



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER II

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

HACHI ABDEL AZIZ

BEN HAMIDOUCHE NABIL

Thème

**ÉTUDE COMPARATIVE SUR LE SOUDAGE À L'ARC
ÉLECTRIQUE AVEC ÉLECTRODE ENROBÉE(SMAW)
ET AVEC ÉLECTRODE RÉFRACTAIRE(GTAW)**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MAKRI Hocine	MCA	Président
BENKHARBECH Houria	MCA	Encadreur
ELHADI Abdelmalek	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/03/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

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

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur, Melle. BENKHERBACHE HOURIA pour sa confiance, son aide précieuse et surtout la disponibilité qu'elle nous a accordé.

Nous adressons nos vifs remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de génie mécanique qui ont bien dirigé notre cursus universitaire.

Nous remercions particulièrement nos collègues et amis qui ont relu ce mémoire et nous ont fait part de leurs suggestions.

DÉDICACES

À

Mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À mes chers frères, Oussama, Didine, Mahdi, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral

À ma chère sœur, Ryna pour son appui et son encouragement et surtout prendre soin de moi

À toute ma famille, ma grande mère, ma chère tante Sabra

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi

HACHI ABDEL AZIZ.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail

À

Mon père qui m'a toujours guidé et soutenu

À Ma mère qui a été toujours à mes côtés

À Mes frères

À tous la famille **BEN HAMIDOUCHE**

À tous mes amis sans exception

BEN HAMIDOUCH NABIL

LISTE D'ABRIVIATIONS

ZF	Zone Fondu
ZAT	Zone Affecté Thermiquement.
MB	Métal de Base
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternative
SMAW	Shielded Metal Arc Welding (Soudage à l'arc avec électrode enrobée)
TIG	Tungsten Inert Gas
GTAW	Gas Tungsten arc welding (Soudage à l'arc avec électrode réfractaire)
GMAW	Gas Metal Arc Welding (Le soudage MIG-MAG)
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
CND	Contrôle Non-Destructif
CD	Contrôle Destructif
PT	Pénétrant Test
FT	Fluorescent Test
RT	Radiographies Test
Rm	Résistance mécanique
Re	Résistance élastique
A%	Allongement
C	Carbone
Si	Silicium
Mn	Manganèse
S	Soufre
P	Phosphore
N	Azote
Cu	Cuivre

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Principaux types d'assemblages
Figure I.2	Présentation d'une zone fondue
Figure I.3	Différentes zones atteintes par la chaleur
Figure I.4	Présentation macrographique d'un joint soudé
Figure I.5	Coupe transversale d'un assemblage
Figure I.6	Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie
Figure I.7	Principes fondamentaux de soudage à l'arc
Figure I.8	Circuit électrique pour le soudage à l'arc
Figure I.9	Arc électrique
Figure I.10	Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée(SMAW)
Figure I.11	Principe du procédé GTAW
Figure I.12	Principe de fonctionnement du procédé GMAW
Figure II.1	Fissure à chaud
Figure II.2	Fissure à froid
Figure II.3	Types de fissures à froid
Figure II.4	Types de soufflures
Figure II.5	Types des inclusions
Figure II.6	Les retassures
Figure II.7	Morsure et caniveaux
Figure II.8	Types d'effondrement
Figure II.9	Trou
Figure II.10	Convexité et concavité
Figure II.11	Surépaisseur du cordon
Figure II.12	Débordement du cordon
Figure II.13	Excès de pénétration
Figure II.14	Manque de pénétration
Figure II.15	Collage ou manque de la fusion
Figure II.16	Projections
Figure II.17	Réalisation d'un contrôle visuel
Figure II.18	Pénétrant et Révélateur
Figure II.19	Fluorescent Test
Figure II.20	Essai Radiographique
Figure II.21	Essai Magnétique
Figure II.22	Essai Ultrason
Figure II.23	Machine de traction
Figure II.24	Machine de pliage
Figure III.1	Éprouvette prismatique normalisée de traction
Figure III.2	Préparation des éprouvettes à souder pour la traction
Figure III.3	Préparation des plaques à souder pour l'essai de ressuage
Figure III.4	Plaque1 après l'exécution de soudage SMAW
Figure III.5	Les éprouvettes prismatiques après l'exécution de soudage SMAW.
Figure III.6	Plaque2 après l'exécution de soudage GTAW
Figure III.7	Les éprouvettes prismatiques après l'exécution de soudage GTAW
Figure III.8	Plaque1 après l'examen de ressuage
Figure III.9	Courbe de traction de l'éprouvette SMAW1
Figure III.10	Courbe de traction de l'éprouvette SMAW2
Figure III.11	Courbe de traction de l'éprouvette SMAW3
Figure III.12	Agrégation des courbes de traction des éprouvettes soudés par SMAW
Figure III.13	Plaque2 après l'examen de ressuage
Figure III.14	Courbe de traction de l'éprouvette GTAW1
Figure III.15	Courbe de traction de l'éprouvette GTAW2
Figure III.16	Courbe de traction de l'éprouvette GTAW3
Figure III.17	Agrégation des courbes de traction des éprouvettes soudés par GTAW

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Les principales différences entre SMAW et GTAW
Tableau II.1	Causes de fissuration et moyens de prévention
Tableau II.2	Causes des soufflures et moyens de prévention
Tableau II.3	Type d'inclusion et leurs descriptions
Tableau II.4	Causes d'inclusions et moyens de prévention
Tableau II.5	Causes de retassures et leurs moyens de prévention
Tableau II.6	Causes des caniveaux et moyens de prévention
Tableau II.7	Causes des défauts géométrique et moyens de prévention
Tableau II.8	Récapitulatif des défauts communs en fonction du procédé utilisé
Tableau II.9	Comparaison entre les rayons X et Gamma
Tableau II.10	Avantages et inconvénients de contrôle par ultrasons.
Tableau II.11	Domaine d'application des END en fonction d'assemblage
Tableau III.1	Propriétés mécanique d'acier A60
Tableau III.2	Composition chimique d'acier
Tableau III.3	Paramètres électriques de soudage SMAW
Tableau III.4	Paramètres d'électrode enrobée utilisée
Tableau III.5	Paramètres électriques utilisé en soudage GTAW
Tableau III.6	Paramètres de métal d'apport utilisé en GTAW
Tableau III.7	Résultats de traction des éprouvettes soudées par SMAW
Tableau III.8	Résultats de traction des éprouvettes GTAW

SOMMAIRE

Liste D'abréviations	v
Liste Des Figures	vi
Liste Des Tableaux	vii
Introduction Générale	03
Chapitre I	04
I.1 Introduction	05
I.2. Historique De Soudage	05
I.3 Définitions	06
I.3.1. Définition De Base	06
I.3.2. Formes De Soudage	06
I.3.3. Différents Types D'assemblage Par Soudage	06
I.3.4. Différentes Parties D'un Assemblage Soudé	07
I.3.5. Différents Parties D'une Soudure	07
I.3.6. Définition De L'opération De Soudage	09
I.4.Procédés De Soudage	11
I.5. Soudage A L'arc	13
I.5.1. Définition De L'arc Electrique	14
I.6. Les Différents Techniques De Soudage A L'arc	16
I.6.1. Soudage A L'arc Avec Electrode Enrobée (SMAW)	16
I.6.2. Soudage A L'arc Avec Electrode Réfractaire TIG (GTAW)	19
I.6.3. Soudage GMAW/MIG-MAG (Sous Gaz Inerte/Actif)	21
I.7. Conclusion	24
Chapitre II	25
II.1 Introduction	26
II.2. Définition	26
II.3. Les différents défauts de soudage	27
II. 3.1. Les fissures	27
II.3.2. Les soufflures	30
II.3.3. Pollution ferreuse	32
II.3.4. Inclusions	32
II.3.5. Retassures et criques de solidification	34
II.3.6. Morsures et caniveaux	35
II.3.7. Les effondrements et trous	36
II.3.8. Les défauts géométriques du cordon	37
II.4. Les Moyens de contrôle et détection des défauts	42
II.4.1. Le Contrôle Non Destructif (CND)	42
II.4.2 Le Contrôle Destructif(CD)	52
Chapitre III	55
III.1. Introduction	56
III.2. Déroulement de réalisation	56
III.2.1: Préparation des éprouvettes	56
III.2.2 : Soudage des éprouvettes	58
III.3 : Résultats et interprétation	62
III.3.1 : SMAW	62
III.3.2: GTAW	66
Conclusion Générale	69
Références	71

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le soudage est outil d'assemblage permanent non démontable. Aussi, c'est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage de manière à assurer la continuité entre la partie à assembler.

Le soudage occupe une place importante dans toutes les branches d'industrie et du bâtiment, car il permet d'adapter au mieux les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service [1].

Il fait partie de la construction mécanique, cela signifie qu'il est très vaste ou les spécialistes, techniciens, ingénieurs et chercheurs continuent de faire des progrès très importants en vue d'améliorer son efficacité.

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique, dans la majorité des cas, elle est obtenue par la fusion locale, par déformation ou par diffusion.

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant les caractéristiques des matériaux à assembler, différentes sources d'énergies sont utilisées pour réaliser la fusion des éléments à assembler ou du métal d'apport. L'un de ces procédés implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné.

D'autre part, la soudure peut avoir plusieurs défauts. Pour les vérifier on réalise ce qu'on appelle les contrôles et inspection des ensembles mécano-soudés, soit par un certain contrôle non destructif(CND), ou par des essais mécaniques(EMD) qui ont pour but, de contrôler les assemblages au point de vue de leur résistance et de l'homogénéité de leurs caractéristiques, et de vérifier que les procédés de soudage, les métaux de base et les métaux d'apport, ainsi les conditions de mise en œuvre et les paramétrages pour qu'elles ne peuvent pas être les causes qui influent à l'apparition des défauts.

Ce mémoire intitulé par « Etude comparative entre le soudage à l'arc avec électrode enrobée et le soudage avec électrode réfractaire TIG » à pour objective de faire la comparaison entre les deux procédés de soudage, les défauts liés au procédés ainsi que d'examiner, à travers un contrôle destructif (traction transversale), et un CND (ressuage).

L'étude illustrée dans ce mémoire est composée en trois chapitres :

- Le premier chapitre représente les notions générales sur le soudage tel que les définitions de base et les procédés de soudage.
- Le deuxième chapitre est consacré pour les défauts de soudage et les contrôles des joints soudés.
- Le troisième chapitre est visé pour l'étude expérimentale et les essais.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉ

SUR LE

SOUDAGE

I.1.Introduction :

Parmi les procédés d'assemblages mécaniques, l'assemblage par soudage est le Plus répandue dans la plupart des domaines industrielles (transporte, industrie pétrolier Et gazier, construction navale, aéronautique, automobile etc.). Le soudage est un assemblage permanent non démontable, son emploi est moins généralisé à cause des difficultés de mise en œuvre liées souvent à des conditions climatiques pas toujours favorables.

Dans ce chapitre présente des notions générales sur le soudage et explique les différents types d'assemblage et procédés.

I.2. Historique de Soudage :

Le soudage est né à la fin du 19ème siècle dans l'esprit des scientifiques, il est passé Rapidement dans les mains des techniciens, tout d'abord avec la technique oxyacétylénique, puis avec celles du soudage à l'arc et du soudage par résistance.

D'autres procédés sont arrivés ensuite et le 20ème siècle a vu la naissance du soudage par Laser est aussi :

- Le soudage avec électrode de carbone : Bernardos et Olszewski; Russie.
- Le soudage avec électrode fusible nue : Slavianov ; Russie.
- Le soudage avec électrode enrobée : Kjell berg ; Suède.
- Le soudage par résistance : Thompson ; USA.
- Le soudage au gaz (chalumeau) : Picard ; France.

A partir de la troisième décennie de notre époque date le développement rapide des procédés de soudage avec les électrodes enrobées et au chalumeau oxyacétylénique, qui a rendu possible la réalisation des premières œuvres importantes comme les bateaux, les ponts, les bâtiments et les chaudières (surtout aux USA et en Angleterre). L'introduction massive du Soudage par résistance joua le rôle décisif dans le développement rapide de l'industrie automobile. Parmi les nouveaux procédés on peut citer :

- Le soudage avec électrode de tungstène : 1924 – USA.
- Le soudage sous flux : 1935 – USA.
- Le soudage vertical sous laitier : 1950 – URSS.
- Le soudage sous la protection gazeuse : 1950 –1960.
- Le soudage avec fils fourrés : 1950 –1960.
- Le soudage par explosion : 1950-1960.
- Le soudage par bombardement électronique : 1956 – France.
- Le soudage par laser : 1965. [2].

I.3 Définitions :

I.3.1. Définition de Base :

I.3.1.1. Soudage : C'est l'opération de réunir de façon permanente deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage soit par chauffage, soit par pression, soit par la combinaison de l'un et l'autre, avec ou sans emploi d'un produit d'apport.

I.3.1.2. Soudure : C'est le résultat de l'opération de soudage.

I.3.2. Formes de Soudage [3] :

On désigne trois formes de soudage :

I.3.2.1. Soudage homogène: les deux parties à assembler sont de même constitution physico-chimique et lorsque le métal d'apport est de constitution physico chimique semblable à celle du matériau de base.

I.3.2.2. Soudage hétérogène : le métal d'apport présente une constitution physico-chimique différente de celle du matériau de base ou les métaux assemblés sans métal d'apport sont de nature différente.

I.3.2.3. Soudage autogène : signifie la participation des bords des pièces assemblées à la composition du joint.

I.3.3. Différents types d'assemblage par soudage :

Les assemblages soudés sont généralement classés en fonction des dispositions relatives des éléments assemblés. On distingue les assemblages suivants : [4][5]

I.3.3.1. Assemblage bout à bout: La soudure bout-à-bout est la plus courante et la plus facile à utiliser, elle est composée de deux pièces plates ou de même section disposées de façon parallèle. Elle assure une bonne continuité géométrique et un bon comportement aux différentes sollicitations. (Figure I.1 : a) [6]

I.3.3.2. Assemblage en coin: L'assemblage en coin est particulièrement difficile à réaliser. La tolérance sur le jeu entre les deux pièces doit être sévère (Figure I.1 : b)

I.3.3.3. Assemblage en angle: Cet assemblage est surtout utilisé pour la fixation des raidisseurs sur les panneaux, la préfabrication des profilés reconstitués et dans les pièces mécano soudées. (Figure I.1 : c).

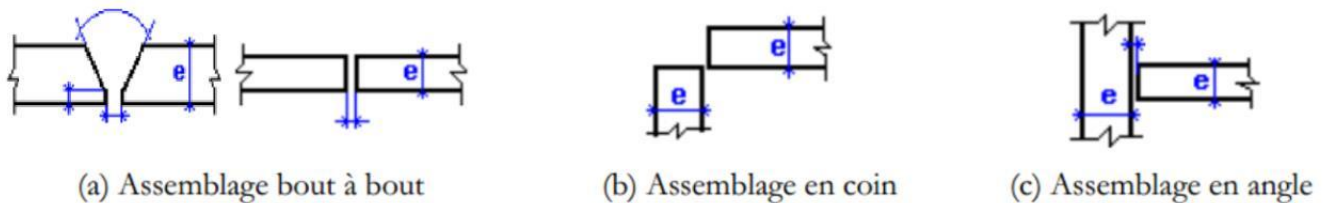


Figure I.1-Principaux type d'assemblage

I.3.4. Différentes parties d'un assemblage soudé :

Les principales parties de l'assemblage réalisé par soudage sont désignées comme suit :

I.3.4.1. Joint : c'est l'espace qui sépare les deux côtés de la pièce à assembler de géométrie variable.

I.3.4.1. Cordon de soudure : c'est la zone fondue (ZF) de l'assemblage soudé après exécution.

I.3.4.1. Bain de fusion : c'est le volume porté à l'état liquide pendant l'opération de soudage

I.3.4.1. Pénétration : c'est la cote P de pénétration du métal fondu dans le métal de base.

I.3.5. Différents parties d'une soudure :

I.3.5.1. 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 distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus chaude vers la moins. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté. [7]

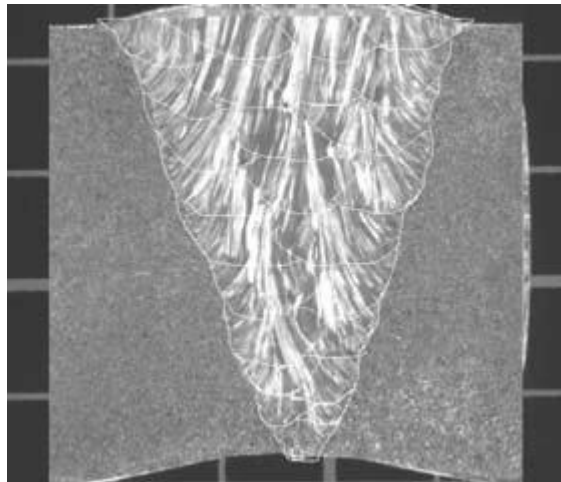


Figure I.2-présentation d'une zone fondue

I.3.5.2. Zone affectée thermiquement : (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins grande ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique [7]

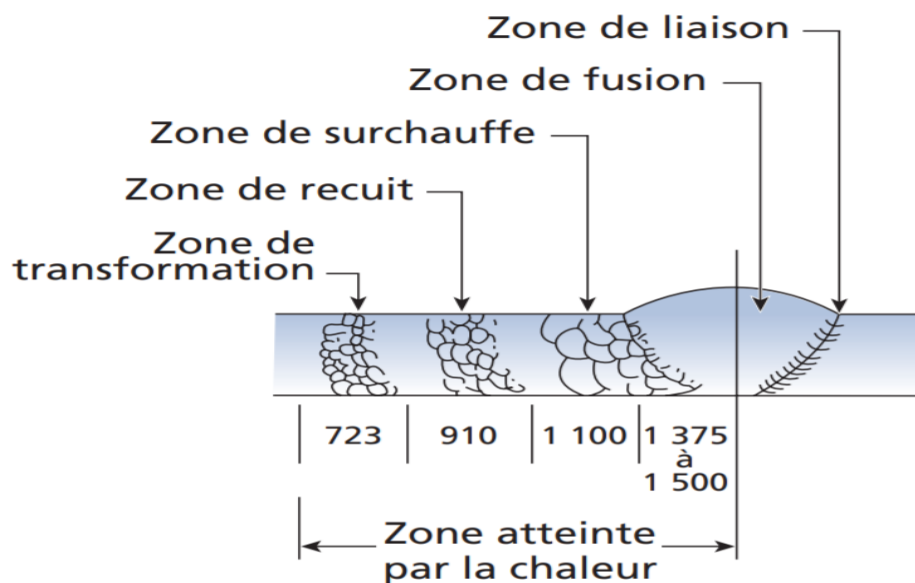


Figure I.3-Différentes zones atteintes par la chaleur [8]

I.3.5.3. Zone de liaison : cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et le zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé. [9]

I.3.5.4. 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. [10]

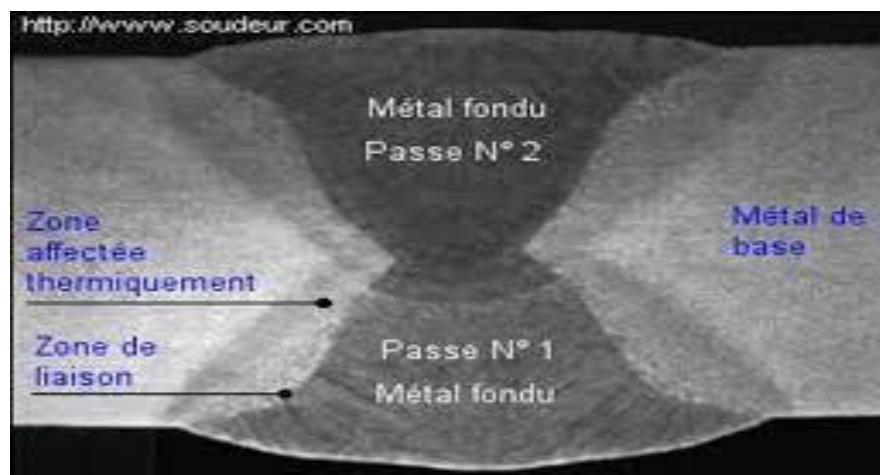


Figure I.4-Présentation macrographique d'un joint soudé

I.3.6. Définition de L'opération de soudage :

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties Constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à Assembler [11], sous l'action d'une énergie calorifique ou mécanique générée par divers Procédés mis en œuvre (combustion de gaz, arc électriques, pression...). En d'autres termes, Le soudage est une opération consistant à assembler deux éléments métalliques, par fusion Et ré-solidification. [12]

Ainsi, la technique assure l'assemblage avec ou sans l'aide d'un produit d'apport permettant un meilleur lien entre les pièces. Dans le cas de l'utilisation d'un métal d'apport, ce composé doit avoir des propriétés au moins égales et une température de fusion du même ordre de grandeur que celle des matériaux à assembler. Différents types d'assemblage peuvent être rencontrés en fonction des contraintes appliquées à la structure réalisée, de la nature et des dimensions et la géométrie de l'élément à assembler (figure I.1).

