

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : CONSTRUCTION MÉCANIQUE

PAR :

REDJAL FERHAT

HAMMICHE YAHIA

Thème

Optimisation d'un paramètre de soudage à l'arc électrique des aciers

Soutenu le 06 octobre 2020 devant le jury composé de:

Mr.	BRADAI M.A	Président
Mr.	YOUNES .R	Rapporteur
Mr.	AMARI .D	Examineur

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2019-2020

Remerciements

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements sont destinés à Mr R.YOUNES, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia, l'équipe De la SARL Saket construction ou nous avons effectué nos échantillons et accueil qui nous a été réservé.

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Dédicace

On dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :

À l'âme de mon père et mon frère Adel, j'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

À ma chère mère, noble qui a sacrifié ses plus belles années, je saisis cette occasion pour lui souhaiter un prompt rétablissement.

- *À mon frère Fatah*
- *À mes sœurs, leurs maris et enfants*
- *À nos grands-parents.*
- *À tout les membres de nos familles.*
- *À nos meilleures amies.*
- *À tout les camarades de notre section.*

R. Ferhat

Dédicace

On dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :

A l'âme de ma mère, j'aurais tant aimé que tu sois présente, Que dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

A mon père, tu étais toujours présent à mes côtés pour me soutenir, que ce travail traduise ma gratitude et mon affection

- *A mon frère Idir*
- *A mes sœurs, leurs maris et enfants*
- *A nos grands-parents.*
- *A tout les membres de nos familles*
- *A nos meilleures amies.*
- *A tout les camarades de notre section.*

H. Yahia

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Sommaire

Table des Figures

Liste des Tableaux

Nomenclature

Introduction Générale

Chapitre I : généralités sur le soudage

I.1. Introduction.....	02
I.2. Les procédés du soudage.....	02
I.2.1. Soudage à l'électrode enrobée.....	02
I.2.2. Soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG.....	03
I.3. Eléments sur les phénomènes physiques du soudage.....	05
I.3.1. Effet thermique.....	05
I.3.2. Effets mécanique du régime thermique.....	07
I.3.2.1. Les déformations en soudages.....	07
I.4. Les contraintes résiduelles.....	07
I.4.1. Contraintes et déformation dans les sens longitudinal.....	08
I.4.2. Contraintes et déformation transversales.....	09
I.4.3. Effet métallurgique	10
I.4.3.1. Introduction à la métallurgie du soudage	10
I.5. Modifications microstructurales en zone affectée par la chaleur.	11
I.5.1. Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur	11
I.5.2. Transformations en ZAC lors du chauffage.....	12
I.5.3. Transformations en ZAC lors du refroidissement	14

Chapitre II : les défauts de soudage

II.1. Introduction.....	16
II.2. Les fissures.....	16
II.3. Types des fissures.....	16
II.3.1. Fissures de gorge (Throat Cracks).....	17
II.3.2. Fissure de racine.....	18

Sommaire

II.3.3.Fissure de cratère.....	18
II.3.4.Fissure au raccordement.....	18
II.3.5.Fissure sous-cordon.....	19
II.3.6.Fissure de réchauffage (reheat cracking).....	20
II.4.Fissure a chaud (ou de solidification).....	21
II.5.Fissures a froid.....	22
II.6.Manque de pénétration.....	23
II.7.Manque de fusion.....	24
II.7.1.Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	24
II.7.2.Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	25
II.7.3.Manque de fusion a la Racine de la soudure.....	25
II.8.Inclusion gazeuse.....	26
II.9.Débordement de cordon.....	26

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1.Introduction.....	27
III.2.Matériaux Utilisés	27
III.2.1.Présentation de l'acier utilisé 3.2 DNV grade A.....	27
III.2.2.Préparation des plaquettes.....	27
III.2.3. Soudages des plaquettes	28
III.2.4. Polissages des plaquettes	29
III.2.5.Réalisation de l'entaille U	30
III.3.Essai de résilience.....	30
III.4.Essai de dureté rockwell HRC	31
III.5.Résultats et discussion	32
III.5.1.Résultats de la résilience.....	33
III.5.2.Profil de dureté HRC.....	34
III.5.2.1.Profil de dureté HRC P1	35
III.5.2.2.Profil de dureté HRC P2.....	36
III.5.2.3.Etude comparative des profils de dureté HRC P1 et P2.....	37

Conclusion générale

Annexe

Liste des figures

Liste des figures et liste des tableaux

Liste des figures

Figure I-1 principe du soudage à l'électrode enrobée.....	03
Figure I-2 Schéma du bain de fusion et torche du procédé MIG/MAG	03
Figure I-3 : Comparaison d'un fil massif et d'un fil fourré, vue en coupe.....	04
Figure I-4 Schéma d'une installation du procédé MIG/MAG.....	05
Figure I-5 les phénomènes physique du soudage.....	05
Figure I-6 Différentes formes de source de chaleur.....	06
Figure I-7 : Aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur (schématique) et définition des paramètres θ_M , Δt (700, 800).....	06
Figure I-8 Différents modes de déformations.....	07
Figure I-9 Répartition des contraintes longitudinales après soudage et refroidissement.....	08
Figure I-10 : Types de déformations résultant de contraintes longitudinales lorsqu'une pièce soudée n'est pas bridée.....	08
Figure I-11 Répartition des contraintes résiduelles transversales résultant d'un autobridage.....	09
Figure I-12 Répartition des déformations et des contraintes résiduelles transversales induites.....	09
Figure I-13 Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion.....	11
Figure I-14 Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C.....	12
Figure I-15 Exemple de diagramme TRC en conditions de soudage ($\theta_M=1300^\circ$).....	13
Figure II-1 Les types de fissure.....	15
Figure II-2 Fissure de Gorge (Throat Cracks).....	16
Figure II-3 Fissure de Racine.....	16
Figure II-4 Fissure de Cratère. Schéma de principe.....	17
Figure II-5 Fissure au raccordement.....	17
Figure II-6 Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).....	18
Figure II-7 Fissures de réchauffages (Reheat cracking).....	19
Figure II-8 Fissure à chaud (ou de solidification).....	20
Figure II-9 schéma des différents types de fissures à froid.....	21

Liste des figures et liste des tableaux

Figure II-10 Défaut manque de pénétration.....	21
Figure II-11 Manque de fusion dans le flanc de la soudure.....	23
Figure II-12 Manque de fusion entre passes.....	23
Figure II-13 Manque de fusion à la racine de la soudure.....	24
Figure II-14 Débordement.....	24
Figure III-1 Découpage de plaques soudées	28
Figure III-2 Les surfaces des plaquettes soudées après le polissage.....	29
Figure III-3 Polisseuse a double plateaux.....	29
Figure III-4 Préparation des plaquettes métalliques avec chanfrein U.....	30
Figure III-5 Machine de résilience MT 3016.....	31
Figure III-6 La plaque après l'essai de résilience.....	31
Figure III-7 Durometre HRC.....	32
Figure III-8 Histogramme des valeurs de la résilience.....	33
Figure III-9 dureté HRC des échantillons P1.....	35
Figure III-10 Empreinte de la dureté HRC échantillon P1	35
Figure III-11 dureté HRC des échantillons P2.....	36
Figure III-12 Empreinte de la dureté HRC échantillon P2.....	36
Figure III-13 étude comparative des duretés HRC des échantillons P1et P2.....	37

Liste des tableaux

Tableau I-1 Valeurs typiques de vitesses de refroidissement ΔT [500°C ,800°C] associées à différents procédés de soudage.....	11
Tableau II-1 Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention.....	22
Tableau III-1 Composition chimique de l'acier A33(S 185).....	27
Tableau III-2 La composition chimique des cordons.....	28
Tableau III-3 Les paramètres de soudage utilisés pour la réalisation de la liaison métallique	29
Tableau III-4 Résultats de la résilience.....	33
Tableau III-5 Dureté HRC des deux plaques soudées P1 et P2.....	34

Liste des figures et liste des tableaux

Introduction générale

Introduction générale

La croissance et le progrès dans tous les domaines aéronautiques, automobile, marin, transport pétrolier agroalimentaire... etc. nécessite une maîtrise du comportement des structures et des assemblages. La connaissance approfondie des phénomènes intervenants dans le matériau utilisé, et les facteurs influençant son comportement permet de prévenir des anomalies et choisir des conditions adoptées à son utilisation. Le soudage est un domaine de construction mécanique très large où les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent à faire des avancées très importantes en vue d'améliorer son rendement et son efficacité.

Aujourd'hui la production mondiale des aciers destinés à la fabrication des produits soudés environs 60 à 80 %, Leurs compositions chimiques et leurs caractéristiques mécaniques représentent un des éléments essentiels intervenant dans le choix du métal d'apport destiné à leurs jonctions par un procédé de soudage approprié (soudage à l'arc électrique, soudage par résistance électrique, soudage par faisceau d'électrons, soudage au plasma, soudage par laser,...). La non-conformité de la composition chimique d'un acier peut gêner sa soudabilité et l'obtention d'une structure nécessaire pour une optimisation de ses caractéristiques mécaniques. Pour ces raisons, des travaux de recherches à l'échelle internationale sont périodiquement publiés dans ce domaine de constructions soudées.

L'un des objectifs de cette étude est de déterminer si les paramètres du métal d'apport, étaient susceptibles d'apporter des avantages, notamment en termes des propriétés mécaniques, dans le cas du soudage conventionnel avec des matériaux d'apport atypique.

Il est essentiel de comprendre et d'expliquer les interactions multi physiques en soudage à l'arc afin de pouvoir apporter des solutions d'optimisation applicables industriellement. La finalité de ce travail est de pouvoir mesurer les différents types de données dans un environnement normal, et de les faire dialoguer de façon cohérente, pour cela on a opté à diviser notre travail en 3 chapitres :

Notre travail se compose d'une introduction générale et de trois chapitres successifs :

- Le premier chapitre Enveloppe des généralités sur le soudage.

Introduction générale

- Le deuxième chapitre concerne la description des défauts de soudage.
- Le troisième chapitre portera sur, la présentation des matériaux utilisés, la préparation des échantillons, les techniques d'analyse utilisées et la présentation et discussion des résultats obtenues.

Notre recherche aboutira enfin à une synthèse permettant de montrer le phénomène de corrosion lors du soudage des aciers à l'arc électrique.

Chapitre I :

Généralité sur le soudage

I.1. Introduction :

Le soudage est un procédé d'assemblage consistant à lier des pièces en effectuant une fusion locale de celles-ci. Cela permet d'assurer, après refroidissement, une continuité physique entre les deux pièces. Simplifiant les assemblages, cette technique offre les meilleures garanties de résistance mécanique, d'étanchéité et de continuités thermiques, électriques et magnétiques. Plusieurs matériaux peuvent être soudés, mais le principal domaine d'application du soudage est l'assemblage des métaux.

I.2. Les procédés du soudage :

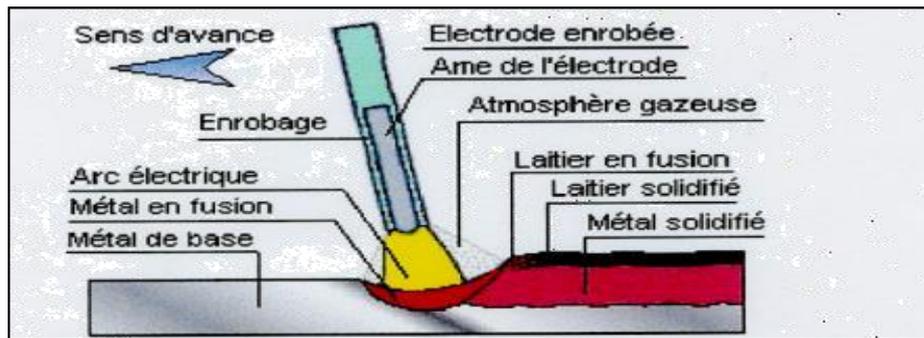
Il existe actuellement, des dizaines de procédés de soudage. Le plus souvent ils sont classés à partir du type d'énergie utilisé par exemple : énergie électrique, énergie chimique, etc...., ensuite les procédés sont classés plus particulièrement suivant la forme de l'énergie directement utilisable pour le soudage ; par exemple : soudage à l'arc, soudage à la flamme, Et finalement suivant les modalités de réalisation ; par exemple : soudage à l'arc électrique avec électrodes enrobées, soudage par résistance à la molette, etc... [1]

Les techniques du soudage se sont développées tellement rapidement au cours des dernières années qu'il serait impossible de donner une liste complète de tous les procédés utilisés de nos jours . On peut toutefois les classer en deux catégories : le soudage par fusion et sans fusion. [2]

I.2.1. Soudage à l'électrode enrobée :

Les origines du soudage à l'arc remontent à la fin du 19^{ème} siècle. Le soudage à l'électrode enrobée est inventé en 1907, appelé aussi SMAW, "Shielded Metal Arc Welding", ou MMA, "Manual Metal Arc". Il connaît son essor industriel vers 1920 en même temps que d'autres procédés tels que le soudage oxyacétylénique (au chalumeau) ou le soudage par résistance.

Le procédé de soudage à l'électrode enrobée utilise une source d'énergie extérieure, à savoir L'arc électrique. Il est fourni par un générateur appelé poste à souder. Cet arc apporte l'énergie nécessaire pour fondre le métal de base et le métal d'apport que constitue l'électrode.[3]



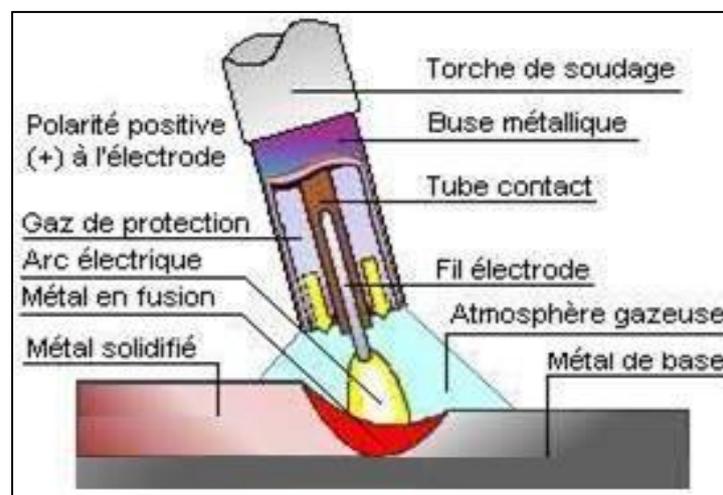
La figure I.01 : principe du soudage à l'électrode enrobée. [5]

L'électrode est formée d'une âme métallique et d'un enrobage. L'âme doit avoir au moins les mêmes caractéristiques mécaniques que le métal de base. Elle fond en gouttelettes qui sont projetées dans le bain de fusion. Après refroidissement et solidification, l'âme constitue le cordon de soudure.

