

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

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Par

➤ **Maghni Nafaa**

Intitulé

**Etude de l'effet du soudage TIG sur les propriétés mécaniques et
microstructurale des tôles d'acier inoxydable 304L et 430**

Soutenu le : 29/06/2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Raouache Elhadj</i>	<i>Professeur</i>	<i>Président</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Boubaaya Rabah</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Djendel Mokhtar</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Benaniba Samir</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Saidani Lyamine</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>

Année Universitaire 2024/2025

الملخص: تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير عملية اللحام بطريقة TIG (Tungsten Inert Gas) على الخواص الميكانيكية والبنية المجهرية للفولاذ المقاوم للصدأ من نوعي 304L و 430، واللذين يُستخدمان على نطاق واسع في الصناعات المختلفة بسبب تكلفتها المنخفضة ومقاومتهما للصدأ. تم إجراء عدة تجارب على عينات ملحومة بتوصيلات متشابهة (304L/304L) و (430/430) وغير متشابهة (304L/430)، باستخدام معايير لحام دقيقة وظروف محددة.

تضمنت الدراسة اختبارات الشد لتحديد مقاومة الكسر والاستطالة، إضافة إلى تحليل ميكروسكوبي للبنية المجهرية باستخدام مجهر بصري، وقياسات للصلادة الدقيقة بطريقة Vickers.

أظهرت النتائج أن الفولاذ 304L يتميز بليوننة ومثانة ميكانيكية أكبر من الفولاذ 430، وأن لحام الفولاذين المختلفين يؤدي إلى مناطق متأثرة حراريًا غير متجانسة، مما ينعكس على تغير في البنية المجهرية وتوزيع الصلادة.

تؤكد نتائج هذا العمل على أهمية التحكم الدقيق في ظروف ومعلمات اللحام عند ربط معادن غير متشابهة، لضمان التحام جيد وتقليل العيوب الناتجة عن الاختلافات البنيوية والحرارية للمواد.

كلمات مفتاحية: لحام TIG، الفولاذ المقاوم للصدأ، الاختبار الميكانيكي، المنطقة المتأثرة بالحرارة.

Résumé : Ce travail de recherche porte sur l'étude de l'influence du soudage TIG (Tungsten Inert Gas) sur les propriétés mécaniques et la microstructure des aciers inoxydables 304L (austénitique) et 430 (ferritique), deux matériaux couramment utilisés dans les domaines industriels en raison de leur bon compromis entre performance et coût. L'objectif est d'évaluer le comportement de joints soudés homogènes (304L/304L, 430/430) et hétérogènes (304L/430) soumis à des conditions de soudage rigoureusement contrôlées.

Des essais de traction ont permis de déterminer la résistance mécanique et l'allongement à la rupture. Parallèlement, des observations métallographiques ont été réalisées afin d'étudier les modifications microstructurales induites par la chaleur du soudage, accompagnées de mesures de microdureté Vickers pour évaluer les variations de dureté à travers les différentes zones du joint.

Les résultats révèlent que l'acier 304L présente une meilleure ductilité et résistance que le 430. Toutefois, les assemblages dissemblables présentent une zone affectée thermiquement plus instable, avec des transitions microstructurales notables et des différences de dureté significatives. Cette étude met en lumière l'importance du choix des paramètres de soudage et du contrôle de la zone fondue pour optimiser les performances des joints soudés, notamment dans le cas d'assemblages entre aciers de nature différente.

Mots clés : soudage TIG, aciers inoxydables, essais mécaniques, zone affectée thermiquement.

Abstract: This study investigates the effect of TIG (Tungsten Inert Gas) welding on the mechanical and microstructural properties of 304L (austenitic) and 430 (ferritic) stainless steels, which are widely used in various industrial applications due to their cost-effectiveness and corrosion resistance. The objective is to analyze the impact of welding on both similar (304L/304L and 430/430) and dissimilar (304L/430) joints under tightly controlled welding parameters.

Mechanical tensile tests were conducted to assess ultimate tensile strength, yield strength, and elongation. Metallographic analyses via optical microscopy were also conducted to examine microstructural changes, and Vickers microhardness tests were used to detect hardness gradients across the welded zones.

The results show that 304L has higher ductility and tensile strength than 430. However, dissimilar welds showed complex thermal effects in the heat-affected zone (HAZ), leading to heterogeneous microstructures and marked hardness variations. These findings highlight the importance of precise control over welding parameters to ensure the structural integrity and mechanical performance of welded joints, especially in dissimilar metal welds.

Key words: TIG welding, stainless steels, mechanical testing, heat affected zone.

Remerciements

Louange à Allah, par Sa grâce les bonnes œuvres s'accomplissent. Une louange abondante, pure et bénie. Sans la faveur d'Allah, nous n'aurions rien accompli. À Lui revient tout mérite, en premier et en dernier lieu.

Une mention spéciale et des remerciements sincères vont à Monsieur Boubaaya Rabah, encadreur de ce mémoire, pour son soutien constant, ses conseils avisés et son encouragement tout au long de ce travail, mais aussi pour leurs qualités humaines.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à Monsieur Djendel Mokhtar, pour avoir co-encadré ce mémoire, pour leur grande disponibilité et leurs conseils avisés.

Mes remerciements vont également au Président du jury, Monsieur Raouache Elhadj, Professeur à l'université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, de m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

J'exprime mes remerciements aux autres membres de jury d'avoir accepté de juger le travail de ce mémoire et enrichi le débat scientifique : Monsieur Benaniba Samir et Monsieur Saidani Lyamine.

Je souhaite aussi témoigner toute ma reconnaissance aux éminents professeurs : Monsieur Benaissa Salim, Monsieur Darey Walid et Monsieur Ancer Mourad pour leur aide précieuse et leur accompagnement tout au long de cette recherche.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont marqué ce parcours exceptionnel pour moi, par leur excellence, leur humilité et leur professionnalisme.

Je n'oublie pas de remercier les ingénieurs des laboratoires des universités de Bordj Bou Arreridj et Sétif, pour leur assistance technique et leur contribution à la création de un environnement propice à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma mère, dont je recherche la satisfaction et à qui je souhaite de jouir toujours d'une bonne santé et d'un bien-être constant.

Par ces mots, j'implore Allah le Tout-Puissant d'envelopper l'âme pure de mon père de Sa miséricorde, de nous accorder à tous deux une place au Paradis, et de m'accorder la grâce de continuer à prier pour lui tant que je vivrai.

Je dédie également ce modeste travail à ma chère famille, mes enfants bien-aimés : Younes, Shahlae et Louay.

À tous mes amis et à ceux qui m'ont soutenu et accompagné tout au long de ce parcours.

Enfin, à tous mes camarades d'études, pour cette belle aventure reprise après une interruption de près de dix-huit ans.

Nomenclatures

- W : est l'énergie libérée (en joules),
- R : la résistance électrique (en ohms),
- I : l'intensité du courant (en ampères),
- t : la durée de passage du courant (en secondes).
- tig : tungstène , inerte, gaz .
- DC : Courant continu.
- AC : Courant alternatif
- ASTM : American Society for Testing and Materials.
- Re : Limite d'élasticité
- Rm : Résistance à la traction maximale
- A : Allongement à la rupture
- MPa : Mégapascal
- MB : Métal de base
- ZAT : Zone affectée thermiquement
- ZF : Zone fondue
- MA : Métal d'apport

Liste des figures

Figure 1.1. Schéma des étapes successives du soudage par points	06
Figure 1.2. Illustration des phases opératoires du soudage par molette	07
Figure 1.3. Vue du procédé de soudage rotatif par friction	09
Figure 1.4. Illustration du procédé de soudage à la flamme oxyacétylénique.....	11
Figure 1.5. Équipements utilisés pour le soudage oxyacétylénique	11
Figure 1.6. Représentation du soudage par faisceau d'électrons sous vide	12
Figure 1.7. Dispositif typique d'un soudage par laser	13
Figure 1.8. Schéma fonctionnel du soudage manuel à l'électrode enrobée	14
Figure 1.9. Installation type pour le soudage semi-automatique MIG/MAG	15
Figure 1.10. Vue du procédé TIG avec électrode réfractaire	16
Figure 1.11. Comparaison des régimes de courant dans le soudage à l'arc	16
Figure 2.1. Microstructure caractéristique d'un acier inoxydable à structure martensitique	22
Figure 2.2. Aspect microstructural d'un acier inoxydable austénitique révélé par attaque Braha	24
Figure 2.3. Microstructure d'un acier austénitique mise en évidence après attaque au Nital	24
Figure 2.4. Observation métallographique typique d'un acier duplex UR45N montrant la coexistence ferrite-austénite	25
Figure 2.5. Structure biphasée d'un acier inoxydable duplex révélée par électrolyse à la soude caustique	26
Figure 2.6. Micrographie d'un acier duplex SAF 2205 révélant l'alternance de bandes ferritiques et austénitiques	26
Figure 2.7. Zone fondue observée sur une soudure d'acier austénitique inoxydable	28
Figure 2.8. Courbes de dureté Vickers mesurées avant et après traitement thermique du joint soudé ...	28
Figure 2.9. Examen métallographique d'un joint soudé en acier ferritique	29
Figure 2.10. Structures observées dans un joint soudé en acier duplex	30
Figure 3.1. Equipement de soudage	36
Figure 3.2. Eprouvettes de traction	37

Figure 3.3. Machine de traction	38
Figure 3.4. Présentation de l'enrobage	39
Figure 3.5. Appareille de polissage	40
Figure 3.6. Réactif d'attaque chimique	40
Figure 3.7. Microscope métallographique optique	41
Figure 3.8. Microduromètre type Qness	42
Figure 4.1. Présentation l'essai de traction vierge	44
Figure 4.2. Courbe de traction pour l'acier 430.....	44
Figure 4.3. Courbe de traction pour l'acier 304L	45
Figure 4.4. Courbe de traction pour l'échantillon 304L/304L	46
Figure 4.5. Courbe de traction pour l'échantillon 430/430.....	46
Figure 4.6. Courbe de traction pour l'échantillon 304L/430.....	47
Figure 4.7. Présentation l'essai de traction similaire	48
Figure 4.8. Présentation l'essai de traction dissimilaire	48
Figure 4.9. Photographie d'un soudage semblable 304L/304L	49
Figure 4.10. Valeurs de dureté Vickers des différentes zones pour l'acier 304L/304L	50
Figure 4.11. Photographie des différentes zones d'un Acier 430/430.....	50
Figure 4.12. Valeurs de dureté Vickers des différentes zones pour un acier 430/430.....	51
Figure 4.13. Photographie des différentes zones susceptibles affectées par le soudage dissimilaire	52
Figure 4.14. Valeurs de dureté Vickers des différentes zones pour le soudage dissimilaire 304L/430..	53
Figure 4.15. Microstructure de l'acier inoxydable 304L	54
Figure 4.16. Microstructure de la zone affectée thermiquement 304L	55
Figure 4.17. Microstructure de la zone fondue	55
Figure 4.18. Microstructure de l'acier 430	56
Figure 4.19. Microstructure de la zone affectée thermiquement 430	56
Figure 4.20. Microstructure zone fondue 430/430	57
Figure 4.21. Changement structurale à l'effet de la soudure 430/430.....	58
Figure 4.22. Zone affectée thermiquement 304L	58
Figure 4.23. Zone affectée thermiquement430.....	59
Figure 4.24. Présentation la zone fondue d'assemblage dissimilaire 304L/430	60

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Utilisation des gaz inertes selon les applications en soudage TIG	18
Tableau 3.1. Compositions chimiques des aciers inoxydables 304L et 430	33
Tableau 3.2. Comparaison des propriétés métallurgiques	35
Tableau 3.3. Paramètres de soudage	36
Tableau 3.4. Description de la machine de traction	38
Tableau 4.1. Les résultats obtenus par l'essai de traction (Matériaux de base).....	45
Tableau 4.2. Les résultats obtenus par l'essai de traction (Échantillons soudés).....	47

Introduction

Le soudage de tôles minces en acier inoxydable représente un défi technique majeur dans les industries de pointe, notamment en raison des problèmes liés à la déformation thermique, aux modifications des propriétés mécaniques et aux transformations microstructurales. Ces défis sont particulièrement cruciaux dans des secteurs exigeants comme l'industrie alimentaire et chimique, où la précision et la durabilité des soudures sont essentielles.

L'un des défis majeurs est la déformation thermique, causée par une répartition inégale de la chaleur pendant le soudage. L'inhomogénéité thermique induit des déformations géométriques dans les tôles minces et introduit des contraintes résiduelles qui altèrent les performances structurelles des composants soudés. De plus, les caractéristiques mécaniques des matériaux sont également affectées et tendent à se dégrader, avec une détérioration importante de la résistance à la traction, de la dureté et de la ténacité dans la zone affectée thermiquement. Les modifications qui en résultent entraînent une diminution de la résistance à la fatigue et des contraintes mécaniques, limitant la fiabilité des pièces soudées.

Sur le plan microstructural, le soudage induit des modifications telles que le grossissement des grains métalliques dans la zone de soudure, la précipitation de carbures et la formation de phases cassantes, qui altèrent la structure cristalline du matériau, ce qui a un effet direct sur ses propriétés physiques et mécaniques.

Introduction

Face à ces enjeux, l'objectif de cette étude est d'évaluer la compatibilité métallurgique et mécanique du métal d'apport austénitique ER308L lorsqu'il est utilisé pour le soudage TIG d'assemblages homogènes et hétérogènes d'aciers inoxydables. Trois configurations de joints sont considérées : un soudage homogène ferritique (430/430), un soudage homogène austénitique (304L/304L), et un soudage hétérogène (304L/430).

L'étude vise à analyser l'influence de la nature des matériaux de base sur la microstructure de la zone fondue, les zones affectées thermiquement, ainsi que sur la dureté et la résistance à la traction. Cette approche permettra de déterminer la pertinence du fil ER308L comme métal d'apport universel dans des contextes industriels où des aciers inoxydables de natures différentes sont soudés ensemble.

Afin de mener à bien ce travail, nous avons réparti le plan comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à un exposé bibliographique sur les différents procédés de soudage.
- Le soudage des aciers inoxydables est traité dans le deuxième chapitre.
- La description de la procédure et des différentes techniques de caractérisation est exposée dans le troisième chapitre.
- Les résultats expérimentaux et leurs interprétations font l'objet du dernier chapitre.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus.

Chapitre 1

Procédés de soudage

Sommaire

Introduction	04
1.1. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique	05
1.2. Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique	07
1.3. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage	09
1.4. Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique	10
1.5. Soudage à l'arc	13
1.6. Le procédé de soudage TIG	15
1.6.1. Paramètres technologiques	16
Bibliographie	20

Introduction

Le soudage constitue une méthode d'assemblage permanent reposant sur l'établissement d'une continuité métallique entre les pièces unies. Le terme « soudure » désigne le joint formé à la suite de la fusion des bords des éléments à assembler, avec ou sans l'ajout d'un métal d'apport. Ce procédé peut ainsi résulter soit de la fusion seule des métaux de base, soit d'un mélange entre ceux-ci et un matériau d'apport complémentaire. La majorité des métaux sont soudables, pour peu que des protocoles opératoires adaptés soient mis en œuvre. C'est notamment le cas pour les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

Contrairement à une perception encore répandue, les technologies de soudage évoluent rapidement, voire radicalement. Bien que des pratiques similaires remontent à l'Antiquité, ce n'est qu'à partir du XXe siècle que le soudage à l'arc électrique permet véritablement la maîtrise de la fusion et de la solidification des matériaux en vue d'un assemblage fiable. Ce n'est cependant qu'après la Seconde Guerre mondiale que les structures soudées trouvent leur place dans les réalisations industrielles et architecturales [1].

Aujourd'hui, une large gamme de procédés de soudage existe, différant selon les principes physiques mis en jeu. Certains reposent sur la fusion des pièces, d'autres sur l'application d'efforts mécaniques sans fusion. Les sources d'énergie utilisées peuvent être d'origine chimique, électrique ou mécanique. Cette diversité permet une classification des procédés selon quatre grandes familles [2] :

- procédés impliquant une fusion locale accompagnée d'une action mécanique ;
- procédés utilisant un chauffage sans fusion combiné à une action mécanique ;
- procédés purement mécaniques, sans apport de chaleur ;
- procédés à fusion locale sans intervention mécanique.

1.1. Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique

Dans cette catégorie, l'énergie nécessaire à la fusion des métaux est générée par effet Joule, produit par un courant électrique de forte intensité circulant à travers les pièces sous pression. La chaleur ainsi localisée permet la formation d'un bain de fusion sans nécessité de métal d'apport, rendant ces procédés autogènes. L'énergie dégagée peut être quantifiée selon la relation suivante :

$$W = R \times I^2 \times t$$

Où :

- **W** : est l'énergie libérée (en joules),
- **R** : la résistance électrique (en ohms),
- **I** : l'intensité du courant (en ampères),
- **t** : la durée de passage du courant (en secondes).

Ces procédés comprennent notamment le soudage par points et le soudage à la molette.

a) Soudage par point

Le soudage par points consiste à assembler deux tôles métalliques, souvent en acier, en les plaçant entre deux électrodes. Ces électrodes exercent une pression localisée tandis qu'un courant électrique de forte intensité traverse l'interface. Il en résulte une élévation de température suffisante pour générer un noyau fondu à la jonction des tôles. En se solidifiant, ce noyau assure la liaison mécanique entre les pièces.