Durant la phase de soudage, le métal d'apport ainsi que le métal de base (c'est-à-dire les éléments à assembler) sont portés à la température de fusion permettant ainsi un mélange des éléments (figure I.3). L'utilisation du métal d'apport répond à deux besoins : tout d'abord, il est nécessaire d'apporter de la matière afin de combler une préparation de joint (chanfrein) assurant une section efficace entre les deux parties à assembler et d'autre part, il est aussi nécessaire de changer la composition métallographique de la zone fondue afin de lui donner des caractéristiques mécaniques voulues.

La zone fondue ou cordon de soudage est constituée du mélange des deux métaux de base et dans la plupart des cas d'un métal d'apport. De part et d'autre de cette zone fondue, les éléments à assembler, appelés métaux de base ont subi, des transformations de leur structure cristalline dues à l'élévation de température et cette région proche du cordon de soudage est appelée zone thermiquement affectée.

Enfin, la surface de séparation entre la zone fondue et la zone thermiquement affectée porte le nom de zone de liaison. En fonction de l'épaisseur des éléments à assembler et de la densité d'énergie fournie par la source, il est possible de faire varier la profondeur de la zone fondue, on parle alors de niveau de pénétration

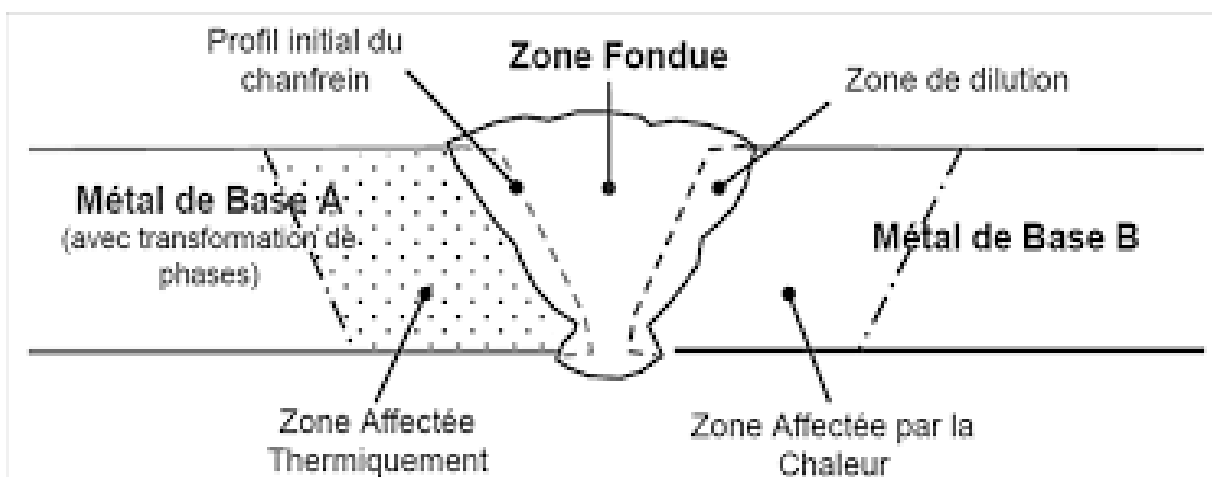


Figure I.5-coupe transversale d'un assemblage

I.4.Procédés de Soudage :

Il y a plusieurs moyens pour obtenir la continuité métallique. Dans la majorité des cas, elle est obtenue par fusion locale. Elle peut aussi être obtenus par diffusion, déformation, ...

Les procédés de soudage sont nombreux et peuvent être classés suivant les caractéristiques des matériaux à assembler, différentes sources d'énergies sont utilisées pour réaliser la fusion des éléments à assembler ou du métal d'apport. C'est au cours du 20e siècle que ces sources d'énergie ont été mises au point et les progrès ont permis de disposer d'une densité d'énergie de plus en plus élevée pour assembler des métaux de natures variées avec des contraintes de plus en plus importantes.

L'objet de ce paragraphe est de faire une description des principales sources d'énergie utilisées en soudage afin de mieux comprendre les caractéristiques du procédé de soudage.

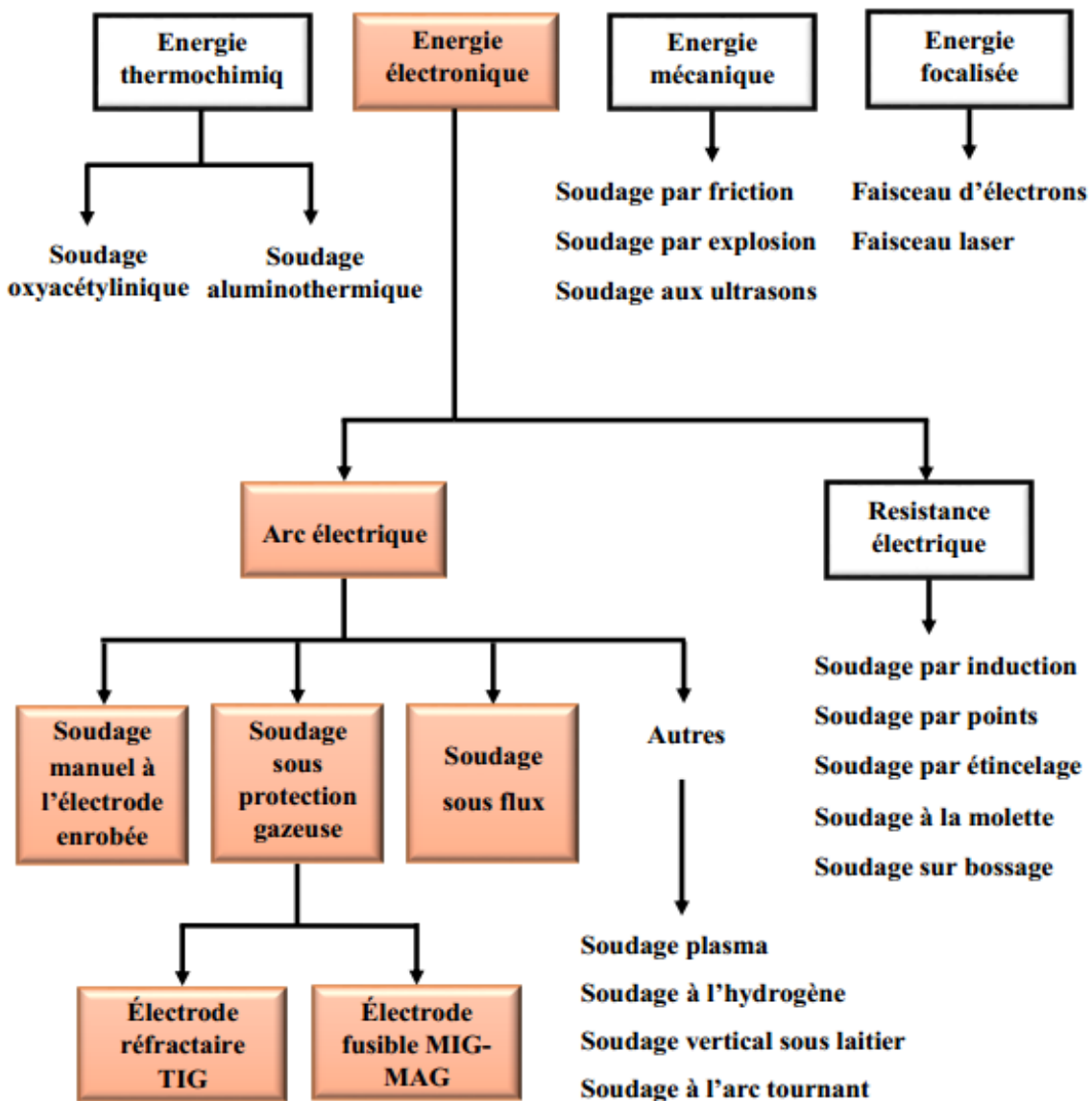


Figure I.6-Classification des procédés de soudage en fonction de l'énergie [13]

Les procédés de soudage présentés dans cette partie sont des procédés de soudage à l'arc électrique manuel et avec protection gazeuse.

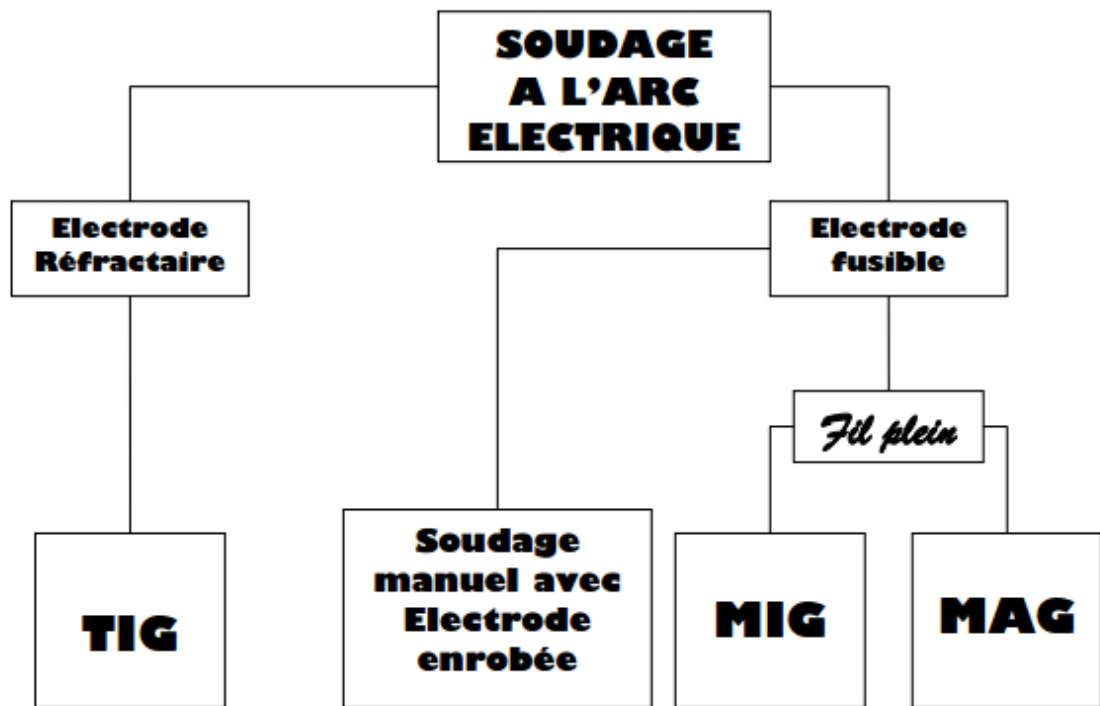


Figure I.7-Principes fondamentaux de soudage à l'arc

L'un de ces procédés implique un ensemble de paramètres qui doivent s'adapter à chacun des travaux de soudage effectués. Chaque procédé de celle-ci comporte différents avantages et inconvénients qui déterminent le choix du procédé à utiliser pour un travail donné.

Ainsi, après avoir identifié le bon procédé de soudage à utiliser, il reste plusieurs paramètres à déterminer tels que le choix du métal d'apport, l'intensité du courant ou de la tension, le type de courant et de polarité (pour le courant continu – CC (DC)), le choix d'un gaz protecteur (s'il y a lieu), la vitesse de dévidage du fil-électrode (s'il y a lieu), l'élaboration de la séquence de soudage et, enfin, la technique de soudage (mouvement oscillatoire, angle de l'électrode, etc.). [14]

I.5. Soudage à l'arc :

Le terme "soudage à l'arc" s'applique à un groupe important et diversifié de procédés de soudage qui utilisent un arc électrique comme source de chaleur pour fondre et assembler des métaux. La formation d'un joint entre les métaux soudés à l'arc peut ou non nécessiter l'utilisation d'un métal d'apport ou de pression [15]

Une électrode qui est déplacée manuellement ou mécaniquement le long de l'articulation ou qui reste immobile pendant que la pièce est déplacée en dessous. L'électrode sera soit un fil ou une tige consommable, soit une tige de carbone ou de tungstène non consommable qui sert à transporter le courant et à entretenir l'arc électrique entre son extrémité et la pièce à usiner. Lorsqu'une électrode non consommable est utilisée, une tige ou un fil séparé peut fournir le métal d'apport si nécessaire. L'électrode consommable, cependant, sera spécialement préparée de manière à ce qu'elle ne conduise pas seulement le courant et soutienne l'arc, mais aussi qu'elle fasse fondre et fournisse le métal d'apport au joint et qu'elle puisse également produire une couverture de laitier [15]

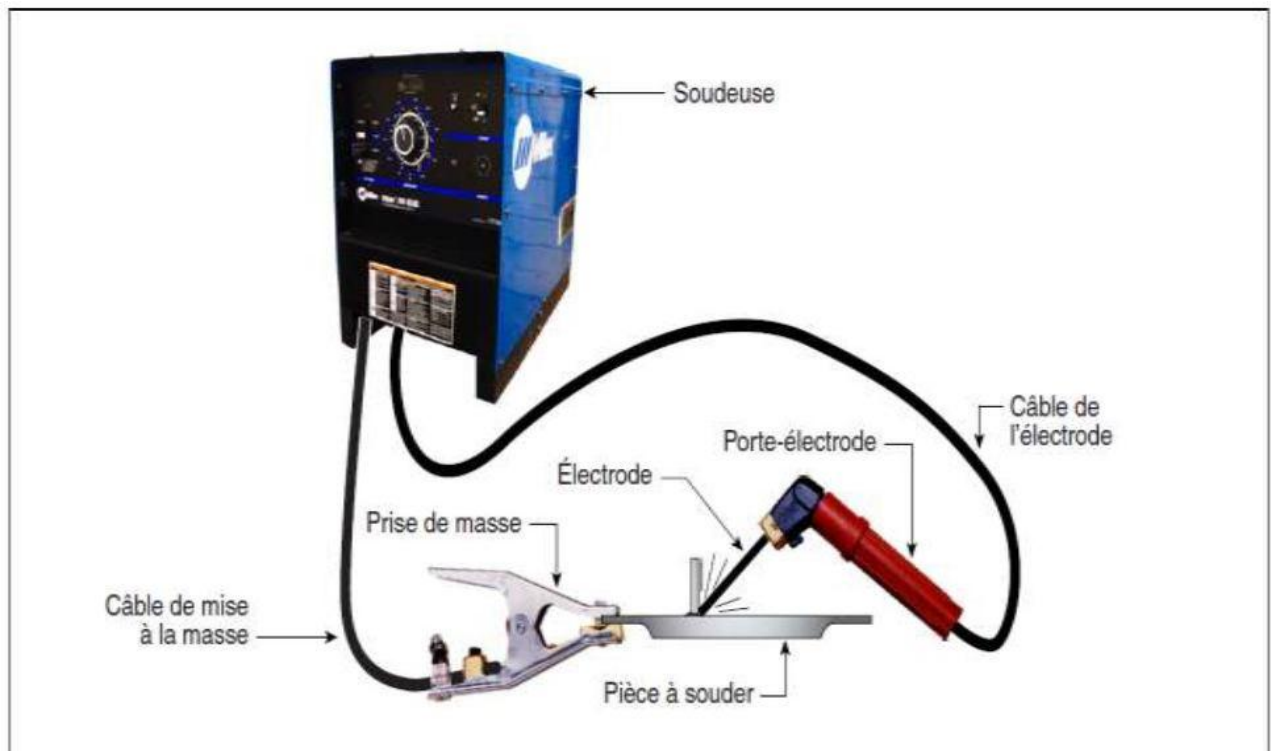


Figure I.8-Circuit électrique pour le soudage à l'arc.

Le soudage à l'arc a d'abord été effectué à l'aide d'électrodes de carbone, développées par Bernardos, puis à l'aide de tiges d'acier. La soudure n'était toutefois pas protégée de l'air et il y avait des problèmes de qualité. Le Suédois Oskar Kjellberg a fait une avancée importante en développant et en brevetant l'électrode revêtue. Le résultat de soudage a été incroyable [16].

Dans un procédé typique de soudage à l'arc, de nombreux paramètres importants influent sur la qualité et le taux de production. La connaissance de la physique de l'arc, des forces agissant sur l'arc et de l'interaction de l'arc avec les différents gaz de blindage est essentielle pour comprendre comment optimiser le processus de soudage [16]

I.5.1. Définition de l'arc électrique :

Un arc est une décharge électrique établie et entretenue dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur et dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques essentiellement : [17]

- Électriques, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs ;
- Thermiques auxquelles se rattachent les phénomènes de fusion.

L'arc électrique est la source de chaleur à la base d'un certain nombre de procédés de soudage s'appuyant sur :

- Ses effets thermiques aux électrodes : l'arc de soudage est un arc court entre une électrode, formant l'outil, et les pièces à souder portées localement à la température de fusion ;
- Les phénomènes de transfert de métal qui s'instaurent naturellement et simultanément de l'électrode, lorsqu'elle est fusible, à la pièce, formant un dépôt continu se diluant avec les bords à souder pour constituer après refroidissement la liaison métallique recherchée. Dans les procédés où l'électrode est réfractaire, il n'y a évidemment pas de transfert de métal électrode-pièce. [17]

On peut représenter l'arc électrique dans la (Figure I.8), où on distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc.

- **La cathode :** C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire de deux modes distincts appelés émission thermoïonique et non thermoïonique, dont le rôle est de fournir les électrons à l'arc.
- **L'anode :** C'est le collecteur d'électrons.
- **La colonne d'arc :** C'est la zone de passage des électrons entre les électrodes.

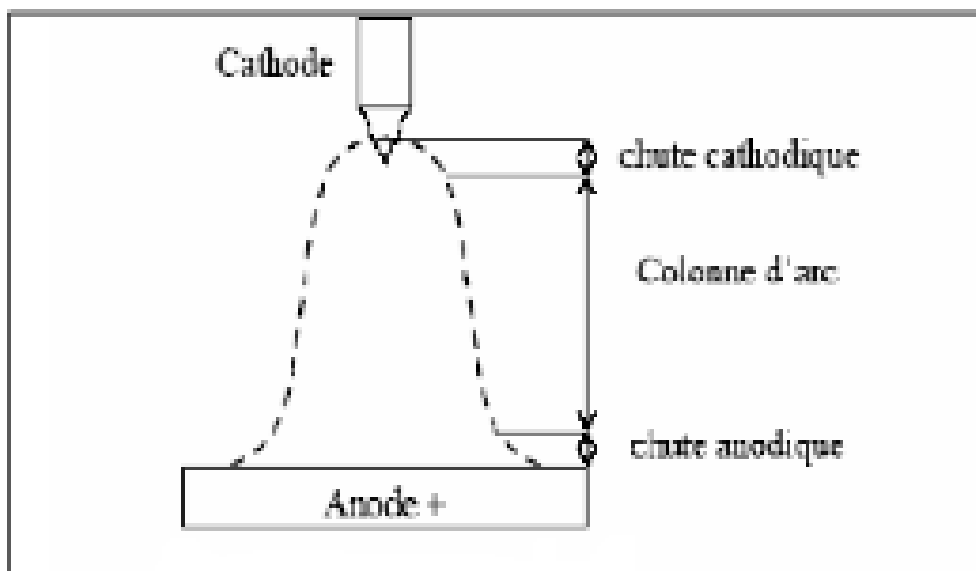


Figure I.9-Arc Electrique

I.6. Les différents techniques de soudage à l'arc :

Le soudage à l'arc électrique comprend plusieurs techniques :

I.6.1. Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) :

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée est le procédé de soudage le plus couramment employé pour les travaux d'entretien et de réparation. Dans ce procédé, on fait jaillir un arc électrique entre le bout de l'électrode et le métal à souder.

L'électrode est constituée d'une âme métallique, recouverte de flux ou d'un revêtement (enrobage). L'électrode fond au fur et à mesure de l'opération de soudage.

Le flux protège de l'air ambiant les ions métalliques de l'arc et assure ainsi la stabilité de l'arc. A mesure que le flux fond, il dégage des fumées et dépose un laitier protecteur sur le métal en fusion.

Ce type de soudage est utilisé pour les travaux d'entretien et de réparation effectués sur l'acier doux, l'acier inoxydable, l'aluminium et les métaux non ferreux. Dans les ateliers de soudage, ce type de soudage est peu utilisé.