L'enrobage participe à la formation d'un laitier et d'un gaz. Le laitier protège le bain de fusion tandis que le gaz protège le bain et l'arc. En effet, l'arc se maintient plus facilement dans une atmosphère de gaz ionisé que dans l'air. Une fois la soudure solidifiée, on enlève le laitier à l'aide d'un petit marteau à piquer. La figure I.1 illustre le principe du soudage par électrode enrobée. [3]

I.2.2 soudage sous protection gazeuse : MIG/MAG :

Dans le cas des soudages MIG et MAG, la protection de la zone fondue est assurée par un gaz délivré en continu et l'arc est établi entre une électrode fusible et les pièces à souder. Dans la littérature, l'acronyme GMAW, pour « Gas Metal Arc Welding », est utilisé pour désigner de façon plus générale les deux procédés. Le schéma de l'extrémité d'une torche MIG-MAG est donné sur la Figure I.2 [3]



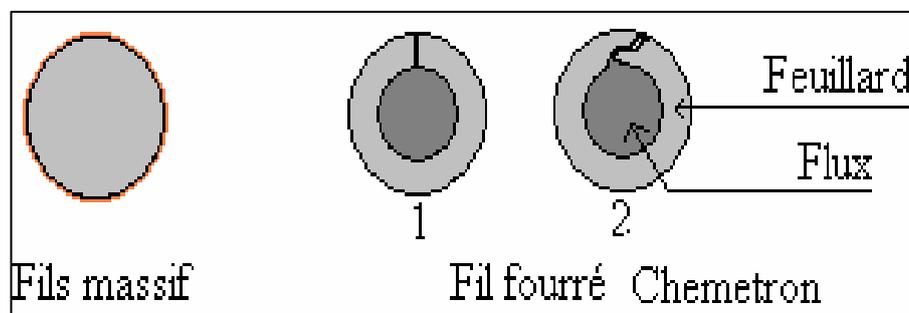
La figure I.02: Schéma du bain de fusion et torche du procédé MIG/MAG [6]

Le soudage MIG (« Metal Inert Gas ») utilise un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium comme gaz de protection. En soudage MAG (« Metal Active Gas »), un gaz chimiquement actif au niveau de la soudure est ajouté. Dans ce cas, le gaz le plus fréquemment employé est le dioxyde de carbone CO₂, que ce soit pures ou mélangé dans différentes proportions avec un gaz inerte. On peut également utiliser d'autres gaz comme l'oxygène O₂, l'hydrogène H₂ ou encore l'azote N₂ et/ou du monoxyde d'azote NO. Ils sont ajoutés en faible ou très faible quantité pour que l'effet recherché ne soit pas compensé par les inconvénients liés à leur présence. Dans la configuration la plus répandue, c'est le fil-électrode qui constitue l'anode et est relié à la borne positive du générateur par l'intermédiaire d'un tube-contact situé à la base de la torche de soudage, alors que les pièces à souder sont reliées à la masse (cathode). [4]

Les métaux soudables par ce procédé sont l'acier faiblement ou non allié pour le soudage MAG ; les alliages légers (à base d'aluminium...) et cuivreux, ainsi que les aciers inoxydables pour le soudage MIG.

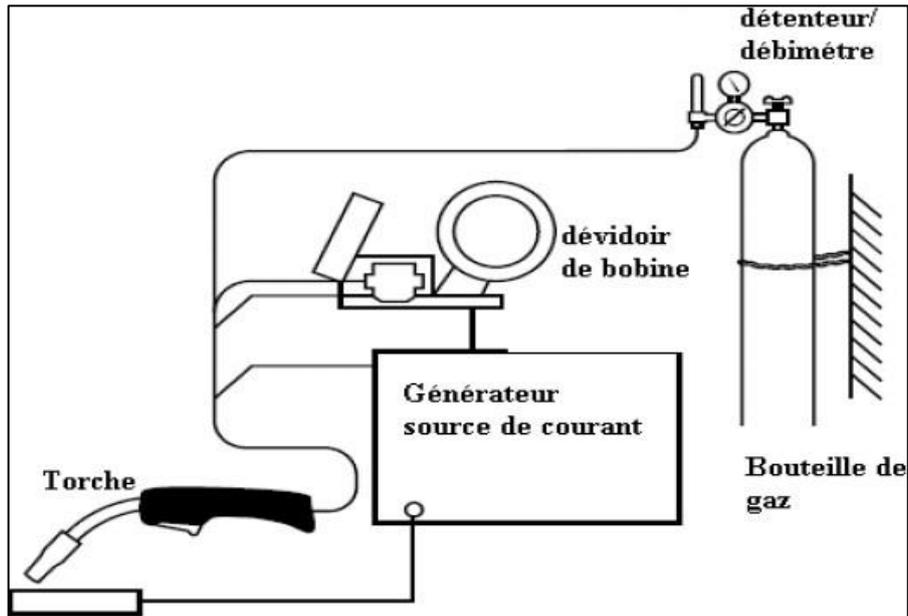
Le soudage MAG se caractérise par une plus forte productivité. Les applications sont nombreuses, dans la chaudronnerie, la construction navale, la construction automobile. Le soudage MIG-MAG permet en effet un taux élevé de dépôt de métal, ce qui est particulièrement utile pour le soudage des fortes épaisseurs. [4]

Le fil-électrode, enroulé sur un tambour, est dévidé en continu au cours du soudage. Son diamètre est compris, selon les applications, entre 0,6 mm et 1,6 mm. Il est entraîné par des galets tournants dans une gaine débouchant dans la torche à une vitesse constante, de 1 à 20 m/mn. Pour le soudage MIG-MAG classique, le fil est en acier massif. Il est également possible d'employer des fils fourrés (**figure I.03**). [4]



La figure I.03 : Comparaison d'un fil massif et d'un fil fourré, vue en coupe. [4]

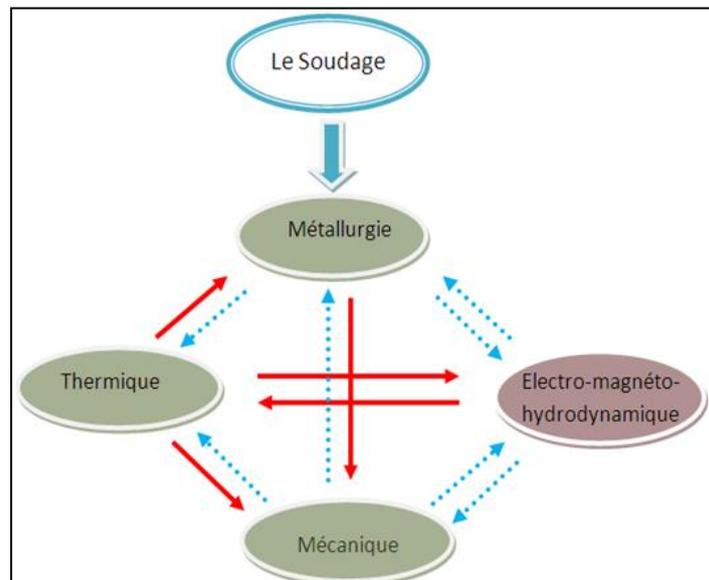
Avec : 1- fil fourré assemblé bord à bord, 2- fil fourré assemblé par recouvrement



La Figure I.04: Schéma d'une installation du procédé MIG/MAG [9]

I.3. Éléments sur les phénomènes physiques du soudage :

Le soudage est considéré comme une technique spéciale et multidisciplinaire. Le résultat de l'opération de soudage dépend étroitement d'un couplage entre les phénomènes thermiques, métallurgiques, mécaniques et électro-magnéto hydrodynamiques.[3]

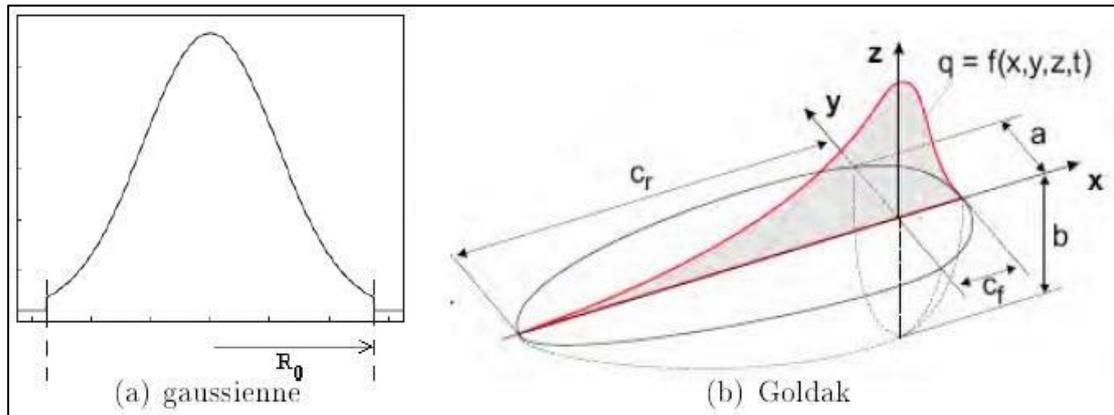


La figure I.05: les phénomènes physique du soudage

I.3.1 Effet thermique :

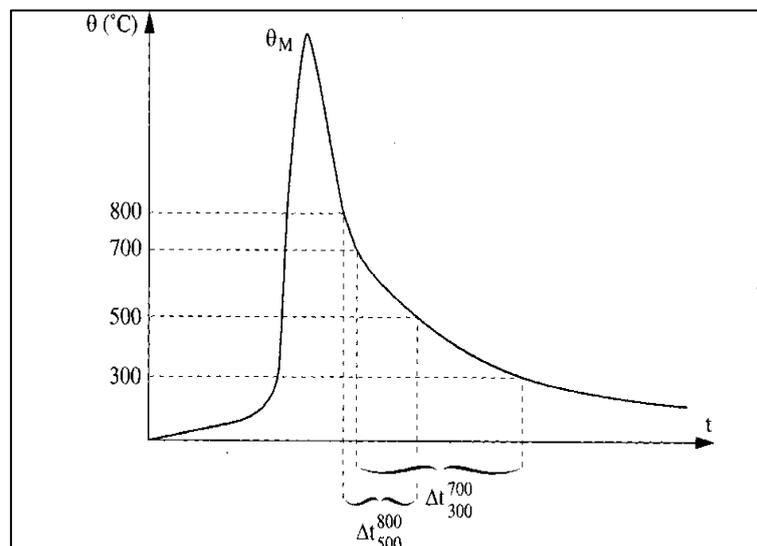
Dans le soudage des pièces métalliques, la liaison atomique réalisée au niveau du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée une élévation locale de température dans les pièces. Ces sources sont généralement le siège de phénomènes

complexes. Le résultat est la production de la chaleur et son transfert au droit de la soudure.[3]



La figure I.06 : Différentes formes de source de chaleur. [7]

Le cycle thermique $\theta(t)$ subi par tout point de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) quel que soit le type de procédé de soudage (source fixe ou mobile), comporte typiquement [3](voir figure I.7) :



La figure I.07 : Aspect de cycle thermique dans la zone affectée par la chaleur (schématisé) et définition des paramètres θ_M , Δt (700, 800). [8]

- une phase d'échauffement très rapide
- un passage par une température maximale θ_M .
- une phase de refroidissement plus ou moins rapide...

