

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira Béjaia
Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique



Mémoire de fin de cycle d'étude
En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique
Option : Matériaux pour l'ingénierie mécanique

Thème

*Caractérisation mécanique en dureté et résilience du
joint soudé de l'acier E24 utilisé comme élément de
structure du châssis de grue*

Présenté par : Mr. BOUIBAOUNE Mansour

Devant le jury :

Mr. YAYA Kamel	Président	MCB	UAMB
Mr. AMMARI Djamel	Examinateur	MAA	UAMB
Mr. OURARI Kamel	Examinateur	MAA	UAMB
Mr. ATI Abdelaziz	Encadreur	PROFESSEUR	UAMB

Promotion : 2013-2014

Table des matières

Sommaire	IV
Listes des figures	VI
Listes des tableaux	VII
Introduction générale	1
1 Présentation de l'entreprise	2
1.1 Présentation de l'organisme d'accueil	2
1.1.1 Présentation générale de l'entreprise nationale de matériels de travaux publics (ENMTP)	2
1.1.2 Organigramme de l'entreprise mère (ENMTP)	3
1.1.3 Présentation de l'entreprise L'UGB	4
1.1.4 Structure de L'UGB	5
1.1.5 Département technique	5
1.1.6 Les grues fabriquées par L'UGB	6
2 Étude bibliographique	7
2.1 Introduction	7
2.2 Définition de soudage	7

2.3	Classification des procédés de soudage	8
2.4	Soudage à l'arc électrique	9
2.4.1	Définition de l'arc électrique	9
2.4.2	Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)	10
2.4.2.1	Définition du procédé	10
2.4.2.2	Principe du procédé	11
2.4.3	Le procédé de soudage MIG/MAG	11
2.4.3.1	Définition du procédé	11
2.4.4	Principe du procédé de soudure MIG/MAG	12
2.4.5	Installation d'une unité de soudage MIG/MAG	12
2.4.6	Domaines d'application	13
2.4.7	Conséquences du procédé de soudage	13
2.4.8	Avantages et inconvénients du procédé	14
2.5	Le comportement mécanique des métaux	15
2.5.1	la dureté	15
2.5.2	Essais de dureté par pénétration	15
2.5.3	Essais de dureté Rockwell	17
2.5.4	Essai de dureté Vickers	18
2.5.4.1	Essai de la macrodureté vickers	18
2.5.4.2	Essai de la microdureté vickers	20
2.6	Essai de résilience	20
2.6.1	Définition du principe de l'essai	21
2.6.2	Les éprouvettes pour la résilience	21
2.6.3	Conclusion	22
3	Matériaux et techniques expérimentales	23
3.1	Introduction	23

3.2	Présentation des matériaux	23
3.2.1	Présentation de l'acier E24	23
3.2.2	Métal d'apport (fil plein)	25
3.2.2.1	Présentation du métal d'apport	25
3.2.3	Le gaz de protection CO2 (gaz pur) utilisé en soudage MAG	26
3.2.4	Débit de gaz	26
3.2.5	Les avantages du débit de gaz	26
3.3	Réalisation de maquette de liaison Métallique E24	27
3.3.1	Préparation des plaquettes	27
3.3.2	Nettoyage des plaques a soudé	27
3.3.3	Bridage	28
3.3.4	Soudage des plaquettes	28
3.4	Prélèvement des échantillons	29
3.4.1	Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques	30
3.4.2	Le fraisage de la maquette et les plaquettes	31
3.4.3	Réalisation de l'entaille	31
3.5	Présentation des essais mécanique réalisés	32
3.5.1	Essai de résilience (essai de flexion par choc)	32
3.6	Essai de la dureté	34
3.6.1	l'essai de macrodureté Vickers	34
3.7	Description terminologique	35
3.7.1	L'essai de microdureté de Vickers	36
3.7.2	Mode opératoire microdureté Vickers	36
3.8	Métallographie	37
3.8.1	Polissage	38
3.8.2	Attaque chimique	38

3.8.3	Examen au microscope optique	39
3.8.4	But de la métallographie	39
3.9	Conclusion	40
4	Résultats et discussion	41
4.1	Introduction	41
4.2	Les résultats des différents essais	41
4.2.1	Dureté	41
4.2.1.1	Résultat de la macrodureté	41
4.2.1.2	Résultat de la microdureté	44
4.2.1.3	Interprétation des résultats de la macrodureté et la micro- dureté	46
4.3	Résultat de la résilience	47
4.3.1	Interprétation des résultats de la résilience	48
4.4	Caractéristique métallographique	49
4.4.1	Macrographie	49
4.4.2	Micrographie	50
4.4.3	Microstructure de joint soudé	50
4.4.3.1	Microstructure de la plaque soudée	50
4.4.3.2	Interprétation des résultats de la microstructure	51
4.5	Conclusion	51
	Conclusion générale	52
	Bibliographie	53
	ANNEXE	55
	A ANNEXE	55

Table des figures

1.1	Organigramme de l'entreprise.	3
1.2	La grue.	6
2.1	Le soudage.	8
2.2	classification des procédés de soudages.	9
2.3	Arc électrique.	10
2.4	Schéma de principe du soudage MIG/MAG.	12
2.5	Schéma type d'une installation manuelle de soudage MAG.	13
2.6	Principe de dureté brinell.	17
2.7	Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).	18
2.8	Méthode de Rockwell (cône).	18
2.9	Principe de dureté Vickers.	19
2.10	Le mouton de Charpy.	21
2.11	Éprouvette Charpy en U.	22
2.12	Éprouvette Charpy en V.	22
3.1	Bobine du fil de soudage type SG2 de poids 15Kg.	25
3.2	Débit de gaz.	26
3.3	Plaquettes avant l'assemblage.	27

3.4	Bridage des plaques.	28
3.5	Différentes passes.	29
3.6	Forme de la maquette après fraisage.	29
3.7	Scie mécanique.	30
3.8	Echantillons découpés.	30
3.9	Réalisation de l'entaille avec un angle de 45°	31
3.10	Type d'éprouvette pour les essais respectifs de résilience et dureté.	32
3.11	Mouton pendule d'essai de résilience.	33
3.12	Macroduromètre.	34
3.13	Différentes positions	36
3.14	Microduromètre.	37
3.15	Positions des empreintes de la microdureté Vickers.	37
3.16	Polisseuse.	38
3.17	Dispositif du microscope optique piloté par ordinateur	39
4.1	Moyenne de la macrodureté (HV) enregistrée sur l'éprouvette à l'état brut.	43
4.2	Moyenne de la macrodureté (HV) enregistrée sur les éprouvettes soudées.	43
4.3	Moyenne de la microdureté (HV) enregistrée sur l'éprouvette à l'état brut.	45
4.4	Profil de la macrodureté (HV) enregistrée sur l'éprouvette soudée.	46
4.5	Valeurs de la résilience.	48
4.6	Moyennes de la résilience.	48
4.7	Présentation macrographique d'un joint soudé.	49
4.8	Direction transversale.	50
4.9	Aspects de la microstructure du métal de bas.	50
4.10	Aspects de la microstructure de la zone affectée thermiquement.	50
4.11	Aspects de la microstructure de la zone fondue	51

Liste des tableaux

3.1	Certificat d'analyse chimique et mécanique d'acier E24.	24
3.2	composition chimique du métal d'apport.	25
3.3	Paramètres de soudage pour la réalisation de la liaison métallique.	28
3.4	Paramétrés de fraisage.	31
4.1	Résultats de la macrodureté des éprouvettes à l'état brut.	42
4.2	Résultats de la macrodureté des éprouvettes soudées.	42
4.3	Résultats de la microdureté à l'état brut.	44
4.4	Résultats de la microdureté des éprouvettes soudées.	45
4.5	résultats des éprouvettes de la résilience à l'état brute (J/cm^2).	47
4.6	résultats des éprouvettes de la résilience à l'état soudées (J/cm^2).	47
4.7	Eléments d'aditions.	49

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'assemblage par soudage occupe une place importante dans l'univers de la construction des bateaux, trains, automobiles, ponts, réservoirs, Grues et tant d'autres choses qui ne seraient être construites sans le recours au soudage. Le soudage est un processus de fabrication généralement utilisé pour assembler des pièces. Il consiste à fondre partiellement les pièces à assembler et parfois en ajoutant un matériau d'apport pour former un bain de métal fondu qui devient après solidification et refroidissement une jonction fixe (joint soudé). Il existe un très grand nombre de procédés de soudage dont les principes sont différents.

Pour notre cas d'étude nous avons utilisé le procédé de soudage MAG (Métal Active Gaz) utilisé à l'Unité Grue de Béjaia (UGB) pour la réalisation de la plupart des soudures des éléments de grues et particulièrement celles des châssis.

Le soudage est un procédé très complexe est difficile à mettre en oeuvre car il faut prendre en considération plusieurs critères est plusieurs phénomènes qui peuvent entrés en jeu lors de l'opération de soudage.

L'objectif de notre travail est d'étudier la fiabilité d'un joint de soudure d'un assemblage de deux pièces en acier E24 par le procédé MAG, et faire une comparaison entre les propriétés mécaniques (résilience, dureté) avant et après soudage.

Notre manuscrit contient quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de l'Unité Grue de Béjaia.

Le deuxième chapitre fera l'oeuvre d'une étude bibliographique sur les différents types de soudage à l'arc électrique ainsi que le comportement mécanique aux chocs (résilience) et la dureté.

Le troisième chapitre traitera les étapes de la fabrication des éprouvettes d'essais, de la réalisation de maquette soudée ainsi que la présentation des techniques de caractérisation.

Le quatrième chapitre rassemble les résultats obtenus et leurs discussions.

Et on terminera par une conclusion générale.

Chapitre 1

Présentation de l'entreprise

1.1 Présentation de l'organisme d'accueil

1.1.1 Présentation générale de l'entreprise nationale de matériels de travaux publics (ENMTP)

L'Algérie a instauré une politique massive d'investissement afin de limiter l'étape du sous développement, cette politique consiste à la mise en place de puissantes entreprises qui doivent répondre aux besoins du pays.

L'ENMTP est une entreprise qui est entrée en force dans l'industrie. Son potentiel est considéré comme l'un des plus importants d'Afrique, elle recouvre un domaine très vaste comprenant le développement de tout processus de fabrications et de distributions entrant dans la filière des travaux publics, de l'industrie mécanique et métallique.

L'ENMTP a été créée par décret n°83-06 du 01/01/1983. Cette dernière a subi une transformation en société par actions le 09/05/1995, et a été dotée d'un capital social de l'ordre de 2200.000.000 DA et gère un important effectif de l'ordre de 2642 salariés.

L'ENMTP développe plusieurs produits qui sont conçus par des constructeurs reconnus mondialement tel que LIEHBER (pour pelle et grues hydrauliques), FIAT-ALLIS (pour les bulldozers), POTAIN (pour les grues de bâtiments).

L'ENMTP développe plusieurs produits qui sont conçus par des constructeurs reconnus mondialement tel que LIEHBER (pour pelle et grues hydrauliques), FIAT-ALLIS (pour les bulldozers), POTAIN (pour les grues de bâtiments). L'ENMTP dont le siège social est basé à AIN SMARA (Constantine) est subdivisée en quatre unités de production comme suit :

1. Complexe pelles et grues (CPG) d'AIN SMARA (Constantine)

Ce complexe est entré en production à partir de 1980.

2. Complexe compresseurs et compacteurs (CCA) AIN SMARA (Constantine)

Ce complexe est entré en production à partir de 1986.

3. Unité de matériels à béton (UMBH) EL HARRACH

Cette unité est entrée en productions à partir de 1973.

4. Unité Grues de Béjaia

Cette unité est entrée en production à partir de 1973.

1.1.2 Organigramme de l'entreprise mère (ENMTP)

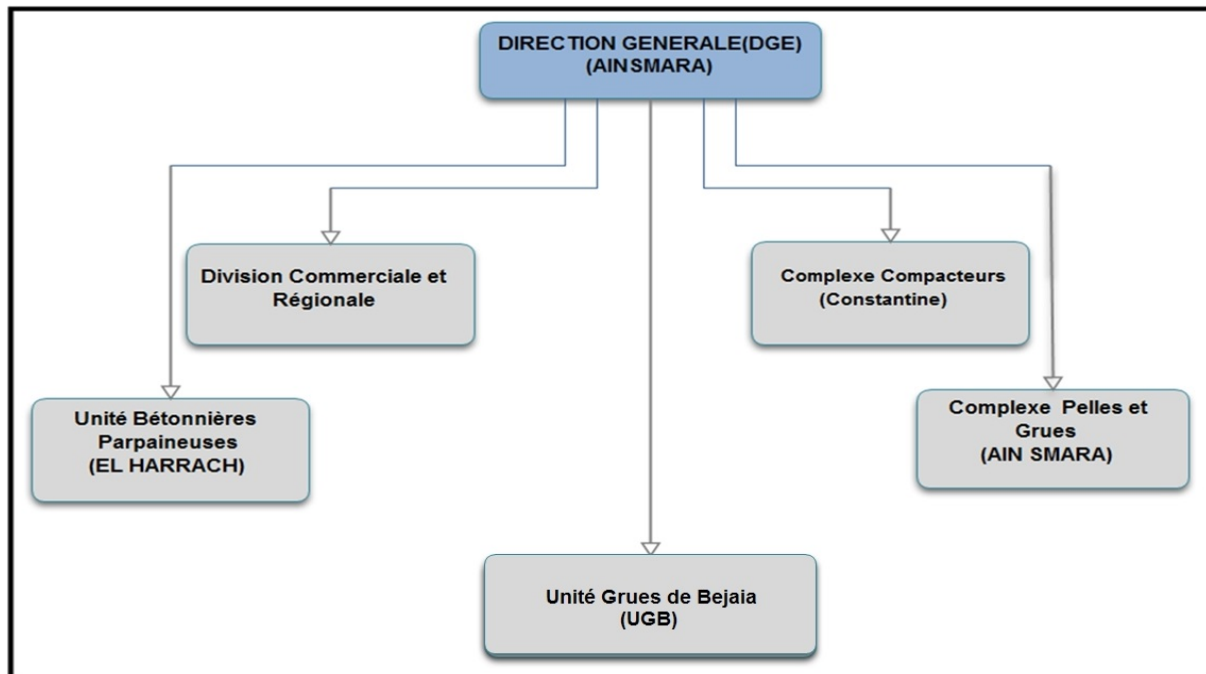


FIGURE 1.1 – Organigramme de l'entreprise.