Le soudage à l'arc avec électrode enrobée tend à être remplacé par le soudage MIG MAG.

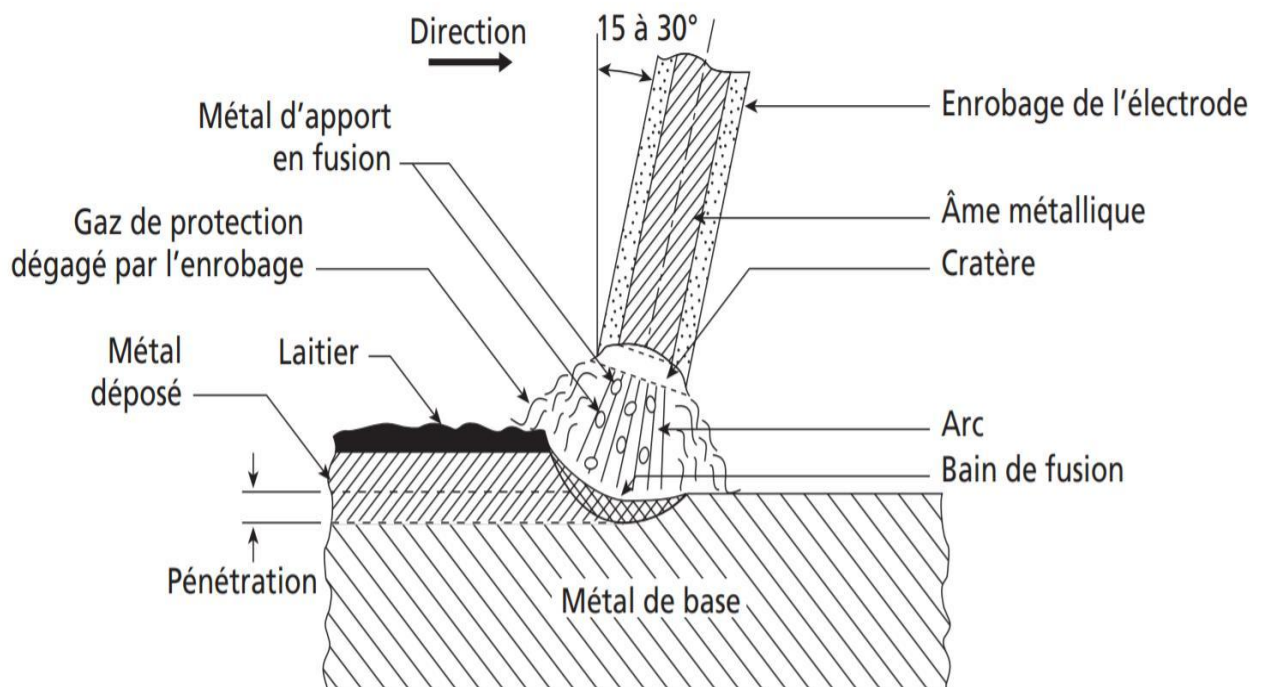


Figure I.10-Principe de soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

I.6.1.1. Principe du procédé :

Une soudeuse, généralement à courant constant (continu ou alternatif ; son intensité varie entre 30 et 500A), est connectée à une électrode enrobée et à une pièce de métal à souder, ce qui provoque la création d'un arc électrique, libérant l'énergie nécessaire (entre 1 et 15Kw) pour fondre le métal d'apport (contenu dans l'électrode) sur le métal à souder (Figure I.10). Le flux recouvrant l'électrode sert à protéger le bain de fusion de la contamination atmosphérique.

Le soudage commence lorsqu'un arc électrique est heurté entre la pointe de l'électrode et le métal de base. La chaleur intense de l'arc fait fondre la pointe de l'électrode et la surface du métal de base sous l'arc. De minuscules globules de métal fondu se forment rapidement sur la pointe de l'électrode, puis passent par le flux d'arc dans le bain de soudure fondu. De cette façon, le métal de remplissage se dépose au fur et à mesure que l'électrode est consommée.

L'arc est déplacé à une longueur et à une vitesse de déplacement approprié (la vitesse moyenne de soudage est en effet de l'ordre de 17 centimètres par minute), fondant et fusionnant une partie du métal de base et ajoutant du métal de remplissage à mesure que l'arc progresse.

I.6.1.2. Les différents types d'électrodes enrobées :

Les différents types d'électrodes enrobées pour le procédé SMAW sont :

- **Enrobage Acide (A) :** Cet enrobage contient du ferromanganèse, de l'oxyde de fer et de l'oxyde de manganèse. Le laitier est très fluide et abondant. Cet enrobage convient pour le soudage à plat et en gouttière. Il convient mal au soudage en position. La soudabilité du métal de base doit être bonne si non le métal constituant le joint est sensible à la fissuration à chaud pour tous les travaux de sécurité (appareils à pression).
- **Enrobage Basique (B) :** Cet enrobage contient principalement du spath-fluor et du carbonate de calcium. Il fournit un laitier calcaire dont l'effet désulfurant est favorable au soudage des aciers ferritiques et il diminue le risque de fissuration à chaud du métal déposé. Ces électrodes nécessitent dans la plupart des cas un étuvage effectué au minimum à 350°C pendant 2 heures sauf prescriptions contraires du fournisseur. La majeure partie de ces électrodes fonctionnent en

courant continu avec une polarité inverse (+ à l'électrode). Certaines peuvent fonctionner en courant alternatif à condition d'utiliser un générateur de soudage avec une tension à vide suffisamment élevée $U_0 > 60V$.

- **Enrobage Cellulosique (C) :** Cet enrobage contient une grande quantité de substances organiques comme la cellulose. Il donne peu de laitier mais un souffle à forte teneur en CO_2 . Celui-ci favorise le soudage rapide en position descendante et améliore la pénétration. Comme pour les électrodes basiques, les cellulosiques fonctionnent en courant continu en polarité inverse. La tension à vide doit être au moins égale à 60 Volts pour les soudures à forte pénétration en position descendante.
- **Enrobage Oxydant (O) :** Cet enrobage contient principalement des oxydes de fer et des oxydes de manganèse. Il correspond à des électrodes faciles à amorcer avec un laitier en général auto-détachable. Il s'utilise en courant continu ou alternatif pour des travaux ordinaires sur aciers doux. Les caractéristiques mécaniques du métal déposé étant très médiocres, il ne supporte aucune déformation de l'assemblage à chaud ou à froid.
- **Enrobage Rutile (R) :** Cet enrobage contient une quantité importante d'oxyde de titane. Le laitier obtenu s'élimine facilement. Il permet de souder aisément en toutes positions en courant continu ou alternatif. Les caractéristiques du métal déposé sont bonnes lorsque les aciers de base sont de bonnes qualités et ont des teneurs en carbone ainsi qu'en soufre limitées [18,19,20].

I.6.1.3. Avantages et inconvénients :

Le soudage SMAW s'exécute dans toutes les positions, permet une grande autonomie et l'équipement requis est peu dispendieux. Le coefficient de transmission thermique du procédé (c'est-à-dire la quantité de chaleur transmise à la pièce) varie entre 50 et 85 %. Comme la profondeur de pénétration de la soudure augmente en fonction de ce coefficient, le SMAW peut atteindre une bonne pénétration. Cependant, la chaleur au centre de l'arc est plus intense et cela peut causer une déformation angulaire.

Pour l'amorçage de l'arc avec les procédés manuels (particulièrement avec les électrodes à enrobage basique pour le SMAW), il faut que la tension à vide soit assez élevée, généralement d'une valeur minimum de 70 V.

I.6.1.4. Applications :

Le procédé de soudage SMAW est très populaire, entre autres dans certaines tâches spécialisées telles que, par exemple, des récipients et des tuyaux sous pression, des réservoirs de stockage, des ponts et des bâtiments ou des navires et des wagons.

Il offre une bonne mobilité et la possibilité de souder à l'extérieur sans précaution particulière, notamment pour effectuer des réparations ou du travail sur un chantier.

I.6.2. Soudage à l'arc avec électrode Réfractaire TIG (GTAW) :

SOUDAGE À L'AIR GAS-TUNGSTÈNE (GTAW), également connu sous le nom de HeliArc et de gaz inerte de tungstène (TIG). La soudure au gaz inerte au tungstène (TIG) est l'ancien nom du procédé de soudage TIG mis au point à la fin des années 1930, lorsque la nécessité de souder du magnésium est devenue évidente. Le procédé maintenant connu sous le nom de soudage à l'arc sous gaz de tungstène GTAW et le nouveau nom sont devenus populaires dans les ouvrages techniques Pour le soudage à l'électrode de tungstène (TIG), un arc électrique est amorcé entre la pièce à souder et l'électrode de tungstène. L'électrode demeure réfractaire à la fusion. La protection de l'arc est assurée par un débit continu de gaz, habituellement de l'Argon (ou aussi de l'Hélium ou encore un mélange Argon – Hélium). Cette protection empêche les gaz atmosphériques de pénétrer dans la zone de soudage. L'arc peut fusionner deux pièces de métal sans métal d'apport. En cas d'apport de métal, celui-ci est introduit sous forme de baguette. Le soudage TIG sert couramment dans les travaux de soudage d'aluminium (soudage métaux nobles). Il peut également servir à souder les pièces en acier doux ou en acier inoxydable

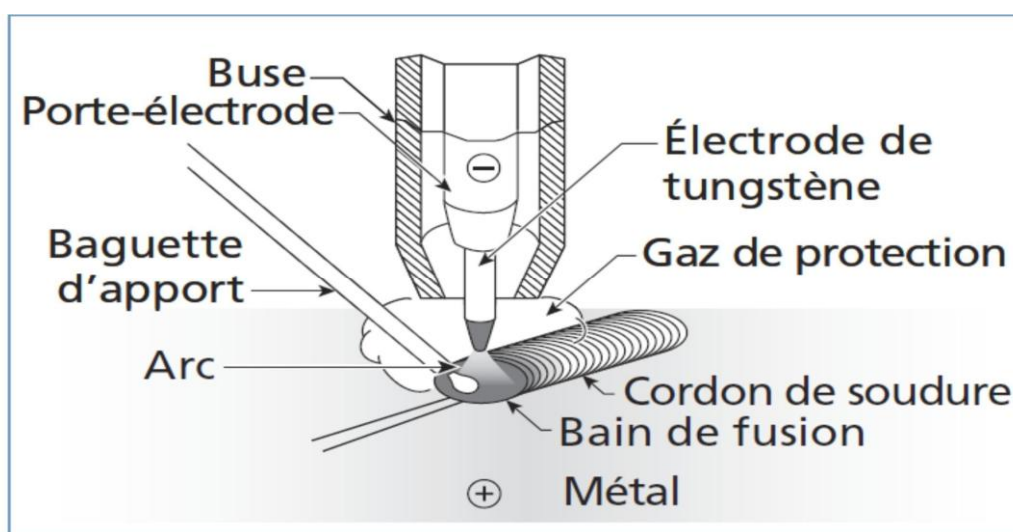


Figure I.11-Principe du procédé (GTAW).

I.6.2.1 Principe du procédé :

Dans un emploi soudeur au tungstène au gaz (GTAW), les métaux sont fondus en les chauffant par un arc électrique établi entre une électrode en tungstène non consommable (ne fond pas) et la pièce à travailler. Un métal d'apport ne peut pas être utilisé en fonction de la conception du joint. Le métal en fusion, l'électrode de tungstène et la zone de soudage sont protégés de l'atmosphère (l'air qui l'entoure) par un courant de gaz inerte traversant la torche de soudage. Les soudures obtenues ont la même intégrité chimique que le métal de base d'origine.

Le courant peut être continu ou alternatif ; son intensité varie entre 10 et 400 A. l'énergie dissipée est comprise entre 0,2 et 8Kw .

Dans un emploi soudeur TIG , le soudage peut être effectué dans n'importe quelle position de soudage et en mode manuel, semi-automatique et automatique; la méthode utilisée dépend de l'équipement disponible et de l'application. La température de fusion nécessaire pour souder des matériaux dans le procédé de soudage à l'arc au tungstène gazeux (GTAW) est obtenue en maintenant un arc électrique entre une électrode en alliage de tungstène et la pièce à usiner (Figure. I.11.). La température de la piscine de soudure peut approcher 2500 ° C (4530 ° F). Un gaz inerte maintient l'arc et protège le métal en fusion de la contamination atmosphérique. Le gaz inerte est normalement de l'argon, de l'hélium ou un mélange d'hélium et d'argon

I.6.2.2. Avantages et inconvénients :

Ce procédé de soudage est particulièrement approprié pour souder les métaux à faible soudabilité, incluant l'acier inoxydable et les métaux non-ferreux (dont l'aluminium, le magnésium, le cuivre, le titane, le nickel de même que leurs alliages)

La soudure est précise, ce qui limite les déformations. Le dépôt de soudure est dense et procure une soudure de grande qualité. Le soudage s'exécute dans toutes les positions et n'emploie pas de laitier, ce qui rend le nettoyage aisé.

Comme le taux de transfert de chaleur est assez faible comparé aux autres procédés, le procédé s'applique bien au soudage de plaques minces mais convient moins aux pièces épaisses, à moins qu'on ne veuille souder certains alliages particulièrement

difficiles à souder, exigeant une grande qualité de soudure ou un cordon de pénétration dans un tuyau.

I.6.2.3. Applications :

On l'utilise surtout dans les secteurs de la construction aéronautique, pour le matériel de restauration, les blocs-moteur, les citernes, les carrosseries, les téléphériques, dans les industries alimentaires et chimiques (échangeurs d'air), les décorations et pour la fabrication ou la réparation de petites pièces. Il permet de souder tous les types de joints en toutes positions et de mettre en œuvre toutes les épaisseurs à partir de 0,1 mm.

I.6.3. Soudage GMAW/MIG-MAG (sous gaz Inerte/Actif) :

Le soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein utilise un fil-électrode, continu et fusible, qui sert à créer l'arc de soudage avec le métal de base, ou est utilisé comme métal d'apport (Figure I.12).

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Comme pour le GTAW, le bain de fusion est protégé par un gaz de protection.

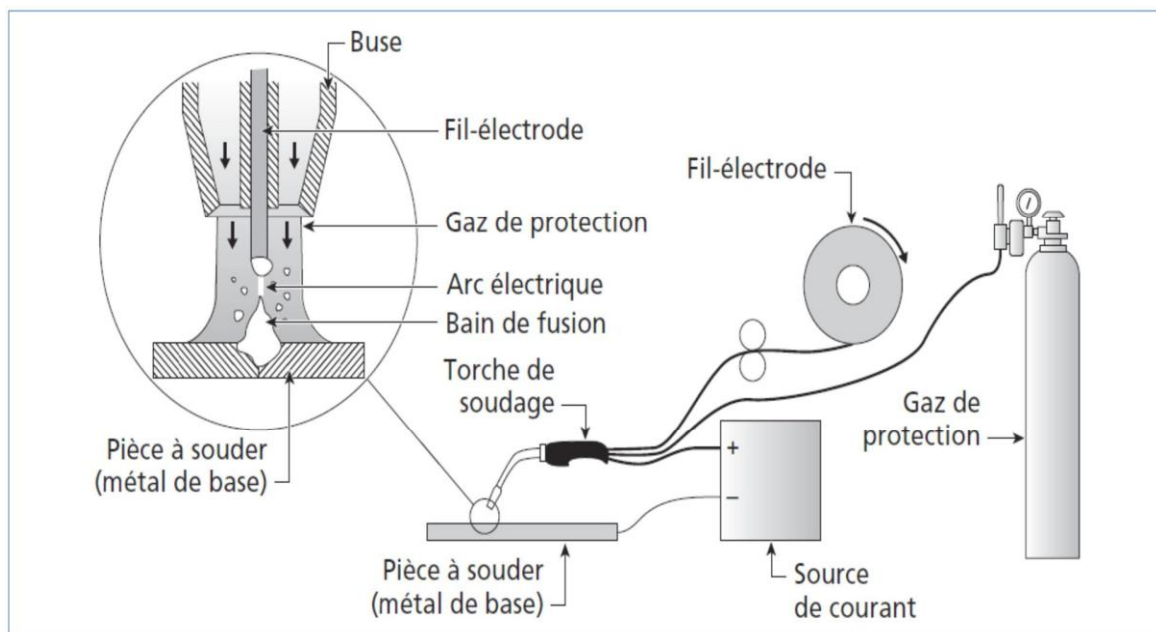


Figure I.12- Principe de fonctionnement du procédé (GMAW).

I.6.3.1 Principe du procédé :

La chaleur dégagée par l'arc de soudage provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Le fil-électrode est continuellement amené à l'arc de soudage, à travers la torche, par un mécanisme de dévidage. Ce procédé est donc semi-automatisé. Et le bain de fusion est protégé par un gaz de protection (Figure I.12).

Le courant est continu ; son intensité varie entre 60 et 500 A. La tension d'arc est comprise entre 16 et 40 V tandis que l'énergie dissipée est comprise entre 1 et 20 kW.

Le fil-électrode est alimenté dans la torche par un dévidoir. Les dévidoirs sont à vitesse fixe ou variable. On distingue deux catégories de GMAW, en fonction de la nature du gaz de protection utilisé :

- **Le procédé MIG (Métal Inerte Gaz)** qui utilise un gaz de protection neutre ou inerte (par exemple, l'argon ou l'hélium).
- **Le procédé MAG (Métal Active Gaz)** qui utilise un gaz actif ou un mélange de gaz incluant au moins un gaz actif.

Les consommables utilisés dans GMAW sont des électrodes et des gaz de protection.

La composition chimique de l'électrode, en combinaison avec le gaz de protection, influencera la composition du métal de soudure qui détermine les propriétés chimiques et mécaniques de la soudure.

Les facteurs influençant le choix d'électrodes et le gaz de protection sont :

- Composition du métal de base ;
- Propriétés mécaniques du métal de base ;
- État et propreté du métal de base ;
- Type de service ou exigence de spécification applicable ;
- Position de soudage ;
- Type de transfert du métal de remplissage (pulvérisation, globulaire ou court-circuit).

I.6.3.2. Avantages et inconvénients :

Le procédé de soudage GMAW soude aisément la plupart des types de métaux, incluant l'aluminium (où il tend à remplacer de plus en plus le GTAW) et les aciers inoxydables. On l'emploie aussi de plus en plus pour le soudage d'aciers au carbone ou faiblement alliés.

Comme il s'utilise avec de fortes intensités de courant, il procure un taux de dépôt élevé. Par ailleurs, il offre une grande rapidité d'exécution. Il n'exige pas de changement d'électrode, ce qui permet de souder de plus longues distances d'un seul coup.

Le nettoyage post-soudage des pièces est simple puisque le procédé n'utilise pas de laitier. La pénétration obtenue peut être profonde; ceci se traduit par une préparation des joints plus rapprochée (à angles plus étroits, soit moins d'ouverture), donc une économie en terme de quantité de métal déposée. La qualité des soudures est bonne et la teneur en hydrogène est faible. Il faut s'assurer que la vitesse de dévidage soit appropriée à la procédure de soudage, sinon le fil-électrode risque de fondre dans le tube-contact ou de se figer dans le bain de fusion, ce qui occasionne des pertes de temps et d'énergie considérables.

I.6.3.3 Applications :

Le soudage GMAW est très répandu dans pratiquement tous les domaines de la fabrication. Généralement, toutes les entreprises qui ont souvent recours au soudage possèdent un ou plusieurs postes permettant l'utilisation de ce procédé. Les applications spécifiques dépendent généralement du mode de transfert choisi.

I.7. Conclusion :

On conclure ce chapitre par faire une petite exhibition de principales différence entre les deux procédés qui nous intéresse dans notre comparaison (SMAW – GTAW).