Les principaux paramètres caractérisant le régime thermique de soudage peuvent s'exprimer, pour un assemblage et un procédé de soudage donnés, en fonction de la durée de refroidissement entre 800 °C et 500 °C.[3]

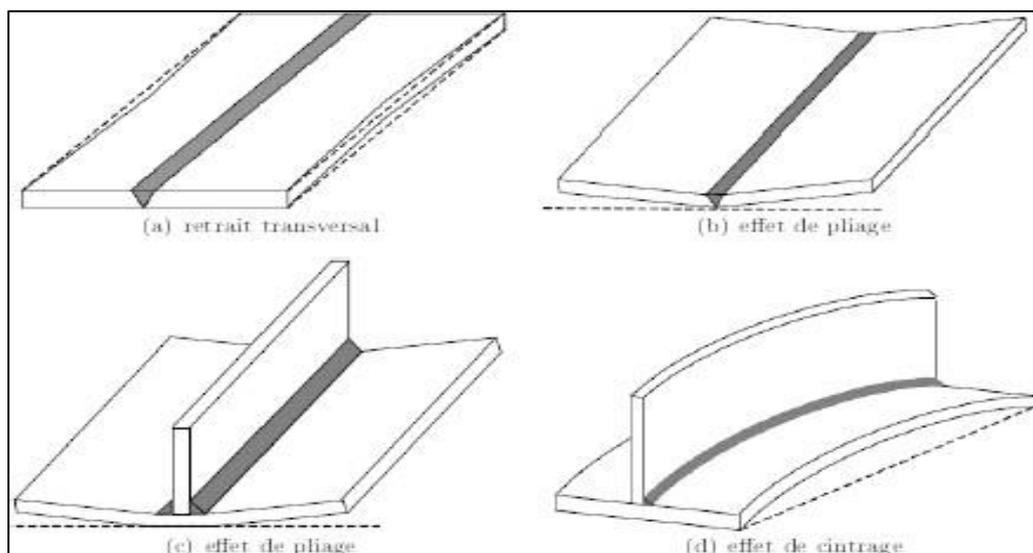
L'ensemble des phénomènes physiques, métallurgiques ou mécaniques qui se produisent lors de l'exécution d'un joint soudé ou d'un rechargement aussi bien dans la zone fondue que dans l'ensemble de la structure soudée dépendent de la grandeur de l'apport calorifique « Heat Input », $H = P/V$ rapport entre la puissance nette de la source de chaleur et la vitesse V de soudage.[3]

I.3.2 Effets mécaniques du régime thermique :

La localisation de l'opération de soudage entraîne une répartition thermique non uniforme dans les pièces à assembler, Cette dernière entraîne l'apparition de contraintes internes (résiduelles) dans les pièces assemblées et des déformations de celles-ci. Ces contraintes résiduelles et ces déformations peuvent entraîner de sérieux inconvénients lors de la mise en service.[3]

I.3.2.1. Les déformations en soudage :

Les déformations résultent des déformations des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Ces déformations résultant d'une répartition thermique non uniforme seront également variables dans les pièces assemblées comme le montre la (figure I.8)[3]



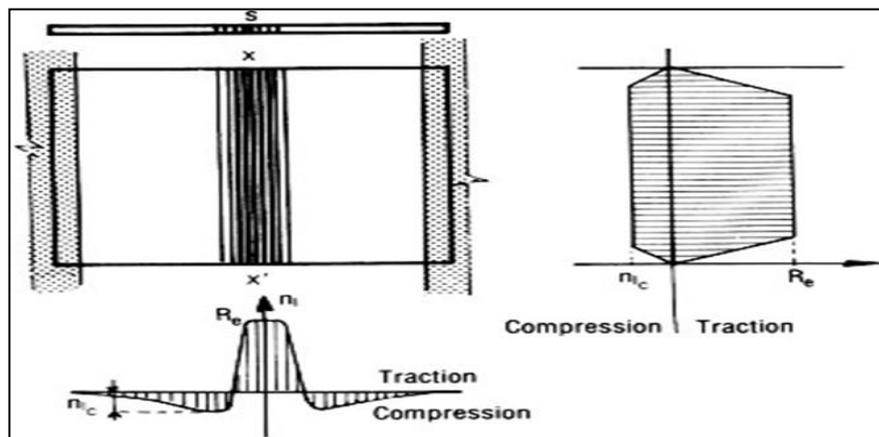
La figure I.08 : Différents modes de déformations. [13]

I.4. Les contraintes résiduelles :

Les contraintes résiduelles résultent de l'empêchement des déformations ou bridage des zones du métal de base échauffé par l'opération de soudage. Suivant l'origine du bridage on distingue les contraintes résiduelles directes et indirectes. Les parties chaudes sont bridées par les parties restées froides des pièces à assembler.[3]

I.4.1 Contraintes et déformations dans le sens longitudinal :

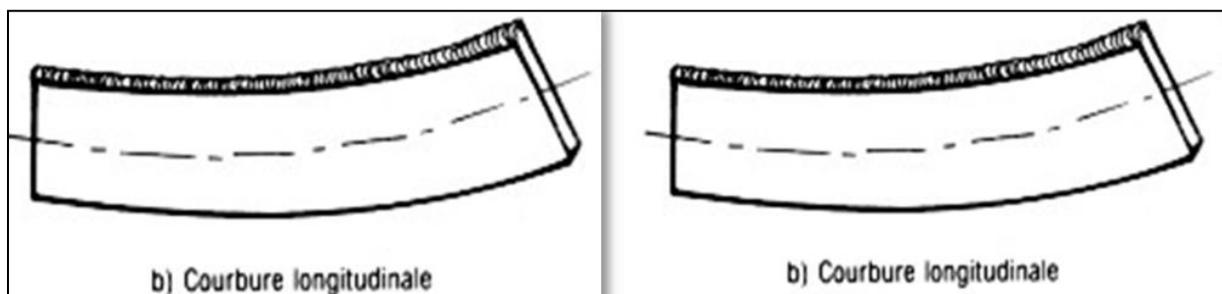
Pendant le refroidissement, la contraction du métal de toute la bande centrale est systématiquement bridée par les zones adjacentes restées plus froides (**fig. I.9**). Une certaine largeur de métal de sections située de part et d'autre de l'axe du joint est plastifiée en traction à la valeur de la limite d'élasticité R_e du métal. Les zones adjacentes assurant l'équilibre sont sous contraintes de compression. Celles-ci sont d'autant plus faibles que le rapport $s/(S-s)$ est faible (S étant la section totale).[3]



La figure I.09 : Répartition des contraintes longitudinales après soudage et refroidissement. [13]

Les contraintes et les déformations longitudinales augmentent avec la limite d'élasticité du métal d'apport.

Deux types de déformations beaucoup plus visibles peuvent l'accompagner (**fig. I.10**)

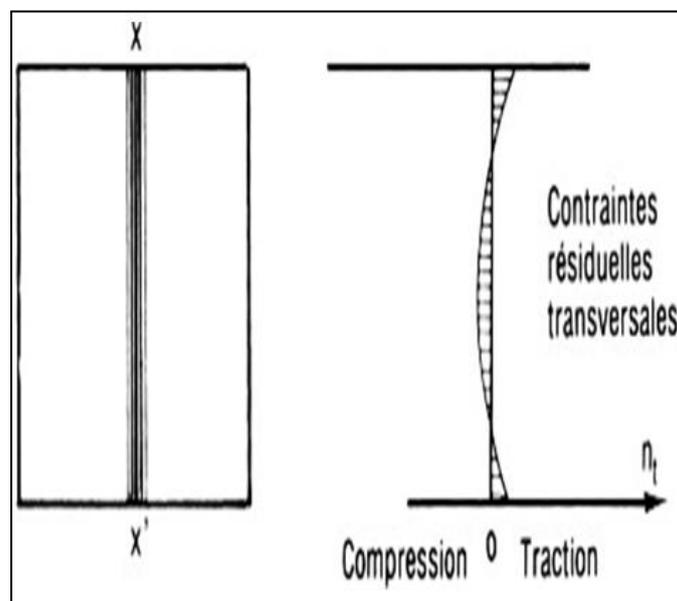


La figure I.10 : Types de déformations résultant de contraintes longitudinales lorsqu'une pièce soudée n'est pas bridée. [13]

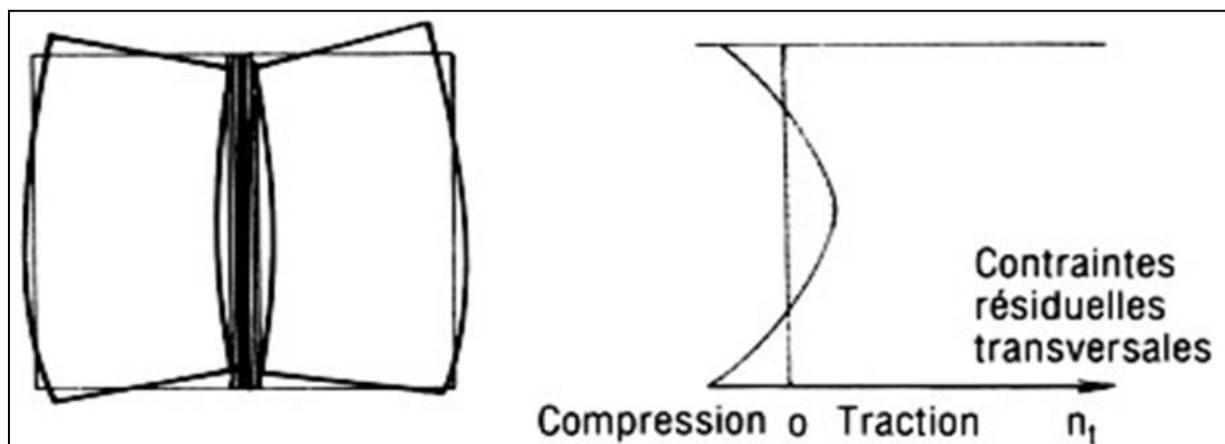
I.4.2. Contraintes et déformations transversales :

Même dans le cas de simples éléments de tôles soudées bout à bout, il intervient ce qu'on appelle communément l'auto-bridage, c'est-à-dire le bridage de la soudure par les éléments qu'elle assemble. Du fait que le soudage est exécuté de proche en proche, l'auto-bridage n'est pas constant. Il est très faible au début de l'exécution d'une soudure et devient plus sévère à la fin.

En conséquence, les déformations et les contraintes transversales ne sont pas réparties régulièrement (**fig. I.11**) et deviennent plus complexes en s'ajoutant aux contraintes induites (**fig. I.12**).



La figure I.11 : Répartition des contraintes résiduelles transversales résultant d'un auto-bridage. [13]



La figure I.12 : Répartition des déformations et des contraintes résiduelles transversales induites. [13]

I.4.3 Effet métallurgique :**I.4.3.1. Introduction à la métallurgie du soudage :**

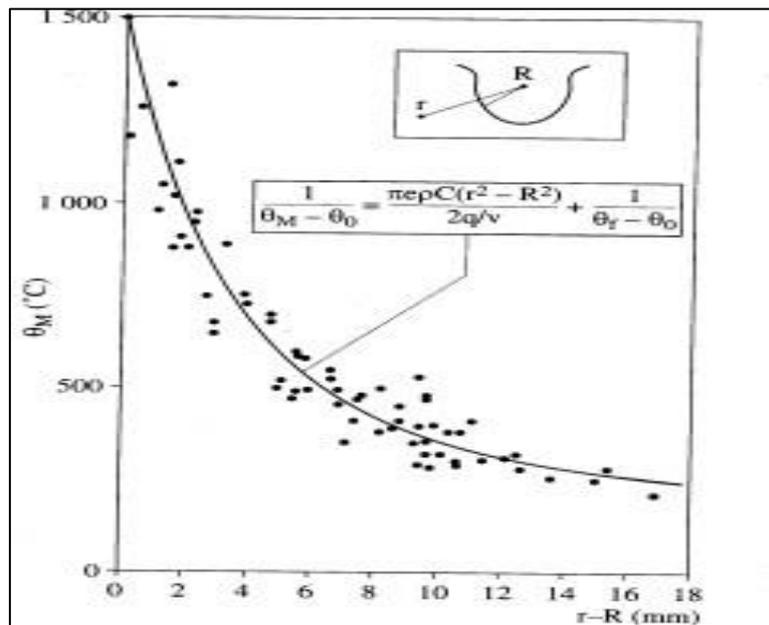
La source d'énergie nécessaire au soudage fait subir aux pièces assemblées un traitement thermique spécifique qui modifie localement les propriétés du métal des pièces assemblées, ou métal de base. De plus, de nombreux procédés nécessitent généralement d'apporter une certaine quantité de métal, ou métal d'apport, de sorte que le soudage s'apparente à une sorte d'opération de fonderie présentant un mode de solidification particulier mais également une sorte d'élaboration métallurgique puisque la continuité du joint est assurée au refroidissement par la solidification du métal d'apport et de la partie du métal de base qui auraient été préalablement fondu. L'étude de ces divers phénomènes : traitement thermique du métal de base dû au soudage, fusion du métal d'apport et d'une partie du métal de base et leur mélange ainsi que les phénomènes de solidification au refroidissement compose la métallurgie du soudage.[3] La métallurgie du soudage à un caractère différent de la métallurgie classique, qu'elle soit d'élaboration ou de traitement thermomécanique, par les faits suivants :

- du point de vue thermique, le soudage se caractérise par des temps d'échauffement et de refroidissement beaucoup plus courts. Si en métallurgie classique l'unité de temps est l'heure, elle est la seconde dans le cas du soudage : les phénomènes se caractérisent donc par un état hors d'équilibre résultant des grandes vitesses de variation de température tant à réchauffement qu'au refroidissement;
- du point de vue de l'élaboration métallurgique (fusion du métal de base et du métal d'apport) le soudage se distingue de la métallurgie classique par le fait que le phénomène se passe de proche en proche et est lié aux conditions de soudage (taux de dilution, protection du bain de fusion, courant de soudage, tension d'arc, vitesse de soudage,...);
- du point de vue de l'opération de fonderie, par le fait que la solidification se fait de proche en proche et intéresse une partie du «moule» que sont les pièces à assembler.[3]

I.5. Modifications microstructurales en zone affectée par la chaleur.

