

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

---

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



# MÉMOIRE

## DE FIN D'ÉTUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADIMIQUE  
EN GÉNIE MÉCANIQUE  
OPTION : SCIENCES DES MATÉRIAUX

THÈME

*Caractérisation d'une  
soudure hétérogène réalisée  
par le procédé MAG*

Dirigé par:

M<sup>r</sup> : FILALI

Étudié par :

M<sup>elle</sup> : AMAUCHE SAMIRA

*Promotion 2011-2012*

## **Remerciements**

*Avant d'entamer mon travail, je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné du courage et de la volonté.*

*Au terme de ce travail, je tien à exprimer ma grande reconnaissance et haute gratitude à mon promoteur M<sup>r</sup> FILALI pour son aide et ses conseils qu'il m'a donné tout le long de la réalisation de mon travail.*

*Mes remerciements vont également à tout le personnel du département technique de l'entreprise FAGECO (ENMTP de BEJAIA), en particulier M<sup>r</sup> KIKOUCHE et tout le personnel du service contrôle qualité.*

*Je tiens à remercier également les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en m'examinant et jugeant mon projet.*

*Comme je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*

*Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail, qu'elles trouvent ici ma profonde reconnaissance.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail en premier lieu à mes très chers parents ;*

*À la mémoire de ma grand-mère ;*

*À mes frères, mes sœurs et toute la famille ;*

*À tous mes amis, les étudiants de génie mécanique en particulier ceux de SDM.*

***A. Samira***

# *Sommaire*

# Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## Présentation de l'entreprise

I.1. Présentation de l'ENMTP.....	02
I.2. Présentation de (UGB) .....	03
I.2.1. Structure de l'UGB .....	04

## Chapitre I : Généralité sur les aciers

I. Définition.....	06
I.1. Diagramme d'équilibre.....	06
I.1.1. Variétés allotropiques du fer.....	06
I.1.2. Les différentes phases d'équilibre et hors équilibre.....	07
a) Constituants d'équilibre.....	07
b) Constituants hors équilibre.....	08
I.2. classification des aciers.....	09
I.2.1. Selon la teneur en carbone.....	09
I.2.2. Selon la composition chimique.....	10
I.2.2.1. Aciers au carbone (non alliés).....	10
a) Aciers non alliés.....	10
b) Aciers ordinaires d'usage général .....	11
c) Aciers non alliés pour traitement thermique .....	11
I.2.2.2. Aciers alliés .....	11
a) Aciers faiblement alliés .....	12
b) Aciers fortement alliés .....	12
c) Les aciers inoxydables .....	12
I.2.3. Selon les propriétés d'usage.....	13
I.2.3.1. Les aciers rapides .....	13
I.2.3.2. Les aciers à outils .....	13
I.3. Désignation des aciers.....	13
I.3.1. Désignation des aciers (NF EN 10027).....	13
I.3.2. Désignation symbolique des aciers (NF EN 10027-1).....	14
I.3.2.1. Aciers désignés à partir de leurs applications et de leurs caractéristiques mécaniques.....	14
I.3.2.2. Aciers désignés selon composition.....	15
I.3.2.3 Désignation alphanumérique des aciers (NF EN 10027-2).....	16
I.4. Soudabilité des aciers.....	16

## Chapitre II : généralité sur le soudage

II.1. Définition de l'opération de soudage.....	17
II.2 Types de soudures .....	18
II.3.. Classification des procédés de soudage .....	18
II.3.1. Le soudage à la forge.....	19
II.3.2. Le soudage à la flamme.....	19
II.3.3. Le soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée.....	19
II.3.4. Le soudage à l'arc électrique sous flux pulvérulent.....	19
II.3.5. Le soudage TIG ( <i>Tungstène Inert Gaz</i> ).....	19
II.3.6. Le soudage A-TIG ( <i>Active Tungstène Inert Gaz</i> ).....	20
II.3.7. Le soudage plasma.....	20
II.3.8. Le soudage MIG ( <i>Metal Inert Gaz</i> ).....	20
II.3.9. Le soudage MAG ( <i>Metal Active Gaz</i> ).....	20
II.3.10. Le soudage au fil fourré.....	20
II.3.11. Le soudage par effet Joule sous flux protecteur.....	20
II.3.12. Le soudage par résistance.....	20
II.3.13. Le soudage par étincelage.....	21
II.3.14. Le soudage par décharge de condensateur.....	21
II.3.15. Le soudage par faisceau d'électrons.....	21
II.3.16. Le soudage par faisceau laser.....	21
II.3.17. Le soudage par ultrasons.....	21
II.3.18. Le soudage par aluminothermie.....	21
II.3.19. Le soudage par friction.....	21
II.4. Les différentes parties d'un assemblage soudé .....	22
II.5. Caractéristiques du soudage .....	22
II.5.1. La zone fondue .....	22
II.5.2. La zone affectée thermiquement .....	22
II.5.3. La zone de liaison .....	22
II.5.4. Le métal de base.....	23
II.6. Métallurgie du soudage .....	24
II.6.1. Cycles thermiques de soudage.....	24
II.6.2. Phénomènes métallurgiques .....	25
II.6.3 Transformations au soudage .....	27
II.6.3.1 Transformations au chauffage .....	27
a) Austénitisation.....	27
b) Recristallisation.....	27
c) Grossissement du grain .....	27
d) Dissolution des carbures .....	27
II.6.3.2 Transformations au refroidissement .....	28
a) Transformations indépendantes du temps .....	28
b) Transformations fonctions du temps .....	28

b.1) Transformation perlitique .....	28
b.2) Transformation bainitique .....	28
II.6. 4. Localisation des transformations .....	29
II.7. Les avantages de soudage par rapport à autres techniques d'assemblage .....	29
II.8. Critères de choix d'un procédé de soudage.....	30
II.9. Les principaux défauts de soudage.....	30
II.9.1 La fissuration à chaud.....	30
II.9.2. La fissuration à froid.....	31
II.9.3. Caniveaux .....	31
II.9.4. Porosité .....	32
II.9.5. Manque de fusion : collage .....	32
II.9.6. Manque de pénétration .....	33
II.9.7. Inclusion de laitier .....	33
II.10. Le taux de dilution.....	33
II.10. 1. Principe de la dilution .....	33
II.10. 2. Mesure de la dilution (dilution du métal de base dans le métal fondu).....	33
II.10. 3. Variation du taux de dilution .....	34
II.10. 4. Importance du taux de dilution .....	35
II.11. Diagramme de SCHAEFFLER.....	35
II.11.1. L'utilité du diagramme SCHAEFFLER.....	35
II.11.2. Formules de calcul.....	35
II.11.3. Exemple d'utilisation du diagramme Schaeffler.....	34

### **Chapitre III : Le soudage MAG**

III.1. Procédé MAG avec fil plein.....	38
III.2. Différents régimes de soudage MAG.....	39
III.2.1. Transfert par « court-circuit» .....	39
III.2.2. Transfert par «pulvérisation axiale» .....	39
III.2.3. Transfert «globulaire» ou par «grosses gouttes» .....	40
III.2.4. Régime pulsé.....	40
III.2.5. Régime par court-circuit forcé.....	41
III.2.6. Transfert à veine liquide rotative.....	41
III.3. Description d'une installation de soudage MAG.....	43
III.4. Avantage du soudage MAG.....	44
III.5. Procédé MAG avec fil fourré.....	45

### **CHAPITRE IV : Méthodes et technique expérimentales**

IV.1. Identification des Métaux de base .....	47
IV.1.1. Présentation de l'acier E36.....	47

IV.1.1.1. Composition chimique.....	47
IV.1.1.2. Les caractéristiques mécaniques .....	47
IV.1.2. Présentation de l'acier A60.....	48
IV.1.2.1. Composition chimique.....	48
IV.1.2.2. Les caractéristiques mécaniques.....	48
IV.2. Présentation du métal d'apport (fils pour soudage MAG ER70S-6).....	48
IV.2.1. Composition chimique AWS: ER70S-6.....	50
IV.2.2. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6.....	50
IV.3. Réalisation des plaques de liaisons bimétalliques acier A60/acier E36.....	50
IV.3. 1. Préparation des plaquettes.....	50
IV.3. 2. Assemblage des plaquettes.....	51
IV.4. Prélèvement des éprouvettes et des échantillons à caractériser.....	52
IV.4.1. Prélèvement des échantillons.....	53
IV.4.2. Elaboration et préparation des éprouvettes.....	54
IV.5. Caractérisation microstructurale des échantillons .....	54
IV.5.1. Polissage.....	54
IV.5.2. Finissage .....	55
IV.5.3. L'attaque chimique.....	55
IV.5.4. Observation macroscopique.....	55
IV.5.5. Observation microscopique.....	56
IV.5.5.1. Microscope optique.....	56
IV.6. Essais de dureté.....	57
IV.6.1. Duromètre .....	57
IV.7. Essai de traction .....	58
IV.7.1. Grandeurs conventionnelles.....	58
IV.7.2. Grandeurs rationnelles.....	59
IV.7.3. Géométrie des éprouvettes de traction.....	60
IV.7.4. Condition de déroulement de l'essai de traction .....	60
IV.7.5. Machine de traction .....	60
IV.8. Essai Charpy V (essai de résilience).....	61
IV.8.1. Principe de l'essai .....	62
IV.8.2. Dimension de l'éprouvette .....	62
IV.8.3. Machine de résilience.....	63

## **CHAPITRE V : Résultats et discussions**

V.1. Examen macrographique.....	64
V.1.1. Macrographie des assemblages soudés.....	64
V.1.2. Calcul du taux de dilution des métaux de base dans le métal fondu.....	65
V.1.2.1. Taux de dilution de l'assemblage (A).....	65
V.1.2.2. Taux de dilution de l'assemblage (B).....	66

V.1.2.3. taux de dilution de l'assemblage (C).....	66
V.2. Observation microscopique.....	67
V.2.1. Microscopie des métaux de base.....	67
V.2.2. Microscopie de la liaison bimétallique A60/E36 multipasses.....	68
V.3. Résultats des essais de dureté Vickers.....	72
V.3.1. essais HV pour les trois assemblages en une seule passe.....	72
V.3.2. essais HV pour les trois assemblages en multipasse passe.....	73
V.4. Essai de traction .....	75
V.4.1. Comportement en traction uni-axial .....	75
V.5. Essai de résilience (essai charpy V).....	78
Conclusion générale.....	80

# *Liste de figures*

# Liste des figures

## CHAPITRE I

<b>Figure 1.1</b> : Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température.....	7
<b>Figure 1.2</b> : Diagramme Fe-C.....	9
<b>Figure 1.3</b> : Principes de désignation symbolique des aciers selon la norme EN 1007-1-2.....	14

## CHAPITRE II

<b>Figure 2.1</b> : Schéma simplifié de deux métaux de base liés par soudage.....	17
<b>Figure 2.2</b> : Principaux procédés de soudage en fonction de la source d'énergie.....	19
<b>Figure 2.3</b> : Schématisation des parties sus-citées et leurs localisation.....	22
<b>Figure 2.4</b> : Présentation du bain fondu et la zone affectée thermiquement.....	23
<b>Figure 2.5</b> : Cycle thermique de soudage.....	24
<b>Figure 2.6</b> : Phénomènes métallurgique au cours du soudage.....	26
<b>Figure 2.7</b> : Identification des différentes structures métallurgiques d'un joint soudé selon le gradient des températures maximales atteintes et le diagramme d'équilibre Fer-Fe <sub>3</sub> C.....	29
<b>Figure 2.8</b> : Localisations des fissures de solidification.....	31
<b>Figure 2.9</b> : Exemple de fissuration à froid.....	31
<b>Figure 2.10</b> : Caniveaux.....	32
<b>Figure 2.11</b> : Soudure en angle de tôles pré-peintes – (Porosité résultant de la décomposition de la peinture sous le cordon).....	32
<b>Figure 2.12</b> : Collage.....	32
<b>Figure 2.13</b> : Manque de pénétration.....	33
<b>Figure 2.14</b> : Inclusion de laitier .....	33
<b>Figure 2.15</b> : Taux de dilution dans la zone fondue.....	34
<b>Figure 2.16</b> : Diagramme de schaeffler pour Z 7 CN 18.09.....	36
<b>Figure 2.17</b> : Diagramme de schaeffler pour Z 7 CN 18.09 et S 275 J2 G3.....	36
<b>Figure 2.18</b> : Diagramme de schaeffler montrant le taux de dilution des métaux de base et celui d'apport.....	37

## CHAPITRE III

<b>Figure 3.1</b> : Schéma en coupe de l'extrémité d'une torche de soudage MAG.....	39
<b>Figure 3.2</b> : Transfert par pulvérisation axiale.....	40
<b>Figure 3.3</b> : Transfert globulaire.....	40
<b>Figure 3.4</b> : Schéma des régimes de transfert.....	42
<b>Figure 3.5</b> : Forme de pénétration en fonction du type de transfert.....	42
<b>Figure 3.6</b> : Schéma type d'une installation manuelle de soudage MAG. Un générateur.....	43
<b>Figure 3.7</b> : Taux de projection en fonction du régime de transfert.....	44

## CHAPITRE IV

<b>Figure 4.1</b> : Scie tronçonneuse.....	50
<b>Figure 4.2</b> : Deux plaquettes acier A60 /acier E36.....	50
<b>Figure 4.3</b> : Poste à soudé du procédé MAG.....	51
<b>Figure 4.4</b> : Schéma illustrant la forme d'assemblage de la liaison bimétallique A60/E36 après soudage .....	52
<b>Figure 4.5</b> : Coupons pour essais.....	53
<b>Figure 4.6</b> : Plan de découpe nomination et dimensions des échantillons prélevées sur les	

assemblages du couple A60/E36.....	53
<b>Figure 4.7</b> : Prélèvement des éprouvettes.....	54
<b>Figure 4.8</b> : Polisseuse à deux disques.....	55
<b>Figure 4.9</b> : Sécheur d'échantillon .....	55
<b>Figure 4.10</b> : Exemple typique d'un examen macrographique.....	56
<b>Figure 4.11</b> : Microscope optique.....	56
<b>Figure 4.12</b> : Positionnement type de l'essai (selon NF EN 288-3:1992/A1:1997).....	57
<b>Figure 4.13</b> : Duromètre.....	57
<b>Figure 4.14</b> : courbes de traction.....	58
<b>Figure 4.15</b> : Eprouvette de traction.....	60
<b>Figure 4.16</b> : Machine de traction.....	61
<b>Figure 4.17</b> : Principe de l'essai Charpy V.....	62
<b>Figure 4.18</b> : Eprouvette de Résilience Charpy V.....	62
<b>Figure. 4.19</b> : Machine de Résilience.....	63

## CHAPITRE V

<b>Figure 5.1</b> : Macrographique de soudure .....	64
<b>Figure 5.2</b> : Zone de dilution dans la zone fondue pour l'assemblage (A).....	65
<b>Figure 5.3</b> : Zone de dilution dans la zone fondue pour l'assemblage (B).....	66
<b>Figure 5.4</b> : Zone de dilution dans la zone fondue pour l'assemblage (C).....	67
<b>Figure 5.5</b> : La microstructure des métaux de base.....	68
<b>Figure 5.6</b> : Aspect de la microstructure de la liaison bimétallique A60/E36 réalisée par soudage MAG en fil plein type <b>ER70S-6</b> . (Assemblage (A)).....	68
<b>Figure 5.7</b> : Aspect de la microstructure de la liaison bimétallique A60/E36 réalisée par soudage MAG en fil plein type ER70S-6. (Assemblage (B)).....	69
<b>Figure 5.8</b> : Aspect de la microstructure de la liaison bimétallique A60/E36 réalisée par soudage MAG en fil plein type <b>ER70S-6</b> . (Assemblage (C)).....	70
<b>Figure 5.9</b> : Aspect de la microstructure de l'interface Métal de base A60 / Zone fondue .....	71
<b>Figure 5.10</b> : Aspect de la microstructure de l'interface Métal de base E36/ Zone fondue.....	71
<b>Figure 5.11</b> : courbes de dureté en superposition pour les trois assemblages en une seule passe.....	72
<b>Figure 5.12</b> : courbes de dureté des trois passes en superpositions pour l'assemblage (A).....	73
<b>Figure 5.13</b> : courbes de dureté des trois passes en superpositions pour l'assemblage (B).....	74
<b>Figure 5.14</b> : courbes de dureté des trois passes en superpositions pour l'assemblage (C).....	74
<b>Figure 5.15</b> : Courbe de traction de l'assemblage A.....	76
<b>Figure 5.16</b> : Courbe de traction de l'assemblage B.....	76
<b>Figure 5.17</b> : Courbe de traction de l'assemblage C.....	77
<b>Figure 5.18</b> : Eprouvettes de traction après rupture pour les trois assemblages.....	77
<b>Figure 5.19</b> : Comportement aux chocs des deux joints soudés.Effet du courant de soudage sur la résilience (énergie de rupture par unité de surface (J/cm <sup>2</sup> ) pour rompre le joint soudé.....	78

# *Liste des tableaux*

# Liste des tableaux

## CHAPITRE I

<b>Tableau 1.1</b> Types d'aciers au carbone.....	10
<b>Tableau 1.2</b> : Classification des aciers de construction d'usage général.....	11
<b>Tableau 1.3</b> : Coefficient multiplicateur des éléments d'alliage pour les aciers peu alliés.....	15

## CHAPITRE II

<b>Tableau 2.1</b> : Composition chimique du matériau Z 7 CN 18.09.....	35
<b>Tableau 2.2</b> : Composition chimique du matériau S 275 J2 G3.....	36

## CHAPITRE IV

<b>Tableau 4.1</b> : Composition chimique de l'acier E36.....	47
<b>Tableau 4.2</b> : Caractéristiques mécaniques de l'acier E36.....	47
<b>Tableau 4.3</b> : Composition chimique de l'acier A60.....	48
<b>Tableau 4.4</b> : Caractéristiques mécaniques de l'acier A60.....	48
<b>Tableau 4.5</b> : Composition chimique du métal d'apport.....	49
<b>Tableau 4.6</b> : Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 (selon ISO 14175)	49
<b>Tableau 4.7</b> : Différents paramètres utilisés dans la réalisation des trois passes de soudure	51
<b>Tableau 4.8</b> : Dimension des éprouvettes de traction utilisées.....	60

## CHAPIRE V

<b>Tableau 5.1</b> : les dilutions dans la zone fondue du l'assemblage A.....	71
<b>Tableau 5.2</b> : les dilutions dans la zone fondue du l'assemblage B.....	71
<b>Tableau 5.3</b> : les dilutions dans la zone fondue du l'assemblage A.....	72
<b>Tableau 5.4</b> : Dureté Vickers de la première passe.....	76
<b>Tableau 5.5</b> : Dureté Vickers de l'assemblage A.....	77
<b>Tableau 5.6</b> : Dureté Vickers de l'assemblage B.....	78
<b>Tableau 5.7</b> : Dureté Vickers de l'assemblage C.....	79
<b>Tableau 5.8</b> : Caractéristiques mécanique de l'assemblage A .....	80
<b>Tableau 5.9</b> : Caractéristiques mécanique de l'assemblage B .....	81
<b>Tableau 5.10</b> : Caractéristiques mécanique de l'assemblage C.....	81
<b>Tableau 5.11</b> : Résultats des essais de résilience.....	82

# *Liste des symboles*

# *Liste des symboles*

$T_m$  : Température maximale à laquelle est porté le point étudié [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T(y_0, t)$  : Température à une distance  $y_0$  et un temps  $t$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_0$  : Température initiale du métal à souder [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$q$  : Puissance effective du procédé utilisé [W]

$v$  : Vitesse de soudage [cm/min]

$E$  : Energie de soudage [J/cm]

$C_p$  : Capacité thermique de volume [J/cm<sup>3</sup> · K]

$\lambda$  : Coefficient de conductibilité thermique [W/cm · K]

$a$  : Coefficient de diffusion thermique [cm<sup>2</sup>/s]

$t_r$  : Temps de refroidissement [s]

$\delta$  : Epaisseur des pièces à souder [cm]

$\delta^*$  : Epaisseur de transition [cm]

$y_0$  : Distance du point considéré [m]

$R_e$  : limite élastique [MPa]

HV : dureté Vickers

Z : allongement à la striction

A : allongement [%]

K : résilience [J/cm<sup>2</sup>]

I : intensité [A]

U : tension [V]

CC : cubique centrée

CFC : cubique à face centrée

$\alpha$  : la ferrite

$\gamma$  : austénite

$\delta$  : la ferrite  $\delta$

$M_s$  : martensite start

$M_f$  : martensite finish

$\text{Fe}_3\text{C}$  : cémentite

P : perlite

Fe : fer

MB : métal de base

ZL : zone de liaison

ZF : zone fondue

ZAT : zone affectée thermiquement

TIG : Tungstène Inert Gaz

MIG : Metal Inert Gaz

MAG : Metal Activ Gaz

K : température en kelvin

T<sub>f</sub>: température de fusion

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Les problèmes d'assemblage sont très anciens, depuis le temps préhistorique, l'homme a cherché à concevoir des assemblages pour créer des produits répondant à des fonctions bien précises ; A l'heure actuelle presque tous les produits manufacturés comportent une liaison et la qualité de ce produit dépend en grande partie de la qualité de celle-ci.

Parmi les procédés d'assemblage, le soudage tient une place importante pour des multiples applications dans des secteurs industriels aussi nombreux que variés (mécanique, l'aéronautique, nucléaire, naval, pétrolière, etc...). La compréhension de ce procédé requiert un investissement à la fois scientifique et technologique. Ou le développement actuel des procédés de soudage est axé vers le perfectionnement des techniques d'utilisation (procédures, métallurgie, et équipement), vers l'introduction des robots industriels et de la programmation, vers l'application des nouvelles sources d'énergie (LASER).

Les procédés de soudage, provoquant des transformations à hautes températures, induisent des conséquences métallurgiques, ayant des répercussions sur les propriétés mécaniques, qu'il est difficile de maîtriser.

Notre travail consiste à maîtriser le procédé du soudage MAG (Metal Active Gaz) et optimiser ces paramètres, aussi de caractériser une liaison bimétallique réalisée avec ce dernier en variant à chaque fois les paramètres de soudage. Cette investigation est réalisée à ENMTP (entreprise nationale du matériel des travaux public) de BEJAIA.

La présente étude est scindée en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique des aciers.
- Le soudage et ces différents procédés sont décrits dans le deuxième chapitre.
- Le troisième chapitre s'articule à la description du procédé de soudage MAG (Metal Actif Gaz).
- Le quatrième chapitre est consacré à la description de la procédure et des différentes techniques et méthodes expérimentales.
- Les résultats expérimentaux et leurs interprétations font l'objet du dernier chapitre.

On termine par une conclusion générale où on présente les principaux résultats obtenus.

*Présentation de  
l'entreprise*

### **I.1. Présentation de l'ENMTP**

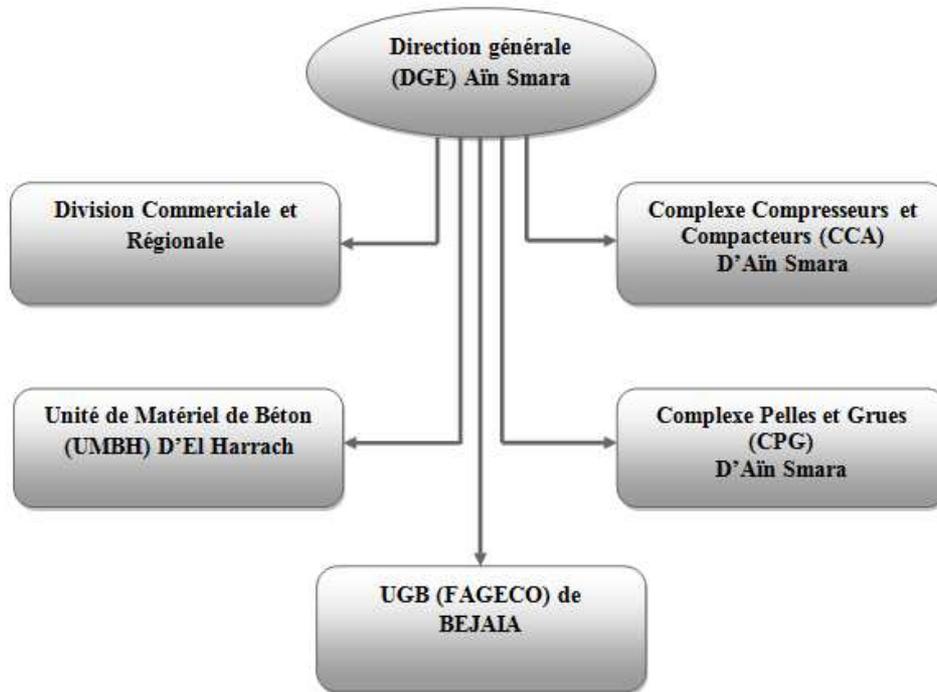
L'entreprise nationale des matériels de travaux publics est spécialisée dans le domaine de développement de tout processus de fabrications et de distribution entrant dans la filière de travaux publics, de l'industrie mécaniques et métalliques. Son potentiel est considéré comme l'un des plus importants d'Afrique.

Créée suite au décret n°83-06 du 01 janvier 1983 après la restructuration des entreprises SONACOME et SN METAL, l'ENMTP a subi une transformation en société par actions (SPA) le 09 juin 1995; elle est dotée d'un capital de l'ordre de 2.200.000.000 DA et gère un potentiel effectif de l'ordre de 2642 employés.

L'entreprise développe plusieurs produits conçus par des constructeurs mondialement reconnus tels que LIEBHERR (Allemagne) pour la fabrication des pelles et des grues, FIAT-ALLIS (Italie) pour la fabrication des bulldozers et enfin POTAIN (France) pour la fabrication des grues de bâtiments.

Le siège social de l'ENMTP est basé à Aïn Smara (Constantine) et dispose des unités de production :

- Complexe Pelle et Grues (CPG) d'Aïn Smara (Constantine), entré en production en 1980.
- Complexe Compresseurs et Compacteurs (CCA) d'Aïn Smara (Constantine), entré en production en 1986.
- Unité de Matériel de Béton (UMBH) d'El Harrach (Alger), entrée en production en 1973.
- Unité Grue de Bejaïa (UGB), entrée en production en 1973.



**Figure. 1** : Organigramme de l'ENMTP

## **I.2. Présentation de (UGB)**

L'Unité Grue de Bejaïa a été créée le 19 novembre 1971 par la société mère SN METAL, elle a été intégrée par la suite à l'ENMTP suite au décret n°83-14 du 01 janvier 1983.

L'UGB fabriquait des grues de bâtiments, et c'est à partir de 1980 qu'une nouvelle gamme de produits a été lancée (grue à montage rapide).