1.1.3 Présentation de l'entreprise L'UGB

a. Historique

L'unité Grues de Bejaia a été créé le 19/11 /1971 par la société SN -METAL (société mère). L'UGB a été transférée par la suite à L'ENMTP par décret n° 83-14 du 01/01/1983

b. Situation géographique

Unité Grues de Bejaia est implantée dans la zone industrielle de Bejaia. On remarque que toutes les infrastructures si afférentes sont présentes : les chemins de fer, l'aéroport et le port qui sont dans un rayon ne dépassant pas trois kilomètres.

c. Evolution de l'Unité Grues de Béjaia

L'unité Grues de Béjaia fabriquait des grues de bâtiments qui correspondaient à plusieurs sortes de constructions, mais après quelques années de fonctionnements il s'est avéré que le procédé technologique mis en place et la dimension de l'entreprise n'était pas de nature à répondre aux exigences du développement du marché national, surtout avec l'expansion du secteur de construction et de l'habitat.

A partir de 1980 une nouvelle gamme de produits, mis au point sur le plan technologique (grue à montage rapide) a été lancée. Toute fois si la nouvelle gamme a répondu favorablement à l'attente des entreprises de constructions, elle n'était pas en rapport avec les besoins des entreprises nationales du point de vue performance.

Ainsi, l'extension de l'Unité Grues de Béjaia était nécessaire pour y intégrer des grues en relations avec les normes de constructions. La superficie de l'entreprise est maintenant doublée et la partie couverte quadruplée, et peut recevoir tous les équipements de production nécessaires pour le développement envisagé.

1.1.4 Structure de L'UGB

Chaque entreprise est structurée selon un organigramme qui est censé refléter et répondre aux exigences et aux objectifs tracés au préalable (objectif à atteindre). L'UGB, comme toute entreprise nationale, est organisée selon un organigramme préétabli par sa direction générale.

1.1.5 Département technique

Le département technique est composé comme suit :

a. Service bureau d'études

Le service bureau d'études a pour mission d'effectuer les tâches suivantes :

- La gestion technique et organique des différents produits existant déjà et ceci en suivant leur fabrication au niveau des ateliers ;
- Apporter des modifications dans le but d'améliorer les produits ;
- La réalisation des prototypes ;
- Etablir des études de fiabilités afin de suivre l'évolution des nouvelles technologies.

b. Service méthode

Le service méthode a pour mission d'effectuer les tâches suivantes :

- Etablir des détails pour les pièces complexes ;
- Etablir des fiches de fabrications qui comportent les différentes opérations pour réaliser une pièce ;
- Etudier le temps alloué pour la fabrication de chaque pièce ;
- Etudes et réalisations des gabarits pour les grandes pièces.

c. Service contrôle Ce service a pour mission d'effectuer les tâches suivantes :

- Contrôle technique des pièces fabriquées ;
- La traçabilité en suivant tous les produits fabriqués ;
- L'analyse de la matière première à chaque réception ;
- L'accord de conformité des produits fabriqués.

1.1.6 Les grues fabriquées par L'UGB

- GRUE GMR 20-10
- GRUE GMR 14-04
- GRUE GMR 18-05

Une grue est un appareil de levage et de manutention réservé aux lourdes charges. Cet engin est construit de manière différente selon son utilisation à terre grue de chantier, camion-grue, à bord d'un navire...etc.

La grue de chantier se caractérise essentiellement par une longue flèche en porte-à-faux, à laquelle la charge est suspendue, généralement au moyen d'un câble et d'une partie au bout des deux ou quatre câbles ; cette flèche possède toujours au moins un ou plusieurs degrés de liberté par rapport au sol, afin de permettre le déplacement de la charge dans un plan horizontal.

La figure suivante montre la grue en vue générale.



FIGURE 1.2 – La grue.

Étude bibliographique

2.1 Introduction

Le soudage à l'arc électrique est un moyen d'assemblage permanent, il est utilisé pour des réalisations rapides, et lorsqu'il permet un gain de temps par rapport à un usinage, on distingue plusieurs types de soudages :

- Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW) ;
- Soudage électrique à l'arc sous flux solide ;
- Le procédé de soudage sous protection gazeuse TIG ;
- Le procédé de soudage sous protection gazeuse MIG/MAG.

2.2 Définition de soudage

Le soudage est le procédé qui permet de reconstituer la continuité métallique entre les surfaces des éléments à assembler. Pour activer les surfaces, la fusion est une méthode très efficace qui permet également le nettoyage des surfaces afin d'assurer l'installation de la liaison métallique. On obtient, après solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents [1].

Le soudage est un procédé qui se caractérise par une grande complexité de phénomènes physico-chimiques [2]. Dans l'opération de soudage, la liaison atomique réalisée au niveau

du joint nécessite l'intervention d'une source d'énergie extérieure qui crée élévation de la température dans les pièces de soudés. La continuité entre les pièces est schématisée sur la figure 2.1[1] :

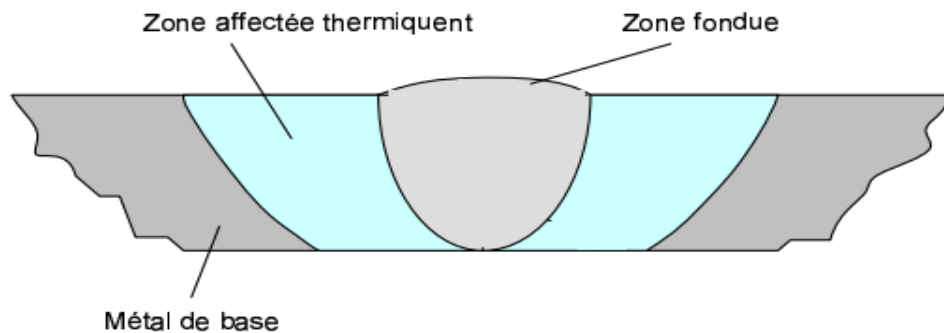


FIGURE 2.1 – Le soudage.

◇ Zone de fusion (ZF)

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

◇ Zone affectée thermiquement (ZAT)

Est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base.

2.3 Classification des procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes de la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres les continuités métalliques sont obtenues sans fusion par effets purement mécaniques. On peut aisément classer ces procédés en fonction des énergies mises en œuvre comme présenté sur la figure 2.2 [3].

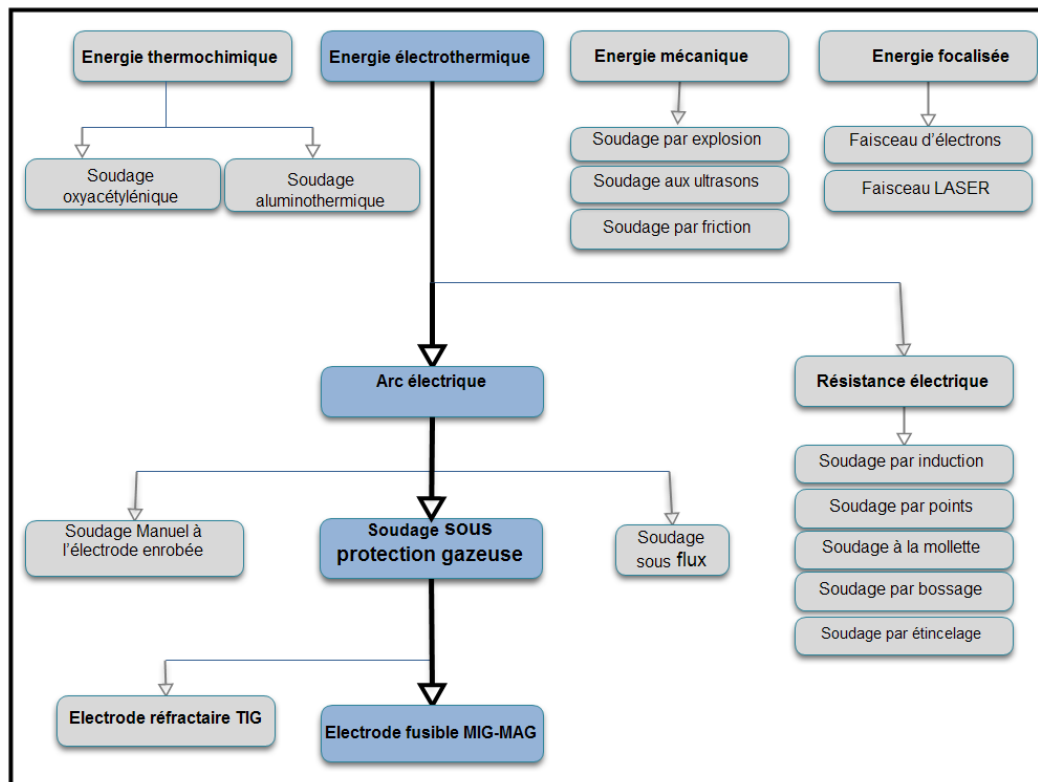


FIGURE 2.2 – classification des procédés de soudages.

2.4 Soudage à l'arc électrique

2.4.1 Définition de l'arc électrique

Un arc est une décharge électrique établi et entretenu dans un gaz entre deux électrodes reliées aux pôles d'un générateur en dégageant lumière et chaleur ; il forme une colonne ionisée conductrice qui répond à des lois physiques, essentiellement [4] :

- ◇ électriques, reliant tension et courant, auxquelles se rattachent les caractéristiques et le fonctionnement des générateurs ;
- ◇ thermiques aux quelles se rattachent les phénomènes de fusion. On peut représenter l'arc électrique dans la figure 2.3 [3], où on distingue classiquement trois zones dans l'arc électrique qui sont la chute anodique, la chute cathodique et la colonne d'arc.

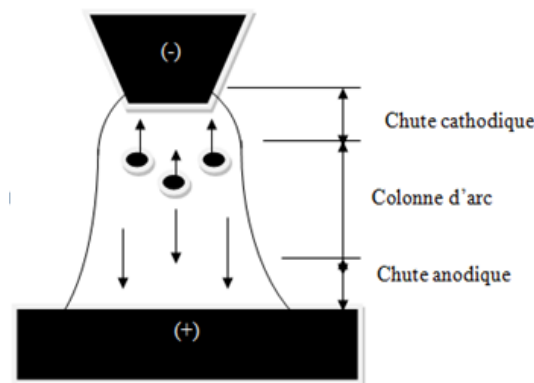


FIGURE 2.3 – Arc électrique.

- ◇ **La cathode** : C'est la zone d'émission des électrons qui peut se faire de deux modes distincts appelés émission thermoïonique et non thermoïonique. Le rôle de la cathode est de fournir les électrons à l'arc[3].
- ◇ **l'anode** : C'est le collecteur d'électrons.
- ◇ **la colonne d'arc** : la colonne d'arc : C'est la zone de passage des électrons entre les électrodes.

2.4.2 Soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

2.4.2.1 Définition du procédé

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SMAW) est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'âme métallique de l'électrode et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et l'âme métallique de l'électrode pour constituer le bain de fusion et après refroidissement le cordon de soudure recouvert d'un laitier protecteur. Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 30 à 400 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre de l'électrode, la nature de l'enrobage, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La tension à vide du générateur (U_0) doit être supérieure à la tension d'amorçage (surtout en courant alternatif). Sa valeur doit être comprise entre 40 et 80 volts[5].

2.4.2.2 Principe du procédé

L'électrode enrobée est placée et serrée sur la pince porte-électrode relié sur l'une des bornes électriques de sortie du poste de soudage. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. L'amorçage de l'arc est réalisé en frottant l'extrémité généralement graphitée de l'électrode sur la pièce et en écartant de quelques millimètres le bout de l'électrode lorsque l'arc jaillit. Ensuite il faut entretenir cet arc électrique afin d'éviter la rupture d'arc en veillant à maintenir une distance constante la plus faible possible entre le bout de l'électrode et la pièce à souder.

2.4.3 Le procédé de soudage MIG/MAG

2.4.3.1 Définition du procédé

Le soudage à l'arc sous protection de gaz actif avec fil électrode fusible est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre le fil d'apport (\varnothing 0,6 à 2,4 mm) à dévidage continu et à vitesse constante (de 2 à 20 mètres/minutes environ) et la pièce à souder. L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil métallique pour constituer le bain de fusion donnant lieu au cordon de soudure après refroidissement. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible de gaz de protection actif (CO_2 ou Argon + CO_2 ou Argon + O_2). Un générateur électrique fournit le courant exclusivement continu avec une intensité variant de 40 à 700 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil électrode, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler.

La bobine du fil électrode est placée dans un dévidoir motorisé automatique et le fil est déroulé du dévidoir à la sortie de la buse de la torche, dans la gaine guide-fil de la torche de soudage jusqu'au tube contact. La torche de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie positive du générateur de soudage à courant continu. La masse est reliée au générateur et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre. L'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe du fil électrode touche la pièce à souder[7].