I.5.1. Température maximale atteinte en zone affectée par la chaleur :

D’après les expressions analytiques du cycle thermique de soudage $\theta(t)$ (**Fig. I.13**) décrivant l’évolution de la température en fonction du temps dans les cas respectifs du soudage de produits épais ou minces, la température maximale est atteinte à un temps t_M tel que $\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_{t_M} = 0$



La figure I.13 : Evolution de la température maximale en fonction de la distance à la ligne de fusion. Comparaison des températures calculées analytiquement et relevées expérimentalement (soudage à l’arc submergé). [10]

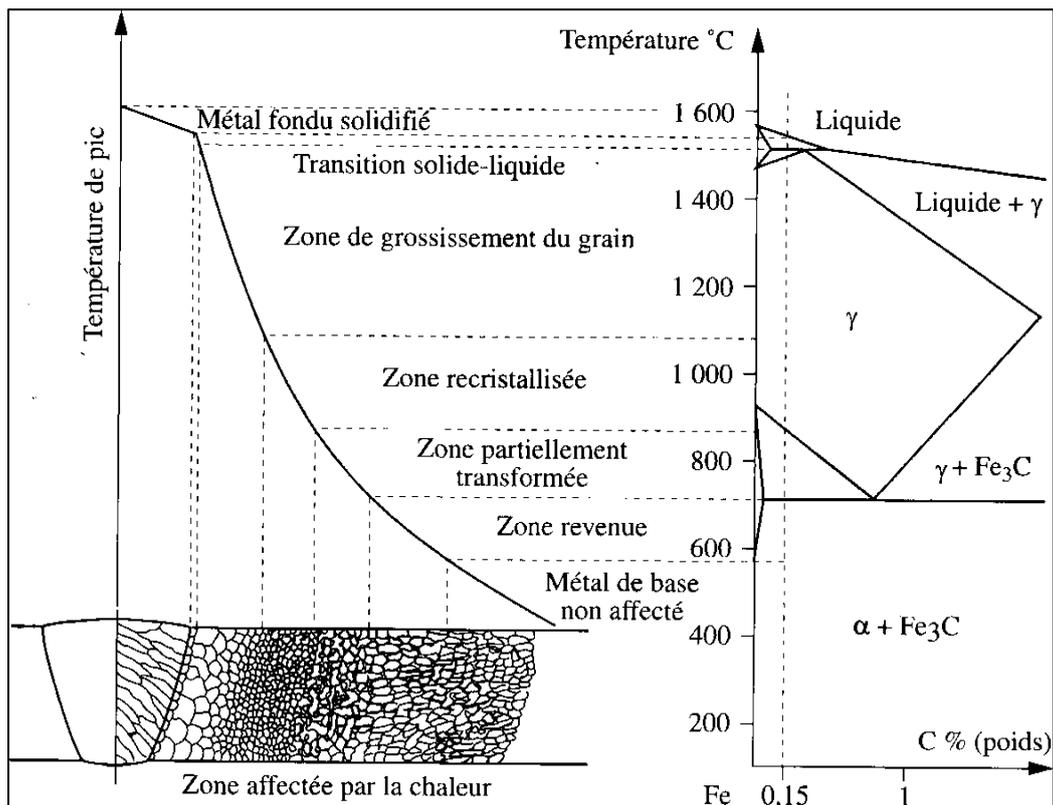
L’expérience montre en fait que la structure métallurgique finale en tout point de la ZAT ne dépend pratiquement que la température maximale θ_M atteinte en ce point, et du critère de refroidissement défini par exemple au moyen de $\Delta T [500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}]$.

Procédé de Soudage	résistance (point, molette...)	TIG, ERW, plasma	LASER	Etincelage	Electrode enrobée	MIG, MAG	Arc sub-mergé	Electroslag Electrogaz
$\Delta [500^\circ\text{C}, 800^\circ\text{C}]$	<1 s	<3s	<5s	1-10 s	2-15 s	4-30 s	5-50 s	100- 250

Tableau I.01: Valeurs typiques de vitesses de refroidissement $\Delta t [500, 800]$ associées à différents procédés de soudage. [11]

I.5.2. Transformations en ZAC lors du chauffage :

Au sens strict, le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, à l'exemple d'Easterling, il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales (voir figure I.14).



La figure I.14 : Présentation schématique des différentes parties constitutives d'un joint soudé d'un acier de construction à 0.15% C [8]

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

- Le métal de base n'ayant pas subi de transformation de phase au chauffage.
- Une zone subcritique, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Certains phénomènes tels que revenu, globularisation, recristallisation, vieillissement, etc., peuvent éventuellement intervenir.
- Une zone de transformation partielle (ou inter-critique).
- A partir de la température A_3 et jusqu'à 1 495 °C environ, la transformation en austénite est totale. La nouvelle structure ainsi formée remplace et « efface » toute trace de la structure antérieure.

C'est au sein de cette zone qu'intervient un grossissement du grain, la plus susceptible de causer certains problèmes métallurgiques.

- Une zone portée partiellement à l'état liquide, où coexistent une phase ferritique solide (δ) et une phase liquide.

Enfin le métal fondu a souvent une composition différente de celle du métal de base. Les premiers germes du métal fondu se solidifient par épitaxie (relations de cohérence cristallographique) sur les grains de la Zone Affectée par la Chaleur.[3]

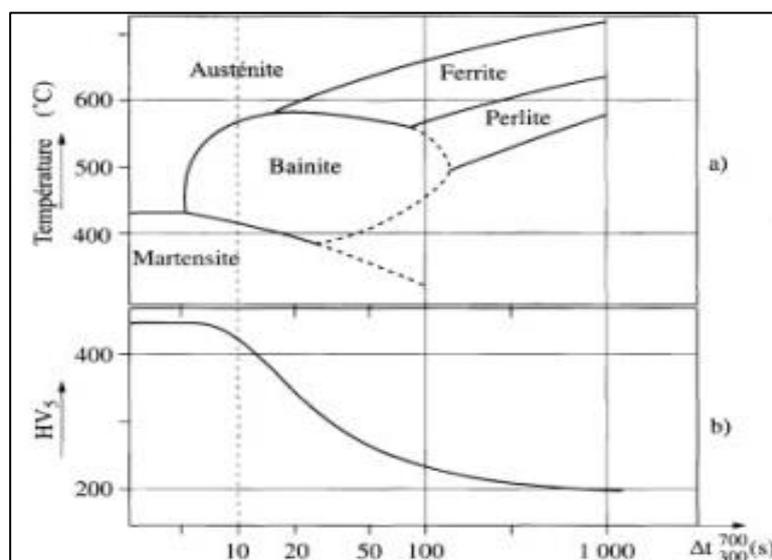
I.5.3. Transformations en ZAC lors du refroidissement :

Selon la vitesse de refroidissement, différents types de microstructures sont susceptibles de se former.

Il existe dans le métal de base une zone qui dépasse la température de transformation ferrite – austénite T_a . Cette zone appelée Zone Affectée Thermiquement ZAT est comprise entre la ligne de fusion dans le métal de base et la température T_a .

En soudage, la vitesse de refroidissement de la ZAT est élevée et dépend des conditions de soudage. Par conséquent, une approche intuitive des phénomènes métallurgiques dans la zone thermiquement affectée ne permettent pas d'appréhender correctement les phénomènes métallurgiques qui apparaissent dans la zone thermiquement affectée. [3]

Ceci peut se faire au moyen de diagramme au refroidissement continu élaboré en condition de soudage (diagramme TRC) (Fig. I.15).



La figure I.15 :(a) Exemple de diagramme TRC en conditions de soudage ($\theta_M=1300^\circ$) :
 (b) Courbe (dureté-critère de refroidissement Δt) correspondante. Acier C=0.18% Mn= 1.4%, Si=0.4%. [11]

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

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

- une résistance mécanique plus élevée,
- une possibilité de déformation plus limitée (perte de ductilité). [3]

Chapitre II :

Les Défauts de soudage

II. Les défauts de soudage:

II.1.Introduction :

Il existe plusieurs types de défauts de soudage ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger, Dans Ce chapitre en vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction du métal travaillé ou bien la procédure de soudage utilisée, Commençons d'abord par les Fissurations.

II.2. Les fissures :

Les fissures sont définies comme des discontinuités de type fracture caractérisées par une extrémité en pointe et à haut rapport de longueur /largeur, Elles peuvent se produire dans le métal fondu, la zone affectée thermiquement, et le métal de base lorsque des contraintes localisées dépassent la résistance maximum du matériau, la fissuration est souvent initiée par des concentrations de contraintes causées par d'autres discontinuités mécaniques ou à proximité d'entailles associées à la configuration du joint. Les contraintes qui provoquent la fissuration peuvent être soit résiduelles ou appliquées Les contraintes résiduelles qui se développent en raison de restrictions issues de l'opération de soudage et de la contraction thermique qui suit la solidification de la soudure. Les fissures liées au soudage présentent peu de déformation plastique, Si une fissure est décelée durant le soudage, celle-ci doit être complètement éliminée avant la poursuite soudage.

II.3.Types des fissures :

La (figure II.01) résume les fissures qui peuvent être trouvés dans la plupart des cas :

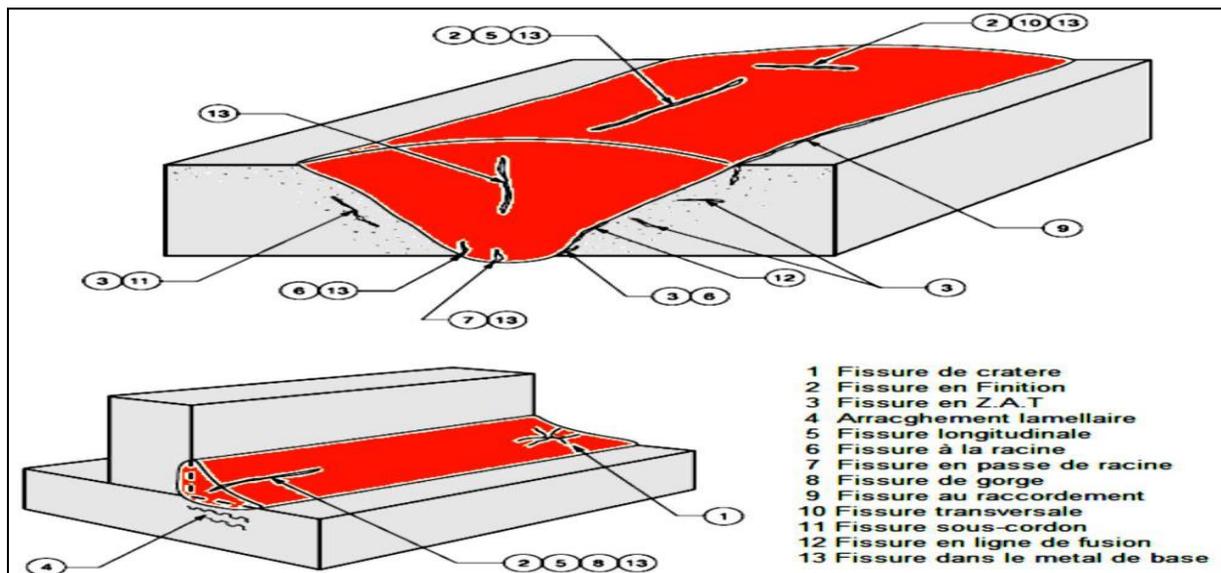


Figure II.01 : Les types de fissure[14]

II.3.1. Fissures de Gorge (Throat Cracks):

les fissures longitudinales orientées le long de la gorge des soudures d'angle (Figure II.02)
Elles sont généralement, des fissures à chaud, bien sur avec l'existence des exceptions, [14]

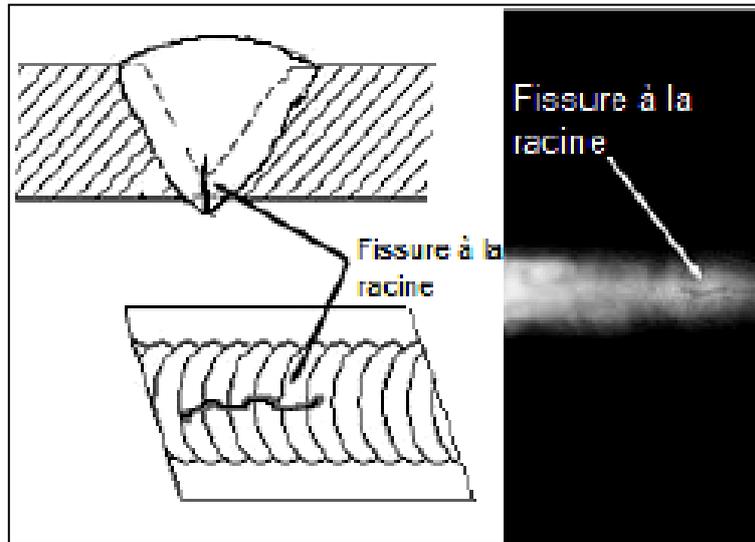


Figure II.02: Fissure de Gorge (Throat Cracks).

II.3.2. Fissures de Racine:

Ce sont des fissures longitudinales à la racine de la soudure ou de la surface de la racine (Figure II.03). Elles peuvent être des fissures à chaud ou à froid.

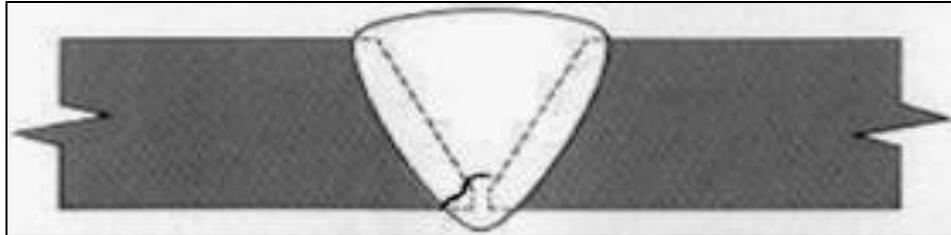


Figure II.03 : Fissure de Racine.

II.3.3. Fissures de Cratère:

Elles se produisent dans le cratère formé à la fin d'un cordon de soudure lorsque la soudure est mal terminée (coupure trop rapide de l'arc). Elles sont parfois appelées fissures en étoile. Les fissures de cratère sont en général des fissures à chaud formant un réseau en étoile. Elles se trouvent le plus souvent dans des matériaux à haut coefficient de dilatation thermique, par exemple l'acier inoxydable austénitique et l'aluminium. Toute fois, l'apparition de fissures peut être minimisée ou évitée par une fin de cordon de forme légèrement convexe avant de retirer l'arc (figure II.04) Des fissures longitudinales peuvent être initiées par une fissure de cratère. [14]



Figure II.04 : Fissure de Cratère.