L'UGB est implantée dans la zone industrielle de Bejaïa, où toutes les infrastructures sont distantes d'un rayon ne dépassant pas les 03 km, à l'instar des chemins de fer, du port ou de l'aéroport. Elle est limitée par :

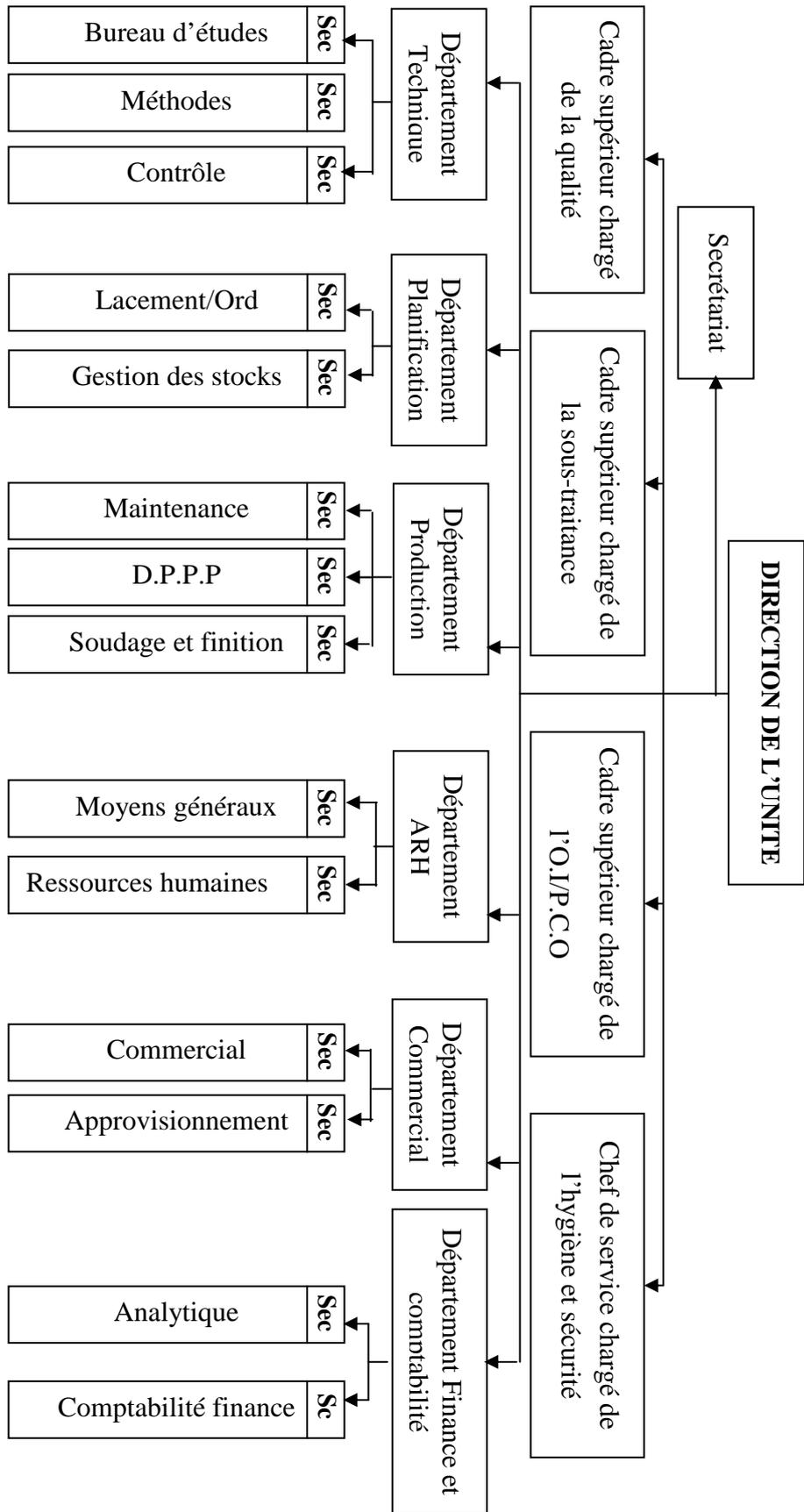
- La Société des Industries des Métaux de Bejaïa (SIMB) au nord.
- L'usine JUTE au sud.
- Le Complexe des Corps Gras de Bejaïa (COGB) et l'entreprise de préfabrication légère en aluminium de Bejaïa à l'est.
- L'Entreprise des Travaux de Distribution d'Energie (ETDE) à l'ouest.

L'objectif principal de l'unité est la fabrication et la distribution (livraison) de matériels de travaux publics. Les produits sont multiples et variés tels que les grues de levage, les retro chargeurs, les bennes à béton, etc.

### **I.2.1. Structure de l'UGB**

L'UGB est structurée selon un organigramme préétabli par sa direction générale qui est censé refléter et répondre aux exigences et aux objectifs tracés au préalable. Sa structure est comme suit :

# ORGANIGRAMME DE L'UGB



A.R.H : Administration des ressources humaines

D.P.P.P : Département préparation pièces primaires

O.I/P.C.O: Organisation industrielle/ planification, contrôle et organisation

**CHAPITRE I :**  
*Généralités sur*  
*les aciers*

## I. Définition

L'acier est un alliage de fer et de carbone renfermant au maximum 2% de ce dernier élément. Il peut contenir de petites quantités d'autres éléments incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage; il est considéré alors comme un *acier allié*. La teneur en carbone de certains de ces aciers alliés peut parfois dépasser 2% [1, 2].

### I.1. Diagramme d'équilibre

Les diagrammes d'équilibre constituent la base de toute étude rationnelle des alliages métalliques. Soit un alliage d'une composition chimique donnée. Le diagramme indique sa constitution en phases à toute température, mais à condition qu'il soit en état d'équilibre. De la connaissance des différentes phases, on peut déduire certaines conclusions très importantes concernant les propriétés mécaniques et la maîtrise des traitements thermiques [3].

La solidification des alliages fer-carbone donne naissance à des solutions solides interstitielles d'une part, et de la cémentite ou du graphite d'autre part. De ce fait deux diagrammes d'équilibres peuvent être établis :

- Un diagramme de fer- cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) appelé diagramme métastable ;
- Un diagramme de fer- graphite (G) appelé diagramme stable.

Les différences entre ces deux diagrammes sont les suivantes :

- La teneur en carbone varie de 0 à 6.67% pour le diagramme métastable, par contre pour le diagramme stable elle varie de 0 à 100%.
- La transformation eutectoïde s'effectue à la température de  $727^\circ\text{C}$  pour le diagramme métastable et à une température de  $738^\circ\text{C}$  pour le second.
- La transformation eutectique s'effectue à la température de  $1148^\circ\text{C}$  pour le diagramme métastable et à une température de  $1152^\circ\text{C}$  pour le second [4].

#### I.1.1. Variétés allotropiques du fer

Selon la température à laquelle il se trouve, le fer peut prendre des formes cristallographiques différentes (appelées variétés allotropique). On distingue parmi ces variétés :

- **Le Fer  $\alpha$**  : existe entre la température ambiante et la température de  $912^\circ\text{C}$ . Sa structure est cubique centrée (CC). A la température de  $912^\circ\text{C}$ , son paramètre de maille  $a$  est égal à 0,287 nm.

- **Le Fer  $\gamma$**  : cette forme existe entre les températures de  $912$  et  $1401^\circ\text{C}$ . Le Fer  $\gamma$  cristallise dans le réseau cubique à faces centrées (CFC). Son paramètre de maille  $a$  varie de 0,364 à 0,368 nm.

- **Le Fer  $\delta$**  : il existe entre les températures 1041°C et 1538°C (température de fusion du fer). Sa structure est cubique centré (CC) et son paramètre de maille  $a$  passe de 0,292 à 0,293 nm.

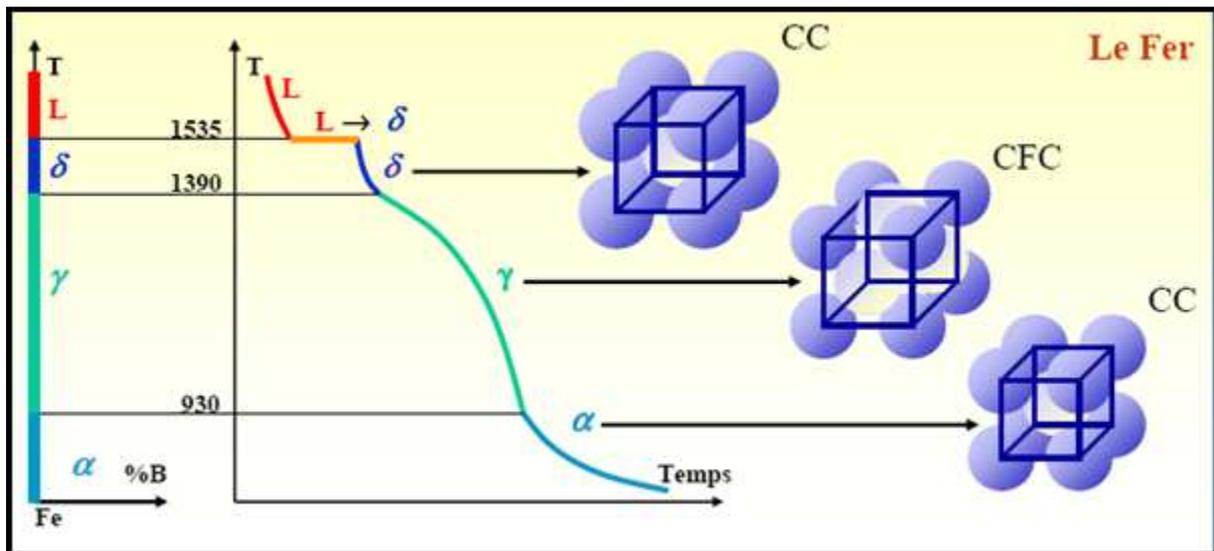


Figure. 1.1 : Variation de la structure cristalline du fer en fonction de la température [4]

### I.1.2. Les différentes phases d'équilibre et hors équilibre

#### a) Constituants d'équilibre

Ils sont obtenus par refroidissement lent ou relativement lent. Leurs noms apparaissent sur le diagramme d'équilibre métastable. Ce sont :

- **La ferrite  $\alpha$**  : C'est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer  $\alpha$ . Elle contient au maximum 0,025% de carbone. L'atome de carbone occupe les centres des faces ou des arêtes du cube formé par fer  $\alpha$ .
- **La ferrite  $\delta$**  : C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le fer  $\delta$ . Elle contient au plus de 0,1% de carbone s'insérant dans les vides laissés par les atomes de fer  $\delta$  (centres des faces ou des arêtes).
- **La cémentite** : C'est une combinaison chimique définie contenant 6,67% de carbone sa formule chimique est  $Fe_3C$ . Elle cristallise dans un système rhomboédrique ( $a=b=c$  ;  $\alpha=\gamma=\beta\neq 90^\circ$ ) à empilement compact. Sa température de fusion avoisine 1550°C.
- **La perlite** : C'est un agrégat de ferrite et de cémentite issu de la transformation eutectoïde du diagramme d'équilibre Fe- $Fe_3C$  à la température eutectoïde 727°C et pour une teneur en carbone de 0.8% C (100 %  $\gamma \rightarrow$  100 % perlite). Elle se présente généralement sous forme de lamelles alternées de ferrite et de cémentite [6].

**b) Constituants hors équilibre**

Ces constituants sont obtenus par refroidissement rapide ou relativement rapide. On distingue :

- **L'austénite  $\gamma$**  : C'est une solution solide d'insertion de carbone dans le Fer  $\gamma$ . Elle contient au plus 2,1% de carbone. L'atome de carbone occupe les centres des arêtes ou le centre du cube formé par le fer  $\gamma$ . L'austénite est très plastique, sa limite d'élasticité et sa charge de rupture est faibles.
- **La martensite** : C'est le produit de la transformation martensitique qui s'obtient à une vitesse de refroidissement assez importante. C'est un constituant hors équilibre qui possède la même composition en carbone que l'austénite qui lui donne naissance, mais sa structure cristalline est différente (passage de la structure cubique à face centrées de l'austénite à la structure quadratique centrée de la martensite). La martensite se forme par une réaction sans diffusion et sa structure se présente sous forme de plaquettes ou sous forme de lattes.
- **La bainite** : C'est un agrégat de carbure et de ferrite, de morphologie différente de celle de la perlite. Elle est issue de la transformation bainitique qui s'obtient si la vitesse de refroidissement plus élevée que celle de la perlite mais inférieure à celle de la martensite. Elle se forme également par un traitement isotherme au dessus du point martensitique supérieur (MS).[2]
- **La troostite** : C'est un agrégat de ferrite et de cémentite. Elle est obtenue à une vitesse de refroidissement moyenne, qui rend cette dernière ultra fine et structurellement hors équilibre. Sa morphologie s'apparente à celle de la perlite mais avec la distance interlamellaire relativement plus faible.
- **La sorbite** : C'est un constituant qui présente la même structure et la même constitution que la troostite, mais elle est obtenue par réchauffage d'un acier trempé martensitique suivi d'un revenu[5].

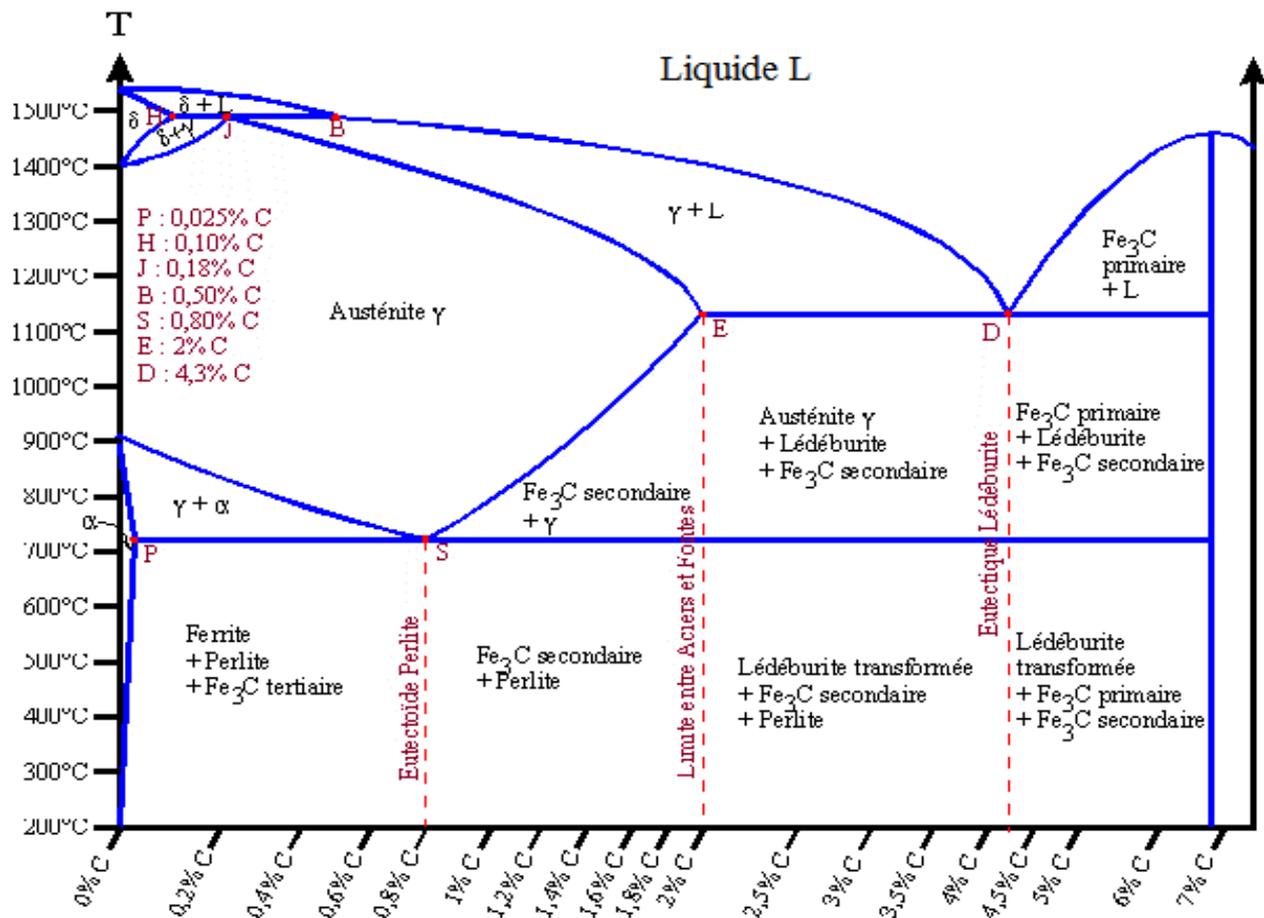


Figure 1.2 : Diagramme Fe-C [5]

## I.2. Classification des aciers

### I.2.1. Selon la teneur en carbone

La structure fer-carbone évolue d'une façon plus complexe en fonction de la température et de la teneur en carbone. On distingue trois types d'aciers:

- **acier eutectoïde** : 0,77% C contient 100% de perlite ;
- **acier hypoeutectoïde** :  $0,02 < C < 0,77$  contient de la perlite ( $\alpha + Fe_3C$ ) et de la ferrite proeutectoïde  $\alpha$ ;
- **acier hypereutectoïde** :  $0,77 < C < 2,11$  contient de la perlite +  $Fe_3C$  proeutectoïde ;

La perlite est un constituant qui caractérise les aciers, la dureté de l'acier dépend de la quantité de perlite [4]. On distingue:

Tableau 1.1 Types d'aciers au carbone [3]

Nuance	Pourcentage de carbone(C)	Emplois
Extra –doux	$C < 0,15$	Tôles pour carrosserie, feuillards, quincailleries, pièces de forge
Doux	$0,15 < C < 0,20$	Charpente métallique, profilés, construction mécanique courante, boulons, fils ordinaires.
Demi-doux	$0,20 < C < 0,30$	Pièces de machines pour applications mécaniques, pièces ou bâtis moulés, pièces forgées.
Demi- dur	$0,30 < C < 0,40$	Petit outillage, éléments de machines agricoles, organes de transmission.
Dur	$0,40 < C < 0,60$	Pièces d'outillage, d'armement, glissières, rails et bandages, ressorts, pièces moulées et traitées.
Extra-dur	$0,60 < C$	Outils d'usage et découpe, câbles, ressorts

### I.2.2. Selon la composition chimique

La classification des aciers selon la composition chimique nous permet de les regrouper dans les deux familles suivantes :

- Les aciers au carbone (aciers non alliés)
- Les aciers alliés.

#### I.2.2.1. Aciers au carbone (non alliés)

##### a) Aciers non alliés

L'acier ordinaire, non allié, est un alliage fer-carbone dont les autres éléments, qui n'ont pas fait l'objet d'une addition volontaire, ont une teneur inférieure à une certaine limite. Ces éléments sont introduits par des nécessités techniques (Mn, Si, parfois Al) ou proviennent des matières premières (P, S et éventuellement Cu, Ni, ..., dans le cas de ferrailles convenables). Cet acier est habituellement dénommé acier de construction d'usage général (régies par la norme NF A 35-501)

Le tableau 1.2 rassemble les neuf nuances les plus utilisées en construction mécanique. Ils sont présentés avec leur désignation normalisée, les teneurs maximales des principaux éléments chimiques, la valeur minimale de la limite d'élasticité  $R_e$ , la valeur limite de la

résistance à la traction  $R_m$  exprimées en MPa et la valeur minimale de l'allongement à rupture  $A$  (en %).

**Tableau 1.2 :** Classification des aciers de construction d'usage général [6]

Nuance	C%	P%	S%	$R_e$ min (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)
A33	-	-	-	176	323-490	18
A34	-	0.060	0.050	167	333-412	26
E24	0.18	0.060	0.050	235	363-441	24
E26	0.20	0.060	0.050	255	412-490	21
E30	0.24	0.050	0.050	274	461-559	21
E36	0.24	0.050	0.050	353	510-608	20
A50	-	0.070	0.050	294	490-588	19
A60	-	0.070	0.050	334	588-706	15
A70	-	0.045	0.045	363	686-833	10

### b) Aciers ordinaires d'usage général

Ce sont les aciers de construction (métallique, mécanique) employés dans la fabrication des éléments de machines, certaines parties de moule d'injection plastique et dans la fabrication de différentes pièces d'automobile et véhicules industriels. En général, la teneur en carbone de ces aciers ne dépasse pas 0,5 à 0,6%. Ils se caractérisent essentiellement par leurs propriétés technologiques importantes.

### c) Aciers non alliés pour traitement thermique

Les aciers non alliés pour traitement thermiques sont définis en fonction de leurs compositions chimiques, contrôlée de manière à garantir leur réponse aux traitements thermiques. Ils sont désignés par les lettres CC.

#### I.2.2.2. Aciers alliés

Les aciers alliés sont essentiellement des alliages fer-carbone qui contiennent au moins un troisième élément M dans le souci d'améliorer davantage leurs propriétés à l'utilisation. L'amélioration des propriétés souhaitées se fait par l'addition en quantité convenable d'un ou de plusieurs éléments. De ce fait, on rencontre :

- Aciers pour traitements thermiques (amélioration de la trempabilité).
- Aciers réfractaires : destinés à résister à la corrosion à chaud (températures supérieures à 450-550°C) dans les milieux corrosifs.
- Aciers inoxydables : dont le fer, le chrome et le nickel sont les éléments fondamentaux. Ils sont équilibrés en fonction des conditions particulières de corrosion

ou des impératifs de caractéristiques mécaniques à haute température. On peut partager cette famille en deux groupes d'aciers, qui sont [7]:

**a) Aciers faiblement alliés :** Un acier est considéré comme faiblement allié si chacun des éléments qui le composent est à moins de 5% du mélange (exemple : 42CD4).

**b) Aciers fortement alliés :** Ce sont des aciers dans lesquels au moins un élément d'addition représente plus de 5% du mélange (exemple : Z200C12). Les autres éléments sont limités le plus possible pour des raisons de soudabilité ou d'aptitude au formage. L'action de ces éléments d'alliage est comme suit :

- **Le chrome** (jusqu'à un peu plus de 2 %), pour augmenter les caractéristiques mécaniques à l'ambiante et la tenue à chaud ainsi que la bonne tenue à la corrosion.
- **Le nickel**, pour améliorer la résistance à la rupture fragile ; il permet de constituer la famille spéciale des aciers au nickel pour emplois à basse température ; les diverses nuances contiennent de 0,5 à 9 % de nickel.
- **Le cuivre** (jusqu'à 1 - 1,5 %) nécessaire pour augmenter les caractéristiques mécaniques et pour modifier la tenue à la corrosion.
- **Le molybdène** (jusqu'à 0,5 %), pour augmenter la trempabilité des tôles très épaisses ( $e > 80$  mm, par exemple) ou pour ajuster les propriétés des aciers trempés revenus. Il permet aussi d'améliorer la tenue à chaud.

On peut combiner plusieurs de ces éléments d'alliage, mais il s'agit de nuances à usage particulier, car l'on préfère, pour des questions de commodité d'emploi, éviter les éléments coûteux et utiliser d'autres procédés de durcissement. Le chrome et le molybdène sont donc essentiellement réservés aux aciers pour emploi à chaud, et le nickel à ceux pour emploi à basse température [6, 8]

#### **d) Les aciers inoxydables**

La dénomination « aciers inoxydables » concerne un ensemble d'alliages ferreux résistants à un grand nombre de milieux corrosifs, dans des limites étendues de températures.

L'élément absolument indispensable pour qu'un acier soit inoxydable est le chrome à teneur suffisante, variable selon les cas, mais toujours supérieure à 12%. La présence du chrome permet la formation en surface d'un film de passivation conférant à l'alliage son caractère « d'inoxidabilité ». L'emploi, des aciers inoxydables doit être considéré sous deux aspects principaux :

- la résistance à la corrosion dans le milieu de service ;
- les propriétés mécaniques exigées par la mise en œuvre et les conditions d'utilisation.

[09]

➤ *Les aciers inoxydables martensitiques* qui contiennent de 12 à 18 % de chrome et des teneurs en carbone variables de 0,1 à 1 % environ.

➤ *Les aciers inoxydables ferritiques* (12 à 20 % de chrome) et super-ferritiques (% chrome > 20) dont la teneur en carbone ne dépasse pas 0,08 % et ne durcissant pas par trempe. Leur composition leur permet de rester ferritiques à toute température et de présenter donc des propriétés mécaniques intéressantes. Mais ils sont mauvais en soudage du fait de la grosseur du grain.

➤ *Les aciers inoxydables austénitiques* avec des teneurs en chrome égales ou supérieures à 17 % et des proportions de nickel (et de manganèse) suffisantes (en général au moins 8 %) pour assurer la stabilité de l'état austénitique à toutes températures. En soudage, il ya risque de fissuration à chaud.

➤ *Les aciers inoxydables austéno-ferritiques* dont la composition (en chrome, nickel, molybdène et silicium) est équilibrée pour conserver à l'état d'emploi une structure mixte constituée d'austénite (30 à 50 %) et de ferrite (70 à 50 %). Cet état confère à ces aciers des performances mécaniques élevées et une résistance particulière des liaisons soudées [10, 11].

### I.2.3. Selon les propriétés d'usage

Selon le domaine d'utilisation, on distingue deux types :

**I.2.3.1. Les aciers rapides :** sont des aciers dits spéciaux, obtenus par une addition importante d'éléments carburigènes tels que le molybdène, le tungstène (14% à 22%), le vanadium, le chrome ( $\leq 6\%$ ), le cobalt ou le titane.

**I.2.3.2. Les aciers à outils :** ce sont des aciers au carbone à plus de 0,6 – 0,7% C et alliés. Pour toutes les étapes de fabrication, on a besoin d'outils dont les conditions d'utilisation peuvent être très variées. Les caractéristiques exigées de ces aciers demandent l'amélioration de la trempabilité, la ténacité, la résistance à l'usure...etc.

### I.3. Désignation des aciers

#### I.3.1. Désignation des aciers (NF EN 10027)

Les aciers sont désignés selon deux systèmes équivalents, étant entendu qu'il existe une relation bi-univoque entre chacune de ces désignations.

Article détaillé : Désignation normalisée des aciers.

Chaque pays a son mode de désignation des aciers. Le schéma ci-contre indique la désignation européenne selon la norme EN10027. Cette norme distingue quatre catégories :

- les aciers non-alliés d'usage général (construction) ;
- les aciers non-alliés spéciaux, pour traitement thermique, malléables, soudables, forgeables...

- les aciers faiblement alliés, pour trempe et revenu ; les éléments d’alliage favorisent la trempabilité et permettent d’avoir des structures martensitiques ou bainitiques, donc des aciers à haute dureté, à haute limite élastique, pour les outils, les ressorts, les roulements...
- les aciers fortement alliés :
  - les aciers inoxydables,
  - les aciers rapides, pour les outils à forte vitesse de coupe comme les forêts.[5]

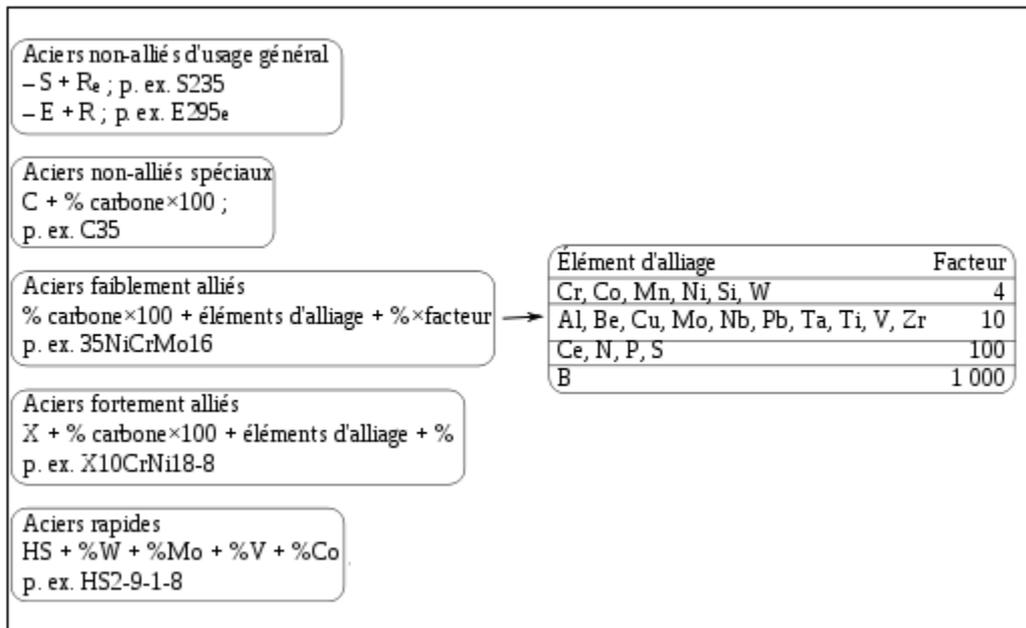


Figure I.3 : Principes de désignation symbolique des aciers selon la norme EN 1007-1-2[5]

### I.3.2. Désignation symbolique des aciers (NF EN 10027-1)

#### I.3.2.1. Aciers désignés à partir de leurs applications et de leurs caractéristiques mécaniques

➤ Une lettre précise le domaine d’application :

S = acier de construction,

P = acier pour appareil à pression,

L = acier pour tubes,

E = acier de construction mécanique, etc.

➤ Une valeur numérique indique soit la limite d’élasticité, soit une propriété physique garantie.

➤ Éventuellement d’autres symboles donnent d’autres propriétés ou les conditions de fabrication.

### I.3.2.2. Aciers désignés selon la composition

➤ **Aciers non alliés avec Mn < 1 %**

Ils sont désignés par la lettre C suivie de la teneur en carbone multipliée par 100.

#### Exemple

C35 = acier avec une teneur en carbone de 0,35 %.