2.4.4 Principe du procédé de soudure MIG/MAG

Lorsque le soudeur actionne la gâchette, celui-ci actionne le dévidage du fil, la sortie du gaz et en même temps, il ferme le circuit électrique qui permet le passage du courant. Si le fil est suffisamment proche d'une pièce en contact avec la masse, il se crée un arc électrique d'une énergie suffisante pour fondre la matière. Le métal d'apport peut ainsi se mélanger à la matière et ainsi grossir la partie fondue. Le tout s'exécute sous protection gazeuse. La figure 2.4 présente le principe du procédé de soudure sous protection gazeuse MAG :

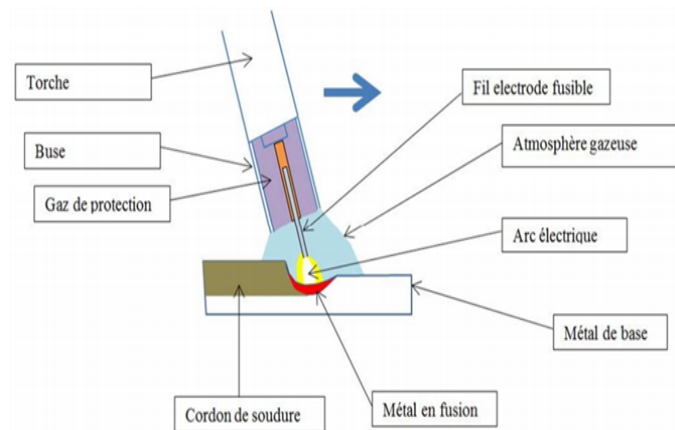


FIGURE 2.4 – Schéma de principe du soudage MIG/MAG.

2.4.5 Installation d'une unité de soudage MIG/MAG

Une installation de soudage est constituée de trois principaux éléments comme illustré en figure :

- ◇ le générateur qui fournit le courant à l'origine de l'arc électrique ;
- ◇ le dévidoir de fil qui permet l'apport de fil de la bobine jusqu'à la torche de soudage ainsi que l'amenée de courant ;
- ◇ la torche de soudage ainsi que la gaine qui permet le passage du courant, l'apport de fil et l'amenée de gaz.

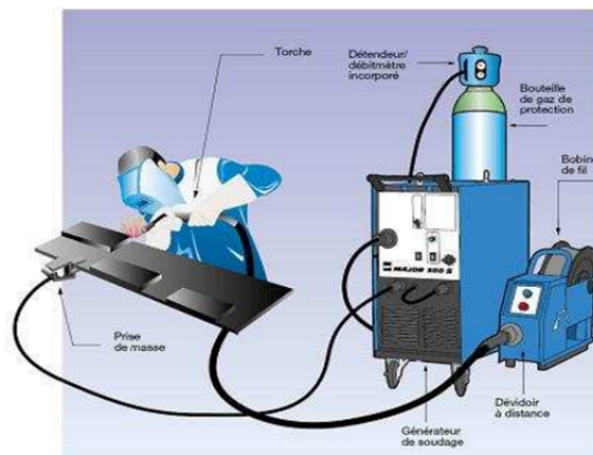


FIGURE 2.5 – Schéma type d'une installation manuelle de soudage MAG.

2.4.6 Domaines d'application

On peut utiliser les procédés MIG/MAG dans l'installation de charpentes métalliques et dans tous les alliages commerciaux. Le premier procédé est utilisé pour le soudage des aciers doux et le deuxième procédé permet de réaliser des soudures en toutes positions, il est utilisé pour l'assemblage de métaux semblables, ferreux et non ferreux.

2.4.7 Conséquences du procédé de soudage

a. Conséquences thermiques du soudage

Les opérations de soudage engendrent des cycles thermiques qui conduisent à des changements de phase à l'état liquide et solide dans la zone soudée. Les cycles thermiques sont caractérisés par un chauffage suivi d'un refroidissement. L'amplitude et la durée de ce trajet thermique varie en fonction de la distance par rapport à la source de la chaleur qui peut être mobile (ex. soudage à l'arc) ou non (ex. soudage par résistance).

b. Conséquences métallurgiques du soudage

Les cycles thermiques du soudage conduisent à des modifications métallurgiques du matériau de base dans la zone où la température maximale obtenue au chauffage est suffisamment importante. Ces modifications métallurgiques dépendent de la composition chimique locale du matériau de base et des conditions de soudage telles

que l'énergie de soudage, la vitesse de déplacement de la source de chaleur et les conditions de refroidissement.

c. Conséquences mécaniques du soudage

L'histoire thermique et les modifications de microstructures provoquées par le soudage s'accompagnent naturellement d'évolutions importantes des propriétés mécaniques par rapport au métal de base. D'autre part, la localisation de la source de chaleur ou autrement dit, les dilatations hétérogènes et les variations des propriétés mécaniques du matériau en fonction de la température et de la microstructure ainsi que les conditions de bridage des pièces engendrent les contraintes et les déformations résiduelles dans les structures après soudage.

2.4.8 Avantages et inconvénients du procédé

a. Avantages

- ◇ Bobine de fil (soudage en continu) ;
- ◇ Productivité importante (comparé au TIG) ;
- ◇ Peu de fumée (par opposition au soudage à l'électrode enrobée) ;
- ◇ Procédé semi-automatique ou automatique ;
- ◇ Soudage de l'acier et de l'aluminium en toutes positions.

b. Inconvénients

- ◇ outillage de gaz de soudage ;
- ◇ Soudage en intérieur (éviter les courants d'air) ;
- ◇ Pénétration à maîtriser (sinon collage) ;
- ◇ Le soudage ne peut être effectué à une très grande distance de la source de courant à cause de l'alimentation en fil électrode ;
- ◇ l'intensité est liée au débit du fil électrode, ce qui peut conduire à certaines difficultés dans le choix des paramètres de soudage[8].

2.5 Le comportement mécanique des métaux

Le comportement mécanique d'un matériau reflète sa réponse (déformation) à une ou à une force appliquée. Les principales propriétés mécaniques sont la résistance, la dureté, la résilience ; la ductilité et la rigidité. On détermine les propriétés mécaniques des matériaux par des expériences minutieuses en laboratoire aussi proches que possible des conditions d'utilisation. Les facteurs à considérer comprennent la nature de la charge appliquée, la durée de l'application et les conditions du milieu. La charge peut exercer une traction, une compression ou une cession, et sa valeur peut être constante ou varier continûment. L'application peut ne durer qu'une fraction de seconde ou durer plusieurs années.

2.5.1 la dureté

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété physique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. Les essais habituels de dureté sont simples, rapides, et généralement non destructifs, ils offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique. La dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la conservation du poli, la difficulté d'usinage, etc. Elle permet d'apprécier la résistance des corps fragiles (carbures, composés intermétalliques, etc.)[9].

2.5.2 Essais de dureté par pénétration

C'est à cette catégorie d'essais qu'appartiennent la plupart des appareils employés industriellement. Un pénétrateur suffisamment dur pour ne pas être déformé par le matériau à essayer, et de forme variable, est enfoncé dans le métal par l'action d'une force constante appliquée dans des conditions bien définies ; on mesure soit les dimensions transversales, soit la profondeur de l'empreinte [10]. Et parmi les essais les plus utilisés on distingue trois types d'essais :

1. **Essai de dureté Brinell** : Dans l'essai proposé par Brinell, le pénétrateur est une bille polie en acier trempé ou en carbure de tungstène. Son diamètre D vaut normalement 10 mm, mais aussi 5 mm, 2,5 mm et 1 mm. Elle est appliquée sur le métal avec une charge F (normalement 3000 kgf). Après suppression de la charge, elle laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre d , d'autant plus grand que la bille a pénétré plus profondément dans le métal, donc que celui-ci est moins dur. La dureté s'exprime par le rapport de la charge F à la surface S de la calotte sphérique imprimée dans le métal :

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2 * 0.102F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

L'exécution de l'essai Brinell demande une surface plane, usinée ou meulée. Son état de surface doit permettre une lecture aisée du diamètre de l'empreinte : plus ses dimensions seront faibles, plus l'état de surface devra être soigné [9].

2. **Déroulement de l'essai de brinell** : On applique la charge normalement à la surface et sans choc, en la faisant croître progressivement de manière à atteindre en 15 s la charge fixée. On la maintient pendant 10 à 30s, on décharge et on mesure le diamètre de l'empreinte. Des précautions sont également à prendre pour éviter une déformation de la pièce :

- ◇ La distance du centre de l'empreinte au bord de la pièce ne doit pas être inférieure à 2.5 d.
- ◇ La distance entre les centres de deux empreintes voisines doit dépasser quatre fois leur diamètre.
- ◇ L'épaisseur de la pièce doit être d'au moins huit fois la profondeur de l'empreinte pour éviter aucune déformation visible sur la face opposée[11].

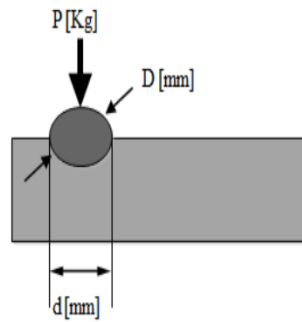


FIGURE 2.6 – Principe de dureté brinell.

D : diamètre de la bille (mm).

d : diamètre de l’empreinte (mm).

2.5.3 Essais de dureté Rockwell

L’essai consiste à mesurer la profondeur de l’empreinte d’indenteur de forme géométrique conique Figure 2.7, ou bien sphérique figure 2.8 appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précisées. Le pénétrateur conique est de diamant de section circulaire, d’angle au sommet 120° , à pointe arrondie sphérique (rayon 0,2 mm) [12].

Le pénétrateur sphérique est une bille d’acier trempé polie de diamètre 1,588 mm ou 3.175 mm (figure II.7). La valeur de dureté est donnée par la formule suivante :

▷ Echelle B, E et F : $HRB = 130 - r$.

▷ Echelle C : $HRC = 100 - r$.

Des précautions opératoires sont également à prendre, tel que ; le fini superficiel de la pièce doit être satisfaisant et la pièce doit bien reposer sur son support pour éviter le déplacement du métal dans la région où se forme l’empreinte . Les chocs et les vibrations doivent être évités. L’essai se déroule en trois phases :

1. Application sur le pénétrateur d’une charge initiale $F_0 = 98 \text{ N}$ (soit 10 kgf). Le pénétrateur s’enfonce d’une profondeur initiale I . Cette profondeur étant l’origine qui sera utilisée pour mesure la dureté Rockwell ;

2. Application d'une force supplémentaire F_1 . Le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur de p ;
3. Relâchement de la force F_1 et lecture de l'indicateur d'enfoncement (Figure 2.8) [13].

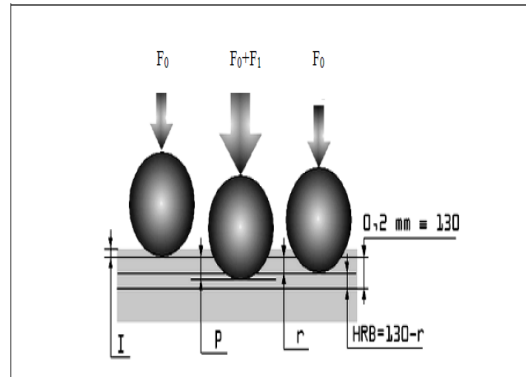


FIGURE 2.7 – Principe de la dureté Rockwell (échelle B, bille en acier).

- **I** : pénétration initiale avant charge additionnelle ;
- **P** : pénétration avec charge additionnelle ;
- **R** : pénétration rémanente sans la charge additionnelle.

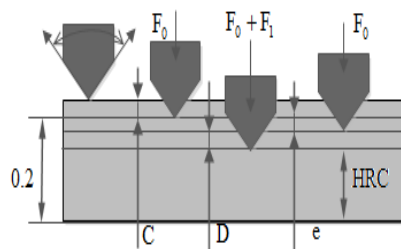


FIGURE 2.8 – Méthode de Rockwell (cône).

2.5.4 Essai de dureté Vickers

2.5.4.1 Essai de la macrodureté vickers

Il consiste à imprimer dans le métal testé un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidal à base carrée, d'angle au sommet entre deux faces opposées de 136° ,

sous l'action d'une force connue (Figure 2.9). On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur [14].

L'avantage d'un pénétrateur pyramidal (comme d'un pénétrateur conique) est quand on fait varier la charge, on obtient des empreintes géométriquement semblables entre elles, donc des valeurs identiques pour la dureté. Généralement la gamme des forces utilisables (5 à 100 kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. En choisissant la force donnant une empreinte telle que la diagonale d doit être inférieure aux deux tiers de l'épaisseur [15].

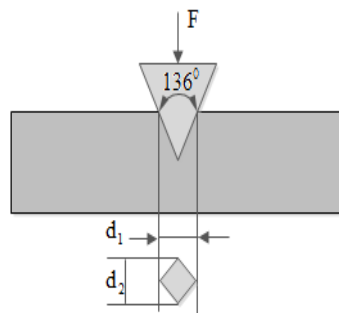


FIGURE 2.9 – Principe de dureté Vickers.