II.3.4. Fissures au raccordement:

Ce type de fissures sont généralement des fissures à froid, Elles apparaissent et se propagent depuis l'extrémité de la soudure où les contraintes de retrait sont concentrées. Les fissures au raccordement apparaissent à peu près à la normale de la surface du métal de base, Ces fissures sont généralement le résultat des contraintes de retrait thermique sur la zone affectée thermiquement (Figure II.05) Certaines fissures au raccordement se produisent par ce que la ductilité du métal de base ne peut pas s'accommoder aux contraintes de retrait qui sont imposées par l'opération de soudage.[14]

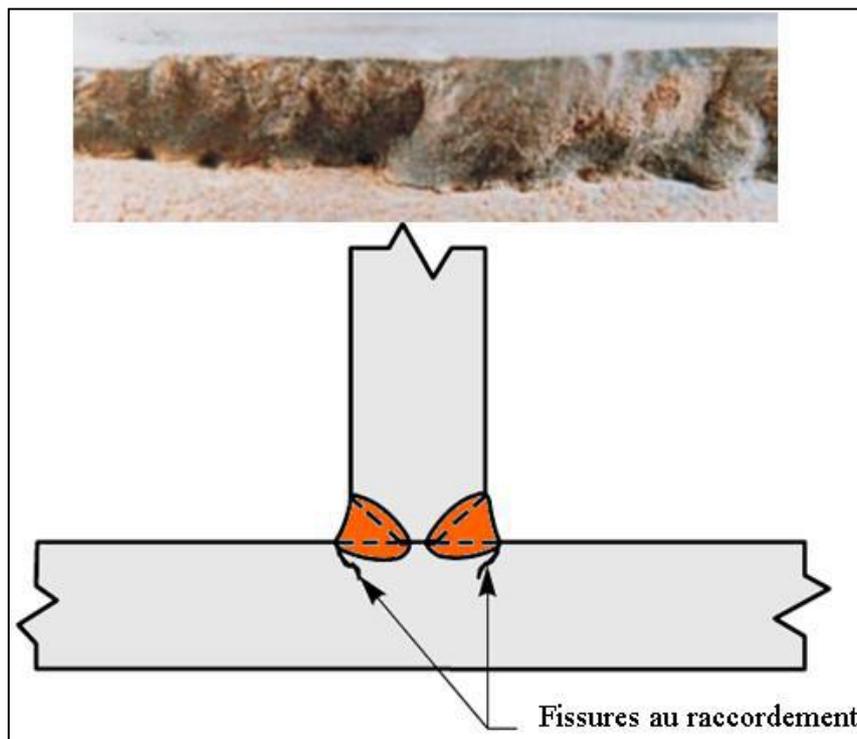


Figure II.05 : Fissure au raccordement.

II.3.5. Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement) :

Les deux appellations sont utilisées de façon interchangeable. Ce sont généralement des fissurations à froid qui se forment dans la zone affectée par la chaleur du métal de base. Ces fissures sous cordon peuvent se produire lorsque trois éléments sont présents simultanément:

- Hydrogène.
- Une microstructure de ductilité relativement faible.
- De fortes contraintes résiduelles. [15]

Ces fissures peuvent être longitudinales et transversales. Elles se trouvent dans la zone affectée par la chaleur et ne sont pas toujours détectables par des moyens visuels. On les Rencontre principalement dans les soudures d'angle, mais peuvent également se produire dans des soudures bout à bout (Figure II.06).

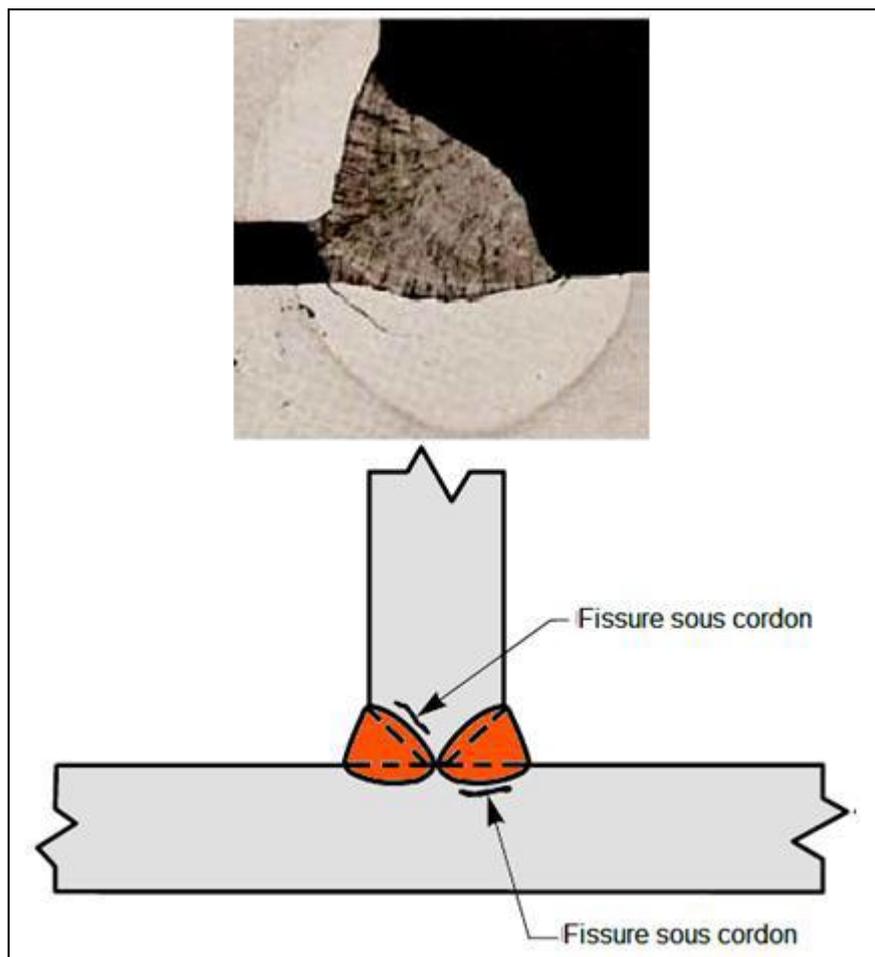


Figure II.06: Fissures Sous -Cordon (ou de Zone Affectée Thermiquement).

II.3.6. Fissures de réchauffage (reheat cracking) :

Forme de fissure qui apparaît dans des aciers au Va (Vanadium) ou Mo (Molybden) qui, dans le cas d'une teneur suffisamment élevée, provoquent une trempe importante dans la zone affectée thermiquement et par la suite une ductilité au fluage basée aux joints des grains dans cette zone affectée thermiquement, d'où apparition de fissures lors du fonctionnement à température élevée (Figure II.07).[15]

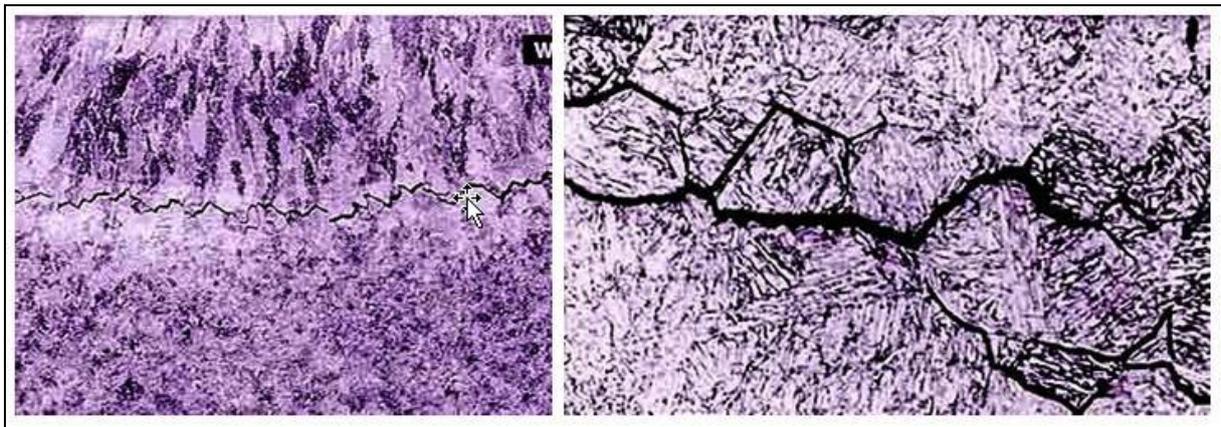


Figure II.07 : Fissures de réchauffages (Reheat cracking).

II.4. Fissuration à chaud (ou de solidification) :

C'est une fissure qui se développe quand la soudure se refroidit, elle se situe souvent en plein centre du cordon. Caractérisé par une séparation au milieu du joint, le cas des passes uniques au passe multiple ou plusieurs joints sont effectués par bande, la fissure centrale est généralement au milieu de l'ensemble du cordon. On sait que Toute solidification d'un métal ou d'énallage s'accompagne d'un retrait, la zone fondue des soudures n'y échappe pas, de telle sorte qu'immédiatement en arrière du bain de fusion le métal qui vient de se solidifier est soumis d'abord à ce retrait à la solidification, puis au retrait d'origine purement thermique qui s'y superpose la compensation de ce retrait par un déplacement du métal de base avoisinant n'est jamais complète (un bridage se produit alors), de telle sorte qu'une déformation plastique à haute température est imposée de proche en proche au métal fondu tant dans le sens transversal que dans le sens longitudinal. La fissuration à chaud affecte les soudures rapides à bain de fusion élancée surtout quand la ductilité à chaud du métal fondu est insuffisante. Les fissures à chaud sont dues à l'association de plusieurs facteurs :

- Facteurs métallurgiques (Ségrégation ou hétérogénéité).

- Facteurs géométriques et tension-thermiques (Géométrie du cordon).

Ces phénomènes sont présents dans le même type de fissure, il est difficile d'identifier la Cause ces fissures, parfois ces derniers interagissent. [15]

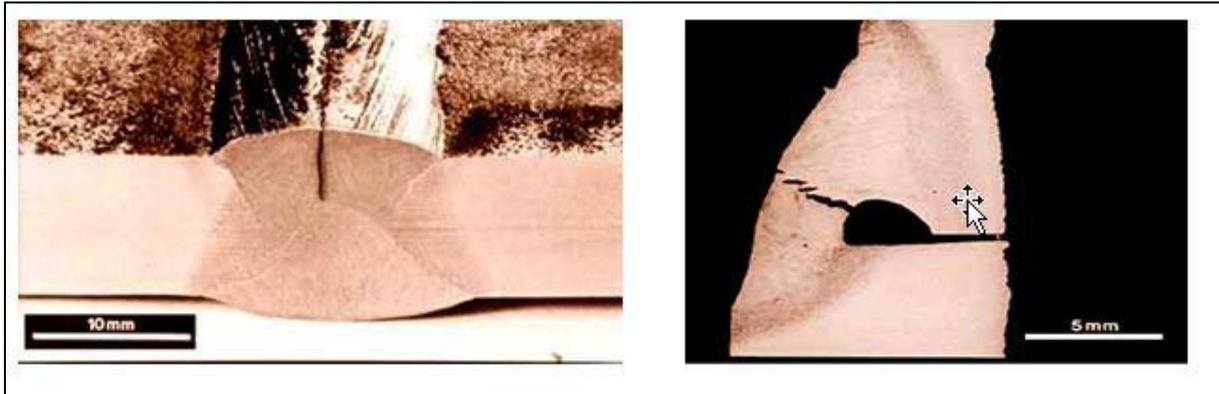


Figure II.08: Fissure à chaud (ou de solidification).

II.5. Fissures à froid :

C'est le défaut le plus redouté dans le soudage des aciers, les fissures à froid peuvent survenir dans la zone fondue ou dans la zone thermiquement affectée ou atteinte.

L'apparition des fissures à froid est très souvent différée dans le temps, c'est à dire longtemps après soudage. Même après le refroidissement de la soudure à la température ambiante, un certain temps peut s'écouler avant que la fissuration n'arrive.

Il peut s'agir de quelques minutes à plusieurs heures. Dans certains cas extrêmes, on a même observé la formation des fissures de deux jours à plusieurs semaines après le soudage. Les fissures à froid dans la zone fondue peuvent se situer suivant une orientation quelconque par rapport à l'axe de la soudure, sont en général situées parallèlement à la ligne de fusion, c'est surtout lors de la première passe de soudage (passe de fond) que naissent les risques de fissuration et lors de la dernière passe pour les fissures au raccordement.

On rencontre les fissures à froid sous plusieurs aspects :

- Fissure à la racine
- Fissure au raccordement entre deux passes.
- Fissure au raccordement
- Fissure sous cordon

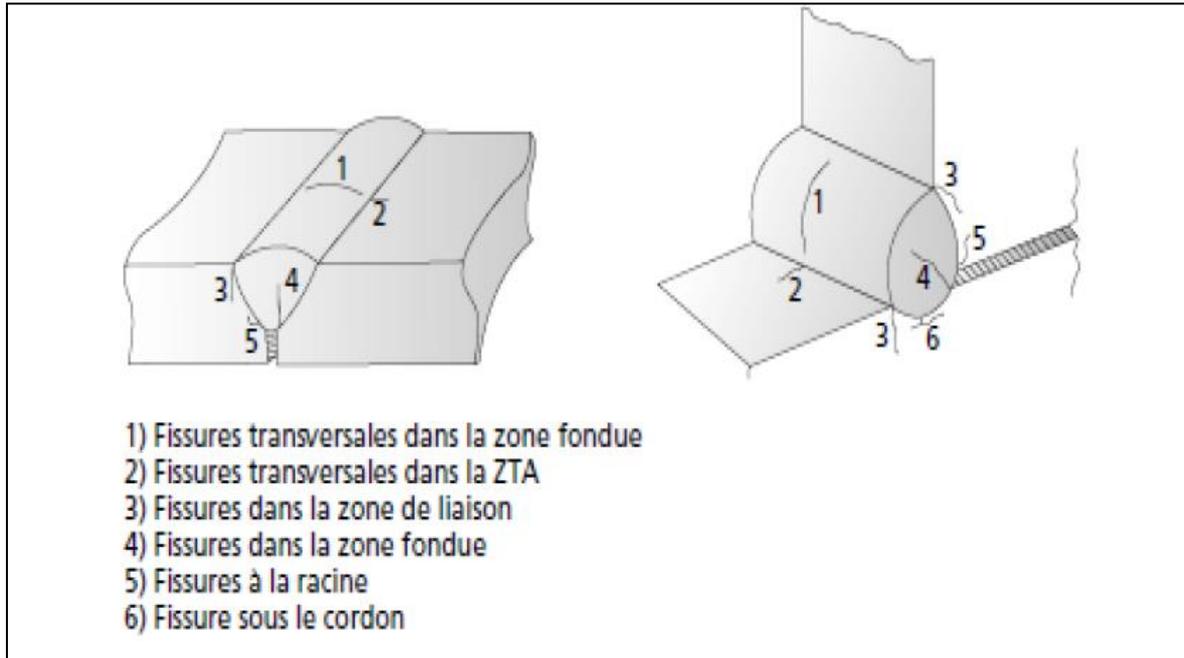


Figure II.09 : schéma des différents types de fissures à froid.