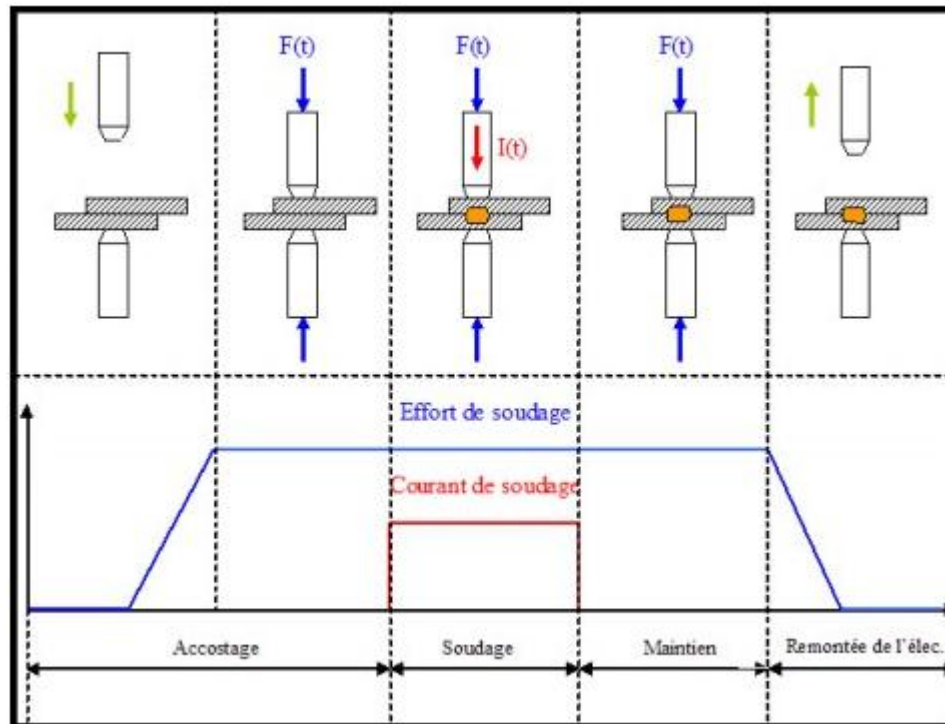


Figure 1.1. Schéma des étapes successives du soudage par points [3].

Le processus se déroule en trois phases (Figure 1.1) :

1. Accostage : les électrodes se rapprochent et appliquent une pression sur les tôles, assurant un bon contact mécanique.
 2. Soudage : le courant est activé, provoquant une fusion localisée par effet Joule. La résistance initiale au niveau du contact génère un échauffement préférentiel.
 3. Maintien : la pression est conservée pour permettre la solidification du point de soudure.
- Le refroidissement est accéléré par un système d'électrodes refroidies à l'eau. Une fois le cycle achevé, les électrodes peuvent être déplacées pour souder un autre point [3].

b) Soudage à la molette

Ce procédé dérive du soudage par points, mais utilise des électrodes en forme de rouleaux, appelés molettes, permettant une soudure continue. Les pièces à assembler sont maintenues en contact entre ces molettes rotatives qui assurent simultanément le serrage, la conduction du courant et la translation le long du joint.

Le processus comporte les étapes suivantes (Figure 1.2) :

1. Accostage : les molettes saisissent les tôles au point de départ.
2. Soudage : le courant est établi tandis que les molettes se mettent en rotation, générant une soudure linéaire.
3. Arrêt : les molettes s'écartent une fois le cordon terminé.

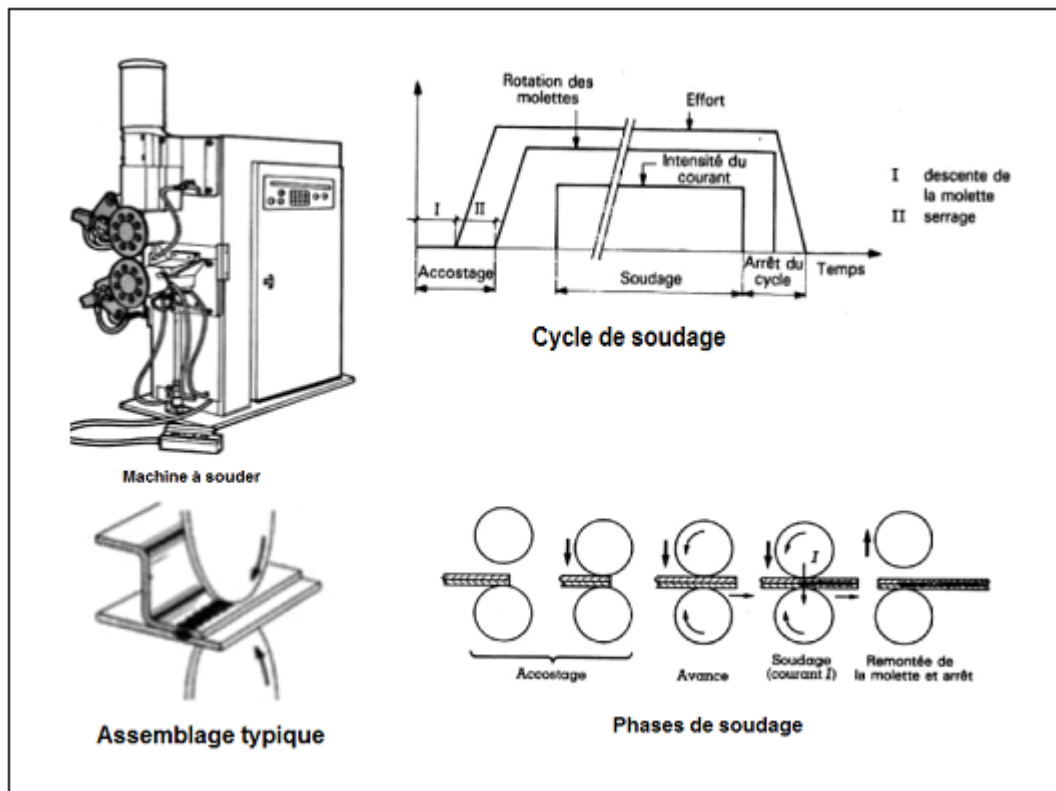


Figure 1.2. Illustration des phases opératoires du soudage par molette [4].

Selon le mode de courant utilisé (alternatif ou modulé), la soudure peut être continue ou constituée de points juxtaposés, chacun pouvant faire l'objet d'un forgeage contrôlé. Il est aussi possible de réaliser des soudures discontinues non étanches, les molettes assurant alors uniquement une pression mécanique suffisante pour maintenir les tôles ensemble [4].

1.2. Procédés avec chauffage sans fusion, accompagnés d'une action mécanique

Dans ces procédés, l'assemblage des pièces repose sur une élévation de température sans atteindre la fusion, combinée à une pression contrôlée. La chaleur peut être générée soit

par une source externe, soit par une énergie mécanique comme le frottement. Leur mise en œuvre nécessite des dispositifs techniques adaptés [5].

Deux méthodes principales sont recensées dans cette catégorie :

- le soudage par diffusion ;
- le soudage par friction.

a) Soudage par diffusion

Il s'agit d'un procédé de soudage à l'état solide. Les surfaces à assembler sont mises en contact sous pression et portées à une température suffisamment élevée pour favoriser la migration des atomes à travers l'interface. Cette diffusion, renforcée par des microdéformations plastiques, permet d'établir la continuité métallique entre les pièces.

Ce procédé exige une préparation minutieuse des surfaces (polissage fin et dégraissage) pour éliminer toute impureté susceptible de perturber la diffusion. De plus, le soudage est généralement effectué sous vide ou en atmosphère inerte afin d'éviter l'oxydation des matériaux à chaud [6].

b) Soudage par friction

Le soudage par friction repose sur la conversion de l'énergie mécanique en chaleur. Une pièce est mise en rotation relative par rapport à l'autre sous une pression axiale, générant un échauffement localisé à l'interface. Une fois la température adéquate atteinte, la rotation est stoppée, et la pression est augmentée pour achever le joint par forgeage.

Ce procédé élimine les contaminants superficiels par l'effet du frottement, rendant inutile une préparation élaborée des pièces. Il permet une liaison efficace sans métal d'apport ni atmosphère de protection [6].

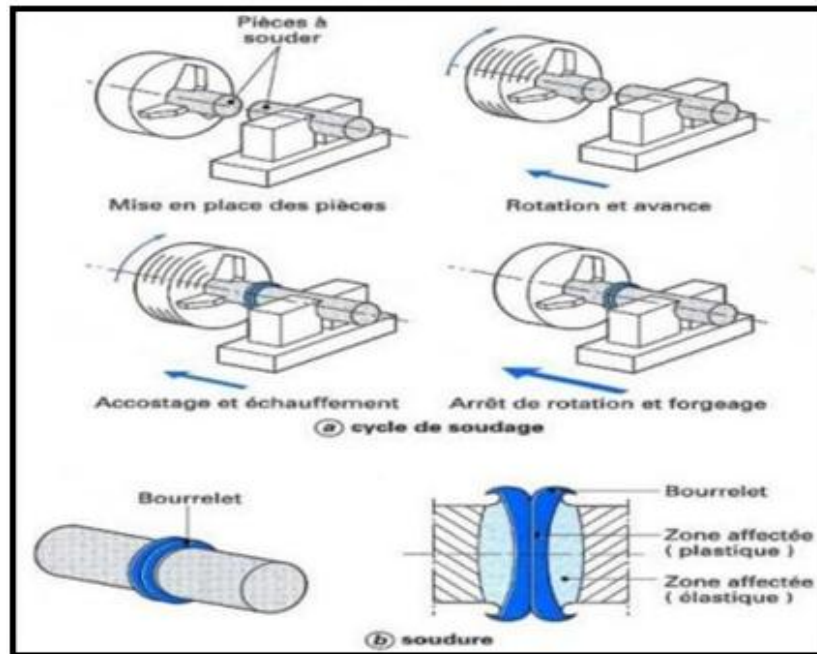


Figure 1.3. Vue du procédé de soudage rotatif par friction [6].

1.3. Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage

Ces procédés exploitent exclusivement des actions mécaniques – vibrations, pressions ou chocs – pour assurer l'assemblage des pièces, sans recourir à une source de chaleur.

On distingue principalement :

- le soudage par ultrasons ;
- le soudage par explosion.

a) Soudage par ultrasons

Ce procédé repose sur l'application simultanée d'une pression de contact et de vibrations ultrasonores (15 à 60 kHz). Ces vibrations, appliquées tangentiellement à l'interface des pièces, induisent un frottement localisé générant un échauffement suffisant pour atteindre la température de recristallisation. Une mince couche de matériau se transforme alors pour assurer une liaison métallurgique [6].

b) Soudage par explosion

Le soudage par explosion permet l'assemblage par recouvrement, notamment pour les procédés de placage. Une détonation contrôlée propulse violemment une des pièces contre l'autre. L'onde de choc générée nettoie l'interface en éjectant les impuretés, ce qui favorise la liaison directe des matériaux. La surface des pièces doit cependant être préalablement décapée [6].

1.4. Procédés à fusion locale sans intervention mécanique

Ces procédés se caractérisent par la création d'un bain de fusion uniquement à l'aide d'une source thermique, sans qu'une contrainte mécanique soit exercée pendant l'opération. La protection du bain fondu contre l'oxydation est assurée par divers moyens selon le procédé.

On distingue :

- le soudage à la flamme ;
- le soudage aluminothermique ;
- le soudage par faisceau d'électrons ;
- le soudage par faisceau laser.

a) Soudage à la flamme

Le soudage oxyacétylénique (procédé 311 selon la norme ISO 4063) utilise la combustion d'un mélange de gaz (oxygène et acétylène) pour générer une flamme pouvant atteindre plus de 3000 °C. Cette chaleur fait fondre les bords des pièces ainsi qu'un métal d'apport (fil) introduit manuellement dans la zone de fusion [7].

Ce procédé est principalement réservé aux pièces de faible épaisseur (≤ 5 mm) et reste apprécié pour sa simplicité de mise en œuvre, notamment dans les travaux de réparation (Figure 1.4) [8].

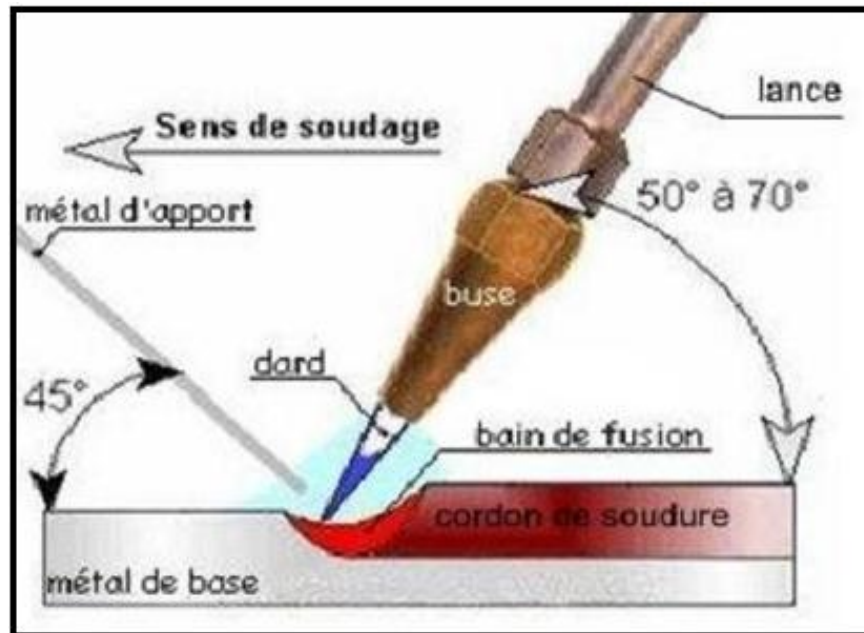


Figure 1.4. Illustration du procédé de soudage à la flamme oxyacétylénique [8].

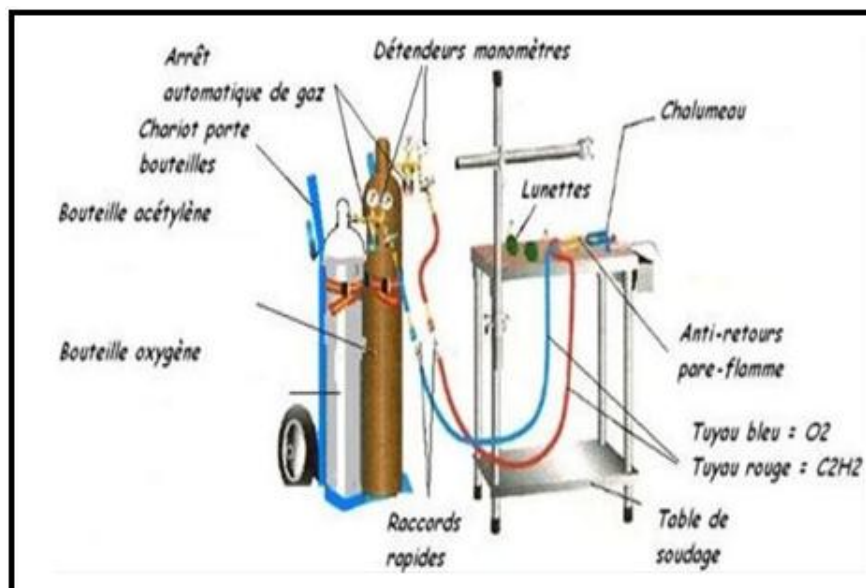


Figure 1.5. Équipements utilisés pour le soudage oxyacétylénique [8].

b) Soudage aluminothermique

Le procédé aluminothermique repose sur une réaction exothermique entre de l'aluminium en poudre et des oxydes métalliques. Cette réaction génère une grande quantité de chaleur permettant la fusion d'un métal d'apport qui, une fois coulé dans un

moule formé entre les pièces à assembler, réalise le joint. La protection du bain est assurée par un laitier formé naturellement au cours de la réaction [6].

c) Soudage par faisceau d'électrons

Ce procédé utilise un faisceau d'électrons accélérés sous vide pour générer une fusion localisée à l'interface des pièces. L'impact des électrons sur la matière produit une chaleur intense et hautement focalisée. Le soudage par faisceau d'électrons est automatisé et permet une grande précision, adaptée tant aux fortes qu'aux faibles épaisseurs (Figure 1.6).

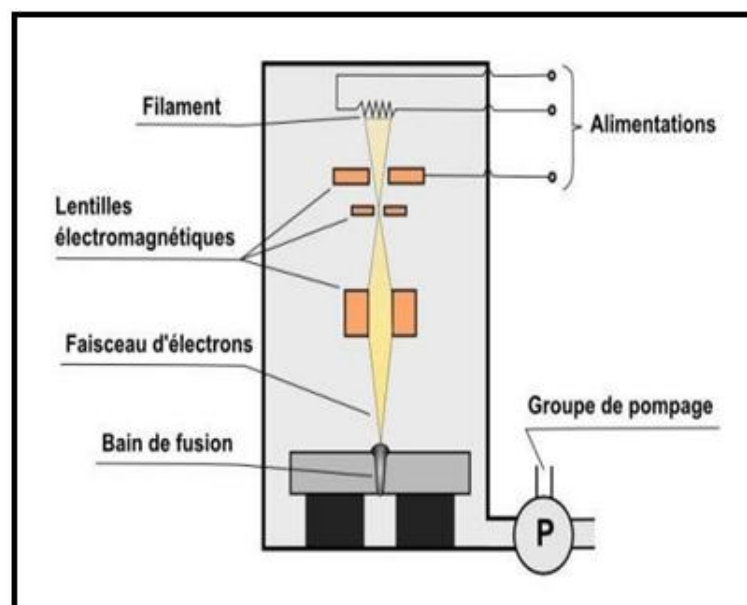


Figure 1.6. Représentation du soudage par faisceau d'électrons sous vide [9].

d) Soudage par faisceau Laser

Le soudage laser s'appuie sur un faisceau lumineux concentré, dirigé sur le joint à souder. Ce faisceau, guidé par des fibres optiques ou des miroirs, fournit une densité d'énergie très élevée permettant de réaliser des soudures profondes, fines et à grande vitesse. Utilisé notamment dans l'industrie automobile, ce procédé convient à la production en série et aux assemblages de haute qualité (Figure 1.7) [9].

