

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

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : FMP

Par :

ADALOU Gaya

BENHAMMOUCHE Mahdi

Thème

**Modes et paramètres de soudage des aciers
inoxydables**

Soutenu le 24 juin 2025 devant le jury composé de :

M. HADJOU M	Président
M. OURARI K	Rapporteur
M. SAHALI M.A	Examinateur

Année Universitaire 2024-2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur

**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche**

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : ADALOU

Prénom : GAYA

Matricule : 1818 330 128 55

Spécialité et/ou Option : FMP

Département: Génie mécanique

Faculté: Technologie

Année universitaire : 2024 / 2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé: Modèles et paramètres de soudage
des aciers inoxydables

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
08/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : Benhammache
Prénom : Mehfidi
Matricule : 191933712020
Spécialité et/ou Option : F. MP
Département : Génie mécanique
Faculté : Technologie
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) :

Intitulé: Modèles et paramètres de sondage des aciers inoxydables

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
28/07/2025

Signature de l'intéressé
(*) Lu et approuvé
Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Mr OURARI KAMEL notre directeur de mémoire, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail. Ses orientations ont été déterminantes pour la réalisation de ce projet.

Nous remercions également tous les enseignants qui nous ont accompagnés tout le long de notre parcours académique pour tous les efforts fournis de leurs parts.

Un grand merci à nos collèges amis et familles pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leurs disponibilités incessantes. Leur présence a été un moteur essentiel dans la poursuite de ce travail.

Enfin, nous souhaitons adresser une pensée à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce travail de loin ou de près, sans ceux ce mémoire n'aurait pu aboutir.

Ce travail est le fruit d'une collaboration et d'un engagement collectif, et nous mesurons la chance d'avoir pu compter sur des personnes aussi inspirantes.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A Mon Père et ma Mère

Sans eux je ne serais jamais arrivée à ce stade-là.

Pour leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse et leur présence dans les moments les plus difficiles.

Je prie le bon dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.

A mes très chers frères et sœurs, qui étaient à mes côtés depuis que j'ai vu lumière pour la première fois

A tous mes amis chacun à son nom.

GAYA

Je dédie ce mémoire à mes chers parents qui ont été toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance qu'ils trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consentis d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

MAHDI

Sommaire

Liste des figures.....	7
Liste des tableaux.....	9
Introduction Générale	11
Chapitre I Généralités sur les aciers et les aciers inoxydables	2
I.1.Les aciers.....	3
I .1.1. Introduction :.....	3
I.1.2. Historique sur les aciers :	3
I.1.3. Définition de l'acier :.....	3
I.1.4. Méthodes d'élaboration de L'acier :	3
I.1.5. Structure cristalline de l'acier :	4
I.1.6. Les domaines d'application :.....	5
I.1.7. Les éléments d'addition et leurs rôles	5
I.2.Les aciers inox.....	6
I.2.1. Historiques des aciers inox :.....	6
I.2.2. Définition inox :	8
I.3.Classification métallurgique.....	9
I.4 Classification des aciers inoxydables.....	14
Chapitre II Technologies de soudage.....	20
II.1Définition du soudage :.....	21
II.2. Terminologie de la soudure :	21
II.3.1. Les Phénomènes en Zone Fondue :	23
II.4. Procédés de soudage conventionnel	25
II.4.1. Soudage à l'électrode enrobée	25

Principe du soudage TIG :	28
II.4.2. Soudage TIG.	28
II.4.3. Procédé de soudure MIG/MAG	33
II.5. Procédés de soudage avancés	38
II.5.1. Soudage laser.....	38
II.5.2. Soudage par friction malaxage FSW (Friction StirWelding):.....	41
II.6. Les procédés hybrides	42
II.6.1. Le procédé de soudage hybride laser/MIG-MAG	42
II.6.2 Soudage a énergie réduite	44
II.7. Perspectives futures du soudage des inox.....	46
 Chapitre III Paramètres de soudage et contrôle qualité	48
 Généralités	49
 III.1.Role des paramètres électriques en soudage.....	49
III.1.1.Intensité du courant :	49
III.1.2Tension de l'Arc :	50
 III.2.Rôle du gaz de protection	51
 III.3. Contrôle qualité.....	53
III.3.1. Méthodes non destructives	53
 III .3.2. Les techniques de contrôle non destructif.....	55
 III .3.3. Essais destructifs :	62
III.3.3.4.Test de pliage guidé	64
 Chapitre IV Partie expérimentale	65
 Introduction.....	66
IV.1.1 Matériaux d'étude :	66
IV.1.2Analyse DRX :	66
IV.1.3. Détermination de la nuance :	67
IV.2.L'acier inoxydable 304 :.....	67
IV.2.1. Composition chimique :	67
IV.2.2. Propriétés générales :.....	68

IV.2.3. Applications industrielles :	68
IV.3. Operations de soudage	68
IV.3.1. Soudage par électrode enrobée (MMA) :	69
IV.3.2. Soudage en TIG(1) :	71
IV.3.3. Soudage en TIG(2) :	73
IV.5. Résultats et discussion:	78
Conclusion Générale	82
Références Bibliographiques	84
Webographie	86
Abstract.....	87

Liste des figures

Figure I.1 : Structure cristalline cubique centrée [2].....	4
Figure I.2 : Structure cristalline cubique à face centrée	5
Figure I.3 : ancienne usine métallurgique	8
Figure I.4. Diagramme binaire Fe-Cr. [6]	10
Figure I.5. Diagramme binaire Fe-Ni [6]	11
Figure I.6. Diagramme binaire Ni-Cr. [6]	12
Figure I.7. Sections des diagrammes ternaires Fe-Cr-Ni à 650°C (a) et (b) Mo-Cr-Ni à 1000°C[6].....	13
Figure I.8 : microstructure d'un acier inox ferritique.....	15
Figure I.9 : collecteur d'échappement d'un véhicule	15
Figure I.10 : structure microcristalline d'un acier inox martensitique.....	16
Figure I.11 : tuyauterie de canalisation	17
Figure I.12 : structure microcristalline d'un acier inox austénitiques.....	18
Figure I.13 : Tubes d'aération [4]	18
Figure I.14 : microstructure cristalline d'un acier inox duplex.....	19
Figure I.15 : canalisations en inox	19
Figure II.1 : illustration du joint d'une opération de soudure.[8].....	22
Figure II.2 : formation de bain de fusion lors d'un soudage à l'arc.[4]	23
Figure II.3: apparition de fissures dans la soudure après refroidissement.[4].....	24
Figure II.4 : dendrites de la zone fonduة après solidification .[6].....	25
Figure II.5 : soudage a l'électrode enrobée [8]	26
Figure II .6. Exemple d'une électrode enrobée [4].....	27
Figure II.7. Principe de soudage TIG[4]	29
Figure II.8 : Torche de soudage TIG[4]	30
Figure II.9 : angles des électrodes de soudures TIG[4].....	31
Figure II.10. tube inox soudé au TIG[4]	32
Figure II.11 : schéma installation MIG/MAG[4]	34
Figure II.12 : piece en inox soudee en MIG[4]	35
Figure II.13 : torche de soudage mig et ses composants[4]	36
Figure II.14 : vue schématique de l'interaction faisceau-matière pendant le soudage au laser[12]	38