Dans l'essai Vickers, une pyramide à base carrée en diamant est utilisée comme pénétrateur. La dureté Vickers HV est définie par [16] :

$$HV = \frac{\text{la charge appliquée}}{\text{la surface de l'empreinte}}$$

$$HV = \frac{2F \sin 68}{gd^2} = 1.5844 \frac{F}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2}$$

avec :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

F : La charge appliquée au pénétrateur en (N) ;

d : Le diagonale moyen de l’empreinte en (mm). Des précautions opératoires nécessaires de l’essai Vickers tel que : Les empreintes étant petites, les irrégularités de la surface prennent une importance plus grande encore que dans les essais précédents, particulièrement pour les fortes duretés et les faibles charges aussi parfait. La distance entre le centre d’une empreinte et le bord de la pièce ou les côtes d’une autre empreinte ne doit pas être inférieure à 2,5 fois la diagonale. L’épaisseur de la pièce doit être supérieure à 1,5 fois la diagonale de l’empreinte. La pièce doit reposer sur le support de façon régulière et uniforme. L’état du diamant doit être fréquemment vérifié [17].

2.5.4.2 Essai de la microdureté vickers

Cette méthode permette de se libérer de la dispersion et de l’imprécision des déterminations des duretés des matériaux rencontrées avec les mesures classiques de dureté. Elle a le même principe de la méthode statique, mais avec une charge appliquée à l’indenteur inférieur à (1kg), et la taille de l’empreinte laissée par la pointe sur la surface peut varier de quelques centaines de micromètres. Elle permet de résoudre de nombreux problèmes tels que : la mesure de la dureté des couches minces, évaluation de l’écaillage local, exploration d’alliages à phases multiples, etc. [18][19]. Des phénomènes influençant les mesures des microduretés nécessitent certaines précautions opératoires tels que :

- L’empreinte doit être suffisamment nette pour permettre une lecture précise, ce qui exige un bon état de surface de la pièce testée.
- La légère croissance de dureté jusqu’à la charge de 1kg, montre la nécessité de spécifier la charge sous laquelle la mesure a été faite pour obtenir des résultats comparables.
- Prendre en considération la charge maximale à appliquer de manière que la dureté du métal support n’intervienne pas dans les mesures [19].

2.6 Essai de résilience

L’essai de résilience a pour objet de déterminer la résistance des matériaux à la rupture sous l’effet d’un choc par l’intermédiaire de l’énergie de rupture.

2.6.1 Définition du principe de l'essai

L'essai de résilience (essai au choc) consiste à rompre, par un seul choc, une éprouvette préalablement entaillée en son milieu et à mesurer l'énergie W (en joules) absorbée par la rupture. La résilience est définie par la lettre K *Joules/cm²*.

L'essai se réalise sur une machine appelée mouton pendule rotatif. On mesure la résistance au choc du matériau la figure 2.10 montre le principe de l'essai du mouton de Charpy.

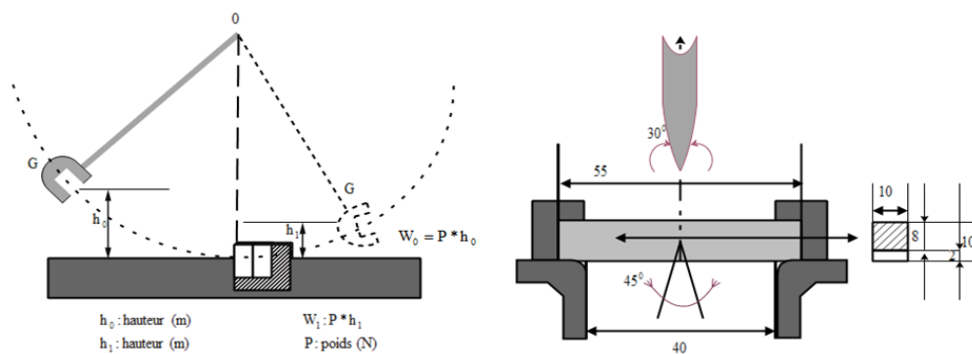


FIGURE 2.10 – Le mouton de Charpy.

2.6.2 Les éprouvettes pour la résilience

a. Eprouvettes CHARPY U

Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de coté et dont la longueur est 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole **Kcu**.

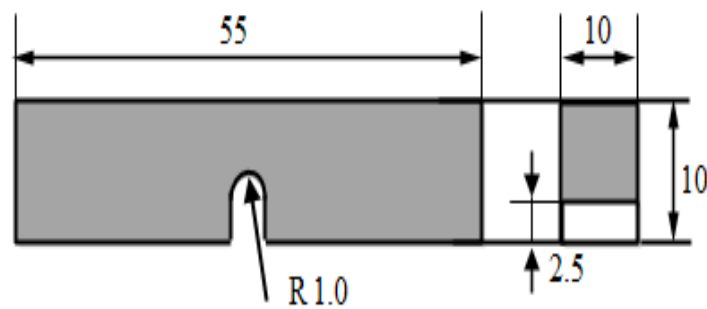


FIGURE 2.11 – Éprouvette Charpy en U.

b. Éprouvettes CHARPY V

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole **Kcv**.

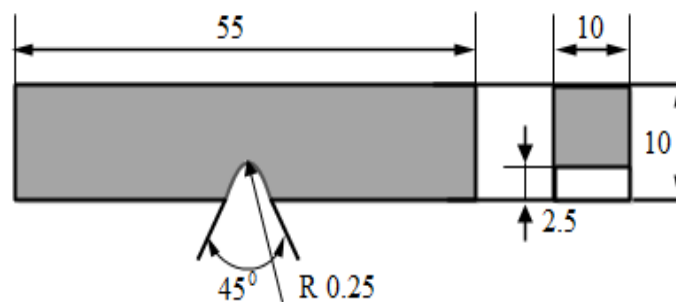


FIGURE 2.12 – Éprouvette Charpy en V.

2.6.3 Conclusion

Il existe de nombreuses méthodes de soudage par arc électrique. Le procédé MIG/MAG devient le plus courant, ce procédé permet de travailler longtemps sans devoir changer l'électrode. En effet, l'électrode qui entre en fusion grâce à la chaleur produite par l'arc électrique, est un câble qui se déroule en permanence d'une bobine lors de l'utilisation, mais celui avec électrode enrobée est encore utilisé car il permet de travailler dans des positions dans lesquelles le MAG ne serait pas utilisable.

Matériaux et techniques expérimentales

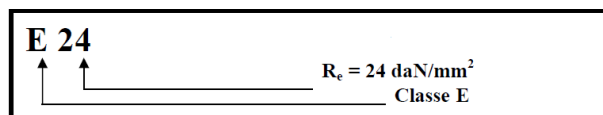
3.1 Introduction

Dans ce chapitre on définit les matériaux d'études ainsi que les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser l'effet du joint soudé sur la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par soudage à l'arc électrique avec le procédé MAG utilisé par l'Unité Grues de Bejaïa au sein de l'atelier de soudage. Le matériau utilisé pour le soudage de châssis des grues est l'acier de construction E24 (S235).

3.2 Présentation des matériaux

3.2.1 Présentation de l'acier E24

C'est un acier de construction mécanique d'usage général avec une teneur en carbone ne dépassant pas 0,2%, c'est donc un acier hypoeutectoïde classé dans la catégorie des aciers doux. Selon la nouvelle désignation (EURONORME), l'acier E24 est désigné par S235 qui indique que c'est un acier de construction mécanique dont la valeur maximale de la limite d'élasticité ne dépasse pas 235 **MPa** ou 24 kg/mm² soit en moyenne 24 daN/mm² d'où la désignation E24 selon l'ancienne norme : 24 indiquant sa limite d'élasticité minimale en daN/mm². Cet acier a comme particularité une excellente conformation et soudabilité, mais une mauvaise résistance à la corrosion.



Les différents éléments chimiques et les caractéristiques mécaniques de ce matériau sont représentées sur le tableau 3.1 fournit par le fabricant de cet acier ("Laminés Marchands Européens") à L'UGB :

TABLE 3.1 – Certificat d'analyse chimique et mécanique d'acier E24.

L'acier E24		
Caractéristique Mécanique	Re [Mpa]	305
	Rm [Mpa]	429
	A5 %	33
Eléments d'alliage [%]	C	0.08
	Si	0.16
	Mn	0.61
	P	0.026
	S	0.035
	Cu	0.43
	Cr	0.12
	Ni	0.16
	V	0.002
	Mo	0.07
	N	0.0069
	Ti	0.0001
	Al	0.002

3.2.2 Métal d'apport (fil plein)

3.2.2.1 Présentation du métal d'apport

Le métal d'apport utilisé par L'UGB pour l'assemblage par soudage bout à bout par le procédé semi-automatique MAG sous protection de gaz actif (CO₂) de l'acier E24 dans notre étude est un fil plein de dénomination commerciale SG2. Sa composition selon la fiche technique du fournisseur est présentée dans le tableau suivant :

TABLE 3.2 – composition chimique du métal d'apport.

C%	Si%	Mn%
0.08-0.12%	0.40-0.60%	1.00-1.30%

C'est un fil de soudage de diamètre 1,20 mm en acier faiblement allié destiné au soudage sous protection gazeuse. Il est commercialisé sous forme de bobine avec un poids 15Kg, comme illustré dans la figure 3.1.

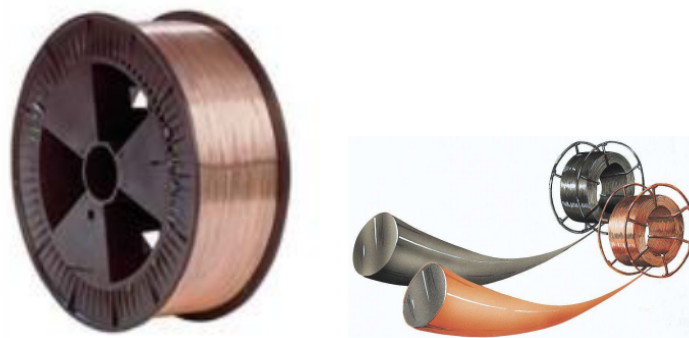


FIGURE 3.1 – Bobine du fil de soudage type SG2 de poids 15Kg.

3.2.3 Le gaz de protection CO₂ (gaz pur) utilisé en soudage MAG

Le gaz protège la zone de soudage ainsi que le fil de l'air environnant, en soudage MAG, cela peut influencer les caractéristiques du cordon de soudure.

3.2.4 Débit de gaz

Le bon choix du gaz de protection et l'ajustement correct du débit de gaz sont particulièrement importants, car un débit de gaz trop faible ne permettra pas de chasser l'air environnant correctement (schéma 1) par contre, un débit de gaz trop fort génèrera des turbulences, dans ce cas, l'air peut s'infiltrer dans l'arc (schéma 2). Le débit est contrôlé au moyen d'un régulateur fixé sur la bouteille de gaz où un petit débitlitre est installé sur la sortie de la buse à gaz (au bout de la torche) peut être utilisé pour vérifier que le débit de gaz passant dans la torche de soudage est suffisant.

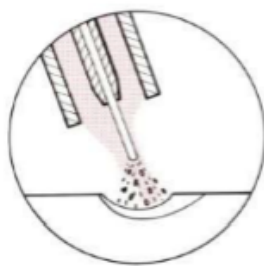


Schéma1 Débit de gaz trop faible.

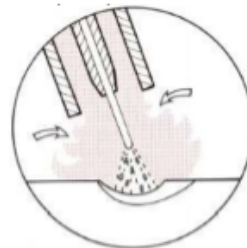


Schéma2 Débit de gaz trop élevé.

FIGURE 3.2 – Débit de gaz.

3.2.5 Les avantages du débit de gaz

- ◇ Bon marché ;
- ◇ Faible sensibilité à l'oxydation, sauf en surface ;
- ◇ Bonne soudabilité sur les tôles oxydées ;
- ◇ Peu de projections en régime court-circuit ;

- ◇ Pénétration importante ;
- ◇ Réglages plus délicats qu'avec d'autres gaz.

3.3 Réalisation de maquette de liaison Métallique E24

3.3.1 Préparation des plaquettes

L'acier E24 est importé par L'UGB sous forme de tôles à fortes épaisseur, 10 mm pour le besoin de conception de châssis des grues. Nous avons prélevé quatre plaquettes de l'acier avec les dimensions (80x80x10mm³). Pour l'exécution de l'assemblage des plaquettes nous avons utilisé le procédé MAG, les deux plaquettes de base (soudures bout à bout) sont réalisés par fraisage sur un coté de chaque plaquettes avec un chanfrein à 30° d'inclinaison pour obtenir la forme " V " présenté dans la figure 3.3.

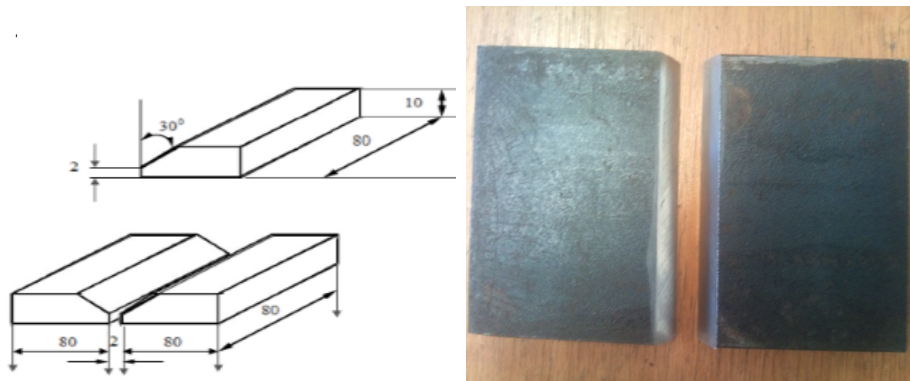


FIGURE 3.3 – Plaquettes avant l'assemblage.