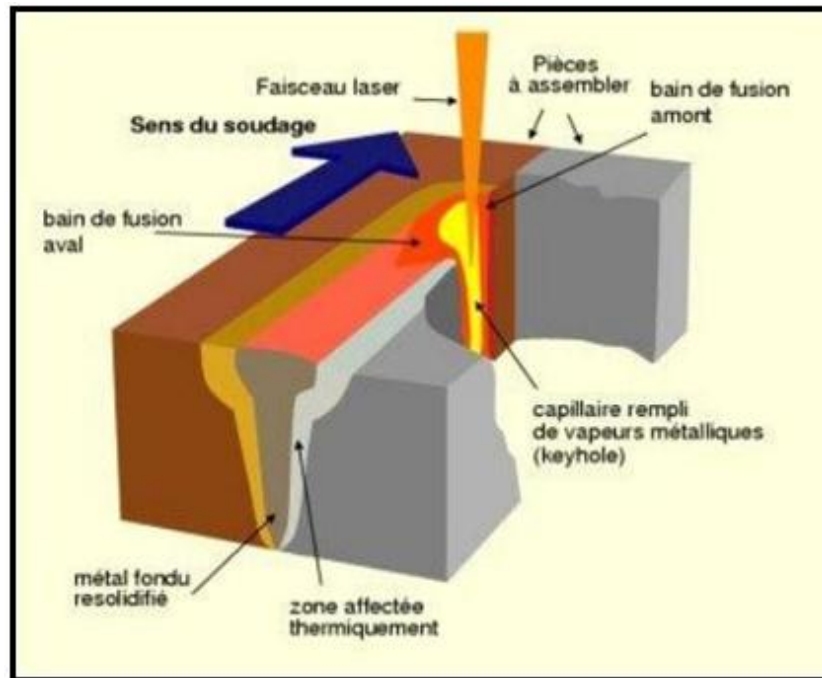


Figure 1.7. Dispositif typique d'un soudage par laser [9].

1.5.Soudage à l'arc

Le soudage à l'arc repose sur la génération d'une chaleur intense par la création d'un arc électrique entre une électrode et les pièces à assembler. L'arc provoque la fusion de l'électrode (si elle est fusible) et du métal de base, formant ainsi le cordon de soudure après solidification. Ce procédé est l'un des plus largement utilisés dans l'industrie du fait de sa polyvalence.

Deux variantes principales sont étudiées ici :

- le soudage à l'électrode enrobée,
- le soudage semi-automatique (MIG/MAG). [10].

a) Soudage à l'électrode enrobée

Le soudage manuel à l'arc, connu sous le nom de procédé SMAW (Shielded Metal Arc Welding), utilise une électrode enrobée servant à la fois de métal d'apport et de source de protection gazeuse. Lorsque l'arc est amorcé, la chaleur générée fait fondre l'électrode,

formant le bain de fusion. L'enrobage, en se consumant, dégage des gaz qui protègent le métal en fusion de l'oxydation et laisse un laitier protecteur en surface (Figure 1.8).

Ce procédé est caractérisé par sa simplicité, sa grande adaptabilité aux différents types d'aciers, et sa facilité de mise en œuvre dans diverses positions de soudage. La qualité du joint obtenu dépend de la technologie de l'électrode et de l'habileté de l'opérateur, notamment dans la régulation de la longueur d'arc et du déplacement manuel [10].

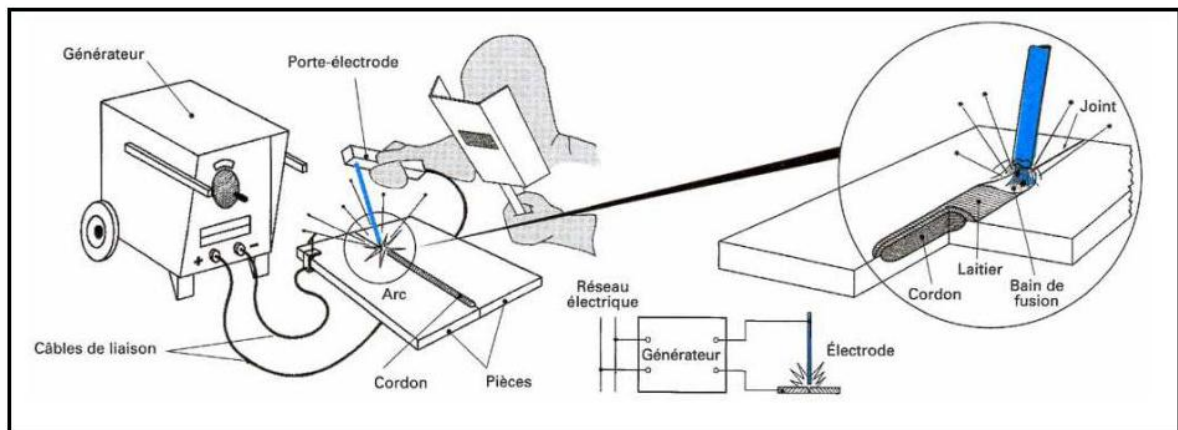


Figure 1.8. Schéma fonctionnel du soudage manuel à l'électrode enrobée [10].

b) Soudage semi-automatique

Le soudage semi-automatique, ou procédé GMAW (Gas Metal Arc Welding), met en œuvre une électrode sous forme de fil continu déroulé mécaniquement, combinée à une protection gazeuse (argon, CO_2 ou mélanges). L'amorçage de l'arc provoque la fusion simultanée du fil et du métal de base. Le gaz, diffusé par la torche, assure la protection du bain de fusion contre l'atmosphère ambiante (Figure 1.9).

Grâce à la constance de l'alimentation en fil et la stabilité de l'arc, ce procédé est plus rapide et nécessite moins de compétence manuelle que le soudage à l'électrode enrobée. Il peut être automatisé et s'adapte à un large éventail de matériaux, notamment les aciers, les inox, l'aluminium et leurs alliages. Il est très prisé dans les secteurs de production en série, comme l'automobile ou la chaudronnerie industrielle [10].

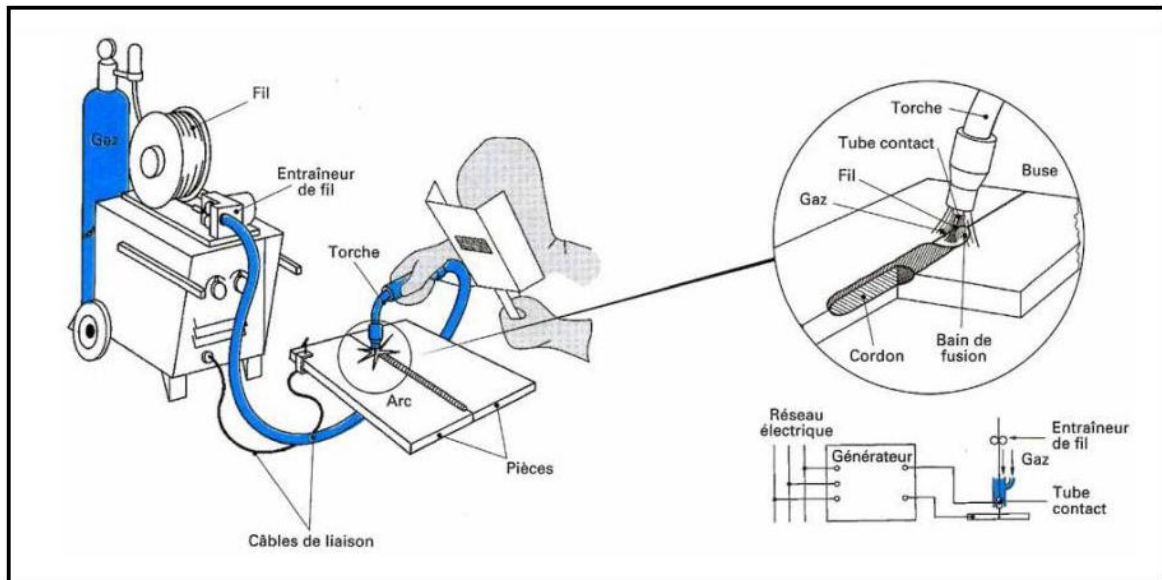


Figure 1.9. Installation type pour le soudage semi-automatique MIG/MAG [10].

1.6. Le procédé de soudage TIG

Le soudage TIG, aussi désigné par l'acronyme GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), met en œuvre une électrode non fusible en tungstène pour établir un arc électrique entre l'électrode et la pièce à assembler. Le métal de base est fondu localement, et un métal d'apport peut être ajouté manuellement si nécessaire. La zone de soudage est protégée de l'air ambiant par un gaz inerte, généralement de l'argon ou de l'hélium (Figure 1.10).

Ce procédé est particulièrement adapté aux applications nécessitant une grande précision, une propreté du cordon et une maîtrise thermique rigoureuse. Il est utilisé dans les secteurs où la qualité du joint est prioritaire, notamment l'aéronautique, la pétrochimie ou la tuyauterie de précision.

Le soudage TIG permet d'obtenir des soudures de haute qualité, sans inclusion ni porosité, sur une large gamme de matériaux tels que l'acier inoxydable, l'aluminium, le titane ou le cuivre [10].

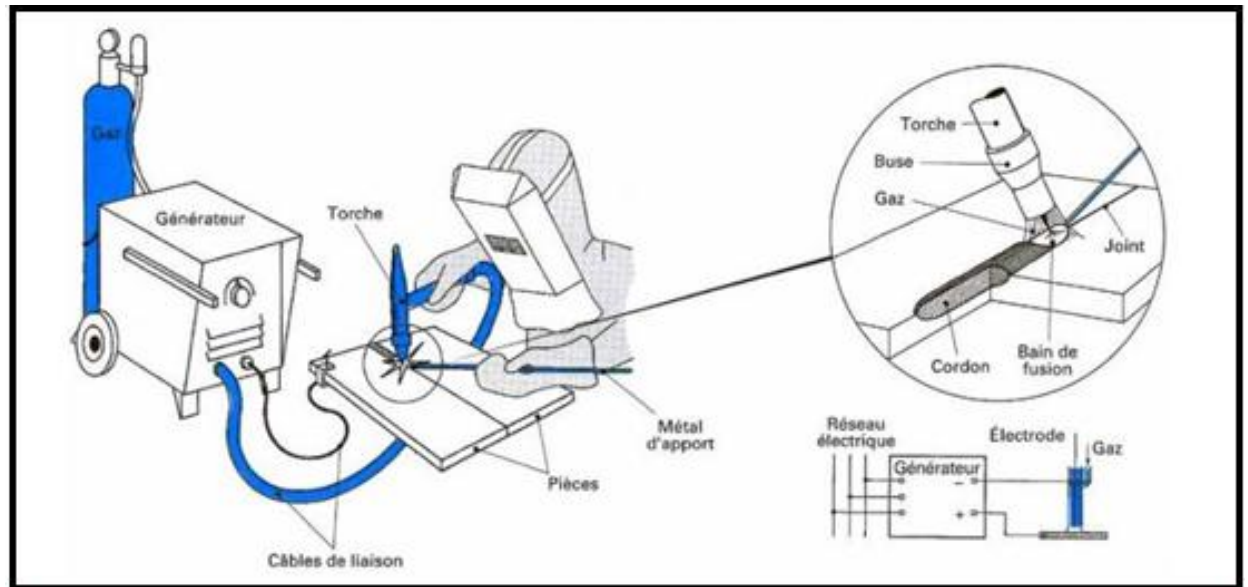


Figure 1.10. Vue du procédé TIG avec électrode réfractaire [10].

2.6.1. Paramètres technologiques

a) Nature du courant de soudage

Le procédé TIG peut être utilisé en courant continu (DC) ou en courant alternatif (AC), selon la nature des matériaux et les exigences du joint à réaliser (Figure 1.11) [11].

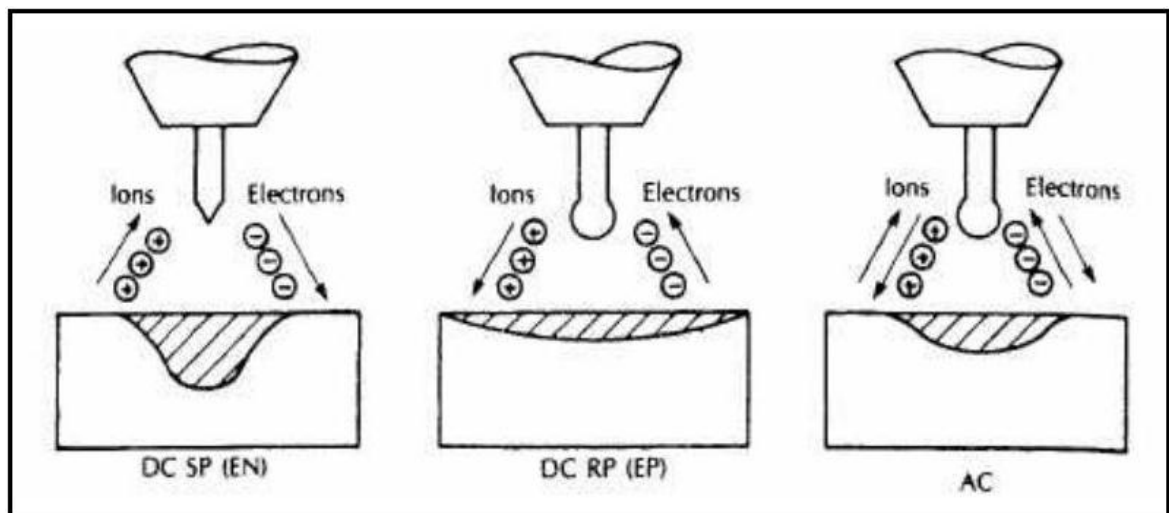


Figure 1.11. Comparaison des régimes de courant dans le soudage [11].

- Courant continu avec électrode négative (DCEN) : les électrons sont émis depuis l'électrode vers la pièce, ce qui concentre l'énergie sur la surface du matériau à souder. Ce mode de fonctionnement assure une pénétration importante et un arc stable. Il est principalement utilisé pour les aciers, le cuivre et les alliages de nickel.

- Courant continu avec électrode positive (DCEP) : l'énergie est concentrée sur l'électrode, nécessitant un refroidissement accru. Ce mode permet un nettoyage électrochimique de la surface, utile pour les métaux oxydables comme l'aluminium, mais limite la pénétration.

- Courant alternatif (AC) : utilisé pour le soudage de l'aluminium et du magnésium, ce mode alterne les effets du courant direct négatif (pénétration) et positif (nettoyage de l'oxyde), offrant un bon compromis.

- Courant pulsé : il alterne entre des niveaux d'intensité faible (périodes froides) et élevée (périodes chaudes), permettant un meilleur contrôle de la température, une limitation des déformations et une réduction de la zone affectée thermiquement.

b) Intensité et vitesse de soudage

L'intensité du courant influence la profondeur de pénétration et la largeur du bain de fusion. Une intensité trop élevée augmente le risque de déformation et de porosités, tandis qu'une intensité trop faible peut engendrer une soudure incomplète.

La vitesse de soudage doit être adaptée pour garantir un apport thermique équilibré. Un déplacement trop rapide réduit la fusion, alors qu'un mouvement trop lent accroît le volume de métal fondu, affectant la géométrie du cordon et la microstructure.

Un compromis optimal entre intensité et vitesse est indispensable pour garantir la qualité du joint et limiter la taille des grains dans la zone fondue.

c) Nature de l'électrode

Les électrodes utilisées dans le procédé TIG sont constituées de tungstène pur ou dopé avec des oxydes (thorium, lanthane, cérium). Le choix du type d'électrode dépend du matériau à souder et du type de courant utilisé :

- les électrodes pures sont adaptées au courant alternatif ;
- les électrodes dopées sont privilégiées en courant continu pour leur longévité et leur stabilité d'arc.

La préparation de l'extrémité (forme pointue ou sphérique) influe sur la focalisation de l'arc et la précision du cordon.

d) Gaz de protection

Le gaz de protection est essentiel pour éviter l'oxydation et stabiliser l'arc. L'argon, largement utilisé pour son faible coût et son efficacité, offre un amorçage facile et une bonne stabilité de l'arc.

Tableau1.1. Utilisation des gaz inertes selon les applications en soudage TIG [11].

Gaz	Qualité du gaz	Applications en soudage
Argon	Inerte	Toutes applications
Hélium	Inerte	Aluminium et cuivre
Argon-hélium (20 %-80 % ou 50 %-50 %)	Inerte	Aluminium et cuivre, avec arc plus stable que cas précédent
Argon-azote (75 %-25 %)	Réducteur	Cuivre essentiellement
Argon-hydrogène (1 %)	Réducteur	Acier inoxydable

L'hélium permet une meilleure pénétration et une température de flamme plus élevée, mais est plus onéreux. Des mélanges d'argon et d'hélium peuvent être employés pour bénéficier des avantages des deux gaz.

Pour les aciers inoxydables, le gaz protecteur contribue également à éviter la formation d'oxydes et de carbures en surface. [11].

Bibliographie

- [1] E. L. Guen, R. Fabbro, M. Carin, Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique, 2010, Université de Bretagne Sud ; thèse ; Paris page 18.
 - [2] Régis BLONDEAU. Métallurgie et mécanique du soudage. Edition LAVOISIER, PARIS. p23.
 - [3] C. Srikunwong ; Y. Bienvenu ; Modélisation du procédé de soudage par points ; Le 14 octobre 2005 ; Mines Paris Tech – Université ; Thèse ; Paris, p8.
 - [4] S. Elias ; Machine de soudage à la molette pour les gaines circulaires ;2012 ; Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université Libanaise ; Projet de fin d'étude ;p28,29.
 - [5] R. BLONDEAU. Métallurgie et mécanique du soudage. Edition LAVOISIER,PARIS. p45.
 - [6] G. MURRY, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux, Techniques de l'Ingénieur, centre français d'exploitation ; article ;page 5- 6.
 - [7] Principaux procédés du soudage, 2017.description, démarche d'évaluation et prévention des risques.<https://www.slideshare.net/>.
 - [8] S. BENSAAADA ;Fonderie et soudage, les principes de bases de fonderie et du soudage ; Editions Universitaires Européennes p71.
 - [9] R. CAZES. Soudage par faisceaux à haute énergie : faisceau d'électrons Et laser'' techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage. Article.
 - [10] R. CAZES ; Soudage à l'arc ; Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique ; article ; pages 7-14-16-17.
 - [11] B. MAALEM ; O. ASSALA ; Résistance à la corrosion des joints soudés par le procédé TIG, d'un assemblage hétérogène 304L /A9étamé, dans NaCl 32g/l.2015, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA ; MEMOIRE ; Annaba ; p27- 4 -5-6-18-19.
-

Chapitre 2

Soudage des aciers inoxydables

Sommaire

Introduction	22
2.1. Types d'aciers inoxydables	22
2.1.1. Les aciers inoxydables martensitiques	22
2.1.2. Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation	23
2.1.3. Les aciers inoxydables ferritiques (série 400 ASTM)	23
2.1.4. Les aciers inoxydables austénitiques (série 300 ASTM)	23
2.1.5. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex)	24
2.1.6. Les aciers inoxydables 316, 316 L et A 790	27
2.2. Soudage des aciers inoxydables	27
2.2.1. Soudage des aciers inoxydables austénitiques	27
2.2.2. Soudage des aciers inoxydables ferritiques	28
2.2.3. Soudage des aciers inoxydables martensitiques	29
2.2.4. Soudage des aciers inoxydables duplex	30
Bibliographie	31

Introduction

Les aciers inoxydables sont des alliages métalliques réputés pour leur excellente résistance à la corrosion et leurs propriétés mécaniques avantageuses. Leur composition chimique repose essentiellement sur le fer, le carbone et un minimum de 10,5 % de chrome, élément fondamental à la formation d'un film passif protecteur. En fonction de leur microstructure, on distingue plusieurs grandes familles : austénitiques, ferritiques, martensitiques, duplex et durcissables par précipitation.