➤ **Aciers non alliés avec Mn > 1 % ou aciers peu alliés dont aucun élément n'est supérieur à 5 %**

Un premier chiffre précise la teneur en carbone multipliée par 100. Les lettres suivantes, selon les abréviations chimiques, indiquent dans l'ordre de concentration les principaux éléments d'alliage. Le ou les chiffres suivants donnent leur teneur multipliée par 4 ou 10, etc., selon les familles précisées au tableau 1.3

**Tableau 1.3 :** Coefficient multiplicateur des éléments d'alliage pour les aciers peu alliés [13]

Norme	Éléments d'alliage	Coefficient multiplicateur
EN ex NFA	Cr, Co, Mn, Ni, Si, W C, K, M, N, S, W	4
EN Ex NFA	Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr A, Be, U, D, Nb, Pb, Ta, T, V	10
EN	N, S, P, Ce	100
EN	B	1 000

#### Exemples

- 10 Cr. Mo 9 – 10 = acier peu ou non allié titrant 0,10 % de carbone, 9/4 soit 2,25 % de chrome et 10/10 soit 1 % de molybdène.
- 100 Cr 6 = acier peu ou non allié titrant 1 % de carbone et 1,5 % de chrome.
- **Aciers fortement alliés dont au moins un élément à une teneur supérieure à 5 %**

Une première lettre X est suivie de la teneur en carbone multipliée par 100. Les lettres suivantes précisent les principaux éléments d'alliages suivies de leurs teneurs en pourcentage.

#### Exemple

- X 6 Cr Ni 18.9 = acier très allié titrant 0,06 % de carbone, 18 % de chrome et 9 % de nickel.
- **Aciers rapides**

Les aciers rapides sont désignés par le symbole HS suivi de trois ou quatre chiffres donnant dans l'ordre les concentrations en pourcentage des éléments W, Mo, V, Co.

**Exemple**

- HS 6-5-2 = acier rapide contenant 6 % de tungstène, 5 % de molybdène, 2 % de vanadium, 0 % de cobalt.

**I.3.2.3 Désignation alphanumérique des aciers (NF EN 10027-2)**

Ces mêmes aciers peuvent être désignés par 5 chiffres :

- le chiffre 1 précise qu'il s'agit d'un acier ;
- un nombre à deux chiffres indique le groupe de l'acier défini selon le type d'acier, sa composition, son usage, etc.
- un numéro d'ordre actuellement à deux chiffres.

Exemple : X5CrNi19-10 = 1.4308, avec **1.** = acier, **43** = acier inoxydable avec Ni < 2,5, sans Mo, Nb et Ti, **08** = numéro d'ordre.[13]

**I.4- Soudabilité des aciers****I.4.1- Définition**

On considère qu'un matériau métallique est soudable à un degré donné par un procédé donné et pour un type d'application donné, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de la quelle il est possible d'assurer la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs caractéristiques locales et les conséquences de leur présence, satisfont aux propriétés requises et choisies comme base de jugement

Comme on peut le remarquer, la soudabilité n'est pas mesurable et dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- La nuance de l'acier (notamment la composition chimique réelle et complète) ;
- Les caractéristiques dimensionnelles (notamment l'épaisseur et les formes des pièces à souder) ;
- Le mode opératoire de soudage (notamment le procédé de soudage) ;
- Le traitement thermique éventuel du joint soudé ;
- Les conditions de service ;

La valeur du carbone équivalent qui est donné par la formule suivante :

$$C_{eq} (\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \dots\dots\dots (1.1)$$

**CHAPITRE I :**  
*Généralités sur*  
*le soudage*

## Introduction

Pendant des millénaires, l'assemblage des métaux fait par forgeage. La fin du 19<sup>ème</sup> siècle marque une rupture, avec l'apparition de procédés de soudage, comme le soudage par résistance et le soudage à l'arc, utilisant l'électricité comme source d'énergie. Les premières électrodes étaient en acier, elles ont été rapidement remplacées par les électrodes en carbone de bernardos pour le soudage à l'arc. En 1904, le suédois Oskar kjellberg invente l'électrode enrobée et la fait breveter. Cette innovation marque une évolution radicale.

A peu près au même moment apparaît le soudage au gaz, utilisant l'actyline et l'oxygène pour produire une flamme dont la température peut atteindre 3100 °C.

A la fin des années 1930, de nouveaux procédés apparaissent, ils détrônent le soudage à l'arc traditionnel (manuel) avec électrode fusible remplacée par un fil-électrode l'autorisation du dévidage.

En 1958, apparaît le soudage par faisceau d'électrons qui, avec le soudage laser relève la catégorie du soudage par faisceau à haute densité d'énergie [2]

### II.1. Définition de l'opération de soudage

Le soudage est une opération consistant à assembler deux éléments métalliques. Il s'agit d'assurer la continuité mécanique entre les parties à assembler avec ou sans l'aide d'un produit d'apport et 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.

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. L'utilisation du métal d'apport répond à deux besoins : tout d'abord, il est nécessaire, d'une part, 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 changer la composition métallographique de la zone fondue afin de lui donner des caractéristiques mécaniques voulues [15].

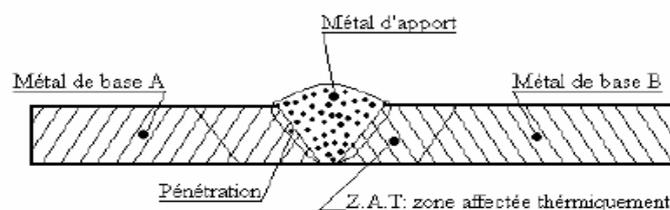


Figure 2.1 : Schéma simplifié de deux métaux de base liés par soudage [15]

## II.2. Types de soudures

On distingue trois types de soudures :

- La soudure homogène, dans laquelle les métaux de base et le métal d'apport éventuel sont tous de même nature,
- La soudure hétérogène de type « A » qui associe des métaux de base de même nature avec un métal d'apport d'une autre nature.
- La soudure hétérogène de type « B » où les métaux de base et le métal d'apport sont tous de natures différentes.

Quand les caractéristiques physico-chimiques des métaux de base et d'apport sont similaires, on dit qu'ils sont homogènes.

La soudure est le joint qui résulte de l'opération. Dans le soudage autogène, les pièces à assembler participent à la constitution du joint.

## II.3. Classification des procédés de soudage

La classification des procédés de soudage se fait en considérant certaines caractéristiques telles que :

- Le type d'énergie mise en œuvre ;
- Les paramètres physiques (température, pression, milieu extérieur) ;
- Le mode d'élaboration de la continuité de la matière (solidification depuis le liquide ou diffusion depuis le solide) ;
- La morphologie de la liaison qu'ils permettent de la réaliser [9].

Il existe à l'heure actuelle des dizaines de procédés de soudage, le plus souvent ils sont classés à partir du type d'énergie utilisée, par exemple : énergie électrique, énergie chimique... etc.

Les principaux procédés de soudage sont présentés sur la figure ci-après :

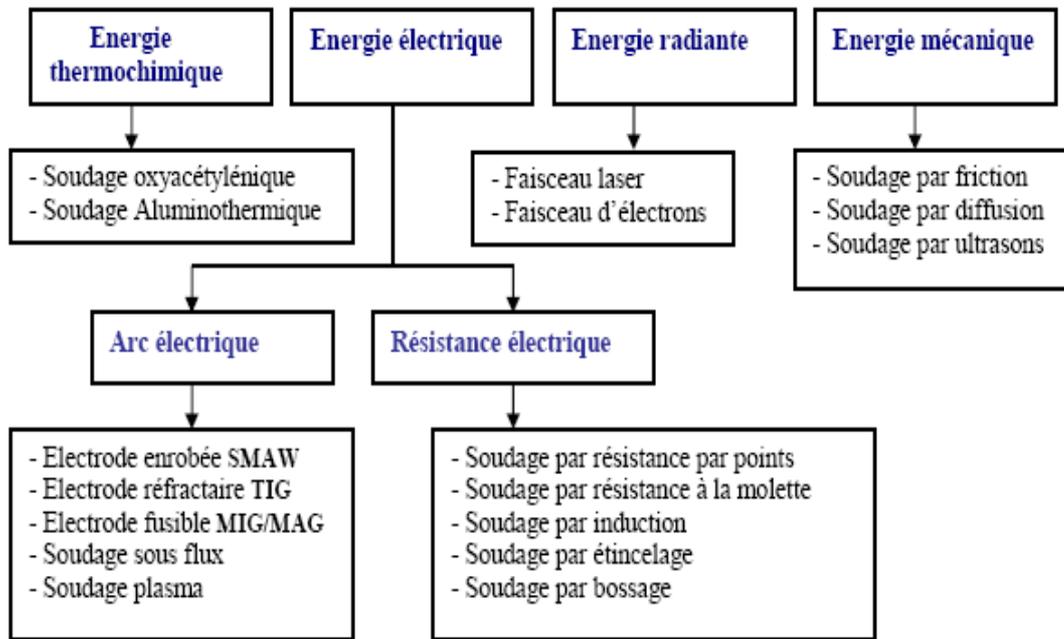


Figure 2.2 : Principaux procédés de soudage en fonction de la source d'énergie [9].

**II.3 .1. Soudage à la forge**

C'est le plus ancien des procédés de soudage. Les bords des pièces à souder sont portés à la température qualifiée de « blanc soudant » (de 950CC à 1050CC) estimée à l'œil par le forger. Une fois la température requise atteinte, les parties à assembler sont juxtaposées puis martelées. Ce procédé s'apparente au brasage car il n'y a pas à proprement parler de fusion ; ce principe est en partie repris dans le soudage par ultrasons.

**II.3 .2. Soudage à la flamme**

Une flamme est dirigée sur la pièce à souder, le métal d'apport étant apporté dans le bain de fusion sous forme d'une baguette tenue à la main.

**II.3 .3. Soudage à l'arc électrique avec électrode enrobée**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par une électrode enrobée fusible et la pièce à souder.

**II.3 .4. Soudage à l'arc électrique sous flux pulvérulent**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant submergés par un flux pulvérulent [15].

**II.3 .5. Soudage TIG (Tungstène Inert Gaz)**

Un arc électrique éclate entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. S'il faut un métal d'apport, celui-ci est amené dans le bain de fusion à la main (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

**II.3 .6. Soudage A-TIG (*Active Tungstène Inert Gaz*)**

Même procédé que le 11G, à la différence près que les pièces sont revêtues d'un flux qui, au passage de l'arc électrique, provoque un effet constricteur sur l'arc électrique. La concentration d'énergie qui en résulte permet une pénétration plus importante. Pour une même consommation d'électricité, l'épaisseur soudée est plus importante qu'en TIG traditionnel.

**II.3 .7. Soudage plasma**

Un plasma électrique est maintenu entre une électrode non fusible en tungstène et la pièce à souder. En cas de besoin d'un métal d'apport, celui-ci est apporté dans le bain de fusion manuellement (baguette d'apport) ou mécaniquement (bobine de fil d'apport).

**II.3.8. Soudage MIG (*Metal Inert Gaz*)**

Un arc électrique s'amorce entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement inerte d'argon ou d'hélium.

**II.3 .9. Soudage MAG (*Metal Active Gaz*)**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué par un fil-électrode nu ou fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder, l'arc et le bain de fusion étant environnés d'une atmosphère protectrice chimiquement active qui peut être du CO<sub>2</sub> ou d'un mélange argon/CO<sub>2</sub>.

**II.3 .10. Soudage au fil fourré**

Un arc électrique éclate entre un métal d'apport constitué en un fil fourré qui se dévide mécaniquement et la pièce à souder. Ce procédé s'apparente au soudage à l'électrode enrobée.

**II.3 .11 Soudage par effet Joule sous flux protecteur**

L'effet Joule est produit entre un fil ou un feuillard qui se dévide mécaniquement dans le bain de fusion formé avec les pièces à souder (ou à revêtir), le bain de fusion étant protégé de l'oxydation par un flux pulvérulent flottant à sa surface. Ce procédé est souvent dénommé « Electrogaz » dont le gaz protecteur est inerte [18].

**II.3 .12. Soudage par résistance**

Des électrodes non fusibles et refroidies pincent adéquatement deux pièces superposées et conduisent un courant électrique ; la température de fusion est atteinte par effet Joule à l'interface des pièces à souder et le soudage s'effectue lors du pincement.

**II.3 .13. Soudage par étincelage**

Des étincelles éclatent entre les bords des pièces à souder. Une fois la fusion obtenue, les bords à souder sont vivement rapprochés jusqu'à provoquer l'éjection de la phase liquide et des impuretés éventuelles. Puis, on maintient l'ensemble sous pression.

**II.3 .14. Soudage par décharge de condensateur**

Les pièces sont maintenues en contact jusqu'à décharge d'un condensateur libérant ainsi l'énergie nécessaire à la production du bain de fusion. Les pièces sont maintenues pressées l'une contre l'autre jusqu'à la solidification du joint (ce procédé est très utilisé pour le soudage de fil thermocouple sur paroi métallique).

**II.3 .15. Soudage par faisceau d'électrons**

Un faisceau d'électrons bombarde les pièces à souder et produit une source de chaleur tridimensionnelle étroite et intense formant un trou ou un tunnel débouchant à travers les matériaux et se déplaçant le long du joint à souder ; la machine et les pièces à assembler sont maintenues dans une enceinte sous vide [10].

**II.3 .16. Soudage par faisceau laser**

Technique similaire à la précédente, le faisceau d'électrons est remplacé par un faisceau laser et le soudage n'est pas effectué sous vide.

**II.3 .17. Soudage par ultrasons**

C'est un procédé de soudage à l'état solide car la température atteinte est comprise entre 30 à 50% de la température de fusion. Les surfaces à assembler sont maintenues en position par des sonotrodes reliées à un transducteur d'ultrasons. Les vibrations ultrasoniques communiquées aux pièces à souder portent l'interface à un état pâteux qui, associé aux efforts mécaniques appropriés, permet de créer une zone de liaison comparable à celle d'une soudure. Cette technique s'apparente au brasage.

**II.3 .18. Soudage par aluminothermie**

Une réaction exothermique est provoquée au sein d'un mélange approprié d'oxydes métalliques et d'agents réducteurs maintenu entre les bords de pièces à assembler. Une fois la réaction amorcée, le mélange exothermique et les bords des pièces entrent en fusion et forment le joint soudé, contenu généralement dans une coquille réfractaire [10].

**II.3 .19. Soudage par friction**

Les bords des pièces à souder sont maintenues l'un contre l'autre et mis en mouvement jusqu'à ce que le frottement provoque la fusion, les pièces sont alors vivement rapprochées et maintenues sous pression.

#### II.4. Différentes parties d'un assemblage soudé

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

- Joint** : c'est l'espace qui sépare les deux côtés de la pièce à assembler de géométrie variable.
- Cordon de soudure** : c'est la zone fondue (ZF) de l'assemblage soudé après exécution.
- Bain de fusion** : c'est le volume porté à l'état liquide pendant l'opération de soudage.
- Pénétration** : c'est la cote P de pénétration du métal fondu dans le métal de base.

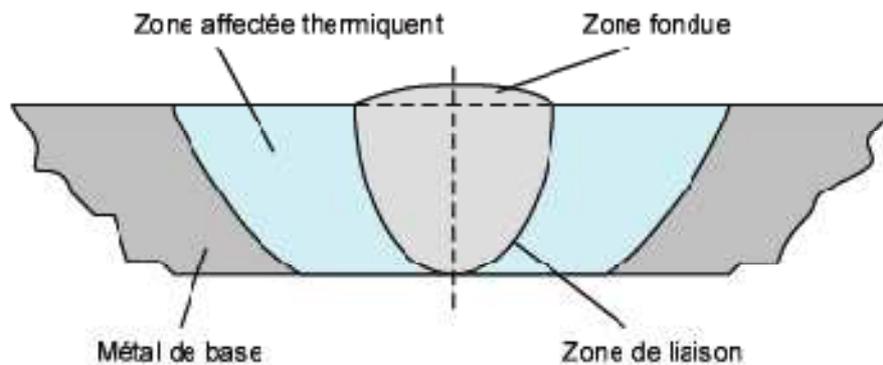


Figure II.3 : Schématisation des parties sus-citées et leurs localisation [10].

#### II.5. Différents parties d'une soudure

**II.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.

**II.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.

**II.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.

**II.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.

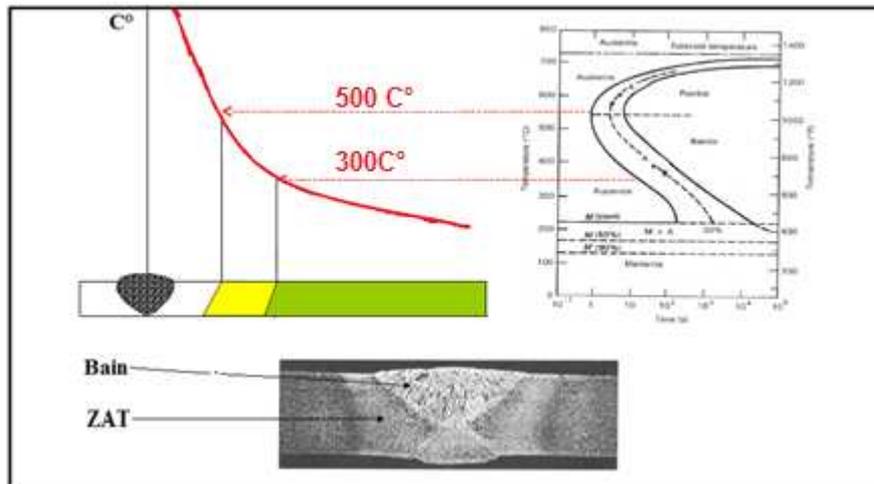


Figure 2.4 : Présentation du bain fondu et la zone affectée thermiquement [9]

### Conclusion :

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celle du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait :

- Des rapides changements de température (élévation de température et refroidissement).
- Du faible temps de maintien.
- De la température maximale.
- De la localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides.

Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique des matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile.

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques,...
- Le couple métal d'apport – gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter.

- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée [16].

$$E = \eta \frac{UI}{v_s} 60 \quad [\text{J/cm}] \quad (2.1)$$

## II.6. Métallurgie du soudage

Le principe des différents procédés de soudage montre qu'un certain nombre de phénomènes métallurgiques peuvent être observés. Dans cette partie nous allons revenir en détail sur ces différents phénomènes :

### II.6.1. Cycles thermiques de soudage

L'interprétation de tous les phénomènes résultant d'un effet thermique requiert comme condition nécessaire, la connaissance de la température atteinte. A cette condition de température s'ajoutent une ou plusieurs conditions de temps comme par exemple, du séjour à température donnée de chauffage ou de refroidissement. Pour interpréter les phénomènes qui prennent naissance, durant l'opération de soudage en un point donné de l'assemblage il faut connaître le cycle thermique de soudage, c'est à dire la variation de la température (T) en fonction du temps (t). La courbe  $T = f(t)$  tracée en un point A voisin d'une soudure nous renseigne sur les grandeurs suivantes :

- La température maximale atteinte  $T_m$
- Le temps de séjours  $t_s$  au-dessus d'une température
- La loi du refroidissement traduite par le temps de refroidissement entre deux températures,  $T_1=850\text{ C}^\circ$  et  $T_2=500\text{ C}^\circ$  ou par la vitesse de refroidissement  $V_R$  à une température  $T_R$ .

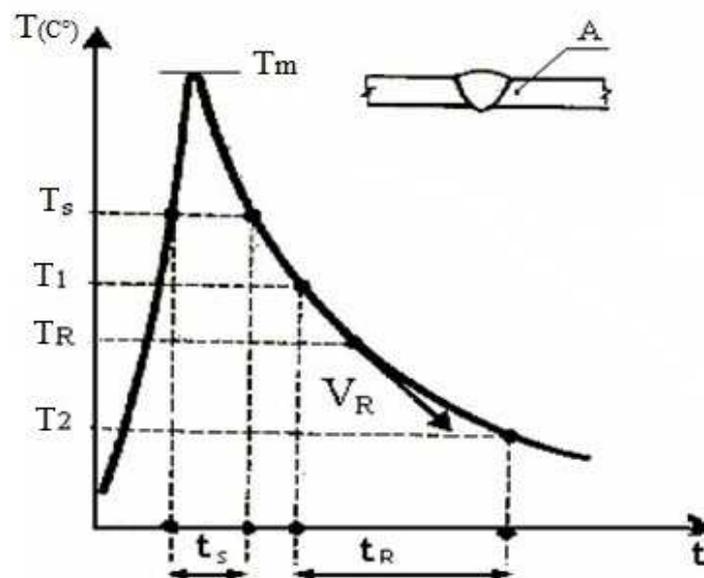


Figure 2.5 : Cycle thermique de soudage [17].

Ainsi déterminées en un point de l'assemblage, les grandeurs associées au cycle thermique nous permettent d'accéder à la connaissance ou la prévision des phénomènes métallurgiques qui prennent naissance, telles que les modifications de structure ou de transformation à l'échauffement et/ou au refroidissement.

Le cycle thermique est déterminé pratiquement à l'aide d'un thermocouple placé dans un trou foré dans la pièce faisant l'objet des mesures (T-t). Ce dernier est placé à une distance (x0, y0, z0) de la source de chaleur mobile ou on veut mesurer le cycle (T-t).

Dans le cas d'écoulement de chaleur bidimensionnel ou tridimensionnel, les grandeurs précitées peuvent-être déterminées aussi par les relations mathématiques suivantes :

▲ Température maximale :

$$T_m = \frac{0.484 \cdot q}{v \cdot c_p \cdot 2 \cdot y_0 \cdot \delta} + T_0 \quad [C^\circ] \quad (2.2)$$

▲ Température a une distance y0 de la source mobile à un temps donné :

$$T(y_0, t) = \left( \frac{q}{v \cdot \delta \cdot \sqrt{4\pi \cdot \lambda \cdot c_p \cdot t}} \right) \text{Exp}^{-y_0^2/4a \cdot t} + T_0 \quad [C^\circ] \quad (2.3)$$

▲ Temps de refroidissement (tr) entre 850 et 500 C° :

A deux dimensions :

$$tr_{2d \ 850/500} = \left( \frac{1}{4\pi \cdot \lambda \cdot c_p} \right) \cdot \left( \frac{E}{\delta} \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(850-T_0)^2} \right] \quad [s] \quad (2.4)$$

A trois dimensions :

$$tr_{3d \ 850/500} = \left( \frac{1}{2\pi \cdot \lambda} \right) \cdot E \cdot \left[ \frac{1}{(500-T_0)} - \frac{1}{(850-T_0)} \right] \quad [s] \quad (2.5)$$

Epaisseur de transition:

$$\delta^* = \sqrt{(E/2C_p) \cdot [1/(500 - T_0) + 1/(850 - T_0)]} \quad [cm] \quad (2.6)$$

Le temps de refroidissement est calculé soit:

- Par la relation (IV-3) si  $\delta < \delta^*$  ;
- Par la relation (IV-4) si  $\delta > \delta^*$  ;

### II.6 .2. Phénomènes métallurgiques

La figure (**Figure 2.6**) schématise les phénomènes métallurgiques intervenant au cours d'un cycle de soudage. Le cycle thermique peut être divisé en deux périodes : le chauffage et le refroidissement.

La première période est caractérisée par la vitesse de chauffage  $V_c$  et par la température maximale  $T_m$  atteinte.

L'importance de la zone affectée par l'élévation de température est fonction pour un matériau et une pièce donné, de l'énergie de soudage et de la température initiale des pièces.

Cette élévation de température va se traduire par l'apparition d'une zone austénitisée (ZAT) définie pour les aciers par l'inégalité :  $T_m > A_{c3}$  ( $A_{c3}$  étant fonction des conditions de chauffage).

Le chauffage se traduit par les phénomènes suivants :

- Austénitisation.
- Grossissement du grain.
- Recristallisation.
- Dissolution des carbures.

La deuxième période est caractérisée par la vitesse de refroidissement  $V_r$  ou le temps de refroidissement entre 850 et 500°C ;  $tr_{850-500}$ .

Les études métallurgiques portent le plus souvent, mais pas uniquement, sur les transformations intervenant dans la zone austénitisée précédente. Au cours du refroidissement, la transformation de cette dernière est fonction :

- De la vitesse  $V_r$  ou du paramètre  $tr_{850/500}$ .
- De l'état de l'austénite de départ.
- De la composition chimique de l'acier soudé. [17]

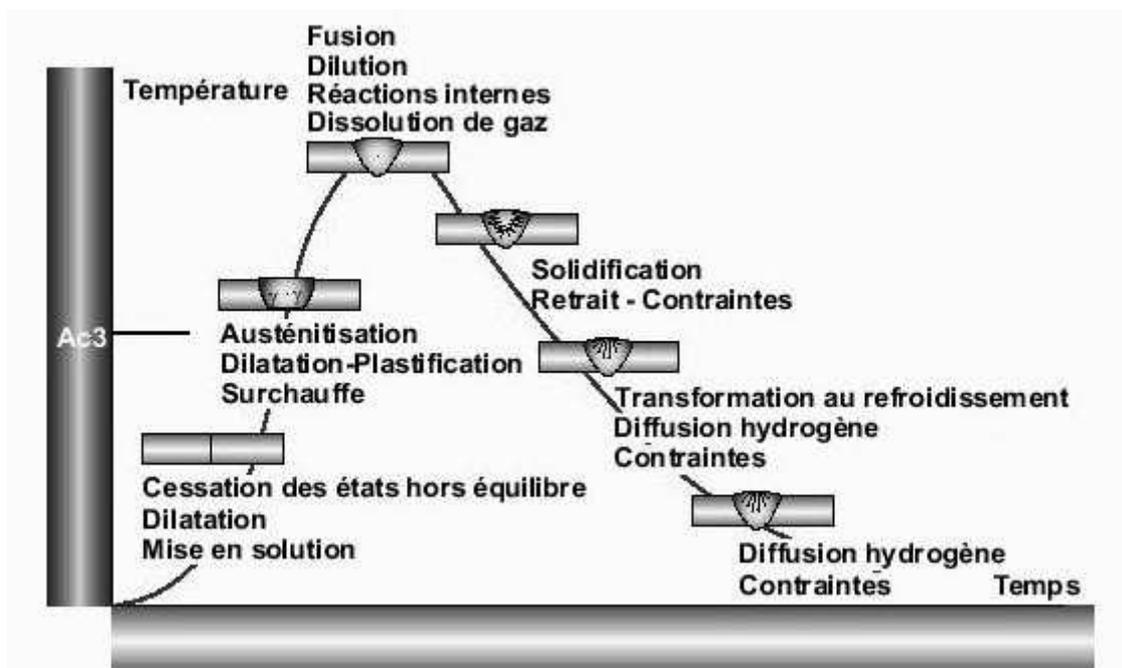


Figure 2.6 : Phénomènes métallurgique au cours du soudage [17].

### II.6 .3. Transformations au soudage

#### II.6 .3 .1 Transformations au chauffage

##### a) Austénitisation

La formation de l'austénite à partir de la perlite devient possible après une faible surchauffe au-dessus du point Ac1. Cette formation s'explique par le fait qu'au-dessus d'Ac1 l'énergie libre de l'austénite est plus faible que celle du mélange  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ . L'austénite obtenue sera caractérisée par son homogénéité, la présence ou non de carbures résiduels, la grosseur des grains.

##### b) Recristallisation

Il s'agit d'une réorganisation du réseau cristallin et donc des grains d'un alliage, par suite d'un échauffement à partir d'un état écroui. Ce phénomène s'opère avec la température avec les phases suivantes :

- Pour une température dite de recristallisation, apparition de germes.
- A partir de ces germes, recristallisation primaire avec des grains fins.
- pour des températures plus ,levées recristallisation secondaire et surchauffe. La taille du grain obtenu en fonction de la température atteinte et du taux d'écrouissage initial.

##### c) Grossissement du grain

Le grossissement du grain commence à une température légèrement supérieure à Ac3, puis se prolonge jusqu'à une température critique Thermodynamiquement, la croissance du grain austénitique s'explique par la tendance du système à diminuer l'énergie libre par réduction de la surface enveloppe des grains. Les grains grossissent en accaparant d'autres grains plus petits, donc moins stables du point de vue thermodynamique. Le grossissement du grain est fonction :

- De la température.
- Du temps de maintien.
- Des éléments d'alliage.