3.3.2 Nettoyage des plaques a soudé

Avant le soudage, les plaques seront laminées et polies de leurs impuretés (graisse, huile...).

3.3.3 Bridage

Avant soudage, on bride les deux pièces dans le but d'éviter leurs déformations pendant l'exécution de soudage présenté dans la figure 3.4 :



FIGURE 3.4 – Bridage des plaques.

3.3.4 Soudage des plaquettes

Le soudage utilisé dans ce travail est du type soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse active(CO_2) avec fil électrode fusible de diamètre 1.2 mm (métal d'apport). Compte tenu de l'épaisseur des plaquettes (10 mm), la réalisation du joint de soudure nécessite trois passes avec l'utilisation des paramètres consignés dans le tableau 3.3 et qui sont ceux de la fiche techniques de l'entreprise.

TABLE 3.3 – Paramètres de soudage pour la réalisation de la liaison métallique.

<i>La passe</i>	<i>Courant de soudage U (Volt)</i>	<i>Vitesse de défilement du fil (métal d'apport)</i>
<i>1^{er} passe (passe de Pénétration)</i>	<i>Tension U = 24Volts</i>	<i>V = 4 m/mn</i>
<i>2^{ème} passe</i>	<i>Tension U = 24 Volts</i>	<i>V = 4 m/mn</i>
<i>3^{ème} passe</i>	<i>Tension U = 24 Volts</i>	<i>V = 4 m/mn</i>

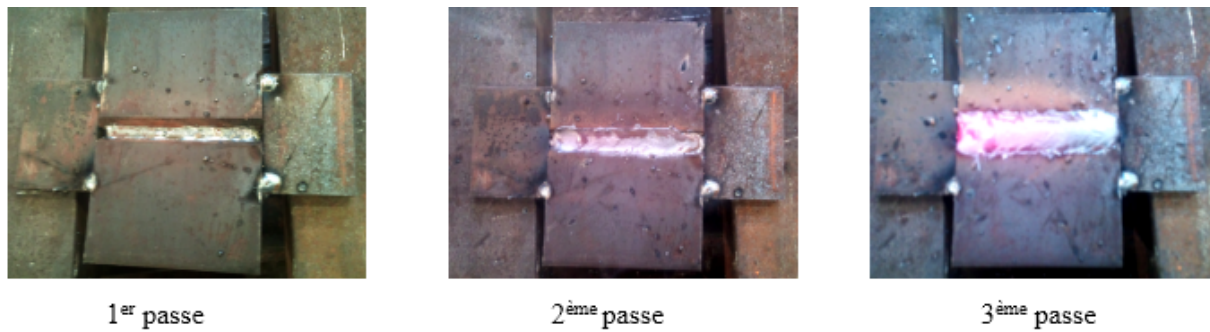


FIGURE 3.5 – Différentes passes.

Après le réglage du poste de soudage sur les paramètres calculés et l'exécution de l'opération de soudage on obtient deux tôles assemblées illustre la maquette de la liaison métallique de l'acier E24 assemblée par le métal d'apport, la présence des deux brides sur la maquette ont été soudées avant la réalisation de la liaison métallique pour maintenir d'une part la distance de 2 mm entre les deux bouts des deux métaux de base et éviter le flambage sous l'effet thermique durant les trois passes de soudage.

3.4 Prélèvement des échantillons

Après soudage nous allons travailler sur une fraiseuse universelle pour effectuer un surfassage pour avoir une épaisseur de 10 mm afin d'avoir une forme parallélisme des faces.



FIGURE 3.6 – Forme de la maquette après fraisage.

La maquette et les deux plaquettes sont ensuite découpées en éprouvettes 16 mm de largeur à l'aide d'une scie mécanique sous lubrification montré dans les figures suivantes :



FIGURE 3.7 – Scie mécanique.

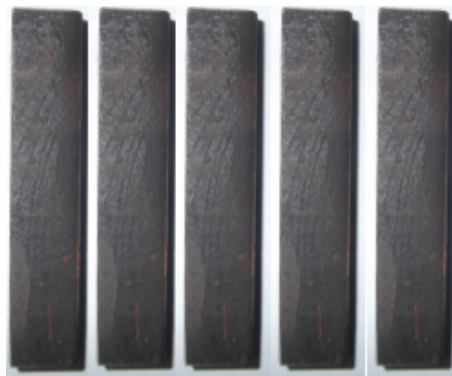


FIGURE 3.8 – Echantillons découpés.

3.4.1 Préparation des éprouvettes d'essais mécaniques

Pour avoir des éprouvette normalisées pour l'essai de résilience et de dureté, les 15 échantillons découpés seront coupés et fraisés à nouveaux pour avoir une longueur de 55mm de manière à ce que le joint de soudure soit centré, en suite, ils vont subir une deuxième opération de surfassage pour obtenir la dimension 55x10x10 mm³.

3.4.2 Le fraisage de la maquette et les plaquettes

Les paramètres de fraisage utilisés sont présentés dans le tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Paramétrés de fraisage.

Machine	Outils de coupe	Vitesse de coupe (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)	Passe (mm)
fraiseuse universelle	fraise 2T Ø 60 mm	Ebauche 350	Ebauche 320	Ebauche 0,4
		Finition 500	Finition 500	Finition 0,2

3.4.3 Réalisation de l'entaille

Après avoir la forme finale des échantillons de dimensions normalisés de l'essai de résilience consiste a réalisé une entaille de forme V d'angle 45° et une profondeur de 2 mm au milieu du joint soudé. L'entaille est réalisée sur une fraiseuse verticale a quelle on' a tourné le porte outil de 45° .



FIGURE 3.9 – Réalisation de l'entaille avec un angle de 45° .

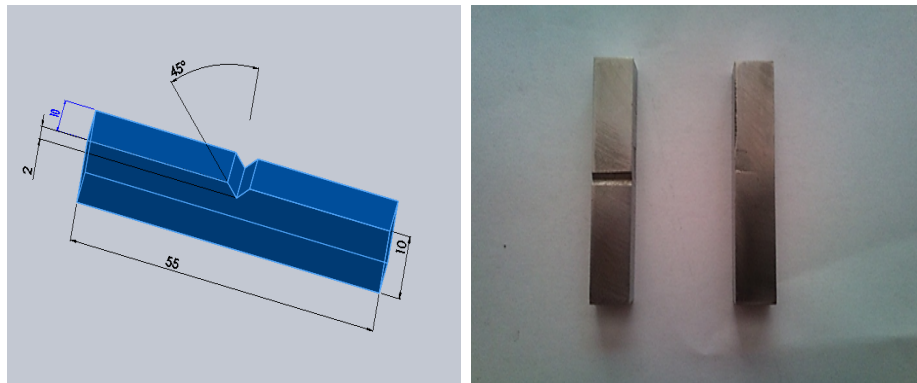


FIGURE 3.10 – Type d'éprouvette pour les essais respectifs de résilience et dureté.

3.5 Présentation des essais mécanique réalisés

3.5.1 Essai de résilience (essai de flexion par choc)

La machine d'essai utilisée à l'UGB est de capacité 300 J, l'énergie de rupture en joule de l'éprouvette testée est lue directement sur le cadran de la machine, c'est un mouton pendule équipé d'un marteau oscillant dans un plan vertical autour d'un axe O. La masse comporte un couteau destiné à rompre l'éprouvette. L'appareil est équipé d'un système qui permet de mesurer l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette. Dans ce système, la masse est abandonnée à elle-même à partir d'une certaine hauteur, l'éprouvette se trouve au point bas. La masse entraîne une aiguille qui se déplace devant un cercle gradué où la mesure de l'angle de remontée avec et sans rupture de barreau, permet le calcul du travail absorbé par cette rupture ; la figure 3.11 représente le Mouton pendule d'essai de résilience (flexion par choc).



FIGURE 3.11 – Mouton pendule d'essai de résilience.

Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondant à une énergie de départ

$$W_0 = m.g.h = 300\text{Joule}.$$

- ▷ On libère le pendule, dans sa chute, le couteau rompt l'éprouvette.
- ▷ On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée

$$W_1 = m.g.h_1.$$

- ▷ On calcule la différence

$$W_0 - W_1 = m.g.(h - h_1) = W.$$

Avec :

m : masse du pendule ;

g : pesanteur terrestre ;

h : hauteur initiale du pendule ;

h₁ : hauteur après rupture de l'éprouvette.

La résilience s'exprime en joule ou en joule par centimètre carré (cm²) si on rapporte à

la section sous entaille de l'éprouvette, ce qui permet de définir la résilience (ténacité) du matériau par :

$$KCV = \frac{\text{nergie. absorbe. par. la. rupture}}{\text{Surface. sous. entaille. en. cm}^2} = \frac{W_0 - W_1}{S} (\text{Joule} / \text{cm}^2)$$

Dans notre cas l'énergie de rupture de l'éprouvette testée est lue directement sur cardon de l'appareil gradué en Joule.

3.6 Essai de la dureté

3.6.1 l'essai de macrodureté Vickers

Les essais de duretés ont été réalisés sur une machine de dureté universelle Diastor de L'UGB présentée dans la figure III.13, nous avons choisi l'essai Vickers, qui est effectué avec un pénétrateur en diamant de forme pyramide à base carrée, l'angle entre deux faces opposées de cette pyramide est de 136° . La valeur de la dureté Vickers HV30 est le rapport de la charge F qui est égale à 30 Kgf à la surface S de l'empreinte.



FIGURE 3.12 – Macroduromètre.

3.7 Description terminologique

La machine d'essai de macrodureté Vickers comporte les étapes suivantes :

- ⊙ Opérations avant l'essai qui permettent d'avoir le sommet de l'empreinte correspondant avec l'axe de la tête optique.
- ⊙ Exécution de l'essai qui consiste à appliquer la force sur la pièce d'essai par le pénétrateur.
- ⊙ Mesure de l'empreinte du pénétrateur, après enlèvement de la force d'essai.

a). Opérations avant l'essai

Avant d'allumer la machine, nous avons monté le pénétrateur Vickers pour assurer le réglage de la charge d'essai à (30 kgf), puis nous avons alimenté la machine pour allumer la lampe, L'échantillon étant en position, nous avons remonté la pièce jusqu'à ce que la surface apparaisse clairement dans l'écran.

b). Exécution de l'essai

On ramène le levier supérieur pour que le pénétrateur vient se mettre en position jusqu'à ce que la lampe s'éteigne, on applique la charge en soulevant légèrement le levier inférieur où un frein hydraulique limite la vitesse d'application de la charge et on la maintient pendant environ 15 secondes en suite, on ramène le levier inférieur en position horizontale, puis on le remet en position supérieure.

c). Mesure de l'empreinte

A la fin, on mesure les deux diagonales de l'empreinte avec la règle adaptée au grossissement de l'objectif, puis on calcule la moyenne des deux diagonales. Cette valeur correspond à une dureté qu'on retrouve à l'aide des tables de dureté standardisées et prédéfinies, ces valeurs de duretés recensées dans ces tableaux en fonction de la charge utilisée sont issues de calculs en utilisant la relation suivante :

$$HV = \frac{0.189 * F}{d^2}$$

Cette opération est répétée plusieurs fois pour examiner l'homogénéité ou pas du joint soudé et la zone affectée thermiquement au niveau du métal de base de l'acier E24 et aussi à l'état brut ,pour avoir des résultats satisfaisants nous avons pris quatre

éprouvettes de la maquette soudée, pour chaque éprouvette nous avons effectué cinq essais horizontalement. Pour la plaquette de l'acier brut nous avons pris aussi quatre éprouvettes et nous avons effectué trois essais horizontalement, ces essais sont indiqués sur la figure suivante :

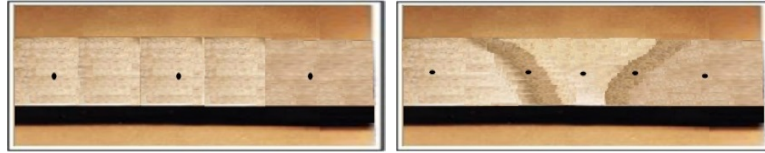


FIGURE 3.13 – Différentes positions

3.7.1 L'essai de microdureté de Vickers

La machine de microdureté utilisée est configurée pour réaliser un essai par pénétration de type Vickers, au sien de l'université de Bastos à Tizi-Ouzou.

3.7.2 Mode opératoire microdureté Vickers

Un pénétrateur de forme pyramidal en diamant avec une base carrée d'angle au sommet 136° , est appliqué progressivement sous l'action d'une force F de 30 kgf sur une surface maintenu pendant un temps précis de 20 secondes.

A l'aide d'un système optique on mesure la longueur (D) moyenne des deux diagonales de l'empreinte, le résultat de la dureté s'affiche automatiquement sur l'écran digital après mesure de D et l'exécution de l'opération sur le bouton read switch ; la figure suivante montre la machine de la microdureté :



FIGURE 3.14 – Microduromètre.

Pour avoir des résultats satisfaisants, nous avons pris trois lignes de positions horizontales sur l'éprouvette soudée de manière à toucher les trois zones du métal(métal de base, zone affectée thermiquement et le métal fondu), et une ligne de positions sur l'éprouvette en acier brut comme indiqué dans la figure suivante :



FIGURE 3.15 – Positions des empreintes de la microdureté Vickers.

3.8 Métallographie

L'examen métallographique a pour but la mise en évidence de la macrostructure de l'échantillon. L'analyse micrographique se fait sur des surfaces polies attaquées chimiquement. Dans ce qui suit, nous donnons les détails de chaque opération.