Chaque type présente des caractéristiques particulières qui les rendent adaptés à des environnements et à des applications spécifiques, notamment dans les secteurs de la chimie, de la pétrochimie, de l'agroalimentaire ou de l'aéronautique. Le choix d'un acier inoxydable dépend donc de critères tels que la résistance mécanique, la soudabilité ou la stabilité thermique [1].

2.1. Types d'aciers inoxydables

2.1.1. Les aciers inoxydables martensitiques

Ces aciers contiennent entre 12 et 18 % de chrome, avec une teneur en carbone relativement élevée pouvant atteindre 1,2 %. Leur structure martensitique leur confère une dureté et une résistance mécanique élevées, mais au prix d'une ductilité réduite. La résistance à la corrosion reste modérée. Ces matériaux sont magnétiques. Leur microstructure typique est constituée de lattes martensitiques [1].

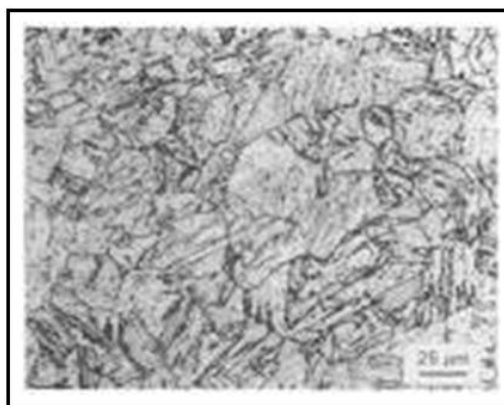


Figure 2.1. Microstructure caractéristique d'un acier inoxydable à structure martensitique [1].

2.1.2. Les aciers inoxydables à durcissement par précipitation

Ils contiennent généralement entre 15 et 17 % de chrome et sont souvent à matrice martensitique, parfois austénitique. Un traitement thermique induit la précipitation de composés (souvent à base de cuivre), ce qui améliore significativement leur résistance mécanique, notamment à la rupture [1].

2.1.3. Les aciers inoxydables ferritiques (série 400 ASTM)

Riches en chrome (11 à 30 %) et pauvres en carbone ($< 0,1$ %), les aciers ferritiques sont magnétiques et se caractérisent par une bonne conductivité thermique, une faible dilatation thermique, et une bonne tenue à la corrosion sous contrainte. Ils sont classés selon leur composition :

- Faiblement alliés : 11 à 14 % de chrome.
- Non stabilisés : 15 à 18 % de chrome.
- Stabilisés : 16 à 20 % de chrome, avec ajout de titane, niobium ou zirconium pour maîtriser la croissance des grains.
- Alliés au molybdène : 18 à 20 % de chrome, avec 1 à 2 % de Mo.
- Super-ferritiques : plus de 25 % de chrome, jusqu'à 4 % de nickel pour améliorer la ténacité.
- Réfractaires : adaptés aux hautes températures, avec ajouts de Nb et parfois Al [1].

2.1.4. Les aciers inoxydables austénitiques (série 300 ASTM)

Ces aciers contiennent en général 18 % de chrome et 8 à 10 % de nickel. Leur structure est entièrement austénitique à température ambiante, ce qui leur confère une excellente ductilité, une bonne résistance à la corrosion et une très bonne aptitude au formage. Ils ne sont pas magnétiques et conservent leurs propriétés mécaniques dans une large plage de températures [1].

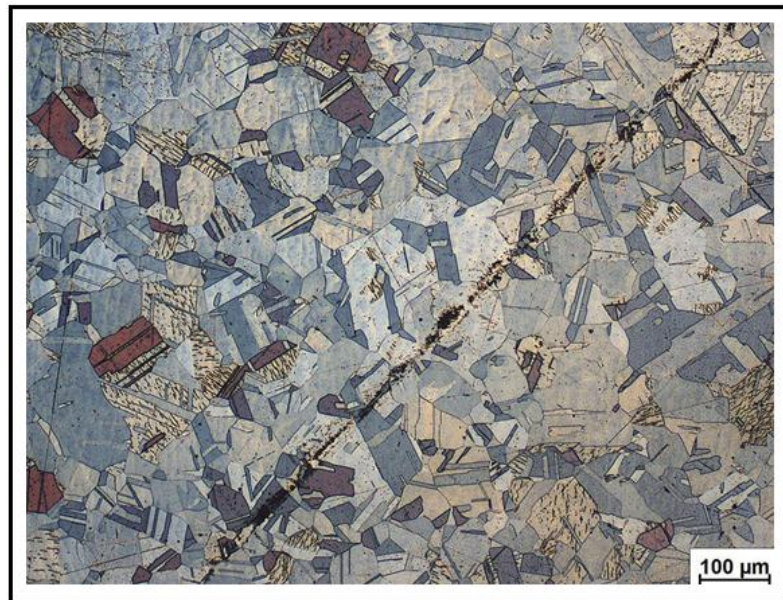


Figure 2.2. Aspect microstructural d'un acier inoxydable austénitique révélé par attaque Braha [2].

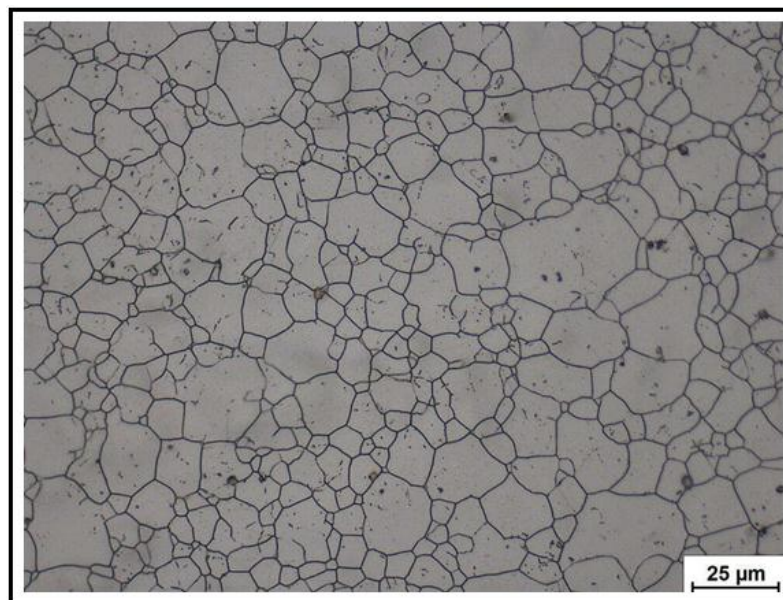


Figure 2.3. Microstructure d'un acier austénitique mise en évidence après attaque au Nital [2]

2.1.5. Les aciers inoxydables austéno-ferritiques (duplex)

Les aciers duplex possèdent une structure biphasée constituée d'austénite et de ferrite en proportions proches. Cette configuration leur confère une combinaison intéressante de résistance mécanique élevée et de bonne ductilité (jusqu'à 40 % d'allongement). Leur domaine d'utilisation est généralement limité à des températures inférieures à 300 °C. On

distingue :

- Duplex standards : 20–23 % Cr, 1–4 % Ni, 0,12–0,3 % N.
- Duplex alliés : ~ 22 % Cr, ≥ 3 % Mo, 0,15–0,25 % N. La nuance 2205 est la plus représentative.
- Superduplex : ≥ 25 % Cr, 6–7 % Ni, 3,5–4 % Mo, 0,25–0,4 % N, parfois additionnés de cuivre ou tungstène [1].

La figure 2.4 présente la microstructure typique d'un acier inoxydable duplex. La microstructure est formée par des îlots d'austénite, allongés dans une matrice ferritique.

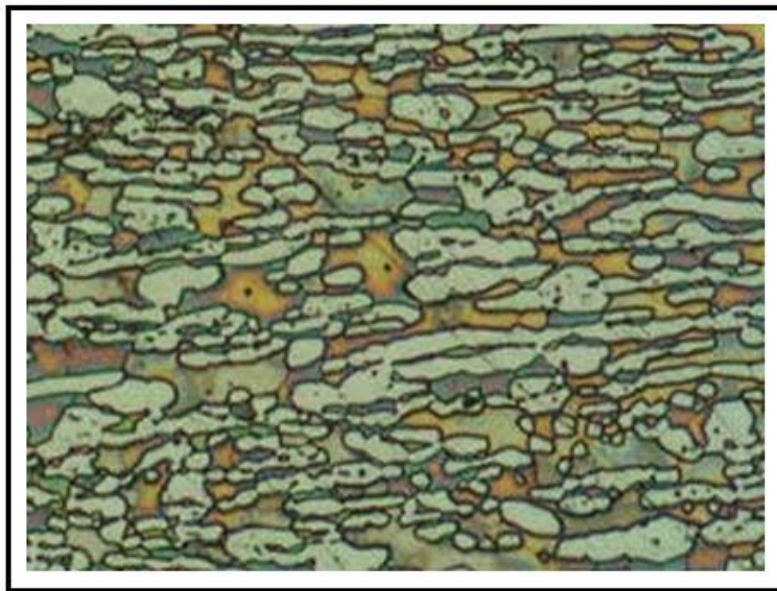


Figure 2.4. Observation métallographique typique d'un acier duplex UR45N montrant la coexistence ferrite-austénite [3].

La figure 2.5 montre un acier duplex a été attaqué par électrolyse avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 40 %, montrant de l'austénite marron et ferrite bleue.

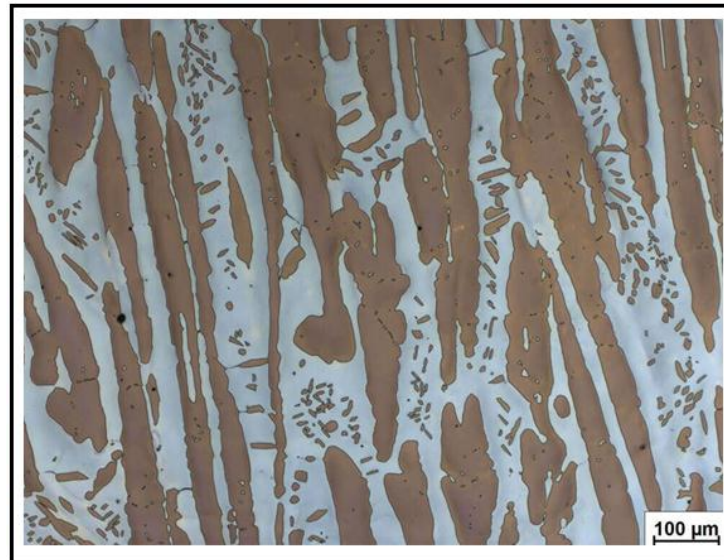


Figure 2.5. Structure biphasée d'un acier inoxydable duplex révélée par électrolyse à la soude caustique [2].

Belkessa et al. [4] ont étudié la microstructure d'un acier inoxydable duplex SAF 2205 (désignation UNS S31803), révélée par micrographie (voir Figure 2.6). Celle-ci met en évidence une structure en bandes composée de deux phases distinctes : la ferrite δ et l'austénite γ . Aucun précipité n'a été détecté dans cet état métallurgique. L'aspect allongé des grains de ces deux phases résulte des contraintes mécaniques imposées lors du laminage à chaud au cours de la fabrication de l'alliage.

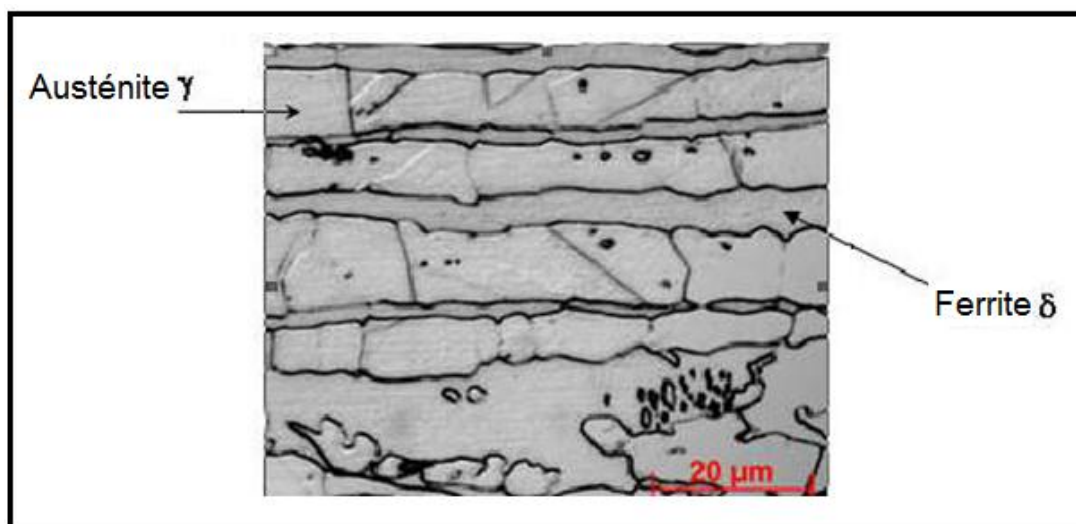


Figure 2.6. Micrographie d'un acier duplex SAF 2205 révélant l'alternance de bandes ferritiques et austénitiques [4].

2.1.6. Nuances spécifiques : 316, 316L et A790

- **L'acier inoxydable 316** : Acier austénitique contenant 16–18 % de Cr, 10–14 % de Ni et 2–3 % de Mo. Il est particulièrement utilisé en environnement agressif (chimie, marine).
- **L'acier inoxydable 316 L** : Variante à faible teneur en carbone, utilisée pour limiter le risque de sensibilisation à la corrosion intergranulaire.
- **L'acier inoxydable A790** : Acier duplex présentant une structure à deux phases, où la ferrite et l'austénite coexistent. Il offre une meilleure résistance à la corrosion que les nuances 304 et 316.

2.2. Soudage des aciers inoxydables

2.2.1. Soudage des aciers inoxydables austénitiques

Les aciers austénitiques se soudent aisément par les procédés TIG, MIG ou à l'électrode enrobée, à condition de respecter certaines règles fondamentales pour maintenir une bonne résistance à la corrosion du joint [5] :

- Choix du métal d'apport : Il doit présenter une composition chimique proche de celle du métal de base.
- Prévention de la contamination : Toute pollution des bords à souder peut compromettre la résistance à la corrosion.
- Absence de préchauffage ou post-chauffage : Ces traitements sont à éviter pour ne pas dégrader la soudure.

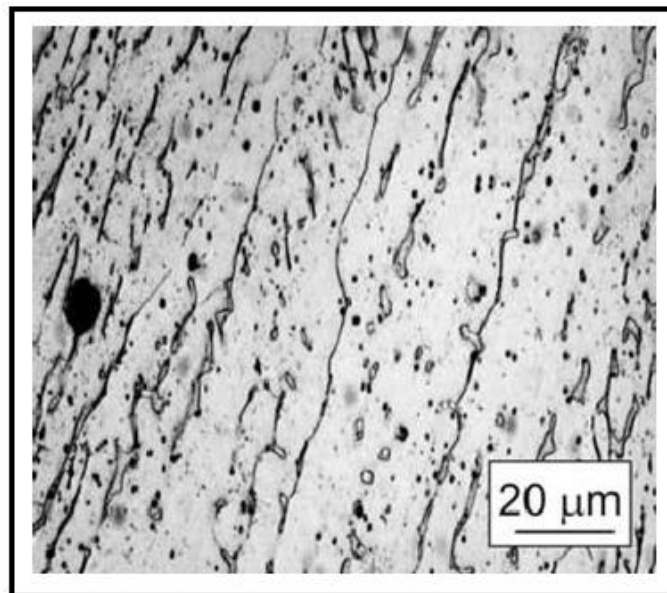


Figure 2.7. Zone fondue observée sur une soudure d'acier austénitique inoxydable [6].

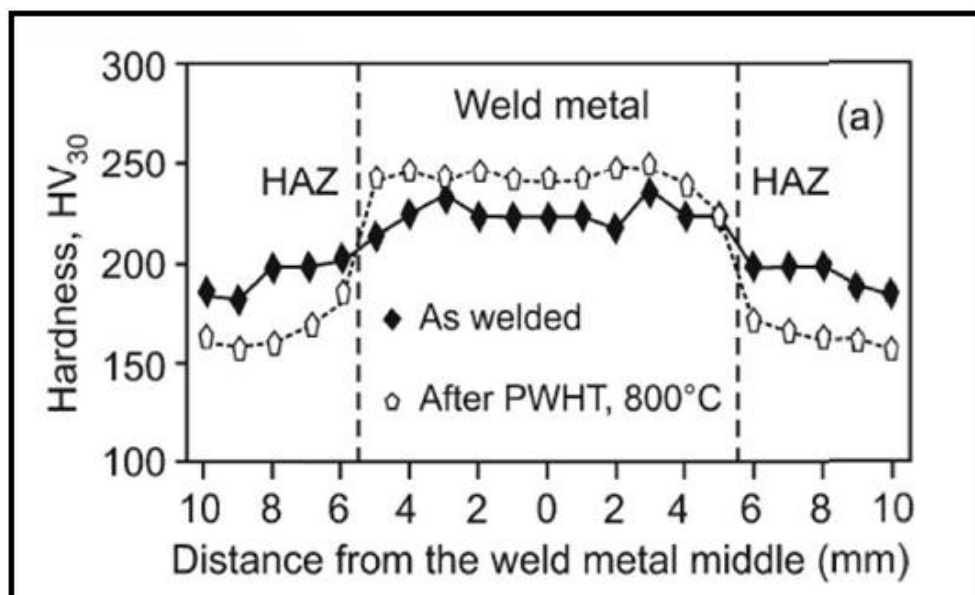


Figure 2.8. Courbes de dureté Vickers mesurées avant et après traitement thermique du joint soudé [6].