##### d) Dissolution des carbures

La présence d'éléments d'alliage carburigènes se traduit par l'obtention de carbures (précipités) dont la composition peut être variable suivant celle de l'alliage. Au cours du chauffage, ces carbures se mettent en général en solution dans un certain domaine de températures. Mais cette mise en solution peut être précédée d'un changement de composition des carbures. Pour des conditions de chauffage imposées (vitesse essentiellement), le décalage des points de

dissolution vers les hautes températures est d'autant plus important que les carbures initiaux soient plus gros, plus globulaires et ont une composition plus proche de l'état d'équilibre.

### II.6 .3 .2. Transformations au refroidissement

On note deux types de transformations :

- Les transformations indépendantes du temps : transformation martensitique,
- Les transformations fonctions du temps : transformations perlitiques et bainitiques.

#### a) Transformations indépendantes du temps

➤ Ces transformations se produisent pour des refroidissements rapides et se traduisent par l'apparition de structures hors d'équilibre (martensite). Les caractéristiques de la transformation martensitique sont les suivantes :

- Il n'y a pas de diffusion des atomes de C, il s'agit d'une transformation d'une phase en une nouvelle phase de même composition.
- La transformation est indépendante du temps, à vitesse élevée.
- La transformation commence à la température  $M_s$  et s'achève à la température  $M_f$  [18].
- Pour les aciers contenant plus de 0,7%C, un risque de formation de  $\gamma$  résiduelle est possible.

#### b) Transformations fonctions du temps

Ces transformations se produisent pour des refroidissements lents et se traduisent par un retour vers des structures d'équilibre (perlite) ou des structures intermédiaires (bainite).

##### b.1) Transformation perlitique

Le mécanisme de la transformation perlitique est le suivant :

- La transformation se fait par diffusion des atomes de C.
- Dans un premier temps, on assiste à la précipitation de ferrite aux joints de grains provoquant un enrichissement en C de l'austénite résiduelle.
- Il y a ensuite formation de germes de cémentite qui se développent dans l'austénite en donnant une structure lamellaire.

Le nombre de germe et donc la finesse de la structure, dépend de la vitesse de refroidissement.

Quand la vitesse augmente, le nombre de germes augmente et la structure devient plus fine.

##### b.2) Transformation bainitique

Cette transformation est intermédiaire entre les deux précédentes.

On assiste d'abord à un réarrangement, par diffusion, des atomes de C dans l'austénite, puis à la précipitation en  $\alpha + Fe_3C$  sans diffusion

On distingue deux types de bainite :

- La bainite supérieure (structure grossière, peu résiliente),
- La bainite inférieure (structure aciculaire, voisine de la martensite) [16 .17]

**II.6. 4. Localisation des transformations**

La localisation au chauffage entraîne au niveau du joint une succession de zones présentant des transformations métallurgiques diverses. Pour les aciers, en partant de la zone fondue vers le métal de la zone de surchauffe (figure 2.7) on observe :

- La zone austénitisée totale avec transformation martensitique totale ou partielle,
- La zone austénitisée partielle,
- La zone non austénitisée.

L'importance et la structure de ces zones dépendent du cycle thermique et de la répartition thermique dans l'assemblage.

Il faut noter également le fait que dans le soudage multi passe, ces zones peuvent être totalement ou partiellement détruites.

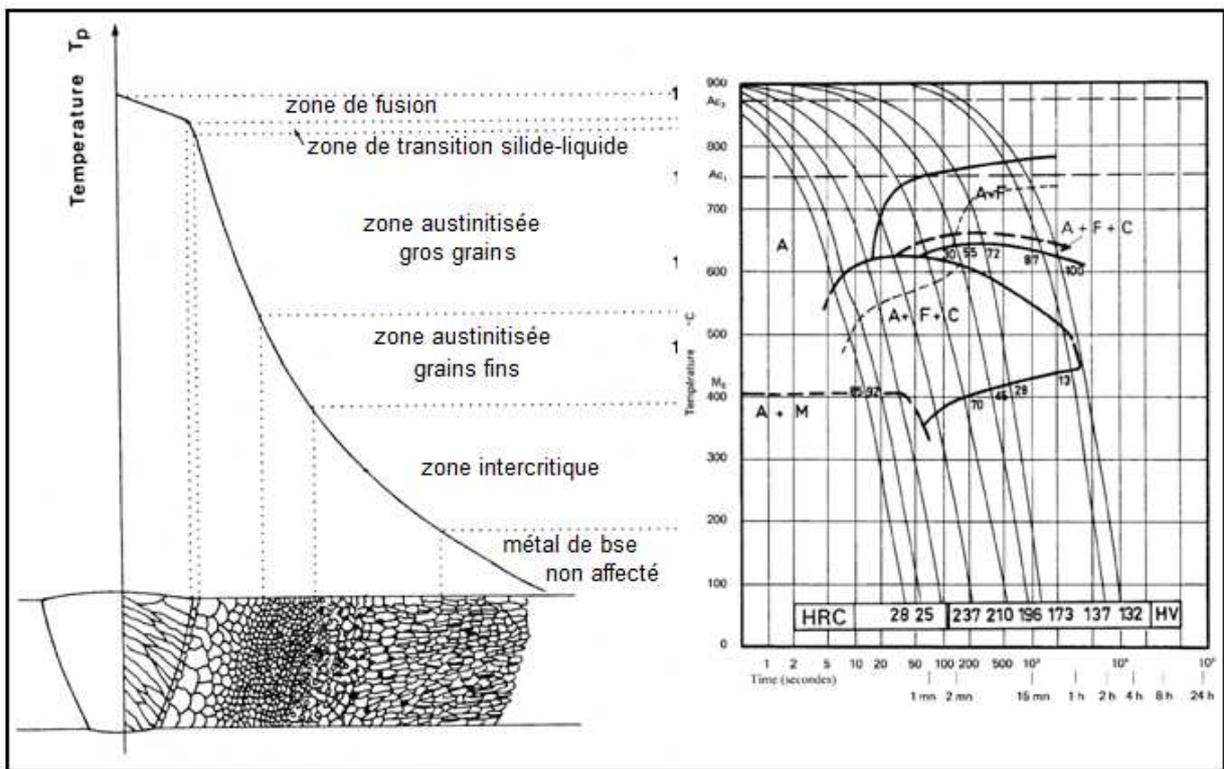


Figure 2.7: Identification des différentes structures métallurgiques d'un joint soudé selon le gradient des températures maximales atteintes et le diagramme d'équilibre Fer-Fe3C [17]

**II.7. Avantages de soudage par rapport à d'autres techniques d'assemblage**

- Il assure une continuité métallique de la pièce, lui conférant ainsi des caractéristiques au niveau de l'assemblage équivalentes à celles du métal assemble (mécanique, thermique, chimique,...) ;

- Il répond à des sollicitations élevées ;
- Il est durable (insensible aux variations de température, aux conditions climatique..);
- Il garantit l'étanchéité de la pièce soudée. [18]

### II.8. Critères de choix d'un procédé de soudage

Chaque procédé a ses avantages et ses inconvénients selon l'application, selon que l'on soude en atelier, ou en extérieur, selon l'accessibilité de la pièce et selon les possibilités d'utiliser ou non des robots.

Quand on choisit un procédé de soudage, il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre de facteurs :

- L'épaisseur du matériau à souder ;
- La composition de l'acier ;
- Le lieu où la soudure doit être faite ;
- L'accès au joint ;
- La position de soudage (à plat, verticale, au plafond...);
- Le rendement du procédé [16]

### II.9. Les principaux défauts de soudage

Les défauts d'une soudure ou de la zone de métal de base qui lui adhère réduisent d'une certaine façon la résistance mécanique de l'assemblage

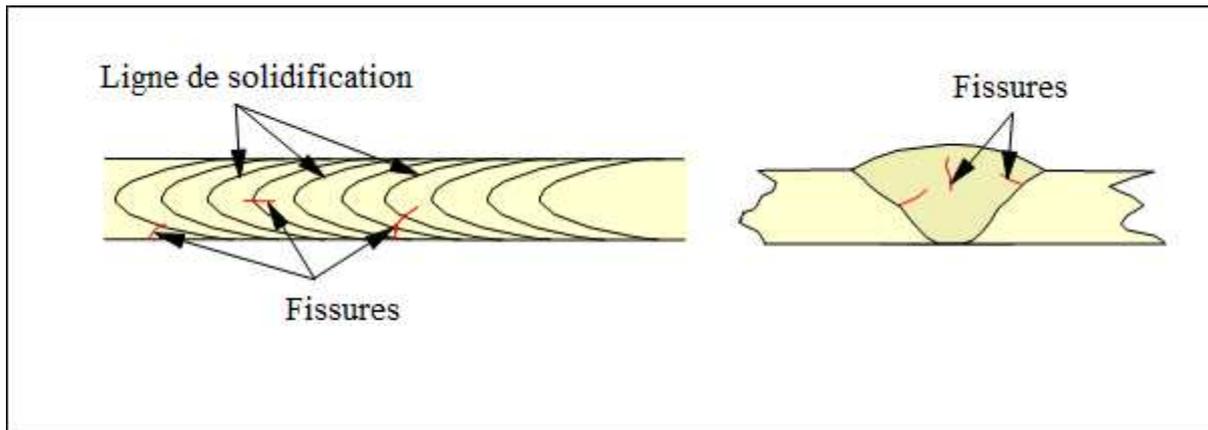
Parmi les principaux défauts des soudures, on distingue :

#### II.9.1. Fissuration à chaud

Sous ce vocable nous regroupons les fissures de solidification, les fissures de liquation et les fissures résultant d'un manque de ductilité à haute température.

A titre d'exemple, les fissures de solidification.

Apparaissent en fin de solidification. Elles peuvent être internes ou déboucher en surface mais elles sont toujours localisées dans les espaces interdendritiques et suivent donc les directions de solidification (figure 2.8). De ce fait, elles sont en tous points perpendiculaires aux isothermes. Comme elles se forment à haute température, elles sont oxydées au contact de l'air en débouchant en surface. Enfin elles sont toujours larges du fait de la contraction du métal environnant durant le refroidissement. Ce germe de fissuration se manifeste généralement en soudage des aciers austénitiques.

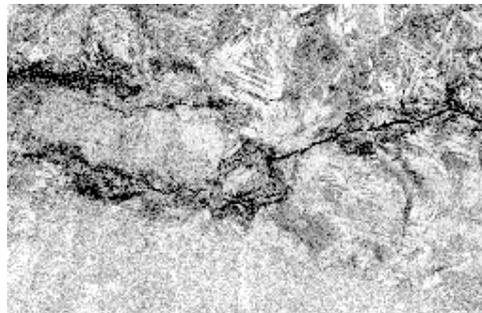


**Figure 2.8 :** *Localisations des fissures de solidification* [

### II.9.2. Fissuration à froid

Ces fissures apparaissent à basse température ( $< 200\text{ °C}$ ). De ce fait, elles sont fines et présentent une surface non oxydée. Elles n'ont pas d'orientation privilégiée par rapport à la microstructure. Elles se développent le plus souvent dans la zone affectée par la chaleur mais peuvent parfois se rencontrer dans le métal fondu lorsque celui-ci possède une très haute limite d'élasticité. Elles sont tributaires du champ de contraintes ce qui explique qu'elles prennent naissance dans les zones de concentration que constituent les défauts de surface (mauvais mouillage, caniveaux) ou les discontinuités liées à la conception de l'assemblage (pénétration partielle par exemple). [19]. Facteurs induisant à ce type de fissure sont :

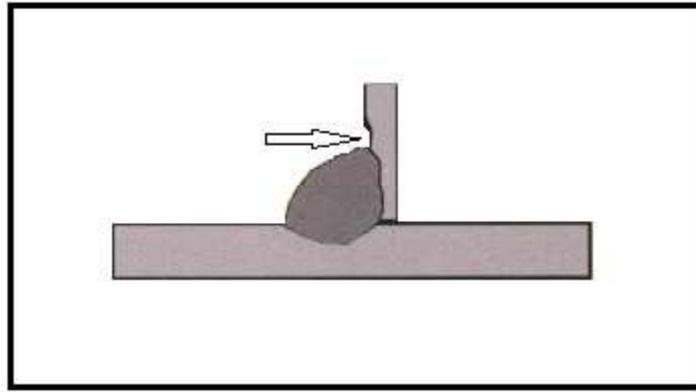
- Régime thermique de surface faible ; ( $V_{\text{refroidissement}}$  rapide) ;
- Teneur en carbone élevé ;
- $V_r$  rapide (martensite) ;
- Diffusion d'hydrogène ;
- Contraintes résiduelles.



**Figure 2.9 :** *Exemple de fissuration à froid*

### II.9.3. Caniveaux

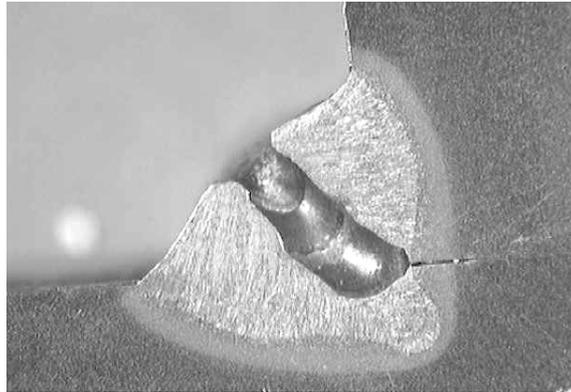
C'est un manque de métal en forme de sillon en bordure du cordon. Ils sont dûs à un courant de soudage trop intense et à une technique opératoire défectueuse.



**Figure 2.10 :** Caniveaux [8]

#### II.9.4. Porosité

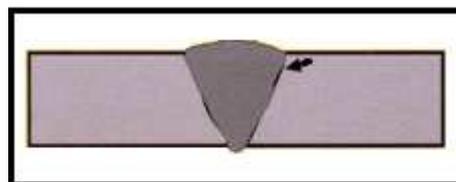
L'apparition des piqures, des soufflures ou des rugosités à la surface du cordon.



**Figure 2.11 :** Soudure en angle de tôles pré-peintes –  
(Porosité résultant de la décomposition de la peinture sous le cordon). [19]

#### II.9.5. Manque de fusion : collage

C'est un manque de liaison entre le métal de base et le métal déposé. Il constitue une entaille aiguë susceptible de jouer le rôle d'amorce pour une fissure de fatigue. Avec les procédés MIG - MAG, les risques de collage sont importants.



**Figure 2.12 :** Collage [8]

### II.9.6. Manque de pénétration

Manque de fusion des 2 bords laissant subsister un intervalle entre les bords. Ce défaut est très dangereux car il réduit la section résistante du cordon et il se situe en racine du cordon où les concentrations de contraintes sont importantes.

De plus, ce défaut est à l'origine d'entailles qui peuvent servir d'amorces de rupture par fatigue.

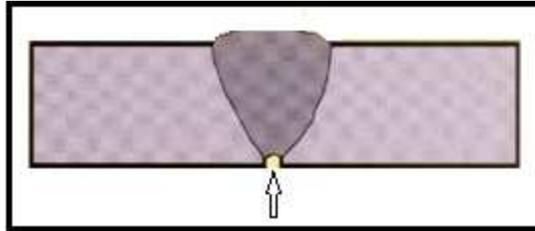


Figure 2.13: Manque de pénétration [8]

### II.9.7. Inclusion de laitier

En soudage à l'arc à l'électrode enrobée, le laitier provient de la fusion des éléments non métalliques de l'enrobage. Celui-ci étant moins dense que le métal fondu, doit normalement flotter à la surface.

Lorsqu'il reste inclus dans le cordon, cela peut provenir :

- Des chanfreins trop étroits
- Du mauvais décrassage entre passes
- Choix de l'électrode
- Du la mauvaise intensité.

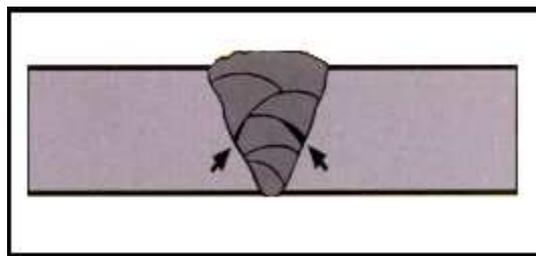


Figure 2.14 : Inclusion de laitier [8]

## II.10. Taux de dilution

### II.10. 1. Principe de la dilution

Lors de l'opération de soudage, une partie du métal ou des métaux de bases est fusionnée par la source de chaleur et se mélange au métal déposé pour former la zone fondue.

### II.10. 2. Mesure de la dilution (dilution du métal de base dans le métal fondu)

La source d'énergie se déplaçant d'un mouvement uniforme, donne lieu à un régime thermique stationnaire. De ce fait le bain prend une dimension constante dans le temps.

Du fait de l'agitation, le métal fondu est un mélange assez homogène du métal d'apport et du métal de base, sa composition chimique dépend de celle des métaux en présence et de la dilution (figure 2.15).

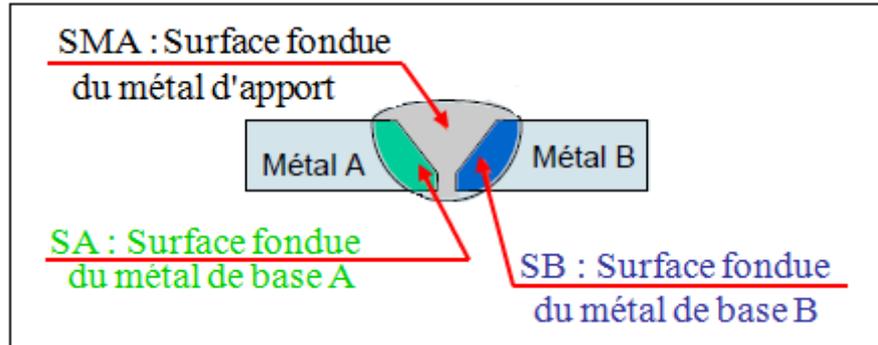


Figure 2.15: Taux de dilution dans la zone fondue

On appelle:

✓ dilution du métal d'apport MA :  $d_A = \frac{SA}{SA+SB+SC}$  (2.7)

✓ dilution du métal de base MB :  $d_B = \frac{SB}{SA+SB+SC}$  (2.8)

✓ dilution du métal de base MC :  $d_C = \frac{SC}{SA+SB+SC}$  (2.9)

Le taux de dilution permet de connaître la composition chimique de la zone fondue :

$$d \% = \frac{\text{volume du métal de base fond u}}{\text{volume de la zone fondue}} \times 100 \quad (2.10)$$

En rapport de surface, cela donne :

$$d \% = \frac{SA + SB}{SA + SB + SMA} \times 100 \quad (2.11)$$

### II.10. 3.Variation du taux de dilution

Le taux de dilution varie suivant le procédé de soudage utilisé :

Procédé TIG (141) : environ 15 à 30%

Procédé ARC E.E (111) : environ 10 à 35%

Procédé MAG (135) : environ 20 à 40%

Procédé A.S.F : environ 60 à 80%

La dilution varie suivant la géométrie des bords à souder mais aussi de l'énergie de soudage appliquée (intensité, tension, vitesse de soudage)

#### II.10. 4. Importance du taux de dilution

La détermination du % de dilution est primordiale lors de l'assemblage par soudage de matériaux dissemblables afin de connaître les structures métallurgiques qui en découlent des zones fondues. Elle permet de sélectionner le type de métal d'apport pour optimiser la soudabilité métallurgique du joint à partir du diagramme de Schaeffler.

#### II.11. Diagramme de SCHAEFFLER

##### II.11.1. L'utilité du diagramme SCHAEFFLER

Le diagramme de Schaeffler permet de prédéterminer la structure métallurgique du métal fondu. La composition chimique des éléments en présence. Il permet aussi de sélectionner un métal d'apport approprié à l'assemblage hétérogène par rapport à un *taux de dilution* déterminé. Le principe est basé sur l'équivalence en Chrome (élément alphagène) et l'équivalence en Nickel (élément gammagène).

Le chrome favorise la ferrite et le nickel favorise l'austénite.

Le diagramme permet d'évaluer aussi la teneur en ferrite d'un assemblage. L'objectif étant d'obtenir un pourcentage de ferrite compris entre 3 et 10%. Afin d'éviter les fissurations à chaud.

La ferrite  $\delta$  de 2 à 4% permet déjà à réduire ce risque en

##### II.11.2. Formules de calcul

*Formule de calcul de l'équivalence Chrome :*

$$\% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5 \times \% \text{ Si} + 0,5 \times \% \text{ Nb} \quad (2.12)$$

*Formule de calcul de l'équivalent Nickel :*

$$\% \text{ Ni} + 30 \times \% \text{ C} + 0,5 \times \% \text{ Mn} \quad (2.13)$$

##### II.11.3. Exemple d'utilisation du diagramme Schaeffler

a) Exemple pour le matériau inoxydable austénitique type **Z 7 CN 18.09** repéré **A** sur le diagramme. Et l'analyse sur produit est représentée sur le tableau 2.1

**Tableau 2.1 :** Composition chimique du matériau Z 7 CN 18.09

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
pourcentage	0,07%	0,75%	2,00%	0,040%	0,015%	18%	9%

(Eq Cr = 19,12 et Eq Ni = 12,1)

Ces valeurs sont reportées sur le diagramme de Schaeffler en abscisse pour l'équivalent Chrome 19,12 et en ordonnée pour l'équivalent Nickel 12,1. La structure est austénitique avec environ 3 % de ferrite.

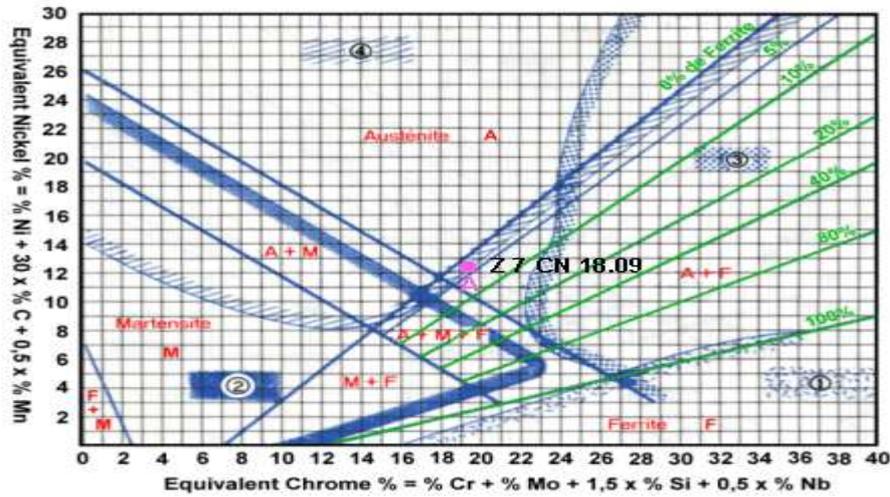


Figure 2.16: Diagramme de schaeffler pour Z 7 CN 18.09

b) Exemple pour l'acier non allié type S 275 J2 G3 repéré B sur le diagramme.

Analyse sur produit :

Tableau 2.2 : Composition chimique du matériau S 275 J2 G3

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Al	N
pourcentage	0,18%	0,030%	1,50%	0,025%	0,020%	0,020%	0,009%

(Eq Cr = 0,1 et Eq Ni = 6,15) ces valeurs sont reportées en abscisse pour l'équivalent Chrome 0,1 et en ordonnée pour l'équivalent Nickel 6,15. Donc la structure du matériau est du type ferritique + martensitique. Traçant une ligne entre les deux points A et B.

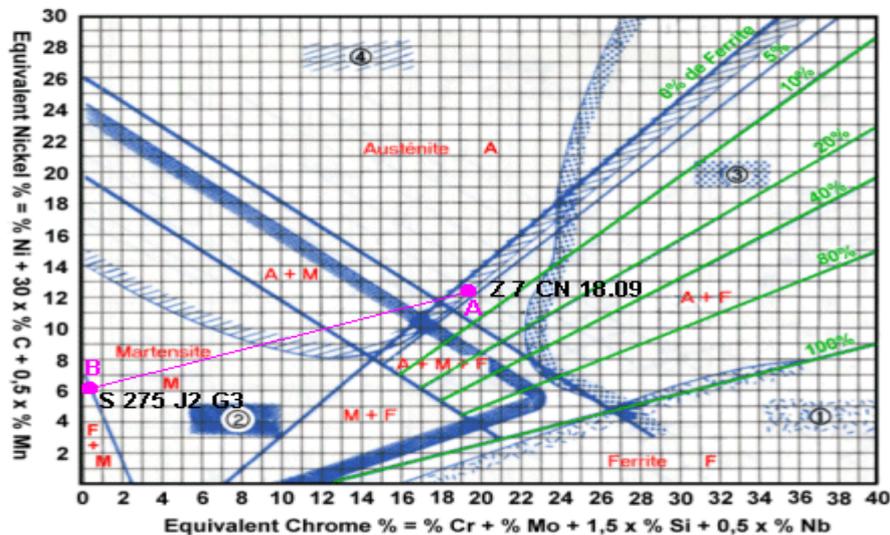


Figure 2.17 : Diagramme de schaeffler pour Z 7 CN 18.09 et S 275 J2 G3

c) Un métal d'apport **ER 309 L** est utilisé de type 24% de chrome et 13% de nickel pour souder les deux nuances sélectionnées ci-dessus afin d'obtenir une structure austéno-ferritique en métal fondu avec un taux de ferrite de 5 à 10%. Le calcul de l'équivalent chrome du métal d'apport donne **24,5** et l'équivalent nickel donne **14,5**. on reporte ces valeurs en abscisse pour l'équivalent Chrome 24,5 et en ordonnée pour l'équivalent Nickel 14,5. on remarque que la structure du métal d'apport est du type austéno-ferritique avec 10% de ferrite.

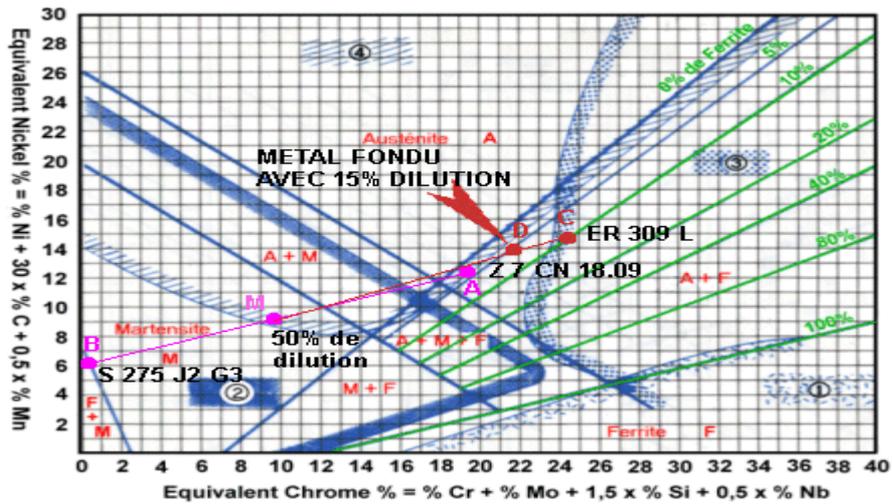


Figure 2.18 : Diagramme de schaeffler montrant le taux de dilution des métaux de base et celui d'apport

Comme elle le représente la figure 2.18, on place un point M sur la droite AB correspondant à la dilution à 50% des métaux de base. On trace en suite une droite entre le point C et le point M. La structure métallurgique du métal fondu suivant le pourcentage de dilution se situe donc sur la droite C. Le point D correspond à 15% de dilution [20].

# **CHAPITRE III :**

## ***Le soudage MAG***

**Introduction**

Le soudage constitue la technique d'assemblage la plus utilisée pour fabriquer les pièces élémentaires de l'ossature d'une charpente métallique, à savoir les poutres, les poteaux et les systèmes de stabilité des structures. Ces éléments, composés de profilés munis de platines d'extrémités, de renforts, de raidisseurs, de goussets, sont réalisés à partir d'aciers de construction de nuance S235 à S355 suivant NF EN 10025 dans des épaisseurs généralement comprises entre 5 et 30 mm. Dans la pratique, deux techniques de soudage couvrent la quasi-totalité de la production en atelier des pièces de bâtiment : le soudage sous flux en poudre ou le procédé MAG automatique pour la reconstitution des profilés, le procédé MAG en mode manuel ou l'un de ses dérivés pour l'assemblage des éléments d'habillage.

