

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Technologie des Matériaux**

Intitulé du mémoire

## **Caractérisation microstructurale et mécanique des soudures en acier inoxydable ferritique**

**Présenté par :**

DOUGHNOU Mohamed Oussama

DJENADI Mustapha

**Promotrice :**

Dr. ZERMANE Faiza

**Co-promoteur :**

Mr. BENSALIM Nabil

Année universitaire 2016/2017



# Remerciements

*Nos remerciements vont d'abord au Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la patience pour pouvoir réaliser ce travail*

*Au terme de ce travail, on tient à exprimer un profond témoignage de reconnaissance à M<sup>me</sup> ZERMANE Faiza maitre de conférences grade A, d'avoir bien voulu nous guider dans ce travail à sa fin et de nous avoir fait bénéficier de ses conseils judicieux et ses encouragements*

*On remercie également notre Co-promoteur Mr BENSALD Nabil, attaché de recherche dans le CRTI pour son aide, son suivi, sa disponibilité et son expérience qui nous ont été une aide précieuse tout au long de notre travail de recherche*  
*Notre très vive gratitude va également à M<sup>me</sup> BOUCHNAFA.N et Mr BEN OMAR qui nous ont pris en charge et nous ont permis de faire ce stage et nous donnent l'opportunité pour vivre cette expérience, on vous dit infiniment merci*

*On exprime nos sincères remerciements aux membres de jury pour avoir bien voulu faire part de leur observations à propos de ce travail et de participer à ce jury.*

*Nos plus vifs remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel du CRTI, en particulier : M' BOUTAGANE ainsi qu'à M<sup>me</sup> ZAHRA, M<sup>me</sup> ZAHIA et Mr AMINE, pour leur gentillesse, leur aide et leur disponibilité.*

*On porte envers l'ensemble des enseignants du département de Génie des Procédés qui ont contribué à notre formation, une immense gratitude.*

*Bien qu'il nous soit impossible de citer tous ceux et celles qui ont contribué et qui nous ont soutenu lors de la réalisation de ce travail, qu'ils soient assurés de notre profonde reconnaissance.*

*Merci* 

# الملخص

يرتبط الفولاذ المقاوم للصدأ من الحديد (AISI 430) ، بمجموعة من المشاكل أثناء عملية التلحيم. من ضمن هذه المشاكل نجد تضخم الحبوب، في منطقة الانصهار (ZF)، والمنطقة المعرضة للحرارة (ZAT) من جهة ومن جهة أخرى نجد تشكل المرتنسيات (martensite) في حدود الحبوب خلال عملية الحام، هذه المشاكل تجعل مرونته عند درجة حرارة منخفضة ضعيفة، ما يجعل التجميع حساس وقابل للكسر. حيث يمكن تخفيض حجم الحبوب من خلال تسريع الدورة الحرارية، أو عن طريق الحد من كمية الطاقة أثناء عملية اللحام. يهدف هذا العمل أولاً وصف مجهري للحامات الفولاذ (AISI 430) بعوامل متغيرة (السرعة، شدة التيار) ومن ثم تحسينها. لقد ركزنا على تحسين صقل حجم الحبوب باستعمال لحام غاز حامل التنغستن (GIT).

توجد المرتنسيات (martensite) وتراسيب الكربيد (precipitations de carbures) في حدود الحبوب، تتسبب في هشاشة الفولاذ، ولتحسينها يجب اجراء معالجة حرارية ما بين 750-850 درجة مئوية بعد عملية التلحيم والتي تحول المرتنسيات الى فريت وكربيد.

**الكلمات الرئيسية:** شدة التلحيم وسرعة التلحيم، لحام غاز حامل التنغستن، الفولاذ المقاوم للصدأ من الحديد (430)، تخفيض حجم الحبوب.

# Résumé

Les aciers inoxydables ferritiques AISI 430, sont associés à de nombreux problèmes lors du procédé de soudage. Ces problèmes sont le grossissement des grains, à la fois dans la zone fondu (**ZF**) et celle affectée thermiquement (**ZAT**) et la formation de martensite au joint des grains de la soudure. Le grossissement des grains de la ferrite à haute température et la présence de martensite font que la résilience à température ambiante est généralement faible, ce qui fait que l'assemblage devient sensible à la rupture fragile. La taille des grains peut être réduite en accélérant le cycle thermique, ou en réduisant l'apport en énergie lors du procédé de soudage.

Le but du travail consiste, premièrement à caractériser la microstructure des soudures d'acier (**AISI 430**) sous paramètres variables (le courant et la vitesse) et ensuite à optimiser ses mêmes paramètres. On s'est concentré sur l'amélioration de l'affinage de la taille durant le procédé de soudage TIG (**Tungstène Inerte Gaz**).

La présence de martensite et des précipitations de carbures dans les joints des grains cause une fragilisation, pour l'améliorer ils devront subir après soudage un traitement thermique entre 750-850 °C transformant la martensite en ferrite plus carbures.

**Mots-Clés :** Courant de soudage, la vitesse de soudage, soudage TIG, acier AISI 430 (acier inoxydable ferritique), Taille des grains.

# Abstract

Ferritic stainless steels, AISI430, are associated with many problems during the welding process. These problems are the grain growth, both in the fusion zone (**FZ**) and the heat affected zone (**HAZ**) and martensite formation at grain boundaries of the weld. The grain growth of ferrite at high temperature and the presence of martensite make the resilience at ambient temperature low, is that fact that the assembly becomes susceptible to fragile fracture. The grain size can be reduced by accelerating the thermal cycle, or by reducing the energy input during the welding process.

The aim of the work is, to characterize the microstructure of welds steel (**AISI 430**) with variable parameters (the current, the speed) and then optimize this own parameters. We focused on improving refining the grain size during the TIG (**Tungsten Inert Gas**) welding process.

The presence of martensite and carbide precipitation in grain seals cause an embrittlement and to improve it we did a heat treatment between 750-850°C after welding who transforms martensite into ferrite and carbide.

**Keywords:** welding current, welding speed, TIG welding, AISI 430 (ferritic stainless steel), grain Refinement.

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1 :</b> Diagramme d'équilibre Fe-C.....	05
<b>Figure I.2 :</b> Diagramme d'équilibre Fe-Cr.....	06
<b>Figure I.3 :</b> L'influence du C sur la boucle $\gamma$ .....	07
<b>Figure I.4 :</b> Classification par type de source d'énergie.....	13
<b>Figure I.5 :</b> Principe du soudage TIG.....	14
<b>Figure I.6 :</b> Schéma illustrant dans une section transversale d'un assemblage soudé les différentes zones.....	17
<b>Figure II.1 :</b> Préparation des tôles pour l'opération de soudage.....	19
<b>Figure II.2 :</b> Système de bridage des tôles .....	20
<b>Figure II.3 :</b> Méthode de prélèvement d'un échantillon.....	23
<b>Figure II.4 :</b> Exécution et mesures de l'essai de microdureté Vickers .....	26
<b>Figure III.1 :</b> Microstructure de métal de base (X1000).....	28
<b>Figure III.2 :</b> Microstructure de la zone de liaison (1) X50 ; (2) X150 ; (3) X1500.....	30
<b>Figure III.3 :</b> Influence des paramètres de soudage sur la microstructure (X50).....	33
<b>Figure III.4 :</b> Topographie des soudages.....	37
<b>Figure III.5 :</b> Contrôle par radiographie des soudures.....	39
<b>Figure III.6 :</b> Photo montrant l'influence des paramètres de soudage sur la macrostructure .....	40

<b>Figure III.7 :</b> Schéma du balayage de la microdureté.....	46
<b>Figure III.8.</b> L'évolution de la dureté en fonction de la distance entre piques (01,02).....	42
<b>Figure III.9.</b> L'évolution de la dureté en fonction de la distance entre les piques (03,04).....	43
<b>Figure III.10.</b> L'évolution de la dureté en fonction de la distance entre les piques (05).....	44
<b>Figure III.11 :</b> Courbe de traction de l'échantillon (01).....	45
<b>Figure III.12 :</b> Courbe de traction de l'échantillon (02).....	46
<b>Figure III.13 :</b> Courbe de traction de l'échantillon (03).....	47
<b>Figure III.14 :</b> Courbe de traction de l'échantillon (04).....	48
<b>Figure III.15 :</b> Courbe de traction de l'échantillon (05).....	49
<b>Figure III.16 :</b> Examen des facies de rupture de l'échantillon (01).....	50
<b>Figure III.17 :</b> Examen des facies de rupture de l'échantillon (02).....	51
<b>Figure III.18 :</b> Examen des facies de rupture de l'échantillon (03).....	51
<b>Figure III.19 :</b> Examen des facies de rupture de l'échantillon (04).....	52
<b>Figure III.20 :</b> Examen des facies de rupture de l'échantillon (05).....	52
<b>Figure III.21 :</b> Dureté avant et après traitement thermique.....	53
<b>Figure III.22 :</b> Métal fondu après revenu à 800 °C.....	54

# LISTE DES ABREVIATIONS

A : Allongement à la rupture.

AISI : American Iron and Steel Institute.

CET : Columnar to Equiaxe Transition.

E: Module de Young.

F : La charge appliquée.

Fmax : Force maximale.

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding.

HI : Heat Input.

MB : Métal de base.

MEB : Microscope Electronique à Balayage.

Re : La Limite élastique.

Rp0,2 : La limite élastique à 0.2%.

Rm : La résistance à la rupture.

TIG : Tungsten Inert Gaz.

ZAT : Zone affecté thermiquement.

ZF : Zone fondu.

ZL : Zone de liaison.

$\alpha$  : Structure cubique centrée.

$\gamma$  : Structure cubique à face centrée.



# Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Les familles d'acier inoxydables.....	09
<b>Tableau II.1</b> : Paramètres énergétique de soudage.....	21
<b>Tableau III.1</b> : Composition chimique de l'acier inoxydable ferritique AISI 430.....	28
<b>Tableau III.2</b> : Taille des grains et la chaleur apportée.....	35
<b>Tableau III.3</b> : les paramètre optimaux.....	36
<b>Tableau III.4</b> : Résultats de traction de l'échantillon (01).....	45
<b>Tableau III.5</b> : Résultats de traction de l'échantillon (02).....	46
<b>Tableau III.6</b> : Résultats de traction de l'échantillon (03).....	47
<b>Tableau III.7</b> : Résultats de traction de l'échantillon (04).....	48
<b>Tableau III.8</b> : Résultats de traction de l'échantillon (05).....	49

# CONCLUSION

Ce travail s'ajoute aux nombreux travaux qui s'effectuent actuellement sur la soudabilité des aciers inoxydables ferritiques. Cette soudabilité a été étudiée selon deux aspects : opératoire et métallurgique.

Nous relevons les difficultés pour souder de faibles épaisseurs sans métal d'apport tout en assurant une pénétration satisfaisante, condition primordiale d'une opération de soudage réussie. Nous avons réussi à assurer la continuité métallique, en choisissant les paramètres de soudage adéquats.

Les conclusions que nous pouvons tirer de cette étude sont :

- La microstructure des soudures de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 qui se produit sous paramètres variables de soudage, a été étudiée.
- Les résultats obtenus n'impliquent que, les caractéristiques microstructurales du cordon de soudure influencées par le courant et la vitesse de soudage, mais au-delà d'une valeur critique du courant, la vitesse n'a aucune influence.
- On peut diminuer la fragilité de l'acier inoxydable ferritique AISI 430, en limitant le grossissement des grains de ferrite, ce résultat s'obtient en accélérant le cycle thermique, et, en ne mettant donc en jeu, lors du soudage, qu'une énergie réduite.
- La présence de martensite et des précipitations de carbures dans les joints des grains cause une fragilisation. Ils devront subir après soudage un traitement thermique entre 750-850 °C, transformant la martensite en ferrite plus carbures.
- Après avoir fait subir à nos échantillons un traitement thermique de type revenu nous avons constaté une diminution de la dureté dans la zone fondue et dans la ZAT et se stabiliser dans le MB.

Les paramètres optimaux de soudage TIG trouvés dans cette étude sont :

- Courant de soudage :  $I = 80 \text{ A.}$  ;  $I = 90 \text{ A.}$
- Vitesse de soudage :  $V = 8 \text{ mm/s}$  ;  $V = 8 \text{ mm/s.}$

Il est évident qu'un tel travail sur les inoxydables ferritiques ne fait que commencer. Les résultats obtenus sont très appréciables. De nombreuses questions restent encore posées que ce soit par rapport aux divers paramètres de maîtrise des technologies des procédés de soudage (TIG) ou par rapport aux divers défauts que nous pouvons rencontrer tels que les inclusions métalliques de tungstène.

C'est pourquoi, d'un point de vue opératoire, nous recommandons dans un premier temps :

- L'utilisation d'un gaz de protection dont le degré de pureté est garanti,
- De revoir la méthode de préparation des surfaces avant soudage ;
- d'automatiser le procédé TIG ce qui nous permettra d'assurer une stabilité de déplacement de l'arc, ainsi, évaluer l'énergie réelle dissipée en plus de l'utilisation de grande vitesse de soudage.

D'un point de vue métallurgique, nous avons constitué une base de données que nous pourrions suivre en allant plus loin dans l'expérimentation.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION</b> .....	01
---------------------------	----

## **Chapitre I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

<b>I.1.</b> Généralités sur les aciers inoxydables .....	03
<b>I.2.</b> Etat de l'art sur l'acier inoxydable et leur utilisation.....	03
<b>I.3.</b> Les types des aciers inoxydables .....	04
<b>I.4.</b> Les effets des éléments d'addition .....	08
<b>I.5.</b> Les principaux constituants des aciers inoxydables .....	08
<b>I.6.</b> Domaines d'utilisation des aciers inoxydables .....	08
<b>I.7.</b> Aperçu sur les aciers inoxydables ferritiques .....	10
<b>I.8.</b> Procédés de soudages et phénomènes métallurgiques .....	11
<b>I.8.1</b> Définition .....	12
<b>I.8.2.</b> Types de soudage .....	12
<b>I.8.3.</b> Classification des procédés de soudage .....	12
<b>I.8.4.</b> Cycle thermique de soudage.....	13
<b>I.9.</b> Notions de base sur le Tungstène à Gaz Inerte (TIG).....	14
<b>I.10.</b> Caractéristiques de soudures.....	16

## **CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES**

<b>II.1.</b> Introduction .....	18
<b>II.2.</b> Détermination de la composition chimique du matériau .....	18
<b>II.3.</b> Procédure de soudage .....	18
<b>II.4.</b> Contrôle visuel et radiographique .....	22
<b>II.5.</b> Caractérisations structurale .....	23
<b>II.6.</b> Observation métallographique.....	24
<b>II.7.</b> Caractérisations mécaniques .....	25
<b>II.8.</b> Traitement thermique.....	26
<b>II.9.</b> Microscope électronique à balayage .....	27

## **CHAPITRE III : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION**

<b>III.1.</b> Introduction.....	28
<b>III.2.</b> Résultat de composition chimique de matériau de base utilisé .....	28

<b>III.3. Caractérisation structurale</b> .....	28
<b>III.4. Résultats de mesure de la taille des grains et la chaleur apportée</b> .....	34
<b>III.5. Contrôle visuel et radiographique</b> .....	36
<b>III.6. Les résultats de la caractérisations mécaniques</b> .....	41
<b>III.7. Résultat de la Caractérisation par microscopie électronique à balayage (M. E. B)</b> [examen des faciès de rupture] .....	50
<b>III.8. Traitement thermique</b> .....	53
 <b>Conclusion</b> .....	 55

*Synthèse  
bibliographique*

---

**Chapitre**

**2**

*Matériels  
et  
méthodes*

*Résultats  
et  
discussion*



---



# **Conclusion**

---



# **Introduction**

---



**Annexe**

---



**Références  
bibliographiques**

## **I.1. GENERALITES SUR LES ACIERS INOXYDABLES :**

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques à base d'acier (alliage : fer-carbone) qui doivent contenir au moins 10,5 % de chrome et des éléments d'alliage comme le nickel, le molybdène, le silicium, etc. Selon le pourcentage de ces éléments, la structure d'acier en condition d'emploi sera martensitique, duplex, austénitique ou ferritique. La principale propriété des aciers inoxydables est leur excellente résistance à la corrosion.

Cette propriété donne au matériau une durée de vie quasi exceptionnelle dans la très grande majorité des milieux. A cette propriété fondamentale, s'ajoutent les caractéristiques mécaniques intéressantes comme la résistance mécanique, la ductilité et la ténacité [3].

## **I.2. ETAT DE L'ART SUR L'ACIER INOXYDABLE ET LEUR UTILISATION :**

L'histoire des aciers inoxydables est liée à celle du chrome, métal découvert en **1797** par le chimiste Français Nicolas-Louis Vauquelin et isolé en **1854** par Bunsen [4].

En **1820**, J.Stodart et M. Faraday publièrent un rapport sur la résistance à la corrosion des différents alliages à base de fer qu'ils avaient préparé ; c'est sans doute le premier rapport où les alliages Fe-Cr furent mentionnés. Cependant, la teneur maximum de chrome contenu dans ces alliages était en dessous de la valeur requise pour une passivation [4].

L'évolution de cette première découverte vers celle des aciers inoxydables fut ralentie par les circonstances suivantes :

- Les alliages préparés étaient en général très riches en carbone
- Les teneurs en chrome étaient le plus souvent trop basses (résistance à la corrosion insuffisante), ou trop élevées (manque de déformation).

Entre 1904 et 1909, les métallurgistes français Guillet et Portevin ainsi que l'allemand Giesen publièrent les résultats de leurs recherches sur des aciers au chrome, dont les compositions sont très voisines de celles utilisées aujourd'hui. Ils étudièrent l'effet des traitements thermiques sur la structure et les propriétés mécaniques. Le mécanisme de résistance à la corrosion des aciers inoxydables commença à être étudié, et c'est le mérite du métallurgiste allemand Monnartz d'avoir mis en relief le rôle de la passivité et celui de la teneur en carbone sur cette résistance [5].

Si la période comprise entre 1904 et 1920 a été riche en travaux de laboratoire, il a fallu attendre presque un demi-siècle pour atteindre un stade véritablement industriel.

Les aciers inoxydables ferritiques Peu utilisés à leurs débuts pour leur manque de ductilité ou de soudabilité et leur fragilité, les aciers inoxydables ferritiques ont connu depuis 50 ans une phase de développement importante. Les travaux intensifs des années 1970 aboutirent à des aciers inoxydables ferritiques ayant une bonne soudabilité et une mise en œuvre facilitée. Les progrès effectués dans l'élaboration et la transformation des métaux ont été prépondérants au développement et à l'utilisation industrielle de ces aciers. Aujourd'hui, les aciers inoxydables ferritiques peuvent, dans un certain nombre d'applications, rivaliser avec les aciers austénitiques beaucoup plus chargés en éléments d'alliage et donc beaucoup plus coûteux.

### **I.3. LES TYPES DES ACIERS INOXYDABLES :**

La connaissance des diagrammes d'équilibre binaires Fe-Cr, Fe-C, ainsi que les diagrammes d'équilibre ternaires issues des différentes combinaisons entre les diagrammes cités ci-dessus, plus particulièrement les diagrammes Fe-Cr-Ni et Fe-C-Ni permet de comprendre et de justifier les différentes familles d'aciers inoxydables ainsi que les transformations structurales qu'ils subissent.

#### **I.3.1. Alliage Fer-Carbone**

Le carbone est l'élément non métallique indispensable à tous les aciers. Le diagramme Fe-C est bien connu (figure I.1) et présente, à l'état solide. Il s'agit d'un élément gammagène puissant qui favorise très fortement le domaine de la solution solide d'insertion du carbone dans la structure austénitique du fer. Pour des raisons de résistance à la corrosion, la teneur en carbone des aciers inoxydables est dans la plupart des cas maintenue très basse.