Figure II.15: le soudage au laser par conduction[12]	39
Figure II.16 : le soudage laser de forte profondeur [12]	40
Figure II.17 : illustration du principe de soudage par friction malaxage. [13]	42
Figure II.18 : Schéma de principe de fonctionnement du soudage hybride laser/MIG-MAG[13]	43
Figure II.19 : schéma d'équipements du LEW [14].....	44
Figure III.1 : Processus mis en jeu lors d'un examen visuel.[19]	56
Figure III.2: Schéma de principe de ressage [19].....	57
Figure III.3 : Principe de la magnétoscopie.[20].....	58
Figure III.4 : Schéma contrôle par ultrasons [19]	59
Figure III.5 : schéma de contrôle par courants de Foucault [19]	61
Figure III.6 : Schéma du test de tension transversale [21]	63
Figure III.7 : test de pliage guidé [21].....	64
Figure IV.1 : échantillon préparé pour l'analyse DRX	66
Figure IV.2 : machine Panalytical Empyrean	67
Figure IV.3 : échantillon inox principal	69
Figure IV.4 : poste à souder SAFE AC 420	69
Figure IV.5 : les deux pièces a assembler chanfreinées.....	70
Figure IV.6 : retrait du laitier du procès MMA	70
Figure IV.7 : poste a souder TIG SAF-FRO	71
Figure IV.8 : torche de soudage TIG.....	71
Figure IV.9 : électrode en tungstène	72
Figure IV.10. : Baguette d'apport TIG1	72
Figure IV.11 : assemblage soudé en TIG 1	73
Figure IV.12 : poste à souder ESAB caddy TA33	73
Figure IV.13 : torche de soudage ESAB	74
Figure IV.14 : électrode tungstène 2% thorié	74
Figure IV.15 : baguette d'apport TIG 2	75
Figure IV.16 : assemblage soude en TIG2	75
Figure IV.17 : rectifieuse plane.....	76
Figure IV.18 : échantillon après rectification.....	76
Figure IV.19 : machine d'essais de dureté QNESS 250 CS.....	77
Figure IV.20 : exemple d'une empreinte de dureté.....	77
Figure IV.21 : courbe de dureté transversale MMA	78

Figure IV.22 : courbe de dureté du cordon MMA	78
Figure IV.23 : courbe de dureté transversale TIG1	79
Figure IV.24 : courbe de dureté du cordon TIG1	79
Figure IV.25 : courbe de dureté transversale TIG2.....	80
Figure IV.26 : courbe de dureté du cordon TIG2.....	80

Liste des tableaux

Tableau III .1 : les gaz de protection et leurs caractéristiques [16]	52
Tableau III.2 : abréviations des examens CND	56
Tableau IV.1 : tableau de composition chimique de l'acier inoxydable 304	68

Introduction Générale

Introduction Générale

Le soudage est une méthode d'assemblage primordiale dans l'industrie contemporaine, qui permet de réaliser des structures solides et robustes dans divers domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, la construction navale ou même l'agroalimentaire. Les aciers inoxydables sont souvent préférés parmi les matériaux du fait de leur résistance à la corrosion, leur aspect visuel et leurs caractéristiques mécaniques constantes à même des températures élevées. Ces propriétés font de ces matériaux un choix prédominant dans les environnements difficiles, où la durabilité et l'hygiène sont des exigences indispensables.

Néanmoins, le soudage des aciers inoxydables présente un certain nombre de difficultés techniques. Effectivement, les caractéristiques physico-chimiques spécifiques de ces matériaux requièrent une connaissance approfondie des techniques de soudage afin d'assurer la solidité des soudures. Des problèmes comme la sensibilité à la corrosion intergranulaire, ou les déformations thermiques, risquent d'affecter la qualité de l'assemblage si les paramètres ne sont pas réglés de manière optimale.

Le mode de soudage sélectionné (TIG, MIG/MAG, MMA, soudage au plasma, etc.) ainsi que les ajustements correspondants (intensité du courant, tension d'arc, type et débit du gaz protecteur, polarité, etc.) ont un impact direct sur la microstructure, la résistance mécanique et la longévité de la soudure. Par conséquent, l'étude des interactions entre les paramètres de soudage, la métallurgie des aciers inoxydables et le comportement des soudures s'avère essentielle pour les ingénieurs et les chercheurs.

L'objectif de cette thèse est donc d'étudier quelques méthodes les plus courantes de soudage des aciers inoxydables notamment MMA, TIG, et caractériser les échantillons étudiés avec des paramètres de soudage différents pour différents cordons.

Chapitre I

Généralités sur les aciers et les aciers inoxydables

Généralités sur les aciers et les aciers inoxydables

I.1.Les aciers

I .1.1. Introduction :

Parmi tous les alliages métalliques, l'acier est l'un des plus fréquemment utilisés dans les applications industrielles. Ces multiples nuances et la capacité d'effectuer des traitements thermomécaniques qui modifient les propriétés mécaniques de ces aciers offrent un éventail d'applications extrêmement vaste.

I.1.2. Historique sur les aciers :

Il s'agit de métaux ferreux très anciens, qui sont sans doute les premiers à avoir été utilisés. Il semble que la découverte de ces aciers, grâce à la méthode de la cémentation et l'art de la trempe, remonte à environ 1000 ans avant J.C. Ces techniques ont été découvertes par hasard lorsque le fer a été exposé au carbone par le biais des matières organiques utilisées pour le chauffer afin de le marteler.

I.1.3. Définition de l'acier :

L'acier est un alliage de fer contenant moins de 2 % de carbone. Il peut être répertorié selon cette teneur en carbone qui fixe son niveau de dureté maximale à l'état trempé. Un acier de haute teneur en carbone sera employé pour sa grande dureté alors qu'un acier de teneur plus faible est moins dur et plus malléable. Il contient généralement de petites quantités d'autres éléments que le fer et le carbone, incorporés, volontairement ou non, au cours de son élaboration. On peut également y ajouter des quantités plus importantes d'éléments d'alliage ; il est considéré alors comme un acier allié.

I.1.4. Méthodes d'élaboration de L'acier :

L'acier s'élabore actuellement de deux manières :

- Dans un haut fourneau, à partir du minerai de fer et de coke avec réduction du carbone dans un convertisseur.