3.8.1 Polissage

Cette opération consiste à rendre la surface plane et brillante, pour cela on utilise une surfaceuse à disque abrasif (polisseuse), c'est une opération mécanique qui permet d'avoir des états de surface semblable à celui d'un miroir. Ce polissage s'effectue en plusieurs étapes avec des disques en papiers abrasifs de différentes granulométrie des grains abrasif en carbure de silicium (du plus gros au plus fin : 180, 400, 600, 800, 1000, 1200 jusqu'à 4000) et on prolonge l'action jusqu'à ce que les stries créés par les opérations précédentes disparaissent, cela en prenant soin de rayer l'échantillon dans un sens avec abrasif et dans le sens contraire avec le suivant, et on tourne à chaque fois avec un angle de 90° tout long de cette opération en l'aspergeant avec de l'eau pour éviter l'échauffement.



FIGURE 3.16 – Polisseuse.

3.8.2 Attaque chimique

Les examens métallographiques nécessitent au préalable une attaque chimique appropriée à chaque nuance pour mettre en évidence les structures, cette opération donne une différence de couleur entre les différentes phases, car elle est directement liée à la différence de vitesse de réaction des constituants. Le réactif chimique utilisé pour notre acier est le Nital 4 % (4 ml d'acide nitrique et 100 ml d'éthanol), une fois étalée sur la surface de l'échantillon, un temps de maintien de 5 à 10 seconds est respecté, cette opération doit être suivie d'un rinçage à l'eau distillée puis on sèche avec du papier absorbant.

3.8.3 Examen au microscope optique

L'étude de la structure micrographique appelé métallographie nécessite l'emploi d'un microscope optique, pour cela nous avons fait l'examen au laboratoire de technologie des métallurgies à l'université de BADJI Mokhtar d'Annaba pour la disponibilité d'un microscope optique de marque LEICA DM LM, équipé d'une camera CCD couplé à un microordinateur munie d'un logiciel de camera CCD.

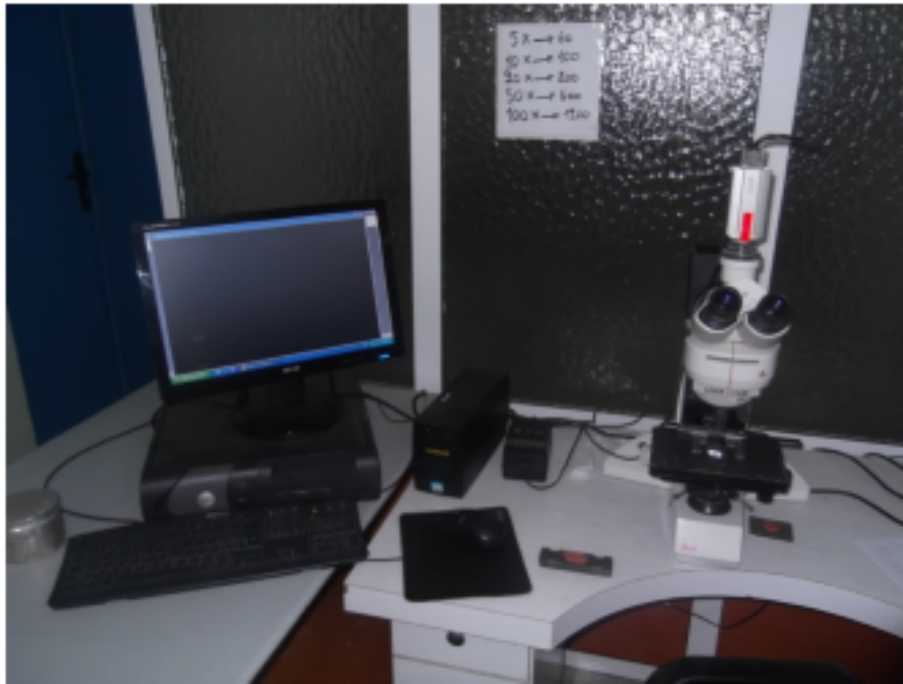


FIGURE 3.17 – Dispositif du microscope optique piloté par ordinateur

3.8.4 But de la métallographie

La métallographie est la technique consistant à déterminer la structure d'un métal en observant avec un microscope optique. On peut déterminer ainsi, selon les cas :

- la taille et la forme des grains.
- la répartition des phases.
- la direction des lignes de glissement (intersection des plans de glissement avec la surface) dans le cas d'un échantillon déformé.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les matériaux utilisés, ainsi que les différentes techniques expérimentales pour caractériser l'effet du soudage sur les propriétés mécanique des joints soudés à savoir : la dureté et la résilience d'une liaison métallique réalisée par soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec le procédé MAG.

Résultats et discussion

4.1 Introduction

Le soudage de la maquette métallique d'une tôle forte d'acier E24 avec le procédé MAG, nous a permis d'obtenir les résultats des différents tests effectués qui ont présentés et discutés dans ce chapitre.

4.2 Les résultats des différents essais

4.2.1 Dureté

4.2.1.1 Résultat de la macrodureté

Les tableaux ci-dessous représentent les valeurs obtenues de la macrodureté des quatre éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut, et celles de la maquette soudée :

TABLE 4.1 – Résultats de la macrodureté des éprouvettes à l'état brut.

<i>Eprouvette</i>	E_0	E_1	E_2	E_4
<i>Position</i>	HV_{30}	HV_{30}	HV_{30}	HV_{30}
<i>1</i>	<i>155</i>	<i>171</i>	<i>171</i>	<i>184</i>
<i>2</i>	<i>177</i>	<i>155</i>	<i>165</i>	<i>177</i>
<i>3</i>	<i>171</i>	<i>165</i>	<i>171</i>	<i>171</i>
<i>Moy_i</i>	<i>168</i>	<i>164</i>	<i>169</i>	<i>177</i>
<i>Moy</i>	<i>170</i>			

TABLE 4.2 – Résultats de la macrodureté des éprouvettes soudées.

<i>Eprouvette</i>	<i>MB</i>	<i>ZAT</i>	<i>MF</i>	<i>ZAT</i>	<i>MB</i>
E_4	<i>177</i>	<i>184</i>	<i>202</i>	<i>187</i>	<i>165</i>
E_5	<i>165</i>	<i>177</i>	<i>210</i>	<i>184</i>	<i>174</i>
E_6	<i>174</i>	<i>177</i>	<i>223</i>	<i>185</i>	<i>171</i>
E_7	<i>165</i>	<i>179</i>	<i>214</i>	<i>177</i>	<i>174</i>
Moy(HV)	<i>170</i>	<i>180</i>	<i>212</i>	<i>183</i>	<i>171</i>

La présentation de la variation de la macrodureté de ces éprouvettes est exprimée sur les histogrammes suivants :

- ◇ **Le premier histogramme** :représente la moyenne de la macrodureté enregistrée sur les éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut de livraison.

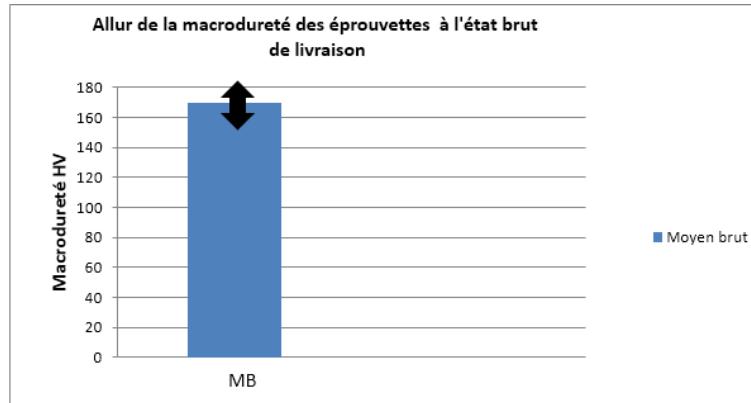


FIGURE 4.1 – Moyenne de la macrodureté (HV) enregistrée sur l'éprouvette à l'état brut.

◇ **Le deuxième histogramme** :représente la macrodureté enregistrée sur les éprouvettes soudées.

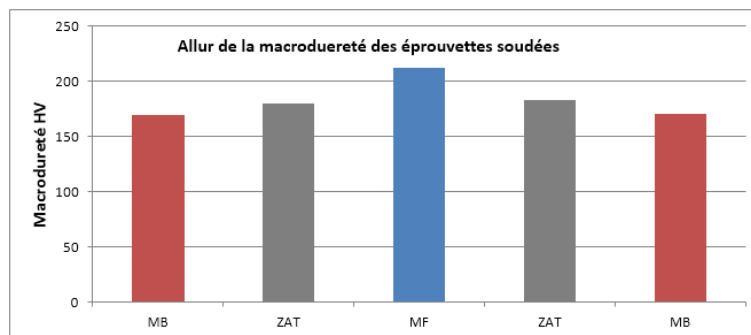


FIGURE 4.2 – Moyenne de la macrodureté (HV) enregistrée sur les éprouvettes soudées.

a). Interprétation des résultats à l'état brut

Pour estimer l'écart des duretés de l'acier E24 dans son état brut de livraison (non traité thermiquement), nous avons effectués une filiation de duretés vickers (HV) sur les coupes transversales des éprouvettes, ce qui nous a permis d'obtenir les résultats représentés sur l'histogramme illustré dans la figure 4.1. Après l'analyse de ce dernier, nous constatons qu'il y a une hétérogénéité sur le long de la même surface d'éprouvette, qui met en évidence l'influence thermique due à la fabrication des tôles fortes de l'acier E24 à l'état brut de livraison, cette influence thermique joue un rôle important sur la répartition du carbone dans le métal et aussi de l'hétérogénéité sur les proportions des phases ferritique et perlitique.

b). Interprétation des résultats à l'état soudé

Les valeurs des duretés moyennes mesurées sur les différentes zones de cordon de soudure sont représentées dans l'histogramme illustré dans la figure 4.2. Nous constatons que la valeur de la macrodureté mesurée dans la zone fondue (ZF) est plus importante par rapport à celle de la zone affectée thermiquement (ZAT) est celle de métal de base (MB), cette augmentation de l'ordre de 15% par rapport à la ZAT et de 25% par rapport à MB.

La différence entre MF et de la ZAT est due à la différence de la composition chimique, la teneur en carbone dans le MF est de la moyenne de 0.1% (c) par contre la ZAT est 0.08% (c). Et on constate aussi l'influence du traitement thermique de la normalisation lors d'exécution de soudage qui peut engendrer des modifications structurales de grain et le joint de grain entre la ZAT et le MB.

4.2.1.2 Résultat de la microdureté

Les tableaux ci-dessous représentent les valeurs obtenues de la microdureté des quatre éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut et les quatre éprouvettes de la maquette soudée :

TABLE 4.3 – Résultats de la microdureté à l'état brut.

<i>Colonne</i>	C_1	C_2	C_3
<i>Ligne</i>	HV_{30}	HV_{30}	HV_{30}
L_1	215	217	205
L_2	217	215	216
L_3	214	229	209
<i>Moy</i>	218	220	210

TABLE 4.4 – Résultats de la microdureté des éprouvettes soudées.

<i>Eprouvette</i>	<i>MB</i>	<i>ZAT</i>	<i>MF</i>	<i>ZAT</i>	<i>MB</i>
<i>L₁</i>	213	233	264	231	213
<i>L₂</i>	219	241	272	242	225
<i>L₃</i>	227	249	272	245	215
<i>Moy</i>	220	241	269	239	219

La présentation de la variation de la dureté de ces éprouvettes est exprimée sur les histogrammes suivants :

◇ **Le premier histogramme**

Représente la microdureté enregistrée sur les éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut.

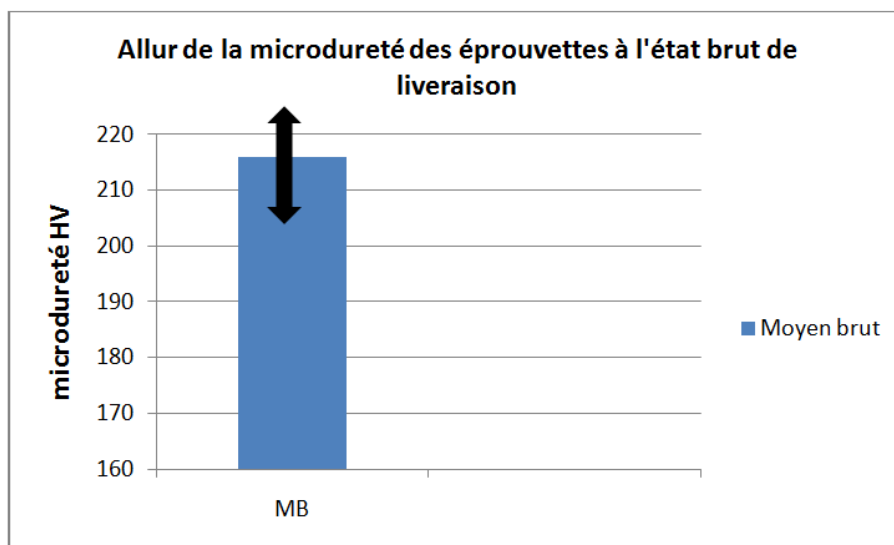


FIGURE 4.3 – Moyenne de la microdureté (HV) enregistrée sur l'éprouvette à l'état brut.

◇ Le deuxième histogramme

Représente la microdureté enregistrée sur les éprouvettes soudées.