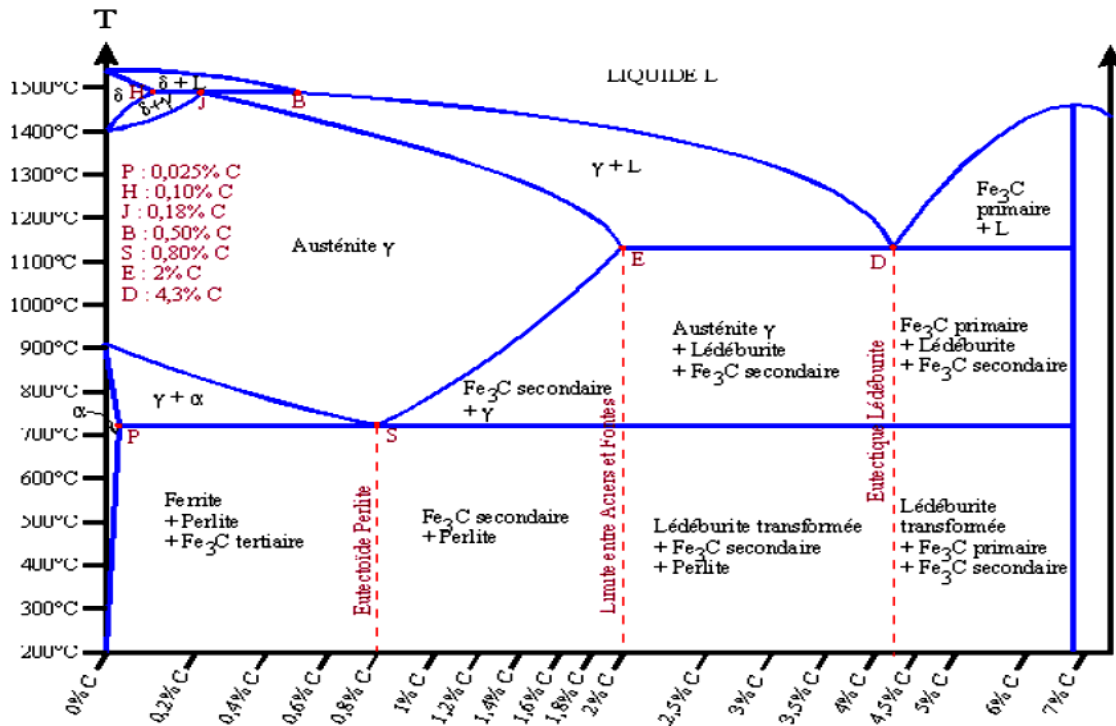


Figure I.1. Diagramme d'équilibre Fe-C [6]

Le carbone est majoritairement en solution. La solubilité maximale du carbone dans l'austénite est de l'ordre de 2% à la température du palier eutectique alors qu'elle est moindre à 0,1% dans la ferrite  $\alpha$  et dans la ferrite  $\delta$ .

### I.3.2. Alliage Fer-Chrome

Le chrome, cristallisant dans le système cubique centré, constitue l'élément d'alliage essentiel des aciers inoxydables. Il génère la passivation de l'acier, par la formation d'un film passif que l'on trouve sous forme d'oxyde complexe de type  $(Fe, Cr)_2O_3$  et d'hydroxyde  $Cr(OH)_3 \cdot nH_2O$  dans le film passif [7]. De plus, le chrome favorise le domaine ferritique et élargit son domaine d'existence, c'est un élément alphagène.

Le diagramme d'équilibre Fe-Cr (figure I.2) montre que l'existence de la phase  $\gamma$  est limitée à l'intérieur d'un domaine appelé « Boucle  $\gamma$  », cette situation est due à la structure cristallographique du chrome.

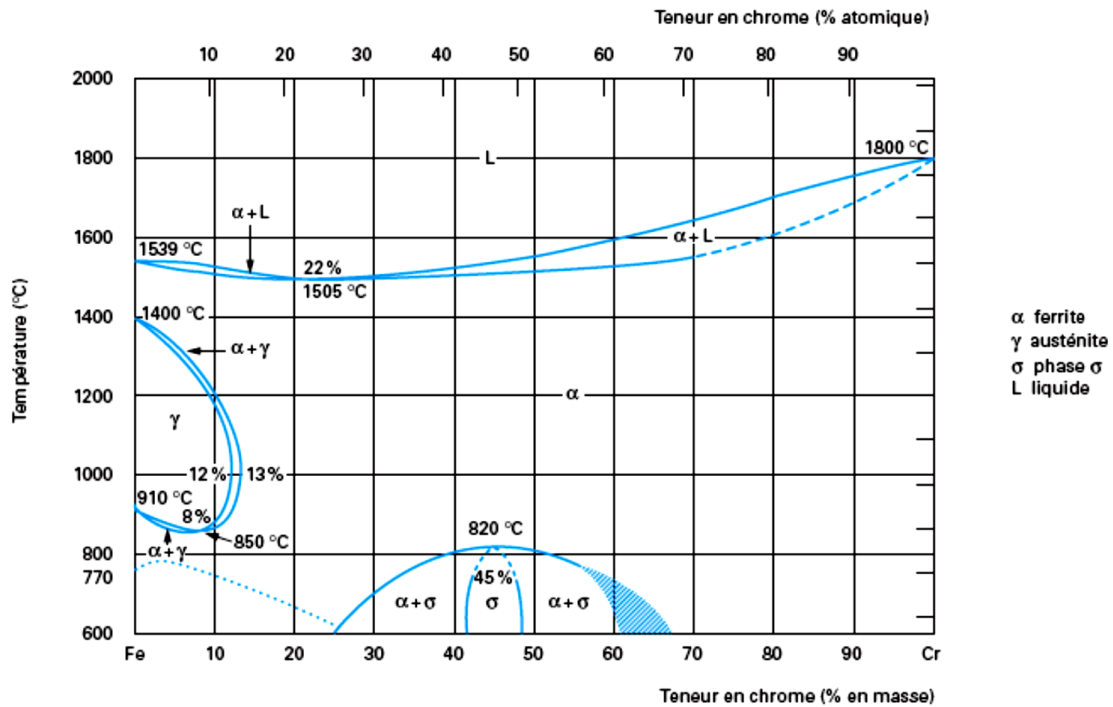


Figure I.2. Diagramme d'équilibre Fe-Cr [7].

On peut délimiter deux régions de teneurs en chrome [5] :

- Pourcentage de Cr < 13% : ces alliages ont la possibilité d'être austénisés totalement ou partiellement et peuvent donc subir la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$  par chauffage ou par refroidissement.
- Pourcentage de Cr > 13% : ces alliages sont ferritiques à toutes températures et ne peuvent pas donc subir de trempe martensitique. Cependant, pour des teneurs suffisantes en chrome, il y a possibilité d'apparition d'une phase intermétallique, dure et fragile, dite phase sigma ( $\sigma$ ).

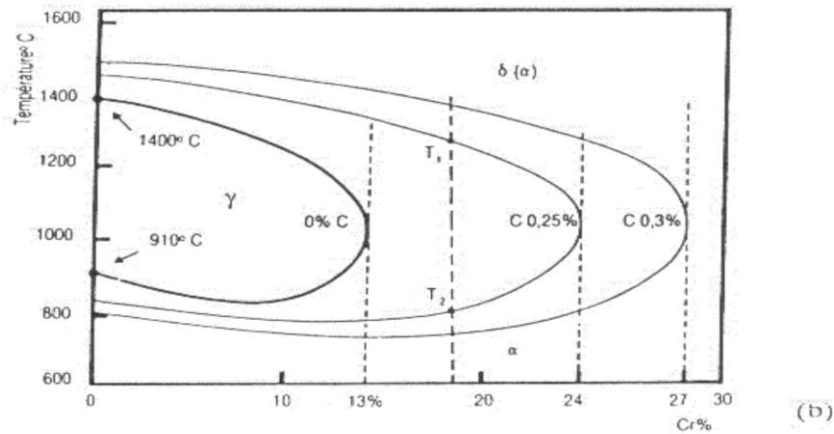
Cette phase sigma peut apparaître autour de la composition 50/50 (entre 45 et 55%), et elle peut précipiter aux joints de grains ferritiques  $\alpha$  en rendant fragile l'alliage dans le cas de fortes teneurs en chrome ou pour des traitements de revenu prolongés [5].

### I.3.4. Alliage ternaire Fer-Chrome-Carbone

Le carbone possède une action gammagène puissante, il élargit fortement le domaine austénitique. En outre, il peut donner lieu à la précipitation des carbures qui, bien qu'ils aient un pouvoir durcissant peuvent conduire néanmoins à des problèmes de tenue à la corrosion. Pour ces raisons, la teneur en carbone est dans la plupart des cas maintenue très basse [8,5].



Le fait d'ajouter du carbone à un alliage binaire Fe-Cr élargit en température et en concentration le domaine d'existence de la phase austénitique  $\gamma$ . Cela est illustré dans la figure (1.3.)



**Figure I.3 :** l'influence du C sur la boucle  $\gamma$  [9]

### **I.3.5. Alliage ternaire Fer-Chrome-Nickel**

Le nickel, de structure cubique à faces centrées favorise l'extension du domaine austénitique. Il est avec le chrome un des plus importants éléments d'alliage des aciers inoxydables austénitiques et austéno-ferritiques.

Le nickel améliore la résistance à la corrosion et renforce en particulier la résistance à la corrosion sous tension [10]. Par ailleurs, il augmente la capacité de trempe des aciers en abaissant la vitesse critique de refroidissement [5]. Comme le carbone, le nickel élargit en température et en concentration le domaine austénitique des alliages Fe-Cr. Mais il est remarquable qu'il faut une teneur beaucoup plus importante en nickel pour élargir la boucle  $\gamma$  qu'il en faut avec l'addition du carbone. Ceci démontre que le carbone a un pouvoir gammagène beaucoup plus prononcé que celui du nickel [8].

#### **I.4. LES EFFETS DES ELEMENTS D'ADDITION :**

Les éléments d'alliage, et leurs proportions, peuvent modifier le diagramme d'équilibre Fer-Carbone. Ils peuvent être regroupés en deux familles :

- Une **première** famille des éléments appelé les **alphagènes**. Ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique centrée. Ce sont notamment : le chrome, le molybdène, le silicium, le titane, le niobium, le vanadium, le tungstène et l'aluminium.
- **La seconde** est la famille des éléments **gammagènes**. Ils favorisent la prépondérance à température ambiante d'une structure cristallographique cubique à faces centrées. Ce sont notamment : le nickel, le carbone, l'azote, le cobalt et le manganèse.

#### **I.5. PRINCIPAUX CONSTITUANTS DES ACIERS INOXYDABLES :**

On peut diviser les constituants des aciers inoxydables en deux : la matrice et les constituants mineurs eux même partagés en phases interstitielles et phases intermétalliques.  
[11]

En plus des éléments principaux constituant les aciers inoxydables, à savoir le Fer, le Chrome et le Nickel, d'autres éléments y sont ajoutés comme éléments d'addition soit en insertion tels que le Carbone ou l'Azote, soit en substitution tel que le Molybdène et la structure des aciers inoxydables en dépend énormément.

#### **I.6. DOMAINES D'UTILISATION DES ACIERS INOXYDABLES :**

En raison de leur résistance à la corrosion et de leurs finis de surface de tout premier rang, les aciers inoxydables jouent un rôle prépondérant pour l'équipement des particuliers et des collectivités, dans le bâtiment et la décoration, l'industrie des transports et les industries pétrolières, agroalimentaires, pharmaceutiques et chimiques, devient de plus en plus un produit de grande consommation. Parallèlement, il s'impose comme un matériau de base pour la fabrication des équipements industriels qui doivent résister à des sollicitations mécaniques, chimiques et thermiques de plus en plus sévères.

Les aciers inoxydables constituent d'une grande famille d'alliages métalliques qui ont tous en commun de posséder du fer et du chrome. Suivant leur teneur en chrome et les traitements métallurgiques qu'ils ont subis, ils présentent une large gamme de propriétés. Dans la suite, nous allons brièvement décrire les différentes familles d'aciers inoxydables [7].

**Tableau 1.1.** Les familles d'acier inoxydables [6, 12,13].

<b>Classe d'acier inoxydable</b>	Martensitique	Ferritique	Austénitique	Austéno-ferritique (Duplex)
<b>Composition chimique</b>	C% $\leq$ 1,2 12 $\leq$ Cr % $\leq$ 18 Ni % $\leq$ 7 Mo % $\leq$ 3	Alliage Fe-Cr ou Fe-Cr-Mo. 11 $\leq$ Cr% $\leq$ 30. Aucune addition en Nickel	17 $\leq$ Cr % $\leq$ 18 7 $\leq$ Ni% $\leq$ 14 C% $\leq$ 0.05 Mo % $\leq$ 3	20 < Cr% < 25 4 < Ni% < 7 Mo % $\leq$ 4 N % $\leq$ 0,3
<b>Propriétés mécaniques</b>	- Dureté élevée - Elasticité élevée - Bonne résistance à la corrosion	- Elasticité assez bonne - Dureté faible.	- Bonne résistance à la rupture ; - Elasticité faible ; - Ductilité et Ténacité exceptionnelles ; - Bonne résistance à la corrosion.	- Haute résistance à la rupture ; - Elasticité très élevée ; - Excellentes ductilité et ténacité - La résistance à la corrosion.
<b>Propriétés physiques</b>	- Faible dilatation thermique.	- Faible dilatation thermique ; - Alliages ferromagnétiques.	- Haute dilatation thermique.	- Bonne dilatation thermique - Haute résistivité électrique.

## **I.7. APERÇU SUR LES ACIERS INOXYDABLES FERRITIQUES :**

Ce sont des alliages fer-chrome dont la teneur en chrome varie de 11 à 30% [14]. Les aciers inoxydables ferritiques sont caractérisés par le fait que leurs structures restent ferritique dans tout l'intervalle de température, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de transformation  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ , ils sont magnétiques ; insensibles à la trempe ; sensibles au grossissement des grains à chaud. [15, 16]. Pour garantir une structure ferritique aux hautes températures, on rajoute des éléments d'alliage dits « stabilisants » (Ti, Nb, Zr) qui ont la propriété de piéger le carbone et l'azote, éléments hautement austénitiques [17].

Ces aciers furent développés après la réalisation des aciers inoxydables austénitiques qui avaient pour défaut la rupture sous corrosion sous contrainte, particulièrement en présence d'ions chlorurés et après l'augmentation du prix de nickel.

Ces aciers ont une très bonne résistance à la corrosion mais des caractéristiques mécaniques faibles. Ils sont utilisés dans le domaine des ustensiles ménagers (cuillères, éviers...), dans le domaine alimentaire et en milieu très agressif (eau de mer) [12].

Il existe trois nuances des aciers inoxydables ferritiques :

- Les aciers inoxydables semi-ferritiques qui ont une teneur en chrome entre 11 et 16 %, ces aciers subissent une transformation partielle en austénite lors des cycles thermiques à haute température.
- Les aciers inoxydables purement ferritiques ont une teneur en chrome comprise entre 12 et 19 %, ces aciers ne présentent aucune transformation structurale depuis la température ambiante jusqu'à la température de liquide.
- Les aciers ferritiques très fortement alliés, ou super-ferritiques, ont des teneurs en éléments d'addition plus importantes  $Cr \geq 20 \%$ .

Ces aciers ont été développés pour leurs aptitudes face à la corrosion sous contraintes et la corrosion par piqûre. [18]

### **I.7.1. Soudabilité**

On considère qu'un matériau métallique est soudable, à un degré donné, par un procédé et pour un type d'application donné. Nous nous intéresserons à la soudabilité opératoire, c'est-à-dire la facilité avec laquelle on peut, d'un point de vue opératoire, obtenir les caractéristiques de soudures voulues avec les aciers inoxydables ferritiques et surtout à leur soudabilité métallurgique. Celle-ci intègre tous les effets que peut avoir l'opération de soudage sur les caractéristiques microstructurales, pouvant affecter les propriétés mécaniques ou de tenue à la corrosion de la soudure.

### **I.8. PROCÉDES DE SOUDAGES ET PHÉNOMÈNES METALLURGIQUES :**

L'assemblage par soudage occupe une place primordiale dans l'univers industriel. Il est utilisé dans l'élaboration des bateaux, trains, avions, fusées, automobiles, ponts, tuyaux, réservoirs et tant d'autres choses qui ne sauraient être construites sans le recours au soudage.

La clé des problèmes qui se posent lors d'une construction à souder relève du métier du soudeur dont la démarche doit inclure, outre l'opération de soudage, les problèmes se posant en amont et en aval de celle-ci, à savoir :

- La conception des assemblages : découpage de l'assemblage et disposition des joints ;
- La préparation des pièces avant soudage : géométrie des bords, état des surfaces ;
- La mesure de la qualité des soudures et de la tenue de l'assemblage en service.

### **I.8.1 Définition**

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties du matériau, de manière à assurer la continuité entre les pièces soudées [19]. La soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles, avec ou sans adjonction d'un métal d'apport. La Soudure peut donc être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport.

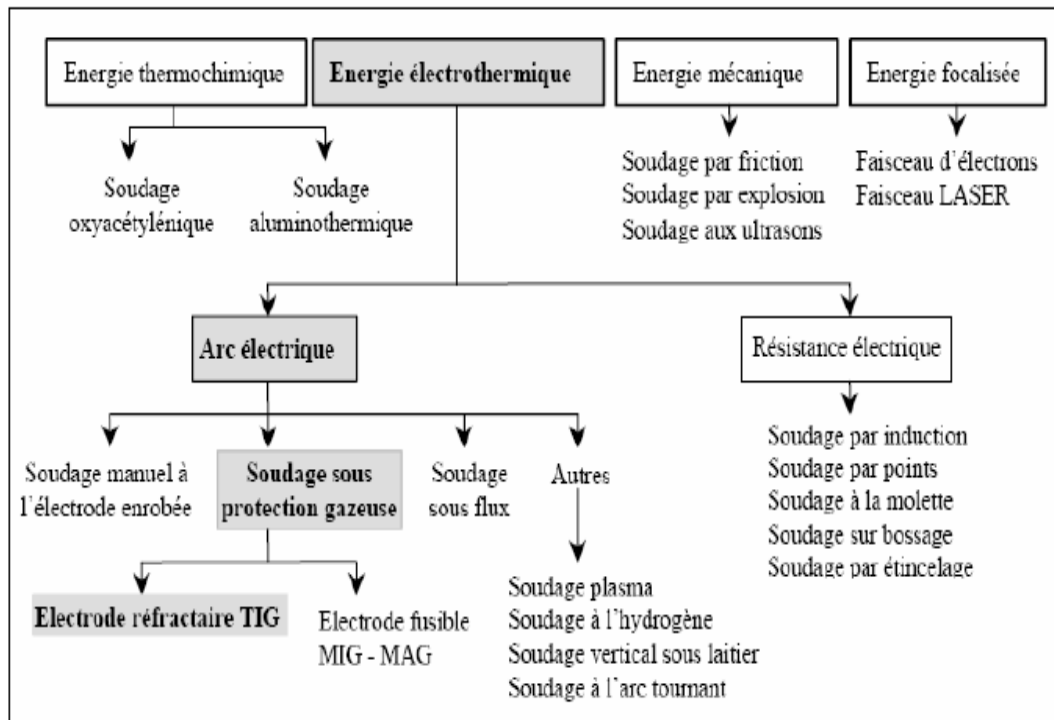
Autrement dit le soudage est un procédé d'assemblage qui consiste à la mise des pièces à souder à la température de soudage (Température de fusion, dans la majorité des cas) au niveau de leur joint, par le biais d'une source de chaleur. Une pression mécanique peut, éventuellement, être associée à cette chaleur [20].

### **I.8.2. Types de soudage**

- ❖ **Homogène** : lorsque les deux matériaux de base et le métal d'apport sont de même nature.
- ❖ **Autogène** : lorsque les deux matériaux de base sont de la même composition et que l'assemblage s'effectue sans métal.
- ❖ **Hétérogène** : si au moins un des matériaux en question (métaux de base ou métal d'apport) est différent des autres [21].

### **I.8.3. Classification des procédés de soudage**

Dans cette méthode les procédés de soudage sont classés à partir du type d'énergie utilisée, ensuite ils sont classés plus particulièrement suivant la forme de l'énergie directement utilisable pour le soudage, par exemple, soudage à l'arc, à la flamme et finalement suivant les modalités de réalisation, par exemple, soudage électrique avec électrode enrobées, soudage par résistance à la molette.