- Dans un four électrique, à partir d'acier de récupération. On parle d'acier de recyclage ou d'acier électrique

I.1.5. Structure cristalline de l'acier :

L'acier, dont le principal élément est le fer, se distingue par la présence de deux structures cristallines distinctes : le fer α (ferrite) et le fer γ (austénite). Ces modifications structurelles successives selon la température représentent les transitions allotropiques du fer. Chaque atome de fer est sphérique et jointif. Ils apparaissent comme des superpositions régulières dont le motif fondamental est la grille. On appelle ces superpositions un réseau.[1]

a) Le réseau Cubique Centré (C.C) :

En dessous de 906 °C, le fer possède une structure cristalline cubique centrée comme le montre, où les atomes sont disposés dans des couches identiques superposés. La maille de cet empilement est le cube centré. Le fer porte le nom de fer α et correspond à la phase α

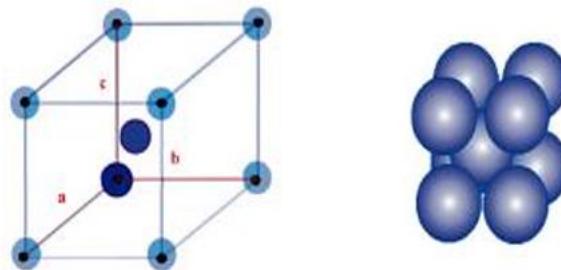


Figure I.1 : Structure cristalline cubique centrée [2]

b) Le réseau Cubique à Faces Centrées (C.F.C) :

Dans l'intervalle de températures comprises entre 1392°C et 1539°C, le fer possède une structure à maille cubique à faces centrées comme le montre la figure I.2, où l'arrangement des atomes de fer consiste également en couches identiques superposés. Dans ce cas, la maille est un cube à faces centrées. Le fer porte alors le nom de fer γ et correspond à la phase γ [2]

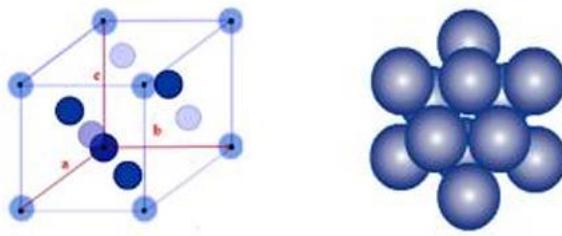


Figure I.2 : Structure cristalline cubique à face centrée

I.1.6. Les domaines d'application :

Les aciers continuent d'être favorisés dans presque tous les secteurs d'application technique : équipements publics (ponts et chaussées, signalisation), industrie chimique, pétrochimique, pharmaceutique et nucléaire (matériel sous pression, équipement exposé à la flamme, capacités de stockage, divers récipients), agro-alimentaire (emballage et entreposage), construction (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), ainsi que l'industrie mécanique et thermique (moteurs, turbines, compresseurs), automobile (châssis, accessoires), ferroviaire, aéronautique et aérospatial, construction navale, secteur médical (instruments, appareils et prothèses), pièces mécaniques (vis, ressorts, câbles, roulements, pignons), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), ameublement, design ainsi que les équipements électroménagers etc.

I.1.7. Les éléments d'addition et leurs rôles

Le carbone (c) : Le carbone est un fort stabilisant austénitique qui améliore la résistance à la traction des aciers en amplifiant le volume de carbure présent. L'acier devient plus durci grâce à l'ajout de carbone.

Le manganèse (Mn) : Augmente la ductilité et confère une meilleure réponse aux traitements thermiques.

Le silicium(Si) : Agit comme désoxydant et augmente la résistance de l'acier. Il affecte aussi la vitesse de diffusion du zinc dans l'acier lors de la galvanisation à chaud.

Le molybdène(Mo) : Améliore la dureté et la trempabilité. Quand il est ajouté dans des proportions de 2 à 4 % (comme dans l'acier inoxydable), il améliorera la résistance de l'acier aux attaques des chlorides.

Le chrome(Cr) : S'il est utilisé en petites quantités, il améliore la réponse aux traitements thermiques et l'abrasion. Quand son pourcentage est grand (entre 12 et 25%), il améliore la résistance à l'oxydation et à la corrosion.

Le nickel (Ni) : Améliore la trempabilité et la résistance à la corrosion. De plus, il augmente la stabilité de l'acier à haute température.

Le plomb(Pb) : Augmente la machinabilité de l'acier.

Le phosphore(P) : Diminue la ductilité et la résilience et améliore la machinabilité et la résistance à la corrosion.

Le soufre(S) : Réduit fortement la ductilité transversale et les propriétés de résilience. Il affecte la qualité de la surface et la soudabilité. Lorsqu'il est combiné au manganèse pour obtenir des sulfures de manganèse, il améliore la machinabilité.

L'aluminium(Al) : Désoxydant et affineur de grain, il affecte aussi la vitesse de diffusion du zinc dans l'acier.

Le vanadium(v) : Retarde la croissance de grain et forme des carbonitrides qui augmentent la résistance des aciers lors du laminage à chaud.

Le titane(Ti) : Stabilise la structure et améliore l'efficacité des éléments durcisseurs dans l'acier.

I.2.Les aciers inox

I.2.1. Historiques des aciers inox :

Les premiers alliages de fer et d'acier inoxydable ont été coulés dès l'époque antique. Toutefois, il est important de faire une distinction dans la terminologie : ces alliages devaient leur solidité à leur forte concentration en phosphore, et non au chrome. Donc, il ne s'agissait pas d'aciers inoxydables dans le sens moderne du terme. Dans ces alliages, et lorsqu'ils sont soumis à des conditions météorologiques propices, une couche de passivation d'oxyde de fer et de phosphates se crée en surface. Cette couche offre une bien meilleure protection pour le métal que l'accumulation de rouille.

C'est le métallurgiste français Pierre Berthier qui a conçu les premiers aciers résistants à base de chrome, ayant observé leur résistance face à certains acides et envisageant leur utilisation dans la fabrication de couteaux. Toutefois, à cette époque, les bas taux de carbone et les hauts taux de chrome souvent employés dans l'acier inoxydable moderne n'étaient pas

utilisés. Les alliages obtenus alors, excessivement riches en carbone, étaient trop fragiles pour présenter un véritable intérêt.

L'année 1878 marque le début de la production à grande échelle d'acières au creuset chromés par les établissements Jacob Holtzer localisés à Unieux (Loire). Toutefois, ce sont principalement des propriétés mécaniques améliorées qui sont recherchées, la corrosion n'étant guère une préoccupation pour les métallurgistes.

C'est dans les années 1890 que Hans Goldschmidt, un Allemand, a mis au point et déposé un brevet pour une méthode connue sous le nom de thermite, permettant l'extraction du fer sans carbone. De 1904 à 1911, plusieurs scientifiques, dont le Français Léon Guillet, ont développé divers alliages que l'on pourrait qualifier aujourd'hui d'inoxystables. En 1911, le chercheur allemand Philip Monnartz a souligné l'impact du pourcentage de chrome dans les alliages sur leur capacité à résister à la corrosion.

Enfin, en 1913, l'Anglais Harry Brearley des laboratoires Brown-Firth (Sheffield, Angleterre), en travaillant sur l'érosion dans les canons d'armes à feu, développa un acier qu'il baptisa rustless (« sans rouille ») : il s'aperçut que des échantillons polis en vue d'examens de laboratoire ne subissaient pas d'oxydation. Cet acier sera ensuite rebaptisé stainless (« sans tache », ou « pur »), ce sera officiellement le premier acier à porter le nom d'« inoxydable » ; Brearley entra dans l'histoire comme leur inventeur. Il s'agissait alors d'un acier inoxydable martensitique (0,24 % en carbone et 12,8 % en chrome). Cependant, d'autres aciers comparables avaient été développés en Allemagne par Eduard Maurer (de) et Benno Strauss qui élaboraient un acier inoxydable austénitique (21 % de chrome et 7 % de nickel).