Cette rubrique retrace les principes et compare les avantages et inconvénients des deux principales variantes du procédé MAG utilisées dans la profession : le soudage avec un fil d'apport massif et le soudage avec un fil d'apport fourré. Contrairement à certaines idées reçues, l'analyse proposée tend à démontrer que le procédé avec fil fourré sous gaz associe les avantages métallurgiques des électrodes enrobées et des performances technologiques et économiques encore améliorées par rapport à celles obtenues en MAG avec fil plein.

**III.1. Procédé MAG avec fil plein**

Le procédé MAG est une technique de soudage destinée à l'assemblage des aciers non alliés et faiblement alliés. De l'anglais «Metal Active Gas», ce procédé consiste à faire jaillir un arc électrique entre un fil-électrode fusible servant de métal d'apport et les éléments à assembler. Le fil-électrode dévidé en continu, le métal transféré dans l'arc et le bain de fusion sont protégés de l'air ambiant par un flux de gaz actif canalisé par une buse concentrique au fil. En mode manuel, cette technique est plus connue par les soudeurs sous l'appellation de procédé «semi-automatique». [21]

Toujours alimenté en courant continu, l'arc de soudage MAG est établi en polarité inverse. L'électrode fusible étant reliée au pôle positif. Le fil est alors soumis à un flux d'électrons qui favorisent sa fusion et assurent une bonne stabilité de l'arc. Le dévidage du fil à vitesse constante (de 1 à 15 m/min) détermine l'intensité débitée par le générateur. Les densités de courant mises en œuvre sont toujours très élevées.

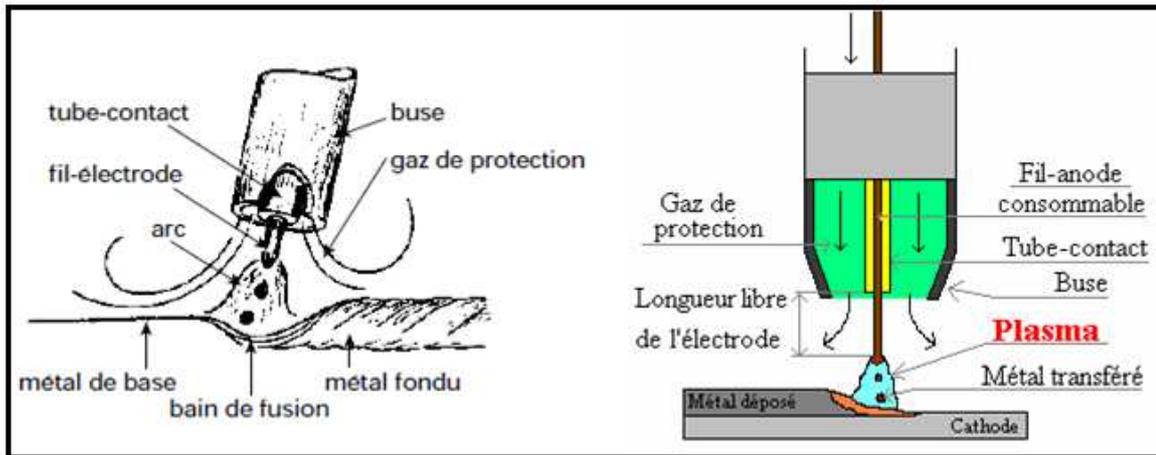


Figure 3.1 : Schéma en coupe de l'extrémité d'une torche de soudage MAG.[22]

### III.2. Différents régimes de soudage MAG

La fusion du fil et le transfert dans l'arc peuvent s'effectuer de différentes manières en fonction de la nature des gaz de protection, de la tension et de l'intensité de l'arc. Ce paragraphe décrit les différents transferts dits spontanés obtenus grâce à des générateurs fournissant une tension et une intensité continue (50 – 650 A). Il aborde aussi les régimes de transfert forcés découlant de l'utilisation de formes d'ondes particulières (utilisation de deux niveaux d'intensité, utilisation d'une source de polarité variable) [15].

#### III.2.1. Transfert par « court-circuit »

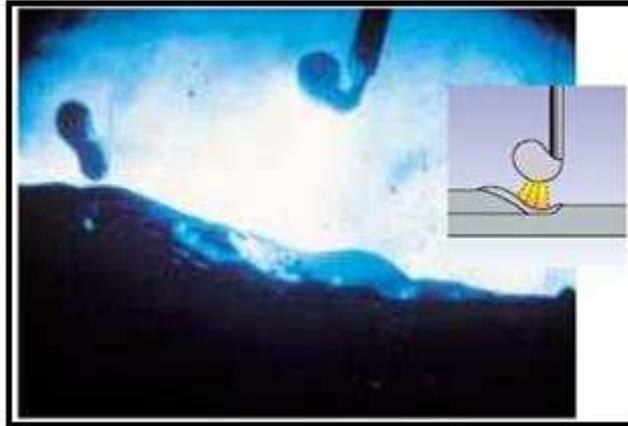
Ce régime est obtenu pour de faibles énergies d'arc (15 à 20V – 50 à 200A). Une goutte se forme au bout du fil, grossit jusqu'à venir en contact avec le bain de fusion.

Avec le court-circuit, le courant augmente rapidement et produit un pincement du fil qui facilite le détachement de la goutte. L'arc se réamorçage et ce même cycle se répète à des fréquences de 50 à 200 Hz. Régime dit « froid », présentant un arc court, le transfert par court-circuit permet de souder les fines épaisseurs et de maîtriser le bain de fusion dans toutes les positions de soudage [20].

#### III.2.2. Transfert par « pulvérisation axiale »

Vers les hautes énergies de soudage et au-delà d'une certaine densité de courant (supérieure à 250 A/mm<sup>2</sup> selon la nature du fil et du gaz de protection), l'extrémité du fil présente un cône allongé. Le transfert qui donne l'apparence d'une veine continue se produit sous forme de fines gouttelettes projetées à grande vitesse dans l'axe du fil. L'arc est long, de 4 à 6 mm. Ce mode de transfert procure un arc stable et peu de projections. Il autorise de fortes pénétrations et des volumes de métal déposé importants.

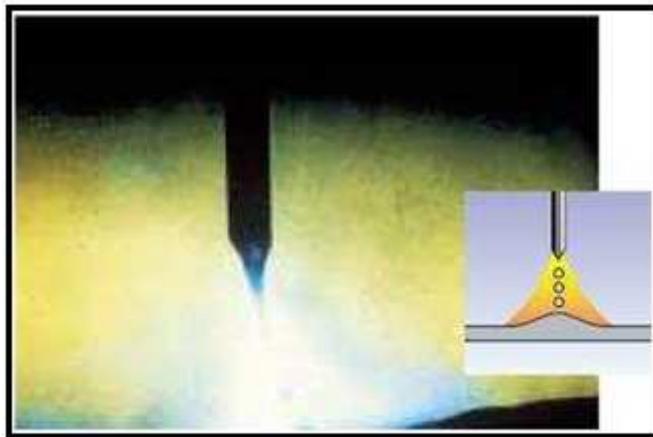
Son domaine d'emploi concerne les épaisseurs supérieures à 5 mm. Le volume et la fluidité du bain limite son domaine d'application au soudage à plat.



**Figure3.2 :** *Transfert par pulvérisation axiale.[20]*

### III.2.3. Transfert «globulaire» ou par «grosses gouttes»

Pour des énergies de soudage intermédiaires aux deux précédents modes de transfert, les gouttes ont une croissance lente et l'intensité du courant n'est pas suffisante pour provoquer son détachement par effet de pincement électromagnétique. La goutte grossit, de taille supérieure au diamètre du fil, et le transfert s'établit soit par court-circuit quand la goutte touche le bain, soit par détachement de la goutte sous l'effet de la pesanteur. Ce mode de transfert est instable, il produit de faibles pénétrations et de nombreuses projections. Il n'est pas recommandé de travailler dans ces conditions.



**Figure3.3 :** *Transfert globulaire.*

### III.2.4. Régime pulsé

Le régime pulse est réalisé grâce à la superposition de pics d'intensité à un courant de base. L'arc est constamment maintenu et il y a libération de fines gouttelettes de métal d'apport lors des pics d'intensité. Ce régime de transfert particulier permet de réaliser des cordons

avec des contraintes d'épaisseur et de caractéristiques des matériaux qui nécessiteraient l'utilisation d'un régime globulaire.

### **III.2.5. Régime par court-circuit forcé**

Le transfert par court-circuit forcé (short-arc +) est utilisé dans une gamme de vitesse de déplacement de la torche ou l'augmentation de l'intensité correspondante entraînerait l'apparition d'un transfert globulaire. Ce transfert permet de conserver un transfert par court-circuit et donc des taux de projection faibles. Ce régime de soudage est obtenu avec des postes de soudage particuliers dont les formes d'ondes permettent de maintenir une fréquence de court-circuit régulière.

### **III.2.6. Transfert à veine liquide rotative**

Pour des intensités de l'ordre de 500 A et des tensions de 45 à 50 V, le transfert par pulvérisation axiale est soumis à des forces électromagnétiques importantes. À ce niveau d'énergie, le métal liquide soumis à ces forces effectue un mouvement de rotation dans l'arc.

Au vu de l'énergie apportée par l'arc, ce régime permet une productivité élevée pour des éléments à souder de forte épaisseur.

#### **➤ Synthèse**

Les régimes de soudage définis auparavant sont représentés dans un diagramme tension d'arc intensité d'arc. Ce diagramme montre aussi le résultat (niveau de pénétration du cordon, largeur du cordon, etc.) de chaque opération de soudage pour chaque régime.

L'utilisateur d'une installation de soudage ne doit intervenir que sur un minimum d'éléments pour effectuer le réglage d'un générateur. Pour ce faire, il est indispensable d'avoir un dévidage de fil parfait, sans fluctuation de la vitesse, ainsi qu'une très bonne prise de courant de soudage au niveau de la torche. Les générateurs disposent ainsi d'abaques appelés synergies contenant les données des courbes de fusion pour une nature et un diamètre de fil d'apport particulier ainsi qu'un gaz de protection. Le diagramme de la figure ci-après fait apparaître clairement que le mode de transfert influence beaucoup le résultat de l'opération de soudage.

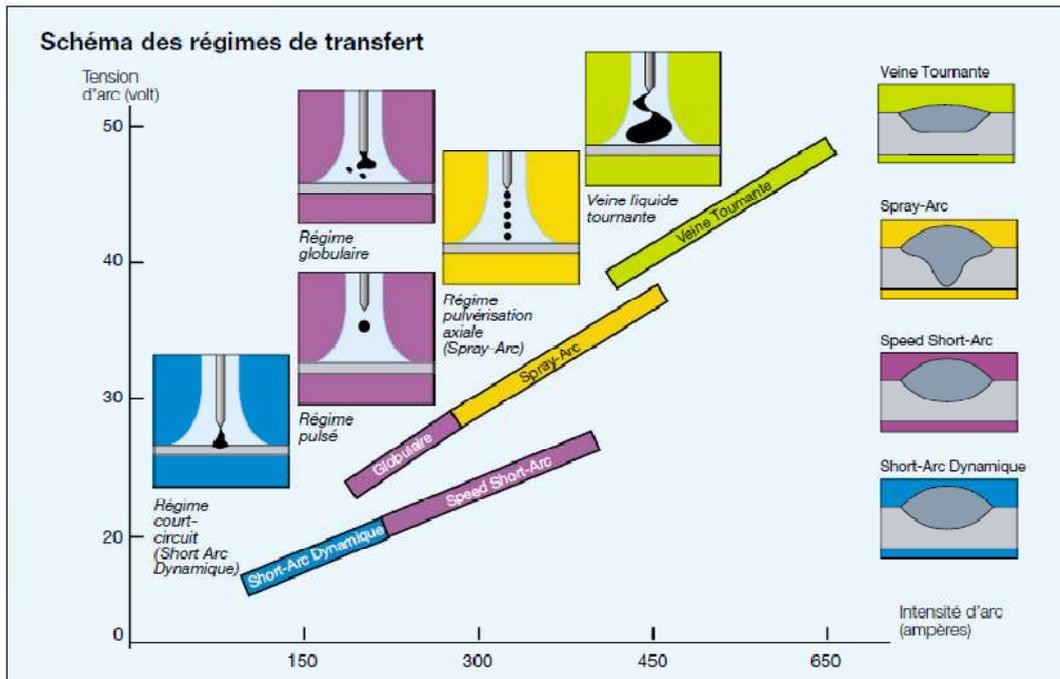


Figure 3.4 : Schéma des régimes de transfert [15]

Le choix d'un régime de transfert permet de mieux répondre aux contraintes imposées par l'assemblage à réaliser (épaisseur et nature des tôles, position de soudage, préparation). Deux régimes de transfert supplémentaires sont présentes sur ce schéma (les régimes short-arc + et spray +) et il s'agit en fait de deux termes commerciaux ne correspondant pas effectivement à des régimes de transfert particuliers. Ensuite, comme le montre la figure 3.5, la modification de paramètres, et plus particulièrement la tension entre l'électrode et la tôle, modifie le transfert et donc le niveau de pénétration.

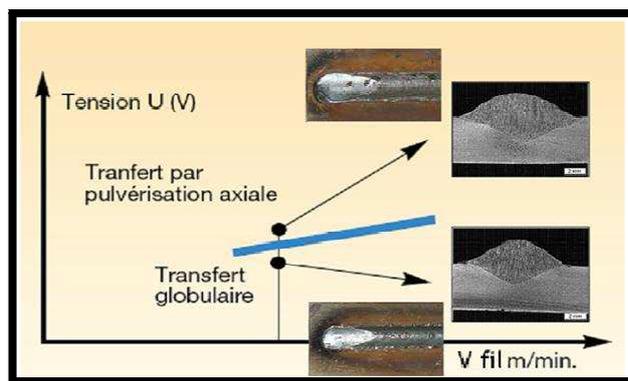
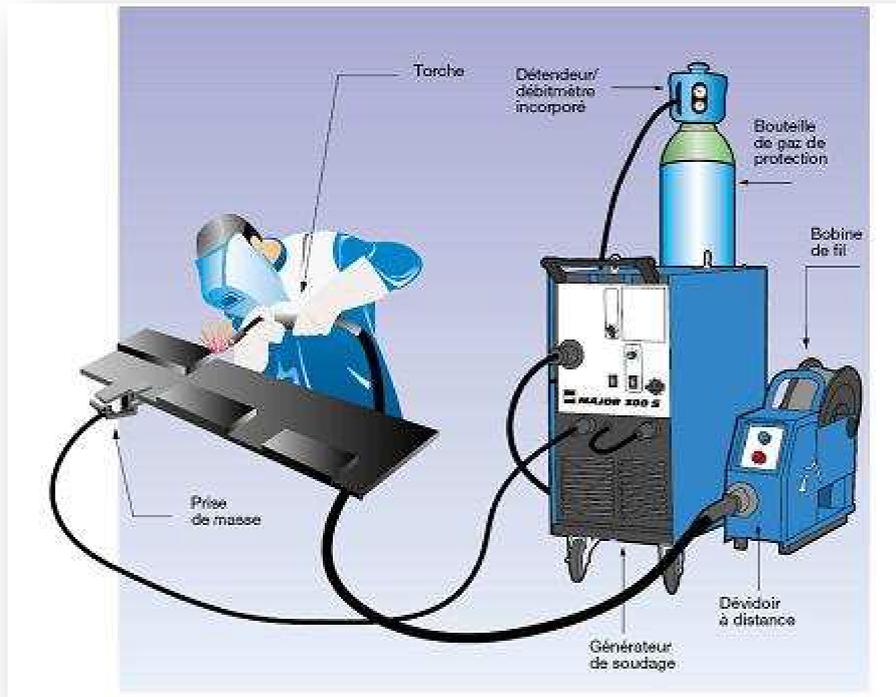


Figure 3.5 : Forme de pénétration en fonction du type de transfert.[21]

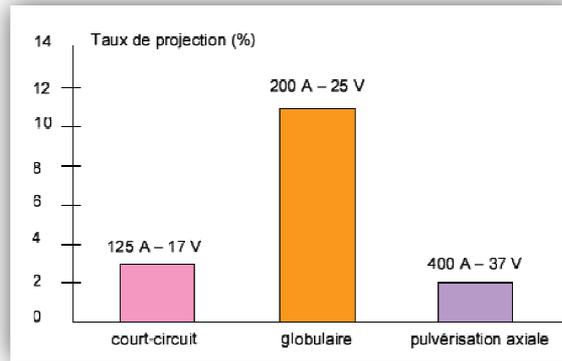
### III.3. Description d'une installation de soudage MAG

Une installation de soudage est constituée de trois principaux éléments comme illustres-en figure 3.6. En outre, on trouve chez les fabricants des postes à thyristors ou à transistors dits «synergiques» qui autodéterminent, par une logique interne, les paramètres électriques optimums pour obtenir la qualité de soudure attendue (diamètre et nature du fil, gaz, position de soudage) En complément du générateur de soudage, l'installation classique de soudage MAG comprend :



**Figure 3.6 :** Schéma type d'une installation manuelle de soudage MAG. Un générateur [15]

- Un dévidoir qui comprend un moteur avec réducteur, un jeu de galets d'entraînement, des guide-fils, un support de bobine avec sa bobine de fil, pour permettre le réglage en continu de la vitesse du fil jusqu'à 20 m/mn;
- Une source d'alimentation en gaz, bouteille ou centrale, avec son débitmètre;
- Les câbles et gaines pour la commande du dévidoir et pour l'alimentation de la torche en fil, courant, gaz et le cas échéant eau de refroidissement;
- une torche ou pistolet refroidi ou non, qui assure l'arrivée et le guidage du fil, le contact électrique sur le fil par un «tube contact» en cuivre, la protection gazeuse par la buse.



**Figure 3.7 :** Taux de projection en fonction du régime de transfert.

Le générateur de soudage dont la fonction est d'adapter l'énergie électrique fournie par le réseau aux faibles tensions et fortes intensités requises par l'opération de soudage constitue l'élément central du poste de travail. Son choix est déterminant. Sa technologie doit correspondre à l'utilisation et au domaine d'application prévue. Les générateurs de soudage peuvent être classés selon trois grandes familles :

- **Les générateurs à diodes** : constitués d'un transformateur incrémental et d'un redresseur à pont de diodes, le réglage de la tension se réalise de façon discontinue;
- **Les générateurs à thyristors** : constitués d'un transformateur et d'un pont redresseur à thyristors piloté par une électronique de commande. Ils offrent un plus grand confort d'utilisation et plus de souplesse (commande à distance, réglage continu de la tentube - contact buse gaz de protection fil-électrode arc métal de base métal fondu bain de fusion). Mais sont limités par leur temps de réponse (vitesse de variation des grandeurs électriques délivrées par le générateur insuffisante par rapport à celle imposée par l'arc) ;
- **Les générateurs à transistors** : constitués d'un transformateur, d'un convertisseur type hacheur ou onduleur et d'une électronique de commande élaborée, assurant un meilleur transfert du métal dans l'arc et encore plus de souplesse et de facilité d'emploi.

#### III.4. Avantage du soudage MAG

De bonnes propriétés mécaniques du métal déposé et une forte productivité, très supérieure à celle du soudage à l'arc avec électrode enrobée, sont les principales caractéristiques du procédé MAG. Il est facile à mettre en œuvre en atelier et est utilisé aussi bien en mode manuel qu'en mode automatique ou robotique. Grâce aux différents modes de transfert du

métal dans l'arc, son domaine d'application couvre toutes les positions de soudage sur des épaisseurs à partir de 0,6 mm.

### **III.5. Procédé MAG avec fil fourré**

Le principe du procédé est sensiblement identique à celui du MAG avec fil plein. Le courant est toujours continu, mais la polarité peut dépendre du type de fil utilisé. Le fil fourré est constitué d'une gaine tubulaire en acier remplie par un fourrage en poudre.

Celui-ci contient les éléments nécessaires pour assurer un rôle voisin de celui des enrobages pour les électrodes :

- Un rôle métallurgique; il assure la protection du bain par formation d'un gaz, la désoxydation et la dénitration du bain, l'apport éventuel d'éléments d'alliage (Ni, Cr, Mo);
- Un rôle physique; par formation d'un laitier, il protège et moule le cordon de soudure et facilite l'emploi en position.

Les fils fourrés avec gaz de protection peuvent être divisés en deux familles :

- Les fils fourrés avec laitier, répartis en deux sous familles, les fils fourrés rutilés et Les fils fourrés basiques,
- Les fils fourrés sans laitier (le fourrage est essentiellement métallique).

Pour les fils avec laitier, ce dernier recouvre au refroidissement le métal fondu comme en soudage avec électrodes enrobées. Il est généralement aisément détachable et doit être éliminé par piquage.

Le procédé MAG avec fil fourré de type rutilé est particulièrement adapté au soudage des aciers de construction courants. Les caractéristiques mécaniques des joints soudés sous gaz binaire de type argon-CO<sub>2</sub> sont satisfaisantes. Des nuances de fil fourré rutilés sont même disponibles pour des applications où des caractéristiques de ténacité à basses températures sont recherchées. Ce procédé procure une pénétration plus forte qu'avec un fil plein et son utilisation est unanimement jugée plus sécurisante à l'égard des risques potentiels de collage.

Ces avantages sont de différentes natures et concernent :

- L'augmentation de la productivité par l'accroissement du taux de dépôt et par une minimisation des manutentions nécessaires à l'exécution des opérations de soudage,
- Le confort d'utilisation grâce à de larges plages de paramètres utilisables, une qualité d'aspect accrue et une réduction sensible des projections,

- L'amélioration des conditions d'hygiène et d'environnement du soudeur par une réduction du volume et de la nocivité des fumées et une diminution du niveau sonore.

# **CHAPITRE IV :**

## *Méthodes et techniques expérimentales*

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 par ordre chronologique les différentes opérations concernant le soudage, ainsi que les méthodes de caractérisation mécanique et métallurgique des nuances étudiées (A60) et (E36). Ceci est dans le but de maîtriser et d'améliorer la qualité et l'aspect des assemblages soudés par le procédé MAG (Metal Activ Gaz).

#### IV.1. Identification des Métaux de base

##### IV.1.1. Présentation de l'acier E36

L'acier E36 de composition standard est généralement utilisé dans la construction chaudronnée, ce qui supprime une bonne partie du durcissement par vieillissement et ainsi permet de conserver au métal une bonne ductilité

##### IV.1.1.1. Composition chimique

Le tableau 4.1 représente la composition chimique de l'acier de base E36 selon la norme AFNOR standard.

**Tableau 4.1 :** Composition chimique de l'acier E36

Les éléments chimiques	C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	V	S	P	Al
Composition selon AFNOR	0,17	0,0275	0,025	1,365	0,365	0,013	≤0,02	0,010	0,028	0,0295

**Remarque :** l'acier E36 présente une bonne soudabilité

##### IV.1.1.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau 4.2 représente les caractéristiques mécaniques de l'acier de base E36 selon la norme AFNOR standard.

**Tableau 4.2 :** Caractéristiques mécaniques de l'acier E36

Nuance	R <sub>e</sub> min (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)
E36	353	510-608	20

### IV.1.2. Présentation de l'acier A60

C'est un acier de décolletage avec adjonction de plomb et de soufre, représentant une excellente usinabilité. Il est utilisé dans l'industrie horlogère (visserie), automobile, constructions mécaniques, construction des gabarits et montures etc.

#### IV.1.2.1. Composition chimique

Le tableau 4.3 représente la composition chimique de l'acier de base A60 selon la norme AFNOR standard.

**Tableau 4.3:** Composition chimique de l'acier A60

Les éléments chimiques	C	Si	Mn	P	S	Fe
Composition selon	0.65	0.10	0.50	max	0.15	Solde
AFNOR	0.75	0.40	0.90	0.07	0.25	

**Remarque :** l'acier A60 présente une faible soudabilité

#### IV.1.2.2. Les caractéristiques mécaniques

Le tableau 4.4 représente les caractéristiques mécaniques de l'acier de base A60 selon la norme AFNOR standard.

**Tableau 4.4:** Caractéristiques mécaniques de l'acier A60

Nuance	R <sub>e</sub> min (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A (%)
A60	334	588-706	15

### IV.2. Présentation du métal d'apport (fils pour soudage MAG ER70S-6)

Les fils ER70S-6 sont des fils de soudage en acier peu allié, destinés au soudage sous protection gazeuse. Ils se distinguent par leur conjonction forte avec une couche cuivrée, leur anticorrosion forte, leur entraînement stable, leurs projections faibles, leurs excellentes soudures. Les soudures obtenues peuvent résister aux impacts forts issus des basses températures.

Ils conviennent à l'acier naval (A, B, D, E, A36, E36, D36) et à d'autres aciers de même force.

Serrent à souder les structures importantes, par exemple, les conteneurs, les véhicules, les machineries de construction (soudage automatique ou semi-automatique à gaz protecteur)

Gaz de protection

M21 Mélange de gaz Ar+ >15-25% CO<sub>2</sub>

C1 Gaz actif 100% CO<sub>2</sub>

### IV.2.1. Composition chimique AWS: ER70S-6

Le tableau 4.5 représente la composition chimique du métal d'apport selon la norme AFNOR

**Tableau 4.5 :** Composition chimique du métal d'apport

Matières des fils(%)	C	Mn	Si	P	S	Cu
	0.06~0.15	1.40~1.85	0.80~1.15	≤0.025	≤0.035	≤0.50

### IV.2.2. Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6

Les caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 sont rassemblées dans le tableau ci dessous.

**Tableau 4.6 :** Caractéristiques mécaniques du métal d'apport AWS: ER70S-6 (selon AFNOR)

Emballage	Taille	Bobine de fils		Poids net
	φ0.8~1.6 (mm)	D100mm, D200mm, D270mm, D300mm, K300mm		1kg, 5kg, 15kg, 18kg, 20kg
Facultés mécaniques du métal	Limite d'élasticité conventionnelle $\sigma_{0.2}$ (Mpa)	Résistance à la traction $\sigma_b$ (Mpa)	Ratio d'étirage $\delta_5$ (%)	Energie d'impact AKV (J)
	≥420	≥500	≥22	≥27 (-29)
Diamètre du fil (mm)	φ1.2			
Courant de soudage (AMP)	80 à 350			

## IV.3. Réalisation des plaques de liaisons bimétalliques acier A60/acier E36

### IV.3. 1. Préparation des plaquettes

Les deux aciers E36 et A 60 sont importés par l'unité grue de Bejaïa (UGB) sous forme de tôles de dimension 1500 X 6000 X 10 mm ronds de 180 X 6000 mm pour le besoin de conception des grues. Pour chaque type de matière première, nous avons prélevé trois plaquettes de 150 mm de longueur, 100 mm de largeur et 10mm d'épaisseur. Cette opération est réalisée à l'aide d'une tronçonneuse de grand model type ULTRA de caractéristiques suivantes :

- ✓ Alimentation : 220/380 V et 12,5 A ;
- ✓ Puissance : 5KW ;
- ✓ Fréquence : 50 Hz.



**Figure 4.1 :** Scie tronçonneuse

Pour l'exécution des soudures, bout à bout de deux plaquettes acier A60 /acier E36, nous avons réalisé par fraisage sur un côté de chaque plaquette un chanfrein à 30° d'inclinaison pour obtenir un « V » de 60° le long des plaquettes (figure 4.2).



**Figure 4.2:** Deux plaquettes acier A60 /acier E36

### IV.3. 2. Assemblage des plaquettes

Pour la réalisation des assemblages, on a utilisé le procédé de soudage semi automatique avec fil plein de diamètre 1.2 mm (procédé MAG (Metal Activ Gaz), dont le poste à soudé est représenté ci après :

- ✓ Alimentation primaire : 230 V / 240 V Triphasé
- ✓ Consommation effective : 35,5 A / 20,5 A
- ✓ Poids : 135 Kg



Figure 4.3 : Poste à soudé du procédé MAG (Metal Activ Gaz)

Compte tenu de l'épaisseur des plaquettes (10mm), la réalisation du joint soudé a nécessité trois passes. Pour repérer nos assemblages, on leur a attribué les lettres A.B et C :

Afin de réaliser le cordon de chaque type d'assemblage, on a utilisé des paramètres différents de soudage.