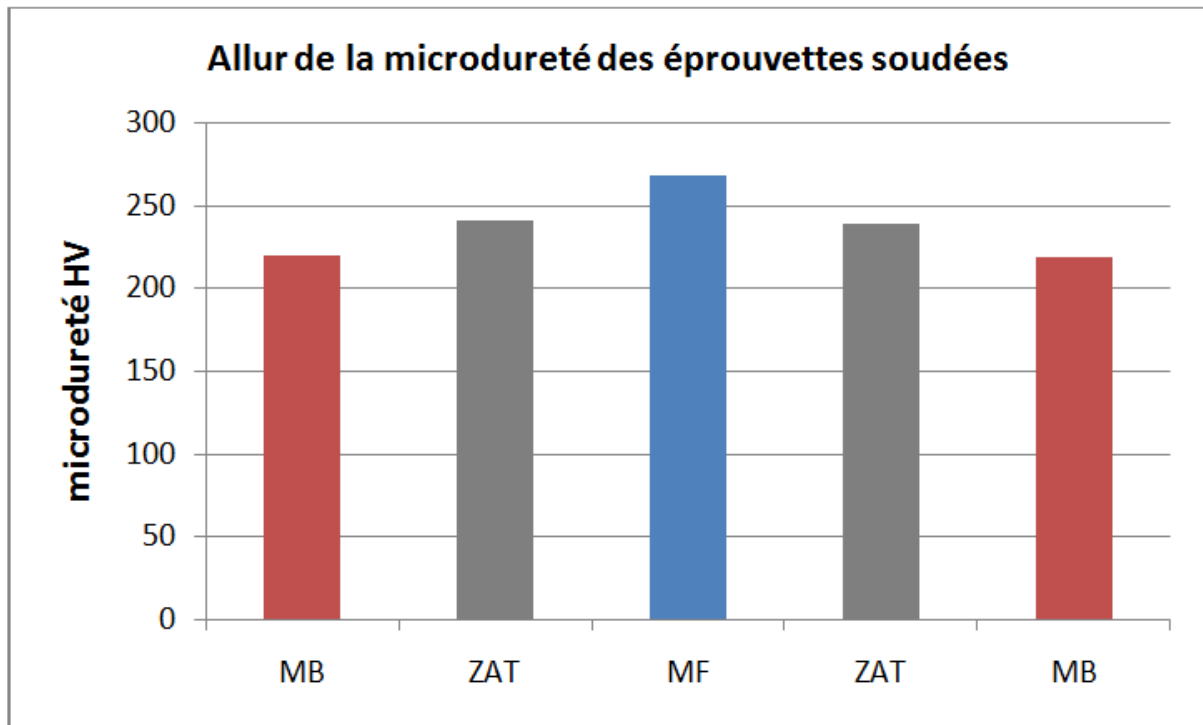


FIGURE 4.4 – Profile de la macrodureté (HV) enregistrée sur l'éprouvette soudée.

4.2.1.3 Interprétation des résultats de la macrodureté et la microdureté

Puisque le comportement mécanique des matériaux reste le même pour les deux essais (macro et microdureté), les duretés moyennes mesurées dans la zone fondue (MF) est plus importantes par rapport à celle de la zone affectée thermiquement (ZAT) et celle du métal de base (MB). Juste les résultats que on a obtenus dans la microdureté est présentatifs par rapport à celle de la macrodureté.

4.3 Résultat de la résilience

Les tableaux ci-dessous représentent les valeurs obtenues de la résilience (J/cm^2) des éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut et les éprouvettes soudées.

TABLE 4.5 – résultats des éprouvettes de la résilience à l'état brute (J/cm^2).

<i>Éprouvettes</i>	<i>E0</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
<i>Résilience</i>	<i>54</i>	<i>46</i>	<i>59</i>	<i>45</i>
<i>Moy</i>	<i>51</i>			

TABLE 4.6 – résultats des éprouvettes de la résilience à l'état soudées (J/cm^2).

<i>Éprouvettes</i>	<i>E 0</i>	<i>E 1</i>	<i>E 2</i>	<i>E 3</i>
<i>Dureté HV</i>	<i>166</i>	<i>164</i>	<i>173</i>	<i>176</i>
<i>Moy</i>	<i>170</i>			

L'Histogramme représente les valeurs de la résilience enregistrées sur les éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut de livraison et les éprouvettes soudées.

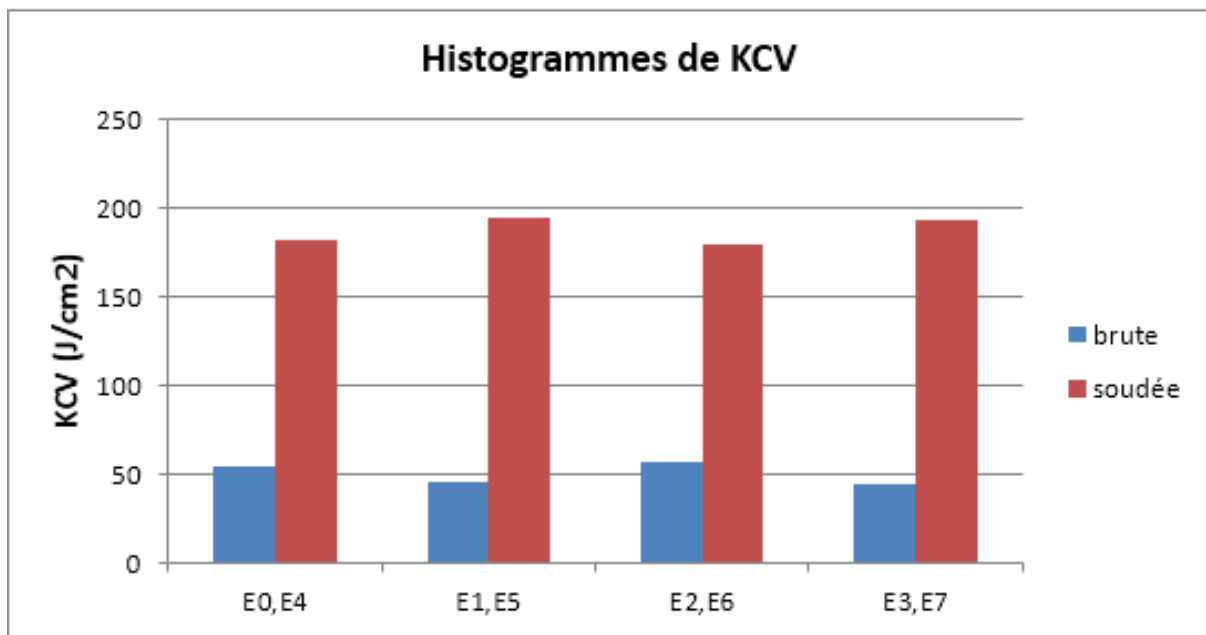


FIGURE 4.5 – Valeurs de la résilience.

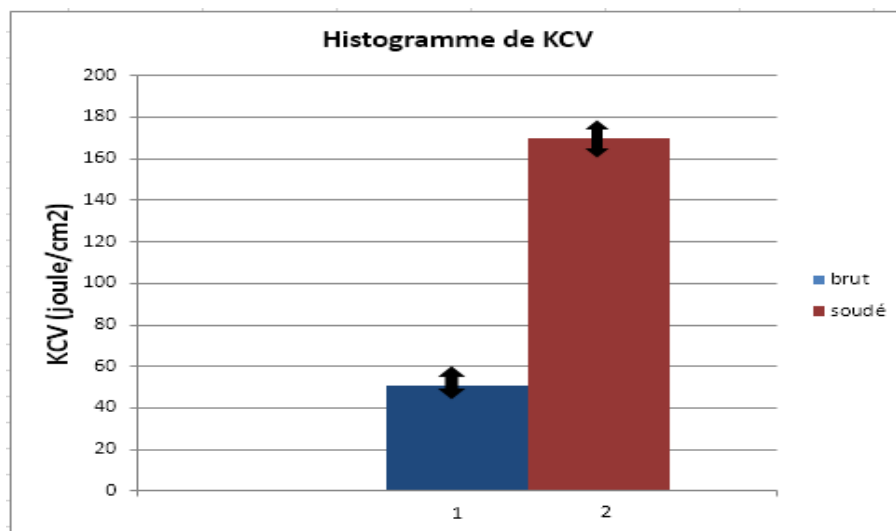


FIGURE 4.6 – Moyennes de la résilience.

4.3.1 Interprétation des résultats de la résilience

Les résultats de l'essai de résilience effectué sur des éprouvettes entaillées en V au milieu du joint soudée, montrent que les éprouvettes soudées sont plus tenaces que celles

des éprouvettes à l'état brut de livraison, elle présente une moyenne de 170 J/cm^2 par contre les éprouvettes à l'état brut de livraison présentent une moyenne de 51 J/cm^2 .

Sachant que lorsque le métal est plus ductile il devient plus fragile (moins tenace), hors que ce n'est pas le résultat que nous avons obtenus, cela est due au métal d'apport qui contient trois fois plus de silicium (Si) et deux fois plus de magnésium par rapport au métal à l'état brut, ce qui explique l'augmentation de la résilience du joint soudé en même temps que sa dureté. Le tableau 4.5 montre les éléments caractéristiques du métal d'apport

TABLE 4.7 – Eléments d'aditions.

<i>Métal</i>	<i>C %</i>	<i>Si %</i>	<i>Mn %</i>
<i>Métal d'apport</i>	<i>0.08-0.12</i>	<i>0.40-0.60</i>	<i>1.00-1.30</i>
<i>Métal brut</i>	<i>0.08</i>	<i>0.16</i>	<i>0.61</i>

4.4 Caractéristique métallographique

4.4.1 Macrographie

Les observations macroscopiques permettent d'avoir des macrographies Figures 4.7. qui révèlent les différentes zones du joint soudé. Dans le cas de l'acier E24, le but est aussi de bien distinguer le grossissement des grains au niveau de joint soudé.

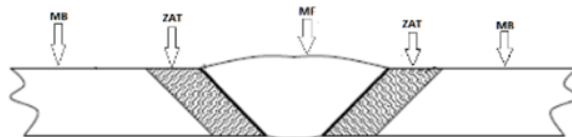


FIGURE 4.7 – Présentation macrographique d'un joint soudé.

4.4.2 Micrographie

Les résultats de l'observation micrographique sont obtenus suivant la direction transversale figure 4.8, pour analyser l'évolution structurale du joint soudé,



FIGURE 4.8 – Direction transversale.

4.4.3 Microstructure de joint soudé

4.4.3.1 Microstructure de la plaque soudée

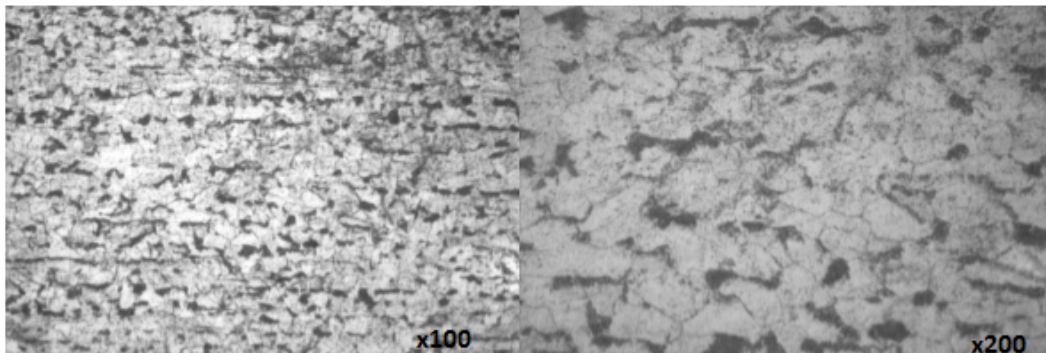


FIGURE 4.9 – Aspects de la microstructure du métal de base.

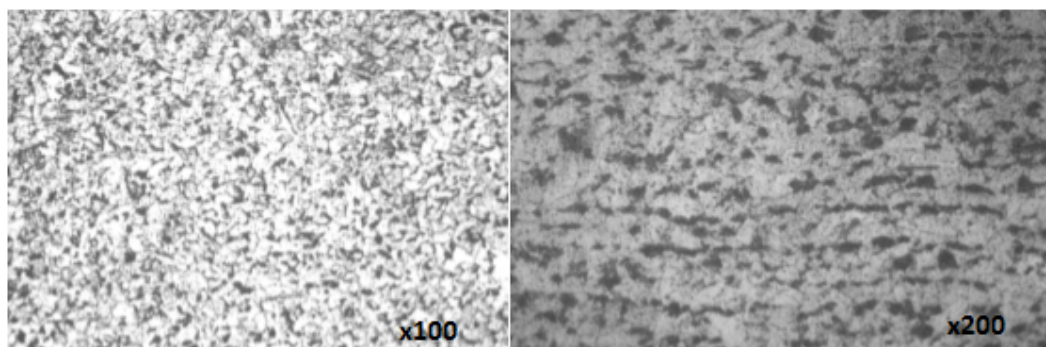


FIGURE 4.10 – Aspects de la microstructure de la zone affectée thermiquement.