SMAW	GTAW
<p>-Utiliser une source d'alimentation à courant constant (polarité positive).</p> <p>-courant peut être continu ou alternatif.</p> <p>-intensité varie entre 30 et 500A, suivant l'électrode utilisé</p> <p>-les matériaux de remplissage ressemblent à des tiges droites et linéaire.</p> <p>-les électrodes consommables (fusibles) courtes doivent être remplacées fréquemment. Le soudage ne peut donc effectuer en continu pendant une plus longue durée</p> <p>-une tige de petite diamètre est utilisé comme électrode. la longueur de l'électrode est généralement limitée à 60cm</p> <p>-ce processus n'est pas très productif car le taux de dépôt des charges est faible, en utilisant principalement le mode d'application manuel.</p> <p>Le flux produit également une couche de laitier sur le cordon de soudure. Cette couche de laitier protège le bain de métal de soudure chaud contre l'oxydation. Mais peut également entrainer des défauts de soudure si elle s'incruste dans le cordon de soudure</p>	<p>-utilise une source d'alimentation à courant continu (polarité négative).</p> <p>-Courant peut être continu ou alternatif.</p> <p>-intensité varie entre 10 et 400A.</p> <p>-l'énergie dissipée est comprise entre 0,2 et 8kW.</p> <p>-les électrodes sont réfractaires inconsommables (non fusible), et ne doivent pas être remplacées fréquemment. Ce procédé peut être effectué en une plus longue durée.</p> <p>-la soudure TIG conserve l'avantage de la protection de zone de soudage.</p> <p>-la protection par le gaz se fait diriger par une buse céramique dans la torche</p> <p>-le GTAW est un procédé de soudage pour les métaux et alliages (aciers, inox, cuivre...)</p> <p>- il peut être effectué dans n'importe quelle position de soudage et en mode manuel, semi-automatique et automatique.</p>

Tableau I.1-Les principales différences entre SMAW et GTAW

CHAPITRE II

LES DÉFAUTS DE SOUDAGE ET SES CONTRÔLS

II.1 Introduction :

Il existe plusieurs types de défauts de soudure ainsi que différentes méthodes pour les prévenir et les corriger. Ce chapitre vise à identifier et à décrire les défauts les plus courants en fonction des paramètres travaillés ou du procédé de soudage utilisé. Ainsi à décrire les moyens de détection ou bien les contrôles par CND et CD.

II.2. Définition :

Les joints soudés, de par leur nature, contiennent des discontinuités et de différents types et de différentes tailles. En dessous d'un certain niveau acceptable, ils ne sont pas considérés comme nocifs. Au-delà de ce niveau, ils sont considérés comme des défauts.

Le niveau d'acceptation varie selon la sévérité du service à rencontrer. Les défauts parfois rencontrés dans les soudures réalisées sont :

- Les Fissures
- Les Soufflures
- La Pollution ferreuse
- Les Inclusions
- Les Retassures et Criques de Solidification
- Les Morsures et Caniveaux
- Les Effondrements et Trous
- Les Défauts géométriques du cordon :
 - Débordements du cordon
 - Défauts de pénétration
 - Excès de pénétration
 - Manque de pénétration
- Collage ou manque de fusion
- Projections.

II.3. Les différents défauts de soudage :

II. 3.1. 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 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 de poursuivre le soudage. Le soudage sur une fissure supprime rarement la fissure. [21]

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

- Dans le métal fondu; elles dépendent alors de la nature du métal d'apport des conditions d'exécution de la soudure.
- Dans le métal de base, dans la zone de liaison; ces dernières sont généralement reliées à une plus faible soudabilité du métal. On peut aussi distinguer deux types de fissurations selon le moment où elles surviennent à la suite d'une soudure :
 - La fissuration à chaud,
 - La fissuration à froid

II.3.1.1. Fissure à chaud (Fissure de solidification) :

La fissuration à chaud survient au moment de la solidification du bain de fusion. Elle est plus susceptible d'apparaître en présence d'impuretés dans le métal de base (comme le soufre ou le phosphore).

Cette fissure localisée normalement au centre de la coupe transversale d'une soudure (soit soudure d'angle, soit soudure bout à bout), qui peut déboucher en surface et se propager dans le sens longitudinal.

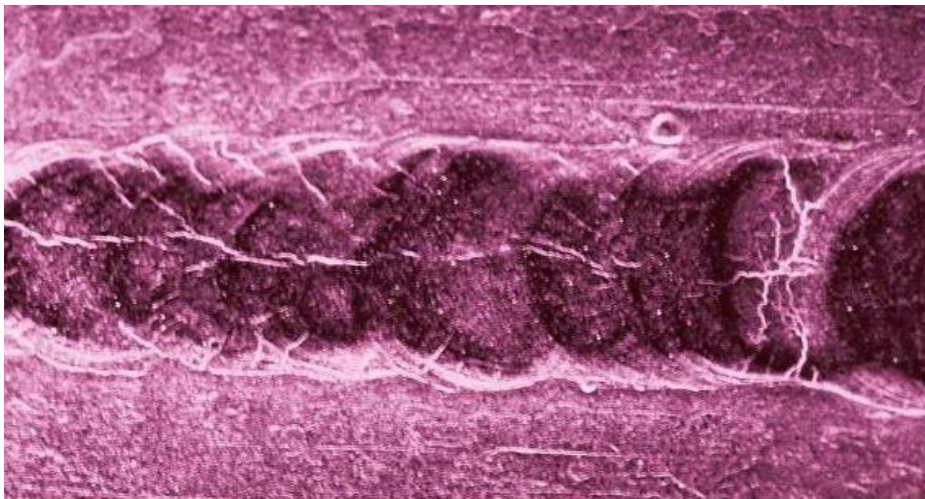


Figure II.1- fissure à chaud

II.3.1.2. Fissure à froid (Fissures d'hydrogène) :

La fissuration à froid (figure II.2) peut apparaître vers la fin du refroidissement ($0^{\circ} < 250^{\circ}$) ou de façon différée, plusieurs heures après l'exécution de la soudure.

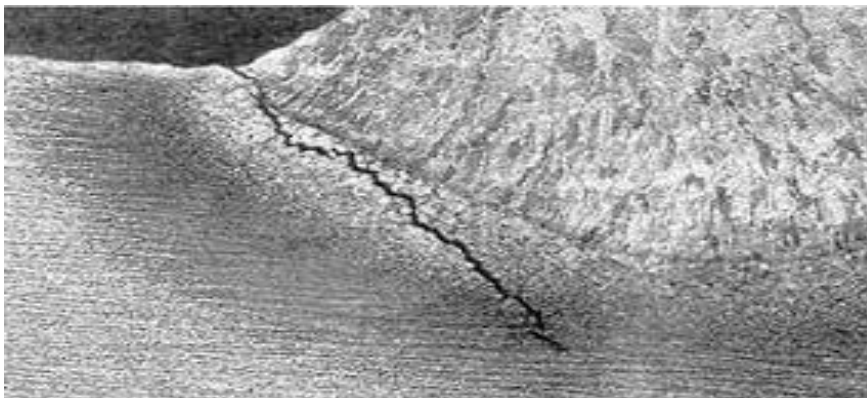


Figure II.2- fissure à froid

Elle survient dans la zone de soudage ou dans la ZAT (figure II.3) et est causée par l'hydrogène coincé dans la soudure ou par des tensions internes résiduelles importantes. Les aciers à forte teneur en carbone de même que les aciers faiblement alliés sont plus susceptibles de subir la fissuration à froid.

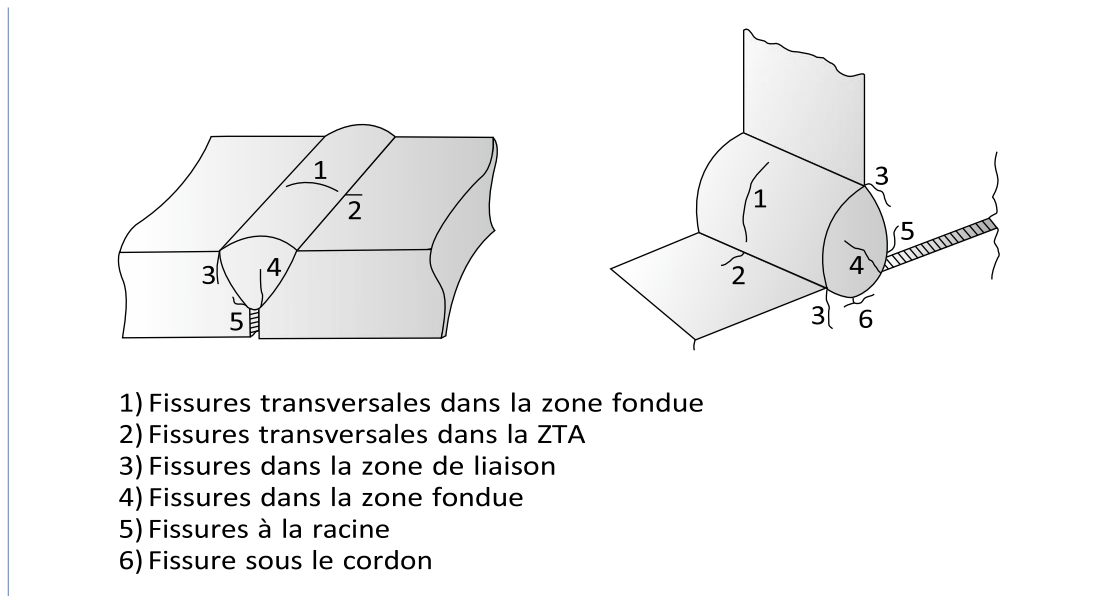


Figure II.3-type de fissures à froid. [22]

- Pour la détection des fissures débouchant en surface : examen visuel, magnétique, ressuage.

Et pour fissures internes : examen par ultrasons ou radiographie.

- Pour la réparation : Eliminer la partie défectueuse de la soudure 5 mm au-delà de l'extrémité visible de la fissure et réparer par soudage.

	Causes	Moyens de prévention
Fissuration à chaud	<ul style="list-style-type: none"> – Joints trop étroits – Présence d’impuretés dans la soudure (soufre, phosphore) – Métal d’apport incompatible avec le métal de base – Cordon trop petit – Trop de retrait durant ou après le soudage 	<ul style="list-style-type: none"> – Bonne mesure des angles des Chanfreins – Préchauffage et chauffage en Cours de soudure – Bon choix du métal d’apport – Refroidissement lent – Traitement thermique après Soudage (normalisation, recuit) – Cordon suffisamment large, Réduction de la vitesse au besoin – En cas de retrait, léger retour en Arrière et ajustement de la procédure de soudage
Fissuration à froid	<ul style="list-style-type: none"> – Hydrogène coincé dans la Soudure – Tensions internes résiduelles importantes 	<ul style="list-style-type: none"> – Préchauffage et chauffage en Cours de soudure – Refroidissement lent – Utilisation d’électrodes basiques – Entreposage des électrodes dans Un four, au chaud – Traitement thermique après Soudage (normalisation, recuit) – Dessoudage (au besoin)

Tableau II .1-Causes de fissuration et moyens de prévention [22]

II.3.2. Les soufflures :

Les soufflures sont des défauts creux, généralement sphériques, formés par la présence de gaz (figure II.2). Quant aux piqûres, ce sont plus précisément des soufflures débouchantes sont appelées piqûres (en surface). [23]

Soufflures peuvent être causées par la présence de courants d’air, un manque de gaz de protection, la présence d’une substance grasseuse sur le métal de base ou le métal d’apport, l’obstruction de la buse, un mauvais angle de soudage, un arc trop long, de l’eau ou des impuretés dans le joint à souder. [24]

Pour prévenir les soufflures, on doit s'assurer que la surface du métal de base est propre de même que l'équipement utilisé. Il est également important de bien protéger le bain de fusion. Une intensité de courant trop faible ainsi qu'une vitesse de soudage trop élevée peuvent aussi être responsables de la formation de soufflures. Enfin, les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base. [24]

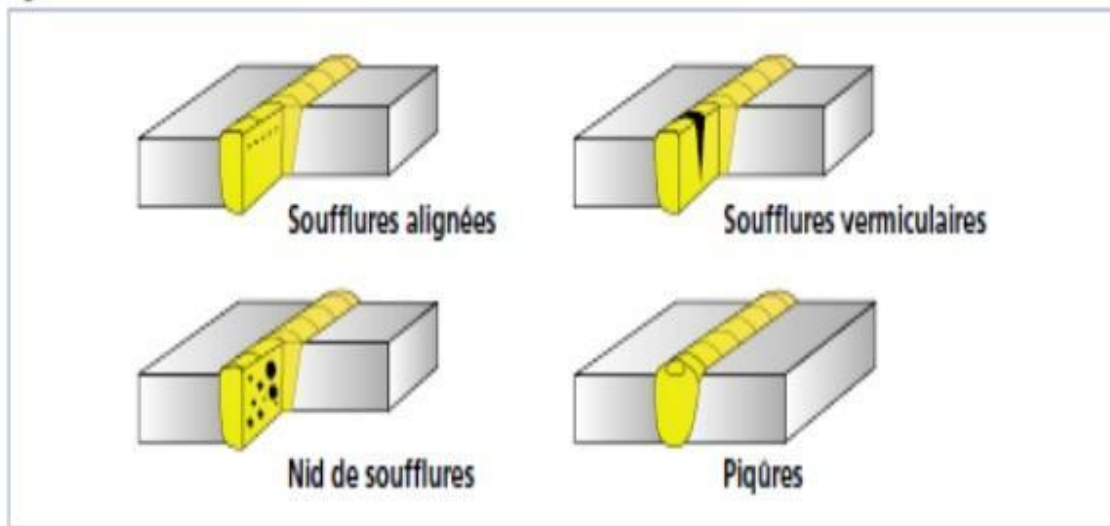


Figure II.4-types de Soufflures

Causes des soufflures[24]	Moyens de prévention[24]
<ul style="list-style-type: none"> -À des courants d'air -Un manque de gaz de protection -Un débit de ce gaz trop faible -La présence de graisse ou d'huile sur le métal de base ou le métal d'apport, -Une buse encrassée -Un mauvais angle de soudage qui entraîne une mauvaise protection gazeuse -Des impuretés dans le joint à souder. 	<ul style="list-style-type: none"> -S'assurer que la surface du métal de base et d'apport sont propres et non gras. -Vérifier la protection gazeuse -Une intensité de courant trop faible et une vitesse de soudage trop élevée peut entraîner ce défaut -Les piqûres sont généralement causées par le contact entre l'électrode et le métal de base

Tableau II .2-Causes des soufflures et moyens de prévention

II.3.3. Pollution ferreuse :

La pollution ferreuse est une corrosion des aciers inoxydables causée par la destruction de la couche superficielle. Elle résulte généralement de l'utilisation d'outils qui ne sont pas en acier inoxydable (brosse ou autres) pendant l'usinage, la mise en forme ou le nettoyage.

Dans d'autres cas, elle survient en conséquence des projections de métal fondu lors des opérations de soudage.

II.3.4. Inclusions :

Les inclusions désignent l'incorporation, dans le cordon de soudure, d'un composé étranger (Figure II.3). Il existe différents types d'inclusion (tableau II.3)

- Inclusion solide (poussières)
- Inclusion de laitier
- Inclusion de flux
- Inclusion d'oxyde métallique
- Inclusion métallique (électrode).

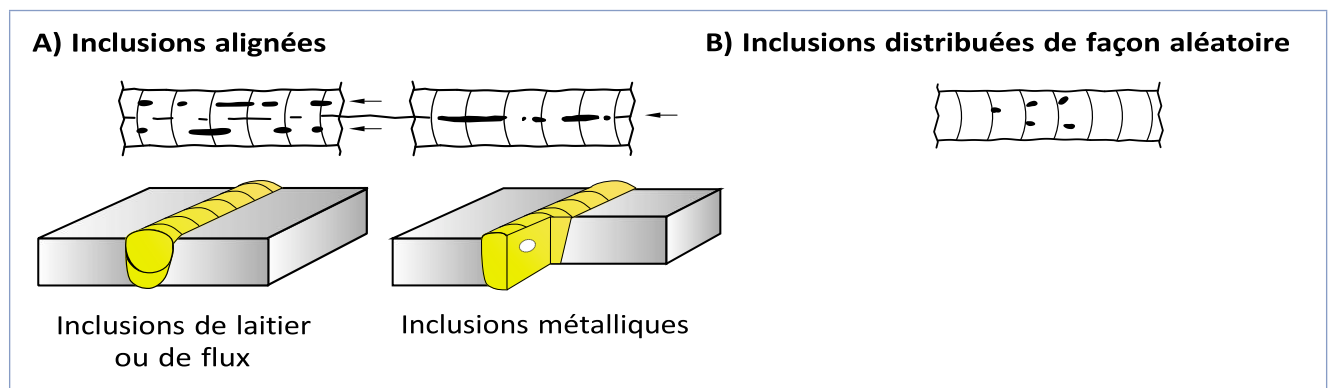


Figure II.5-Inclusions

Type d'inclusion	Description
Inclusion solide	Corps solide étranger emprisonné dans la masse de métal fondu (ex. : poussières)
Inclusion de laitier	Résidu de laitier emprisonné dans le métal fondu. Les inclusions de laitier peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion de flux	Résidu de flux emprisonné dans la soudure Les inclusions de flux peuvent être alignées (ou en chapelet), isolées ou distribuées de façon aléatoire.
Inclusion d'oxyde	Oxyde métallique emprisonné dans le métal fondu au cours de la solidification
Inclusion métallique	Particule de métal étranger emprisonnée dans la masse du métal fondu (ex. : le tungstène lors du soudage GTAW, le cuivre et tout autre métal étranger)

Tableau II.3-type d'inclusion et leurs descriptions

Causes d'inclusions	Moyens de prévention
<ul style="list-style-type: none"> -Le nettoyage entre passes et couches est insuffisant. -L'intensité de soudage est trop faible ou le laitier pas devant l'arc. -La répartition des passes de soudure est inadaptée. -La qualité ou le diamètre de l'électrode de tungstène sont inadaptées. -L'électrode infusible rentre en contact avec le bain de fusion ou le métal d'apport -L'intensité de soudage est trop élevée par rapport au diamètre de l'électrode. 	<ul style="list-style-type: none"> -insuffisance de nettoyage des cordons. -Décoller correctement le laitier emprisonné et meuler entre passes. -Adapter l'intensité de soudage et le diamètre des électrodes. - La répartition et le profil des passes doivent être adaptés. Eviter les angles fermés. - Choisir un type d'électrode infusible adapté aux travaux de soudage. -Eviter tout contact de l'électrode du tungstène avec le bain de fusion ou le fil d'apport. _Le diamètre doit être adapté à la densité de courant .

Tableau II.4-Causes d'inclusions et moyens de prévention

II.3.5. Retassures et criques de solidification :

Comme en fonderie, à la suite d'un retrait du métal lors de son refroidissement, un espace vide se forme et apparaît à la surface ainsi qu'à l'intérieur du cordon (figure II.4). Une retassure à la racine apparaît sous la soudure au moment de la solidification, tandis qu'une retassure de cratère est une cavité dans une reprise non corrigée avant l'exécution de la passe suivante. Certaines retassures ne sont visibles qu'au microscope.

Les criques de solidification sont, quant à elles, des retassures non apparentes.

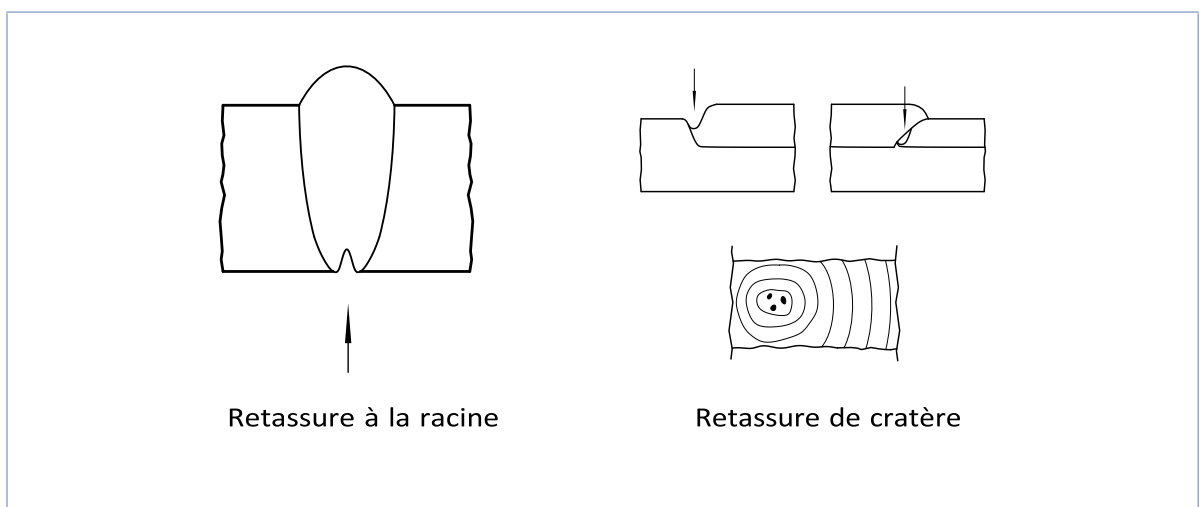


Figure II.6-Retassures

Causes de Retassures	Moyens de prévention
-solidification rapide du métal après interruption de l'arc	-contrôle visuel pendant le soudage. -interruption progressive de l'arc, en fin d'exécution des cordons

Tableau II .5- Causes de retassures et leurs moyens de prévention

II.3.6. Morsures et caniveaux :

Une morsure est un défaut caractérisé par le creusage ou une insuffisance du métal de base sur une partie du cordon. Un caniveau traverse une grande part du métal de base en raison d'une trop grande chaleur du métal d'apport par rapport à l'épaisseur ou à la densité du métal de base (figure II.5). Un courant trop fort ou une vitesse d'avance trop élevée favorise l'apparition de caniveaux. Un mauvais angle de soudage de même qu'une longueur d'arc incorrecte peuvent aussi être à l'origine de ce type de défaut.