Krupp AG. Aux États-Unis, Christian Dantsizen et Frederick Becket lancèrent déjà la fabrication industrielle d'acier inoxydable ferritique. En 1908, Krupp avait déjà construit des navires à coque en acier inoxydable chrome-nickel

C'est en 1924 que William Herbert Hatfield, qui a pris la relève de Harry Brearley à la direction des laboratoires Brown-Firth, a développé l'acier « 18/8 » (composé de 18% de chrome et 8% de nickel) qui est sans doute le type d'acier inoxydable fer-nickel-chrome le plus largement employé. [3]



Figure I.3 : ancienne usine métallurgique

I.2.2. Définition inox :

L'acier inoxydable, souvent désigné sous le nom d'acier inox ou inox, est un type d'acier (alliage basé sur le fer et le carbone) présentant ici une teneur en carbone inférieure à 1,2 %, mais une proportion de chrome supérieure à 10,5%. Sa caractéristique principale est sa faible sensibilité à la corrosion.

La présence de chrome dans la matrice d'un acier, au-delà de 10,5%, entraîne la création d'une couche d'oxyde de chrome protectrice qui confère à l'acier sa propriété inoxydable. On peut également incorporer d'autres composants, comme le nickel qui renforce les propriétés mécaniques en général et la ductilité spécifiquement, ou le molybdène et le titane qui favorisent la stabilité de l'alliage à des températures autres que celles ambiantes. On peut aussi envisager des éléments à fusion élevée tels que le vanadium et le tungstène, souvent associés à une augmentation du pourcentage de chrome, dans le but d'améliorer la résistance aux hautes températures lorsqu'ils sont exposés à une flamme (acières réfractaires).

L'acier inoxydable s'est imposé comme un matériau essentiel dans divers secteurs : équipements de cuisine (bien qu'il ait une conductivité thermique dix fois inférieure à celle de l'aluminium), objets courants, domaine médical et chirurgical, construction et travaux publics, construction de navires, industrie automobile, aéronautique, fabrication d'outils, industries

mécaniques, agroalimentaires et chimiques, transports et bien d'autres. Il est totalement recyclable.

- Durabilité et Résistance

L'un des principaux avantages de l'acier inoxydable est sa remarquable durabilité. Capable de résister aux conditions les plus extrêmes, telles que les températures élevées et les environnements corrosifs, l'acier inoxydable est le matériau de choix pour les applications nécessitant longévité et fiabilité. Sa résistance à la corrosion, en particulier, le rend idéal pour des utilisations dans des secteurs tels que la construction, l'automobile, et la fabrication de produits ménagers.

- Polyvalence d'Application

La polyvalence de l'acier inoxydable est un autre de ses atouts majeurs. Disponible en plusieurs grades, chacun adapté à des conditions spécifiques, il peut être utilisé dans une vaste gamme d'applications. Que ce soit pour la construction de structures résistantes aux intempéries, la fabrication d'ustensiles de cuisine non toxiques ou la création de composants médicaux stérilisables, l'acier inoxydable répond à divers besoins avec efficacité.

- Impact Écologique

L'aspect écologique de l'acier inoxydable est également notable. Entièrement recyclable, il joue un rôle clé dans les efforts de l'industrie pour réduire les déchets et promouvoir la durabilité. La capacité de recycler l'acier inoxydable sans perte de qualité signifie que de nouveaux produits peuvent être créés à partir de matériaux recyclés, contribuant ainsi à la conservation des ressources naturelles et à la réduction de l'empreinte carbone.

I.3. Classification métallurgique

I.3.1 DIAGRAMMES DE PHASES :

I.3.1.1- Diagrammes binaires :

Tous les aciers inoxydables sont basés sur le système Fe-Cr. En tant qu'élément alphagène, le Cr a tendance à réduire la boucle γ , affichant une solubilité maximale de 12 % Cr dans

l'austénite à 1000 °C. L'austénite n'apparaît que dans une plage de température de 830° à 1390°. L'inclusion de carbone et d'azote, qui sont fortement gammagènes, élargit la région γ et donc augmente la solubilité du Cr dans l'austénite. La zone $\alpha+\beta$ est particulièrement vaste, avec une concentration de 0.2 % (C + N) qui élargit la limite de solubilité du Cr de 13 à 27 %.

La partie du système Fe-Cr révèle la présence de la phase σ de structure tétragonale contenant 30 atomes par maille. Cette phase se développe très progressivement à une température restreinte entre 800° et 600°C. Dans l'alliage binaire, sa présence est très restreinte (46 à 53 % Cr). À 520°C, un palier eutectoïde est observé, accompagné d'une réaction relativement lente. On peut éviter la phase σ grâce à un refroidissement rapide.

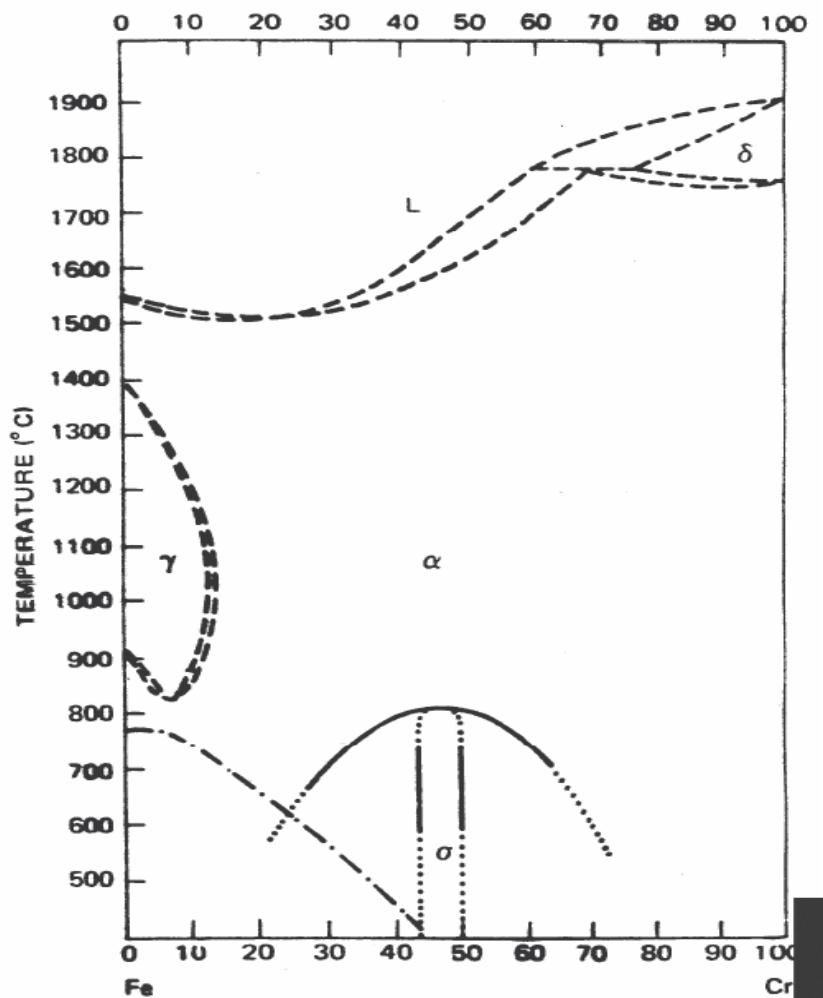


Figure I.4. Diagramme binaire Fe-Cr. [6]

- Le système FE-NI :

On considère actuellement que le système Fe-Ni est valide au-delà de 450°C. La solubilité maximale du nickel dans le fer se situe entre 400 et 500°C.