II.6. Manque (défaut) de pénétration :

Il est dû à une absence de métal à la racine des chanfreins, à cause d'utilisation d'électrode de diamètre trop important, intensité trop faible du courant de soudage, mauvaise préparation des pièces à souder. Pour les éviter, il faut un bon choix de l'intensité du courant de la vitesse d'avancement, et une préparation adaptée aux conditions de soudage.

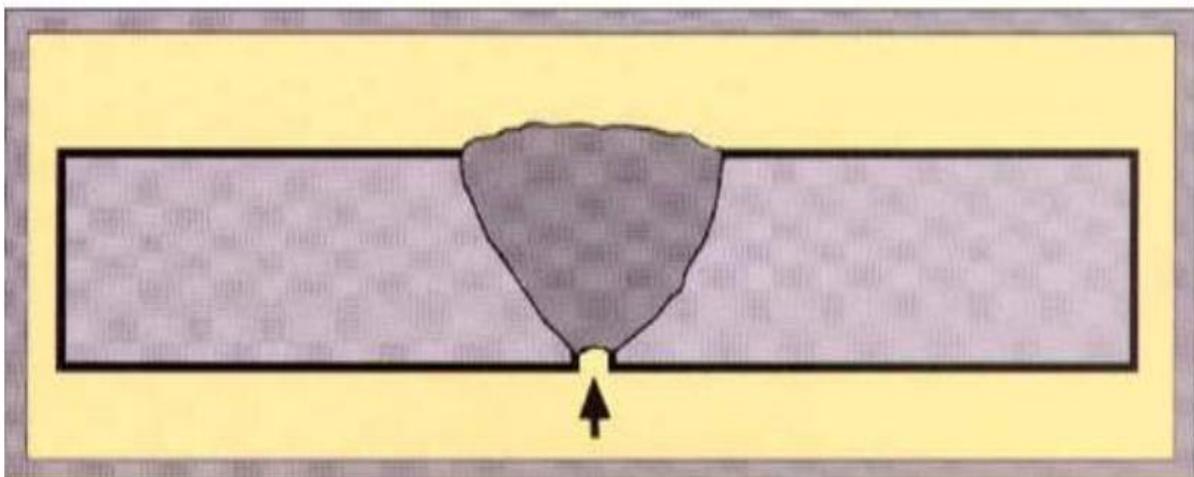


Figure II.10 : Défaut manque de pénétration.

Un excès de pénétration est un excès de métal à la racine. Pour une soudure multi passe, il s'agit d'un excès de métal à travers le cordon déjà déposé Tableau (II.01).

Un manque de pénétration constitue une absence partielle de fusion des bords à souder qui laisse un espace entre ceux-ci. Le manque de pénétration constitue souvent une conséquence d'un courant trop faible ou d'une vitesse d'avance trop élevée. Il est aussi possible que le chanfrein soit trop étroit ou absent, ou que l'arc soit trop long. Dans le cas de pièces épaisses, un préchauffage insuffisant peut aussi être à l'origine d'un manque de pénétration de la soudure.

Défaut de Pénétration	Causes possibles	Moyens de prévention
Excès de Pénétration	<ul style="list-style-type: none">– Vitesse d'avance trop lente– Intensité du courant trop forte– Mauvaise préparation des bords– Trop de distance entre les pièces– Arc trop court	<ul style="list-style-type: none">– Augmenter la vitesse.– Diminuer l'intensité.– Utiliser le joint approprié.– Rapprocher les pièces.– Éloigner la torche.
Manque de Pénétration	<ul style="list-style-type: none">– Vitesse d'avance trop élevée– Intensité du courant trop faible– Chanfrein trop étroit ou absent– Métal de base trop épais et froid	<ul style="list-style-type: none">– Diminuer la vitesse.– Augmenter l'intensité.– Élargir le chanfrein ou modifier l'écartement des pièces.– S'assurer que le métal de base est préchauffé de façon appropriée.

Tableau II.01 : Défauts de pénétration, causes et moyens de prévention [15].

II.7. Manque de fusion (collage) :

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

II.7.1. Manque de fusion dans le flanc de la soudure :

Manque de cohésion moléculaire entre métal d'apport et métal de base au flanc de la soudure (Figure II.11).

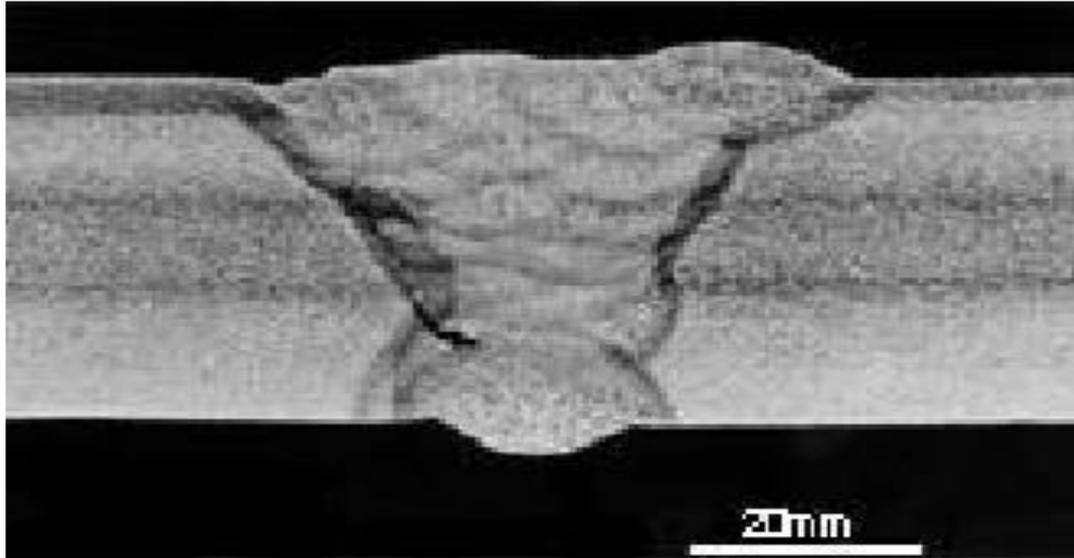


Figure II.11 : Manque de fusion dans le flanc de la soudure.

II. 7.2. Manque de fusion entre passes :

Manque de cohésion moléculaire entre les passes d'une soudure multi-passes (Figure II.12).

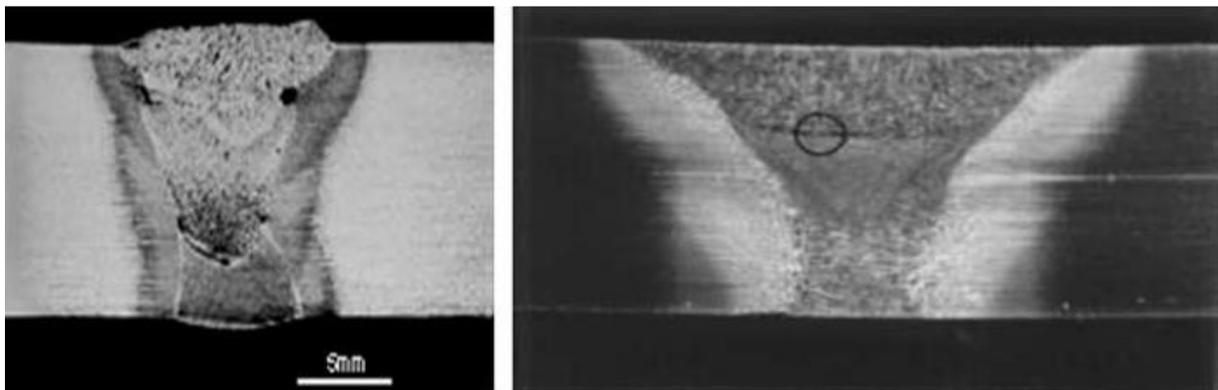


Figure II.12 : Manque de fusion entre passes.

II. 7.3. Manque de fusion à la racine de la soudure :

Manque de fusion moléculaire entre métal d'apport et métal de base à la racine de la Soudure. Cette faute est souvent accompagnée d'un manque de pénétration (Figure II.13).

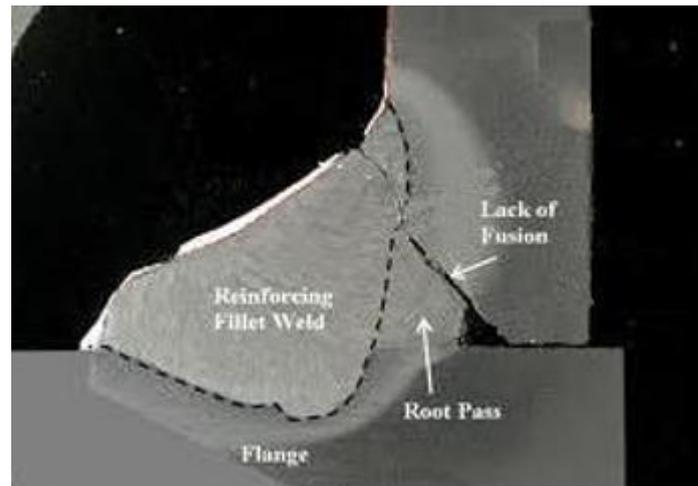


Figure II.13 : Manque de fusion à la racine de la soudure.

II.8. Les inclusions gazeuses :

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

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

Les inclusions gazeuses peuvent se présenter sous 3 formes :

- Porosités vermiculaires.
- Porosités de reprise.
- Porosités uniformes

II.9. Débordements du cordon :

Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier (figure II.14). [16]

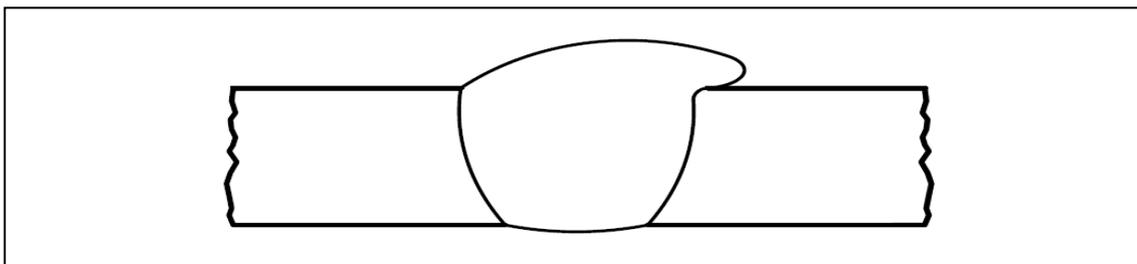


Figure II.14: Débordement.

Chapitre III :

Les résultats et discussions

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons le matériau utilisé, ainsi que les différentes techniques expérimentales qu'on a utilisé pour caractériser l'effet du courant de soudage sur les propriétés mécaniques du joint soudé a savoir : la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée. L'opération de soudage a été réalisée au sein de l'entreprise SARL Saket construction.

III.2. Matériaux Utilisés :

III.2.1. Présentation de l'acier utilisé A33 (S 185) :

L'acier A 33 utilisé dans cette étude est fourni par l'entreprise nationale de Réparation Navale (ERENAV) de Bejaia. L'analyse chimique de l'acier A33 à été réalisée par la spectrométrie de fluorescence X. Dans le tableau ci-dessous on présente leur composition chimique.

Composition chimique de l'acier A 33	Fe	99,3154	V	0,0075
	Cr	0,0046	S	0,0123
	Ni	0,0058	P	0,0148
	Mn	0,1125	Ti	0,0021
	Si	0,0164	Al	0,0163
	Cu	0,0085	Mo	0,0011
	Co	0,0075	C	0,1080

Tableau III.1 : Composition chimique de l'acier A33 (S 185). [17]

III.2.2. Préparation des plaquettes :

L'acier A33 fourni par ERENAV BEJAIA est sous formes de tôle d'épaisseur 4 mm. Nous avons découpé quarte plaquette de dimension 150 x 25 mm,

Après le soudage des plaquettes nous avons encore découpé notre plaque soudée en deux échantillons de 75 mm et l'autre en 25 mm. (**Voir la figure III.1**)

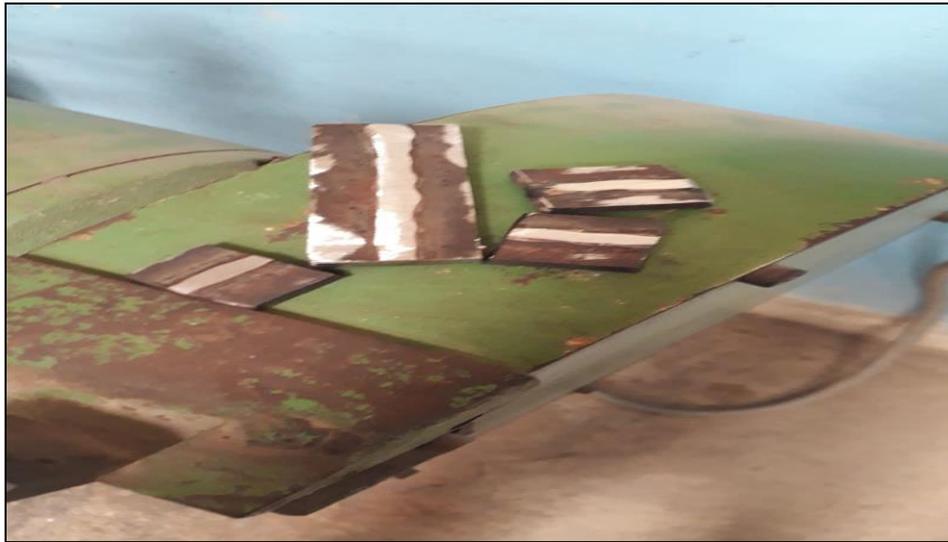


Figure III.1: Découpage de plaques soudées

III.2.3. Soudages des plaquettes :

Pour l'élaboration de nos joints de soudure, le procédé utilisé est constitué d'un poste à souder ainsi qu'une perche, L'enrobage de l'électrode est un mélange complexe dont les composants sont choisis en fonction du métal à souder. Il forme le laitier qui remonte à la surface. Sa viscosité permet de varier les compositions. Dans notre étude les deux enrobages sont de types A Cellulosique. Dans ce travail on a utilisé le soudage à l'arc électrique avec deux type d'électrode enrobée de diamètre 2.5mm, la première est de type rutile de dénomination commerciale E6013, alors que la deuxième est l'électrode enrobée de type Inox 18/8. La composition chimique des deux types de cordon est présenté dans le tableau ci dessous **tableau III.2**

Plaques	Fe	Ti	Cr	Ni	Mn	C
P I (rutile)	-	Bal	trace	1,8 – 2,6	1.4	/
P II (Inox 18/8)	Bal	-	17	18	0.1	0.06

III.2 : La composition chimique des cordons

Dans le tableau ci-dessous en présent les paramètres de soudage utilisés pour la réalisation de la liaison métallique.