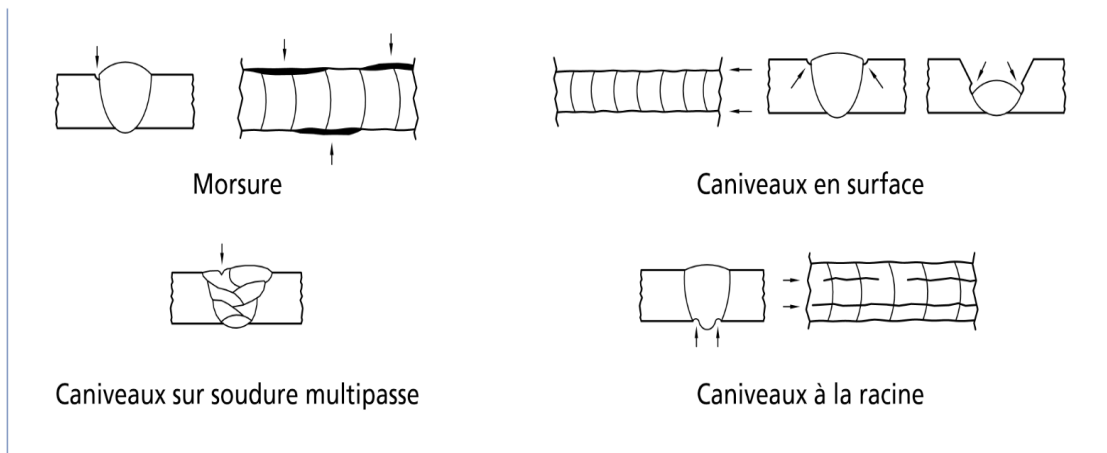


Figure II.7-Morsure et caniveaux

Causes des morsures et caniveaux	Moyens de prévention
-intensité trop forte du courant de soudage -position défectueuse de l'électrode, dans le cas des cordons d'angles. Températures des pièces trop élevées. -Vitesse de soudage excessive. -Balancement et oscillation de l'arc inadaptés.	-choix judicieux de l'intensité du courant de soudage, de la position de l'électrode et de la température des pièces -Diminuer la vitesse de soudage afin que le métal fondu comble les sillons. -Adapter un balancement avec un arrêt sur chaque bord de la soudure.

Tableau. II.6-Causes des caniveaux et moyens de prévention

II.3.7. Les effondrements et trous

L'effondrement est le résultat de l'affaissement du métal déposé dû à une fusion excessive. On distingue différents types d'effondrements (figure II.6).

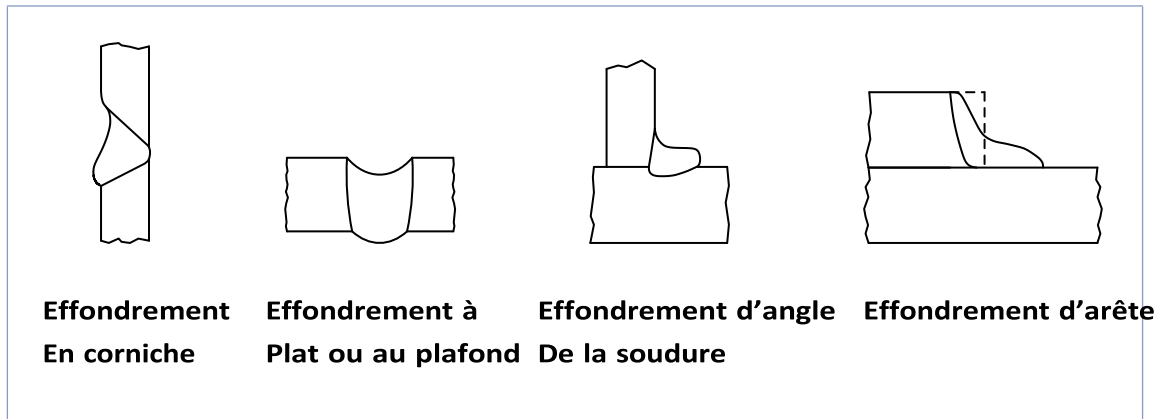


Figure II.8-Types d'effondrement

Lorsque l'effondrement du bain de fusion entraîne la perforation de la soudure, on parle alors de trou (figure II.7). Une soudure effectuée trop lentement (vitesse d'avance trop faible) risque de causer un effondrement. Si on travaille avec des plaques minces, le courant ne doit pas être trop fort.

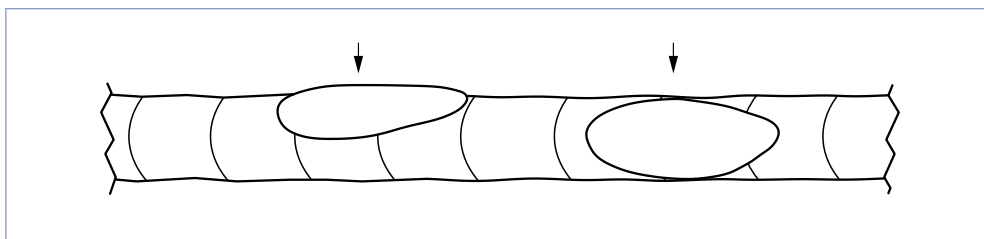


Figure II.9-Trou

II.3.8. Les défauts géométriques du cordon :

Ce sont des défauts associés à une mauvaise forme de la surface du cordon. On distingue plusieurs types de ces défauts :

II.3.8.1. Convexité ou concavité de cordon : Le cordon peut être trop convexe ou trop concave (figure II.8).

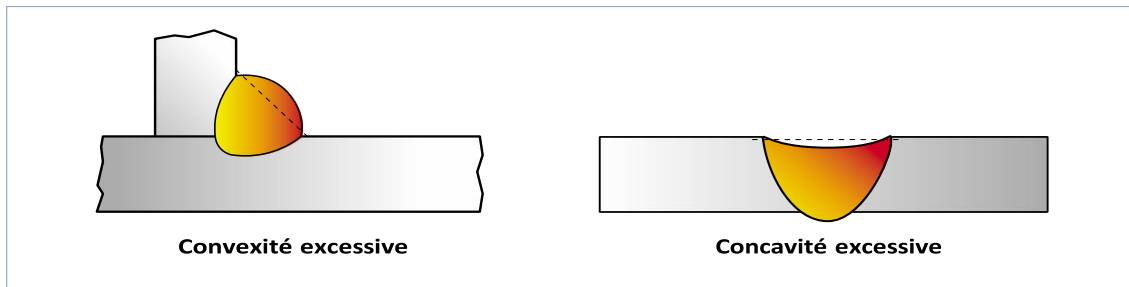


Figure II.10-Convexité et concavité

II.3.8.2. Surépaisseur du cordon : une surépaisseur excessive du cordon survient lorsqu'il y a trop de métal déposé sur le cordon au cours des dernières passes et que l'épaisseur du cordon dépasse les normes tolérées (partie A de la figure II.9). Dans d'autres cas, il manque de métal à la surface du cordon ; ce manque peut être localisé (partie B) ou continu.

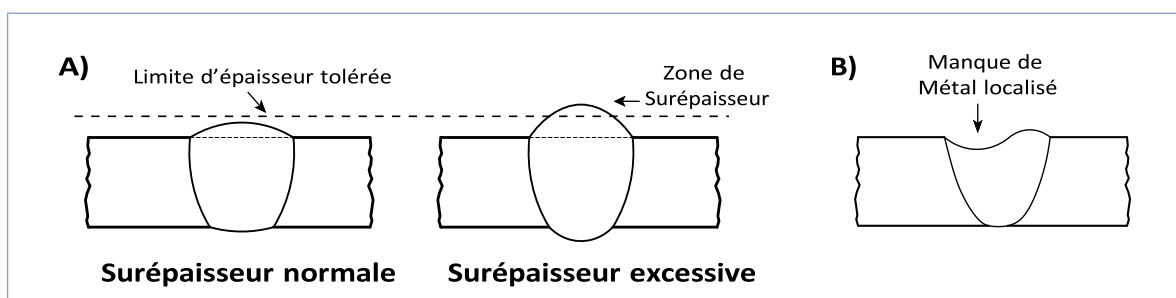


Figure II.11-Surépaisseur du cordon.

II.3.8.3. Débordement du cordon : Il s'agit d'un excès de métal déposé à la surface (figure II.10). Débordement du métal de base, mais qui ne se lie pas avec ce dernier

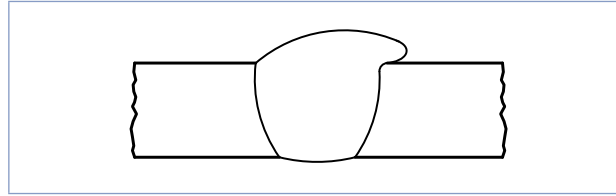


Figure II.12-Débordement du cordon

II.3.8.4. Défauts de pénétration :

- **Excès 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 (figure II.11)

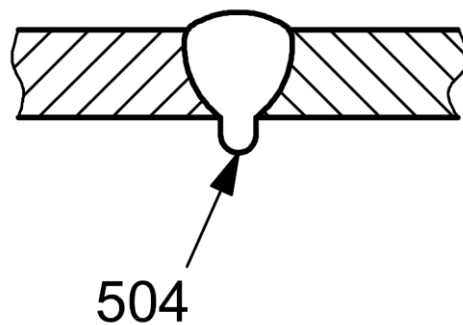


Figure II.13-Excès de pénétration

- **Manque de pénétration :** le cordon de soudure n'est pas continu à l'arrière du joint (figure II.12) ou les cordons de soudure de la face endroit et envers de la pièce ne se rejoignent pas à c'ur

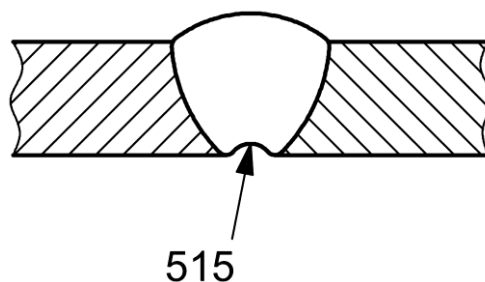


Figure II.14-Manque de pénétration

II.3.8.5. Collage (manque de fusion) : Dans ce cas, le métal de base est non fondu, ce qui crée un manque de liaison entre le métal déposé et le métal de base. Le manque de fusion diminue la section efficace de la soudure. Le collage peut être latéral, entre passes ou à la racine de la soudure (figure II.13).

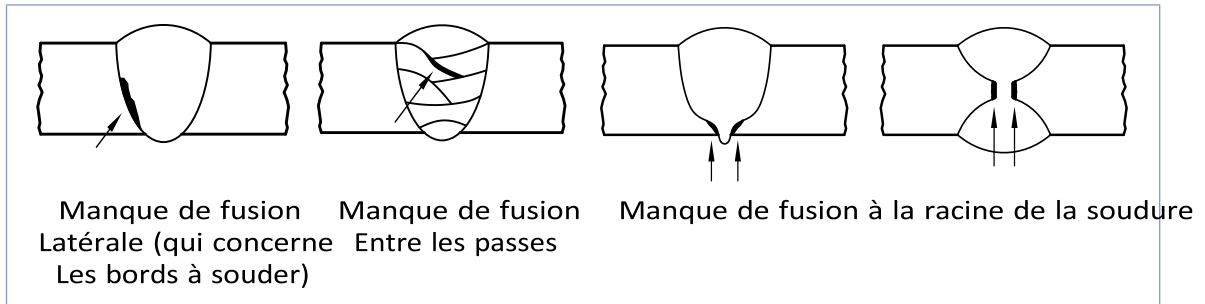


Figure II.15-Collage ou manque de fusion

II.3.8.6. Projection : une projection est une éclaboussure de métal en fusion pendant le soudage et qui adhère au métal de base (figure II.14). Ou au cordon déjà solidifié. Les projections peuvent être causées par un courant trop fort. Un arc trop long ou le soufflage de l'arc. Un mauvais débit et certains gaz de projection peuvent aussi favoriser l'apparition de projection.

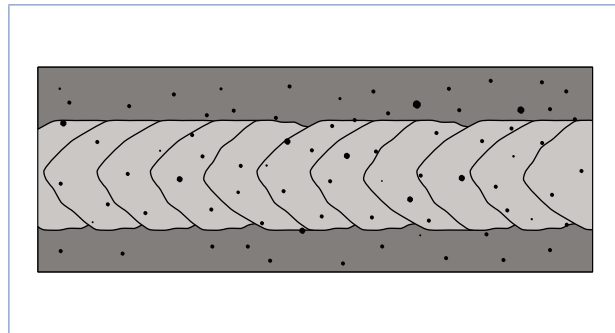


Figure II.16-Projections

Défauts géométrique	Causes	Moyens de préventions
Surépaisseur du cordon	-Energie insuffisante(vitesse de soudage trop faible et intensité inadaptée).	-Augmenter la vitesse de soudage et l'intensité. -Augmenter la tension en MIG/MAG .
Débordement du cordon ou convexité	-le soudeur n'a pas le bon angle de soudage, le bon paramètre. -les pièces ne sont pas d'une bonne dimension.	-Diminuer l'excédent de soudure par meulage. -Surveiller le paramètre de soudage ainsi que la technique (voltage, vitesse de fil, poussé, tiré ...ext). -Porter attention aussi un joint à souder.
Excès de pénétration	-Energie de soudage excessive (vitesse de soudage trop faible et intensité trop forte). -Préparation de joint inadaptée.	-Augmenter la vitesse de soudage et diminuer l'intensité. -Diminuer le jeu entre les bords des pièces.
Manque de pénétration	-Mauvaise préparation du joint à souder. -Intensité trop faible ou vitesse d'avance trop rapide. -Le diamètre de l'électrode enrobée est trop important pour la passe de pénétration.	-Augmenter l'intensité de soudage -Utiliser un gaz de protection dit chaud. -Opter pour un diamètre plus faible.
Collage(Manque de fusion)	-L'énergie de soudage est trop faible. -avancement trop rapide ou balancement trop rapide de l'électrode, ne permettant pas la fusion du métal des pièces.	-Augmenter l'intensité de soudage -Utiliser un gaz de protection dit chaud. -Préchauffer les pièces massives.

	<p>Préparation des pièces non adaptées aux conditions de soudage, surtout dans le cas des chanfreins en $\frac{1}{2} V$, en K et en J</p> <p>-Le régime thermique de soudage est trop froid.</p> <p>-La répartition des passes de soudure est inadaptée.</p>	<p>-préparation adaptées aux conditions de soudage.</p> <p>-La répartition et le profil des passes doit être adaptée. Eviter les angles fermé.</p>
Projection	<p>-Un courant trop fort.</p> <p>-Un arc trop long ou le soufflage.</p> <p>-Mauvais débit de gaz de protection.</p>	<p>-Diminuer le courant.</p> <p>-éviter le soufflage par adaptation de l'arc</p> <p>-Régler le débit de gaz de protection.</p>

Tableau II.7-Causes des défauts géométrique et moyens de prévention [25]

Procédés	Défauts Communs
SMAW	<p>-Aspect du cordon.</p> <p>-Mauvais reprise (cratère de reprise).</p> <p>-Défauts de pénétration (Manque de pénétration surtout).</p> <p>-Inclusions de laitier.</p>
GTAW	<p>-Fissures.</p> <p>-Cavités.</p> <p>-Inclusions de tungstène.</p> <p>-Manque de fusion ou de pénétration.</p> <p>-Défauts de formes du cordon.</p> <p>-Oxydation en surface.</p>
GMAW	<p>-soufflures.</p> <p>-Collage.</p> <p>-Manque de pénétration.</p> <p>-Projection.</p> <p>-Joints irréguliers.</p> <p>-convexité excessive.</p>

Tableau II .8- Récapitulatif des défauts communs en fonction du procédé utilisé [26]

II.4. Les Moyens de contrôle et détection des défauts :

Le contrôle des soudures doit s'exercer pendant trois stades bien distincts :

- Contrôle Avant le soudage
- Contrôle pendant le soudage
- Contrôle après le soudage

Et dans ce chapitre on va voir le troisième stade et le décortiquer.

Le contrôle après le soudage distingue deux types de contrôle :

- Contrôle Non Destructif
- Contrôle Destructif

II.4.1. Le Contrôle Non Destructif (CND) :

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader ou les ruiner, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi d'essais non destructifs (END) ou d'examens non destructifs.

Le but principal des essais non destructifs est de détecter les défauts qui peuvent avoir un effet néfaste sur le comportement des assemblages et de fournir des données concrètes permettant de juger de la qualité des joints. [27] Les normes de réception doivent être adaptées au type de constructions soudées d'utilisation, la sécurité imposée et les impératifs économique.

Le contrôle visuel est toujours essentiel mais il est souvent nécessaire de prévoir des essais non destructifs pour contrôler la qualité interne des joints soudés. Les principaux essais non destructifs utilisés dans le domaine des constructions soudées, sont les essais par ressuage, les essais radiographiques, les essais par ultrasons, les essais magnétiques (magnétoscopie). [27]

II.4.1.1. Contrôles visuels :

Les contrôles visuels s'effectuent pendant et après le soudage.

- Pendant le soudage, ils ont pour but de contrôler que la position relative des pièces reste correcte et que les conditions d'exécution des soudures sont en accord avec le procédé de soudage utilisé, compte tenu des types de préparations adoptées pour les pièces. Ces contrôles permettent de diminuer fortement le risque d'obtention de défauts tels que les inclusions gazeuses et de laitier, les manques de fusion et de pénétration ainsi que les retassures de cratères.
- Après le soudage, les contrôles visuels ont pour but de s'assurer de l'absence de défauts apparents dans les joints et de vérifier que l'aspect extérieur de ces joints est adapté à la destination et au type de sollicitations de la construction. Cet examen visuel s'attache particulièrement à déceler les défauts de fusion, les défauts de pénétration, les caniveaux et les morsures ; il permet également de contrôler qu'on ne dépasse pas les tolérances admises sur les dénivellations, les brisures locales, les pentes de raccordements, les surépaisseurs et les manques d'épaisseurs.

Les contrôles visuels après soudage portent également sur l'aspect des cordons, l'importance des stries, des cratères, des surépaisseurs de reprises et des angles de raccordement des cordons aux pièces, ainsi que sur les fissurations apparaissant en surface et dont la détection nécessite généralement l'emploi d'un liquide pénétrant.

Dans le cas des assemblages par cordons d'angle, l'examen visuel permet en outre de vérifier si la forme concave ou convexe des cordons est adaptée en type de sollicitation du joint. Les contrôles visuels des cordons d'angles sont particulièrement importants, en raison des difficultés d'application des autres moyens de contrôle.

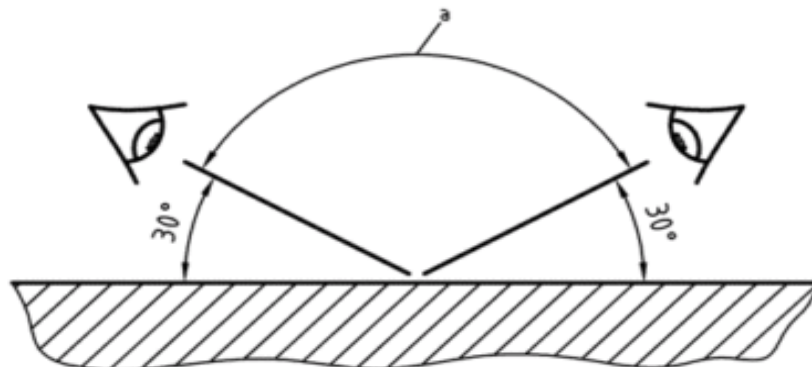


Figure II.17-Réalisation d'un contrôle visuel

II.4.1.2. Contrôles par ressuage : (PT/FT)

Dans ces essais, les fissures et cavités débouchant à la surface des pièces peuvent être détectées à l'aide d'un liquide qui y est répandu et qui pénètre dans ces défauts. Après enlèvement du liquide en excès, on dépose une poudre absorbante détectrice qui agit comme un buvard ; cette poudre s'imprègne du liquide ressuant des fissures et cavités et permet ainsi de déceler, par mouillage, la présence et la forme des défauts.

