calculs des processus thermiques de soudage", Communication Présent Ce à la Société des Ingénieurs Soudeurs, 1959

[5] : LIEGEOIS J. "Considérations pratiques sur le soudage et la soudabilité des aciers micro-alliés à haute limite d'élasticité" Soudage et Techniques Connexes sept.-oct. 1980, pp.3 13-330

[6] : EASTERLING K.E. "Introduction to the physical metallurgy of \veldingU Buttenvorths Edt, 1983

[7] : CONSTANT A. HENRY G. "Les principes de base du traitement themuque. Transformations au chauffage"

[8] : I.R.S.I.D. "Courbes dureté / paramètre de refroidissement en condition de soudage", Recueil établi à l'LR.S.I.D.,1977

[9] : KERVERSAU de E. GENIER G.R."Physiologie de l'acier" Edition SEDOM 1972

[10] : E. LEVINE, D.C. HILL "A review of the structure and properties of metals in colombium or vanadium containing high strength low alloy steel", WRC Bulletin 213, Fév.1976

[11] : N.CAVALLO. Contribution à la validation expérimentale de modèles décrivant la ZAT lors d'une opération de soudage, thèse de doctorat, INSA, Avril 1998.

[12] : Anne-Sophie BILAT, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007 Estimation du risque de rupture fragile de soudures de pipelines en aciers à haut grade caractérisation et modélisation.

[13] : R.BOURGEOIS. Mémothech, Génie des matériaux, édition éducative 2001.

[14] : H.Surderland. Caractéristiques et choix des matériaux, Dunod 1987

[15] : C.LEYMONIE, R.BOUVEROT. Contribution à l'étude des traitements thermiques après soudage d'aciers faiblement alliés. Soudage et techniques connexes N°1/2 1970

[16] : H.GRANJON. Bases métallurgiques de soudage, publications de soudage et de ses applications 1995.

[17] : B.CHASSIGNOLE, Influence de la structure métallographique des soudures en acier inoxydable sur le contrôle non destructif par ultrasons, thèse de doctorat, INSA, Lyon. Décembre 2000.

[18] : J. Bernrd, Métallurgie générale, Masson 1984.

[19] : C.OLIVIER , A. BISANTI, Extrait du rapport d'enquête sur l'accident maritime du bateau de TITANIC 2001

[20] : Emilie Le Guen. Etude 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. Génie des procédés. Université de Bretagne Sud, 2010.

Annexe



Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 742
Mode Precious Metals
Time 2018-03-07 20:11
Duration 31.12
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 Iron/CS : 0.00
Alloy2 No Match : *2.13
Flags
SAMPLE 004
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

Carbon steel

	%	±	Error
In	< LOD	:	0.007
Cd	< LOD	:	0.007
Ag	0.023	±	0.006
Pd	0.012	±	0.003
Rh	< LOD	:	0.005
Ru	0.003	±	0.001
Mo	0.003	±	0.001
Nb	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.012
Au	< LOD	:	0.009
Pt	< LOD	:	0.013
Ir	< LOD	:	0.015
Ga	< LOD	:	0.013
Zn	0.017	±	0.006
Cu	< LOD	:	0.020
Ni	< LOD	:	0.045
Co	0.167	±	0.063
Fe	99.048	±	0.079
Mn	0.700	±	0.030
Cr	< LOD	:	0.018
Ti	< LOD	:	0.045
Sn	< LOD	:	0.009

Supervised By: _____



Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 740
Mode Precious Metals
Time 2018-03-07 20:09
Duration 23.32
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 Iron/CS : 0.00
Alloy2 No Match : *3.41
Flags
SAMPLE 002
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

Carbon Steel

	%	±	Error
In	< LOD	:	0.008
Cd	< LOD	:	0.008
Ag	< LOD	:	0.013
Pd	< LOD	:	0.006
Rh	< LOD	:	0.005
Ru	< LOD	:	0.003
Mo	0.006	±	0.001
Nb	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.016
Au	< LOD	:	0.012
Pt	< LOD	:	0.015
Ir	< LOD	:	0.017
Ga	< LOD	:	0.015
Zn ¹	< LOD	:	0.014
Cu	< LOD	:	0.024
Ni	< LOD	:	0.055
Co	< LOD	:	0.146
Fe	99.329	±	0.091
Mn	0.449	±	0.031
Cr	0.036	±	0.011
Ti	< LOD	:	0.053
Sn	< LOD	:	0.010

Supervised By: _____

Thermo SCIENTIFIC

Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 741
Mode Precious Metals
Time 2018-03-07 20:10
Duration 30.68
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 Iron/CS : 0.00
Alloy2 No Match : *3.41
Flags
SAMPLE 003
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

Carbon Steel

	%	±	Error
In	< LOD	:	0.007
Cd	< LOD	:	0.007
Ag	< LOD	:	0.011
Pd	< LOD	:	0.005
Rh	< LOD	:	0.005
Ru	< LOD	:	0.003
Mo	0.007	±	0.001
Nb	0.002	±	0.001
Pb	< LOD	:	0.014
Au	< LOD	:	0.010
Pt	< LOD	:	0.014
Ir	< LOD	:	0.015
Ga	< LOD	:	0.013
Zn	< LOD	:	0.012
Cu	< LOD	:	0.020
Ni	< LOD	:	0.045
Co	0.303	±	0.064
Fe	99.214	±	0.079
Mn	0.415	±	0.026
Cr	0.024	±	0.009
Ti	< LOD	:	0.046
Sn	< LOD	:	0.008

Supervised By: _____



Thermo Fisher Scientific
900 Middlesex Turnpike
Billerica, MA 01821

Certificate of Verification

XL3t-62240

Reading No 739
Mode Precious Metals
Time 2018-03-07 20:09
Duration 24.13
Units %
Sigma Value 2
Sequence Final
Alloy1 Iron/CS : 0.54
Alloy2 LA-1215 : 0.58
Flags
SAMPLE 001
HEAT
LOT
BATCH
MISC
NOTE

Carbon Steel

	%	±	Error
In	< LOD	:	0.007
Cd	< LOD	:	0.007
Ag	< LOD	:	0.012
Pd	< LOD	:	0.006
Rh	< LOD	:	0.006
Ru	< LOD	:	0.003
Mo	< LOD	:	0.002
Nb	< LOD	:	0.002
Pb	< LOD	:	0.017
Au	< LOD	:	0.010
Pt	< LOD	:	0.014
Ir	< LOD	:	0.017
Ga	< LOD	:	0.014
Zn	< LOD	:	0.013
Cu	0.028	±	0.012
Ni	< LOD	:	0.047
Co	0.484	±	0.071
Fe	98.697	±	0.089
Mn	0.766	±	0.034
Cr	< LOD	:	0.020
Ti	< LOD	:	0.049
Sn	< LOD	:	0.009

Supervised By: _____