Étant un élément gammagène, le Ni à 30% élargit la phase γ de 500 °C à 1450 °C. La conversion de l'austénite lors du refroidissement est particulièrement lente, et une vitesse de refroidissement trop élevée entraînerait une transformation martensitique des alliages Fe-Ni.

Toutefois, la forme du diagramme de phase Fe-Ni en dessous de 450°C reste encore un sujet de débat. La phase Fe-Ni (structure tétragonale à faces centrées à des températures inférieures à 400°C) peut former une précipitation, ce qui en est la preuve. À cette température, les phases d'équilibre des alliages contenant beaucoup de fer sont α et Fe-Ni.

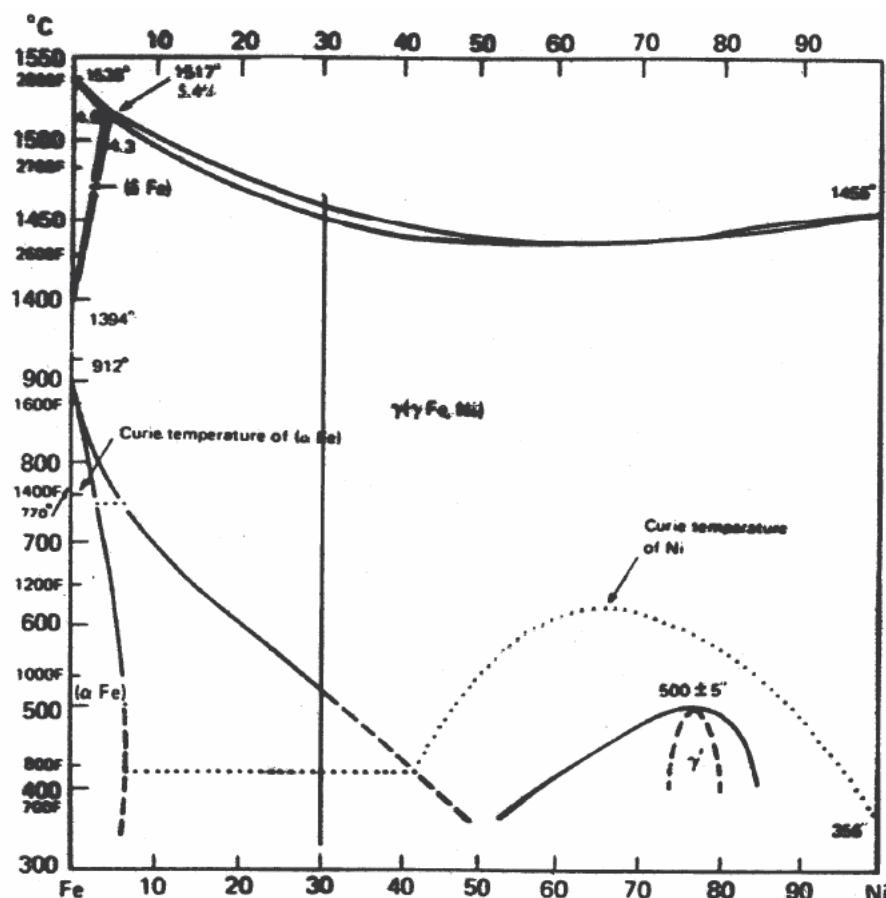


Figure I.5. Diagramme binaire Fe-Ni [6]

- **Le système Cr-Ni :**

Démontre une transition allotropique du Cr. Les phases σ et δ peuvent être maintenues à température ambiante par une trempe à 1250°C. En ce qui concerne les aciers inoxydables, l'aspect principal de ce diagramme est l'étendue considérable de la zone γ ; pour des taux de Cr supérieurs à 50 %, il peut se dissoudre en structure cfc de Ni à 1350°C.

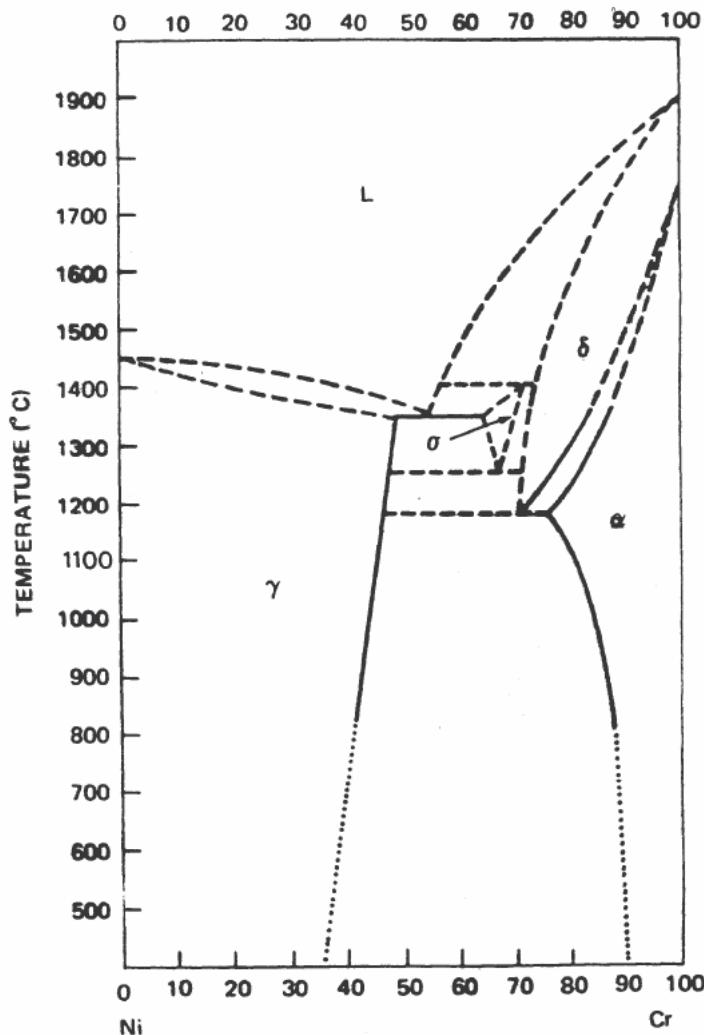


Figure I.6. Diagramme binaire Ni-Cr. [6]

I.3.1.2 Diagrammes ternaires:

Les incertitudes présentes dans les trois systèmes binaires se reflètent dans le diagramme ternaire Fe-Cr-Ni. De plus, en raison du temps nécessaire pour les réactions, le diagramme

d'équilibre des phases ne peut pas toujours servir à anticiper les structures présentes dans les alliages vendus sur le marché.

Les illustrations montrent une portion des schémas ternaires Fe-Cr-Ni (à 650 °C) et Mo-Cr-Ni (à 1000 °C).