Plaques	Tension	L'intensité	Polarité
P I (rutile)	220 V	90 A	Normale
P II (Inox 18/8)	220 V	150 A	Normale

Tableau III.3 : Les paramètres de soudage utilisés pour la réalisation de la liaison métallique.

III.2.4. Polissages des plaquettes :

Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des papiers abrasifs de différentes granulométries décroissantes (de plus gros au plus fin : 220 jusqu'à 1500) (**figure III.2**).



Figure III.2 : Les surfaces des plaquettes soudées après le polissage.

Cette opération consiste à rendre la surface plane et brillante .pour cela on a utilisé une polisseuse à disque abrasif. (**Voir la figure III.3**)



Figure.III.3 : Polisseuse a double plateaux

III.2.5. Réalisation de l'entaille U :

Pour avoir la forme finale des échantillons normalisés, l'essai de résilience nécessite de réaliser une entaille de forme U, d'angle 90 et une profondeur de 6 mm au milieu du grand joint soudé (voir la figure III.4).

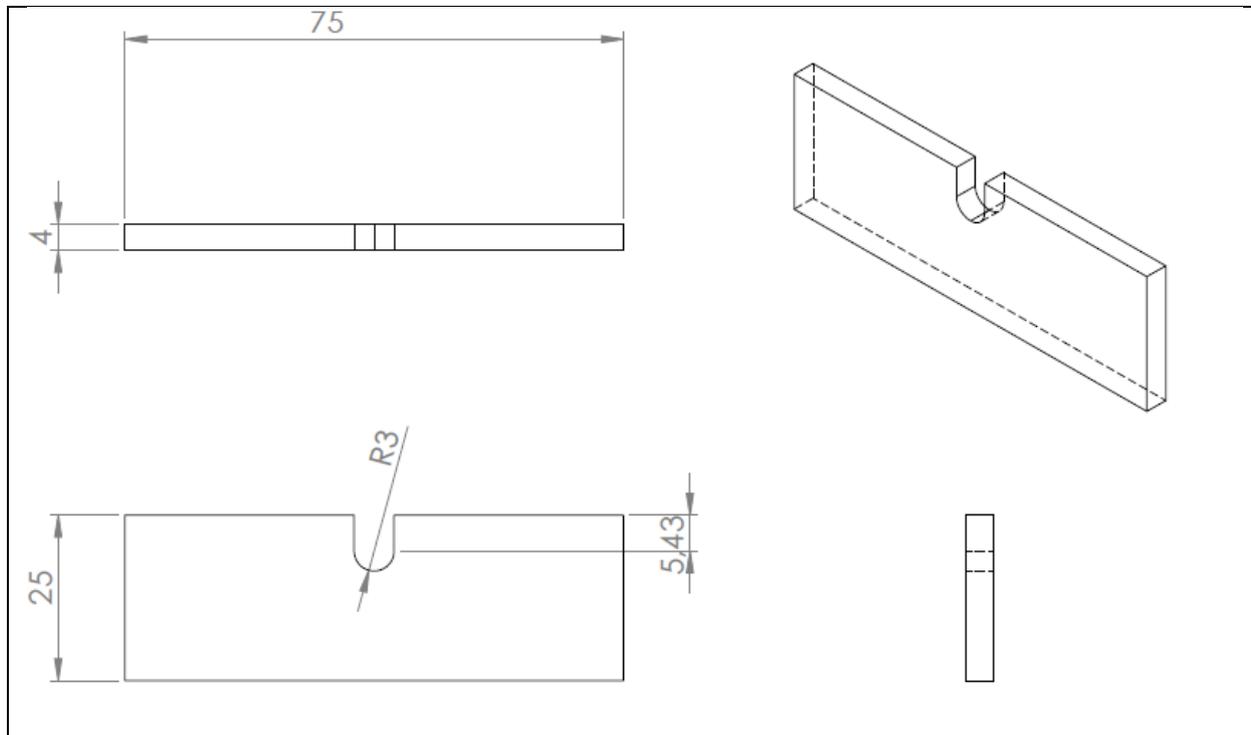


Figure.III.4 : Préparation des plaquettes métalliques avec chanfrein U

III.3. Essai de résilience :

L'essai Charpy permet de caractériser très rapidement le type de rupture fragile ou ductile, en déterminant l'énergie nécessaire pour la rupture d'une éprouvette entaillée. C'est un essai de choc à vitesse de déformation élevée. Dans l'étude, il est question de l'appliquer à des dépôts obtenus grâce au pistolet arc spray 234. L'essai est réalisé sur la machine type MT 3016 Impact Testé selon la norme AFNOR NF EN ISO 148-2 au sein du hall de technologie de l'université de Bejaïa (figure III.5). Elles sont positionnées sur deux appuis et frappées par le pendule dans leur plan de symétrie, au dos de l'entaille. L'échelle est diplômée en joules et montre directement l'énergie nécessaire pour rupture de l'éprouvette.



Figure III.5: Machine de résilience MT 3016.

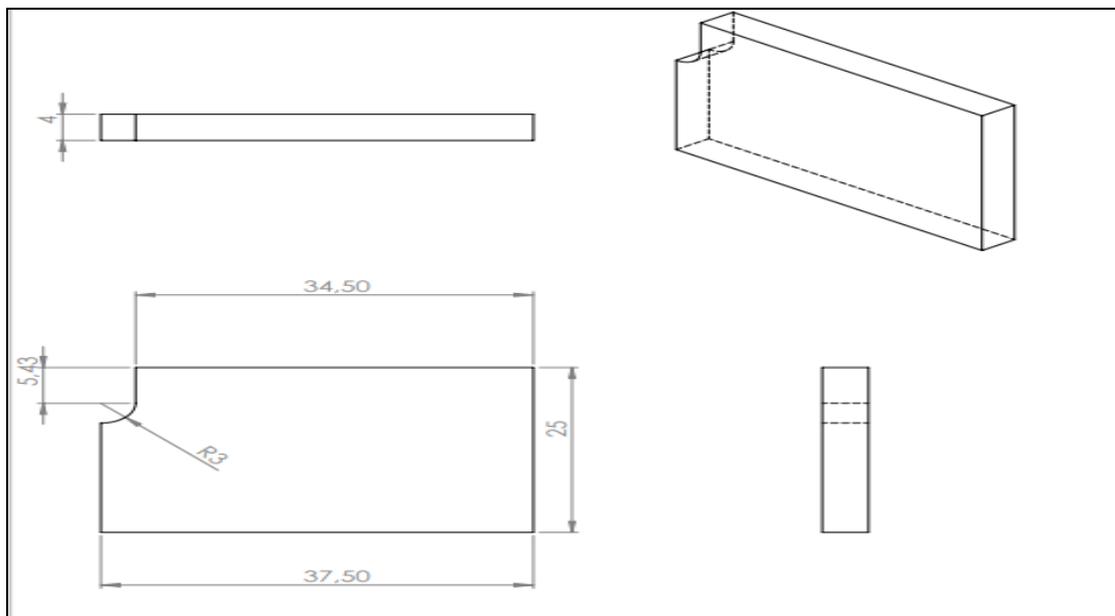


Figure III.6: La plaque après l'essai de résilience

III.4. Essai de Dureté Rockwell HRC :

La dureté est un paramètre permettant de caractériser les matériaux. Il existe plusieurs manières de déterminer la dureté d'un matériau dont certaines font l'objet de norme précise. La machine de l'essai de dureté utilisée est configurée pour réaliser un essai de dureté par pénétration de type Rockwell. Un pénétrateur de forme conique à base carrée d'angle au sommet 136° , est appliqué progressivement sous l'action d'une force F de 981N sur une surface maintenu pendant un temps précis de 20 seconde. (Voir la figure III.7)



Figure III.7: Durometre HRC.

III.5. Résultats et discussion:

Après la réalisation de l'opération de soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée des deux plaques métalliques en acier A33, nous avons procédé à une série d'essais mécaniques de dureté et de résilience. Nous présenterons dans ce chapitre l'ensemble des résultats obtenus suivi d'une discussion.

III.5.1. Résultats de la résilience :

Le tableau III.4 ci-dessous représente les valeurs de la résilience en (J/cm²) des deux plaques

Résiliances en (J/cm ²) de plaque soudée avec le rutile E6013 à 90A	
Résultats après calcul	K=13,16
Résiliances en (J/cm ²) de plaque soudée avec L'INOX 18/8 à 150	
Résultats après calcul	K=19,74

Tableau III. 4: Résultats de la résilience

Justification des résultats de tableau :

- La résilience de plaque soudée avec le rutile E 6013 :

$$K = (25 - 15) / S$$

$$S = (25 * 4) - (6 * 4) = 76 \text{ mm}^2 = 0,76 \text{ cm}^2$$

$$\text{Donc: } k = 10 / 0,76$$

$$K = 13,16 \text{ J/cm}^2$$

- La résilience de plaque soudée avec l'INOX:

$$K = (25 - 10) / S$$

$$S = (25 * 4) - (6 * 4) = 76 \text{ mm}^2 = 0,76 \text{ cm}^2$$

$$\text{Donc: } k = 15 / 0,76$$

$$K = 19,74 \text{ J/cm}^2$$

L'Histogramme de la figure III.8 représente les valeurs de la résilience enregistrées sur les deux échantillons soudés sous différents paramètres P1 et P2.

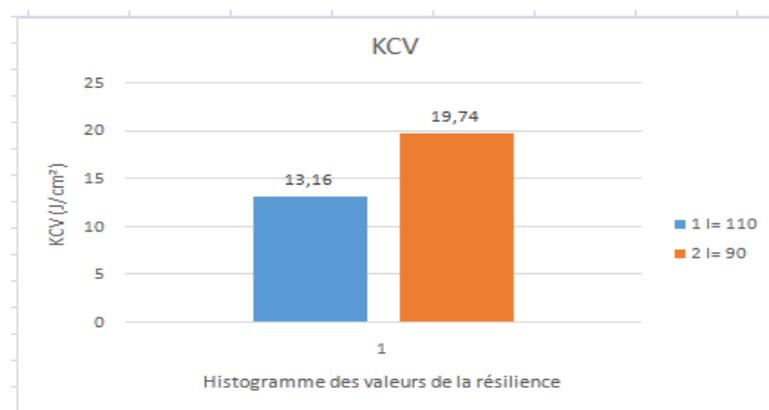


Figure III.8: Histogramme des valeurs de la résilience

Les résultats de l'essai de résilience effectué sur les plaques soudées entaillées en U au milieu du joint soudé, montrent que la liaison métallique réalisée à 150 A est plus tenace que celle soudée à 90A. Elle demande une énergie importante à la rupture (19,74 J/cm²) par contre la liaison réalisée avec un courant de 90A présente une énergie à la rupture de 13,16 J/cm². Cette diminution de l'énergie de rupture dans le cas de plaque soudée à 90A par rapport à la plaque soudée à 150A, peut être expliquée par le type de l'électrode enrobée utilisée lors de soudage telle que celle que l'on a soudée à 150 A on a utilisé L'Inox par contre l'autre soudée à 90 A on a utilisé la rutile E6013.

De ce fait, la plaque soudée avec L'inox 18/8 à 150A présente un comportement ductile à la rupture par contre la plaque soudée avec la rutile E6013 à 90A présente un comportement fragile à la rupture. Cette explication peut être confirmée par l'observation du faciès de rupture donc on n'a pas pu le réaliser par manque de moyens.

III.5.2.Profil de dureté HRC :

Les deux tableaux III.5 ci-dessous représentent les valeurs obtenues de la dureté HRC des deux plaques soudées avec les deux paramètres P1 et P2.

Plaques	Dureté moyenne HRC	Distance (cm) 0.0	Distance (cm) 0.5	Distance (cm) 1	Distance (cm) 1.5	Distance (cm) 2	Distance (cm) 2.5
P I (rutile)	65.66	74	72	54	50	71	73
P II (Inox 18/8)	64.83	69	67	60	61	64	68

Tableau III. 5: Dureté HRC des deux plaques soudées P1 et P2

III.5.2.1.Profil de dureté HRC P1 :

La figure III. 9 illustre le profil de dureté HRC effectué sous une charge 981N pour les échantillons P1 est représenté ci-dessous.