2.2.2. Soudage des aciers inoxydables ferritiques

La soudabilité dépend de la teneur en chrome :

- Aciers à 13 % Cr : bonne soudabilité, proche des aciers doux.
- Aciers à 16–30 % Cr : risque de grossissement granulaire dans la ZAT, préchauffage

à éviter, soudage en passes multiples avec électrodes fines recommandé.

En environnement réducteur ou sulfuré à haute température, on privilégiera une combinaison d'électrodes ferritiques et austénitiques selon les conditions de service [5].

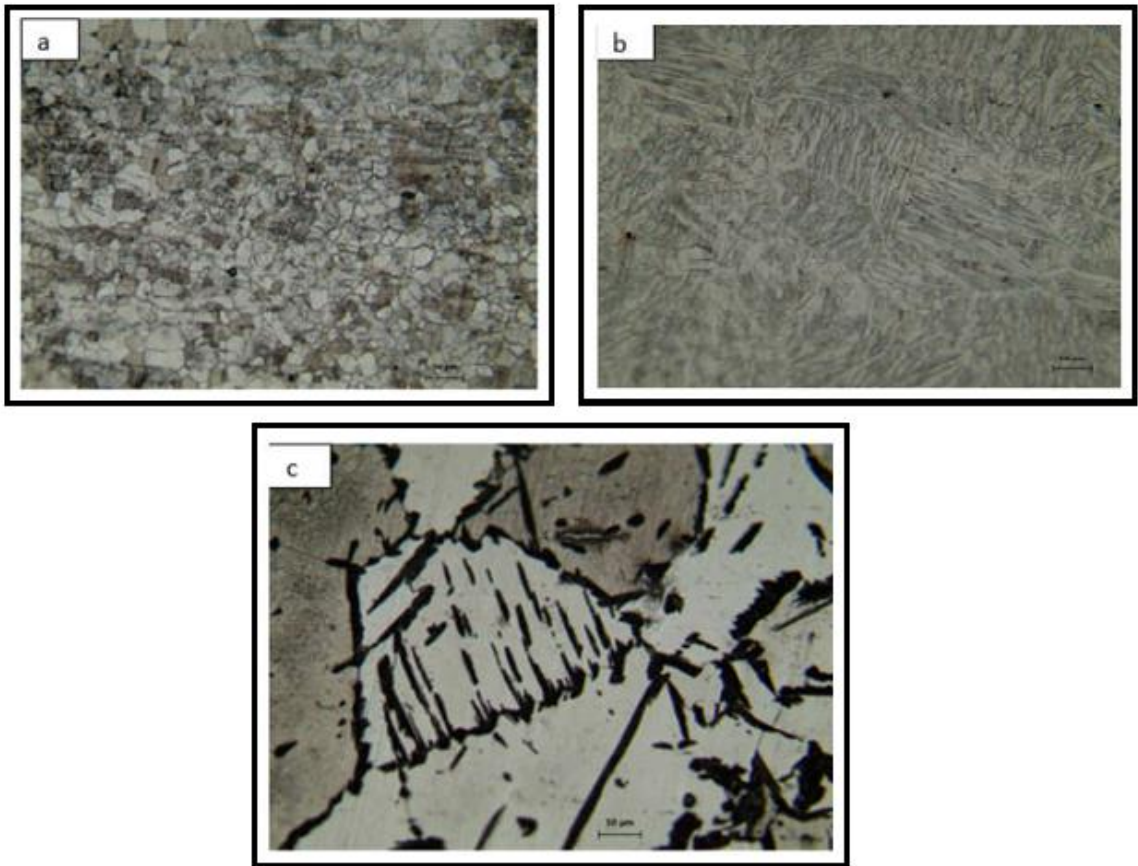


Figure 2.9. Examen métallographique d'un joint soudé en acier ferritique : (a) métal de base, (b) zone fondue, (c) Zone Affectée thermiquement. [7]

2.2.3. Soudage des aciers inoxydables martensitiques

Ces aciers sont sensibles aux transformations métallurgiques lors du soudage. Le risque de fissuration augmente avec la teneur en carbone :

- Préchauffage à 250–400 °C recommandé selon le taux de carbone.
- En l'absence de traitement thermique, utilisation d'électrodes Ni-Cr.
- Maintien de la température interpasses < 150 °C.
- Traitement de relaxation à 475–525 °C possible pour stabiliser la structure [5].

2.2.4. Soudage des aciers inoxydables duplex

La solidification se fait initialement en phase ferritique. L'austénite apparaît en phase solide lors du refroidissement. La ZAT comprend :

- Une zone surchauffée, pauvre en grains austénitiques.
- Une zone partiellement recuite avec des grains plus développés.

Le métal d'apport doit permettre de rétablir un bon équilibre ferrite/austénite, avec ajout de Ni ou N si nécessaire [3, 4].

La zone partiellement recuite (adjacente au métal de base), (figure 2.10.(c)) est caractérisée par une croissance remarquable de la taille des grains comparés au métal de base.

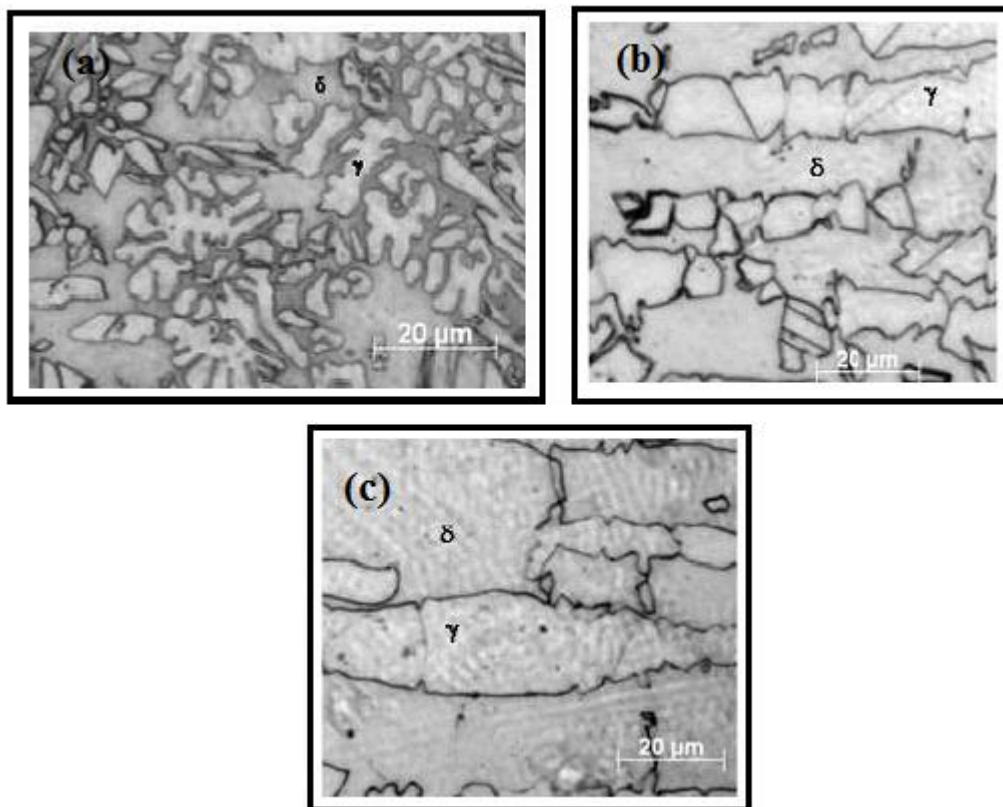


Figure 2.10. Structures observées dans un joint soudé en acier duplex : (a) zone fondue, (b) zone surchauffée, (c) zone partiellement recuite [4].

Bibliographie

- [1] Site Internet A3M (la fédération française des professionnels de l'extraction minière, de la métallurgie, de la sidérurgie et du recyclage des métaux). <https://www.a3ms.fr>
- [2] Site Internet Struers. <https://www.struers.com/fr/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#main>
- [3] R. Dakhlaoui, C. Brahamet A. Baczmański, MATERIAUX 2006. 13-17 Novembre 2006 – Dijon, France.
- [4] B. Belkessa, R. Badji, M. Bouabdallah, N. Ouali, Y. Yahmi, Comportement microstructural et mécanique d'une soudure en acier inoxydable duplex 2205 à haute température, Congrès Algérien de Mécanique, Biskra-Algérie, novembre 2009.
- [5] Cours de soudage, chaudronnerie et tuyauterie. <https://www.rocdacier.com/soudage-aciers-inoxydables-austenitiques/>
- [6] S. Kožuh, M. Gojić, L. Kosec, Mechanical properties and microstructure of austenitic stainless steel after welding and post-weld heat treatment, Kovove Mater. 47 2009 253–262.
- [7] S. Zaman, M. A. Khattak, M.N. Tamin, Effects of Welding on the Microstructural Properties of AISI430 Ferritic Stainless Steel, Journal of Advanced Research in Materials Science 44, Issue 1 (2018) 25-32.
-

Chapitre 3

Procédure expérimentale

Sommaire

Introduction	33
3.1. Matériau de base	33
3.1.1. Composition chimique	33
3.1.2. Propriétés métallurgiques des aciers inoxydables 304L et 430	34
3.2. Préparation des échantillons avant soudage	35
3.3. Paramètres de soudage	36
3.4. Essai de traction	37
3.5. Analyse microstructural	39
3.5.1. Préparation des échantillons	39
3.5.2. Observations microscopiques	41
3.6. Essais de microdureté	41

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les matériaux de base et les principales techniques de soudage utilisées. Par la suite nous allons présenter les techniques et les moyens employés pour caractériser et évaluer soudures réalisées dans ce travail.

3.1. Matériaux utilisés

Les matériaux de base utilisés dans cette étude sont deux aciers inoxydables couramment employés dans l'industrie : l'acier austénitique 304L et l'acier ferritique 430. Ces deux nuances ont été choisies pour réaliser trois types de joints soudés : 304L/304L, 430/430 et un joint hétérogène 304L/430. Le métal d'apport utilisé dans l'ensemble des soudures est un fil austénitique ER308L, sélectionné pour sa bonne compatibilité avec l'acier 304L et sa capacité à assurer une transition métallurgique acceptable avec l'acier 430.

3.1.1. Composition chimique

La composition chimique des matériaux de base (304L et 430) ainsi que du métal d'apport ER308L est présentée dans le tableau ci-dessous. Les teneurs sont exprimées en pourcentage massique (% poids).

Tableau 3.1. Compositions chimiques des aciers inoxydables 304L et 430 et ER308L

Élément	Acier 304L	Acier 430	ER308L
Carbone (C)	0,03	0,11	0.03
Chrome (Cr)	19,15	17.11	19.76
Nickel (Ni)	10,22	0,70	8.87
Manganèse (Mn)	1,80	0,81	0.92
Silicium (Si)	0,94	0,93	0.04
Phosphore (P)	0,04	0,03	0.02
Soufre (S)	0,02	0,02	-
Fer (Fe)	Balance	Balance	Balance

3.1.2. Propriétés métallurgiques des aciers inoxydables 304L et 430

a) Acier inoxydable 304L

- Structure métallurgique : Austénitique (obtenue par ajout de nickel).
- Magnétisme : Généralement non magnétique (peut devenir légèrement magnétique après une déformation à froid).
- Résistance à la corrosion :
 - Excellente résistance aux milieux acides, oxydants et chlorurés (grâce au chrome et au nickel).
 - Sensible à la corrosion intergranulaire si mal traité (mais faible teneur en carbone réduit ce risque).
- Traitement thermique:
 - Recuit : ~1050–1100°C (pour éliminer les contraintes et restaurer la résistance à la corrosion).
 - Ne peut pas être durci par traitement thermique (durcissement uniquement par écrouissage).
- Soudabilité : Excellente (faible teneur en carbone évite la précipitation de carbures de chrome).

b) Acier inoxydable 430

- Structure métallurgique : Ferritique (absence de nickel, haute teneur en chrome).
- Magnétisme : Magnétique (structure ferritique).
- Résistance à la corrosion :
 - Bonne résistance aux atmosphères humides et acides doux, mais inférieure à celle du 304L en milieux agressifs (moins de chrome et absence de nickel).
 - Sensible à la corrosion par piqûres en présence de chlorures.
- Traitement thermique :
 - Recuit : ~700–800°C (pour adoucir le matériau).
 - Ne peut pas être durci par traitement thermique (peut être légèrement durci par écrouissage).
- Soudabilité :
 - Médiocre (risque de grossissement de grain et fragilisation).
 - Recommandé pour des soudures courtes et peu profondes.

Tableau 3.2. Comparaison des propriétés métallurgiques

Propriété	304L	430
Structure	Austénitique	Ferritique
Magnétisme	Non magnétique (sauf écrouissage)	Magnétique
Durcissement	Par écrouissage uniquement	Par écrouissage uniquement
Corrosion	Excellente (milieux agressifs)	Bonne (milieux modérés)
Soudabilité	Excellente	Limitée

3.2.Préparation des échantillons avant soudage

Dans cette étape, nous avons utilisé les deux alliages mentionnés précédemment, à savoir l'acier inoxydable 304L et 430. Nous avons considéré les dimensions standards initiales comme 150*100*1.5 mm. En ce qui concerne les échantillons pour le soudage, un total de 6 pièces ont été préparées dans la configuration suivante :

- Assemblages homogènes : 304L/304L et 430/430
- Assemblage hétérogène : 304L/430

Les pièces ont été rigoureusement positionnées et fixées sur la table de travail à l'aide de sur-joints (attaches de bridage) afin de minimiser les déformations thermiques induites par le processus de soudage.

Le choix des couples matériaux permet d'examiner le comportement en soudage homogène (même famille métallurgique) et les enjeux du soudage hétérogène (soudage dissimilaire).

L'acier sur-jointage mécanique garantit le maintien géométrique pendant le soudage, réduit les contraintes résiduelles et permet une gestion précise des jeux d'assemblage.

3.3. Paramètres de soudage

Tableau 3.3. Paramètres de soudage

Paramètre	Valeur/Réglage	Remarques
Type de courant	DCEN (courant continu polarité négative)	Adapté à l'acier et à l'aluminium.
Intensité du courant (A)	30-40 A	36 A dans cette expérience
Gaz de protection	Argon (pureté $\geq 99,9\%$)	Empêche l'oxydation.
Débit de gaz (CFH)	10-15 pieds ³ /heure	Assure une couverture suffisante du bain de soudure.
Diamètre de l'électrode de tungstène	1,6 mm	Type violet (thorium 2%).
Angle de l'électrode	10-15 degrés	Pour un meilleur guidage de l'arc.
Diamètre du métal d'apport (mm)	1,5-2 mm type 308L	Compatible avec l'épaisseur du métal (1,5 mm)
Vitesse de soudage (cm/min)	5-10	Pour obtenir une soudure homogène.



Figure 3.1. Equipment de soudage.

Le soudage TIG (Tungstène Gaz Inerte) repose sur certains paramètres garantissant la qualité du joint soudé. Ces paramètres sont le courant électrique, le type de gaz, la pression d'écoulement et le réglage de l'électrode. Dans cette recherche, nous avons utilisé une

machine JACKLE WIG 165i fonctionnant en courant continu (CC) de 36 ampères, avec de l'argon comme gaz protecteur, une électrode en violet de tungstène (thorium) de 1,6 mm de diamètre et un métal Apport type 308L de 1,5 mm de diamètre.

3.4. Essai de traction

Les éprouvettes utilisées avaient des dimensions normalisées de 240 mm (longueur) × 20 mm (largeur) × 1,5 mm (épaisseur).

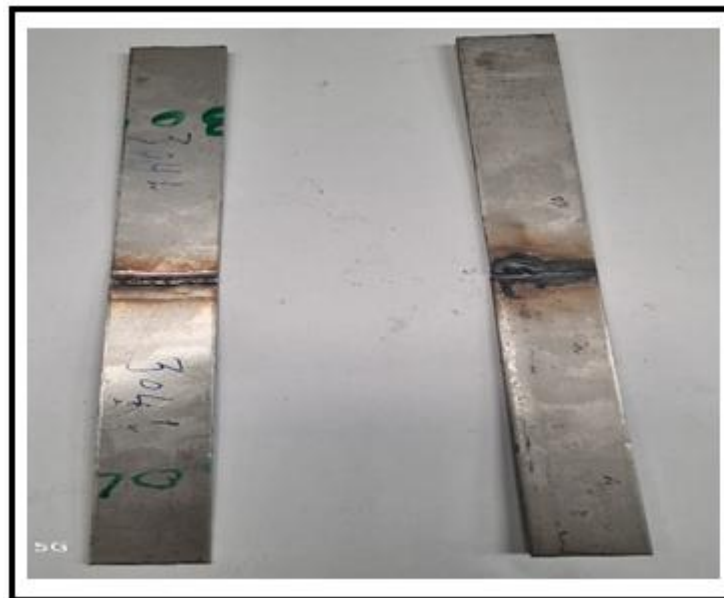


Figure 3.2. Éprouvettes de traction.

On a fait Trois configurations d'assemblage ont été étudiées :

- des joints homogènes 304L/304L,
- des joints homogènes 430/430,
- des joints hétérogènes 304L/430.

Chaque condition expérimentale a été répétée trois fois afin de valider la reproductibilité des mesures.

Tableau 3.4. Description de la machine de traction

Élément	description
Fabricant	Zwick/Roell
Fonction principale	Détermination des propriétés mécaniques des matériaux sous sollicitation de traction
Principaux composants	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre rigide (bâti principal) - Mors de serrage (mors supérieurs et inférieurs) - Cellule de charge - Système de mesure et acquisition des données - Logiciel d'analyse des résultats
Normes applicables	ISO, ASTM
Applications	<ul style="list-style-type: none"> - Études mécaniques des matériaux métalliques - Contrôle qualité - Études académiques et industrielles
Paramètres mesurés	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance à la traction (R_m) - Limite d'élasticité (R_e) - Allongement à la rupture ($A\%$) - Courbe contrainte-déformation (σ-ϵ)
Résultats typiques	<ul style="list-style-type: none"> - Diagramme contrainte-déformation - Valeurs numériques des propriétés mécaniques



Figure 3.3. Machine de traction.