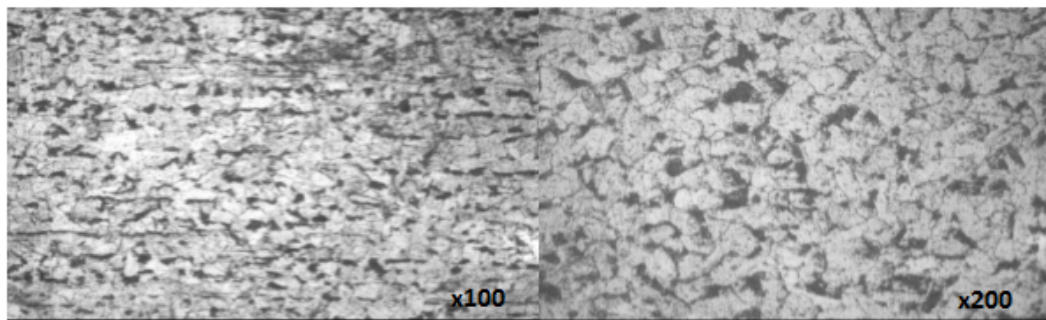


FIGURE 4.11 – Aspects de la microstructure de la zone fondue

4.4.3.2 Interprétation des résultats de la microstructure

Le métal de base présente une structure ferrito-perlitique et la figure 4.9 nous montre une distribution hétérogène des grains de ferrite et de perlite, avec une domination des grains de ferrite. La zone affectée thermiquement a une structure ferrito-perlitique homogène de taille des grains moins faible que celles du métal de base, comme le montre la figure 4.10. La microstructure de la zone fondue, présente aussi une distribution ferrito-perlitique, homogène avec une taille des grains relativement très fins par rapport à celles du métal de base, comme le montre la figure 4.11.

4.5 Conclusion

L'aspect métallurgique en générale, caractérise l'opération de soudage qui par son apport thermique modifie les structures métallurgiques et les propriétés locales des pièces assemblées. L'influence de différents facteurs tels que les cycles thermiques de soudage et la composition chimique des pièces à assembler, peuvent contribuer aux variations de la structure de la zone soudée du métal (ZAT), et par conséquent perdre les propriétés mécaniques demandées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail consiste à étudier les caractéristiques mécaniques de dureté et de résilience d'un joint de soudure réalisé par le procédé MAG sur l'acier E24 utilisé comme élément de châssis de grue.

Le comportement du joint soudé est testé par rapport au comportement aux chocs à travers l'essai de résilience dont la caractéristique mécanique (ténacité) est une propriété de ductilité. Les essais de dureté ont pour but de mettre en évidence l'intensité sur l'homogénéité de la microstructure dans le métal de base, la zone affectée thermiquement et le joint de soudure (zone fondue).

Les tests de microdureté montrent que la moyenne de la dureté du métal fondu (métal d'apport) est de 269 (HV_{30}) est supérieur à celle de la zone affectée thermiquement est de 240 (HV_{30}) et celle de métal de base (MB) qui est de 216 (HV_{30}).

Les tests de résilience montrent que le joint soudé qui est de la moyenne de $170 J/cm^2$ est supérieur à celle de l'acier E24 à l'état brut de livraison qui est de $51 J/cm^2$.

D'une manière générale on conclut qu'un joint de soudage de l'acier E24 par le procédé MAG est plus résistant que le métal de base soudé du côté dureté et résilience.

Bibliographie

- [1] L.Reynard ; Doctorat de l'école central de Lyon ; Février 2006.
- [2] P.Ferton ; Doctorat de l'université Paul Sabatier ; Toulouse III ; novembre 2002.
- [3] Frédéric. LAGO ; Doctorat de l'université Paul Sabatier ; Toulouse III ; Mars 2004.
- [4] K. Ramachandran ; 3D modelling of plasma-particle interactions in a plasma jet under dense loading conditions ; J. Phys. D : Appl. Phys. 435, pp298-306 ; 2003.
- [5] Site internet.<http://www.lyc-de-gaulle-pulversheim.ac-strasbourg.fr/JLH/ASSEMBLAGE/Soudagearc.html>
- [6] Site internet.<http://www.lyc-de-gaulle-pulversheim.acstrasbourg.fr/JLH/ASSEMBLAGE/SoudageTIG.html>
- [7] Mémoire de fin d'étude ; Caractérisation microstructurale et mécanique de deux types de joints soudés. Cas de l'élaboration de la liaison bimétallique acier Z120M12/Acier E36 utilisée par l'Unité Grue de Bejaia pour les pelles de rétro-chargeurs et godets d'excavation.
- [8] Soudage MIG-MAG - Wikipédia.html.
- [9] Dominique FRANÇOIS, Essais mécaniques des métaux : Essais de dureté, Technique de l'ingénieur.
- [10] Loubet J.L., Georges J.M., Marchesini O., Meille G., "Vickers Indentation Curves of Magnesium Oxide (MgO)", Journal of tribology, 106, p. 43, 1984.
- [11] D. Tabor, The Hardness of Metals, Clarendon Press Oxford, 1951.
- [12] Larsson P.L.Giannakopoulos A.E, Söderlund E, Rowcliffe D.J, Vestergaard R, "Analysis of Berkovich Indentation", Int.Jour Solids Structures, Vol. 33, N°2, pp. 221-248, 1996.

- [13] Jonathan R. TuckU,1, Alexander M. Korsunsky1, SteveJ. Bull, Rob I.Davidson On the application of the work-of-indentation approach to depth-sensing indentat.
- [14] P. KEMPE, Nanoindentation et microrayage en environnement contrôlé Colloque, SF2M Section-Ouest : Surfaces et Interfaces, indentation, rayage et abrasion, Angers, 16 et 17mars 2005
- [15] Bolshakov A. et Pharr G.M., "Influences of pileup on the measurement of mechanical properties by load and depth sensing indentation techniques", Journal of materials research, 13(4), p. 1049, 1998.
- [16] Cheng Y.-T. et Cheng C.-M., "Relationships between hardness, elastic modulus, and the work of indentation", Applied physics letters, 73(5), p. 614, 1998.
- [17] J-L. Halary, "Introduction à la mécanique des polymères", INPL (1995) 169.
- [18] Robert L., Etude des propriétés mécaniques du nickel utilisé dans la technologie, LIGA-Réalisation d'un micropréhenseur, Thèse Université de Franche Comté, 1997.
- [19] K.L.Dahm,W.G.Ferguson, R.Murakami, P.A.Dearnley, Carbon coatings, Surface engineering (1994) vol .10 N° : 03 199.
- [19] Jean-Luc. Bucaille, Simulation Numérique de L'indentation et de La Rayure des Verres. Organiques, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2001.

Annexe A

ANNEXE

Tableau des valeurs obtenues de la macrodureté et les diamètres d'empreintes des éprouvettes à l'état brut de livraison :

épreuve	E ₀		E ₁		E ₂		E ₃	
position	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀
1	0.57	171	0.58	165	0.57	171	0.57	171
2	0.60	155	0.57	171	0.57	171	0.55	184
3	0.56	177	0.60	155	0.58	165	0.56	177
Moy _i	/	165	/	164	/	172	/	175

$$Moy_i = \frac{(\sum_{i=1}^4 HV_{30})}{4}$$

Moyi : Moyenne de la dureté d'une seule éprouvette ;

i : Numéro de l'éprouvette.

Tableau des valeurs obtenues de la macrodureté et les diamètres d'empreintes des

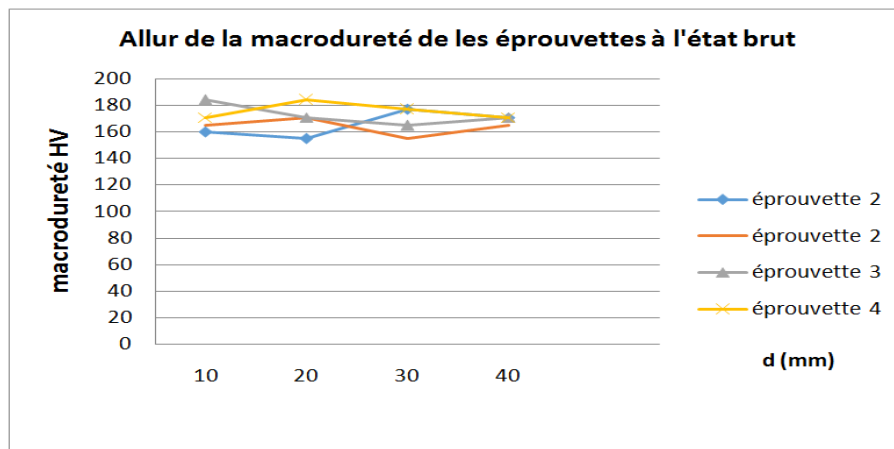
épreuve	E ₄		E ₅		E ₆		E ₇		Moy HV ₃₀
position	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	
MB	0.56	177	0.58	165	0.565	174	0.58	165	170
ZAT	0.55	184	0.56	177	0.56	177	0.53	198	179
MF	0.525	202	0.515	210	0.50	223	0.51	214	212
ZAT	0.545	187	0.55	184	0.53	198	0.56	177	183
MB	0.58	165	0.565	174	0.57	171	0.565	174	171

$$MoyHV_{MB} = \frac{(\sum_{i=1}^4 HV_{MBi})}{4}$$

$$MoyHV_{ZAT} = \frac{(\sum_{i=1}^4 HV_{ZATi})}{4}$$

$$MoyHV_{ZF} = \frac{(\sum_{i=1}^4 HV_{Mfi})}{4}$$

Les graphes de la macrodureté enregistrée sur les éprouvettes de l'acier E24 à l'état brut.



Les graphes de la macrodureté enregistrée sur les éprouvettes soudées.

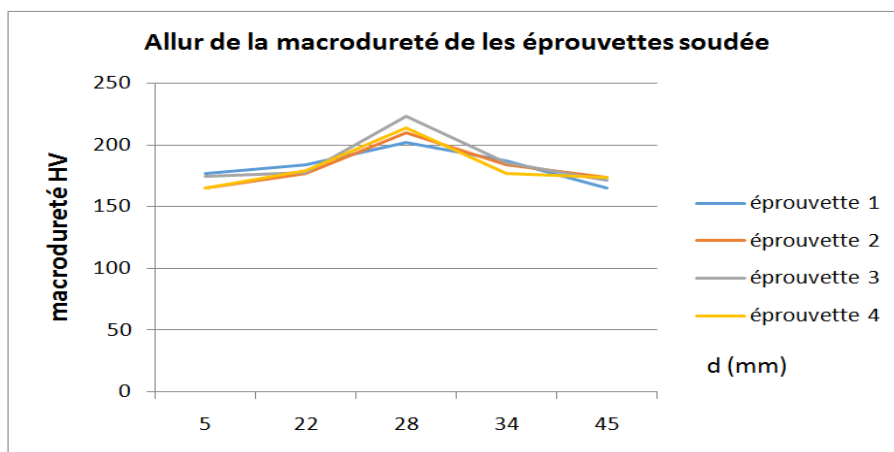


Tableau des valeurs obtenues de la microdureté et les diamètres d'empreintes d'éprouvette à l'état brut de livraison :

éprouvette	C ₁		C ₂		C ₃	
position	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀
L ₁	41.30	217	39.30	225	41.60	214
L ₂	41.50	215	41.30	217	42.20	229
L ₃	42.50	205	41.40	216	42.10	209
Moy _i	/	212	/	219	/	217

$$Moy_i = \frac{(\sum_{i=1}^4 HV_{30})}{3}$$

Moy_i : Moyenne de la dureté d'une colonne;

i : Numéro de la ligne.

Tableau des valeurs obtenues de la microdureté et les diamètres d'empreintes del'éprouvette à l'état soudé :

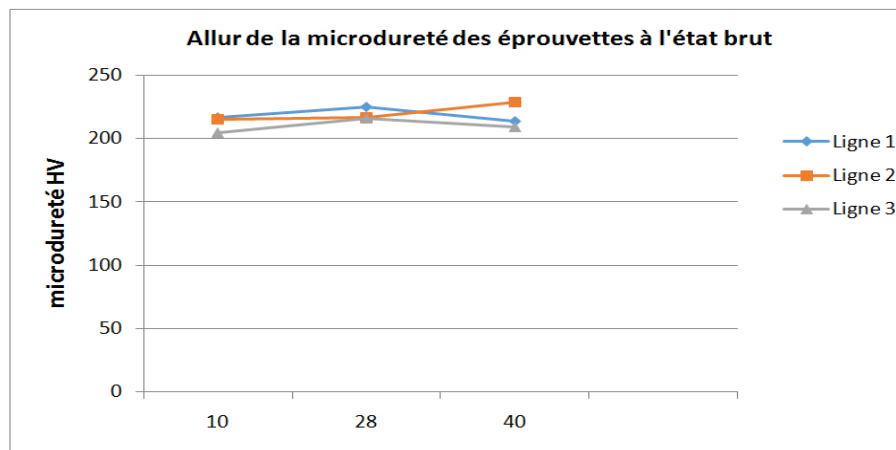
Eprouvette	MB		ZAT		ZF		ZAT		MB	
	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀	Φ (mm)	HV ₃₀
Ligne 1	42.50	205	39.50	238	37.00	271	39.50	238	41.60	214
	41.50	215	39.30	235	37.80	275	39.50	238	42.10	209
Ligne 2	42.10	209	39.30	240	37.00	271	39.10	243	41.30	217
	41.50	215	39.20	241	36.60	277	39.50	238	41.50	215
Ligne 3	41.60	214	39.00	244	36.60	277	39.10	243	41.50	215
	41.30	217	38.70	248	37.80	275	39.20	245	41.60	214
Moy	/	212	/	241	/	274	/	240	/	214

$$MoyHV_{MB} = \frac{(\sum_{i=1}^6 HV_{MBi})}{6}$$

$$MoyHV_{ZAT} = \frac{(\sum_{i=1}^6 HV_{ZATi})}{6}$$

$$MoyHV_{ZF} = \frac{(\sum_{i=1}^6 HV_{Mfi})}{6}$$

Les graphes de la microdureté enregistrée sur l'éprouvette de l'acier E24 à l'état brut.



Les graphes de la microdureté enregistrée sur l'éprouvette soudée.