Pour obtenir la pénétration du liquide dans les défauts, de même que pour obtenir le ressuage de ce liquide dans la poudre détectrice, le temps nécessaire est de quelques minutes.

On utilise habituellement un liquide pénétrant de teinte rouge (Figure II.18) et une poudre détectrice blanche, telle que la craie. (PT)



Figure II.18-pénétrant et révélateur

On peut également effectuer des essais par ressuage avec un liquide pénétrant fluorescent(FT), mais il faut alors examiner les surfaces en y projetant de la lumière noire ; cette lumière peut être obtenue en chambre noire à l'aide de lampes analogues aux lampes à ultraviolet ; les défauts apparaissent sous forme de lignes ou de zones d'un vert brillant, sur un fond violet. (Figure II.19)

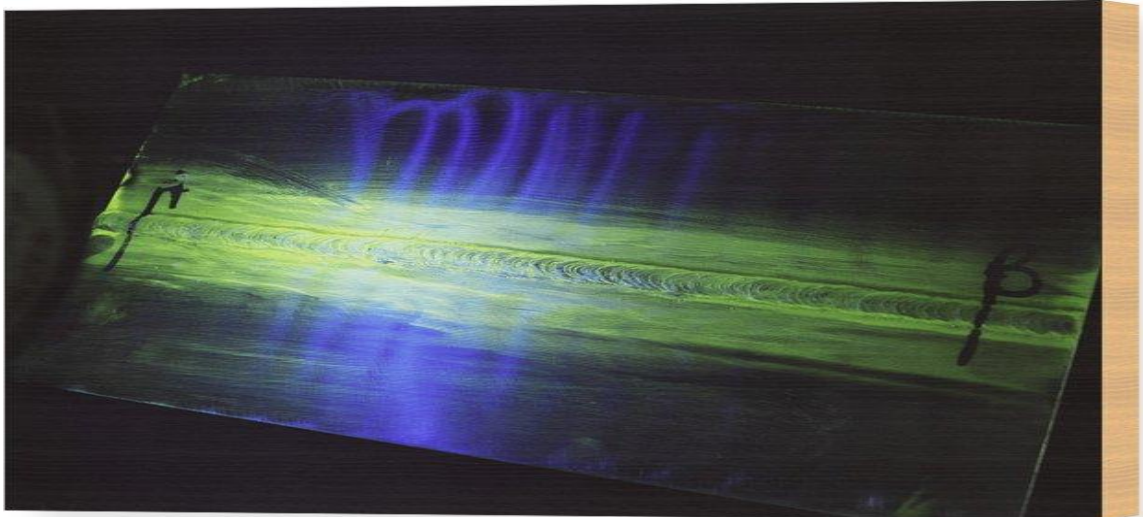


Figure II.19- Fluorescent test

Les essais par ressuage permettent une détection aisée, pour autant qu'ils soient correctement effectués. Ils sont très utiles pour détecter les fissures de fatigue dès leur apparition et pour s'assurer de l'étanchéité des réservoirs remplis de liquide ou de gaz.

Ces essais exigent une préparation particulière des surfaces, avec nettoyage, dégraissage, décapage chimique et sablage mettant à vif les surfaces ; ils ne conviennent pas dans le cas des préparations telles que le meulage, le rabotage et le burinage, qui peuvent boucher les fissures et les cavités en surface, sauf si on procède par après à une mise à vif énergique des surfaces par sablage.

II.4.1.3. Contrôles Radiographiques : (RT)

Dans les essais radiographiques, on fait passer à travers le joint soudé des rayons X ou des rayons gamma et on enregistre les résultats de l'opération sur des films ou sur des écrans de sensibilité convenable (Figure II.20).

Le degré d'absorption des rayons, au cours de leur passage à travers le matériau du joint, dépend de la compacité de ce dernier ; à des variations de compacité du matériau correspondent des variations du degré d'absorption des rayons qui le traversent et des variations de clarté des images obtenues sur les films. Par exemple, au droit d'un trou dans le métal, la puissance des rayons qui atteignent le film est accrue, de sorte que l'émulsion du film est plus fortement affectée ; il en résulte une image plus foncée que dans les zones voisines, ce qui permet de repérer la position du

trou. Il est également possible de détecter sur les films des zones de densité plus fortes ou plus faibles que la moyenne et de mettre ainsi en évidence les hétérogénéités des matériaux des joints soudés.

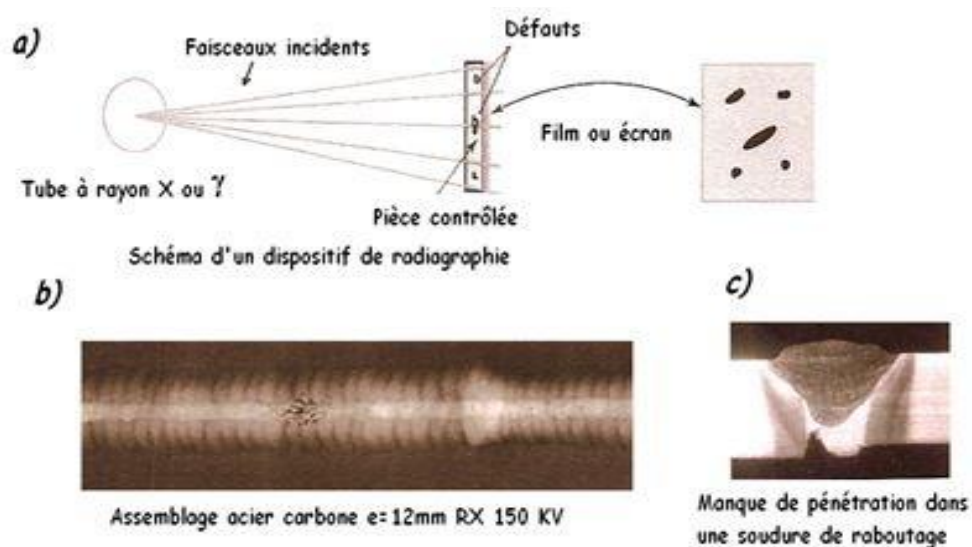


Figure II.20-Essais Radiographiques

Il est cependant important de noter que les inclusions planes et les discontinuités, dont la direction principale n'est voisine de celle du rayonnement, ne sont pas détectable par la radiographie.

La sensibilité du contrôle peut être évalué au moyen d'un indicateur de qualité d'image. Les rayons gamma, comme les rayons X, sont de type électromagnétique et présentent des longueurs d'onde plus faible que les rayons X. Ils diffèrent par leur mode de production ; la production de rayons X requiert habituellement des équipement d'investissement plus couteux, alors que leurs applications sur chantier sont relativement limitées et qu'ils présentent des difficultés d'utilisation, du fait de leurs dimensions et de leurs poids. Par contre, les rayons X permettent d'obtenir des résultats de haute qualité ; le meilleur contraste et la plus grande sensibilité qui les caractérisent, compensent leurs couts d'investissement plus élevés et conduisent à un bon rendement dans les contrôles systématiques de production, pour autant qu'on utilise des moyens de production adéquats.

Pour que le contrôle radiographique soit possible, il faut disposer :

- Un accès pour l'appareil émetteur de rayons X ou pour la source de rayons gamma ;
- D'une vue dégagée de la soudure, à partir de la source ;
- D'un emplacement disponible pour les films et ces écrans renforceurs, en dessous de la soudure.

Il faut de plus éviter les détails qui rendent la radiographie impossible.

Rayons	Avantages	inconvénients
Rayons X	<ul style="list-style-type: none"> -Radiographies contrastées et de hautes sensibilité -Adaptation aisée des tensions d'alimentation aux différentes épaisseurs -application possible à tous les matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> -coutes d'investissement et de remplacement élevés. -Difficultés de transport, fragilité, encombrement important, poids croissant avec les épaisseurs à radiographier. -Nécessité d'une source d'énergie électrique.
Rayons Gamma	<ul style="list-style-type: none"> -poids et encombrement relativement faible. -Robustesses -Bon pouvoir de pénétration. -possibilité d'introduction de la source à travers des orifices de faibles -Fonctionnement sans source d'énergie complémentaire 	<ul style="list-style-type: none"> -Sensibilité moindre que celle des rayons X -Impossibilité d'adapter le pouvoir de pénétration -Rayonnement continu avec les risques qui en découlent -Diminution continu du pouvoir émissif de la source, nécessitant l'ajustement des temps de pose -Durées d'exposition plus longues qu'avec les rayons X

Tableau II .9- Comparaison entre les rayons X et Gamma

II.4.1.4. Contrôles Magnétique : (MT)

Les essais magnétiques permettent de détecter les fissures et les discontinuités des matériaux ferreux et des autres matériaux magnétiques, pour autant que ces défauts soient situés à la surface des pièces ou à une faible profondeur sous cette surface.

Ces essais, qui peuvent être effectués suivant différentes techniques, utilisent un aimant et un produit magnétique en suspension ou non dans un liquide.

Dans les applications courantes, la surface à contrôler est enduite d'une peinture claire, sur laquelle on dépose de l'encre ou de la poudre magnétique. Une force magnétique est ensuite appliquée à l'aide d'un aimant, dans une direction telle que le plan, dans lequel les défauts ont le plus de chance de se trouver, soit perpendiculaire à la direction initiale du flux. Les défauts dévient le flux magnétique ; l'encre ou la poudre magnétique forme sur la surface une image correspondant aux lignes du flux dévié, permettant de localiser les défauts. L'essai est ensuite recommencé en orientant la force magnétique dans la direction perpendiculaire à sa direction initiale, afin de détecter la présence éventuelle d'autres défauts. En effectuant l'essai dans deux directions perpendiculaires, on arrive à détecter l'ensemble des défauts. Le champ magnétique peut être créé par des aimants permanents, par des électro-aimant, par des électrodes, des bobines ou des câbles, alimentés en courant continu ou alternatif.

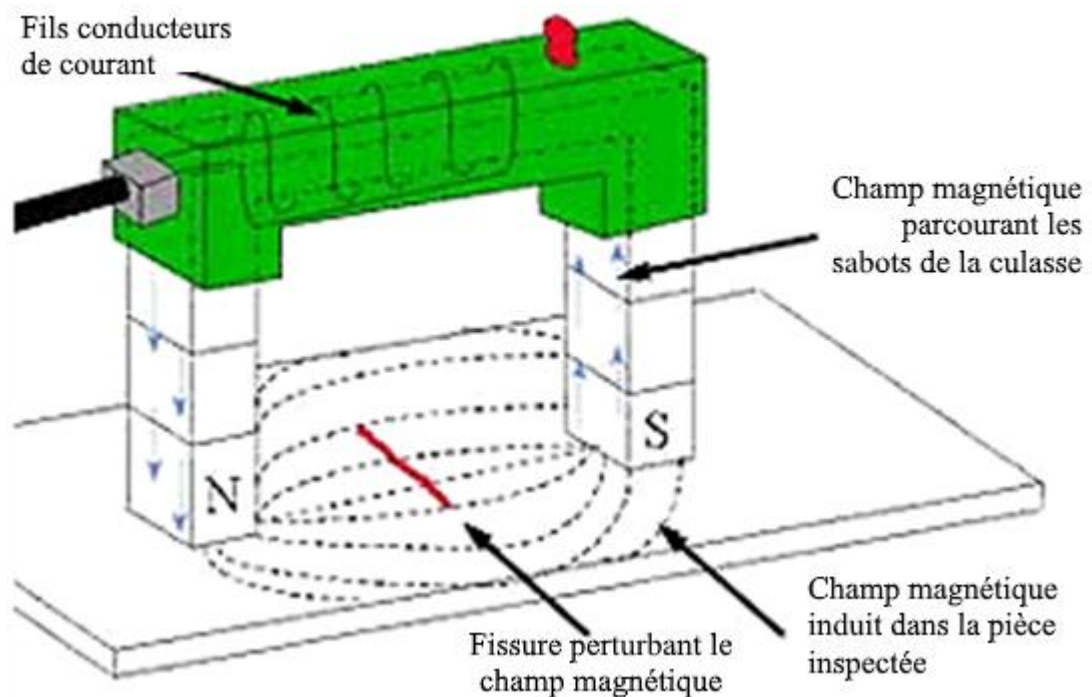


Figure II.21-Essais Magnétique

II.4.1.5. Contrôles Par Ultrasons :

Dans les essais par ultrasons, on fait passer à travers les joints soudés un rayon étroit d'énergie ultrasonore, émis à partir d'un palpeur (Figure II.22).

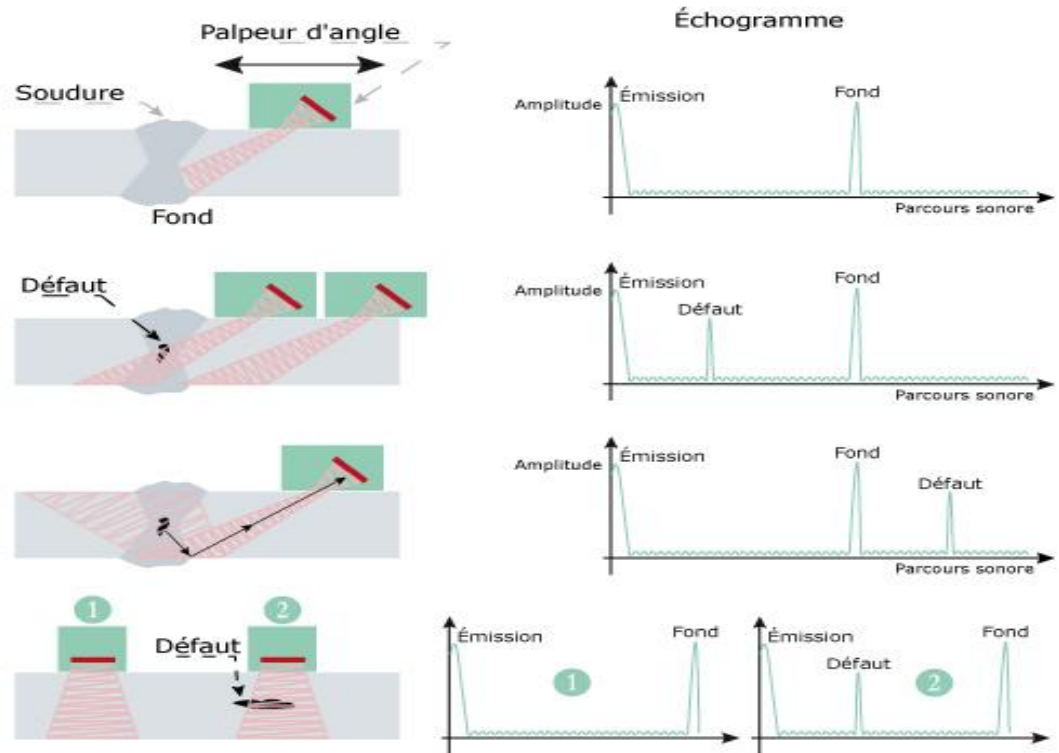


Figure II.22-Essais par ultrasons

Les ondes ultrasonores présentent les mêmes caractéristiques que les ondes acoustiques, mais leurs fréquences sont beaucoup plus élevées ; elles sont produites par le passage de pulsations électriques dans un cristal qui, aux fréquences de résonances, le font vibrer à sa fréquence naturelle ; le domaine des fréquences utilisées pour le contrôle des soudures est de l'ordre de 1 à 5 MC/sec.

Aux variations des propriétés acoustiques du métal des joints soudés, correspondent des réflexions partielles ou totales de l'énergie ultrasonores qui est recueillie, sous forme d'échos, par un récepteur. Les échos peuvent être mis en évidence sur un tube à rayons cathodiques ; ils permettent de déceler les défauts des soudures, de même que les variations significatives de la compacité du métal des joints. Suivant les types de palpeurs utilisés, on obtient des ondes longitudinales qui vibrent dans la direction de leur propagation et des ondes transversales qui vibrent perpendiculairement

à cette direction. On utilise habituellement les ondes transversales dans le cas des conduites et des tubes, le contrôle de la circonférence entière étant possible à partir d'une seule position du palpeur.

Dans les essais ultrasons, il faut que le palpeur puisse être déplacé sur une surface régulière, accessible au droit du joint ou bien de chaque côté de celui-ci.

Les soudures bout à bout et les soudures d'angle, qui n'intéressent pas la totalité de l'épaisseur des pièces, sont difficiles à contrôler par ultrasons, à cause des difficultés d'interprétation des résultats.

Les avantages et les inconvénients des essais de contrôle par ultrasons sont résumés au tableau suivant.

Avantages	Inconvénients
-Equipement compact et portatif	-Haute qualification et expérience de l'opérateur pour l'interprétation des résultats d'essai
-Absence d'interruption des autres travaux pendant le contrôle	-Absence d'enregistrement des résultats d'essai
-Disponibilité immédiate des résultats des essais	

Tableau II .10- Avantages et inconvénients de contrôle par ultrasons.

II.4.1.6. Domaines d'application des essais non destructifs :

Chaque essai non destructif permet de détecter certains défauts et convient pour le contrôle de certains assemblages. Le tableau suivant résume les principaux domaines d'applications des essais non destructifs, respectivement dans le cas des assemblages bout à bout et dans celui des assemblages par cordon d'angles.

Assemblages	Défauts	Essais non destructifs
-Assemblages bout à bout	<ul style="list-style-type: none"> -inclusions gazeuses et solides -défauts de fusion -Défauts de pénétration -Fissurations internes -Fissurations voisines de la surface -Fissurations débouchant en surface -Fissurations d'arrachement lamellaire et défauts situés dans plans parallèles à la surface des pièces -Fissurations dues aux retassures de cratères 	<ul style="list-style-type: none"> -Essais radiographiques -Essais par ultrasons -Essais radiographiques -Essais radiographiques ou par ultrasons -Essais magnétiques -Essais magnétiques ou par ressuage -Essais par ultrasons -Essais par ressuage
-Assemblage par cordons d'angles	<ul style="list-style-type: none"> -Défauts de pénétration -Fissurations (pratiquement toujours voisines de la surface) -Fissuration dues aux retassures de cratères 	<ul style="list-style-type: none"> -Essais radiographiques -Essais par ultrasons, dans les assemblages et té -Essais magnétiques -Essais par ressuage

Tableau II.11- domaine d'application des END en fonction d'assemblage

II.4.2 Le Contrôle Destructif(CD) :

Le contrôle destructif a pour but, d'une part, de contrôler les assemblages au point de vue de leur résistance et de l'homogénéité de leurs caractéristiques et, d'autre part, de vérifier que les procédés de soudage, les métaux de base et les métaux d'apport, ainsi que leurs conditions de mise en œuvre, ne peuvent être la cause de fissurations incompatibles avec le bon comportement en fatigue et la résistance à la rupture fragile des constructions.

Les éprouvettes témoins qui doivent aux essais mécaniques destructifs sont généralement extraites d'assemblages témoins qui doivent être réalisés de manière à reproduire aussi fidèlement que possible les assemblages réels. A cet égard, une attention toute particulière doit être accordée à la nature du métal de base et du métal d'apport, aux conditions de soudage ainsi qu'aux régimes thermiques.

II.4.2.1. Essai de texture :

Ce sont des essais simples d'ateliers destinés à vérifier que la soudure est compacte et bien pénétrée, il consiste à rompre l'éprouvette dans la soudure et on examine les défauts apparents sur la section rompue.

II.4.2.2. Essai mécanique :

Les principaux types d'essais mécaniques destructifs sont les suivants traction, flexion, pliage, dureté, résilience, examen macrographique, fracture, fissuration à froid, fissuration à chaud, arrachement lamellaire, fissuration au réchauffage.

Les essais mécaniques sont classés en deux catégories bien distinctes :

- **Les essais statiques :**

Les essais statiques sont utilisés pour déterminer la traction, le pliage et la dureté. Au cours de cet essai, l'effort appliqué croît lentement.

Dans notre étude, on va se limiter sur l'essai de traction.

- **Essai de traction:** cet essai est réalisé sur une machine spéciale qui enregistre les efforts et les allongement grâce à des capteurs d'extensométrie (FigureII.23). L'essai permet de caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau ductile. Cet essai l'un des principaux critères de classement des matériaux.

La norme européenne de référence est la NF EN ISO 4136 MAI 2011 pour l'essai de traction transversale et la norme européenne NF EN ISO 5178 MAI 2011 pour l'essai de traction longitudinal.