3.5. Analyse microstructurale

3.5.1. Préparation des échantillons

Les échantillons pour l'étude microstructurale ont été découpés dans la tôle sous forme de rectangle. A cause des petites dimensions des échantillons tronçonnés, il est indispensable d'effectuer un enrobage à froid dans une résine thermodurcissable, et ce pour pouvoir maintenir les échantillons d'une façon correcte durant les opérations de polissage. La résine utilisée est une résine non transparente assez dure. Contenu : poudre (2vol), durcisseur liquide (1 vol), moule.

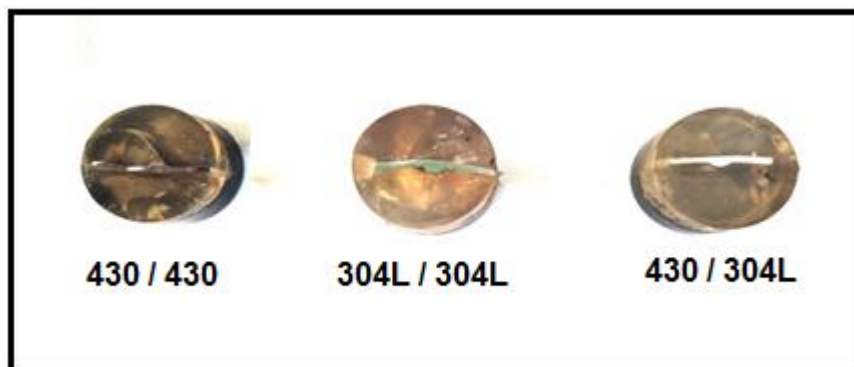


Figure 3.4. Présentation de l'enrobage.

Après enrobage, les échantillons sont ensuite abrasés sur une série de papier abrasif en carbure de silicium jusqu'à une granulométrie 3000, puis polis sur des tissus en feutre à la pâte diamantée.

Une polisseuse de type « SAPHIR » est utilisée pour la préparation finale des échantillons destinés à l'observation en microscopie optique.



Figure 3.5. Appareille de polissage.

Après polissage, les échantillons sont attaqués chimiquement pour révéler la morphologie des différentes phases présentes ainsi que les joints de grains. Le réactif utilisé dans ce travail est constitué d'une solution aqueuse de : 30% de HNO_3 , 40% de HCl et 30% de H_2O . La durée de l'attaque est de l'ordre de 30 secondes à une minute à la température ambiante.

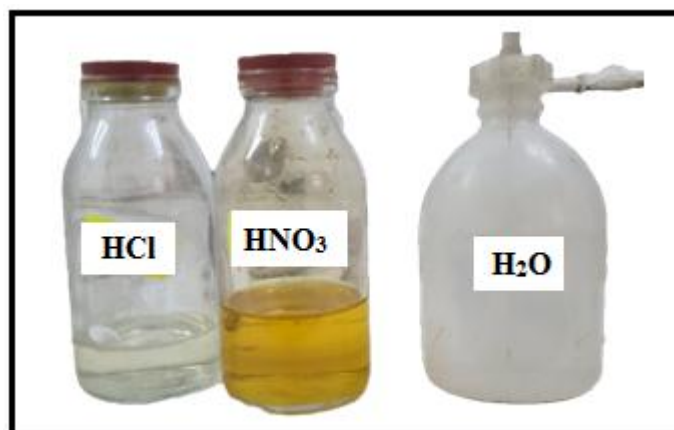


Figure 3.6. Réactif d'attaque chimique.

3.5.2. Observations microscopiques

L'appareillage utilisé est un microscope métallographique optique universel de type « Oxion » permet l'observation des échantillons avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000. Ce microscope s'accompagne d'une caméra, micro-ordinateur et d'une imprimante. L'avantage de la microscopie optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée.



Figure 3.7. Microscope métallographique optique.

3.6. Essais de microdureté

L'essai de microdureté Vickers consiste à mesurer la taille de l'empreinte réalisée sur le dépôt. Les mesures de la microdureté des dépôts ont été effectuées sur des surfaces ou des coupes polies.

Les indentations sous une charge de 20 grammes ont été faites grâce à un microduromètre de type « Qness » qui est équipé d'un pénétrateur diamant Vickers.

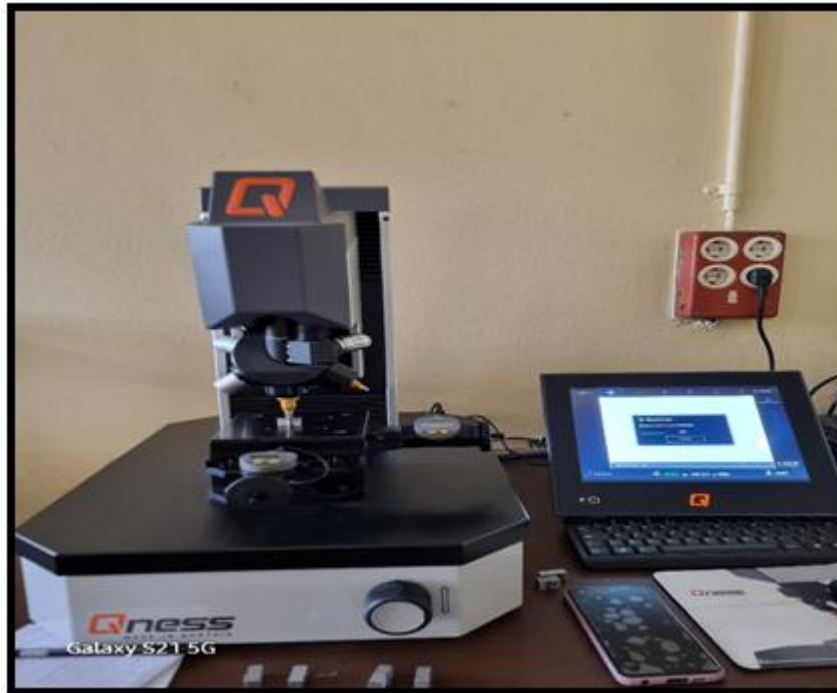


Figure 3.8. Microduromètre type Qness.

Chapitre 4

Résultats et Discussions

Sommaire

Introduction	44
4.1. Essai de traction	44
4.1.1. Essais de traction (Matériaux de base).....	44
4.1.2. Essais de traction (Échantillons soudés).....	45
4.2. Essai de dureté Vickers	48
4.2.1. Evolution de la dureté pour un soudage semblable	49
4.2.1.1. Acier 304L/304L.....	49
4.2.1.2. Acier 430/430	50
4.2.2. Evolution de la dureté pour un soudage non semblable	52
4.3. Observations microstructurales.....	53
4.3.1. Observations d'assemblage similaire 304L/304L.....	54
4.3.2. Observations d'assemblage similaire 403/430.....	56
4.3.3. Observations d'assemblage dissimilaire 403/430.....	58
4.3.4. Comparatif des microstructures des zones soudées.....	60

Introduction

Dans ce chapitre, on présente le résultat de l'étude microstructurale et mécanique des joints soudés à partir des aciers inoxydables similaires et dissimilaires. Nous avons choisi deux types d'aciers inoxydables, à savoir le 304L et le 430, qui sont deux métaux largement utilisés dans les constructions générales en raison de leur prix réduit par rapport aux autres types.

4.1. Essai de traction

4.1.1. Essais de traction (Matériaux de base)

Dans cette étape, nous avons effectué un essai de traction sur l'acier 304L et 430 non soudé.

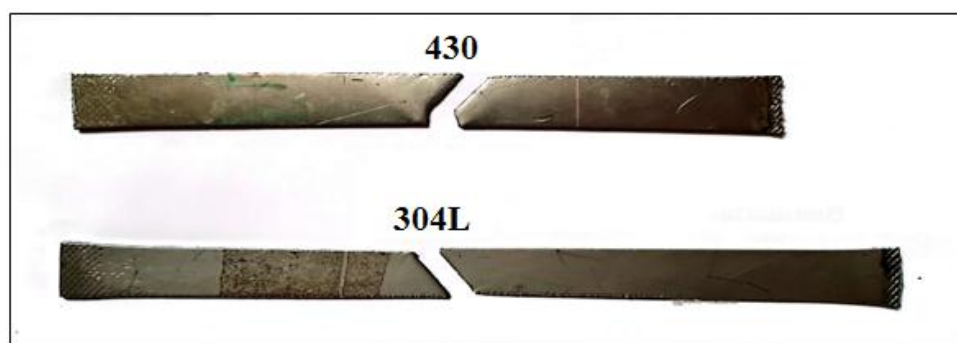


Figure 4.1. Présentation l'essai de traction vierge.

a) Acier 430

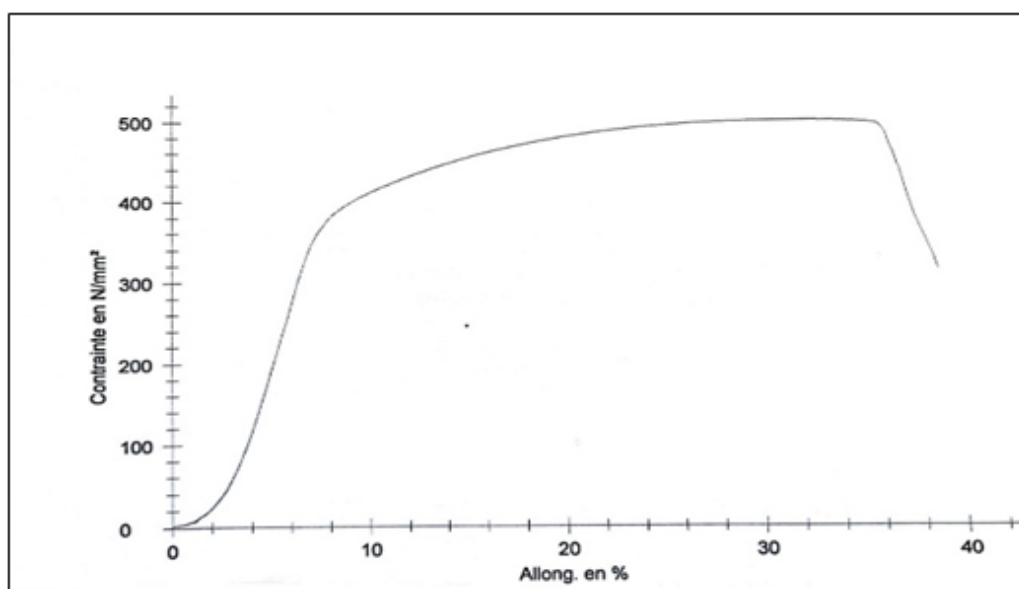


Figure 4.2. Courbe de traction pour l'acier 430.

b) Acier 304L

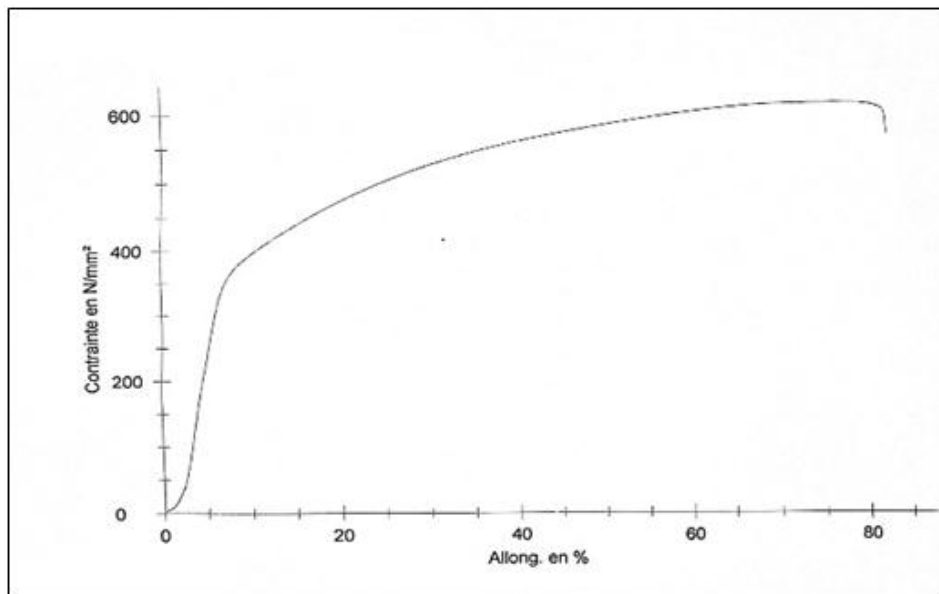


Figure 4.3. Courbe de traction pour l'acier 304L.

Tableau 4.1. Les résultats obtenus par l'essai de traction (Matériaux de base)

ESSAI	Caractéristiques mécaniques		
	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A%
Acier 430	380.23	502.01	39.19 %
Acier 304L	391.42	633.20	82.24 %

Les essais de traction réalisés sur les aciers de base ont permis d'évaluer leurs propriétés mécaniques avant soudage. Les résultats montrent que l'acier austénitique 304L présente une résistance à la traction plus élevée ($R_m = 633,20$ MPa) ainsi qu'une ductilité nettement supérieure ($A\% = 82,24$) par rapport à l'acier ferritique 430 ($R_m = 502,01$ MPa, $A\% = 39,19$). Cette différence de comportement est illustrée par l'allongement marqué observé sur l'éprouvette 304L après rupture, caractéristique des aciers austénitiques connus pour leur grande ténacité et leur excellente déformabilité.

4.1.2. Essais de traction (Échantillons soudés)

Dans cette étape, nous avons effectué un essai de traction d'un assemblage similaires et dissimilaires qui soudé par le procédé TIG avec métal d'apport 308L.

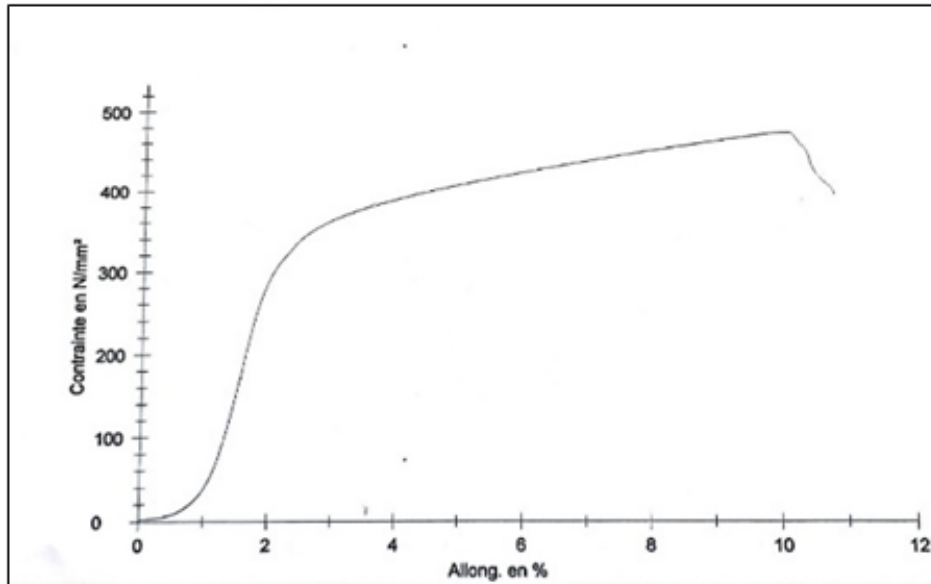


Figure 4.4. Courbe de traction pour l'échantillon 304L/304L.

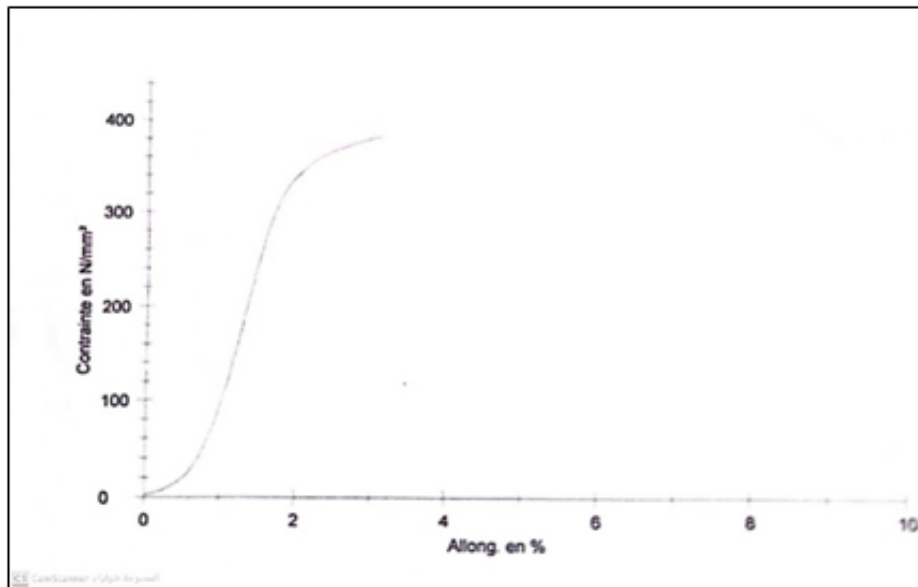


Figure 4.5. Courbe de traction pour l'échantillon 430/430.

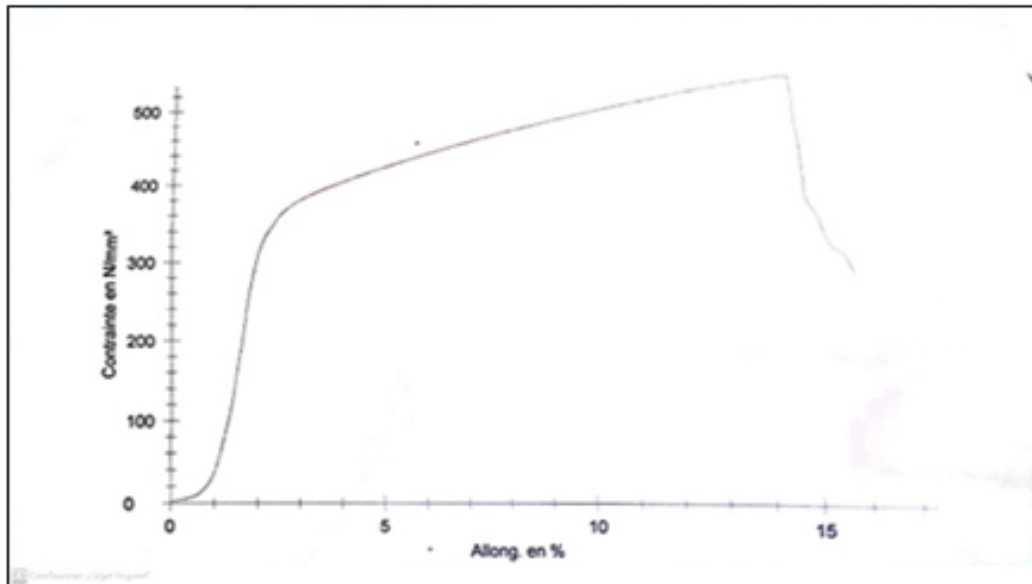


Figure 4.6. Courbe de traction pour l'échantillon 304L/430.