**Figure I.4** Classification par type de source d'énergie [22].

Le choix du procédé s'opère selon des critères bien définis : matériaux à souder, Facteurs technologiques, Critères de qualité, Critères économiques.

En ce qui nous concerne les procédés à arc électriques sont les plus adéquats : Ce procédé se réalise à l'aide d'un arc électrique [une décharge électrique crée entre deux électrodes dans un gaz qui fournit l'énergie nécessaire pour faire fondre l'électrode qui va se solidifier en un dépôt solidaire avec les métaux de base [23].

#### **I.8.4. Cycle thermique de soudage**

Sur le plan thermique, le soudage est caractérisé par un apport important et localisé de chaleur sur la pièce soudée. La diffusion dans le métal de l'énergie ainsi apportée fait du soudage une véritable opération de traitement thermique. Ces effets sont caractérisés par : [24]

- ✓ Un chauffage très rapide jusqu'à une température comprise entre la température initiale et la température de fusion du métal.
- ✓ Un refroidissement qui succède immédiatement au chauffage et dont la cinétique dépend essentiellement des paramètres de soudage.

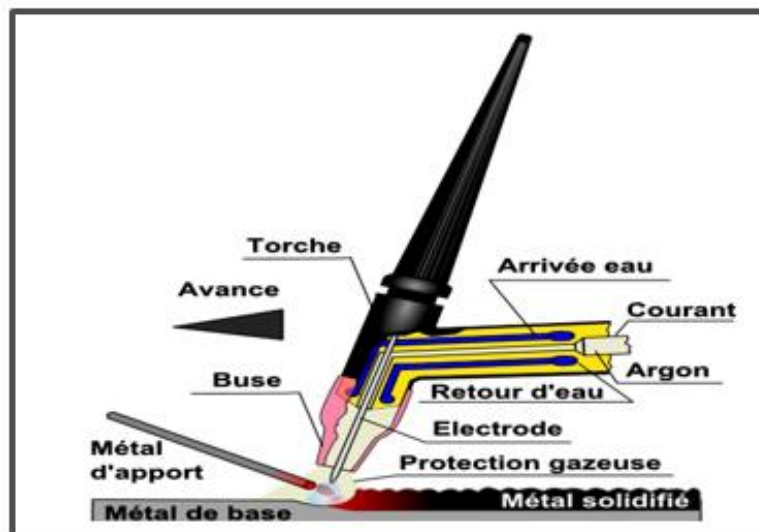
L'intérêt de la connaissance du cycle thermique (c'est-à-dire la variation de la température en fonction du temps, en tout point de l'assemblage) de soudage est de permettre l'interprétation quantitative des phénomènes métallurgiques engendrés par cette opération pour déterminer le critère de choix des procédés de soudage et des modes opératoires.

## **I.9. NOTIONS DE BASE SUR LE TUNGSTENE INERTE GAZ (TIG) :**

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gaz), également appelé GTAW (Gaz Tungsten Arc Welding) aux Etats-Unis, est un procédé de soudage dit « par fusion ». Le principe du TIG est de créer un arc électrique entre une électrode réfractaire (c'est-à-dire non fusible) en tungstène et la pièce à souder.

### **I.9.1.Principe de TIG**

Le soudage TIG est d'abord un procédé à arc. L'arc s'établit entre l'électrode non fusible et la pièce à souder sous la protection d'un gaz inerte.



**Figure I.5 :** Principe du soudage TIG [25].

L'électrode réfractaire en tungstène peut contenir des éléments d'addition comme le thorium ou l'yttrium qui favorisent l'émission électronique. L'arc et le bain fondu sont protégés de l'atmosphère ambiante par l'utilisation d'un gaz neutre. L'argon est le gaz le plus couramment utilisé mais il peut être parfois mélangé avec de l'hélium ou de l'hydrogène pour améliorer la soudabilité. L'électrode n'est pas fusible et ce procédé peut s'appliquer avec ou sans métal d'apport [25].



## **I.9.2. le montages du soudage par TIG**

Le matériel nécessaire pour réaliser des soudures TIG est relativement simple, et peut être décomposé suivant trois fonctions :

- **Générateur de courant** : la source électrique délivre un courant continu lisse, continu pulsé ou alternatif.
- **La torche de soudage** : qui inclut les arrivées électriques et gazeuses, l'électrode réfractaire et la buse. Pour les faibles courants la torche est refroidie par le gaz, Au-delà elle est refroidie par un liquide [26].
- **Création de l'arc électrique** : réalisé en bout de la torche de soudage. Cette dernière est composée d'une électrode de tungstène, d'une buse céramique canalisant le flux de gaz neutre et d'une gâchette utilisable en soudage manuel pour commander l'arc.
- **Protection de l'électrode** : le système de protection gazeuse est incorporé à la torche pour protéger l'arc et le bain. Bien souvent, l'utilisation d'un traînard de protection, endroit ou envers, vient garantir l'intégrité métallurgique du matériau au cours de son refroidissement (notamment dans le cas de matériaux très sensibles à la pollution gazeuse comme le titane ou ses alliages).
- **La bouteille de gaz et son débitmètre.**

## **I.9.3. Domaines d'utilisation du soudage par TIG**

Le soudage TIG s'applique à tous les métaux soudables, il est largement utilisé pour le soudage des aciers inoxydables avec d'excellents résultats [27]. De plus, Il est très souvent utilisé pour des matériaux dont le risque de pollution atmosphérique est important comme les alliages de titane, de nickel, le zirconium, l'aluminium et les aciers inoxydables, ou bien pour des applications qui requièrent une grande qualité de joint comme dans les industries agroalimentaires, pétrochimiques, nucléaires, aéronautiques et aérospatiales.

### **I.9.4. Paramètres influençant la soudure TIG**

Il existe plusieurs paramètres qui influent sur le soudage TIG, parmi ces paramètres on trouve : [28]

- Influence de la vitesse de soudage
- La nature de l'électrode de tungstène (W)
- Le type de gaz de protection
- Le choix, l'affutage et le diamètre de l'électrode réfractaire.

### **I.9.5. Les avantages et les inconvénients du procédé TIG**

#### **A. Les Avantages**

- Possibilité de soudage d'une vaste gamme de matériaux sous réserve de trouver le couple (gaz fil) correspondant.
- Possibilité de contrôler de façon indépendante tous les paramètres ce qui permet un contrôle efficace du bain de fusion et de la dilution.
- Le soudage TIG assure l'intégrité de la zone fondue de part sa protection gazeuse.
- Le procédé TIG permet d'assembler des aciers fortement alliés, des alliages : d'Aluminium, de Nickel, de Cuivre et de Magnésium.
- Automatisation possible.

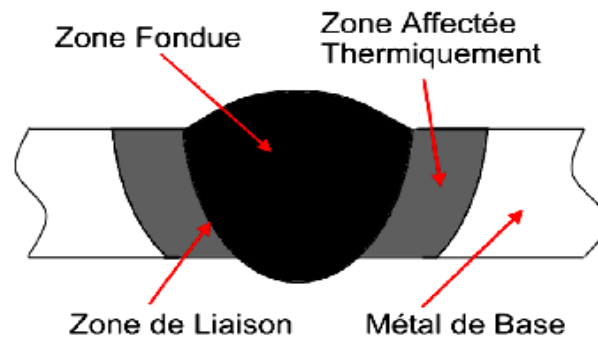
#### **B. Les inconvénients**

- Préparation des assemblages plus soignée.
- Taux de dépôt et vitesses de soudage faibles, d'où le procédé n'est pas utilisé pour le soudage des matériaux nobles.
- Faible pénétration de bain accessible en une seule passe.

### **I.10. Caractéristiques de soudure**

L'assemblage par soudage à l'arc est réalisé par l'apport localisé de chaleur produisant la fusion puis la solidification d'une partie des deux pièces à assembler. La source de chaleur étant mobile, le métal s'échauffe rapidement à l'arrivée de la source, puis se refroidit après son passage. Trois zones peuvent alors être distinguées dans un assemblage, représentées de manière schématique dans une coupe transversale à la soudure sur la Figure I.6.

- a. **La zone fondue (ZF)** : est la zone dans laquelle la température maximale atteinte est supérieure à la température de fusion. Cette zone est donc passée à l'état liquide, puis s'est solidifiée, La composition chimique de cette zone est liée à celles des matériaux de base, la proportion de chacun d'eux étant donnée par la dilution, qui dépend des paramètres procédé.
- b. **La zone affectée thermiquement (ZAT)** : est la zone soumise à une température maximale suffisante pour produire des transformations métallurgiques ou des évolutions microstructurales, mais inférieure à la température de fusion. Les modifications de la structure qui apparaissent dépendent du cycle thermique et de la composition du MB.
- c. **La zone de liaison (ZL)** : zone marquant la frontière entre la ZF et la ZAT.
- d. **le métal de base (MB)** : représente toute la partie de l'assemblage n'ayant subi aucune modification structurale, l'élévation de température n'étant pas suffisante.



**Figure I.6** : Schéma illustrant dans une section transversale d'un assemblage soudé les différentes zones

## **II.1. INTRODUCTION :**

Pour des raisons de commodité et de simplicité, on présentera dans ce qui suit, les techniques expérimentales effectuées pour la réalisation de cette étude ainsi que les résultats obtenus et leurs interprétations. On commencera par présenter le matériau (composition chimique), la technique de soudage utilisée pour la réalisation des cordons), ainsi que les méthodes de caractérisation métallographique. Aussi, la conduite de la méthode de détermination la taille des grains (Image J), une caractérisation mécanique (Essai de traction, Essai de micro dureté) et à la fin caractérisation par microscopie électronique à balayage (Examen des faciès de rupture).

## **II.2. DETERMINATION DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DU MATERIAU :**

Le matériau du métal de base sur lequel a été réalisé le soudage est un acier de type AISI 430, qui appartient à la famille des aciers inoxydables ferritique. Une analyse de sa composition chimique par spectromètre FOUNDRY-MASTER Xpert. (Réalisée au niveau du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Cheraga) a révélé la composition chimique.

FOUNDRY-MASTER Xpert est un spectromètre de laboratoire permettant de d'analyser la qualité du métal. L'échantillon métallique à analyser est placé sur le support d'étincelage et serré par une pince de maintien. L'échantillon est brûlé en surface par un arc électrique. A la décharge, une zone de la surface de l'échantillon est fondue et s'est évaporée sous l'action de la brûlure. L'énergie élevée contenue dans l'étincelle génère un plasma. Ce plasma émet de la lumière dont le spectre est analysé et mesuré grâce à des dispositifs à couplage de charge (DCC, puces à semi-conducteur sensibles à la lumière). Une zone du spectre mesuré peut être attribuée à chaque élément. L'instrument est commandé par des touches grâce à un logiciel fourni qui affiche le résultat de l'analyse sur l'écran du PC connecté.

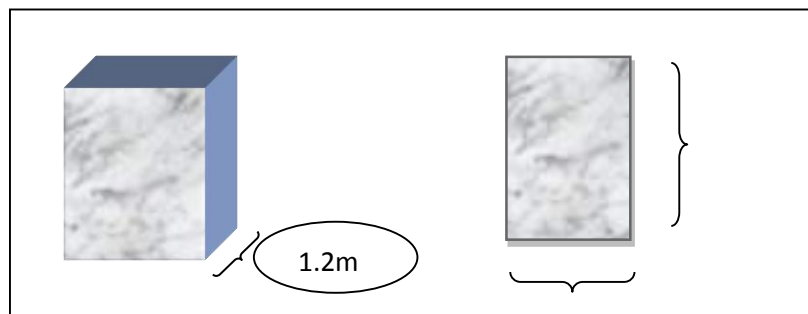
## **II.3. PROCEDURE DE SOUDAGE :**

Pour la réalisation de la soudure, notre choix s'est porté sur le procédé TIG automatique, car celui-ci présente une très bonne soudabilité pour ces types d'acier ainsi qu'un large domaine d'utilisation aussi bien qu'à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle industrielle. Ce qui permet d'élargir le domaine de validité de nos résultats.

L'objectif de ces essais de soudage est d'identifier plusieurs jeux de paramètres adaptés, c'est-à-dire permettant une fusion en pleine pénétration, et donnant des zones fondues présentant des morphologies de grains différentes.

### **II.3.1. Préparation des tôles pour l'opération de soudage**

Les soudures TIG sont réalisées sur des tôles de 1.20 mm d'épaisseur et les dimensions linéaires de longueur et largeur sont variables, les caractéristiques géométriques de sont représentées schématiquement dans la (Figure II.1).



**Figure II.1** : Préparation des tôles pour l'opération de soudage.

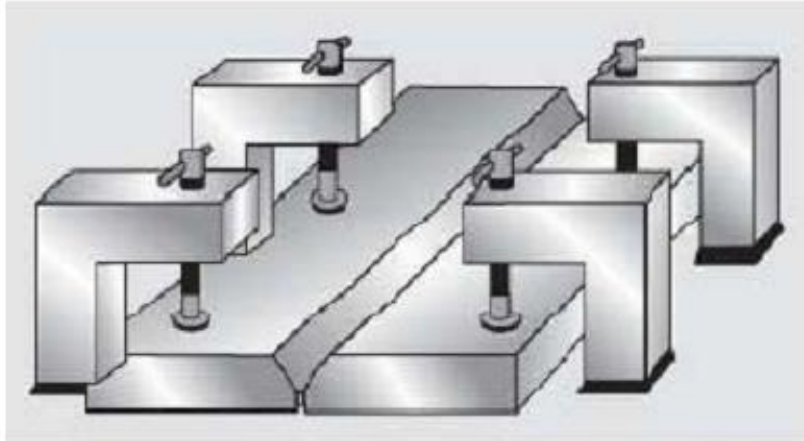
### **II.3.2. Nettoyage de la pièce**

On a fait un nettoyage mécanique (par brossage on utilisant une brosse métallique en inox) et un nettoyage chimique par l'intermédiaire de l'acétone ce qui est nécessaire avant l'exécution de la soudure afin d'éviter la contamination du bain fondu par les poussières ou les grains présents sur les tôles et plus précisément sur les bords à souder.

Il faut trouver les bonnes procédures de nettoyage des bords à souder, mais aussi la façon d'isoler de toute contamination extérieure (poussières, graisses, autres alliages métalliques) les alliages soumis à une opération de soudage. Les techniques de nettoyage des bords à souder sont soit chimiques, soit mécanique où la combinaison des deux.

### **II.3.3. Le bridage**

C'est l'opération qui suit le nettoyage. Elle consiste à fixer les tôles à souder (figure II.2) dans le but d'éviter les déformations dues aux phénomènes de dilatation et de retrait produits par l'apport de chaleur lors du soudage.



**Figure II.2 :** Système de bridage des tôles.

### **II.3.4. Paramètres de soudages**

Au premier lieu on a réalisé 16 cordons de soudure sur des tôles d'acier inoxydable ferritique de 1.20 mm d'épaisseur, avec différentes paramètres (courant et vitesse) afin de choisir les meilleurs paramètres (les paramètres optimales) de soudage.

Le courant utilisé est le courant continu avec une polarité normale, les électrons circulent de l'électrode vers la pièce à souder et frappent sa surface avec une grande vitesse, concentrant ainsi la chaleur sur le joint de soudure. Avec la polarité normale, on peut employer une intensité de courant plus élevée qu'avec la polarité inversée pour un même diamètre d'électrode. L'augmentation d'intensité permet d'obtenir :

- une pénétration plus profonde.
- une vitesse de soudage accrue.
- un profil de cordon étroit mais profond.

Les paramètres de chaque enchantions sont présentés sur au tableau II.1.

**Tableau II.1 : Paramètres énergétique de soudage.**

<b>Echantillon</b>	<b>Vitesse (mm/s)</b>	<b>Courant (A)</b>	<b>Tension (V)</b>	<b>Débit de gaz (L/min)</b>
01	02	20	12	10
02		30		
03		40		
04		50		
05	04	40		
06		50		
07		60		
08		70		
09	06	50		
10		60		
11		70		
12		80		
13	08	60		
14		70		
15		80		
16		90		

Le tableau II.1 présente les différents Paramètres énergétique de soudage, l'intensité de soudage varie entre 20 et 90 A, la vitesse de soudage varie entre 2 et 8 mm/s, On fixe le débit du gaz à 10 l/min.

### **II.3.5. Protocole de l'opération de soudage**

Les opérations qui ont été suivies le long du soudage sont :

**A-Pointage des tôles à souder :** La fixation des bords des tôles à souder a été faite par un pointage en trois positions réparties le long de la longueur des tôles. Ce pointage a permis un soudage à position fixe.

**B-Réalisation de la première passe (passe de pénétration) :** Cette passe a été réalisée par le procédé TIG automatique sur des tôles de 1mm d'épaisseur et les dimensions linéaires de longueur et largeur sont variables.

### **II.4. CONTROLE VISUEL ET RADIOGRAPHIQUE :**

L'une des étapes qui suit le soudage est le contrôle non destructif. Celui-ci comprend : le contrôle visuel et le contrôle radiographique.

#### **II.4.1. Contrôle visuel**

L'objectif est de vérifier les irrégularités du cordon de soudure (défauts de formes) ou les défauts débouchant et apparents telles que les porosités, les fissures.

#### **II.4.2. Contrôle radiographique**

Le contrôle radiographique permet de détecter des imperfections internes telles que les porosités et les fissurations à condition que ces dernières soient perpendiculaires au faisceau.

La technique utilisée est la radioscopique X qui a fonctionné sur le même principe que la radiologie. Le radioscope est constitué d'un générateur à RX dont l'image radiographique est visualisée sur un écran puis enregistrée sur un PC.

Cette méthode présente l'avantage de fournir des images directement exploitables avec une excellente résolution spatiale. Toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part de l'opérateur. Cette méthode est assez coûteuse et impose des conditions de sécurité pour l'opérateur et l'environnement.



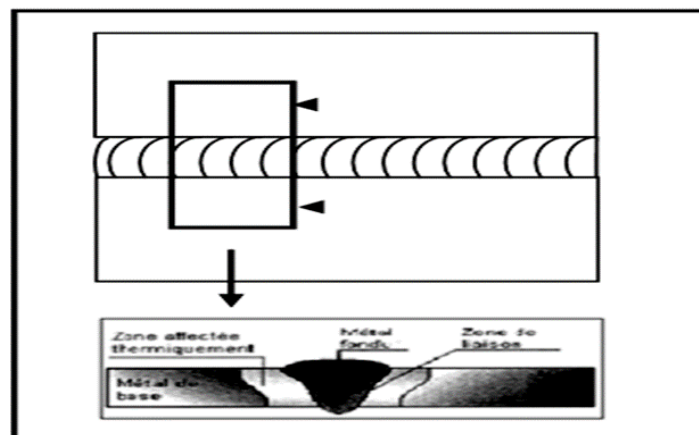
Le type du radioscope est de type BALTEAU. X. B constitué d'un pupitre de commande, et de la source à rayon X isolée dans une chambre blindée qui permet de protéger le personnel et l'environnement des rayonnements, d' et un écran d'acquisition de l'image radiographique. L'image est transmise vers un écran de PC en vue de son traitement, son analyse et son enregistrement [29].

## **II.5. CARACTERISATIONS STRUCTURALE :**

Avant toute observation, il faut préparer la surface de l'échantillon. Les échantillons ont été préparés selon les étapes suivantes :

### **II.5.1. Prélèvement des échantillons**

Les prélèvements le plus souvent examinés sont effectués perpendiculairement à la ligne de soudure (figure II.3) Un tel prélèvement est représentatif de toute la portion de soudure ou l'état quasi-stationnaire a été atteint durant l'opération de soudage.



**Figure II.3 :** Méthode de prélèvement d'un échantillon.

Pour chaque pièce on a prélevé un échantillon pour effectuer les mesures de micro dureté et des observations micrographiques.

### **II.5.2. Etape de découpage**

Les échantillons sont découpés sous forme de petites plaques à l'aide d'une microtrancheuse sous lubrification afin d'éviter toutes sollicitations thermo-mécaniques. Cette opération est indispensable pour pouvoir manier et étudier les échantillons.