**Remarque :**

L'énergie de soudage est donnée par la formule suivante :

$$E_s = \frac{f_1 \cdot U \cdot I}{V} \quad [\text{J/cm}] \quad (4.1)$$

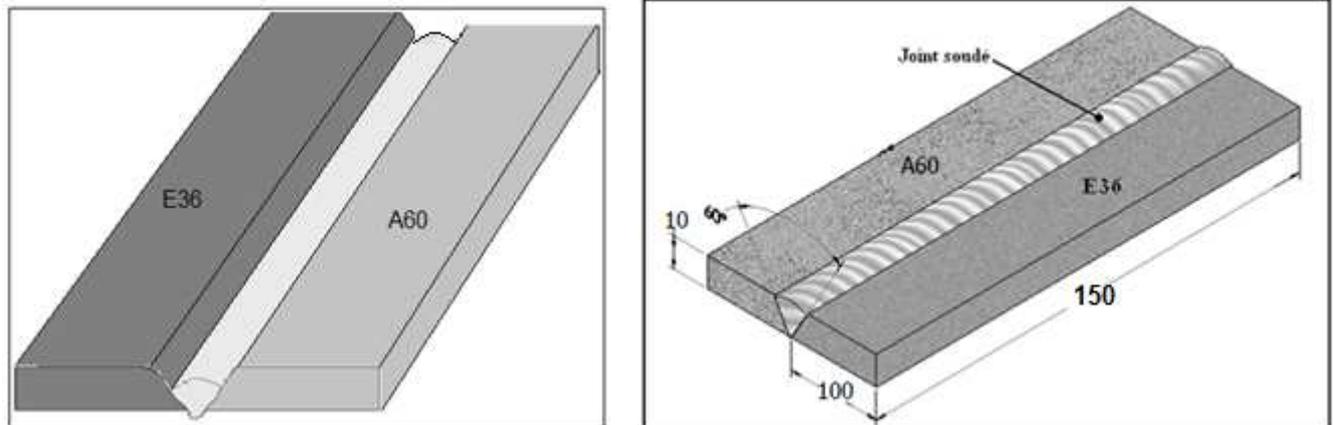
avec,  $f_1$  : coefficient de transfert qui dépend du procédé, dans notre cas  $f_1 = 0,8$ .

Tableau 4.7 : Différents paramètres utilisés dans la réalisation des trois passes de soudure

N° d'assemblage		Intensité I (A)	Tension U(v)		Vitesse du fil (m/min)	Temps (s)	Energie de soudage de la première passe E (J/cm)
Assemblage A	1 <sup>ère</sup> passe	85	A10	21	3	45	4284
	2 <sup>ème</sup> passe	185	C1	27	3.5	30	7992
	3 <sup>ème</sup> passe	240	C3	29	4	19	7052.8
Assemblage B	1 <sup>ère</sup> passe	180	B08	25	4	18.25	4380
	2 <sup>ème</sup> passe	185	B10	26	4	14	3591,46
	3 <sup>ème</sup> passe	210	B10	26	4.5	13	3785,6
Assemblage C	1 <sup>ère</sup> passe	230	C5	32	5	14	5495,4
	2 <sup>ème</sup> passe	300	C6	33	5.5	12	6336
	3 <sup>ème</sup> passe	329	C7	34	6	10	5965,86

**Remarque :** on prélève de chaque assemblage en une seule passe un échantillon dont le but de calculer le taux de dilution ainsi que d'effectuer l'essai de dureté HV.

La figure suivante montre la forme des assemblages en une seule passe et multipasses.



a) Après la première passe

b) Après les trois passes

**Figure 4.4 :** Schéma illustrant la forme d'assemblage de la liaison bimétallique A60/E36 après soudage

#### IV.4. Prélèvement des éprouvettes et des échantillons à caractériser

Pour garantir la qualité des matériaux de base et des assemblages soudés, il est nécessaire d'effectuer des essais mécaniques (en général destructifs) et des essais non destructifs.

Les propriétés mécaniques sont déterminées par des essais réalisés en laboratoire. Ils doivent se dérouler dans des conditions normalisées sur des éprouvettes normalisées.

Le prélèvement des éprouvettes se fait par sciage ou usinage à froid avec lubrification.

- **Essai de traction**

- Traction transversale à la soudure: Le joint se trouve en partie centrale de la partie calibrée de l'éprouvette. La soudure est arasée.

- **Essai de dureté**

Les essais de dureté Vickers sous charges réduite se font sur coupe métallographique transversale. Ils sont réalisés:

- Dans des zones définies (ZF, ZAT, MB) ;
- Suivant des lignes définies.

- **Essai de résilience**

Essai de flexion par chocs (résilience) : Sur éprouvette avec entailles en "V" qui se situent au milieu du cordon de soudure comme elle le montre la figure 4.5 ci-après.

- Observation macro et microstructurale

L'observation se faire sur les zones définies (ZF, ZAT, MB)

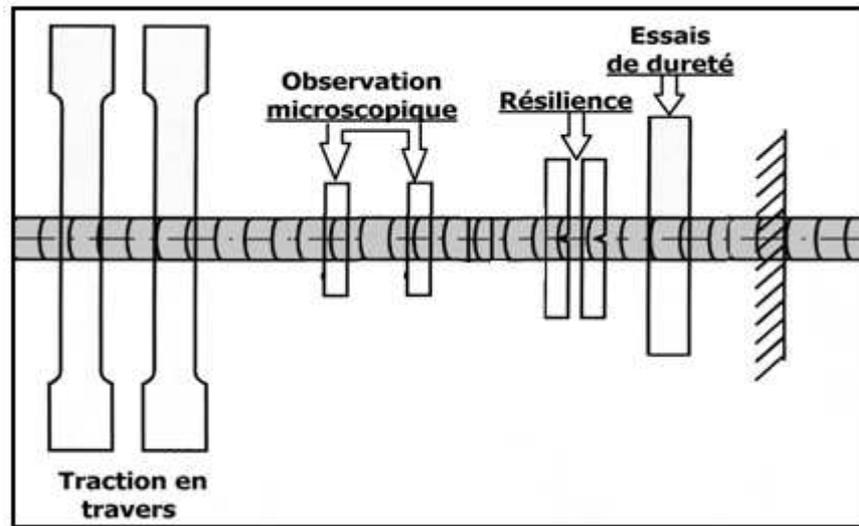


Figure 4.5 : Coupes pour essais

#### IV.4.1. Prélèvement des échantillons

Après soudage, les trois assemblages sont ensuite découpés en éprouvettes parallélépipédiques à l'aide d'une tronçonneuse sous lubrification.

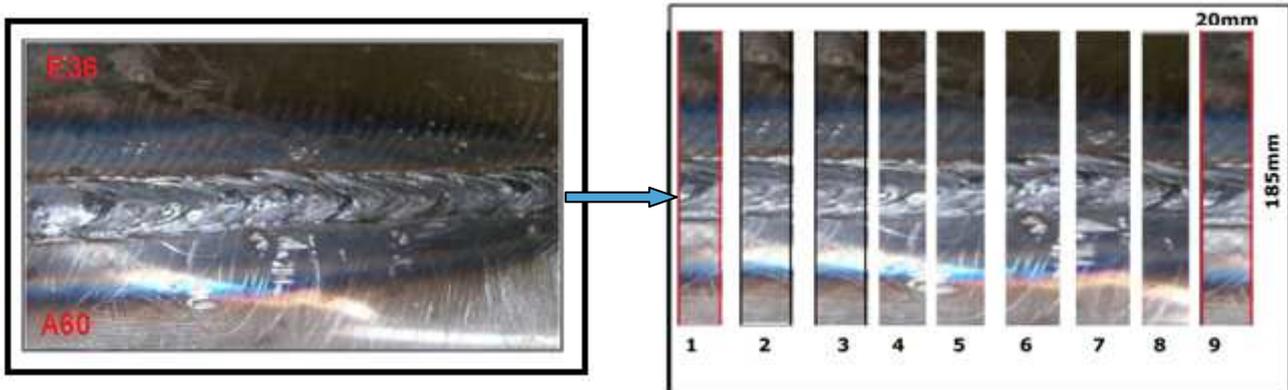


Figure 4.6 : Plan de découpe nomination et dimensions des échantillons prélevés sur les assemblages du couple A60/E36.

Les bords 1 et 09 sont des chutes non utilisées à cause de non uniformité du cordon de soudure.

Les échantillons :

- (2,3) sont destinés à la réalisation des éprouvettes de traction
- (4 et 5) pour la réalisation des éprouvettes de résilience
- (6 ,7) pour l'observation microstructurale
- (8) pour les essais de dureté HV

### IV.4.2. Elaboration et préparation des éprouvettes

Chaque échantillon scié, est destiné pour les essais mécaniques de traction et de résilience, a été repris au fraisage pour réaliser les éprouvettes finales apte à être testées.

Les éprouvettes sont prélevées d'une façon que le cordon de soudure soit au milieu, et réalisées aux dimensions normalisées comme elle les représente la figure 4.7.

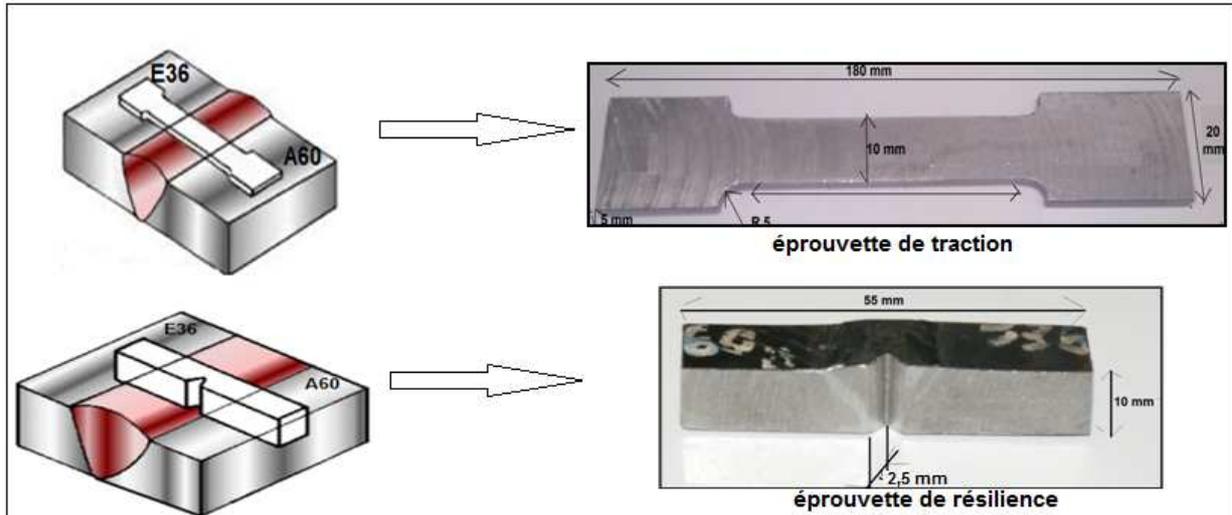


Figure 4.7 : Prélèvement des éprouvettes

## IV.5. Caractérisation microstructurale des échantillons

### IV.5.1. Polissage

#### ▪ 1<sup>er</sup> polissage

Il a pour but de créer la surface plane d'examen pour les échantillons. Il a été fait sur papier émeri de granulométrie P240, P400, P800 et P1200 sur une polisseuse à deux disques ; avec un arrosage abondant pour éviter tout risque d'échauffement et de contamination.

#### ▪ 2<sup>eme</sup> polissage (polissage de finition)

Le polissage consiste à rendre la surface à analyser plane, brillante et dénués de toute rayure. Pour cela, on frotte l'échantillon sur des papiers abrasifs de plus en plus fins (P1000, P1200, P2000 et P4000). Les raies provoquées par un papier doivent être éliminées par le suivant. Pour réaliser cette condition, il faut rayer l'échantillon avec un papier dans un sens et dans le sens perpendiculaire.

#### ▪ Polisseuse

Polisseuse à deux disques de type «MECAPOL CONTROLAB» alimentée sous une tension de 220v et munie d'un dispositif d'arrosage.



Figure 4.8: Polisseuse à deux disques.

**IV.5.2. Finissage :** Son objectif est d'obtenir une surface comparable à celle d'un miroir permettant ainsi de réfléchir la lumière. Les échantillons sont frottés sur des disques de feutre ou de drap imbibé d'une suspension d'abrasifs qui est le plus souvent de l'alumine ( $Al_2O_3$ )

#### IV.5.3. L'attaque chimique

L'attaque à pour but de révéler les joints des cristaux et de différencier les constituants de l'alliage. La méthode la plus répandue consiste à tremper la face à attaquer dans le réactif choisi qui est le Nital pendant un temps convenable ; généralement à la température ambiante, puis on lave l'échantillon sous un jet d'eau et on sèche à l'aide d'un séchoir.



Figure 4.9: Séchoir d'échantillon

#### IV.5.4. Observation macroscopique

Après la préparation des échantillons, on a effectué l'examen macroscopique dans le but d'éclaircir les différentes zones constituant un assemblage soudé telles que le métal de base (MB), les zones affectées thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF).

Ainsi de pouvoir calculer le taux de dilution de chaque zone.

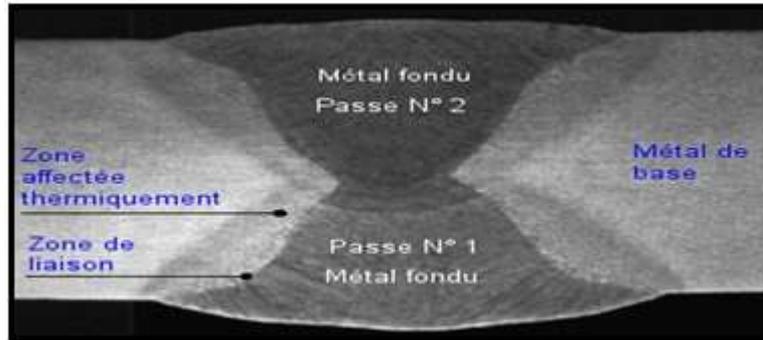


Figure 4.10 : Exemple typique d'un examen macrographique [5].

#### IV.5.5. Observation microscopique

Après le polissage, la surface à analyser est soumise à une attaque chimique permettant de révéler la forme, la distribution et la quantité des phases qui constituent le matériau.

##### IV.5.5.1. Microscope optique

Le microscope optique utilisé est de type HUND équipé d'une camera vidéo de type EyesCora permettant l'acquisition des micrographies sur ordinateur. Sur ce dernier, un logiciel d'acquisition et de traitement de résultats PicedCora est installé. Ce microscope est équipé de quatre objectifs de grossissement 40, 100, 200 et 400 fois. Il est constitué d'une lampe qui fournit de la lumière transmise horizontalement sur un prisme qui la réfléchit verticalement. Le faisceau lumineux est localisé sur l'échantillon par la lentille d'un objectif qui se trouve au-dessus de l'échantillon. La lumière réfléchi par la surface à analyser est transmise à travers la même lentille, on arrondissant l'image de 4, 10, 40 et 100 vers un miroir semi transparent qui la renvoie sur la lentille de grossissement 10, ou elle sera observée par l'œil de l'utilisateur. Une acquisition de photos y est ainsi possible sur ordinateur au moyen de la camera vidéo.

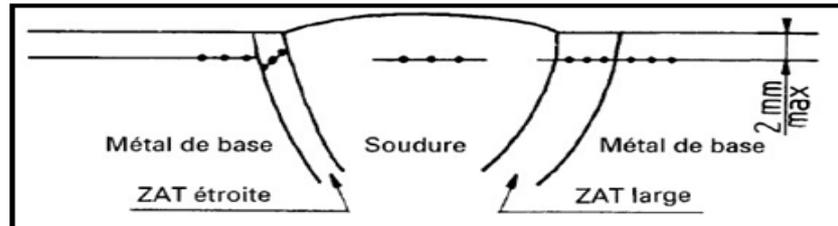


Figure 4.11 : Microscope optique.

## IV.6. Essais de dureté

L'essai de dureté est une technique idéale pour caractériser les cinétiques du durcissement structural car elle est à la fois rapide et peu coûteuse en matériau. Les essais de dureté VICKERS consistent à faire pénétrer en appliquant une force ( $F$ ) sur un pénétrateur ayant une forme de pyramide, en diamant de base carrée avec un angle au sommet de  $136^\circ$

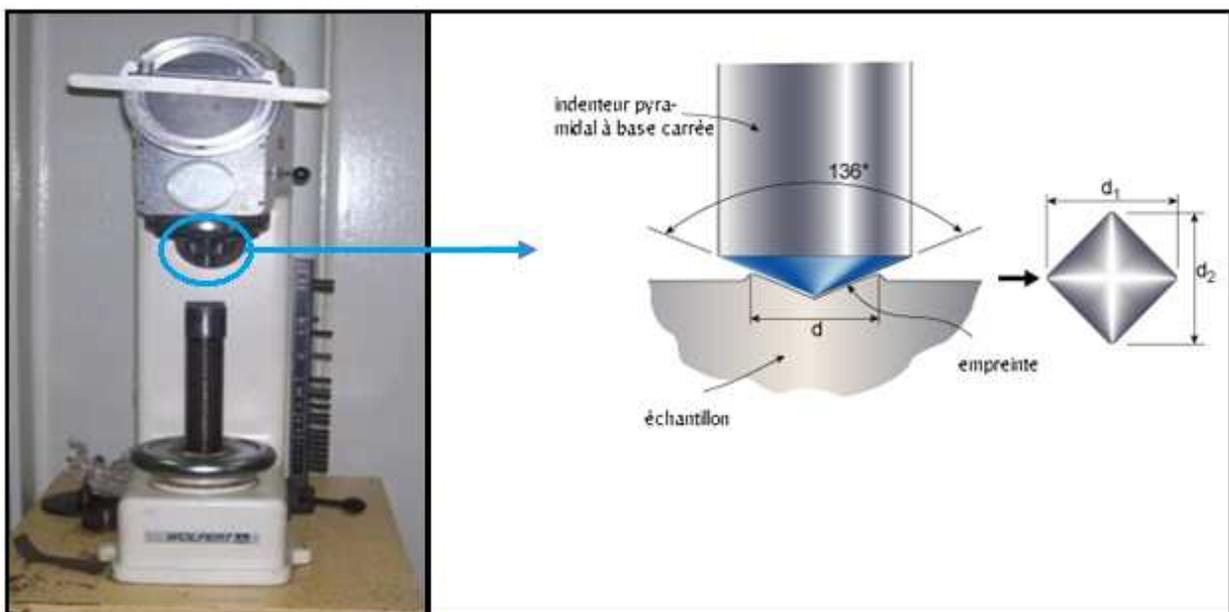
Ces essais de dureté sont réalisés selon la norme française **EN 288-3:1992/A1:1997** comme elle le montre la figure ci-dessous :



**Figure 4.12 :** Positionnement type de l'essai (selon NF EN 288-3:1992/A1:1997)

## IV.6.1. Duromètre

Pour mesurer la dureté, on a utilisé un duromètre marque WOLPERT, de type DIA-TESTOR 2RC constitué de deux parties, la première est la partie d'essai, elle nous permet d'effectuer trois types d'essais : Rockwell, Vickers et Brinell. Il est muni d'un sélecteur de charge et d'un plateau ou table sur laquelle les éprouvettes sont posées. Quant à la deuxième partie elle nous permet de mesurer l'empreinte des billes ou des pyramides à un grossissement de 70 fois sur l'écran de verre dépoli.

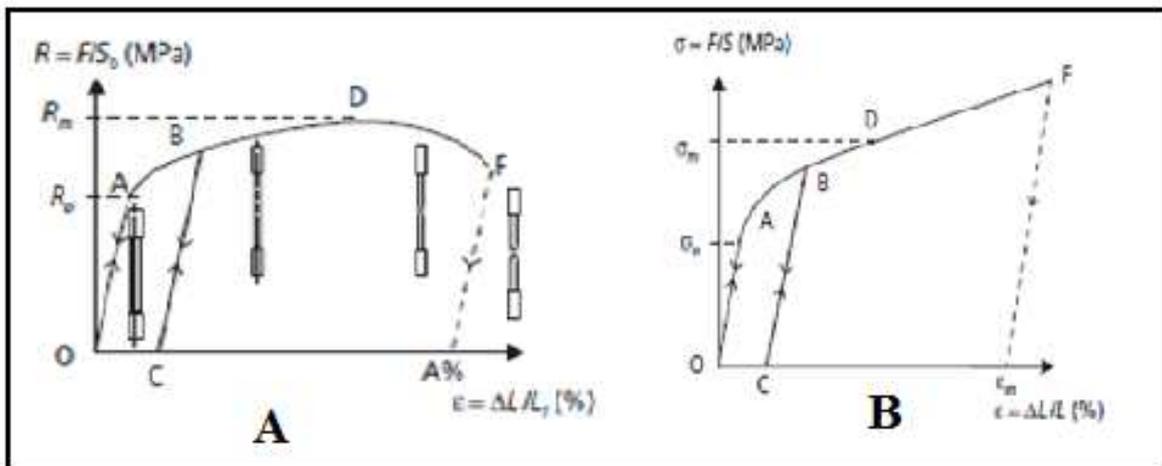


**Figure 4.13 :** Duromètre

IV.7. Essai de traction

L'essai de traction consiste à exercer une déformation croissante sur un barreau prismatique ou cylindrique et à mesurer l'évolution de la force nécessaire pour le déformer jusqu'à sa rupture.

L'examen du diagramme effort-déformation (ou courbe de traction, figure 2.07) fait apparaître un domaine élastique 'OA' dans lequel les déformations sont réversibles et proportionnelles à la charge appliquée et un domaine plastique 'AC' dans lequel les déformations sont permanentes. De 'A' à 'B', les déformations sont homogènes, tandis que de 'B' à 'C', elles ne sont plus homogènes (elles sont localisées) par suite de la striction qui précède la rupture.



A) Courbe conventionnelle  $R \times \epsilon$       B) courbe rationnelle  $\bar{\sigma} \times \epsilon$

Figure 4.14: courbes de traction

IV.7.1. Grandeurs conventionnelles

- L'allongement pour-cent après rupture A est l'allongement rémanent de la longueur entre repères après rupture  $L_u - L_0$ , exprimé en pourcentage de la longueur initiale entre repères  $L_0$ .

$$A = 100 \frac{L_u - L_0}{L_0} \tag{4.2}$$

- La striction est la réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant au cours de l'essai. La section après rupture  $S_u$  est l'aire de la section minimale après reconstitution de l'éprouvette. Le coefficient de striction Z est le rapport de la variation ultime de section transversale  $S_0 - S_u$  produite par l'essai à la section initiale  $S_0$ .

$$Z = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0} \tag{4.3}$$

- La résistance à la traction  $R_m$  est la charge unitaire qui correspond à la charge maximale supportée par l'éprouvette.

$$R_m = F_m / S_0 \quad (4.4)$$

- La charge unitaire à la limite apparente d'élasticité s'appelle aussi, par abréviation, limite apparente d'élasticité  $R_e$  (ou parfois limite d'écoulement). Elle correspond à la charge  $F_e$  pour laquelle, pour la première fois, l'allongement de l'éprouvette continue à augmenter sans que la charge augmente, ou alors que celle-ci diminue.

$$R_e = F_e / S_0 \quad (4.5)$$

#### IV.7.2. Grandeurs rationnelles

Les grandeurs et caractéristique définis précédemment sont celle tirées d'une courbe de traction conventionnelle, elles sont liées à l'état initial de l'éprouvette, si l'on rapporte ces grandeurs à l'état instantané de cette dernière (section  $S$  et longueur  $L$ ) on aura :

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S} \quad (4.6)$$

Avec l'hypothèse de la conservation de volume après déformation plastique :

$$S \cdot L = S_0 \cdot L_0 \quad \Rightarrow \quad S = S_0 \cdot L_0 / L$$

Ce qui donne

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{F_e \cdot L}{S_0 \cdot L_0} \\ \Rightarrow \sigma_e &= R_e \cdot \frac{L}{L_0} \\ \Rightarrow \sigma_e &= R_e \cdot \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \\ \Rightarrow \sigma_e &= R_e \cdot (1 + e) \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\text{Avec : } e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Ainsi, la limite d'élasticité rationnelle  $\sigma_e$  est supérieure de  $(1+e)$  fois  $R_e$  (limite d'élasticité conventionnelle).

Par un raisonnement analogue en remplaçant  $F_e$  par  $F_m$ , on déduit  $\sigma_m$  représentant la résistance rationnelle (vraie) à la traction :

$$\sigma_m = R_m \cdot (1+e) \quad (4.8)$$

On définit aussi la déformation vraie de l'éprouvette  $\varepsilon$ , qui caractérise la somme des déformations relatives de l'éprouvette à tout instant et qui s'exprime par  $\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = Ln \frac{L}{L_0}$

$$\text{Ce qui donne } \varepsilon = Ln (1+e) \quad (4.9)$$

### IV.7.3. Géométrie des éprouvettes de traction

Les éprouvettes de traction adoptent deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai.



Figure 4.15 : Eprouvette de traction

### IV.7.4. Condition de déroulement de l'essai de traction

Cet essai est réalisé, au sein de laboratoire de département de génie civil dans des conditions ambiantes et isothermes, sur des éprouvettes plates qu'on a réalisé à l'entreprise national du matériel des travaux publics de BEJAIA.

Les dimensions des éprouvettes obtenues sont prescrites dans le tableau 4.8 ci-après :

Tableau 4.8 : Dimension des éprouvettes de traction utilisées

Dimension des éprouvettes	valeurs
La longueur entre repère $L_0$	85 mm
La largeur (b)	20 mm
L'épaisseur (e)	5 mm
La section initiale ( $S_0$ )	100 mm <sup>2</sup>

### IV.7.5. Machine de traction

La machine de traction utilisée est de type IBERTEST. Cette machine est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre servant à mesurer la force appliquée à l'éprouvette, et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin mise en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette. On

commande la machine automatiquement par un micro-ordinateur.



**Figure 4.16 :** Machine de traction

Ses caractéristiques sont:

- ✓ Charge d'essais : 200KN ;
- ✓ Vitesse d'essai: 10 à 500 mm/min ;
- ✓ Alimentation électrique T=220V, F=50Hz.

#### **IV.8. Essai Charpy V (essai de résilience)**

Cet essai, encore appelé essai de résilience, est destiné à déterminer l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette entaillée à la température d'essai. L'examen du faciès de rupture permet d'apprécier si la structure est ductile ou fragile.

En général, des essais de flexion par choc sont effectués par série de trois barreaux avec l'entaille placée en métal fondu, dans la zone de liaison(ZL) puis, selon le cas, à ZL +2 mm, ZL + 5 mm et en métal de base (MB). Selon l'épaisseur du matériau testé, des séries de prélèvements peuvent être effectués sous la peau, au tiers, à cœur ou côté reprise de la soudure. Le positionnement de l'entaille est tracé par l'opérateur à même la macrographie réalisée sur le prélèvement. Chaque barreau usiné doit être identifié afin d'assurer la correspondance avec la pièce soudée et la position de l'entaille (MF, ZL ou MB).

L'essai permet de mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois un barreau préalablement entaillé.

## IV.8.1. Principe de l'essai

Les essais de résilience sont effectués à température ambiante et réalisés en utilisant un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. Cette énergie est, classiquement dans le cas de la norme européenne, de 300 joules.

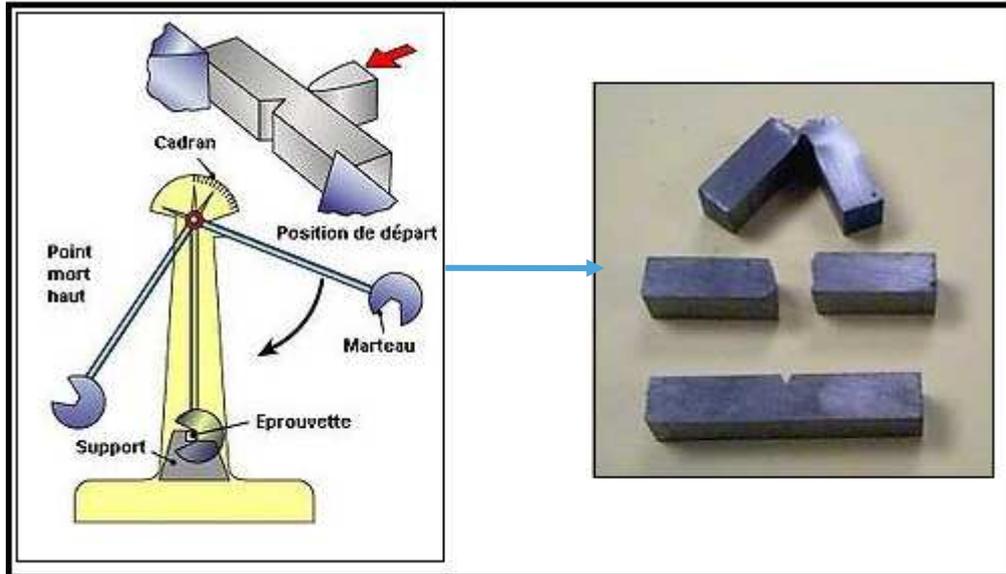


Figure 4.17: Principe de l'essai Charpy V

## IV.8.2. Dimension de l'éprouvette

Les dimensions de nos éprouvettes selon le code ASME sont de type Charpy V, Elles ont toutes une longueur de 55 mm et une section nominale de  $10 \times 7.5 \text{ mm}^2$  (Fig. 4.19).