Tableau 4.2. Les résultats obtenus par l'essai de traction (Échantillons soudés)

ESSAI	Caractéristiques mécaniques		
	Re (N/mm ²)	Rm (N/mm ²)	A %
430/430	335.51	384.44	03.17 %
304L/304L	342.46	482.53	10.21 %
430/304L	362.73	557.12	15.14 %

Les résultats des essais de traction sur les joints soudés révèlent une baisse notable des propriétés mécaniques par rapport aux matériaux de base, en particulier en termes de résistance à la traction et d'allongement. Les soudures homogènes 430/430 et 304L/304L présentent respectivement des valeurs de résistance à la rupture (R_m) de 384,44 MPa et 482,53 MPa, avec des allongements très faibles, notamment 3,17 % pour le 430/430, ce qui indique une fragilité importante de la zone soudée. Dans les deux cas de soudures homogènes, la rupture est intervenue dans la zone fondue, ce qui suggère une influence défavorable du cycle thermique du soudage sur la microstructure locale (fragilisation etc.).

En revanche, la soudure hétérogène 430/304L a présenté la meilleure combinaison résistance-ductilité ($R_m = 557,12$ MPa, $A\% = 15,14$). Toutefois, la rupture a été localisée dans la ZAT du côté ferritique (430), ce qui montre que cette zone constitue le point faible

de l'assemblage, probablement en raison de transformations métallurgiques indésirables (précipitation, déséquilibre de phases) induites par le soudage.

Ces résultats confirment que la nature des matériaux de base et leur comportement thermique jouent un rôle déterminant dans la qualité mécanique de la soudure.

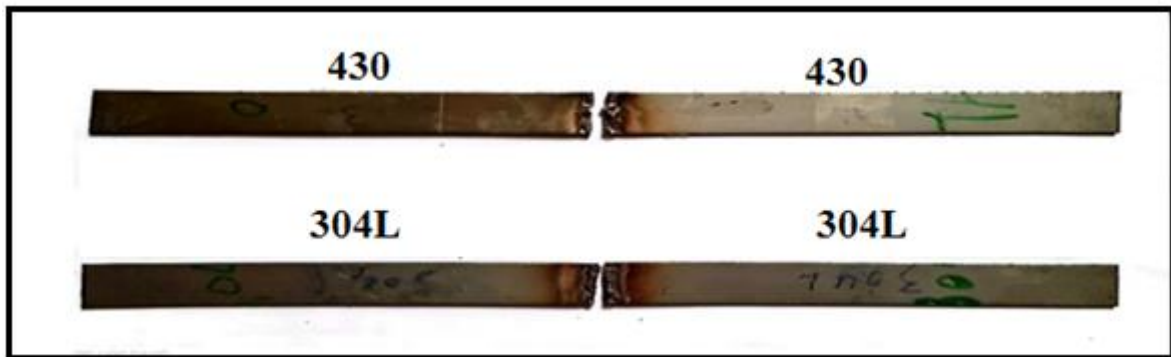


Figure 4.7. Présentation l'essai de traction similaire.



Figure 4.8. Présentation l'essai de traction dissimilaire.

4.2. Essai de dureté Vickers

Afin de bien expliquer l'effet de la soudure sur la dureté des différents types de soudage (semblable et non semblable), nous avons procédé à faire plusieurs indentations Vickers avec une charge constante de 5N avec un temps de maintien de 15 secondes. Cela nous a permis d'interpréter aussi le changement structural qui a eu lieu lors de ce soudage.

4.2.1. Evolution de la dureté pour un soudage semblable

4.2.1.1. Acier 304L/304L

Nous avons choisi l'emplacement des indentations comme détaillé sur la figure 4.9.

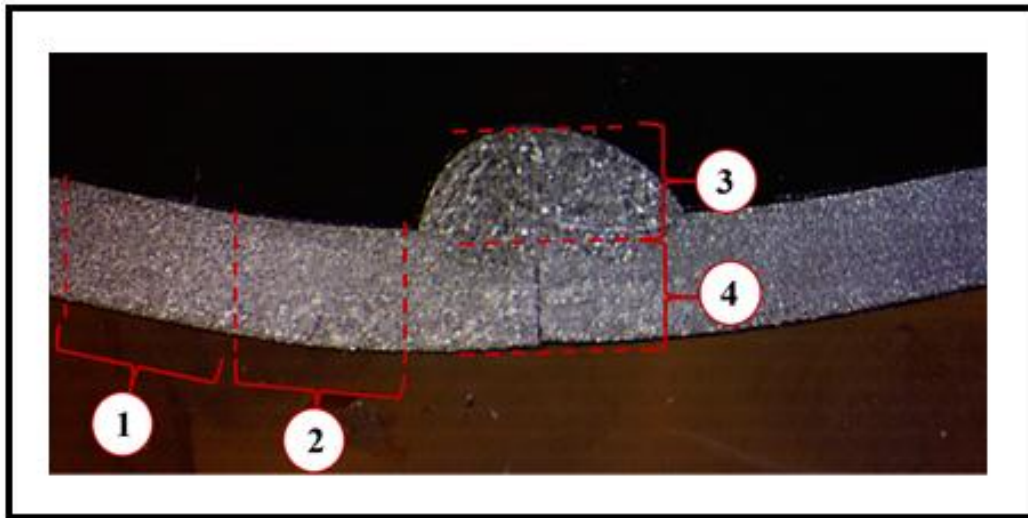


Figure 4.9. Photographie d'un soudage semblable 304L/304L.

- La zone n° 1 : présente le métal de base (MB).
- La zone n° 2 : présente la zone affectée thermiquement (ZAT).
- La zone n° 3 : présente le métal d'apport (MA).
- La zone n° 4 : présente la zone fondue (ZF).

L'évolution de la dureté Vickers depuis le métal de base (zone n°1) jusqu'à la zone fondue présente un profil décroissant (fig.4.10). Nous avons enregistré une dureté de 259 HV pour le métal de base 304L (austénitique), caractérisé par une structure métallographique fine. La dureté de la zone Affectée Thermiquement (ZAT) s'établit à 222 HV, tandis qu'elle ne dépasse pas 147 HV au niveau de la zone fondue.

Etant donné que le soudage est semblable (symétrique) nous opté pour l'enregistrement des valeurs d'un seul côté c'est-à-dire allant du métal de base jusqu'au centre de la soudure uniquement.

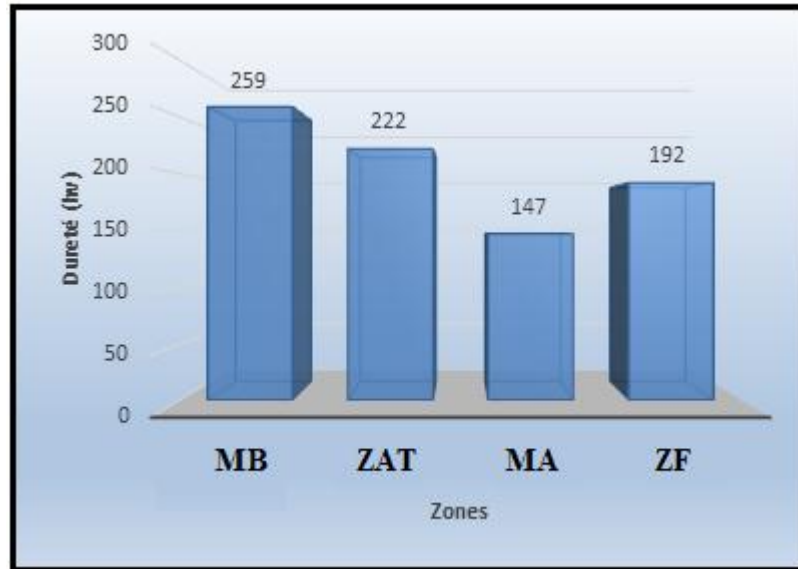


Figure 4.10. Valeurs de dureté Vickers des différentes zones pour l'acier 304L/304L.

4.2.1.2. Acier 430/430

De manière similaire au premier cas (acier 304L/304L), les quatre zones clés sont identifiées clairement à savoir : le métal de base, la zone affectée thermiquement, la zone fondue et finalement la zone du métal d'apport, elles sont numérotées 1, 2, 3 et 4 respectivement (fig4.11).

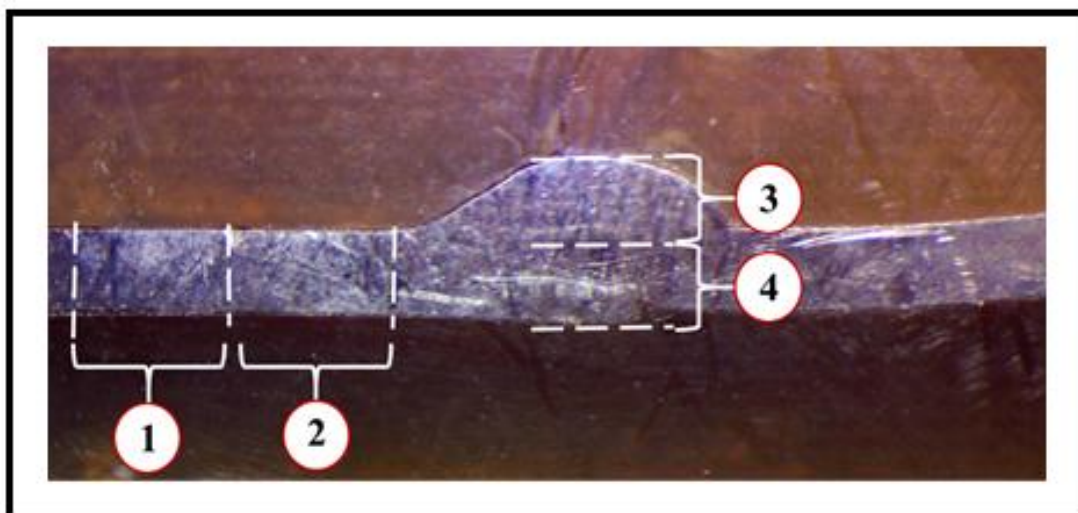


Figure 4.11. Photographie des différentes zones d'un Acier 430/430.

La figure 4.12 illustre l'évolution de la dureté Vickers des zones clés issues du soudage semblable 430/430 qui est un acier inoxydable ferritique, On remarque que par rapport à la zone du métal de base (188 Hv), la dureté de la zone affectée thermiquement (ZAT) présente une augmentation significative de l'ordre de 226 Hv, cela peut s'expliquer par sa fragilisation contrairement aux acier austénitiques. Cette dernière est induite par la précipitation de la phase alpha prime (α') ce qui entraine une hausse de la dureté et une sévère fragilisation. Pour la zone fondue nous constatons une légère augmentation de la dureté (194 Hv) par rapport à la zone du métal de base cela est due à la formation de la martensite et la précipitation des carbures ainsi que l'hétérogénéité de dureté de cette zone. Concernant la zone du métal d'apport nous avons enregistré une dureté de (198 Hv) cela revient à la présence du niobium qui affine la structure et bloque la croissance des grains.

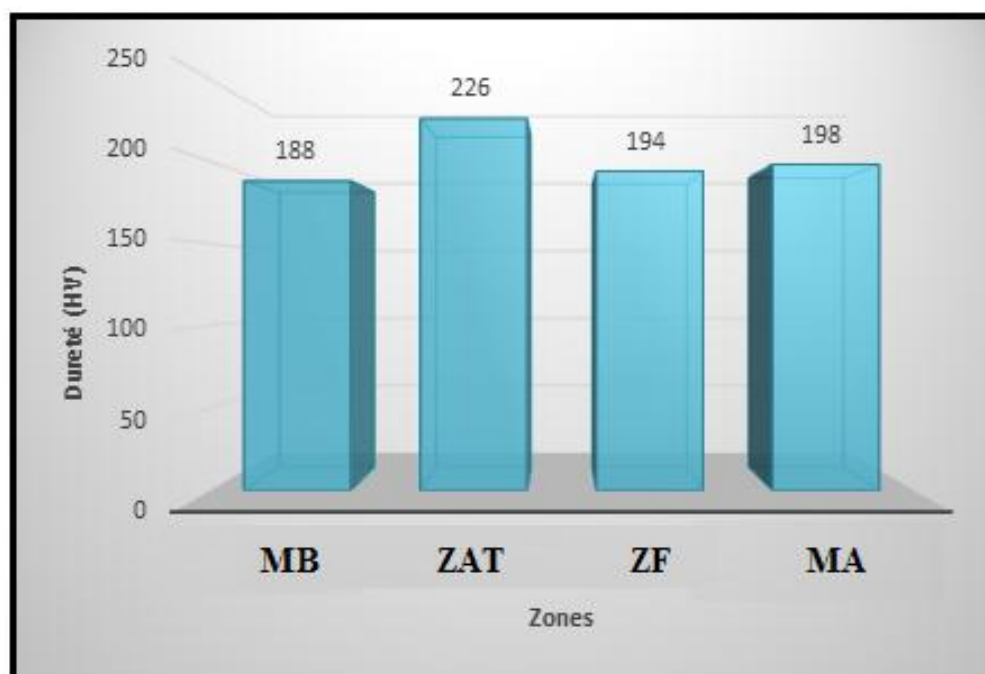


Figure 4.12. Valeurs de dureté Vickers des différentes zones pour un acier 430/430.

4.2.2. Evolution de la dureté pour un soudage non semblable

Pour le deuxième cas du soudage dissimilaire des aciers inoxydables ferritique 430 et austénitique 304L, On distingue six principales zones distinctes (fig.4.13) où la dureté est susceptible d'être altérée par le processus de soudage.

Dont :

- La zone n° 1 : métal de base 304L.
- La zone n° 2 : zone affectée thermiquement ZAT 304L.
- La zone n° 3 : (3a) zone fondue métal d'apport, (3b) zone fondue métal de base 304L.
- La zone n° 4 : (4a) zone fondue métal d'apport, (4b) zone fondue métal de base 430.
- La zone n° 5 : zone affectée thermiquement ZAT 430.
- La zone n° 6 : métal de base 430.

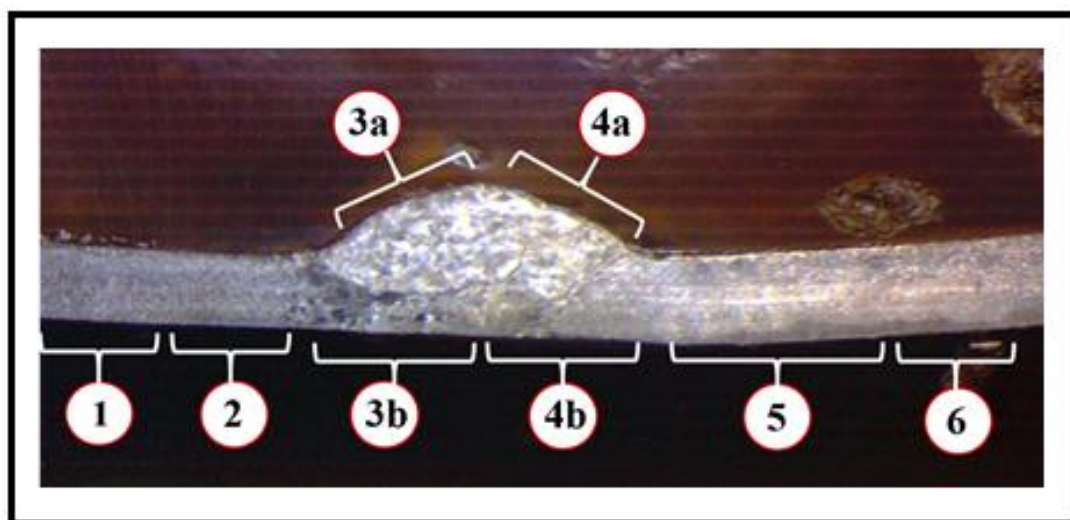


Figure 4.13. Photographie des différentes zones susceptibles affectées par le soudage dissimilaire.

L'augmentation notable de la dureté dans les zones de soudure dissimilaire 304L/430 (Figure 4.14) est due à des interactions complexes :

Dans la zone fondue et la zone affectée thermiquement adjacente au côté 304L, l'augmentation de la dureté résulte principalement de la formation de martensite, conséquence du mélange entre les compositions chimiques du 304L et du 430, rendant le

solidifié austénitique instable lors du refroidissement à l'air. Dans la zone affectée thermiquement du côté 430, l'augmentation de la dureté est principalement due à la précipitation de la phase alpha prime (α') ou des carbures, ce qui entraîne une fragilisation. Cette divergence dans les causes du durcissement explique les propriétés mécaniques globales du joint dissimilaire.