### **II.5.3. Etape de l'enrobage**

Consiste à mettre l'échantillon dans un moule et ajouter le mélange résine-durcisseur, et ensuite laisser la résine se solidifier pendant quelques minutes. Cette étape permet d'avoir une surface plane et une meilleure manipulation des échantillons pendant le polissage.

### **II.5.4. Etape de Polissage**

Est une opération visant à affiner les rayures afin de pouvoir observer la microstructure du matériau après attaque. Le polissage a été effectué en deux étapes :

- **Polissage grossier** (abrasion) : on a fait passer les échantillons enrobés sur des papiers abrasifs de granulométrie décroissante de 80, 120, 320, 400, 600, 800, 1000 et 1200 mèsh. En passant d'un papier à un autre l'échantillon est rincé soigneusement en ultrasons pour assurer un nettoyage en profondeur.

- **Polissage de finition** : il a été réalisé sur des papiers abrasifs de granulométrie 2400 ,4000 mèsh. Après ces deux opérations de polissage, les échantillons doivent présenter une surface ayant l'aspect d'un miroir prêt à l'attaque chimique.

### **II.5.5. Attaque chimique**

Elle permet de révéler la microstructure du matériau étudié. On distingue l'attaque chimique utilisant des solutions chimique spécifique pour chaque matériau. Dans notre cas on a pris les compositions suivante : 5 ml d'acide nitrique (HNO<sub>3</sub>) ; 15 ml d'acide chlorhydrique (HCL) et 10 ml de Glycérol. La durée de l'attaque a été de l'ordre de 20 à 40 secondes. Pour arrêter l'attaque, on lave soigneusement l'échantillon dans un courant d'eau suivi d'un séchage à l'aide d'un sèche-cheveux [30].

## **II.6. OBSERVATIONS METALLOGRAPHIQUE :**

### **II.6.1. Microscopie Optique**

L'observation microscopique est faite à l'aide d'un microscope optique de marque (NIKON). Ce microscope est équipé d'une caméra et assisté par un ordinateur avec utilisation d'un logiciel de traitement d'image [ATLAS] dans le laboratoire de métallurgie au niveau du Centre de Recherche en Technologies Industrielles (CRTI) de Cheraga.

La microscopie optique est une technique très utilisée dans les divers travaux réalisés sur le soudage des aciers inoxydables. Nous avons pris les microstructures des différentes régions du joint soudé : zone fondue, zone de liaison, zone affectée thermiquement ainsi que du métal de base de nos échantillons, avec un agrandissement de 50 fois. Cela permet d'apprécier l'évolution des transformations microstructurales des différentes zones (ZF, ZL, ZAT, MB) et d'observer les phases grossières. La plupart des observations ont été effectuées sur des coupes transversales de soudures.

### **II.6.2. Détermination de la taille des grains**

Après observation par le microscope optique, nous prenons les images obtenues sur l'ordinateur puis on les traite avec un logiciel « image J ».

La taille de grain d'une microstructure donnée est déterminée par la méthode numérique, par le biais d'un logiciel. La grosseur du grain peut être caractérisée par différentes grandeurs conventionnelles déduites de l'observation d'une coupe plane du matériau préparée pour faire apparaître les contours des sections des grains par le plan de coupe.

## **II.7. CARACTERISATIONS MECANIQUES :**

### **II.7.1. La micro-dureté**

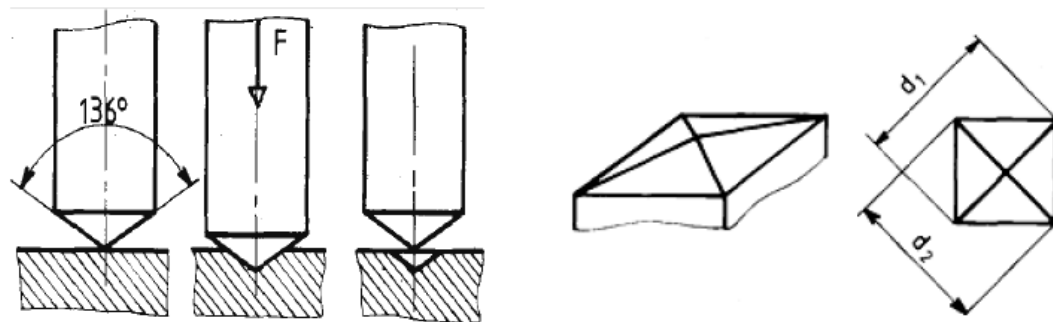
Les essais de microdureté sont destinés à définir les propriétés à l'intérieur des grains, soit de la matrice, soit de ses divers constituants. L'essai décrit sur la figure II.4, utilise un pénétrateur de type Vickers en diamant. Le diamant laisse une empreinte carrée et l'on mesure la longueur de la moyenne des deux diagonales de l'empreinte.

Pour apprécier les effets thermiques ainsi que, les variations structurales et leurs conséquences sur les propriétés. Les mesures de la microdureté moyenne Vickers ont été effectuées sur la surface des échantillons traités, polis mécaniquement et attaqués. On applique une charge de 300 g pour les aciers durant 15 secondes et un balayage tout au long de la pièce soudée (en commençant par le métal de base à la zone fondue en arrivant à l'autre extrémité du métal de base) avec un pas de 500 $\mu$ m selon les abscisses et les ordonnées pour les soudures.

La microdureté Vickers HV est liée à la diagonale moyenne (d) de l’empreinte mesurée en  $\mu\text{m}$  et à la charge pondérale appliquée (F) en grammes ; elle se calcule par la relation suivante :

$$HV = \frac{1854,4 \times F}{d^2} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Avec : } d = \frac{(d_1 + d_2)}{2}$$



**Figure II.4 :** Exécution et mesures de l’essai de microdureté Vickers.

L’appareil utilisé pour nos travaux est un microduromètre type « SIMADZU HMVM » muni d’un micro-indenteur de type Vickers et équipé d’un microscope.

### **II.7.2. Essai de traction**

L’essai de traction l’un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d’élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uniaxiale de traction et à enregistrer l’allongement résultant.

L’essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction généralement jusqu’à rupture en vue de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau. Cet essai est réalisé sur une machine spéciale, qui permet d’enregistrer les variations de la longueur de l’éprouvette en fonction de l’effort qui lui appliqué. Dans notre cas, l’essai de traction est réalisé sur des éprouvettes prélevées transversalement au joint soudé. La machine utilisée est de marque MTS Criterion Model 45, pilotée en déplacement vérin et pilotée par ordinateur.

## **II.8. TRAITEMENT THERMIQUE :**

Tous les types de traitements sur les aciers inoxydables assurant une bonne résistance à la corrosion ont pour but de rendre la répartition en chrome du métal la plus homogène possible en évitant toute précipitation de phases riches en chrome [31].

L'essai consiste à mettre la plaque soudée dans le four de traitement thermique de marque (Thermeconcept) à 800 °C pendant 1h et le laisser refroidir jusqu'à température ambiante afin d'obtenir les résultats souhaités.

## **II.9. MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE**

Le microscope optique à balayage permis une analyse plus fine de la microstructure, une analyse qualitative de la chimie des précipités et des différentes zones, grâce aux électrons rétrodiffusés et aux RX, et une observation des surfaces de rupture dans le grâce aux électrons secondaires (fractographie).

Dans un microscope électronique à balayage ou MEB, un faisceau très fin d'électrons primaires ou sonde électronique balaie la surface de l'échantillon. Les signaux électroniques recueillis, provenant des interactions électrons-matière, sont détecté à l'aide de détecteur spécifique et, après traitement complexe, transforme en un signal électrique proportionnel. Ce signale module l'intensité de faisceau d'un tube cathodique à balayage synchrone. On établit ainsi une correspondance entre un point de l'échantillon et un point de l'écran de tube. La brillance du spot sur l'écran et proportionnelle au signal électronique issu du point correspondant de l'échantillon. On crée ainsi une image.

L'analyse de nos échantillons a été effectuée par un microscope électronique à balayage de marque ZIESS Gemini SEM 300 au niveau du (CRTI).

### III.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale d'acier AISI 430 et les différents résultats relatifs à la micrographie et aux essais mécaniques. Le chapitre est structuré comme suit : En premier lieu, on fait une vision générale sur l'état de matériaux ainsi le cordon de soudure, ensuite, on s'intéresse à la micrographie réalisée par un microscope optique pour avoir des images micrographiques montrant les différentes phases, la taille et l'orientation des grains ; pour pouvoir ensuite les comparer avec les résultats obtenus à l'aide des essais mécaniques (micro dureté, et traction), le microscope électronique à balayage et le traitement thermique.

### III.2. RESULTAT DE COMPOSITION CHIMIQUE DE MATERIAU DE BASE UTILISE :

Analyse par le spectromètre FOUNDRY-MASTER Xpert. La composition chimique illustrée dans le Tableau III.1.

**Tableau III.1 :** Composition chimique de l'acier inoxydable ferritique AISI 430.

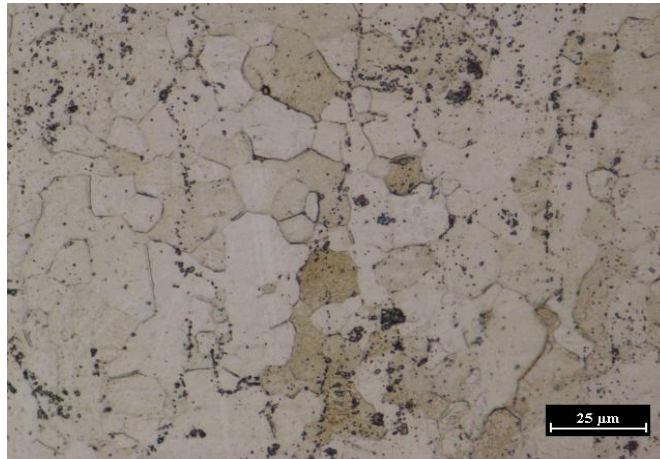
éléments	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu	V	N	Fe
Teneur (%)	0.066	0.42	0.409	16.3	0.02	0.284	0.114	0.113	0.080	82.1

Les aciers ferritique (type AISI 430) contiennent des teneurs en chrome de 16.3 %, et des teneurs en éléments gammagène (C, N, Mn) suffisantes pour stabiliser la phase austénite à haute température.

### III.3. CARACTERISATION STRUCTURALE :

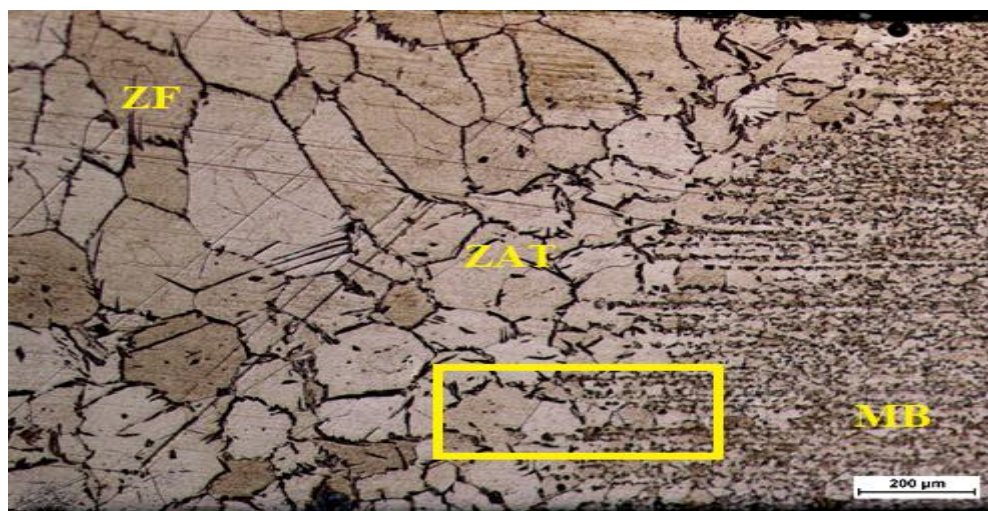
#### III.3.1. Observation microscopique

La figure III.1, montre le résultat de l'observation optique de la microstructure de l'acier inoxydable ferritique AISI 430 pour un grossissement (X1000). Cette micrographie montre une structure ferritique avec une taille des grains de 8  $\mu\text{m}$  calculé par le logiciel image J.

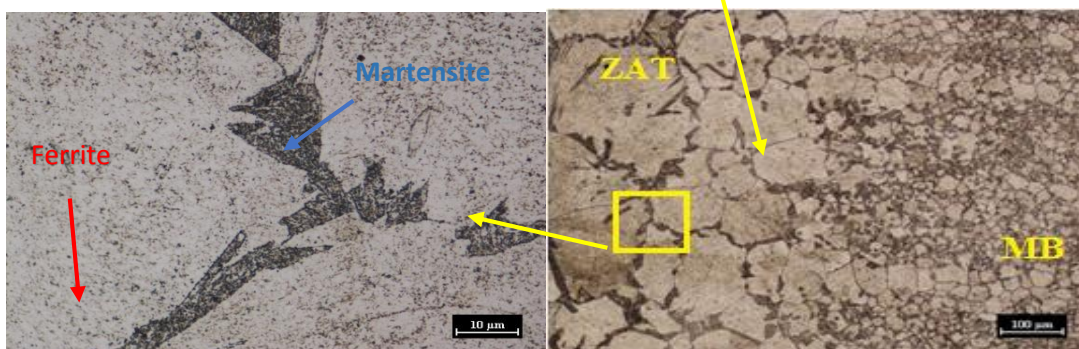


**Figure III.1 :** microstructure de métal de base (X1000).

L'observation des microstructures a révélé deux types de grains en zone fondue (Figure III.2). En fonction de la vitesse et l'intensité de soudage, on retrouve des grains équiaxes de taille modérée, ou des grains colonnaires dont la taille importante peut varier légèrement d'un essai à un autre.



(1)



(3)

(2)

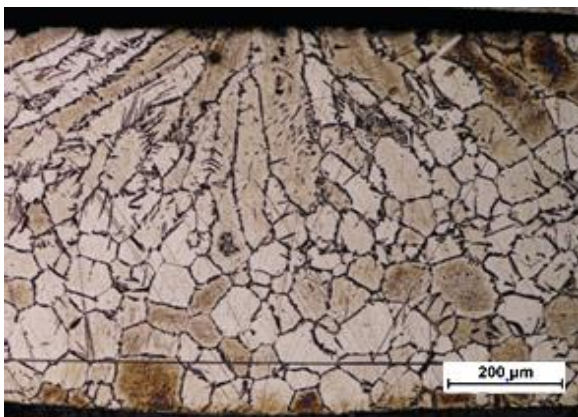
**Figure III.2 :** microstructure de la zone de liaison (1) X50 ;(3) X150 ;(3) X1500.



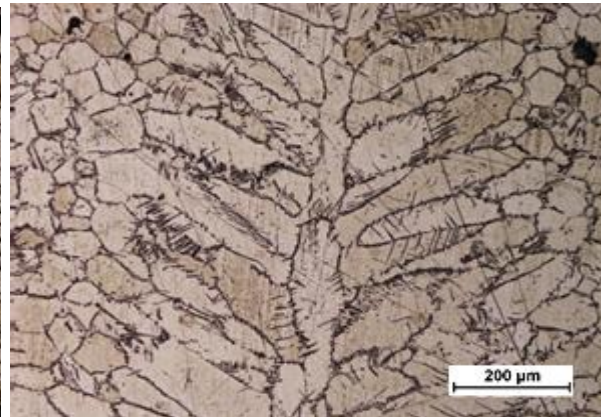
- **MF**: structure à gros grains formée de ferrite, et de martensite aux joints de grains de la ferrite
- **ZAT**: la zone affectée par la chaleur est divisée en deux parties :
  - Celle voisine du métal fondu qui a atteint une température assez élevée pour que se produise la transformation  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Elle est constituée de ferrite et de martensite comme le métal fondu mais la grosseur des grains et la teneur en martensite régressent lorsque l'on s'éloigne du métal fondu (zone fondu)
  - Celle qui n'a pas subi de transformation et dans laquelle seuls les précipités de carbure de chrome ont pu évoluer.
- **MB** : représente toute la partie de l'assemblage n'ayant subi aucune modification structurale, l'élévation de température n'étant pas suffisante [32].

### III.3.2. Résultats des paramètres de soudage sur la microstructure

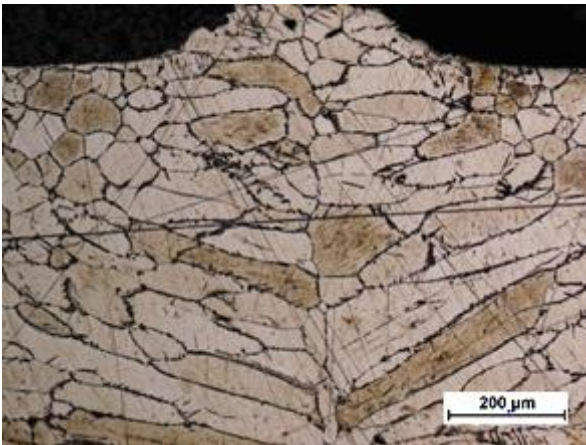
Les résultats de l'influence des différents paramètres de soudage sur la microstructure sont donnés dans les images qui sont présentés dans les figures (1...16.III) suivantes :



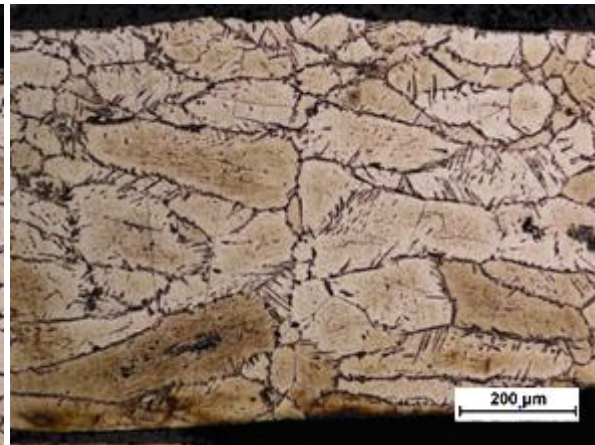
1 (V=02mm/s, I=20A)



2 (V=02mm/s, I=30A)

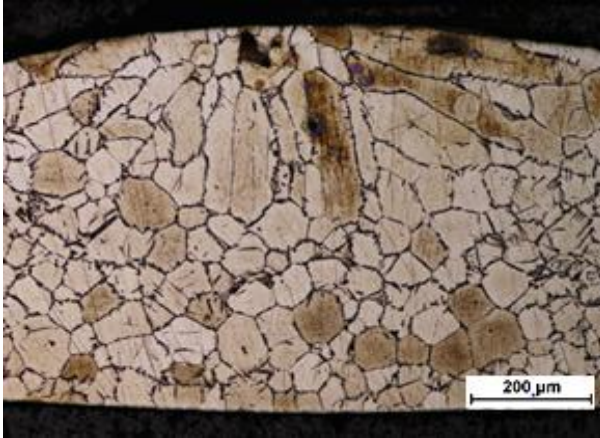


3 (V=02mm/s, I=40A)

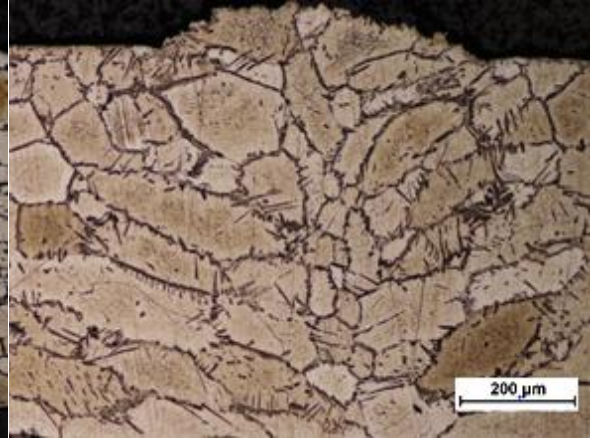


4 (V=02mm/s, I=50A)