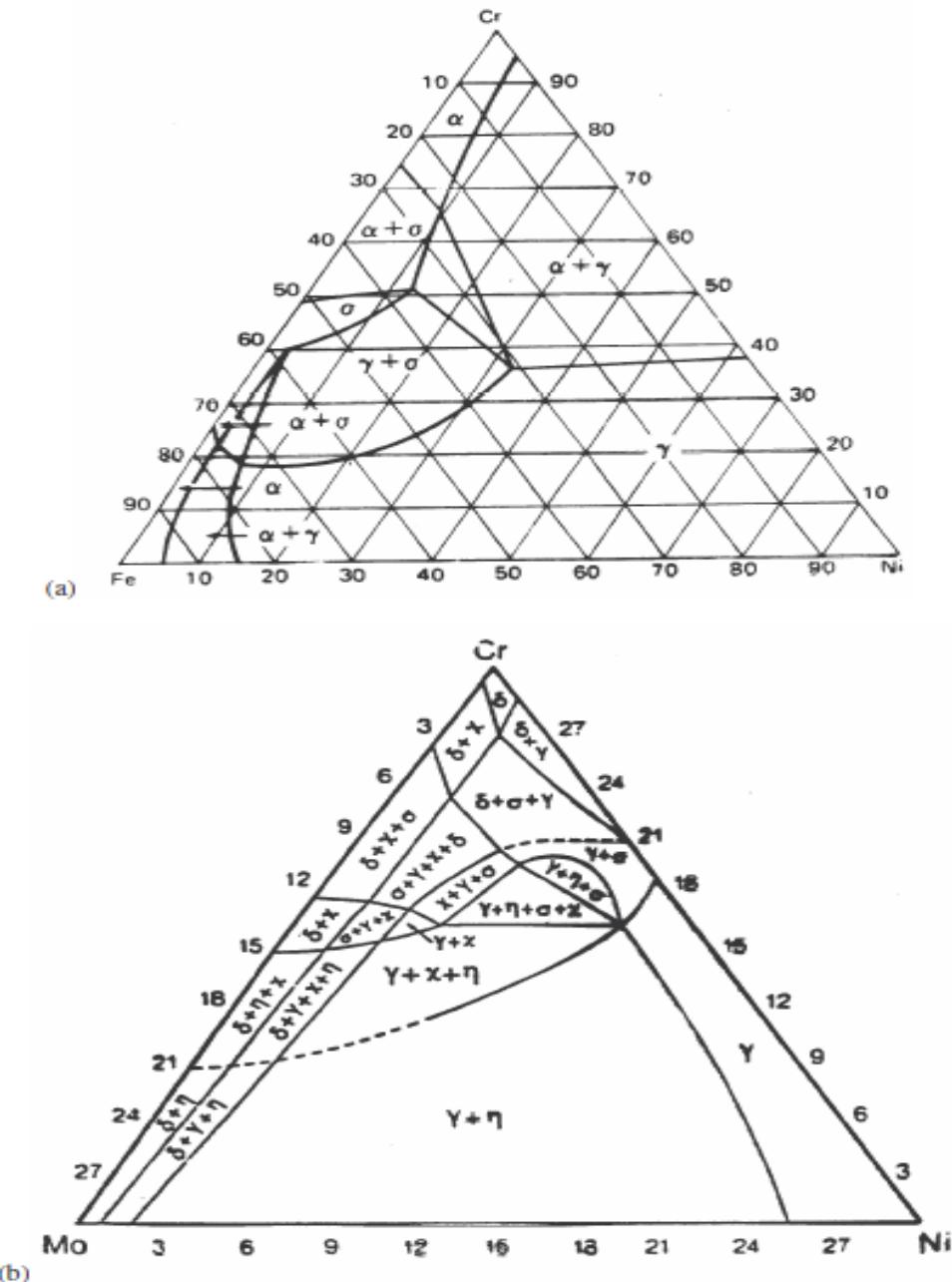


Figure I.7. Sections des diagrammes ternaires Fe-Cr-Ni à 650°C (a) et (b) Mo-Cr-Ni à 1000°C[6]

Bien que la phase σ représente une part importante du diagramme de phase Fe-Cr-Ni, sa formation à moins de 500°C est si progressive qu'elle n'influence pas significativement les caractéristiques des aciers inoxydables employés à ces températures.

I.4 Classification des aciers inoxydables

On peut classer les aciers inoxydables d'après la structure cristalline qu'ils prennent après un traitement bien déterminé. Il existe quatre familles d'aciers inoxydables :

- Les aciers ferritiques (structure cubique centrée cc) ;
- Les aciers martensitiques (structure quadratique)
- Les aciers austénitiques (structure cubique face centrée).
- Les aciers duplex (**structure cristalline biphasée**, combinant les phases **austénitique** et **ferritique**)

a. Les aciers ferritiques :

Ces aciers ne se trempent pas.

On les désigne comme ferritiques car leur structure cristalline correspond à celle du fer à température ambiante.

Ils ont une très faible concentration en carbone (environ 0,07% de carbone). Le pourcentage de chrome varie entre 11 et 29%. Ils ne contiennent pas de nickel. À température ambiante, les aciers ferritiques possèdent des propriétés magnétiques. Ils possèdent une ductilité modérée ($A\% \approx 18\%$).

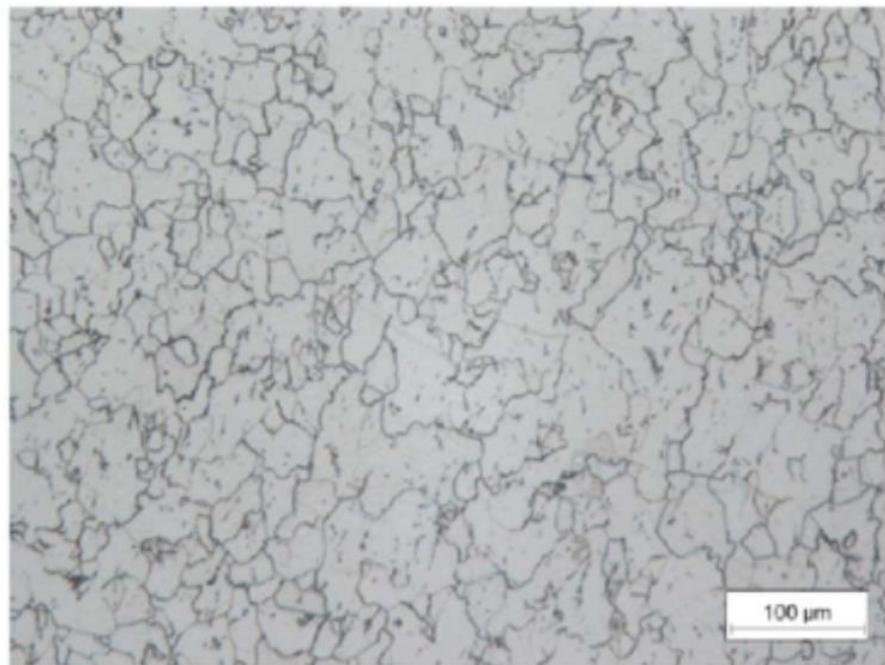


Figure I.8 : microstructure d'un acier inox ferritique.

Exemple d'un produit en acier inox ferritique :



Figure I.9 : collecteur d'échappement d'un véhicule

b. Les aciers martensitiques (magnétiques) :

Ces aciers sont susceptibles d'être trempés et peuvent présenter des propriétés mécaniques diverses en fonction de leur teneur en carbone et du type de traitement thermique (trempe, revenu, recuit). En général, ils possèdent une excellente trempabilité.

Cependant, il est important de souligner que l'amélioration des caractéristiques par la trempe et le revenu est inévitablement liée à une hausse de la vulnérabilité à la corrosion.

En général, les aciers martensitiques présentent une résistance à la corrosion inférieure à celle des aciers ferritiques.