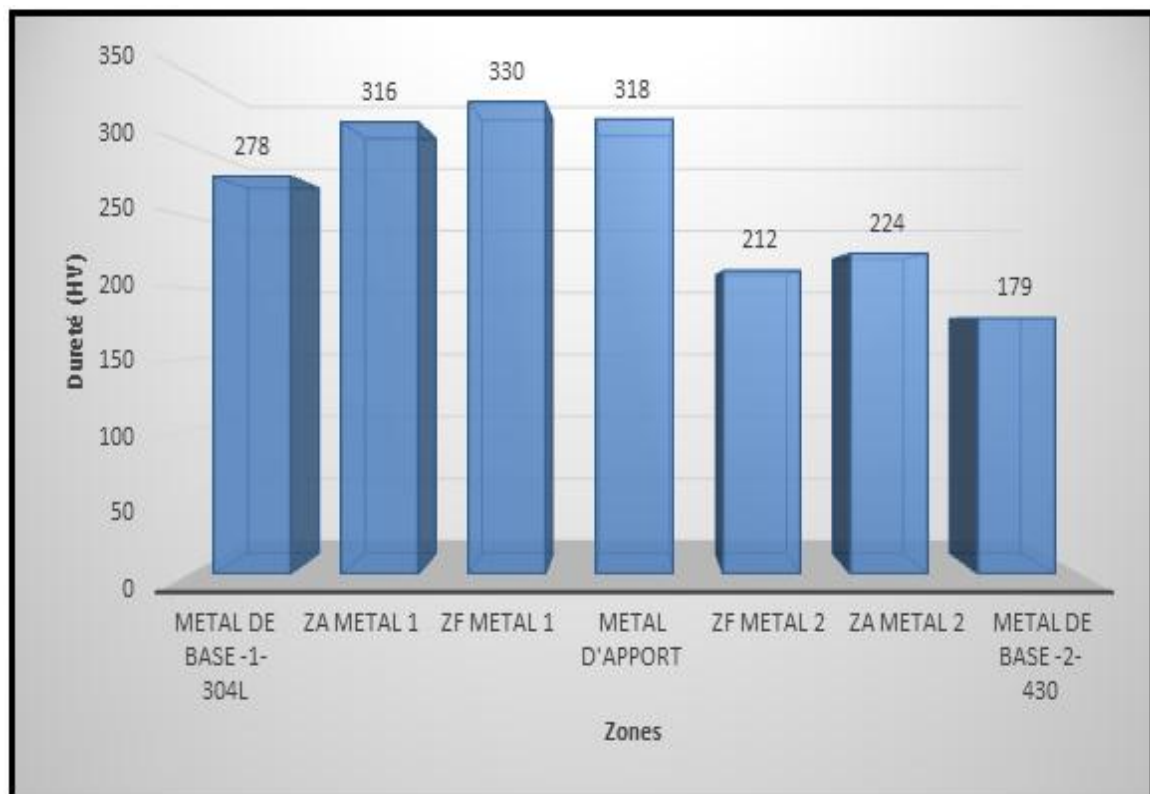


Figure 4.14. Valeurs de dureté Vickers des différentes zones pour le soudage dissimilaire 304L/430.

4.3. Observations microstructurales

C'est une étape cruciale dans le mémoire, car elle constitue le pont entre le processus de soudage et les propriétés mécaniques que nous avons analysées.

Dans notre étude, nous nous baserons toujours sur l'observation des trois types de soudures que nous avons précédemment proposés. Nous efforcerons d'aborder l'influence de la chaleur de soudage et du type de joint sur la microstructure du métal.

Nous avons cherché à réaliser une observation micrographique pour chacun des trois cas, en passant successivement par la zone du métal de base, puis en allant vers la zone affectée thermiquement, et enfin en examinant la zone de fusion.

4.3.1. Observations d'assemblage similaire 304L/304L

a) métal de basse 304L



Figure 4.15. Microstructure de l'acier inoxydable 304L.

La micrographie présente une microstructure austénitique typique de l'acier inoxydable 304L avec des grains équiaxes et la présence évidente de macles de recristallisation. Cette microstructure fine et uniforme explique les propriétés mécaniques élevées du métal de base, à savoir une bonne ductilité (82,01 % d'allongement à la rupture), une bonne résistance à la traction (633,20 N/mm²) et une dureté (259 HV).

b) Zone affectée thermiquement 304L

La Zone Affectée Thermiquement (ZAT) de l'acier 304L présente une microstructure austénitique largement conservée avec des modifications mineures induites par le chauffage. Cela a conduit à une réduction minimale de la dureté à 222 HV, par rapport au métal de base (259 HV). Cette microstructure conserve une bonne ductilité, bien qu'elle puisse être soumise à des effets à long terme sur la résistance à la corrosion si le processus de soudage n'est pas contrôlé avec précision.



Figure 4.16. Microstructure de la zone affectée thermiquement 304L.

c) La zone fondue



Figure 4.17. Microstructure de la zone fondue.

Les images de la zone fondue (zone fondue 1. et zone fondue 2.) révèlent une microstructure de cristallisation colonnaire ou dendritique typique du métal en fusion solidifié. Cette structure grossière conduit à une diminution significative de la dureté, enregistrant 147HV, ce qui représente la valeur la plus basse dans le soudage homogène 304L/304L. Cette dégradation microstructurale explique la baisse considérable de la résistance à la traction (457,83 N/mm²) et de la ductilité (10,94%) de l'assemblage soudé dans son ensemble par rapport au métal de base. Par conséquent, la zone fondue constitue le maillon faible du joint soudé.

4.3.2. Observations d'assemblage similaire 430/430

a) métal de base 430



Figure 4.18. Microstructure de l'acier 430.

La microstructure dévoilée par l'image est caractéristique de celle de l'acier 430 et se distingue par des grains polygonaux sans macles de recuit observables. La dureté de cette zone est de 188 HV. Il en est la cause de ses duretés plus faibles ainsi que de sa ductilité et résistance à la traction réduites (3,21% d'allongement et 380,59 N/mm² de résistance à la traction) en comparaison avec l'acier austénitique 304L. C'est les caractéristiques de sa structure initiale, de base du métal avant soudage.

b) la zone affectée thermiquement de 430



Figure 4.19. Microstructure de la zone affectée thermiquement 430.

L'image révèle la Zone Affectée Thermiquement de l'acier 430, où l'on observe un grossissement significatif des grains ferritiques et l'apparition de phases dures telles que l'alpha prime (α'). Ces modifications microstructurales ont entraîné une augmentation notable de la dureté, atteignant 226 HV, comparé au métal de base (188 HV). Cette forte augmentation de la dureté explique la fragilisation sévère de la zone, ce qui a un impact négatif sur la ductilité globale de la soudure (3,21% d'allongement à la rupture).

c) zone fondue de l'acier 430

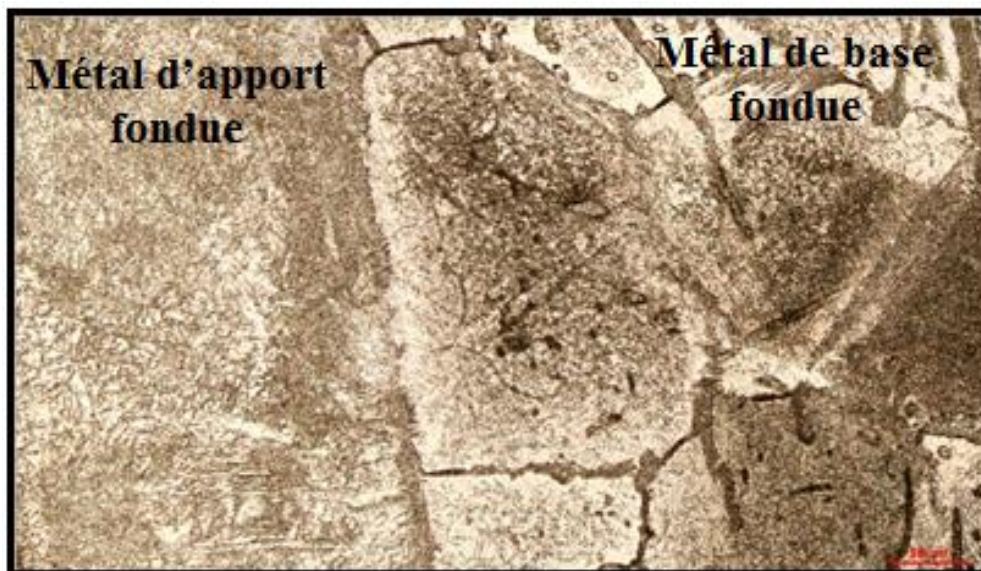


Figure 4.20. Microstructure zone fondue 430/430.

La figure 4.21 a fait apparaître la microstructure de la zone fondue, typiquement ayant une structure cristalline grossière susceptible de contenir des phases dures telles que la martensite et/ou des carbures. Ces transformations ont amené les qualités à un niveau légèrement supérieur, à 194 HV, par rapport au métal de base (188 HV). Bien que il y a eu une augmentation, cette microstructure a beaucoup contribué à la très faible ductilité de l'assemblage soudé global (3,21% d'allongement à la rupture).

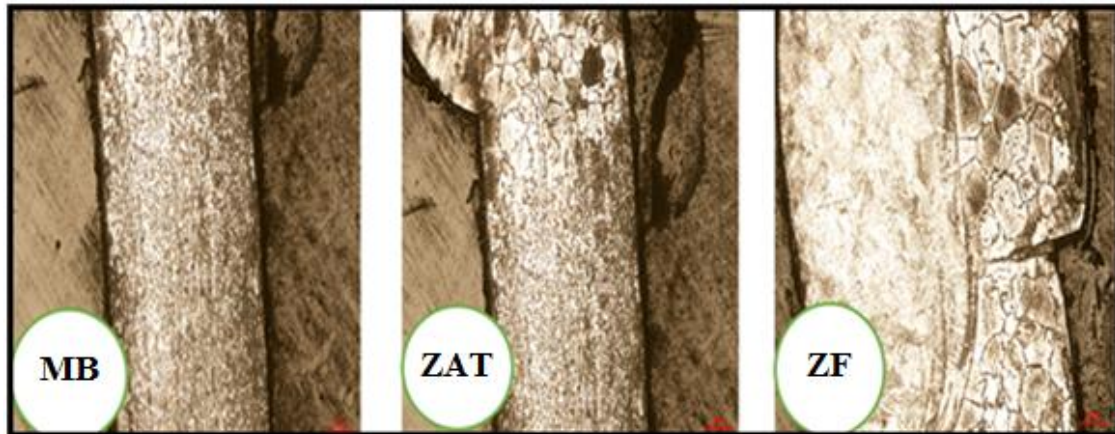


Figure 4.21. Changement structurale à l'effet de la soudure 430/430.

4.3.3. Observations d'assemblage dissimilaire 304L/430

Puisque nous avons déjà présenté les images des deux métaux de base, le 304L et le 430, ainsi que leur analyse lors des étapes précédentes, il n'est pas nécessaire de répéter ces deux éléments.

a) Zone affectée thermiquement 304L



Figure 4.22. Zone affectée thermiquement 304L.

La figure 4.22 montre la Zone Affectée Thermiquement de l'acier 304L, où l'on peut observer une structure austénitique de base avec des changements subtils résultant du cycle thermique de soudage. Malgré la valeur de valeurs de dureté élevées enregistrée (2316 HV) qui nécessite une vérification, cette zone conserve généralement une bonne ductilité mais peut être soumise à des prélèvements de carbures.

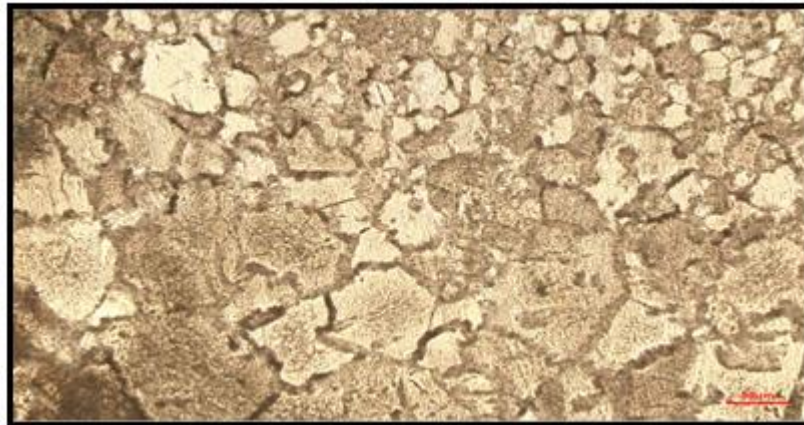
b) Zone affectée thermiquement 430

Figure 4.23. Zone affectée thermiquement 430.

La zone affectée thermiquement (ZAT) de l'acier 430 présente une fort grossissement des grains ferritiques et le développement de la phase alpha prime fragile (α'). Cette modification microstructurale entraîne une augmentation significative de la dureté (224-226 HV) et une fragilisation importante de la zone. Cette dernière est à l'origine de la très faible ductilité du joint soudé 430/430 lors des essais de traction, avec un allongement à la rupture de seulement 3,21 %. Cette zone est considérée comme le défaut critique le plus faible de la soudure.

c) La Zone Fondue (ZF)

La Zone Fondue présente une microstructure cristalline grossière, souvent colonnaire ou dendritique. La formation de martensite fragile est la caractéristique la plus notable, résultant du mélange des éléments des deux aciers (notamment la diffusion du carbone et du nickel du 304L), ce qui augmente la trempabilité. Ce changement microstructural explique la forte augmentation de la dureté (306-330 HV) comparée aux métaux de base, mais affecte négativement la ductilité et la ténacité de l'assemblage soudé.

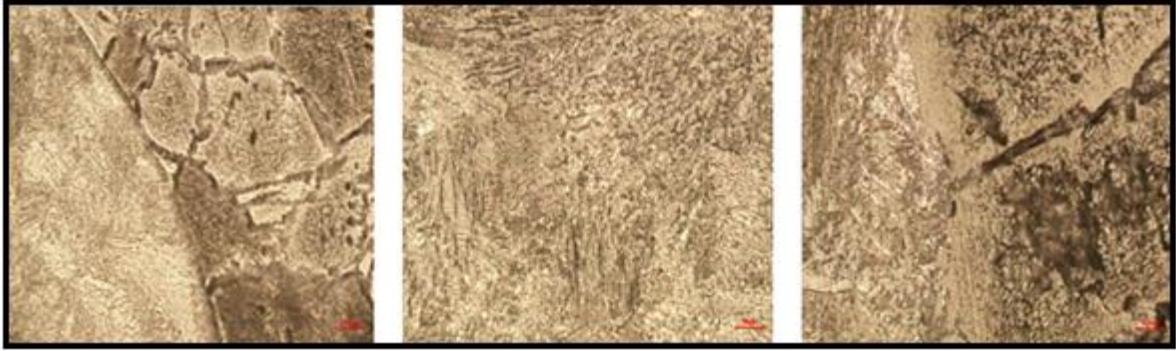


Figure 4.24. Présentation la zone fondue d'assemblage dissimilaire 304L/430.

4.3.4. Comparaison des microstructures des zones soudées

a) Métaux de Base

Acier 304L : Présente une microstructure austénitique distinctive, composée de grains polyédriques bien définis, clairement traversés par des lignes de macles droites et parallèles à l'intérieur des grains.

Acier 430 : Présente une microstructure ferritique, avec des grains polyédriques fins et homogènes, et ne montre pas de lignes de macles.

b) Soudage similaire 304L/304L

- Zone Affectée Thermiquement (ZAT 304L) : Maintient sa microstructure austénitique de base et ses lignes de macles, avec une possible légère croissance des grains.

- Zone Fondue (ZF 304L/304L) : Caractérisée par une microstructure cristalline colonnaire ou dendritique bien définie, reflétant la direction de solidification du bain fondu austénitique.

c) Soudage similaire 430/430

Zone Affectée Thermiquement (ZAT 430) : Montre une croissance importante et évidente des grains de ferrite, qui deviennent plus grands et plus grossiers. De très fines précipitations (phase alpha prime (α')) peuvent également apparaître à l'intérieur ou aux limites des grains.

Zone Fondue (ZF 430/430) : Caractérisée par une microstructure ferritique grossière, pouvant apparaître sous forme colonnaire ou dendritique. Elle peut contenir quelques fines structures aciculaires indiquant la formation de phases dures comme la martensite ou des carbures si du carbone est capté.

d) Soudage dissimilaire 304L/430

Zone Affectée Thermiquement (ZAT 304L) : Maintient sa microstructure austénitique, mais peut présenter de légères modifications des grains ou de potentielles précipitations de carbures aux limites des grains.

Zone Affectée Thermiquement (ZAT 430) : Montre une croissance importante des grains de ferrite, et une formation claire de phases fines et fragiles comme alpha prime (α'), apparaissant sous forme de précipitations à l'intérieur des grains.

Zone Fondue (ZF 304L/430) : Présente une microstructure complexe et mixte. Elle est caractérisée par une cristallisation colonnaire/dendritique, mais la caractéristique la plus notable est la présence de structures aciculaires/lamellaires distinctives de la martensite. La martensite se forme ici en raison du mélange des éléments de soudage, notamment la diffusion du carbone et du nickel du 304L vers le bain fondu riche en chrome, ce qui augmente sa trempabilité lors du refroidissement rapide. Il peut également y avoir de la ferrite ou de l'austénite résiduelle.

Cette comparaison illustre comment la nature du métal de base et les conditions de soudage influencent directement la microstructure formée dans chaque zone, ce qui se reflète par la suite sur ses propriétés mécaniques.

Conclusion

Ce travail de recherche a porté sur l'étude du soudage TIG d'aciers inoxydables ferritique (AISI 430) et austénitique (AISI 304L), en configurations homogènes (430/430 et 304L/304L) et hétérogènes (304L/430), en utilisant un métal d'apport austénitique de type ER308L. L'objectif principal était d'évaluer la compatibilité de ce fil d'apport avec les différentes combinaisons de matériaux étudiées et son influence sur le comportement mécanique et microstructural des assemblages soudés.

Les essais de traction ont permis de constater une réduction générale des performances mécaniques après soudage, notamment en ce qui concerne l'allongement à la rupture. L'acier 304L soudé avec lui-même a conservé des caractéristiques satisfaisantes, tandis que l'acier 430 a montré une baisse plus importante. La soudure hétérogène 430/304L a quant à elle présenté un bon compromis, illustrant l'intérêt de cette combinaison dans certaines applications industrielles.

Les mesures de dureté Vickers ont révélé des variations importantes entre les zones du joint soudé, confirmant l'influence des cycles thermiques sur les propriétés locales des matériaux. Enfin, les observations microstructurales ont permis d'identifier des différences notables de structure entre la zone fondue, la zone affectée thermiquement et les métaux de base.

En conclusion, le métal d'apport ER308L s'est révélé efficace pour le soudage homogène de l'acier 304L, mais son utilisation avec l'acier ferritique 430 ou en assemblage dissemblable nécessite une attention particulière au niveau des paramètres de soudage et des conditions

Conclusion

opérateurs. Des travaux complémentaires, comprenant l'optimisation des conditions de soudage ou l'étude d'autres types de métaux d'apport, pourraient permettre d'améliorer davantage la qualité et la fiabilité de ce type d'assemblage.