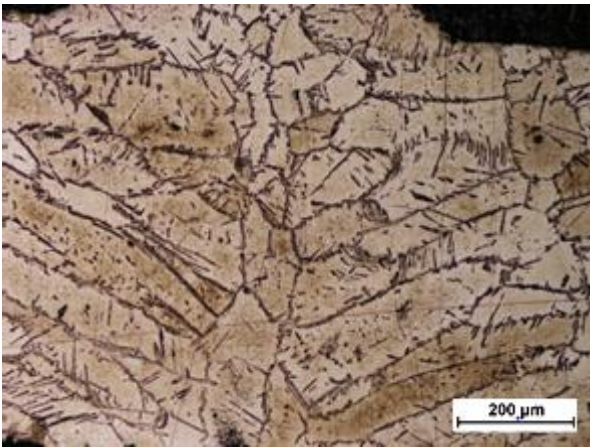




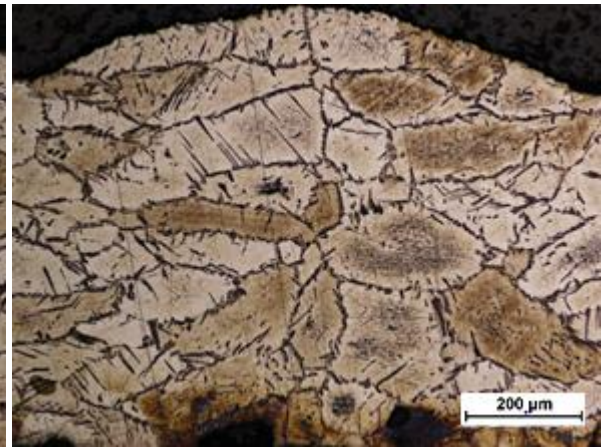
5 (V=04mm/s, I=40A)



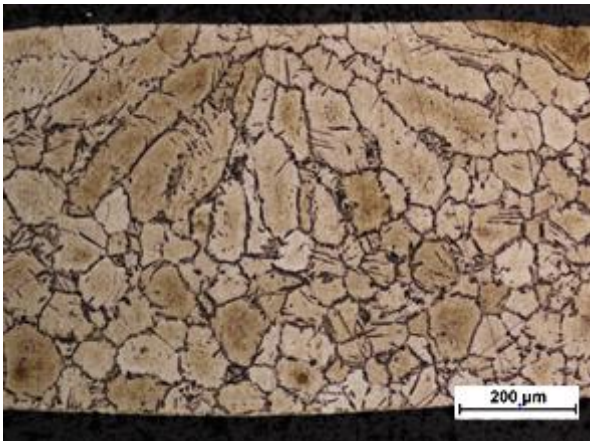
6 (V=04mm/s, I=50A)



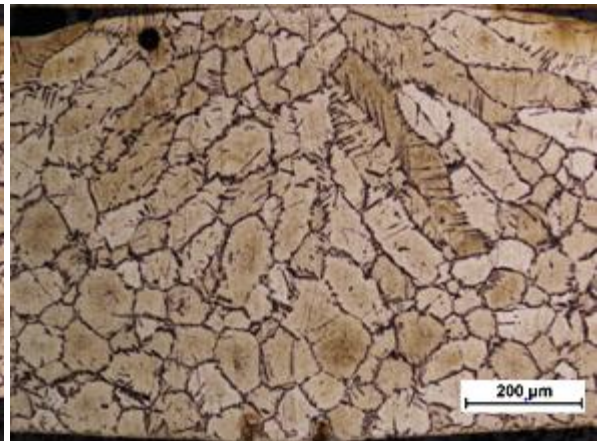
7 (V=04mm/s, I=60A)



8 (V=04mm/s, I=70A)

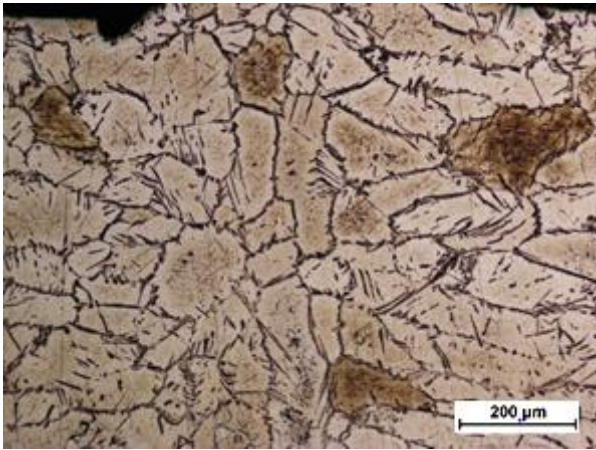


9 (V=06mm/s, I=50A)

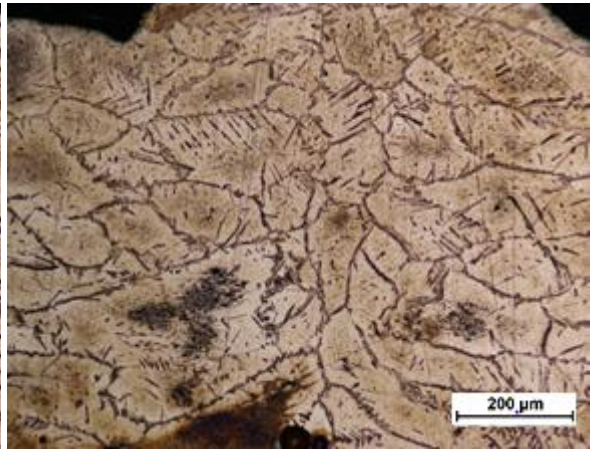


10 (V=06mm/s, I=60A)

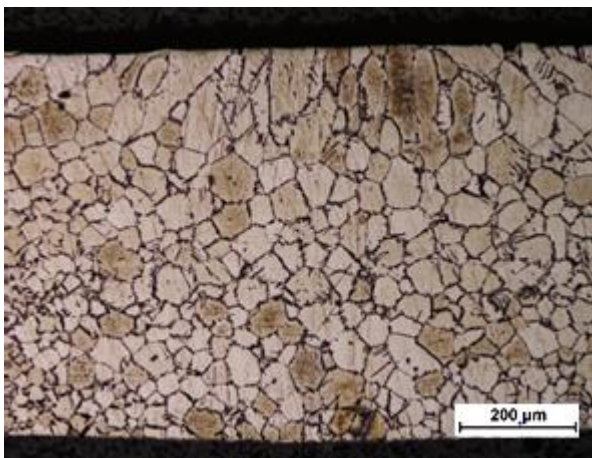




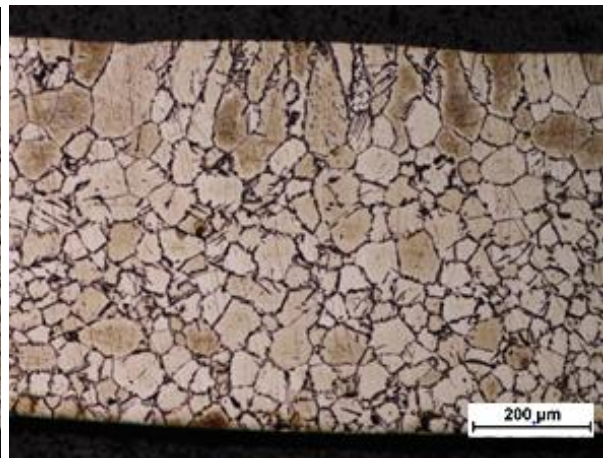
11 (V=06mm/s, I=70A)



12 (V=06mm/s, I=80A)



13 (V=08mm/s, I=60A)



14 (V=08mm/s, I=70A)



15 (V=08mm/s, I=80A)



16 (V=08mm/s, I=90A)

**Figure III.3 :** Influence des paramètres de soudage sur la microstructure (X50).

Les grains formés après soudage dans la zone fondue des aciers inoxydables ferritiques présentent souvent une morphologie colonnaire, et sont de taille très grossière dont la taille importante peut varier légèrement d'un essai à un autre ; ainsi formation de martensite aux joints des grains comme montre les photos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,8.figure III), lorsque le refroidissement après soudage est relativement lent. Les grains sont orientés de la périphérie vers le centre de la soudure et se rejoignent au niveau du plan de symétrie de cette dernière. Ce type de microstructure conduit à des propriétés médiocres en termes de ductilité, ténacité, et tenue en fatigue, mais aussi de sensibilité à la corrosion intergranulaire.

L'augmentation de la vitesse de refroidissement des soudures, que l'on peut obtenir en soudant à très grande vitesse avec le procédé de soudage TIG, peut toutefois permettre de réduire la taille des grains colonnaires comme montre les photos (9, 10, 11, 12 figure III.3) ; pendant le refroidissement, une quantité notable d'austénite est apparue aux joints et à l'intérieur des grains sous une forme aciculaire particulière; c'est une austénite hors d'équilibre qui se forme uniquement par refroidissement rapide depuis le domaine de la ferrite delta, et dont la composition n'est pas très éloignée de celle de la ferrite qui lui donne naissance. Mais on trouve toujours la formation de martensite aux joints de grains. Ce type de microstructure améliore leurs propriétés mécaniques.

D'après les photos (13, 14, figure III.3) avec l'augmentation de la vitesse de soudage, on observe qu'il y a eu une mauvaise pénétration qui est due à la faible intensité.

On observe un changement de la forme de bain entre les essais (15, 16, figure III.3) tous les paramètres étant égaux par ailleurs, il est mis en évidence l'influence des paramètres de soudage sur la forme du bain, et donc sur les mouvements de fluides induits par ceux-ci. On observe cependant en moyenne une augmentation de la proportion de grains équiaxes lorsque la vitesse de soudage augmente. Ce type de structure améliore nettement la ductilité des zones fondues et diminue la température de transition, de manière d'autant plus marquée que le grain obtenu est fin.

L'austénite qui se forme dans la région ZF prend également la trempe martensitique lorsque le refroidissement de la soudure se poursuit jusqu'à la température ambiante.

On remarquera qu'il n'y a aucune différence structurale notable entre le métal fondu et la partie de la zone affectée par la chaleur portée dans le domaine de la ferrite ; il est cependant possible de distinguer ces deux régions car le métal de la zone affectée par la chaleur conserve une orientation équiaxe alors que le métal fondu possède la structure basaltique résultant de la solidification orientée.

Cette transition entre structures colonnaire et équiaxe, appelée CET (Columnar to Equiaxe Transition), dépend des champs de température et de leurs évolutions dans la zone de solidification, et notamment du gradient thermique au niveau du front de croissance des grains colonnaires en cours de solidification, et de la vitesse de déplacement de ce front [2].

#### **III.4. RESULTATS DE MESURE DE LA TAILLE DES GRAINS ET LA CHALEUR APPORTEE :**

Les tableaux ci-dessous représentent les résultats obtenus à l'aide du logiciel **IMAGEJ**. On a mesuré la taille des grains dans la zone fondu (ZF) :

**Tableaux III.2 : La taille des grains et la chaleur apportée.**

<b>Echantillon</b>	<b>Courant (A)</b>	<b>Vitesse (mm/s)</b>	<b>HI (J/mm)</b>	<b>Taille des grains (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
01	20	02	57,6	132,8
02	30	02	86,4	197,2
03	40	02	115,2	261,6
04	50	02	144	302
05	40	04	57,6	120,8
06	50	04	72	154
07	60	04	86,4	178,2
08	70	04	100,8	211,4
09	50	06	48	97,7
10	60	06	57,6	125,8
11	70	06	67,2	133,9
12	80	06	76,8	156,7
13	60	08	43,2	83,6
14	70	08	50,4	95,7
15	80	08	57,6	104,8
16	90	08	64,8	115,9

D'après le tableau on remarque qu'il y a une relation entre la chaleur apportée et la taille des grains. D'où le grossissement des grains est lié proportionnellement avec la chaleur apportée, chaque fois que l'énergie apportée diminue la taille des grains diminue.

### **III.5. CONTROLE VISUEL ET RADIOGRAPHIQUE :**

Le contrôle non destructif est l'une des étapes important qui suivre l'opération de soudage. Celui-ci comprend : le contrôle visuel et le contrôle radiographique.

D'après l'observation microscopique et le traitement d'analyse d'image (mesure de taille des grains) on constate que les paramètres optimaux sont représentés par les photos (6, 10, 11, 15,16 figure III) avec lesquelles on a réalisé notre soudage.

**Tableau III.3.**les paramètres optimaux.

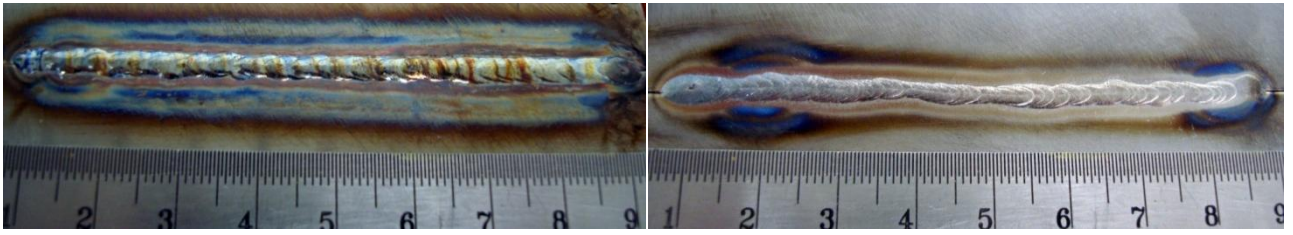
	<b>Echantillon</b>	<b>Courant (A)</b>	<b>Vitesse (mm/s)</b>
01	06	50	04
02	10	60	06
03	11	70	06
04	15	80	08
05	16	90	08

#### **III.5.1. Contrôle visuel**

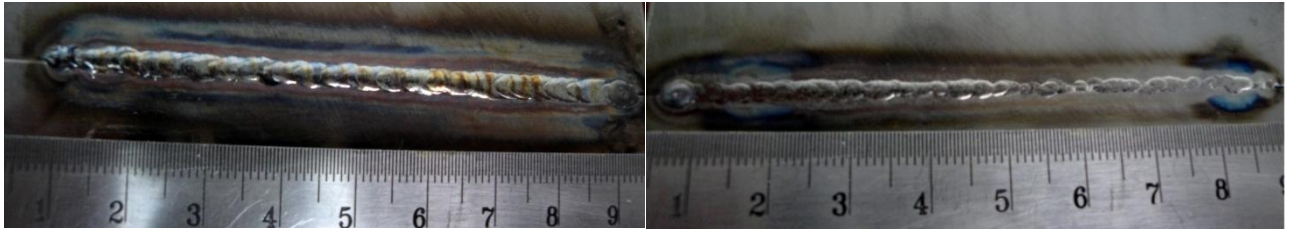
L'objectif du contrôle visuel est de vérifier les irrégularités du cordon de soudure (défauts de formes) ou les défauts débouchant et apparents telles que les porosités, les fissures.

Les figures ci-dessous montrent un bel aspect du cordon de soudure obtenue. Les 5 essais de soudage TIG ont toutes des largeurs assez proches, et une pénétration complète, qui permet d'obtenir des largeurs de bain de fusion sensiblement identiques en face endroit et en face envers. Ces premières observées justifient le choix. :

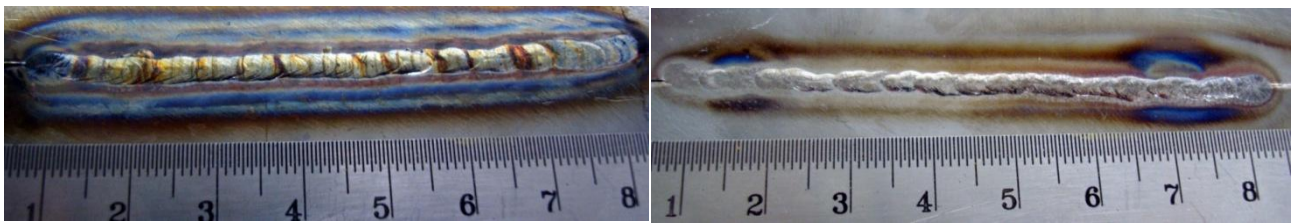




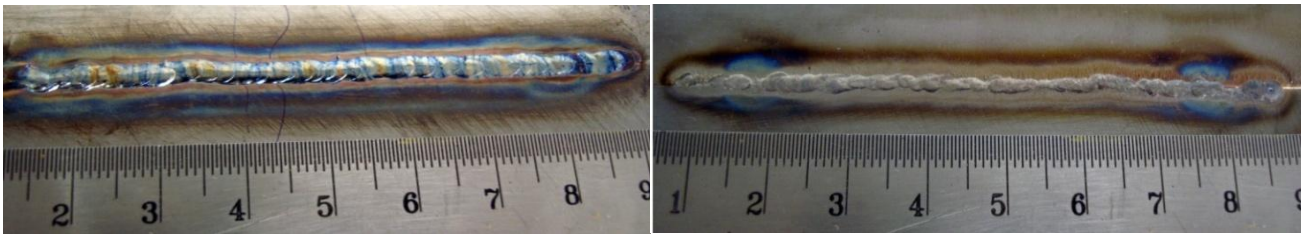
01



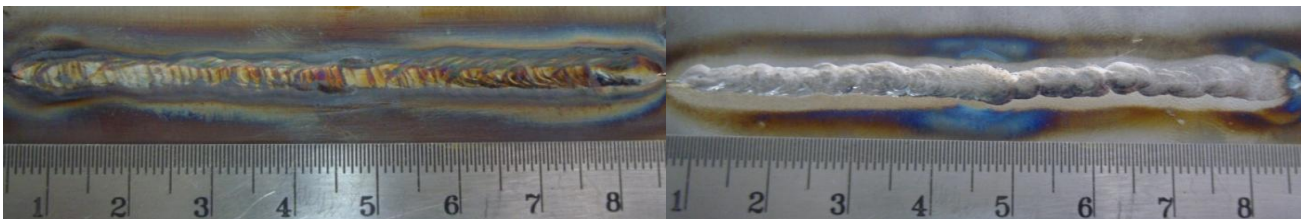
02



03



04



05

**Figure III.4 :** Topographie des soudages

### **III.5.2. Contrôle radiographique**

Les défauts qui peuvent apparaître généralement sont :

**a. L'inclusion de tungstène :**

L'inclusion de tungstène est une inclusion métallique, considéré comme défaut rédhibitoire lors d'un contrôle. L'inclusion métallique de tungstène donne une image radiographique de point blanc opaque caractéristique.

Ce phénomène est causé par :

- ✓ Fonte de l'électrode causée par une chaleur trop élevée.
- ✓ Électrode en contact avec le bain de fusion.

**b. Cordon irrégulier :**

La Cause principale est la vitesse d'avance qui est trop rapide, ou bien l'arc trop long. Donc il faut diminuer la vitesse.

**c. Mauvaise reprise :**

C'est une irrégularité locale de surface à l'endroit d'une reprise. Ce défaut doit être éliminé par meulage ou burinage afin d'améliorer l'état de surface de la soudure (passe de finition) ou éliminer la présence d'un manque de fusion.

Les figures représentent les images de contrôle radiographique.

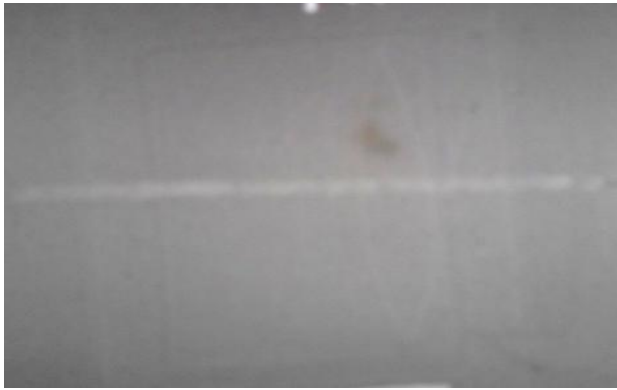


1



2





3



4



5

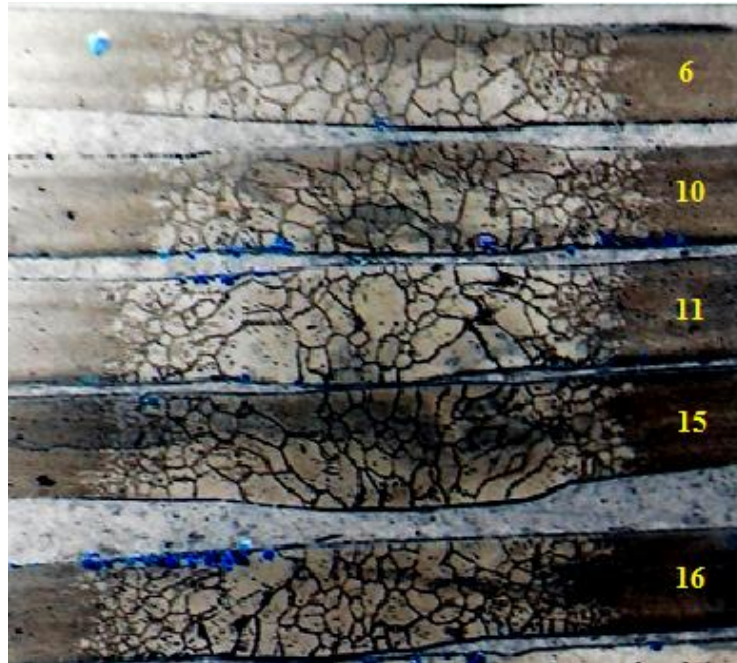
**Figure III.5 :** Contrôle par radiographie des soudures.