Les aciers martensitiques courants se caractérisent par une composition de 13% de chrome et une teneur en carbone qui dépasse 0,08%.

Exemple d'application : lames de couteaux de cuisine.

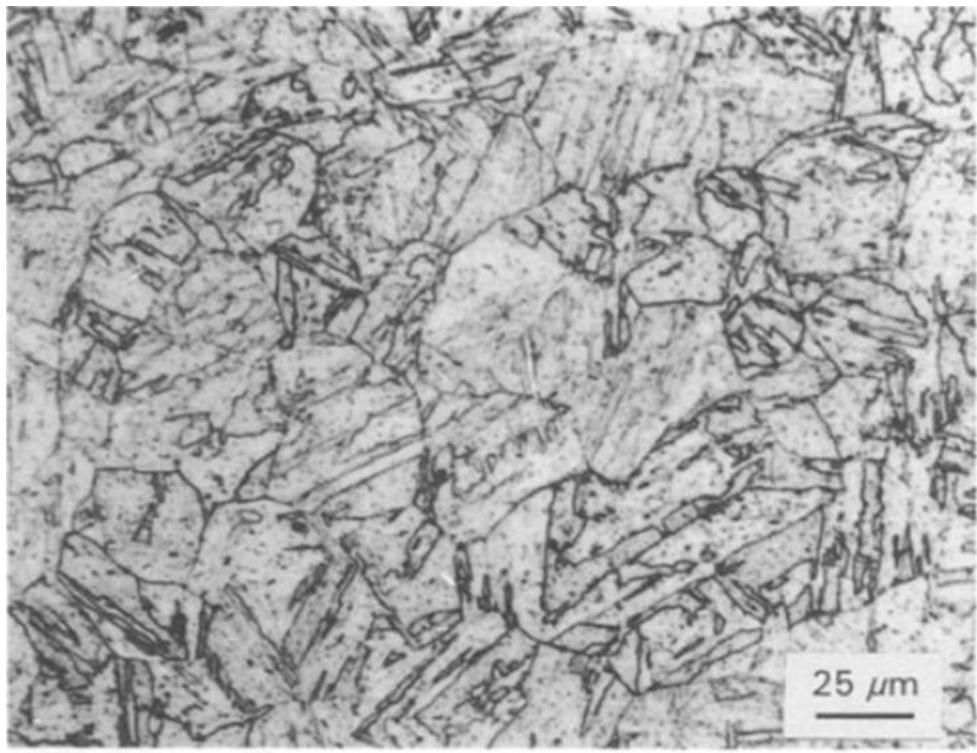


Figure I.10 : structure microcristalline d'un acier inox martensitique

Exemple d'un produit en acier inox martensitique :



Figure I.11 : tuyauterie de canalisation

c. Les aciers austénitiques :

Ces aciers ont une structure cubique à faces centrées à température ambiante. Cette structure est **amagnétique** et peut être conservée à température ambiante grâce à des éléments d'alliage approprié dont le plus connu est le nickel.

Les aciers austénitiques comportent une quantité suffisante de chrome pour garantir une résistance à la corrosion, et du nickel pour maintenir leur structure austénitique à température ambiante.

Les aciers austénitiques sont constitués de 18% de chrome et de 8% de nickel (acier inoxydable 18.8).

Ils sont extrêmement résistants à la corrosion et présentent également une grande ductilité (A% environ 45%).

Ni les aciers austénitiques, ni les aciers ferritiques ne peuvent être durcis par trempe. Au contraire, ils ont la possibilité d'améliorer leurs propriétés mécaniques par le biais de l'écrouissage.



Figure I.12 : structure microcristalline d'un acier inox austénitiques

Exemple d'un produit en acier inox austénitique

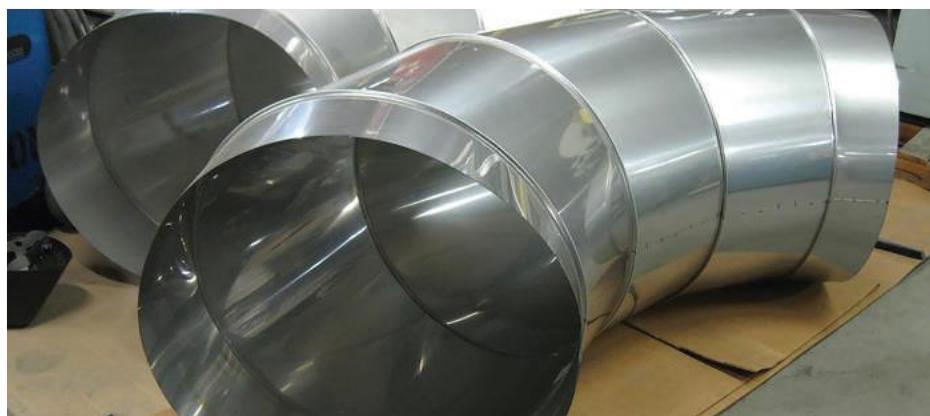


Figure I.13 : Tubes d'aération [4]

d. Les aciers duplex :

Les aciers inoxydables duplexes montrent une proportion de ferrite et d'austénite qui est sensiblement équivalente. Les propriétés mécaniques surpassent celles des aciers inoxydables austénitiques ou ferritiques, tout en conservant un allongement à la rupture avoisinant les 40 %.

On utilise généralement ces derniers à des températures ne dépassant pas 300 °C. On fait la distinction entre :

- Les aciers duplex sans molybdène contenant 20-23 % de chrome, 1-4 % de nickel et 0,12 à 0,3 % d'azote sont considérés comme des nuances duplex de bas de gamme. Cependant, leur résistance à la corrosion est comparable à celle des nuances 304/316 en fonction de l'équilibre chimique et des conditions d'utilisation.
- Les nuances duplex avec une teneur en chrome voisine de 22 % mais avec additions de 1,5 % ou plus (généralement 3 %) de molybdène et 0,15 à 0,25 % d'azote. Parmi ces aciers, la nuance dite 2205 est le standard des nuances duplex, avec des applications essentiellement en milieux sévères.

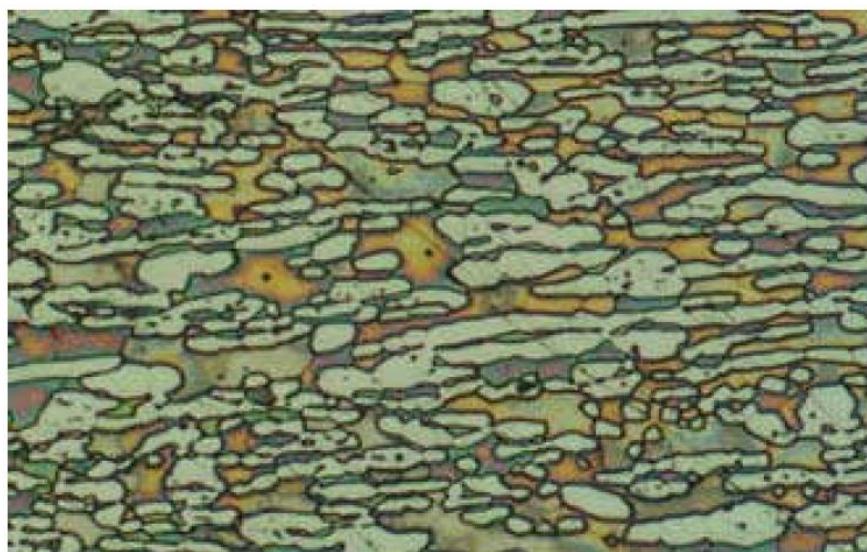


Figure I.14 : microstructure cristalline d'un acier inox duplex

Exemple d'un produit en acier inox duplex



Figure I.15 : canalisations en inox

Chapitre II

Technologies de soudage

Technologies de soudage

II.1 Définition du soudage :

Le soudage, un des procédés d'assemblage, joue un rôle crucial dans tous les secteurs de l'industrie et du bâtiment. Il offre la possibilité d'ajuster au mieux les formes de construction aux exigences auxquelles elles seront confrontées lors de leur utilisation. Le soudage est un procédé qui vise à établir une jonction durable entre deux ou plusieurs éléments de même nature ou différente, soit par l'application de la chaleur, soit par l'exercice de la pression, soit par l'emploi simultané des deux techniques, chaleur et pression. On peut réaliser le soudage avec ou sans métal d'apport.