- **Essai de pliage:** L'essai consiste à exercer sur une éprouvette, à température ambiante une déformation plastique par pliage.

L'éprouvette est prélevée transversalement ou longitudinalement à l'assemblage soudé. Une seule face de l'éprouvette est mise en extension (endroit, envers ou coté) (Figure II.24). Le pliage est réalisé jusqu'à ce que l'une des branches de l'éprouvette fasse un angle α déterminé avec le prolongement de l'autre branche. La norme européenne de référence pour prélever et réaliser l'essai est : NF EN ISO 5173 AOUT 2010.



Figure II.23- Machine de traction



Figure II.24- Machine de pliage

- **Les essais dynamiques :**

Les essais dynamiques sont utilisés pour déterminer la résilience et la fatigue. Au cours de cet essai, l'effort appliqué croit rapidement. Ces différents essais se pratiquent sur des éprouvettes cylindriques, plates ou prismatiques qui ont été découpées dans la pièce à contrôler.

CHAPITRE III

PARTIE EXPÉRIMENTALE

III.1. Introduction :

Le but de ce travail est de réaliser deux procédés de soudage, par l'arc électrique avec électrode enrobée et l'autre avec électrode réfractaire(TIG) sur des plaques en acier a usage générale A60, et sur des éprouvettes prismatiques plates et normalisées. Ensuite, on soumise les plaques à un examen de ressuage et on compare entre les deux procédés.

Ainsi, on prend des éprouvettes prismatiques plates en acier de même nuance, on les soumises à des essais de traction.

En fin on compare les résultats obtenus.

III.2. Déroulement de réalisation :

Dans cette partie nous faisons le point sur les différentes techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des échantillons soudés (assemblage soudée). Dans ce qui suit, nous présentons le métal de base utilisé dans notre étude comparative entre les deux procédés(SMAW-GTAW). Ainsi les différentes opérations concernant le contrôle des soudures, soit par les détruire(CD), ou sans les détruire par CND.

III.2.1: Préparation des éprouvettes:

Matériau :

On a choisi un acier d'usage générale A60, l'ancienne dénomination de la nuance d'acier A60 est remplacée par le E335 ou 1.0060 selon la norme NF EN 10027-1 ou NF EN 10027-2. Le tableau III.1 représente les propriétés mécaniques du matériau utilisé.

Matériau	Rm(N/mm²)	Re(N/mm²)	A%
E335 (A60)	570- 710	335	15%

Tableau III.1- propriétés mécanique d'acier A60. [28]

Le tableau III.2 représente la composition chimique du matériau :

C	Si	Mn	S	P	N	Cu

Tableau III.2- composition chimique d'acier [29]

Dimension :

- **Pour l'essai de traction :** les éprouvettes Chanfreinées en 45° (type V) Sous la norme NF EN ISO 4136 MAI 2011. (Figure III.1) [30].

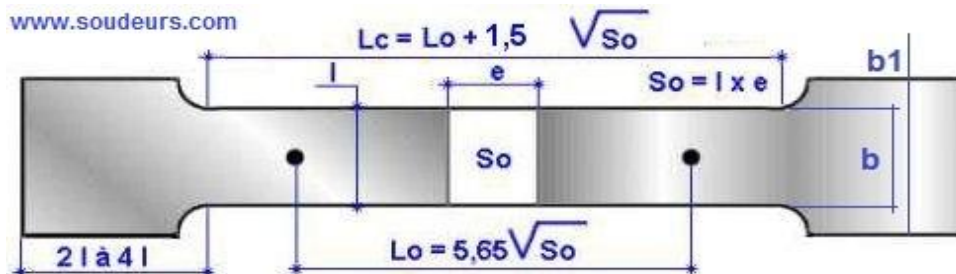


Figure III.1- éprouvette prismatique normalisée de traction



Figure III.2- préparation des éprouvettes à souder pour la traction

- **Pour l'essai de ressuage** : 4 tôles de 10mm d'épaisseur ; 70 mm de largeur ; 180 mm de longueur. Chanfreiné en 45°(type V) (Figure III.3), soudées pour avoir deux plaques de 140mm de largeur assemblées avec les procédés.



Figure III.3- préparation des plaques à souder pour l'essai de ressuage

III.2.2 : Soudage des éprouvettes :

III.2.2.1. SMAW :

Pour l'exécution des joints soudés, on fait le choix de la tension et de l'intensité du courant de soudage suivant l'épaisseur de la pièce à souder. Il est à noter qu'on laisse un jeu de l'ordre de 1,5 à 2,5mm entre les deux tôles, et 1à1.5 mm entre les éprouvettes plates à assembler, pour cette opération on a utilisé les valeurs indiquées dans le tableau III.3.

Type d'éprouvette	Passe de penetration		Passe de rechargement	
	Tensité U(v)	Intensité I(A)	Tensité U(v)	Intensité I(A)
Plaque 1	90	110	92	110
Eprouvette prismatique (SMAW1)	80	110	*	*
Eprouvette prismatique (SMAW2)	80	110	*	*
Eprouvette prismatique (SMAW3)	80	110	*	*

Tableau III.3- Paramètres électriques de soudage SMAW.

Métal d'apport :

Eprouvettes	Enrobage	Ø Diamètre(mm)	Vitesse de soudage (m/h)
Plaque	Basique (E7018-1)	3.2	1,8
Les éprouvettes prismatique	Basique (E7018-1)	2.5	7,7

Tableau III.4- Paramètres d'électrode enrobée utilisée.



Figure III.4- Plaque1 après l'exécution de soudage SMAW



Figure III.5- Les éprouvettes prismatiques après l'exécution de soudage SMAW.

III.2.2.2. GTAW:

Pour l'exécution des joints, on fait le choix de gaz et le métal d'apport (Tableau III.6), selon le métal de base et les épaisseurs des pièces à souder. Ainsi les paramètres électriques. (Tableau III.5).

Type d'éprouvette	Passe de penetration		Passe de rechargement	
	Tensité U(v)	Intensité I(A)	Tensité U(V)	Intensité I(A)
Plaque2	90	200	95	200
Pièce prismatique(GTAW1)	75	150	*	*
Pièce prismatique(GTAW2)	75	150	*	*
Pièce prismatique(GTAW3)	75	150	*	*

Tableau III.5- Paramètres électriques utilisé en soudage GTAW.

Métal d'apport :

Eprouvettes	Métal d'apport Ø (mm)	Ø electrode (mm)	Gaz (l/min)	Vitesse de soudage (m/h)
Plaque	3,2	3,2	Argon (6)	8
Les éprouvettes prismatique	2,4	2	Argon (5)	11

Tableau III.6- Paramètres de métal d'apport utilisé en GTAW.

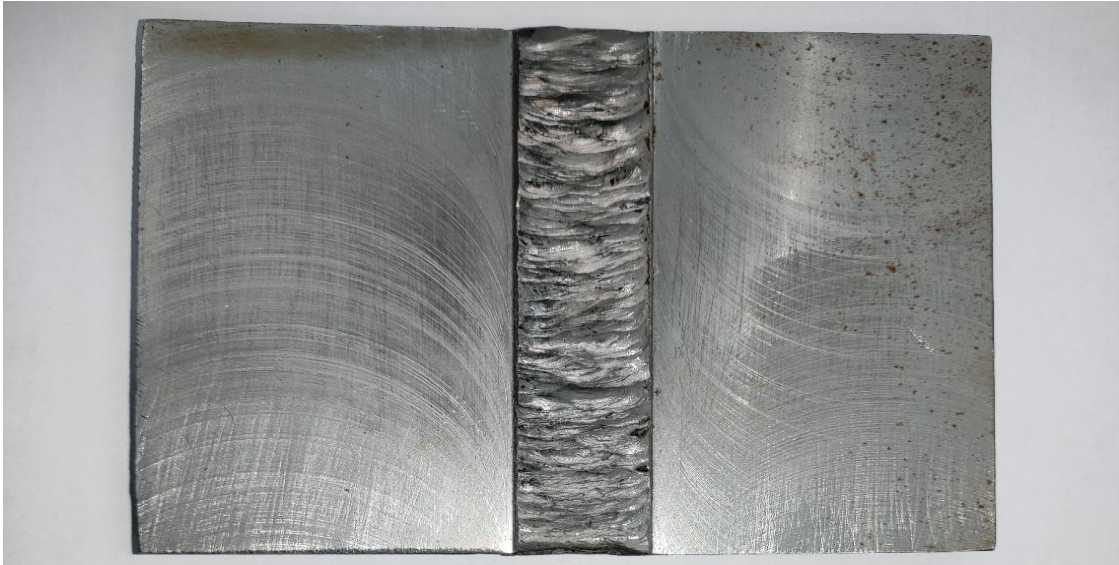


Figure III.6- Plaque2 après l'exécution de soudage GTAW.



Figure III.7- Les éprouvettes prismatiques après l'exécution de soudage GTAW.

III.3 : Résultats et interprétation:

III.3.1 : SMAW :

III.3.1.1. Ressuage:

Par opposition aux autres méthodes de contrôle non destructif, le ressuage peut être considéré comme une méthode « globale » pour tous les défauts débouchant en surface, quelle que soit la nature du matériau.



Figure III.8- Plaque1 après l'Examen de ressuage.

Toute apparition du pénétrant indique en principe la présence d'une discontinuité sur la surface.

Les indications observées en ressuges : Tâche diffusée qui signifié la présence de micro-pore dans les pièces

On constate aussi que la plaque1 soudée par le SMAW a un aspect de cordons qui se présente à la surface ou dans le cordon, à cause de soudage trop lente.

III.3.1.2. Traction :

Test Data									
Specimen Number		1	2	3	4	5	Average	Requirement	Standard Deviation
Width	mm	28,50	27,71	28,60			28,27	-	0,49
Thickness	mm	4,70	5,19	5,35			5,08	-	0,34
Gripping Length	mm	50,0	50,0	50,0			50,0	-	0,0
Maximum Force	N	42 672	37 410	40 341			40 141	-	2 637
Longitudinal Tensile Strength	N/mm	1 497	1 350	1 411	-	-	1 419		74
Tensile Strength	MPa	319	260	264	-	-	280,8		32,8
Elongation	%	8,47	7,61	8,60			8,23	-	0,54

Tableau III.7- Résultats de traction des éprouvettes soudées avec SMAW

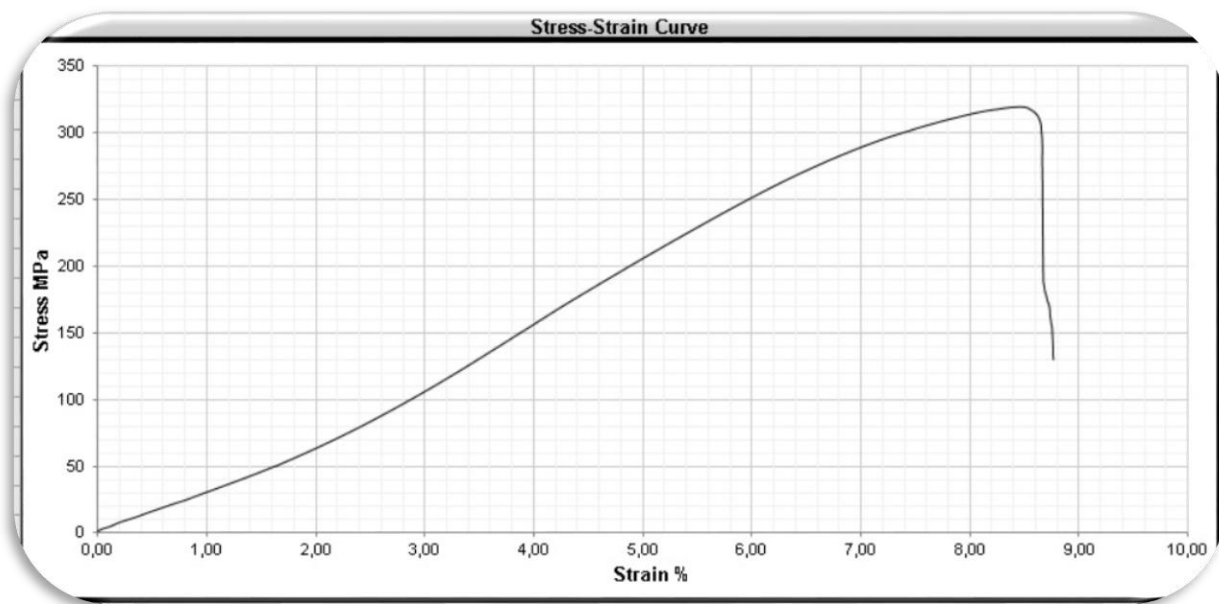
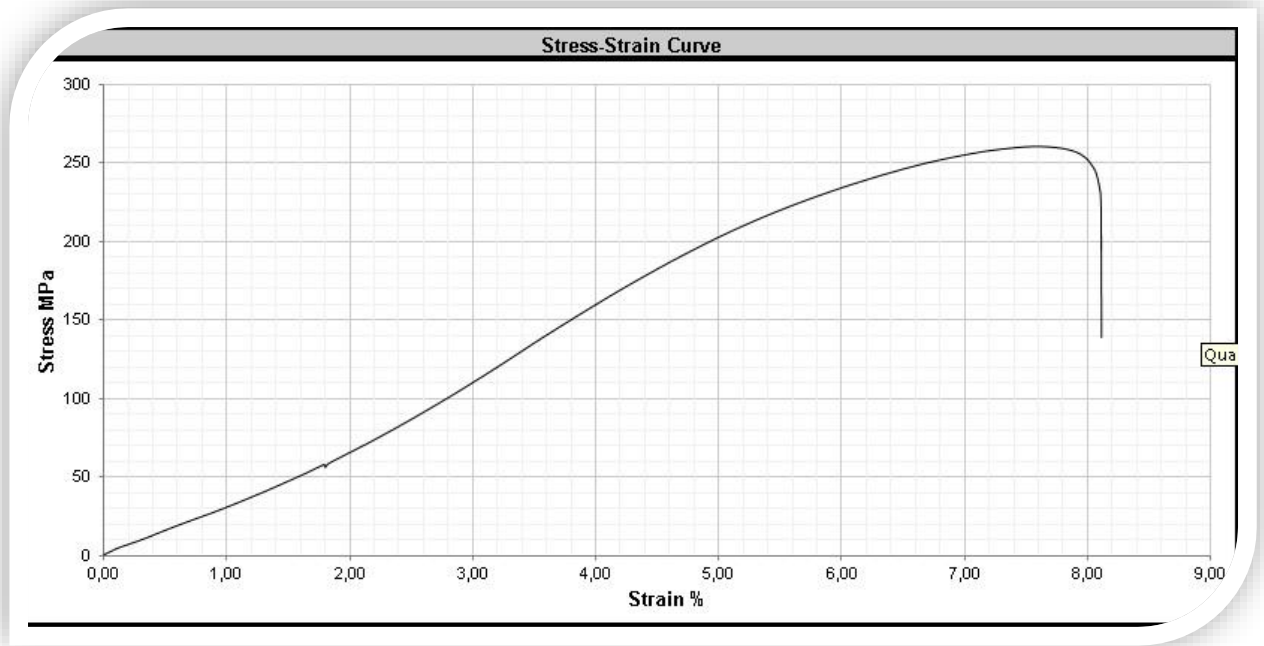
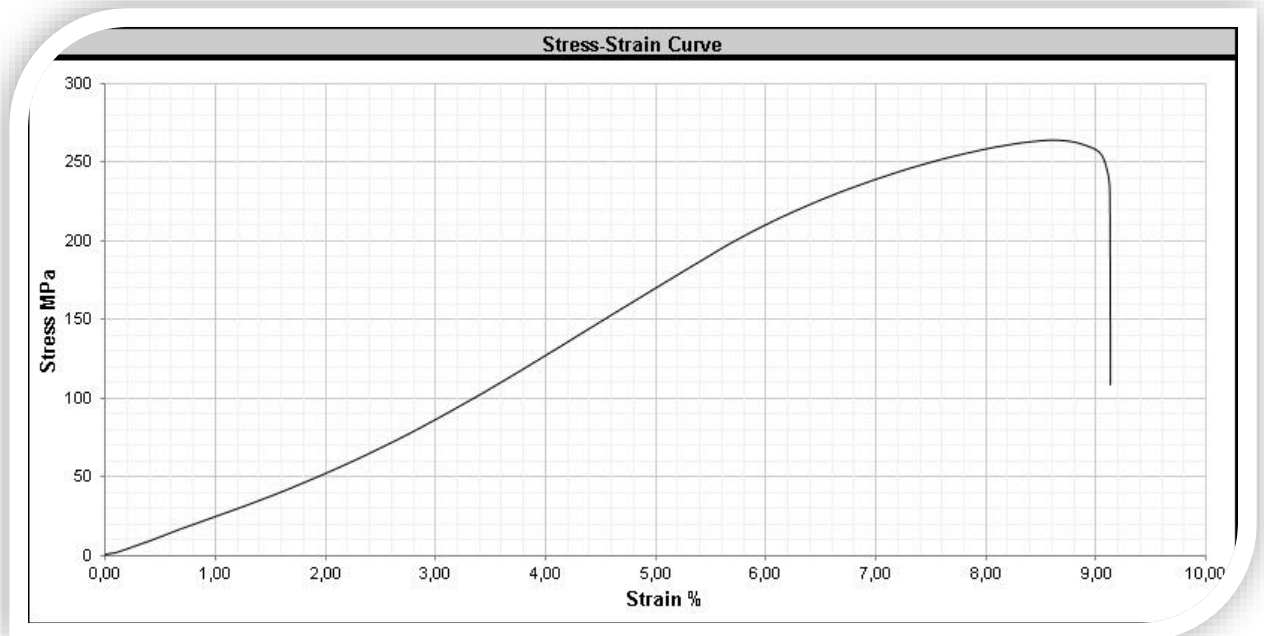


Figure III.9- Courbe de traction de l'éprouvette SMAW1.



FigureIII.10- Courbe de traction de l'éprouvette SMAW2.



FigureIII.11- Courbe de traction de l'éprouvette SMAW3.

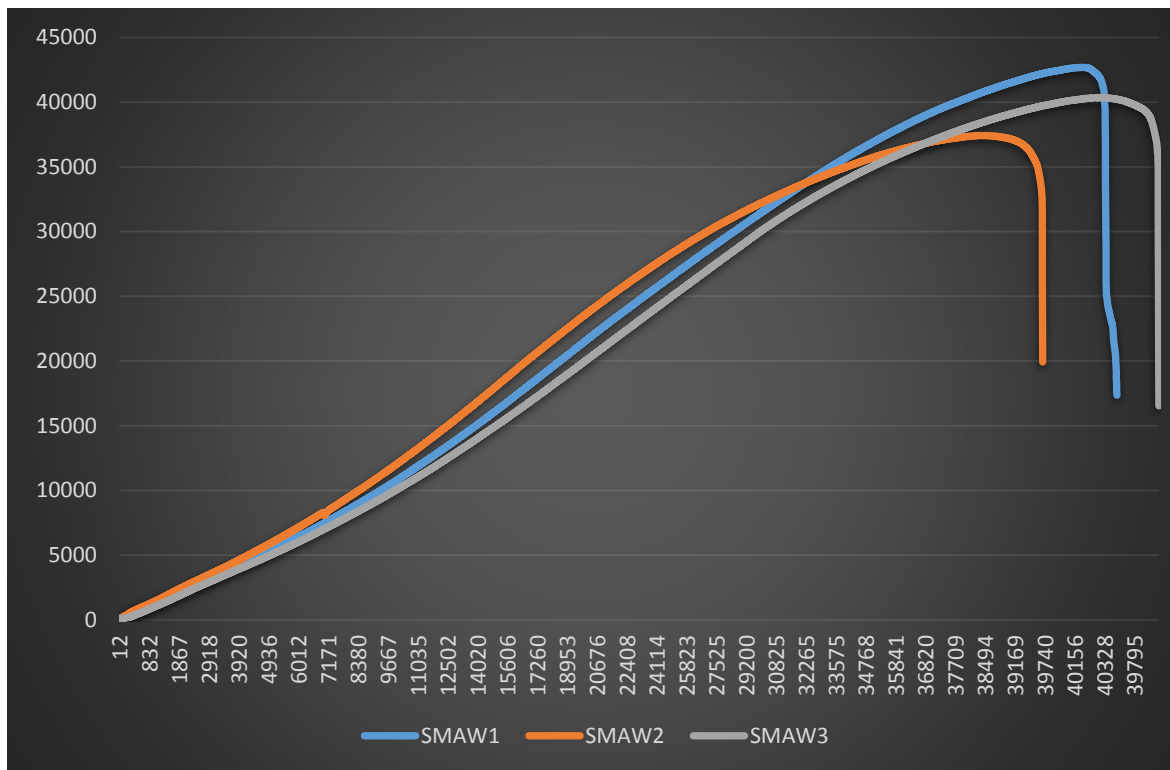


Figure III.12- Agrégation des courbes de traction des éprouvettes soudés par SMAW

- ❖ Nous remarquons d’après les courbes de traction obtenues par le procédé de soudage SMAW que la résistance de traction augmente avec l’augmentation de la surface du contact entre l’acier et le métal d’apport, sauf que l’éprouvette SMAW1 avait une résistance plus élevée par rapport les deux autres éprouvettes à cause de la conformité de la vitesse d’avance de la baguette pendant le soudage malgré la surface du contact est la plus petite. Cela signifie que le paramètre de la vitesse de soudage faut qu’il soit pris en considération.