D'après les images de contrôle radiographique des cordons on observe l'absence d'inclusion de tungstène qui est due à une intensité de courant réduite et un bon choix des paramètres de soudage, ainsi que la présence d'un cordon régulier.

On conclue que nos paramètres choisis, globalement ne contiennent pas de défauts.

### III.5.3. Influence des paramètres de soudage sur la macrostructure

Les résultats de l'influence des paramètres de soudage sur la macrostructure sont donnés dans la figure III.6 suivante :



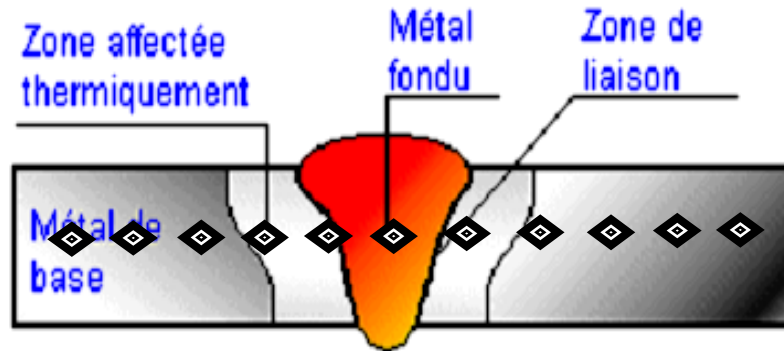
**Figure III.6 :** Photo montrant l'influence des paramètres de soudage sur la macrostructure.

Ces examens nous permis de conclure que, le cordon de soudure a une pénétration satisfaisante et il exempt de défaut (caniveau, sulfures, fissuration...etc.), ils confirment les examens visuels qui dévoile un cordon régulier de bel aspect, on a réussi donc d'obtenir des soudures qualifie par nos paramètre optimisé.

Nous avons prélevé un échantillon au milieu de nos tôles soudées qui portent trois zones essentielles métal de base (MB), la zone affectée thermiquement (ZAT) et la zone fondue (ZF). Le polissage a été réalisé puis suivi d'une attaque chimique afin de révéler la structure macrographique. On distingue l'attaque chimique utilisant des solutions chimique spécifique pour chaque matériau. Dans notre cas on a pris les compositions suivantes : 5 ml d'acide chlorhydrique (HCL), 1 gramme de l'acide picrique et 100 ml d'éthanol.

## III.6. LES RESULTATS DE LA CARACTERISATIONS MECANIQUES :

### III.6.1. Essai de microdureté



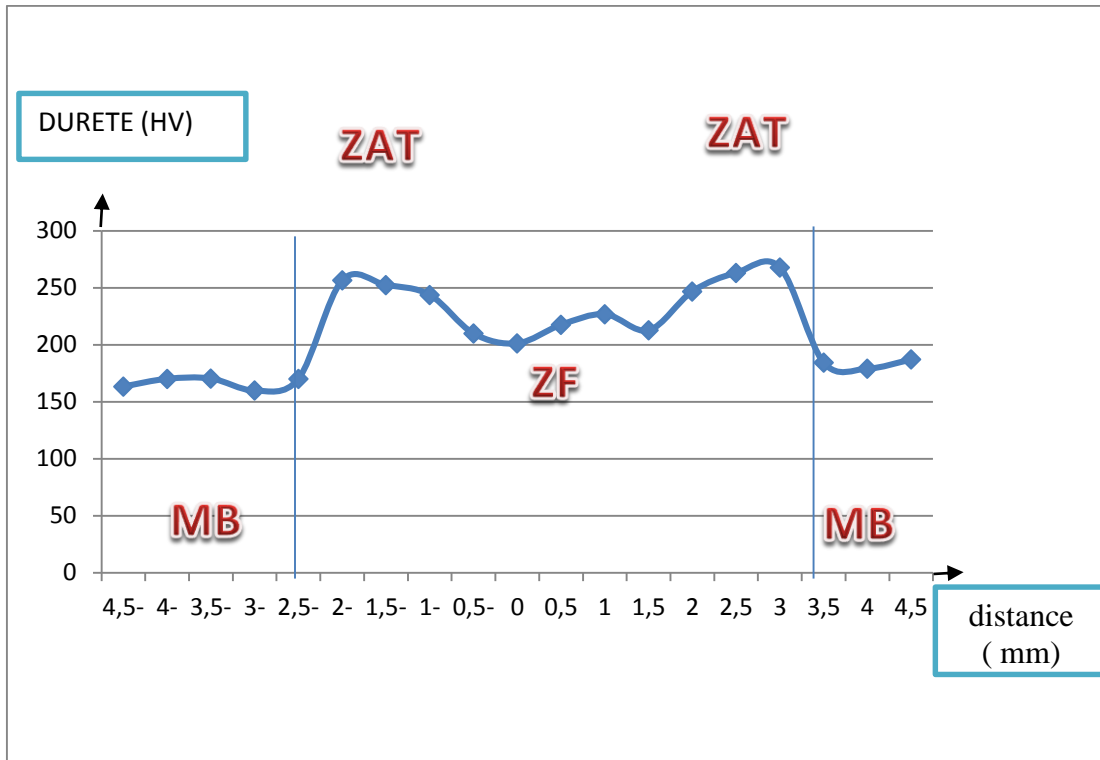
**Figure III.7 :** Schéma du balayage de la microdureté.

Les courbes de la microdureté des soudures présentent presque les mêmes allures.

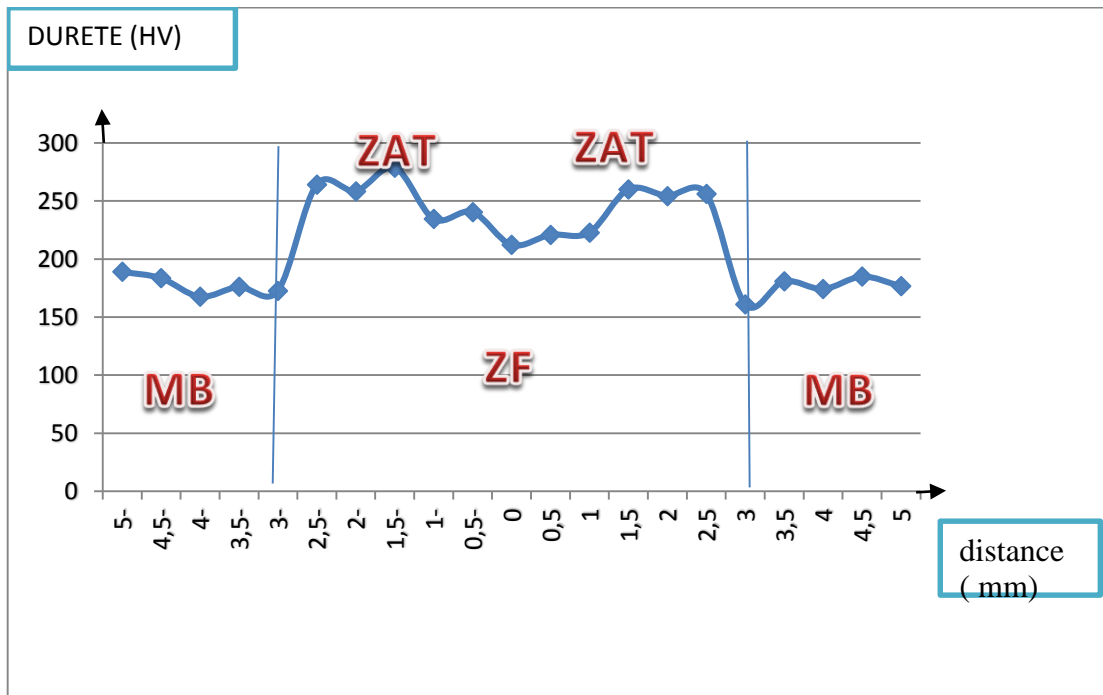
Nous constatons que la dureté au sein de la ZAT est supérieure à celle du métal de base, suivi d'une diminution de dureté dans la ZF pour recroître légèrement dans la ZAT et se stabiliser dans le MB.

Les phénomènes régissant ce comportement sont difficiles à élucider. Ils dépendent de plusieurs facteurs : l'énergie mise en jeu, L'inclusion de tungstène, les cycles thermiques subits par chaque point et l'étendue de la zone d'influence thermique.

En plus des phénomènes de fragilisation et précipitation des carbures de chrome, on doit tenir compte de l'état structural après soudage (affinage et grossissements de grains) qui a une influence sur les propriétés mécaniques et plus particulièrement sur la microdureté. Sachant que l'affinage de grain est caractérisé par les paramètres de soudage.

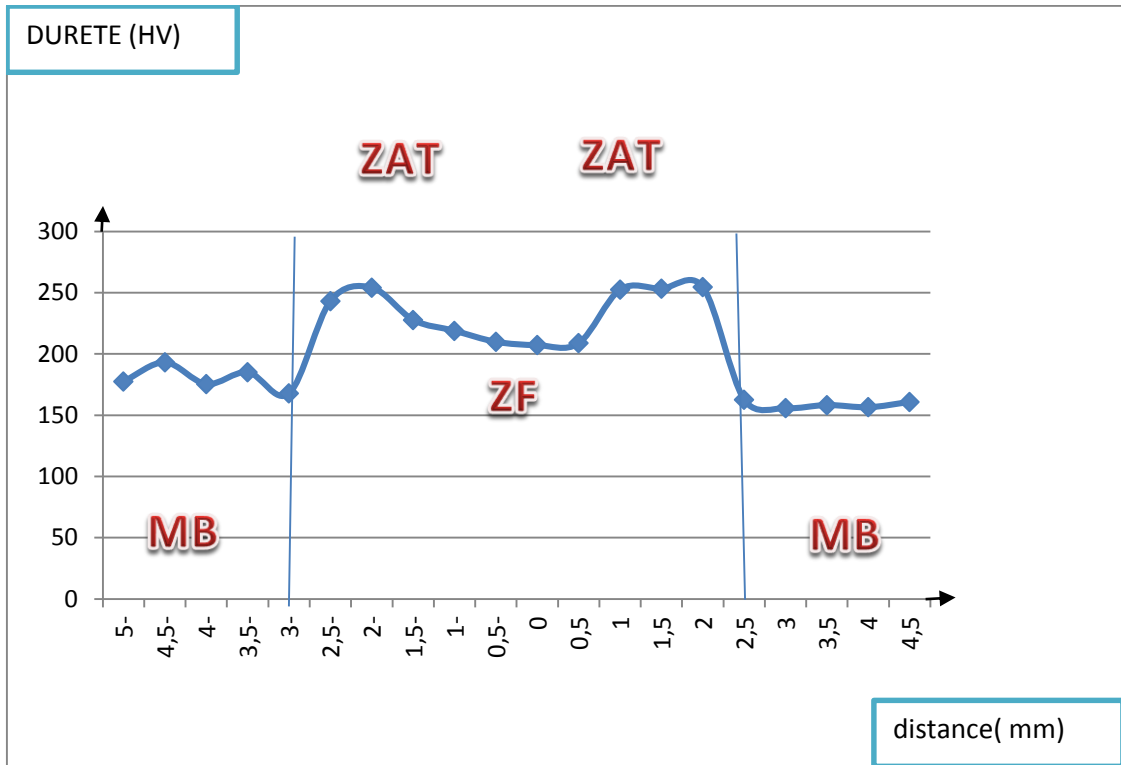


Échantillon 01 (Courant=50A, V=04mm/s).

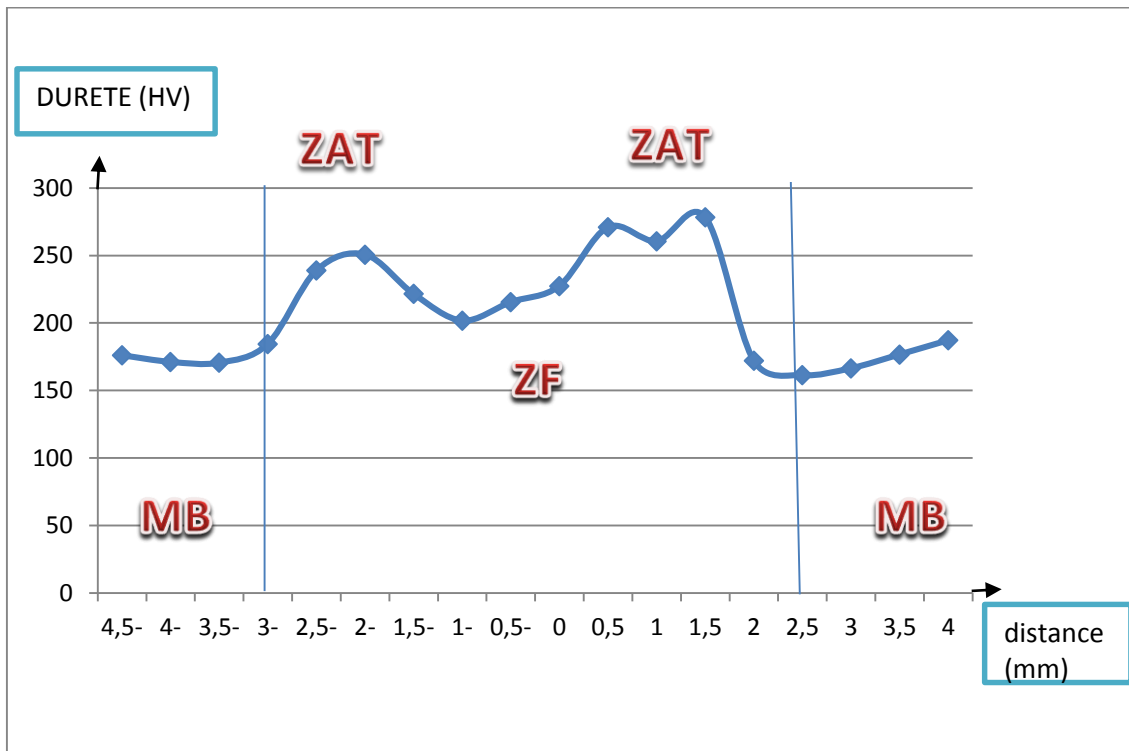


Échantillon 02 (Courant=60A, V=06mm/s).

**Figure III.8.** L'évolution de la dureté en fonction de la distance entre piques (1,2)

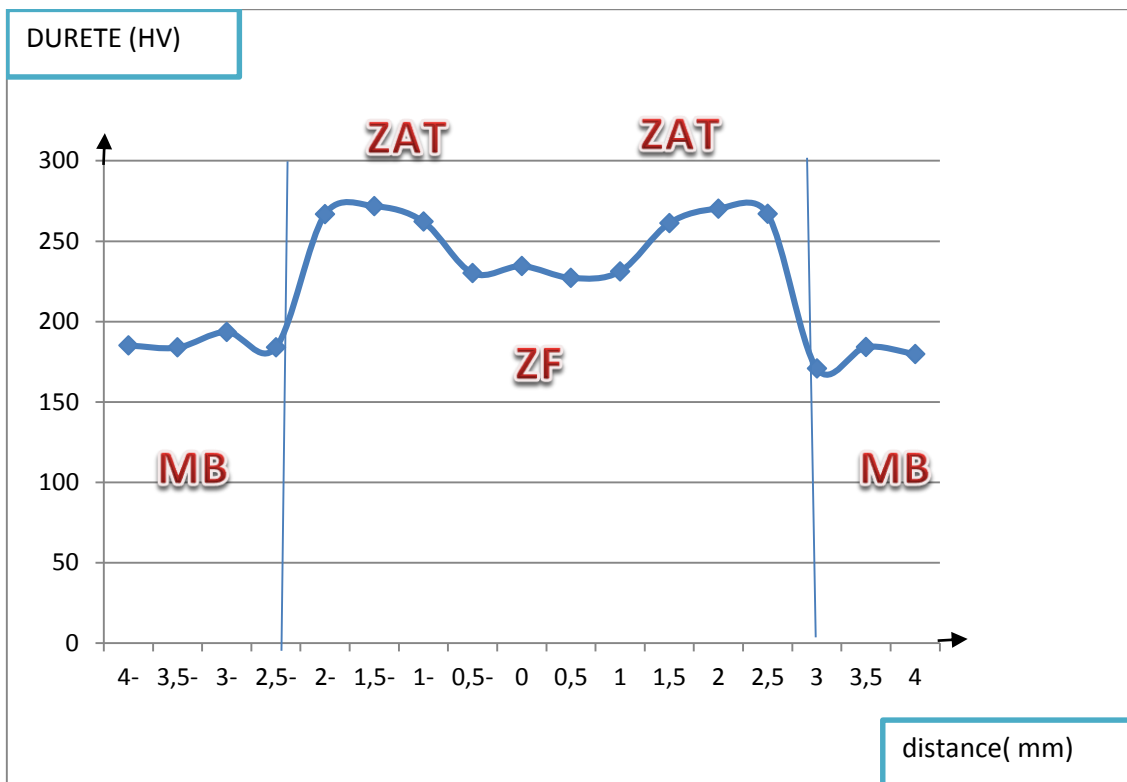


Échantillon 03 (Courant=70A, V=06mm/s).



Échantillon 04 (Courant=80A, V=80mm/s).

**Figure III.9.** L'évolution de la dureté en fonction de la distance entre les piques (03,04)



Échantillon 05 (Courant=90A, V=08mm/s).

**Figure III.10.** L'évolution de la dureté en fonction de la distance entre les piqures (05).

La précipitation de carbures augmente la dureté de la ZAT, et peut réduire la ductilité et la ténacité, surtout si les précipités sont grossiers. De même, le grossissement de grain en ZAT, et l'augmentation de la corrosion intergranulaire produite par la sensibilisation en ZAT réduisent la durée de vie en fatigue.

Remarque : les valeurs négatives dans les graphes représentent la distance à gauche du matériau.

### III.6.2. Résultats des essais de traction

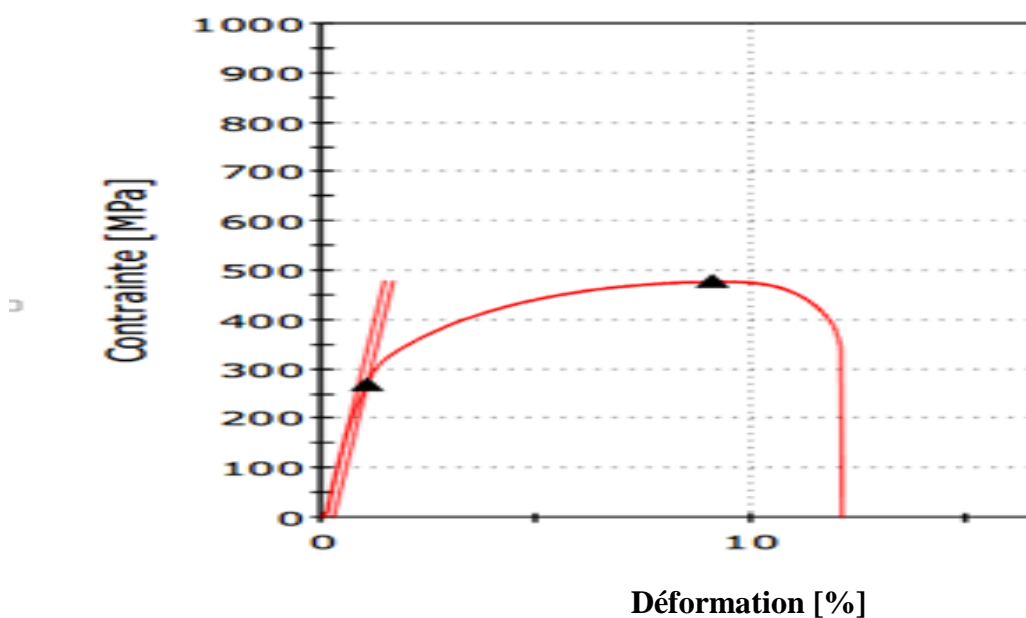
Les figures (III, 11. III, 12. III, 13. III, 14. III, 15) présentes une rupture ductile ou fragile (la contrainte en fonction de la déformation).