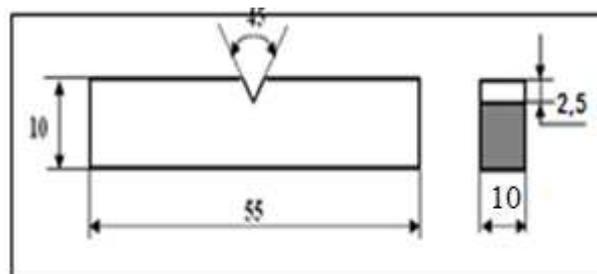


Figure 4.18: Eprouvette de Résilience Charpy V

**IV.8.3. Machine de résilience**

La machine d'essai Charpy V utilisée est de type INSTRON WOLPERT. Cet essai est effectué au niveau du laboratoire des essais mécaniques de l'entreprise nationale du matériel des travaux publics) de BEJAIA.



**Figure. 4.19 :** *Machine de Résilience*

Cette machine est de caractéristiques suivantes :

- ✓ Capacité de 300J ;
- ✓ Poids max = 550 Kg ;
- ✓ Base de 750 x 500 cm<sup>2</sup>.

# **CHAPITRE V :**

## *Résultats et discussions*

## Introduction

Dans le but de caractériser la liaison bimétallique (A60/E36) réalisée par le soudage MAG, on a effectué des essais, sur des liaisons soudées afin de déduire le comportement mécanique, physico-chimique et morphologique, tel que l'essai de traction, essai de dureté Vickers (HV) et tout en s'intéressant à l'influence de paramètres du procédé de soudage utilisés.

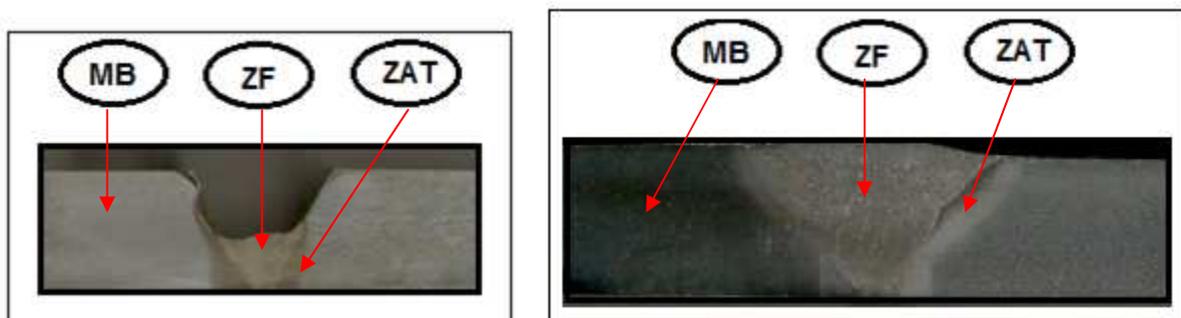
La caractérisation du point de vue mécanique et morphologique a été réalisée en utilisant différentes techniques :

- 1- Examen macrographique pour détecter les différentes zones que constitue la soudure ;
- 2- Le Microscope optique pour l'obtention de la morphologie ;
- 3- Essai de dureté, traction et résilience pour la détermination des propriétés mécaniques.

### V.1. Examen macrographique

#### V.1.1. Macrographie des assemblages soudés

Après préparation des échantillons, polissage mécanique et attaque électrolytique, on a réalisé la macro-micro-graphie, afin de mieux distinguer les différentes zones que constitue la soudure. Et les figures ci-dessous nous montrent les différentes zones constituant la soudure :



a) Macrographie de soudure  
initiale (1<sup>ère</sup> passe)

b) Macrographie de  
soudure avec 3<sup>ème</sup> passe

**Figure 5.1 : Macrographie de soudure**

Afin d'aboutir à la détection des zones constituant un l'assemblage soudé, l'examen métallographique a été effectué à l'aide d'un appareil photos numérique. Ce dernier a montré qu'il existe trois zones hétérogènes différentes:

1. **Zone du métal de base (MB)** n'ayant pas subi de transformations structurales lors de l'opération de soudage ;
2. **Zone affectée thermiquement (ZAT)** où le métal de base a subi de transformations structurales lors de l'opération de soudage (traitement thermique local) ;

3. **Zone fondue (ZF)** qui représente la passe de pénétration et les autres passes tels que le remplissage et la finition.

La formation de ces zones hétérogènes est due au phénomène du traitement thermique, ce qui influe sur la morphologie et la structure de celle-ci.

### V.1.2. Calcul du taux de dilution des métaux de base dans le métal fondu

Pour les trois assemblages en une seule passe, nous avons calculé le taux de dilution des métaux de base E36 et A60 ainsi que, le métal d'apport ER70S-6. Le calcul des surfaces est effectué à l'aide d'un logiciel de calcul.

Les taux de dilution sont calculés on utilisant les relations suivantes :

$$\text{➤ Dilution du métal de base A60 : } d_{A60}\% = \frac{SA60}{SA60+SE36+SMA} \times 100 \quad (5.1)$$

$$\text{➤ Dilution du métal de base E36 : } d_{E36}\% = \frac{SE36}{SA60+SE36+SMA} \times 100 \quad (5.2)$$

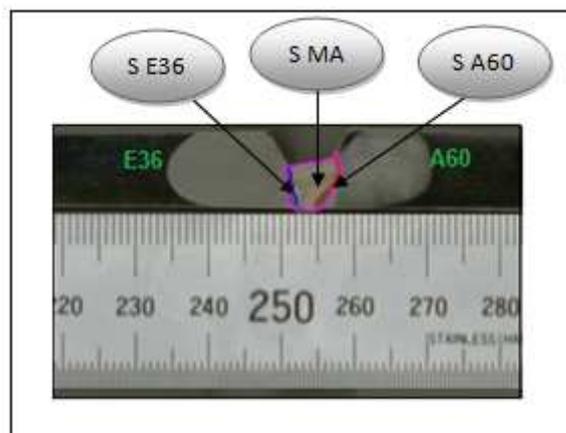
$$\text{➤ Dilution du métal d'apport MA : } d_{MA}\% = \frac{SMA}{SA60+SE36+SMA} \times 100 \quad (5.3)$$

$$\text{➤ Le taux de dilution de l'assemblage est : } d\% = \frac{SA60+SE36}{SA60+SE36+SMA} \times 100 \quad (5.4)$$

#### V.1.2.1. Taux de dilution de l'assemblage (A)

Les résultats de calcul de surfaces pour l'assemblage A sont :

- Surface du métal base A60 :  $S_{A60} = 8,95 \text{ mm}^2$
- Surface du métal base E36 :  $S_{E36} = 4,51 \text{ mm}^2$
- Surface du métal d'apport MA :  $S_{MA} = 33,07 \text{ mm}^2$



**Figure 5.2:** Zone de dilution dans la zone fondue pour l'assemblage (A)

Le tableau 5.1 représente les dilutions dans la zone fondue du **l'assemblage A**

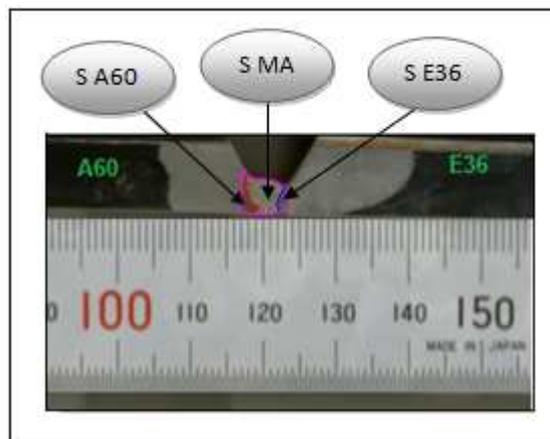
**Tableau 5.1 :** Les dilutions dans la zone fondue du **l'assemblage A**

Zone de dilution	Valeur de dilution (%)
Métal base A60	21,2
Métal base E36	10,7
Métal d'apport MA	78,7

### V.1.2.2. Taux de dilution de l'assemblage (B)

Les résultats de calcul de surfaces pour l'assemblage A sont :

- Surface du métal base A60 :  $S_{A60} = 7,13 \text{ mm}^2$
- Surface du métal base E36 :  $S_{E36} = 3,36 \text{ mm}^2$
- Surface du métal d'apport MA :  $S_{MA} = 19,29 \text{ mm}^2$



**Figure 5.3:** Zone de dilution dans la zone fondue pour l'assemblage (B)

Le tableau 5.2 représente les dilutions dans la zone fondue du **l'assemblage B**

**Tableau 5.2 :** Les dilutions dans la zone fondue du **l'assemblage B**

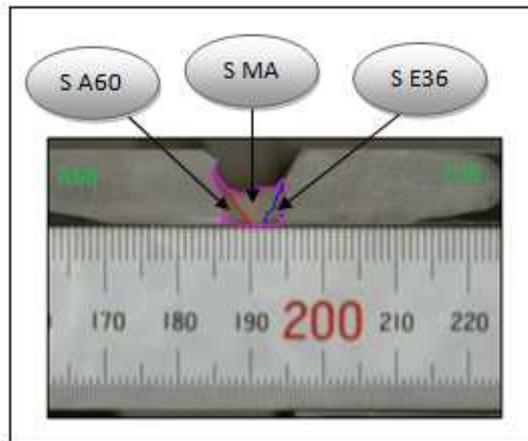
Zone de dilution	Valeur de dilution (%)
Métal base A60	23,9
Métal base E36	12,0
Métal d'apport MA	64,7

### V.1.2.3. taux de dilution de l'assemblage (C)

Les résultats de calcul de surfaces pour l'assemblage A sont :

- Surface du métal base A60 :  $S_{A60} = 12,83 \text{ mm}^2$
- Surface du métal base E36 :  $S_{E36} = 7,63 \text{ mm}^2$

- Surface du métal d'apport MA :  $S_{MA} = 22,7 \text{ mm}^2$



**Figure 5.4:** Zone de dilution dans la zone fondue pour l'assemblage (C)

Le tableau 5.3 représente les dilutions dans la zone fondue du **l'assemblage A**

**Tableau 5.3 :** Les dilutions dans la zone fondue du **l'assemblage A**

Zone de dilution	Valeur de dilution (%)
Métal base A60	29,7
Métal base E36	17,6
Métal d'apport MA	52,5

On remarque que le taux dilution augmente avec l'augmentation de l'énergie de soudage. Cette dernière provoque une fusion locale des joints de grain, ce qui provoque la formation des constituants ductiles, tel que la bainite.

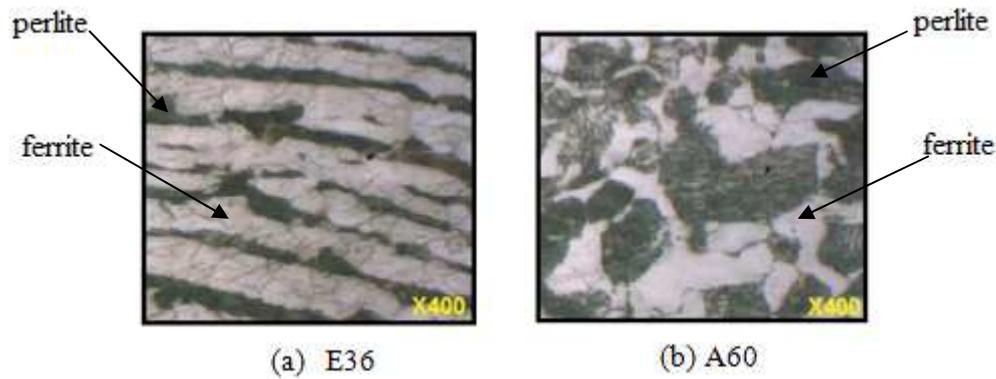
## V.2. Observation microscopique

Après préparation des échantillons, polissage mécanique et attaque chimique, nous avons réalisé des observations microscopiques. Nous avons effectués ces dernières à l'aide d'un microscope optique équipé d'une camera reliée à un ordinateur.

### V.2.1. Microscopie des métaux de base

Les aciers de base sont le A60 et le E36. Ce sont des aciers de construction mécanique à usage général. La microstructure de ces de l'acier E36 a une structure ferrito-perlitique avec une faible proportion de grains perlitiques en bandes qui est due à la faible teneur en carbone que présente cet acier, avec des grains qui sont orientés dans le sens de laminage.

La micrographie optique de l'acier A60 met en évidence une microstructure classique ferrito-perlitique à grains polyédriques de ferrite  $\alpha$  en blanc et colonie de perlite ( $\alpha +$  carbure de fer  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) en noir, comme elle le représente la figure 5.5 ci-dessous.



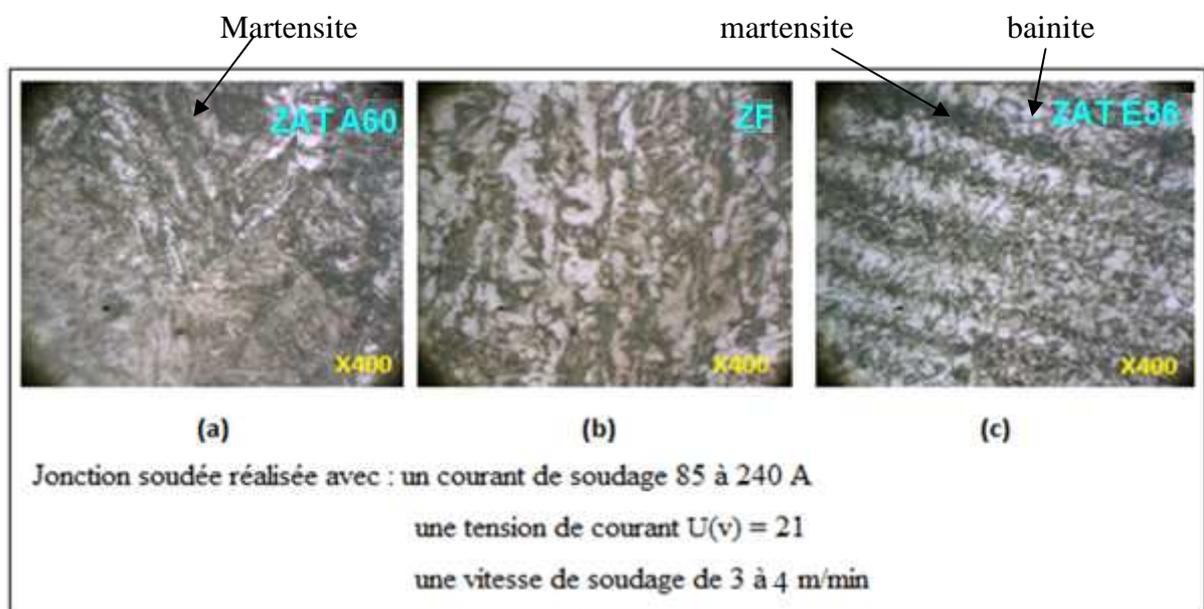
**Figure 5.5 :** La microstructure des métaux de base

La figure montre une différence dans la géométrie des grains, ou l'acier E36 présente des grains allongés et le A60 des grains polyédriques. Cette différence s'explique par la façon de l'élaboration de ces derniers.

### V.2.2. Microscopie de la liaison bimétallique A60/E36 multipasses

Pour chaque assemblage et pour les différents paramètres de soudage utilisés, nous présentons l'aspect microstructural des deux interfaces de la liaison bimétallique (micrographies (a), (c) qui représentent les ZAT) et la microstructure au milieu de la zone fondue formant le joint soudé de cette liaison (micrographies (b) qui représente la ZF).

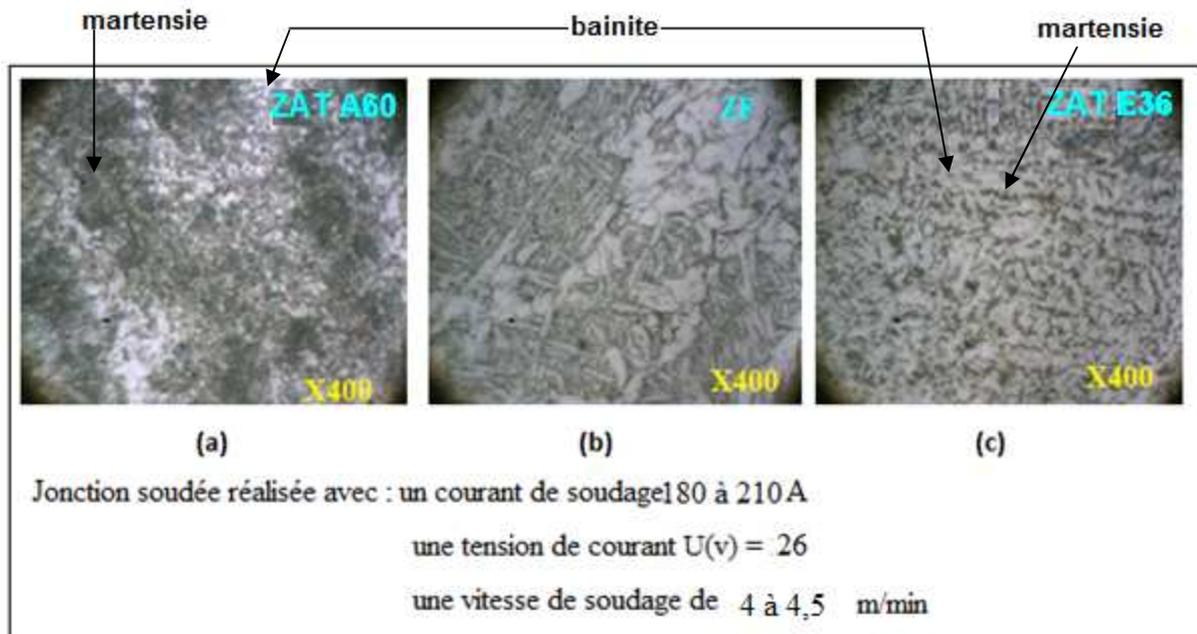
#### ➤ Assemblage A



**Figure 5.6 :** Aspect de la microstructure de la liaison bimétallique A60/E36 réalisée par soudage MAG en fil plein type **ER70S-6**. (Assemblage (A))

La microstructure du métal de base qui a subi de transformation structurale (la zone affectée thermiquement) montre une structure martensitique dominante pour le métal A60 avec apparition des petits grains en bainite, suite à teneur importante de carbone qu'il contient ce dernier. Par contre pour l'acier E36 la ZAT représente une structure bainitique avec la présence des îlots de martensite. Au milieu on voit clairement que la structure est un mélange de martensite et de bainite.

➤ **Assemblage B**

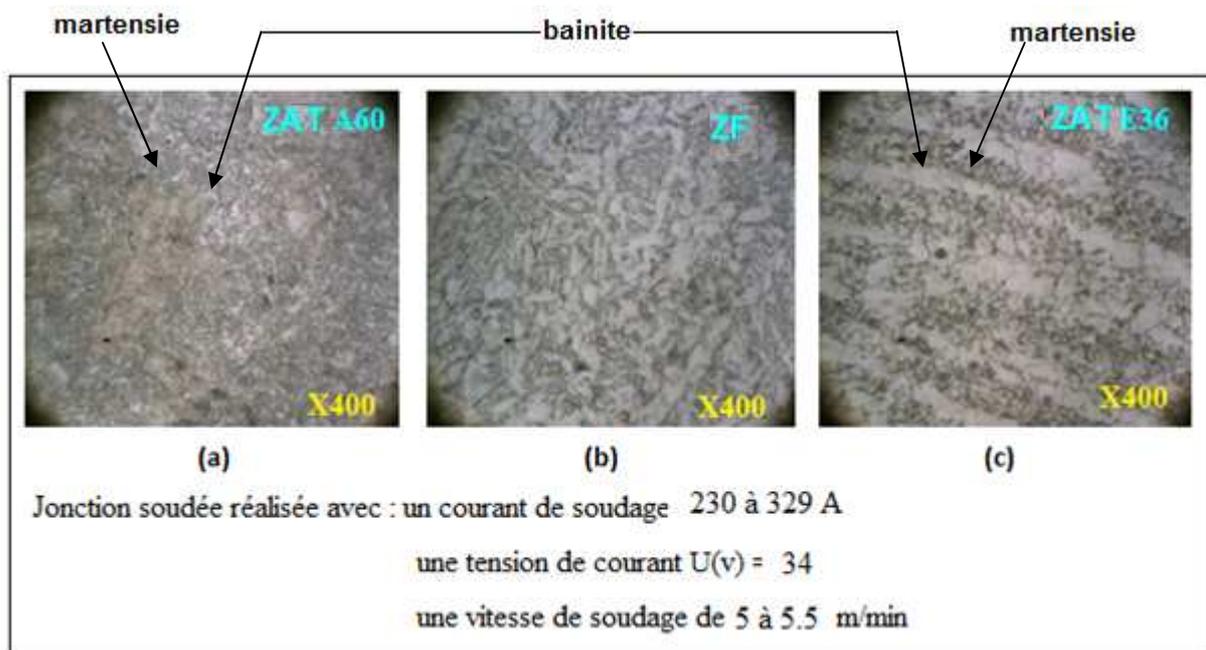


**Figure 5.7 :** Aspect de la microstructure de la liaison bimétallique A60/E36 réalisée par soudage MAG en fil plein type ER70S-6. (Assemblage B))

Avec l'augmentation de l'énergie de soudage on remarque que le taux de martensite de la ZAT du métal A60 diminue avec une augmentation légère de la bainite. De côté E36 la structure est toujours bainitique par contre au milieu la structure représente aspect bainitique avec l'apparition d'une structure ferritique.

**Remarque :** les microstructures des zones affectées thermiquement et celle de la zone fondue sont influencées par le taux de dilution.

➤ *Assemblage C*



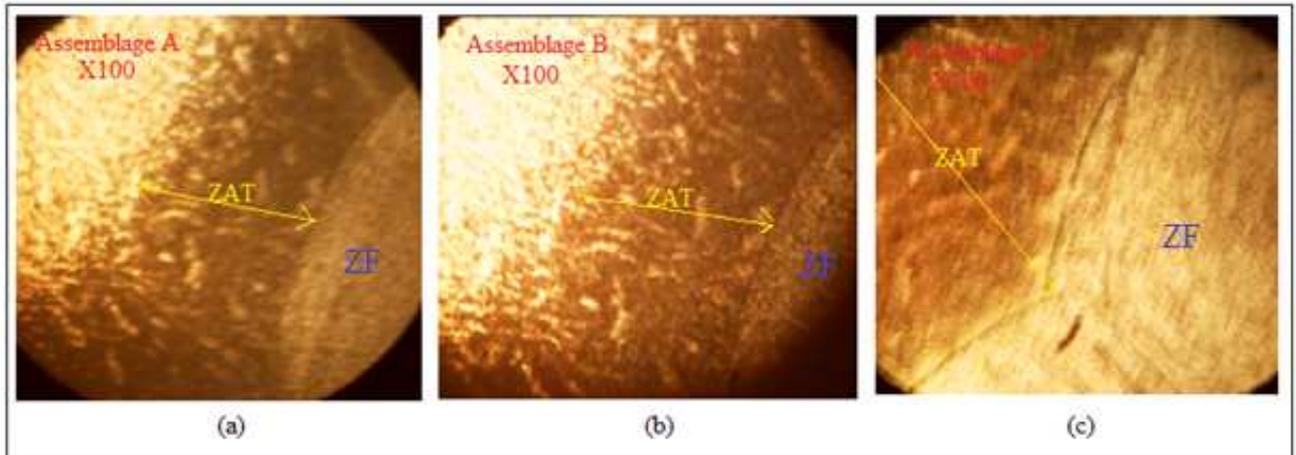
**Figure 5.8:** Aspect de la microstructure de la liaison bimétallique A60/E36 réalisée par soudage MAG en fil plein type ER70S-6. (Assemblage (C))

L'assemblage (C) est réalisé avec une énergie importante ; la micrographie de la ZAT du côté A60 est un mélange de martensite et de bainite, du côté E36 est une structure bainitique avec un taux de perlite et de ferrite. Au milieu la structure est homogène de martensite et de bainite.

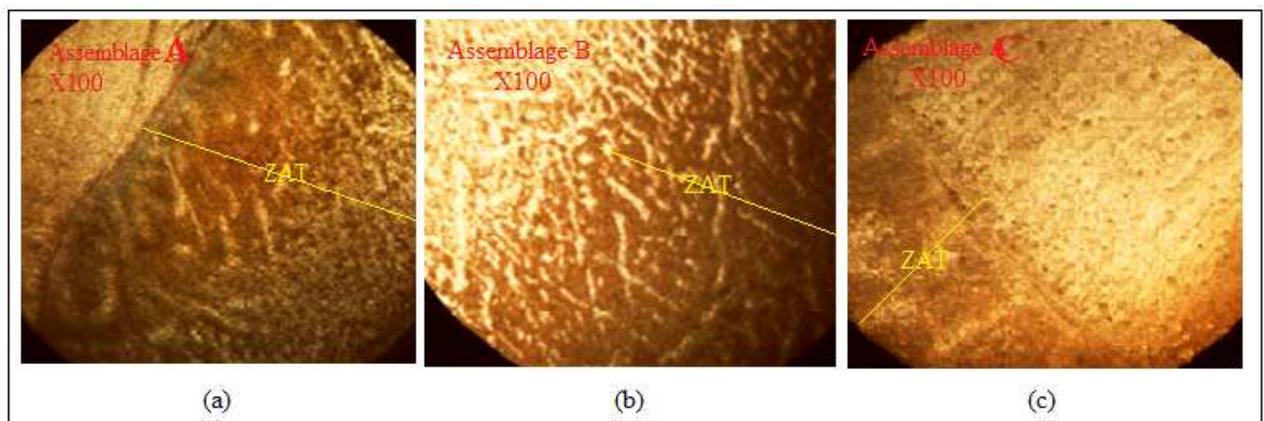
Ainsi avec l'augmentation de l'énergie de soudage, les structures deviennent stables suite à la formation de phases d'équilibre telles que la martensite, la bainite avec quelques îlots de ferrite dans la ZF.

La microstructure nous montre lors de balayage de métal de base vers la ZAT qu'il y a une diminution de la taille de grain (la zone subit un traitement de normalisation).

On distingue clairement la différence de la taille de grain entre la ZAT et la ZF qui sont délimités par la zone de liaison. Cet état de fait semble confirmer les données bibliographiques à savoir qu'avec l'augmentation de l'énergie de soudage (E) provoque une fusion locale des joints de grains avec formation de constituants particuliers [23].



**Figure 5.9 :** Aspect de la microstructure de l'interface Métal de base A60 / Zone fondue



**Figure 5.10 :** Aspect de la microstructure de l'interface Métal de base E36/ Zone fondue

Les figures 5.9 et 5.10 illustrent l'effet des paramètres de soudage sur la morphologie de la liaison bimétallique A60/E36 pour des énergies légèrement différents.

Pour une énergie faible, la zone affectée thermiquement est moins large (micrographie a) contrairement à celle obtenue avec une énergie légèrement supérieure (micrographie b). Pour la liaison réalisée avec une énergie importante, la liaison est plus large. Cette dernière développe après refroidissement du côté du métal d'apport une morphologie cellulaire caractéristique de la présence d'une hétérogénéité chimique [24]. Il est donc remarquable de constater l'effet sensible de l'énergie de soudage sur la morphologie de la structure de l'interface ainsi que le taux de dilution.