III.3.2: GTAW:

III.3.2.1 Ressuage :



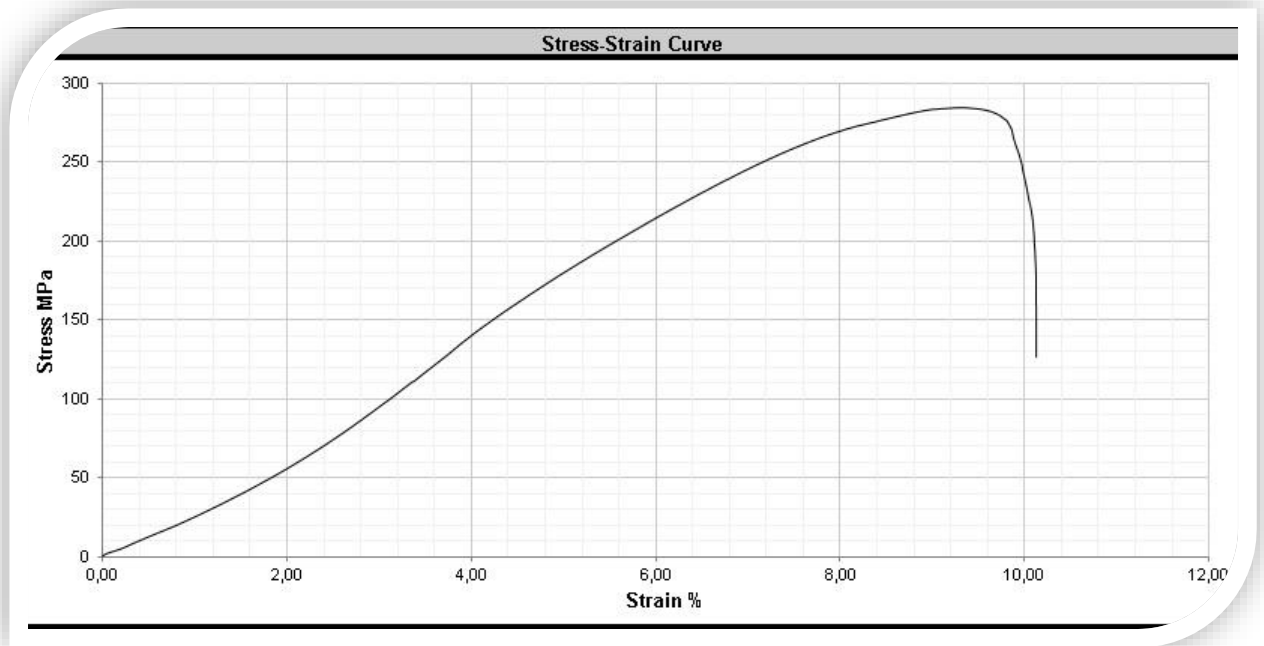
Figure III.13- Plaque2 après l'examen de ressuage.

Les indications observées sont des Formes arrondies qui signifié des indications d'origine les défauts surfaciques de forme sphérique, (soufflure, piquêre, structure poreuse de la pièce). On constate aussi que la plaque2 soudée par le GTAW a un aspect de cordons qui contient des soufflures, à cause de la fuite de gaz ambiant dans le bain de fusion. Dans ce cas, on les considère tolérables.

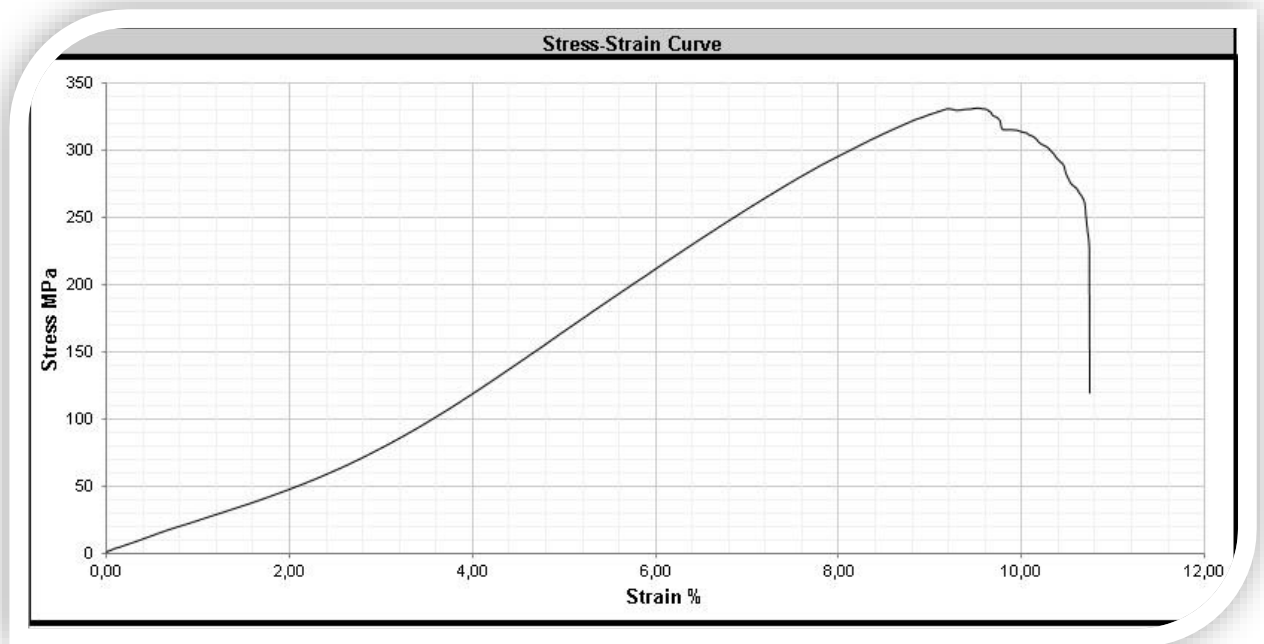
III.3.2.2. Traction :

Test Data									
Specimen Number		1	2	3	4	5	Average	Requirement	Standard Deviation
Width	mm	27,97	28,50	29,60			28,69	-	0,83
Thickness	mm	5,62	5,08	6,26			5,65	-	0,59
Gripping Length	mm	50,0	50,0	50,0			50,0	-	0,0
Maximum Force	N	44 656	47 886	55 411			49 318	-	5 519
Longitudinal Tensile Strength	N/mm	1 597	1 680	1 872	-	-	1 716		141
Tensile Strength	MPa	284	331	299	-	-	304,6		23,8
Elongation	%	9,32	9,53	13,21			10,69	-	2,19

TableauIII.8- Résultats de traction des éprouvettes soudées par GTAW



FigureIII.14- Courbe de traction de l'éprouvette GTAW1.



FigureIII.15- Courbe de traction de l'éprouvette GTAW2.

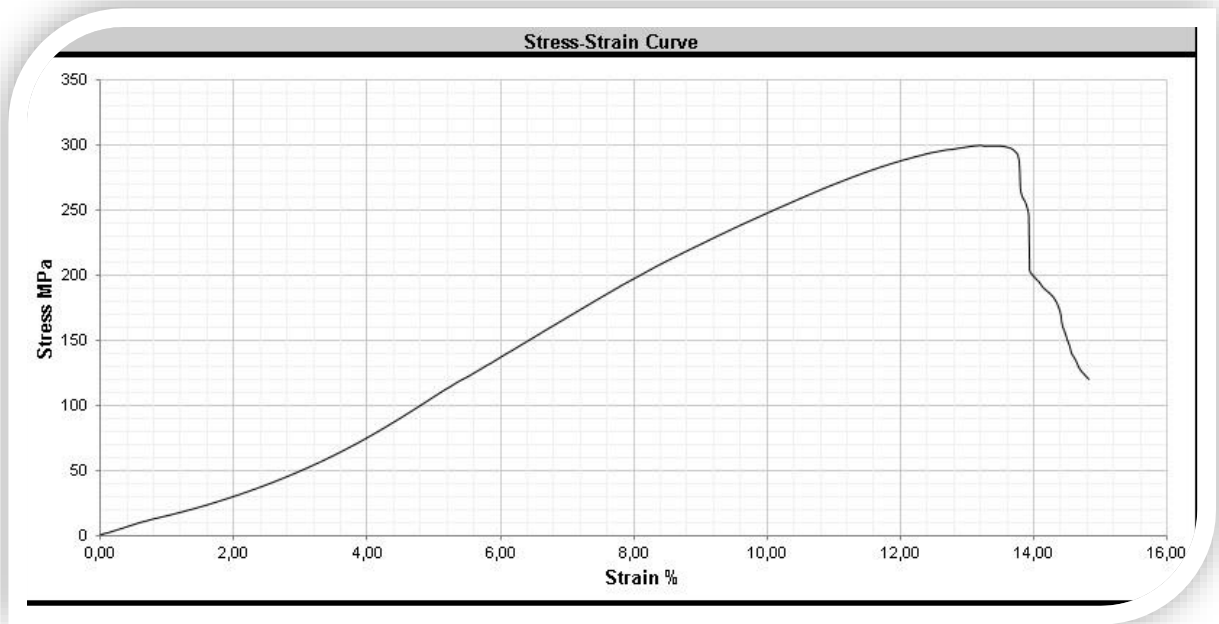


Figure III.16- Courbe de traction de l'éprouvette GTAW3.

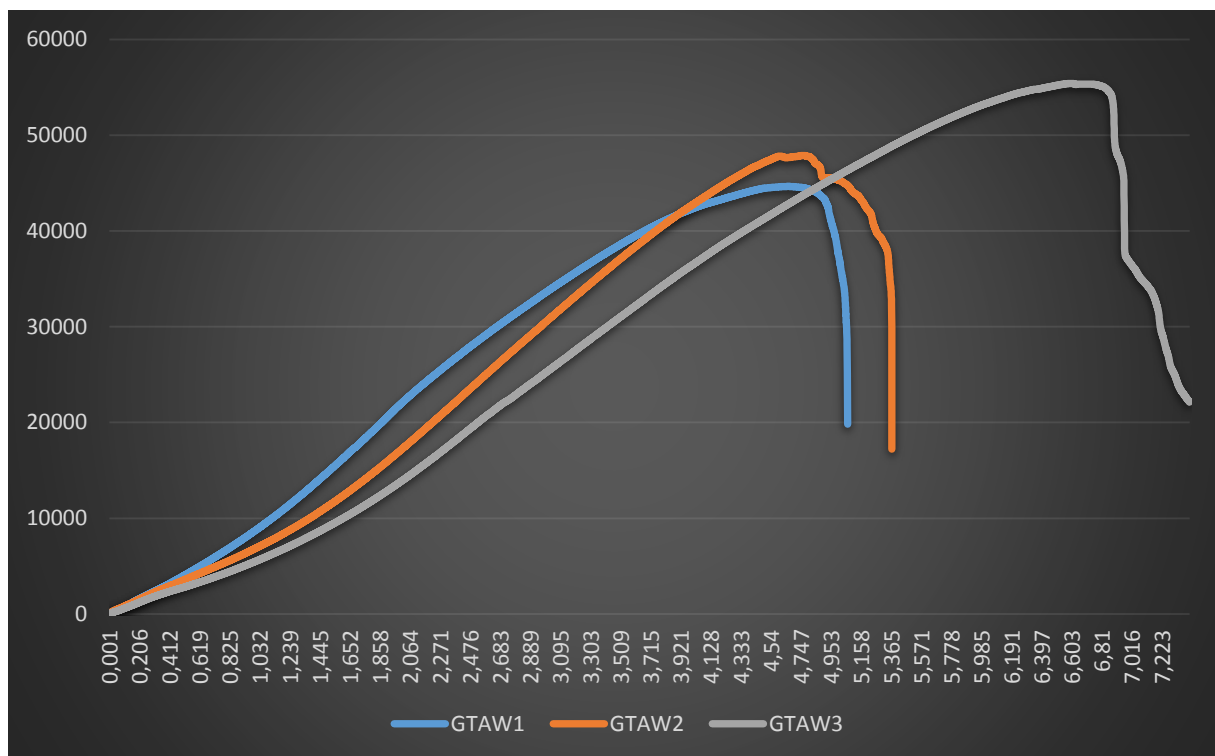


Figure III.17- Agrégation des courbes de traction des éprouvettes soudés par GTAW

D'après les courbes obtenues de la traction des éprouvettes soudés par procédé de GTAW, nous remarquons que la résistance de traction augmente différemment, à cause des paramètres électriques et le débit de gaz et même le paramètre de la vitesse d'avance, et d'après point de vue comparative, la moyenne des trois éprouvettes soudés par GTAW présente des joint plus adhérent au métal de base par rapport aux éprouvettes soudés par arc électrique manuelle SMAW.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette étude modeste, nous avons réalisé dans le projet de fin d'études des essais de traction sur les éprouvettes prismatiques d'acier, et des examens de ressuage sur des plaques.

Ces éprouvettes, et ces plaques ont été effectués après le processus de soudage à l'arc électrique manuel avec électrode enrobée (SMAW) et soudage sous protection gazeuse avec électrode réfractaire (GTAW).

Nous avons constaté que l'aspect de cordons soudés par SMAW, sur la plaque1 avait des tâches diffusées qui se présentent à la surface, et qui signifient la présence de micropores dans les pièces, et à cause de la vitesse de soudage trop lente.

En outre, grâce aux résultats des essais de traction sur les éprouvettes soudés par SMAW, nous remarquons qu'elles avaient une résistance à la traction différente entre elles grâce aux surfaces de contact entre le métal de base et le métal d'apport, et ainsi grâce aux paramètres de vitesse de soudage.

Ainsi, nous avons constaté que l'aspect de cordon soudé par GTAW, sur la plaque2 avait des indications de formes arrondies, qui signifient des défauts surfaciques sphériques, (soufflures). À cause de la fuite de gaz ambiant dans le bain de fusion.

Ensuite, en basant sur les courbes obtenues de la traction des éprouvettes soudés par procédé de GTAW, nous remarquons que la résistance de traction augmente différemment, à cause des paramètres électriques et le débit de gaz et même le paramètre de la vitesse d'avance qu'il faut les prendre en considération.

Finalement, et d'après point de vue comparative, la moyenne de résistance à la traction des trois éprouvettes soudés par GTAW présente des joints plus adhérents au métal de base par rapport aux éprouvettes soudés par arc électrique manuel SMAW.

RÉFÉRENCES

- [1] S. BENSADA.D. FEIIACHI. « TECHNOLOGIE ». Office de publication universitaires.2e Edition.01-2009
- [2] Wikipédia l'encyclopédie libre / Procédés de soudage de pièces métalliques.
- [3] MOSTEFA, A. Etude comparative des différents procédés de soudage sur l'effet de fissuration à froid dans la ZAT (Doctoral dissertation).
- [4] Mécano soudage : Fabrication, Edition CETIM, Mars 2000.
- [5] Mécano soudage : Conception, Edition CETIM, Août 1997.
- [6] BELABED, A. Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles (Doctoral dissertation).
- [7] Fricke, S., Keim, E., & Schmidt, J. (2001). Numerical weld modeling—a method for calculating weld-induced residual stresses. Nuclear Engineering and Design, 206(2-3), 139-150.
- [8] CSMOFMI Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage.
- [9] Granjon, H. (1995). Bases métallurgiques de soudage>>. 2 ème édition. Publication du soudage et de ses applications. Paris.
- [10] CHÉRIFI, N. (2015). Effet du soudage par TIG sur l'aluminium industriel 1050A (Doctoral dissertation, Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra).
- [11] AMAL, S., & HADJIRA, C. (2019). Caractérisation et contrôle non destructif des soudures (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [12] Planckaert, J. P. (2008). Modélisation du soudage MIG/MAG en mode short-arc (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- [13] Kechaou, A. (2014). Etude du soufflage magnétique de l'arc électrique de soudage
- [14] Bachir, S. A. A. D. A. (2019). Caractérisation d'un joint de soudure par la technique de corrélation d'images numériques (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [15] Welding Handbook Seventh Edition, Volume 1 Fundamentals of Welding, 1976.
- [16] Weman, K. (2011). Welding processes handbook. Elsevier.
- [17] Cazes, R. (1990). Soudage à l'arc. Ed. Techniques Ingénieur.
- [18] M.K. Bencharif, "Procédés de soudage –le soudage manuel à l'arc avec électrode Enrobée ", Vinçotte International Algérie, 2007.
- [19] M.K. Bencharif, " Soudage – métaux d'apport ", Cosider, Biskra, 2011.
- [20] TWI, "Section15: Welding Consumables ", Senior Welding Inspection, 2008

- [21] H. Ait-Amokhtar, thèse de Doctorat, Université de Bejaïa, (2006)
- [22] CSMOFMI Soudage et assemblage-soudage Guide d'auto-apprentissage
- [23] M. ZAOUI, Caractérisation mécaniques et métallurgiques des joints de soudure, étude comparative entre deux procédés de soudage, le soudage MIG et le soudage au chalumeau, thèse de magister, Juin 2000.
- [24] K. KHELIL, « Soudage Des Pipelines », Mémoire D'ingénieur En Métallurgie, Université De Mouhamed Kheider [Biskra, (2010).
- [25] <https://www.soudeurs.com/site/quelles-sont-les-causes-et-quels-sont-les-remedes-aux-principaux-defauts-de-soudage-452/>
- [26] <http://tandems.free.fr/mountain/bricolage/cadre/soudure/soudure.html>
- [27] BAUS, R. et CHAPEAU, W. Défauts et contrôles des joints soudés. Cours d'application du soudage aux constructions. Complément n°3. Service des ponts et charpentes, Université de Liège, 1977.
- [28] COLLECTION H. LENGEOT & L. JOURDAN, *Construction industrielle* Edition Dunod © Bordas Paris 1982
- [29] <https://www.soudeurs.com/site/essais-mecaniques-les-essais-de-tractions-transversales-ou-longitudinales-266>

ABSTRACT

من بين عمليات استخدام المواد المعدنية، يحتل اللحام المرتبة الأولى. في الواقع، يستدعي جزء كبير من الأشياء المصنعة التي تحيط بنا تقنيات التجميع باللحام لتحقيقها. تتيح معرفة هذه التقنيات تحسين و / أو تقليل تكاليف تصنيع هذه الكائنات.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إجراء مقارنة بين عمليتي لحام للمواد المعدنية. أولاً، يتم الاقتراب من التصنيف السريع لهذه العمليات، والمعايير التي تسمح باختيار عملية اللحام وفقاً للحاجة، وبالتالي تحديد العيوب المختلفة ووسائل الضوابط، و. أخيراً، معرض تجريبي لإجراء مقارنة صغيرة بين العمليتين.

Among the processes for using metallic materials, welding is in first position. Indeed, large parts of the manufactured objects, which surround us, call upon assembly technologies by welding for their realization. Knowledge of these technologies makes it possible to improve and / or reduce the manufacturing costs of these objects.

The main aim of this study is to make a comparison on two welding processes for metallic materials. Firstly, a rapid classification of these processes is approached, and the criteria allowing the selection of the welding process according to the need, thus the definition of various defects and the means of controls, and. Finally, an experimental exhibition to make a small comparison between the two processes.

Parmi les procédés de mise en œuvre des matériaux métalliques, le soudage se situe en première position. En effet, une grande partie des objets manufacturés qui nous entourent font appel à des technologies d'assemblage par soudage pour leur réalisation. La connaissance de ces technologies permet d'améliorer et/ou de diminuer les coûts de fabrication de ces objets.

Le principal but de cette étude est de faire une comparaison sur deux procédés de soudage des matériaux métalliques. Dans un premier temps, une classification rapide de ces procédés est abordée, et les critères permettant la sélection du procédé de soudage selon le besoin, ainsi la définition de différents défauts et les moyens de contrôles, et. Enfin, une exhibition expérimentale pour faire une petite comparaison entre les deux procédés.