Le matériau est rompu progressivement. Une fissure stable peut s'amorcer au sein de la matière. L'endommagement peut être diffus et relativement important.

Dans un premier temps, la déformation est élastique. La courbe de traction est donc une droite, la pente de cette droite donne le module de Young E.

À partir d'un certain allongement, la courbe s'infléchit : c'est le début de la déformation plastique. La transition peut être franche (rupture de pente).ce qui permet de déterminer facilement la limite d'élasticité Re.

Cette courbe de traction présente ensuite un maximum qui détermine la contrainte de rupture en traction conventionnelle Rm. À partir de ce point, la déformation est concentrée dans une zone, c'est la striction ; la rupture a ensuite lieu dans la zone de striction, pour une valeur de contrainte bien supérieure à la valeur conventionnelle.

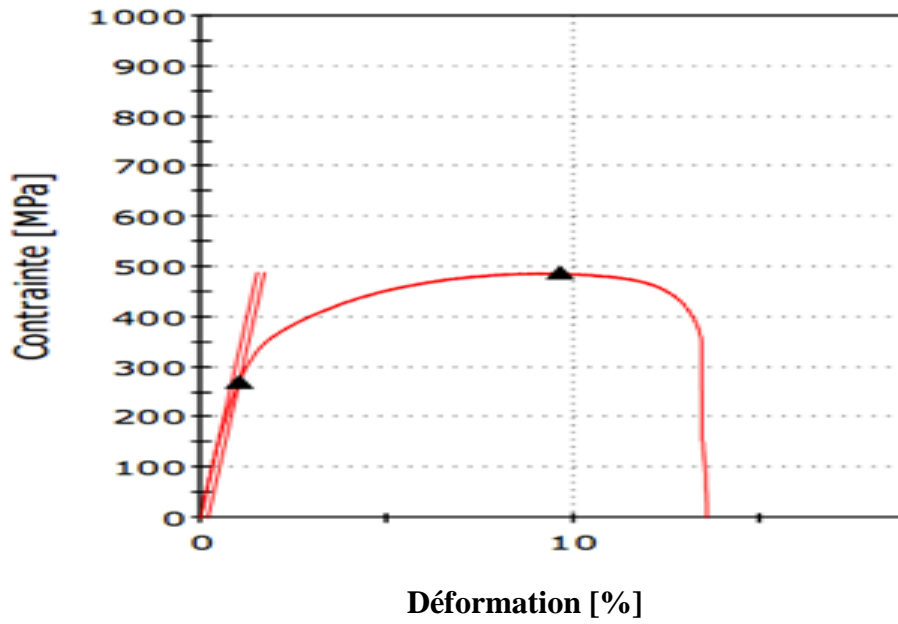


**Figure III.11.** Courbe de traction de l'échantillon (01).

(Courant=50A, V=04mm/s)

**Tableau III.4.** Résultats de traction de l'échantillon (01).

Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module Young (MPa)	Re0.2 (MPa)	Fmax (KN)	Rm (MPa)	Deplacement Max (mm)
6.00	1.20	34477	271.25	3.46	480.00	6.77

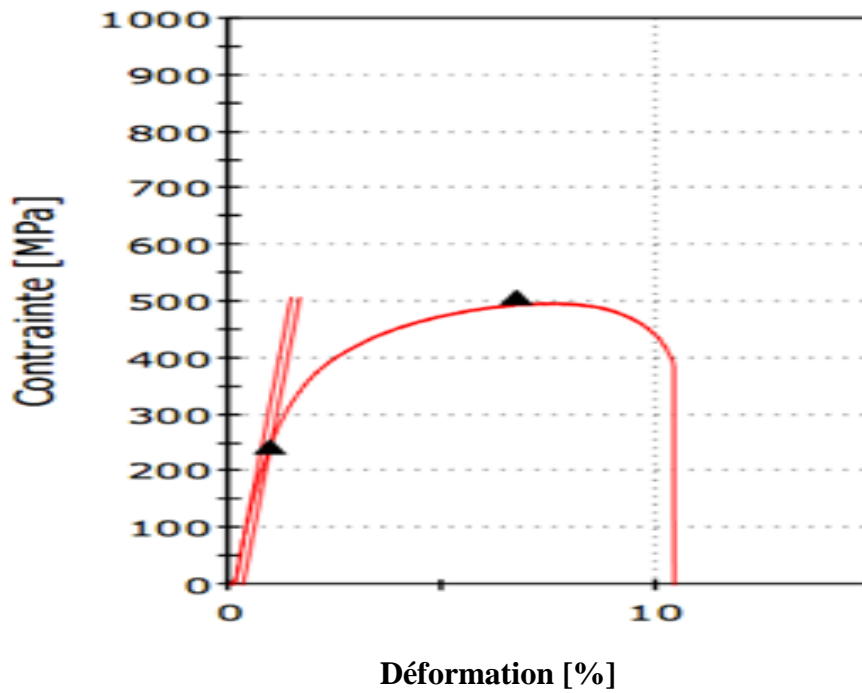


**Figure III.12.** Courbe de traction de l'échantillon (02).  
(Courant=50A, V=06mm/s)

**Tableau III.5.** Résultats de traction de l'échantillon (02).

Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module Young (MPa)	Re0.2 (MPa)	Fmax (KN)	Rm (MPa)	Deplacement Max (mm)
6.00	1.20	32082	271.37	3.52	480.96	7.63

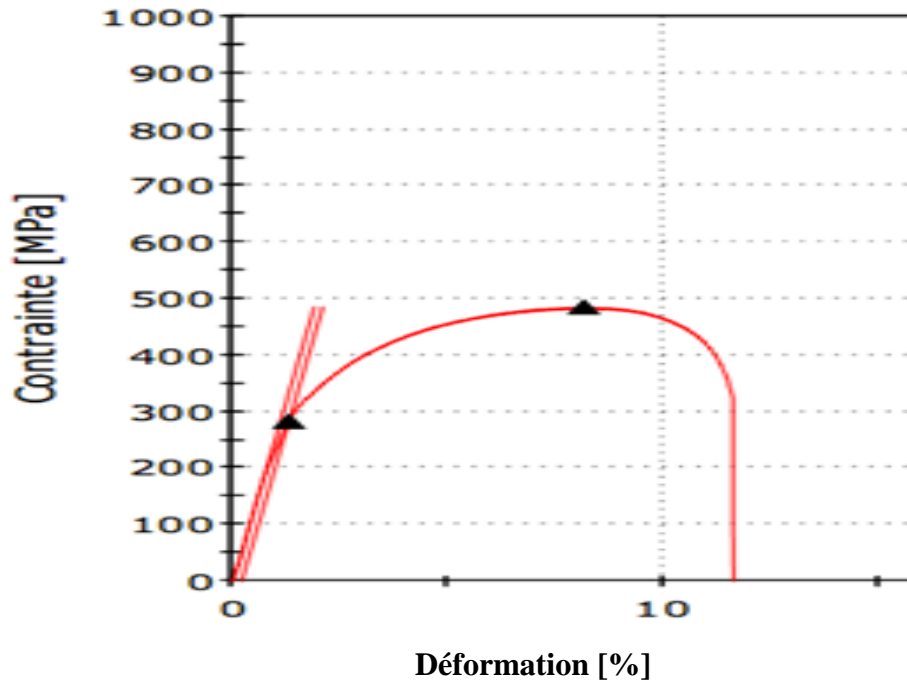




**Figure III.13.** Courbe de traction de l'échantillon (03).  
(Courant=70A, V=06mm/s)

**Tableau III.6 :** Résultats de traction de l'échantillon (03).

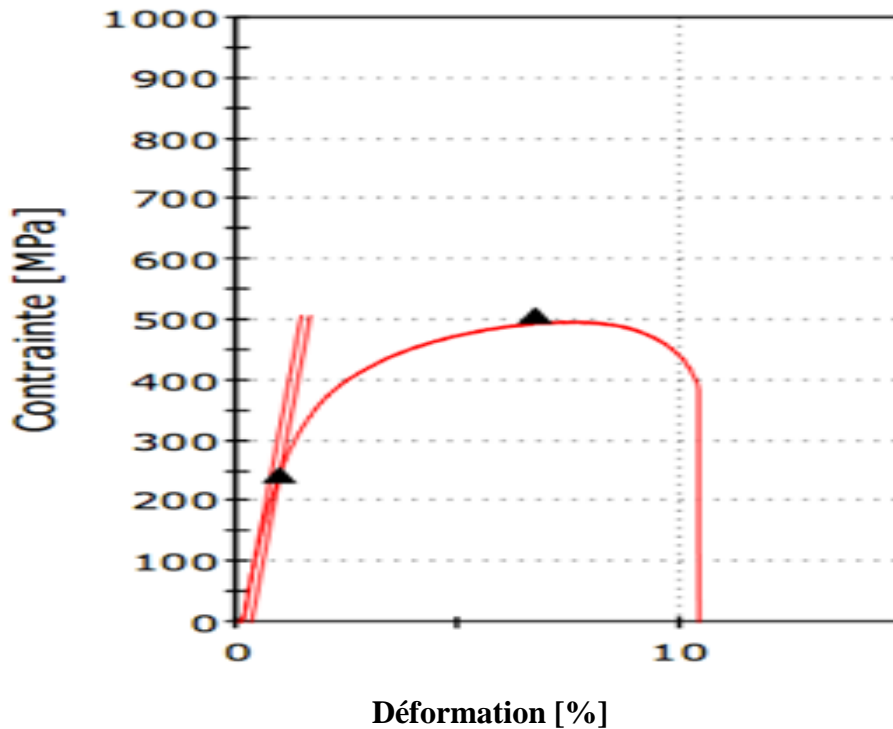
Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module Young (MPa)	Re0.2 (MPa)	Fmax (KN)	Rm (MPa)	Deplacement Max (mm)
6.00	1.20	25804	283.93	3.50	485.88	7.11



**Figure III.14.** Courbe de traction de l'échantillon (04).  
(Courant=80A, V=08mm/s)

**Tableau III.7 :** Résultats de traction de l'échantillon (04).

Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module Young (MPa)	Re0.2 (MPa)	Fmax (KN)	Rm (MPa)	Deplacement Max (mm)
6.00	1.20	31388	240.59	3.64	505.50	7.05



**Figure III.15.** Courbe de traction de l'échantillon (05).  
(Courant=90A, V=08mm/s)

**Tableau III.8 :** Résultats de traction de l'échantillon (05).

Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Module Young (MPa)	Re0.2 (MPa)	Fmax (KN)	Rm (MPa)	Deplacement Max (mm)
6.00	1.20	38416	244.23	3.65	507.53	5.79

### III.7. RESULTATS DE LA CARACTERISATION PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (M. E. B) [Examen des faciès de rupture]

Les faciès de rupture des échantillons sollicités en traction ont été examinés au moyen d'un microscope électronique à balayage de type ZIESS Gemini SEM 300.

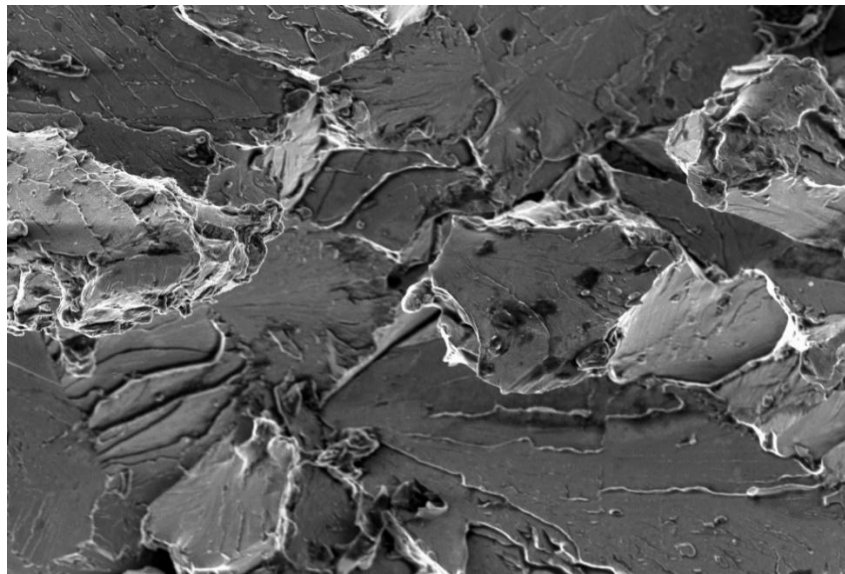
Les figures ci-dessous montrent les différents types de ruptures dont les essais ont été effectués.

Pratiquement dans toutes les figures on distingue deux types de surfaces :

- Surfaces en blanc qui correspondent aux sommets des reliefs.
- Surfaces en gris qui symbolisent la zone du début de la rupture.

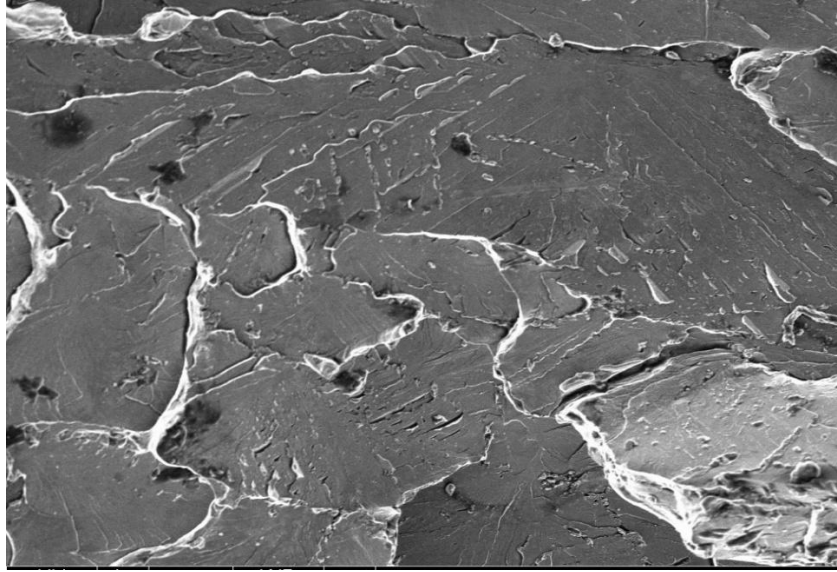
On peut également observer sur quelques figures des taches noires plus ou moins étendues, qui démontrent la présence de cupules qui sont synonyme d'arrachement de matière. Et à travers la densité de ces derniers dans les figures on peut trancher sur le type de rupture [33,34]

Pour les échantillons (1) (2) (3) la fraction de la surface grise est majoritaire considérablement et on constate une inexistence de cupules ce qui marque une rupture plastique-fragile transgranulaire avec des grains plus petit, on constate aussi la présence de nervure à l'intérieur des grains.

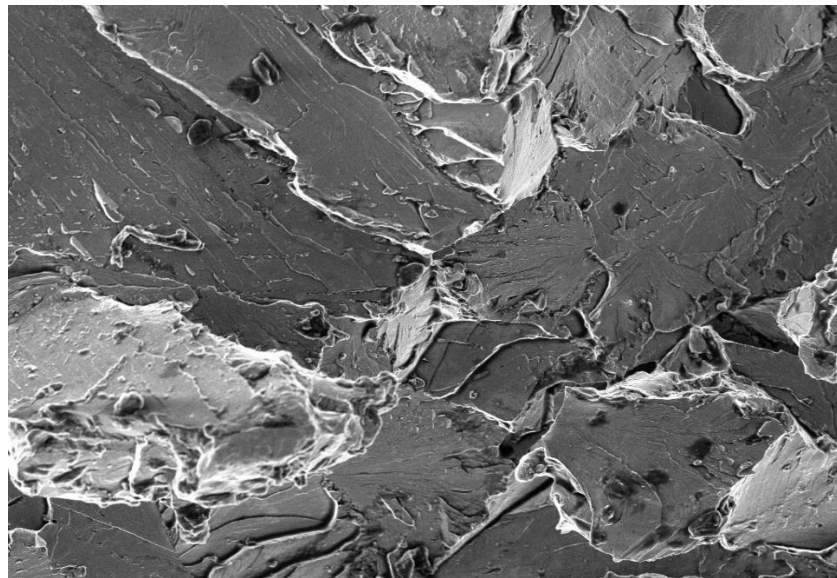


**Figure III.16.** Examen des facies de rupture de l'échantillon (01)

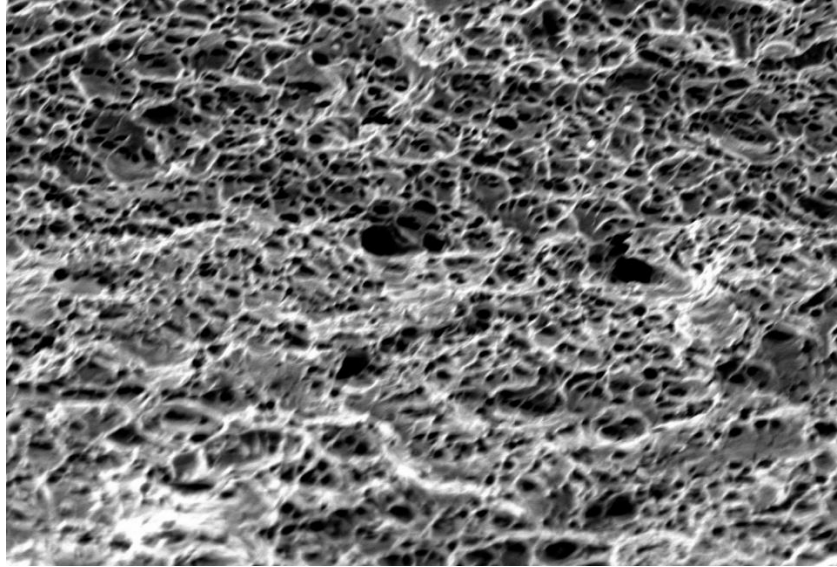
(Courant=50A, V=04mm/s)



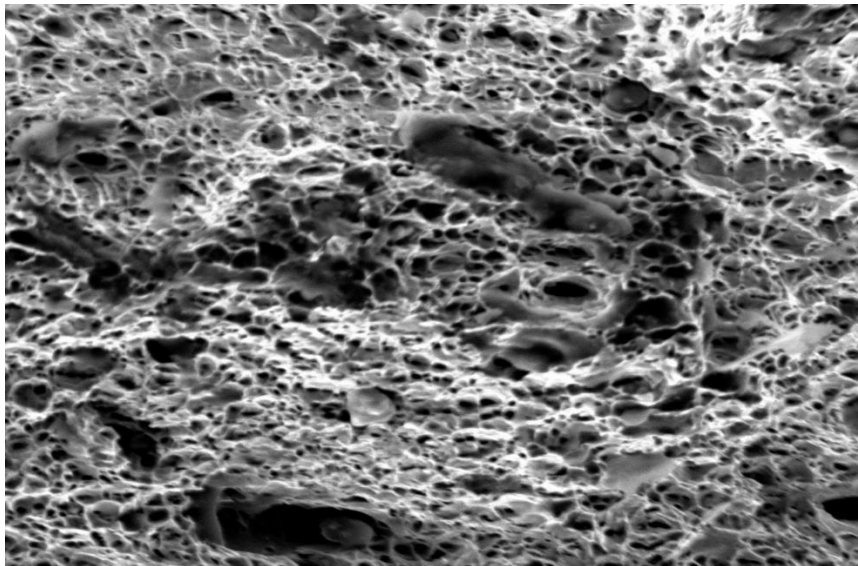
**Figure III.17.** Examen des facies de rupture de l'échantillon (02).  
(Courant=60A, V=06mm/s)



**Figure III.18.** Examen des facies de rupture de l'échantillon (03).  
(Courant=70A, V=06mm/s)



**Figure III.19.** Examen des facies de rupture de l'échantillon (04).  
(Courant=80A, V=08mm/s)



**Figure III.20.** Examen des facies de rupture de l'échantillon (05).  
(Courant=90A, V=08mm/s)

Pour les échantillons (4) (5) La surface rugueuse en blanc constitue la grande majorité de l'image, on apprécie également des cupules qui symbolisent un arrachement de matière. La rupture est considérée comme étant ductile.