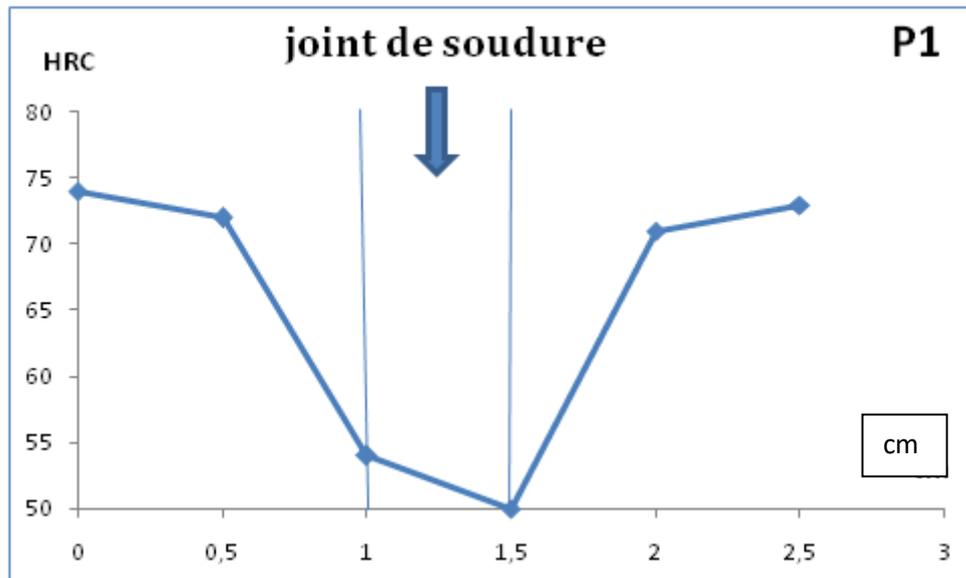


Figure III. 9 : dureté HRC des échantillons P1

-Au niveau du joint de soudure de la plaque I soudé avec le rutile E 6013 a 90A, nous remarquons que la micro dureté présente une moyenne de 54 HRC mais cette valeur diminue jusqu'à 50 HR cette diminution de la micro dureté peut être expliquée par les modifications métallurgiques au niveau du joint de la soudure.

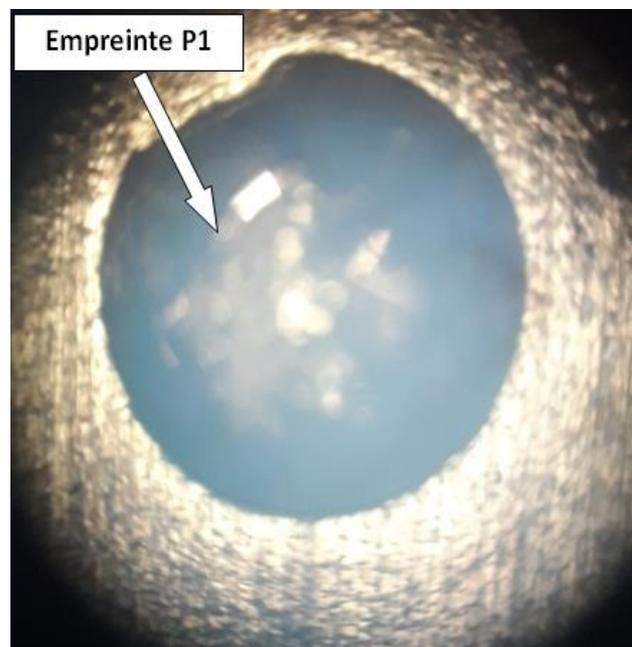


Figure III.10 : Empreinte de la dureté échantillon P1.

III.5.2.2.Profil de dureté HRC P2 :

La figure III. 11 illustre le profil de dureté HRC effectué sous une charge 981 N pour les échantillons P2 est représenté ci-dessous.

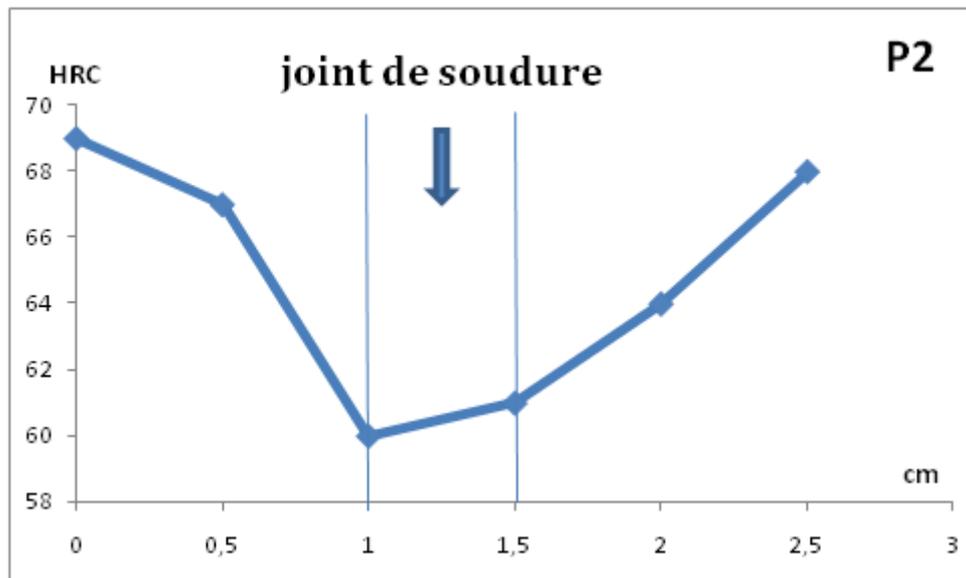


Figure III. 11: dureté des échantillons P2

-Au niveau du joint soudure de la plaque II soudé avec l'INOX 18/8 a 150 A, nous remarquons que la micro dureté présente une moyenne de 60 HRC mais cette valeurs augmente jusqu'a 61 HR .cette augmentation de la micro dureté peut être expliquée par les modifications métallurgiques au niveau du joint de la soudure.

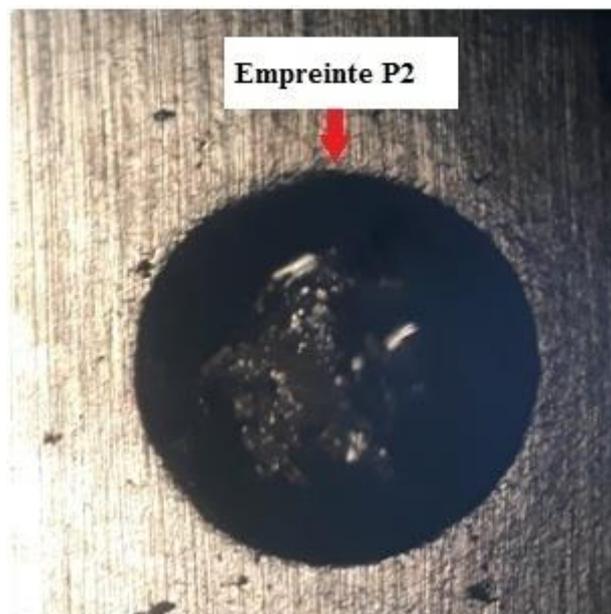


Figure III.12 : Empreinte de la dureté HRC échantillon P2.

III.5.2.3. Etude comparative des profils de dureté HRC P1 et P2 :

La figure III.13 illustre l'étude comparative des profils de dureté HRC effectué sous une charge 981N pour les échantillons P1 et P2 est représenté ci-dessous.

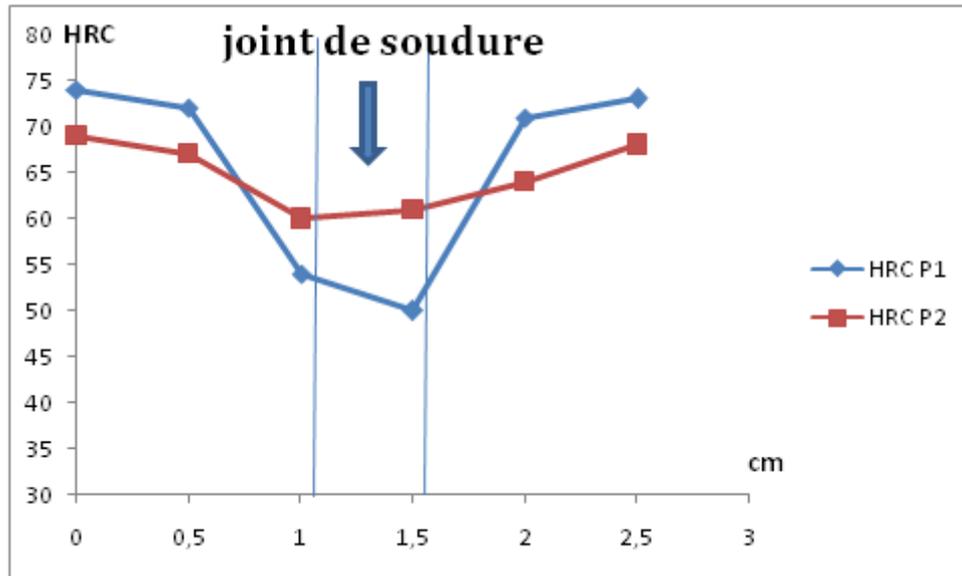


Figure III. 13: étude comparative des duretés HRC des échantillons P1 et P2.

-Nous remarquons que la dureté Rockwell est plus élevée dans le cas de la plaque II soudée avec l'inox 18/8 à 150 A, par rapport à celle soudée avec le rutile E 6013 (plaque I). Cela peut être expliqué par le type d'électrode enrobée utilisée telle que l'inox présente une dureté Rockwell plus élevée que le rutile.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre modeste travail a porté sur l'influence du courant de soudage sur les caractéristiques mécaniques de micro dureté et de résilience d'une plaque soudée à l'arc électrique.

- La microdureté de la plaque PII soudé avec l'inox 18/8 a 150 A supérieur à celle de soudée avec la rutile E 6013 a 90 A PI.
- La liaison métallique réalisée à 150 A (plaque II) et plus tenace que celle soudée a 90A (plaque I). Elle nécessite une énergie importante a la rupture ($197,36 \text{ J/CM}^2$) par contre la liaison réalisée avec un courant de 90A présente une énergie a la rupture de $131,57 \text{ J/cm}^2$.
- Le courant et le type d'électrode utilisés lors du soudage de l'acier sont deux paramètres qui peuvent modifier la microstructure métallographiques des panneaux soudés.

Références bibliographiques

- [1] S. Benissad, Le Soudage Tec 340, livre université de Constantine, 1991
- [2] J.A .Pender, Le Soudage, Edition Métrique.1972
- [3] A .Kechau, Etude de soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage, Thèse de Doctorat Présentée par université de liège, France 2013
- [4] F. Valensi, Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG thèse doctorat présentée a l'université d'Orléans, France ,2007
- [5] M. Clerge, simulation numérique du soudage a l'électrode enrobée d'angle en acier S355, thèse doctorat présentée a l'université de Metz, France ,2000
- [6] J.-Planckaert, Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc, Thèse doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, France ,2008.
- [7] J.Goldak, A. Chakravarti, and M. Bibby, A new finite element model for welding Heat sources, 1984.
- [8] L.Devillers, D.Kaplan, « Aspects métallurgiques de l'assemblage des tôles de faible épaisseur par LASER. Rapport de recherche final CECA n°7210 KA/314, Rapport IRSID RCA 89333, octobre 1989.
- [9] L. Ducros, le soudage Manuel a l'arc électrique, Edition J-B.Bailliére et fils, année 1971
- [10] L. Devillers, D. Kaplan, J-P. Jansen, Simulation thermique des zones affectées Par la chaleur en soudage multi passe des aciers de construction, Edition Sedom, 1987
- [11] R.Blondeau, Métallurgie et Mécanique de soudage. Edition Hermès-Lavoisier, 2001
- [12] J.P. Planckaert, Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short- arc. Thèse de doctorat université Nancy 1, France, 2008
- [13] A. Djelil, Etude mécanique et microstructurale de structure en acier inox 304L soudée par TIG, mémoire fin d'étude Master II, université mouloud Mammeri de tizi ouzou, 2013/2014
- [14] A. Amel, Etude du procédé de soudage semi-automatique Mig-Mag d'un joint soudé en acier ST37, mémoire fin d'étude Master II université de Larbi ben M'hidi oum El-Bouaghi, 2017/2018
- [15] M.Houcine, Dj.Hasnaoui, Inspection et contrôle des assemblages soudés par méthodes non destructives, Mémoire fin d'étude Master II présenté a l'université de M'sila, 2017/2018
- [16] A. Mostefa, Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration a froid dans la Zat, Mémoire fin d'étude Master II présenté a l'université deAbubakr belkaid-Tlemcen ,2017/2018

Références bibliographiques

[17] N. Akilal, Étude de la corrosion de la soudure de l'acier A33 utilisé en construction navale, Mémoire fin d'étude Magister présenté a l'université de Bejaia, 2007

RUSUME

RUSUME

Notre travail a porté à l'assemblage par soudage à l'arc électrique avec inox 18/8 et rutile E6013 de deux plaques métalliques en acier A33. Nous nous sommes intéressé à l'influence du courant de soudage sur les propriétés mécaniques tels que la dureté et la résilience..

Il est essentiel de comprendre et d'expliquer les interactions multi physiques en soudage à l'arc , telle que les propriétés mécaniques , de ces joints afin de pouvoir apporter des solutions d'optimisation applicables industriellement. La finalité de ce travail est de pouvoir mesurer les différents types de caractérisation mécanique.

Les résultats de la micro dureté montrent que la plaque soudée à 150A présente une valeur moyenne de 61 HRC par joint soudé, par contre elle présente une valeur de 50 HRC pour un courant de soudage à 90A. Au niveau de la résilience, la plaque soudée à 150A présente une énergie de rupture légèrement plus élevée par rapport à la plaque soudée à 90A.

Abstract

Our work focused on the assembly by electric arc welding with 18/8 stainless steel and E6013 rutile of two A33 steel metal plates. We were interested in the influence of welding current on mechanical properties such as hardness and toughness.

It is essential to understand and explain the multi-physical interactions in arc welding, such as the mechanical properties, of these joints in order to be able to provide optimization solutions that can be applied industrially. The purpose of this work is to be able to measure the different types of mechanical characterization.

The results of the micro hardness show that the plate welded at 150A has an average value of 61 HRC per welded joint, on the other hand it has a value of 50 HRC for a welding current at 90 A. At the level of resilience, the welded plate at 150A has a slightly higher breaking energy compared to the plate welded at 90A.