### V.3. Résultats des essais de dureté Vickers

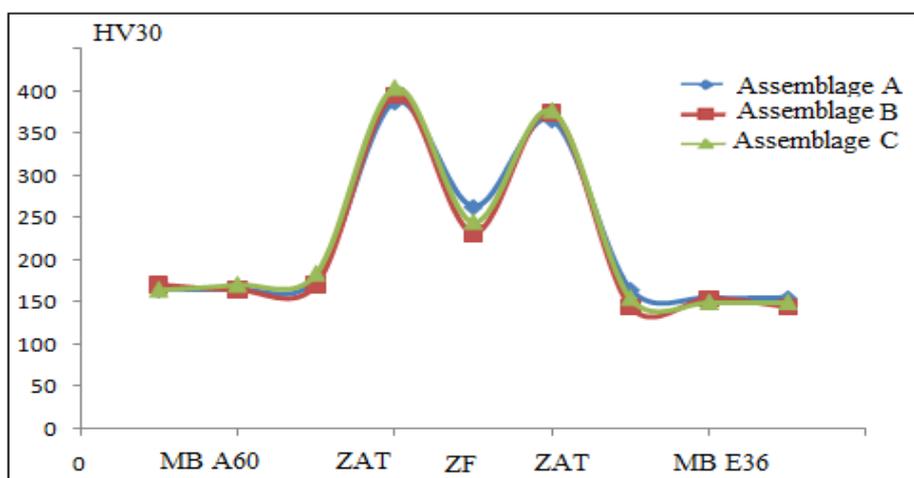
Nous avons réalisés des essais de dureté Vickers (HV) sur les échantillons destinés auparavant pour la dureté.

#### V.3.1. essais HV pour les trois assemblages en une seule passe

Le tableau ci-dessous englobe les résultats de l'essai de dureté HV pour les trois assemblages uniquement en une seule passe.

**Tableau 5.4 :** Dureté Vickers de la première passe

	MB (A60)			ZAT	ZF	ZAT	MB (E36)		
Assemblage A	165	165	177	387	263	366	165	155	155
Assemblage B	171	165	171	395	232	375	145	155	145
Assemblage C	165	171	184	404	245	377	155	150	150



**Figure 5.11 :** courbes de dureté en superposition pour les trois assemblages en une seule passe

D'après les courbes de la figure 5.11 ci-dessus, les duretés augmentent graduellement en partant des aciers de base (150 à 184 HV) pour atteindre un maximum au niveau des zones affectées thermiquement et diminuer légèrement au niveau de la zone fondue (232 à 263HV). Cette variation de dureté s'appuie sur les changements structureaux qui s'y opèrent au niveau des différentes zones après refroidissement. La dureté maximale de l'ensemble qui est de 404 HV au niveau de la ZAT de l'acier A60 de l'assemblage C. Ceci s'explique par la teneur élevée en carbone de ce matériau.

La chute de dureté dans la ZF s'explique par la composition chimique du métal fondu ainsi formé qui obéit aux taux de dilution des éléments constituant l'assemblage.

V.3.2. essais HV pour les trois assemblages en multipasses

Les résultats obtenus pour le soudage multipasses sont rassemblés pour chaque assemblage dans les tableaux 5.5, 5.6 et 5.7 ci-après et leurs courbes sur les figures 5.12, 5.13 et 5.14.

➤ Assemblage A

Tableau 5.5 : Dureté Vickers de l'assemblage A

Pas d'assemblage A	MB (A60)			ZAT			ZF			ZAT			MB (E36)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 <sup>ere</sup> passe HV30	165	168	177	252	248	252	222	220	223	247	247	242	165	160	162
2 <sup>eme</sup> passe HV30	171	171	177	275	287	287	214	206	210	252	249	250	165	168	165
3 <sup>eme</sup> passe HV30	171	171	184	285	279	287	206	214	206	263	270	252	177	168	168

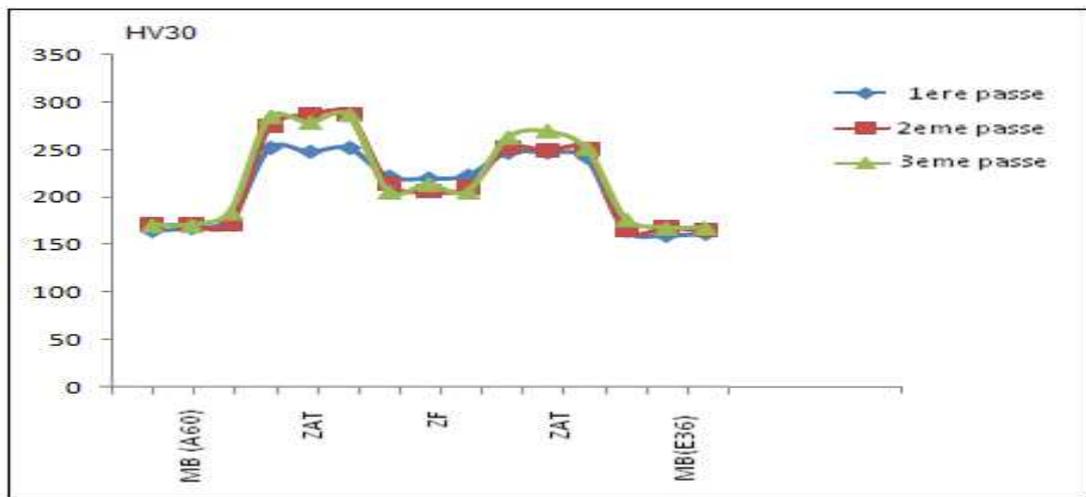


Figure 5.12 : courbes de dureté des trois passes en superpositions pour l'assemblage (A)

➤ Assemblage B

Tableau 5.6: Dureté Vickers de l'assemblage B

Pas d'assemblage B	MB (A60)			ZAT			ZF			ZAT			MB (E36)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 <sup>ere</sup> passe HV30	171	184	184	223	243	225	206	210	206	242	223	234	171	167	168
2 <sup>eme</sup> passe HV30	155	160	171	218	223	215	198	198	206	222	223	231	168	171	168
3 <sup>eme</sup> passe HV30	171	181	177	275	287	284	214	220	214	278	268	275	177	168	160

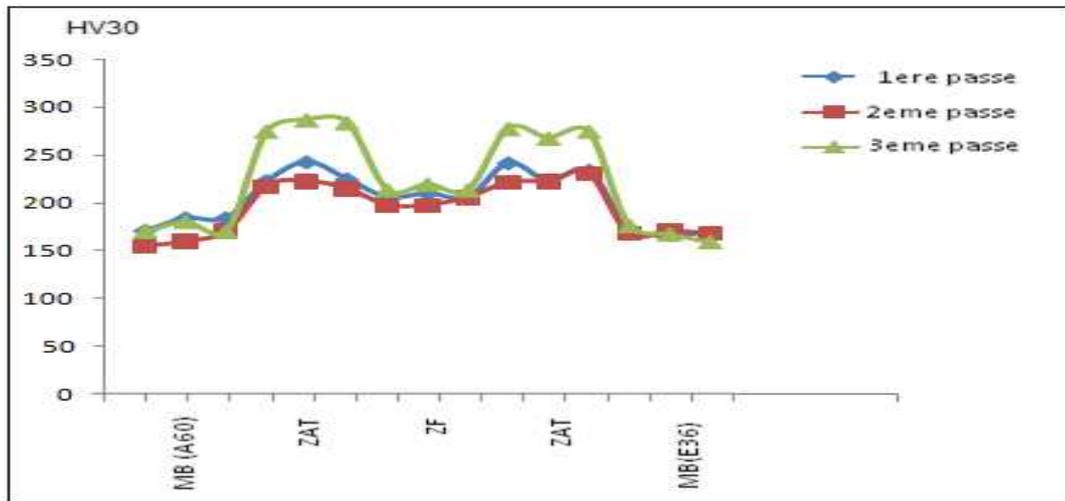


Figure 5.13 : courbes de dureté des trois passes en superpositions pour l'assemblage (B)

➤ Assemblage C

Tableau 5.7 : Dureté Vickers de l'assemblage C

Pas d'assemblage C	MB (A60)			ZAT			ZF			ZAT			MB(E36)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 <sup>ère</sup> passe HV30	165	177	177	263	268	263	223	220	223	206	198	200	177	168	165
2 <sup>ème</sup> passe HV30	171	177	175	298	305	305	232	223	230	214	206	214	171	165	165
3 <sup>ème</sup> passe HV30	177	171	177	323	366	366	232	229	230	232	230	230	177	160	160

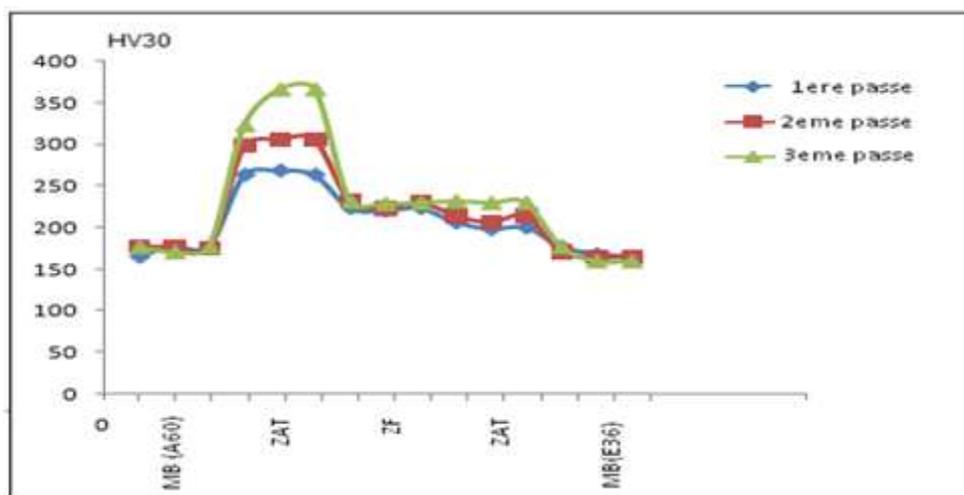


Figure 5.14 : courbes de dureté des trois passes en superpositions pour l'assemblage (C)

On remarque que les duretés obtenues pour les trois assemblages sur différentes zones de l'échantillon diffèrent d'une zone à l'autre. elles évoluent comme elles sont illustrées sur les trois figures ; ou elles augmentent graduellement en partant des aciers de base (160 à 177 HV) pour atteindre un maximum de 287 HV au niveau de l'interface et diminuer légèrement au niveau d de la ZF (214 à 198 HV). Cette différence est due aux conditions de soudage, notamment l'énergie.

La dureté est supérieure au niveau de la zone affectée thermiquement que dans le métal de base ou le métal fondu, c'est dû à la microstructure de cette zone qui est caractérisé par sa structure fine de la taille des grains de martensite et de bainite.

Les graphes en superposition nous montre aussi qu'il y a une diminution de la dureté de la première passe affectée par l'effet de cycle thermique de la deuxième passe, ainsi que le cycle thermique de la troisième passe influe sur la dureté de deuxième passe, ce phénomène peut être classé comme un traitement thermique de type revenu (traitement d'adoucissement).

Les valeurs de test de dureté nous ont confirmés l'effet des cycles thermiques successifs sur la dureté des passes dans le cas d'une soudure multi passes. Puisque on remarque sur la courbe une chute de dureté respectivement de la deuxième passe et la première passe, par rapport à celle de la troisième passe qui présente des duretés importantes, cette augmentation de dureté due à l'importance de la dissipation de la chaleur ainsi que l'énergie de soudage.

#### **V.4. Essai de traction**

##### **V.4.1. Comportement en traction uni-axial**

Pour chaque assemblage, un essai de traction sur éprouvette a été réalisé. Toutes les conditions expérimentales étaient identiques pour l'ensemble des ces essais, en disposant le cordon de soudure de chaque éprouvette perpendiculairement au sens de l'allongement.

Les figures 5.15, 5.16 et 5.17 présentent les courbes de traction de **l'assemblage A, B et C** à température ambiante et pour la vitesse de déformation 10mm/min et les caractéristiques conventionnelles sont présentés dans les tableaux 5.7, 5.8 et 5.9 ci-après :

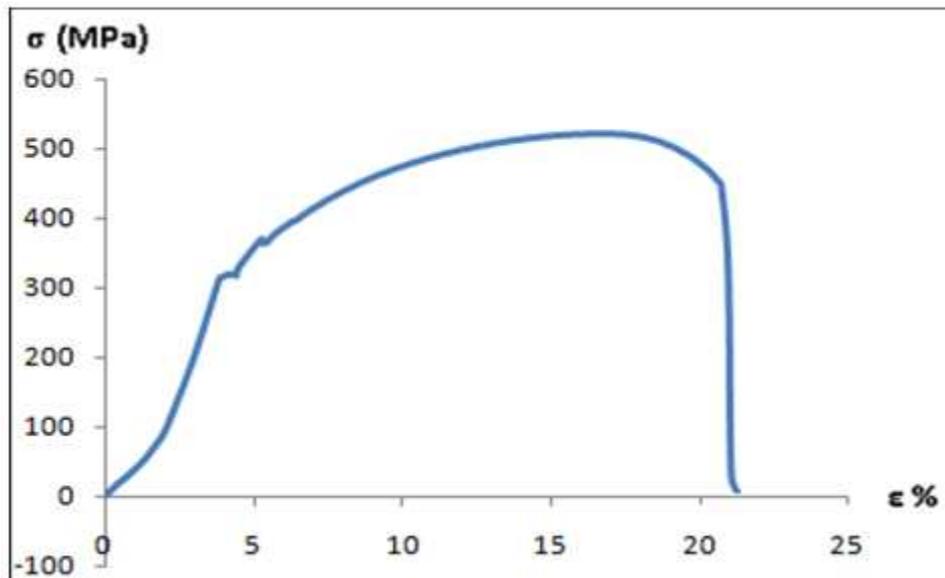


Figure 5.15 : Courbe de traction de l'assemblage A

Tableau 5.8 : Caractéristiques mécanique de l'assemblage A

Température (°C)	Caractéristiques		
	$R_{0.2\%}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$A(\%)$
<i>ambiante</i>	104,22	519,83	12,981

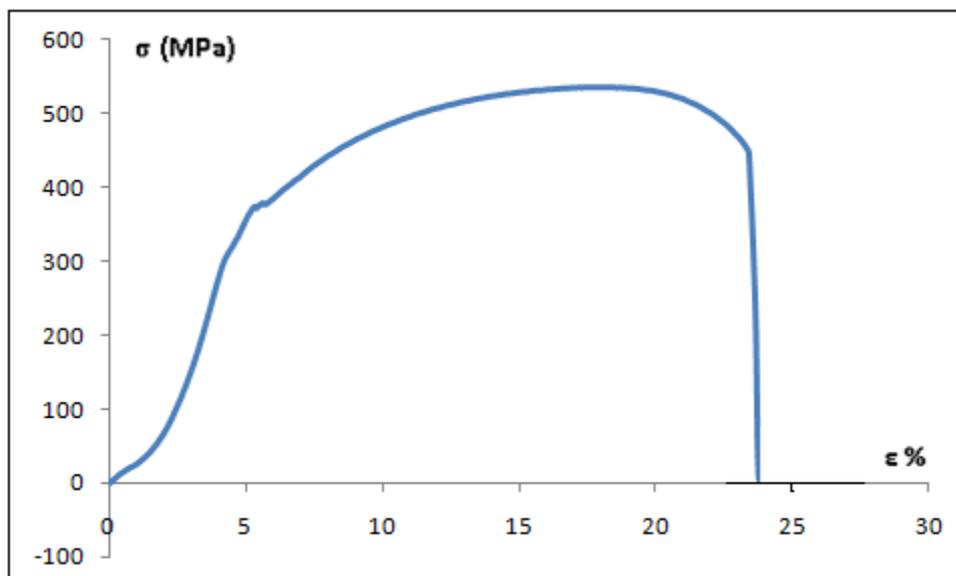


Figure 5.16: Courbe de traction de l'assemblage B

Tableau 5.9: Caractéristiques mécanique de l'assemblage B

Température (°C)	Caractéristiques		
	$R_{0.2\%}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$A(\%)$
<i>ambiante</i>	107.09	535.5	15,228

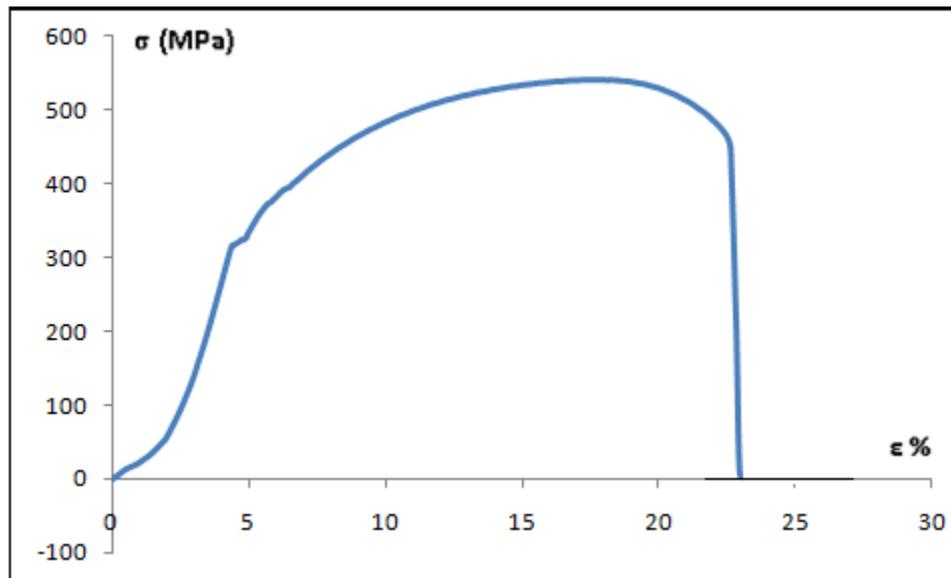


Figure 5.17 : Courbe de traction de l'assemblage C

Tableau 5.10 : Caractéristiques mécanique de l'assemblage C

Température (°C)	Caractéristiques		
	$R_{0.2\%}(MPa)$	$R_m(MPa)$	$A(\%)$
ambiante	108.16	540.8	13,694

➤ A propos des caractéristiques mécaniques la rupture ne s'est pas produite au niveau du joint soudé mais dans le métal de base de moindre résistance ; E36, voir figure 5.18. L'opération de soudage est donc faite dans des bonnes conditions pour les trois assemblages. Nous avons constaté que la rupture des éprouvettes est du type ductile avec une limite d'élasticité élevée et une zone de déformation plastique acceptable.



Figure 5.18 : Eprouvettes de traction après rupture pour les trois assemblages

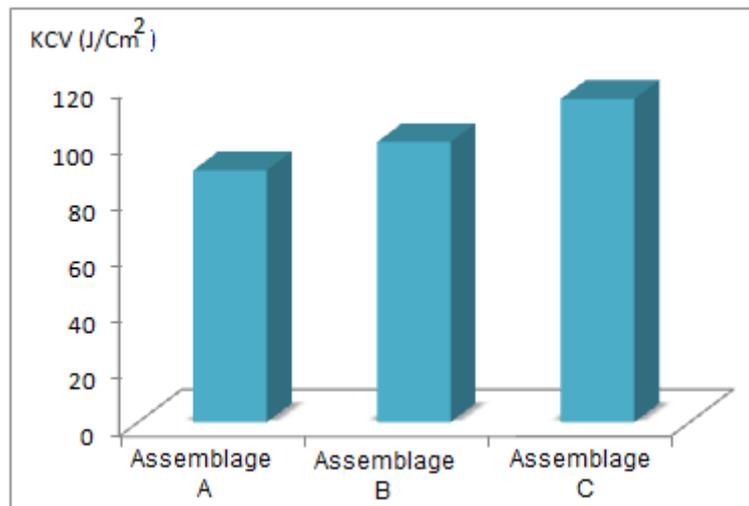
Les résultats des essais de traction montrent une bonne résistance mécanique ( $R_m \approx 520$  à  $540,8$  MPa) de la soudure qui est supérieur à la  $R_m$  du métal d'apport ( $R_m = 500$  MPa). Plus l'énergie de soudage augmente plus la résistance maximale des assemblages ( $R_m$ ) augmente.

**V.5. Essai de résilience (essai charpy V)**

Les valeurs sur l'énergie de rupture par unité de surface nécessaire pour rompre les joint soudés à travers les essais normalisés de résilience, avec entaille en V, est résumé dans le tableau et la figure si dessous :

**Tableau 5.11 : Résultats des essais de résilience**

assemblage	Energie (J)	Section (cm <sup>2</sup> )	KCV (J/cm <sup>2</sup> )
A	67	0,75	89,33
B	74,5		99,33
C	86		114,66



**Figure 5.19 : Comportement aux chocs des joints soudés.**

*Effet de l'énergie de soudage sur la résilience (énergie de rupture par unité de surface (J/cm<sup>2</sup>) pour rompre le joint soudé*

Pour ce type d'essai, les résultats sont importantes ( $89,33$  ;  $99,33$  et  $114,66$ (J/Cm<sup>2</sup>)) successivement pour les assemblages A, B et C. Ceci est dû à l'effet du traitement thermique que subis les trois assemblages. Le soudage multi passes provoque donc pour la première et la deuxième passe de chaque assemblage un traitement de recuit en rendant la structure moins dur.

Aussi, on remarque que les valeurs de résilience évoluent avec l'évolution des paramètres de soudage.

La meilleure tenue à la résistance aux chocs (ténacité) de ces liaisons bimétalliques est obtenue avec le joint soudé avec une énergie importante de l'assemblage (C), qui est de  $114,66\text{J}/\text{cm}^2$ .

Une valeur moyenne a été retenue pour l'assemblage (B) d'où l'énergie de soudage de ce dernier est faible par rapport à celle de l'assemblage C.

Par contre, l'écart étant de  $25,33\text{J}/\text{cm}^2$  par rapport à l'assemblage (A) ou l'énergie est faible. Autrement dit, ce dernier représente la valeur la plus petite tenue à la résistance aux chocs (ténacité).

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

Les châssis des grues fabriquées par l'unité Fabrication Grues et Compacteur Béjaïa (ENMTP) nécessitent la réalisation par soudage de la liaison bimétallique, aciers ordinaires A60/E36. Pour ce faire, L'utilisation du soudage MAG (Métal Active Gaz) donnant lieu à un métal d'apport en fils pleins ER70S-6 en acier peu allié, avec une couche cuivrée.

A cet effet, on a étudié du point de vue métallurgique cette liaison bimétallique (A60/E36). Ceci en effectuant l'observation macro- microstructurale ainsi que des essais mécanique.

A la lumière des résultats obtenus, on a remarqué :

Qu'au cours de l'opération du soudage il est difficile d'obtenir une bonne soudabilité du métal de base A60 suite a sa teneur importante en carbone, contrairement à l'acier E36.

Que les assemblages soudés représentent trois zones hétérogènes qui sont la zone affectée thermiquement, la zone fondue et le métal de base. La zone la plus sensible du cordon de soudure est la zone affectée thermiquement (ZAT) à gros grains, ou elle présente un maximum de dureté ce qui influe sur la ténacité de celle-ci et la fissuration à froid.

La dilution d'un assemblage soudé augmente avec l'évolution de l'énergie de soudage.

La microscopie des différentes zones des assemblages soudés nous a permis de distinguer qu'un taux important de martensite prédominant dans la ZAT du métal A60. Tandis que la ZAT du E36 présente une structure bainitique avec quelques ilots de martensite. Le mélange des deux constituants est constaté au niveau de la ZF. Ainsi, avec l'augmentation de l'énergie de soudage, les structures deviennent stables suit à la formation des phases d'équilibre telles que la bainite.

Le soudage multipasses peut engendrer des changements dans la structure métallurgique et dans les propriétés mécaniques le long du joint soudé. Ceux-ci sont causés essentiellement par l'effet des cycles thermiques de soudage.

Pour ce travail, les paramètres optimaux se situent pour l'assemblage C avec une énergie  $E= 5495,4 \text{ J/ cm}$ .

Comme perspectives il serait intéressant de :

- Préconiser un préchauffage de l'acier A60 avant le soudage ;
- Modifier le métal d'apport (celui choisi n'est pas adéquat) ;
- Réaliser d'autres essais mécaniques tels que la flexion et le pliage ;
- Utiliser un nombre considérable d'éprouvettes pour avoir plus de précision dans les résultats ;

- Faire une analyse de facies de rupture en microscope électronique à balayage ;
- Identifier les différentes phases de soudage aux rayons X.

Et en fin nous espérons que ce travail apportera un plus et servira de référence pour les autres promotions à venir.

# *Bibliographie*

# Bibliographie

- [1] **R.Castro, J.J. De Cadenet** : « Métallurgie du soudage des aciers inoxydable et résistant à chaud », Edition DUNOD Paris, (1968).
- [2] **A. Roos, B. Milet** : « Précis de Métallurgie Appliquée », Edition Technique et Documentation-Lavoisier, ISBN 2-85206-141-4, (1982).
- [3] **C. Chaussin, G. Hilly** : « Métallurgie. Tome I, alliages métalliques ». DUNOD 1984.
- [4] **J-Barralis et G Maeder** : « Précis de métallurgie », élaboration, propriétés et normalisation. 2<sup>ème</sup> édition. NATHAN.1994.
- [5] **Msichel Dupeux** : « Aide mémoire. Science des matériaux ». DUNOD 2004.
- [6] **K. Löbl, H. Tuma** : « Métal d'apport austénitique contenant de l'azote », Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, n° 5, pp. 259-265 (1986).
- [7] **J. Delair** : « Rechargement utilisés dans les assemblages soudés ». Applications industrielles, Matériaux et Techniques, n° 3-4, pp. 49-56, (1998).
- [8] **L.Devillers, D. Kaplan, A. Ribes, P.V. Riboud** : « Métallurgie et propriétés mécanique du métal fondu en soudage multipasse sous flux d'acier au C-Mn micro-allié », Mémoires et Etudes Scientifiques Revue de Métallurgie, n° 1, pp. 43-62, (1986).
- [09] **G.BERANGER, G. HENRY, G. SANZ** : « *Le livre de l'acier* ». Technique et Documentation, Lavoisier, 1994.
- [10] **E. Kaluc, L. Capan, S. Anik** : « Effets des paramètres du soudage sur la résistance en traction-cisaillement de différents aciers inoxydables soudés par points », Matériaux et Techniques n° 1-2, pp.11-13, (1997).
- [11] **J. Delair** : « La corrosion des soudures d'acier inoxydables , sa prise en compte pour la construction des appareils pour la synthèse de l'urée ». Matériaux et techniques n° 1-2, pp.48-55, (1996).
- [12] **J. Philibert, A. Vignes, Y. Bréchet, P** : Combrade, « Métallurgie, du minerai au matériau », Dunod, 2002 .
- [13] **Michel Colombié et coll** : « **matériaux métalliques** » 2e édition © Dunod, Paris, 2001, 2008 ISBN 978-2-10-053918-5.
- [14] **J.-L. Fanchon**, « Guide des sciences et technologies industrielles », Afnor, Nathan, gité la qualité d'« acier soudable » 2001.
- [15] **Short-arc.Jean-Pierre** : « Modélisation du soudage MIG/MAG en mode » PlanckaertCentre de Recherche en Automatique de Nancy CRAN – CNRS UMR 7039 2088.

# *Bibliographie*

- [16] **CETIM**: “Mécanosoudage”, ISBN285400-146-X, 1989.
- [17] **EASTERLING K**: ” Introduction to the Physical Metallurgy of Welding”, second edition, ed. Butherworks, 1992.
- [18] **Patrick Isac** : « compléments au précis de construction mécanique-procédé de fabrication » I- IND2103-tome II.
- [19] **CHRISTIAN BONNET** : « Le Soudage ; Métallurgie et Produits » Air Liquide /CTAS 2001
- [20] **Copyright** © :Décembre 2000 - Soudage 2000.
- [21] **P. MACQUET** : Ingénieur Européen en Soudage (EWE). CTICM « Construction Métallique », Département Construction Métallique n°1-1999.
- [22] **VALENSI Flavien** : « Contribution à l'étude des phénomènes liés aux effets anodiques et cathodiques en soudage MIG-MAG ». UNIVERSITE D'ORLEANS 2007
- [23] **L. Allais, Q. Auzoux, M. Reytier, A. Pineau** : Fissuration en relaxation des jonctions soudées en aciers inoxydables austénitiques, Mécanique et Industrie, n°6, pp. 45-54, (2005).
- [24] **M. Lafrance** : Propriétés d'emploi des tôles fortes en aciers. Influence de la composition chimique, Revue de Métallurgie/CIT, n° 10, pp. 1253-1273, (1999).