Après l'examen des facies de rupture des éprouvettes on observe les résultats suivants :

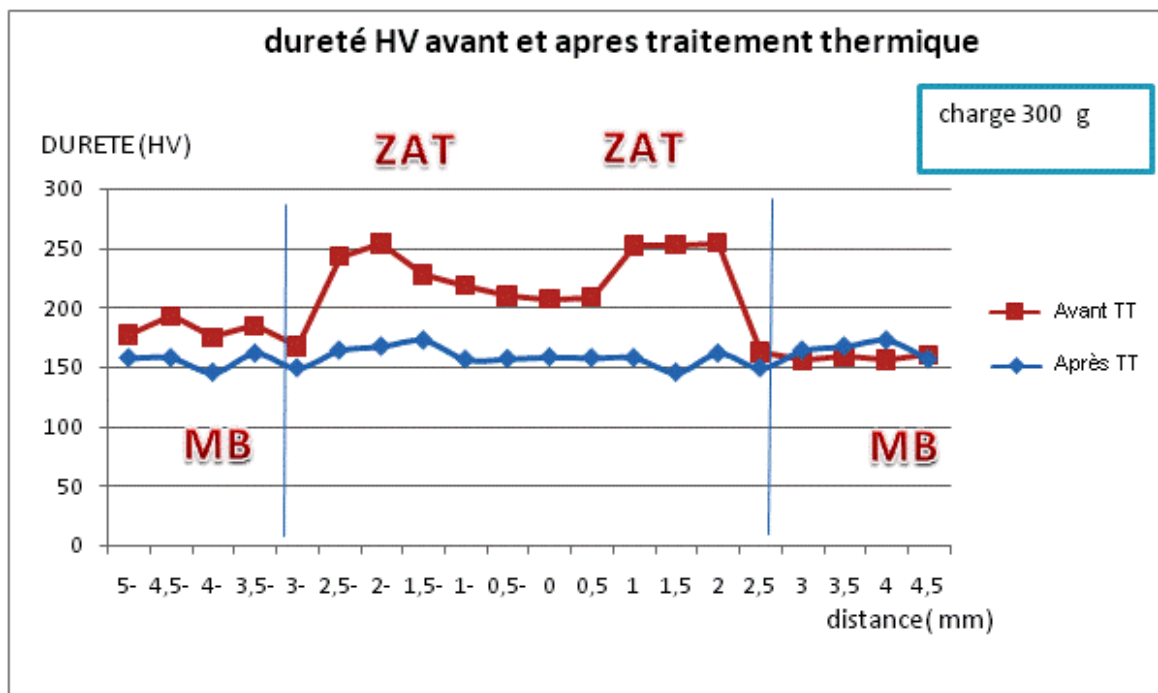
- ❖ que les essais de traction mènent à une rupture des échantillons 1, 2, 3, en MF, et échantillons 4 et 5 en MB.
- ❖ On peut constater que les échantillons 4 et 5 ont des bonnes caractéristiques mécaniques par rapport aux autres échantillons.

### III.8. RESULTAT DE TRAITEMENT THERMIQUE :

#### III.8.1. Résultats des essais de micro dureté

Les courbes de la microdureté des soudures présentent une même allure.

Après avoir fait subir à nos échantillons un traitement thermique de type revenu nous avons constaté une diminution de la dureté dans la zone fondue et dans la ZAT et se stabiliser dans le MB.

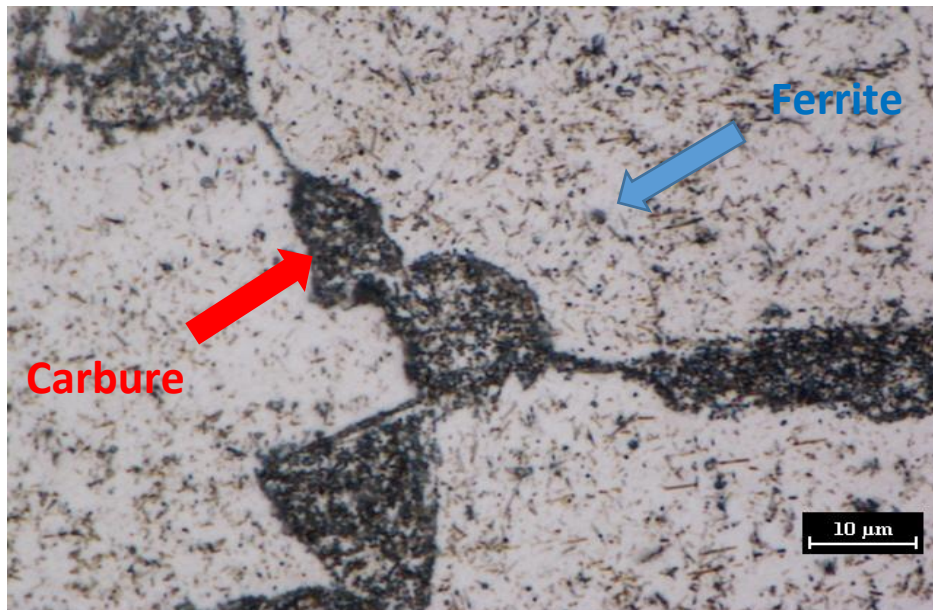


**Figure III.21 :** Dureté avant et après traitement thermique.

La présence de martensite et des précipitations de carbures inter-granulaires dans la ZAT cause une sensibilisation à la corrosion inter-granulaire. Ils devront subir après soudage un traitement thermique entre 750-850 °C, transformant la martensite en ferrite plus carbures.

### **III.8.2. Observation microscopique**

La présence de martensite est une cause de fragilité ; elle diminue la capacité de déformation plastique. C'est pourquoi il est bon de faire subir aux assemblages un traitement thermique vers 800 °C qui transforme la martensite en ferrite alpha et carbures ; des carbures précipitent également dans la ferrite delta, ce qui améliore un peu ses propriétés plastiques, La (figure III.23) représente le métal fondu subi un traitement thermique de type revenu.



*Figure III.22* : Métal fondu après revenu à 800 °C (X1500).

La résistance à la corrosion inter-granulaire est aussi affectée par les cycles de soudage dans toute la zone où la température a dépassé 950 °C. Mais la résistance à cette corrosion est totalement restaurée par le traitement thermique à 800°C.



# INTRODUCTION

Bien qu'il soit utilisé au quotidien et depuis près de 100 ans, l'acier inoxydable reste cependant un matériau méconnu des professionnels de la grande cuisine. En effet, de nombreuses idées fausses circulent à son sujet et bon nombre d'utilisateurs connaissent peu les précautions à prendre pour en conserver son aspect d'origine.

Les aciers inoxydables ferritiques se caractérisent par, une très bonne résistance à la corrosion par piqûres en milieu chloruré, supérieure à celle des austénitiques, De bonnes propriétés de mise en forme à froid, bonne résistance à la torsion et l'arrachement grâce à un module d'Young élevé, à l'oxydation sous température élevée, dilatation thermique 2x moins élevée que celle des austénitiques, et un prix plus stable par rapport aux autres types d'aciers inoxydables. [1]

En raison de ses nombreuses propriétés, l'acier inoxydable est omniprésent dans le secteur des ustensiles ménagers (cuillères, éviers...), dans le domaine alimentaire et en milieu très agressif. Ils sont ainsi facilement mis en forme par emboutissage. Par ailleurs, son aptitude au nettoyage et à la désinfection, sa résistance aux chocs et à la chaleur, sa résistance à la corrosion et son esthétisme permettent de fabriquer des matériels fonctionnels et durables. [2]

Cependant l'utilisation des aciers inoxydables ferritiques en construction soudée est très limitée en raison, qu'ils sont associés à de nombreux problèmes lors du procédé de soudage. Ces problèmes sont le grossissement des grains, à la fois dans la zone fondu (ZF) ainsi que dans celle affectée thermiquement (ZAT) et la formation de martensite au joint des grains de la soudure. Le grossissement des grains de la ferrite à haute température et la présence de martensite font que la résilience à température ambiante est généralement faible, ce qui fait que l'assemblage devient sensible à la rupture fragile.

L'objectif de la présente étude consiste, premièrement à caractériser l'acier inoxydable ferritique (AISI 430) soudé sous paramètres variables (vitesse et courant), et ensuite à optimiser ses mêmes paramètres. On s'est concentré sur l'amélioration de l'affinage de la taille des grains, durant le procédé de soudage TIG (Tungstène Inerte Gaz).

Pour réaliser ce travail nous avons adopté un plan qui consiste à scinder l'étude en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous exposons une synthèse bibliographique qui comporte deux parties. Une première partie contient un bref rappel sur les aciers inoxydables ferritiques, on y aborde entre autres les éléments et diagrammes de phases, la description des différentes familles d'aciers inoxydables, les caractéristiques des structures métallurgiques susceptibles d'être rencontrées dans les soudures en acier inoxydable ferritique, ainsi que les traitements thermiques des aciers inoxydables ferritiques. Une deuxième partie concerne les procédés de soudage et phénomènes métallurgiques intervenant lors du soudage Tungstène à Gaz Inerte (TIG) des aciers inoxydables ferritiques,

Le deuxième chapitre concerne l'approche expérimentale de notre travail, dans ce chapitre nous présenterons le matériau sur lequel notre étude a été réalisée ainsi que la description des modes opératoires de toutes les techniques expérimentales utilisées.

Le troisième chapitre concerne les résultats et discussions, dans ce chapitre nous regroupons les résultats des observations métallographiques et des essais mécaniques réalisés suivis d'une discussion et d'une interprétation lors de soudage des deux tôles avec les paramètres optimaux obtenus.

On termine ce travail par une conclusion générale où nous reprenons les points essentiels de notre étude, et les perspectives attendues.

## Références bibliographique

- [1] LAURENT BUCHER. « Etude de l'endommagement en fatigue thermique des aciers inoxydables F17TNb et R20-12 pour application automobile » thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. décembre 2004
- [2] VINCENT VILLARET « Etude de soudabilité d'un acier inoxydable ferritique (19 %Cr, 2 %Mo, Nb) appliqué aux collecteurs d'échappements » thèse doctorat, Décembre 2012.
- [3] J. VARIOT. Les aciers inoxydables austénitiques et la fabrication d'appareils en aciers austénitiques, METAUX Corrosion-Industrie, 20 Novembre 1984.
- [4] HERBERT H. UHLIG & R. WINSTON REVIE. Corrosion and corrosion control. Third edition / an instruction to corrosion science and Engineering, page 299-300, 1985.
- [5] P.LEFEVRE, M.POUPARD, L.PRIMOT, Y.VENDEVILLE & A.VIEU. Choix et mise en œuvre de aciers inoxydables dans les industries agro-alimentaires et annexes, principes généraux (Vol.1). Publication CITIM (Centre Technique des Industries Mécaniques) 2ème édition. 1996.
- [6] V. MAILLOT. Amorçage et propagation de réseaux de fissures de fatigue thermique dans un acier inoxydable austénitique de type X2 CrNi18-09 (AISI 304L). CEA SACLAY, Janvier 2004.
- [7] P.J.CUNAT Aciers inoxydables : Propriétés. Résistance à la corrosion, Techniques de l'ingénieur, M4541, Juin 2000.
- [8] P.GYMPEL, N.ARLT Les aciers inoxydables, Editeur Tec et Doc, Paris, 1990.
- [9] P.LACOMBE, B.BAROUX, G.BERANGER Les aciers inoxydables, Editions Physique, 1990.
- [10] GYMPEL P. ET ARLT N., Les aciers inoxydables, Editeur Tec et Doc, Paris, 1990.
- [11] LACOMBE., BAROUX., BERANGER., —Les aciers inoxydables, Les éditions de Physique, 1990.
- [12] DUDOGNON JULIEN : Étude des modifications structurales induites par implantation ionique dans les aciers austénitiques, thèse de doctorat de l'université d'Orleans, Décembre 2006.
- [13] Techniques de l'ingénieur, Traité matériaux métalliques, M 1105.
- [14] A. RABEY, Les aciers spéciaux, SEMAS Paris-ed, 1978.
- [15] MICHEL COLOMBIE ET COLL, «matériaux métalliques», 2e édition, 2008
- [16] MICHEL DUPEUX.« aide-mémoire sciences des matériaux », édition Dunod, 2005

- [17] LAURENT ANTONI & ALAIN GALERIE : Corrosion sèche des métaux, Techniques de l'Ingenieur, M 4224.
- [18] M. COLOMBIE., —Technique de l'ingénieur, Les aciers inoxydables | M320-1.
- [19] Collection ATS-OTUA Propriétés d'emploi des aciers, conseils pour le soudage des aciers inoxydables, 1992.
- [20] R. CAZES. “Procédés de soudage : principes généraux et critères de choix” Technique de l'ingénieur, B 7700, (2006)
- [21] R. BLONDEAU. “Procédés et applications industrielles du soudage” hermès science Publications. Paris (2001).
- [22] D. SEFERIAN. « Métallurgie de la Soudure ». FUNOT. 1982.
- [23] GUY DAVID. “Les Aciers Inoxydables” (1990).
- [24] A.P.LAMBERT Rupture par clivage de microstructures d'aciers bainitiques obtenues en conditions de soudage, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 03 Mai 2001.
- [25] Jefferson's Welding Encyclopaedia, CD Rom, American Welding Society Publisher, 18ème Edition (1997) PP 217-235
- [26] Comité sectoriel de la main-d'oeuvre dans la fabrication métallique industrielle (2010), Soudage et assemblage-soudage - Guide d'auto-apprentissage, Canada.
- [27] F. DELATTRE Le soudage des aciers inoxydables, Editions Dunod, Paris, 1965.
- [28] W. CHAPEAU, R. BAUS. “Application du soudage aux constructions” Editions Sciences et Lettres. (1977).
- [29] S.OUALLAM, Etude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024T3, Mémoire de Magister, Avril 2009.
- [30] ABDERREZAK CHAA, « étude de la déformation plastique par laminage d'un acier inoxydable ferritique », thèse de Magister, Université de Blida 1, janv 2013.
- [31] J. C. BAVAY. « Les aciers inoxydables ferritiques à hautes teneurs en Cr et Mo », dans les aciers inoxydables, Editions de physique, Les Ulis, 2000.
- [32] BOUSFOUL HACENE, TRITRI SADEK. « Influence des paramètres de soudage sur l'évolution de la microstructure d'une soudure en acier inoxydable ferritique » mémoire Master 2 Université des Science et de la Technologie Houari Boumediene U.S.T.H.B 2011-2012
- [33] PHILBERT, J., VIGNES, A., BRECHET, Y., ET COMBARDE, P., “Métallurgie du minerai au matériau”, Edition Masson, Paris. (1998).

[34] TAVARES, S.S.M., TERRA, V.F., PARDAL, J.M., CINDRA FONSECA, M.P.,  
“Influence of the microstructure on the toughness of a duplex stainless steel UNS S31803”,  
Journal of materials science, 40, (2005) 145 – 154.

# Annexe

- **Appareillage :**
  - Spectrometer
  - Microtrancheuse
  - Appareille de l'enrobage
  - Polisseuse
  - Microscope optique
  - Microduromètre
  - appareille de traction
  - four de traitements thermiques
  - Le microscope électronique à balayage



Spectrometer (**FOUNDRY-MASTER Xpert**).



Pupitre de commande



Source à rayon X



Ecran d'acquisition

Composants du radioscope (**BALTEAU. X. B**)



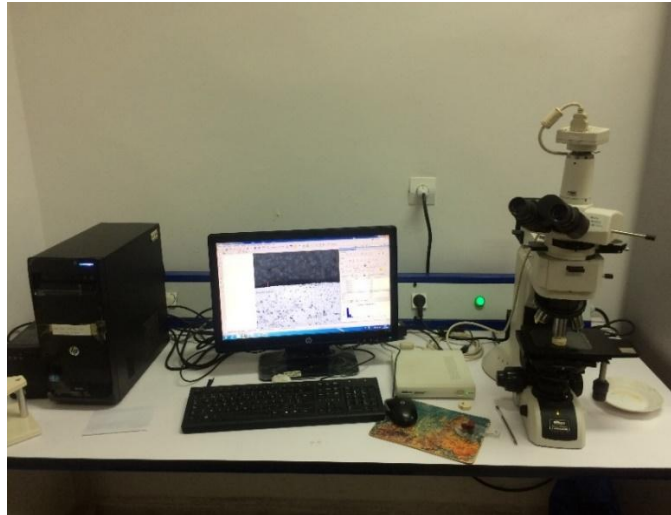
Microtronçonneuse (**Struers DiscTom-6**)



Appareille de l'enrobage (**Struers labopress-1**)



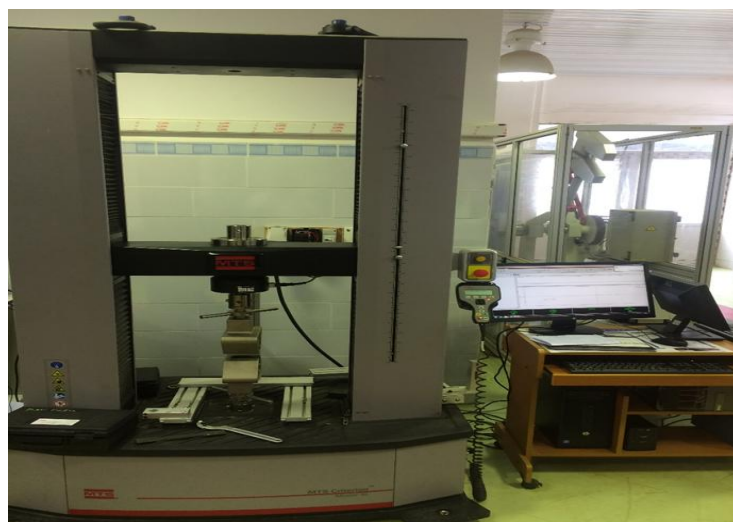
Photo de polisseuse (**Mecatech 264**)



Microscope optique (NIKON)



Microduromètre (SHIMADZU HMV-M)



Dispositif de traction. (MTS Citerion Model 45)

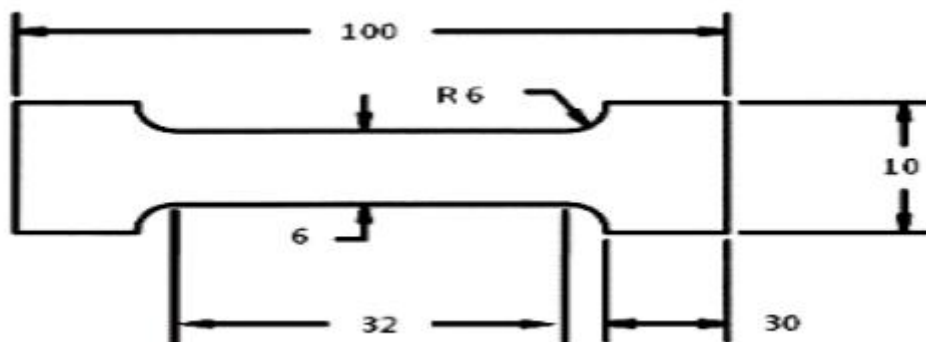




Four de traitements thermiques (**Thermeconcept**)



Le microscope électronique à balayage (**ZIESS Gemini SEM 300**)



Eprouvette de traction