Pour les matériaux métalliques, un domaine particulièrement crucial, le soudage se manifeste de deux manières :

a. Le soudage homogène :

Quand le métal de base et le métal d'apport sont identiques. Dans cette méthode, le métal des composants à unir contribue à la formation du joint tout comme le métal d'apport. Ainsi, il s'agit d'une opération de « fusion localisée » de deux pièces identiques. Le métal primaire se mélange au métal supplémentaire.

Il est donc impératif que la température de soudage soit supérieure à celle de fusion des composants à unir.

b. Le soudage hétérogène :

On parle de soudage hétérogène lorsque le métal d'apport et le métal de base sont de composition distincte. Dans cette méthode, les composants à unir ne sont pas portés à la température de fusion et n'interviennent pas dans la formation du joint. Ce rôle est exclusivement assuré par le métal d'apport, dont le point de fusion est inférieur et qui garantit, grâce à sa solidification, une liaison métallique entre les surfaces à unir.

II.2. Terminologie de la soudure :

- **Le matériau de base :** est celui qui compose les pièces à souder.

- **Le métal d'apport** : se réfère au matériau dont est fait l'électrode employé dans la technique de soudage.
- **La racine** : fait référence à la zone de l'assemblage où le métal d'apport a réussi à pénétrer.
- **La face** : désigne la partie visible de la soudure.
- **Le pied** : fait référence à la démarcation, sur la face de la soudure, séparant le métal de base du métal d'apport.
- **La zone thermiquement affectée (ou ZAT)** : représente la portion du matériau d'origine qui, bien qu'elle n'ait pas été fusionnée avec le métal de remplissage, a subi un réchauffement et un refroidissement ultra-rapides (traitement thermique) lors du processus de soudage.

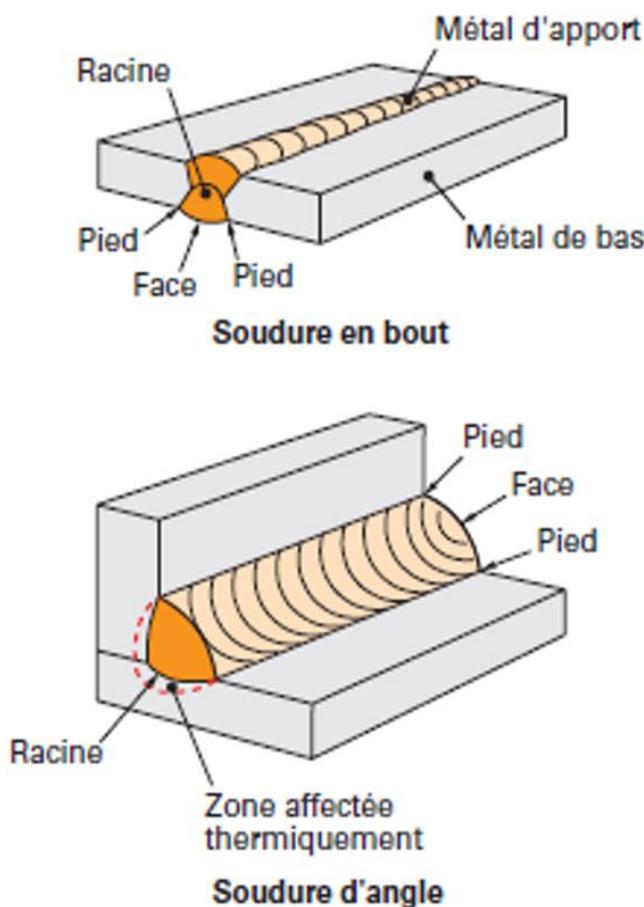


Figure II.1 : illustration du joint d'une opération de soudure.[8]

II.3.1. Les Phénomènes en Zone Fondué :

La zone de fusion (ZF) est la zone où le métal de base parvient à sa température de fusion durant l'opération de soudage. Il est crucial de comprendre les phénomènes qui se produisent dans ce domaine pour garantir la qualité et la durabilité des assemblages soudés.

Phénomènes observés dans la zone fondué :

a. Formation du bain de fusion :

Au cours du processus de soudage, l'arc, la flamme ou le faisceau laser (selon la technique de soudure employée) produit assez de chaleur pour faire fondre localement les bords des éléments destinés à être assemblés. Ce qu'on nomme le bain de fusion est constitué par le métal en état de fusion. Ce bain est une zone fluide qui, lorsqu'elle se refroidit, se transforme en matière solide pour constituer le cordon de soudure. La microstructure du joint soudé, qui influence directement ses propriétés mécaniques et sa réaction aux contraintes, est déterminée par le processus de solidification du bain de fusion.

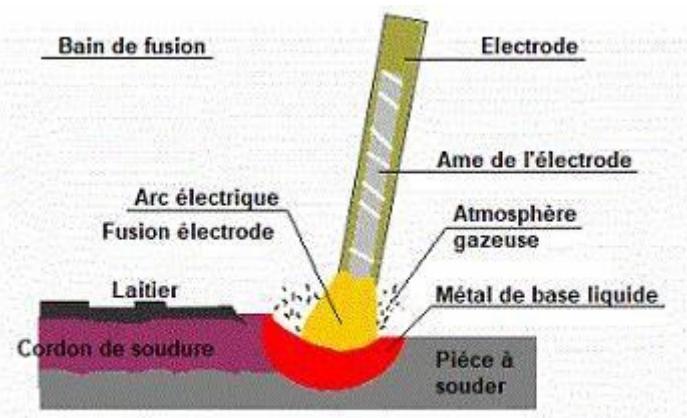


Figure II.2 : formation de bain de fusion lors d'un soudage à l'arc.[4]

b. fissurations à chaud :

La fissuration à chaud a lieu durant l'étape de solidification du bain de fusion. Ce processus est principalement dû à la progression rapide du bain de fusion, conjuguée à l'existence de

diverses impuretés dans le métal, comme le soufre ou le phosphore. Ces composants ont tendance à se regrouper dans la zone en fusion, réduisant localement le point de fusion et engendrant des contraintes résiduelles qui se traduisent par des fissures. Les fissures à chaud se manifestent souvent par des fissures inter-dendritiques (dans les espaces entre les dendrites) et peuvent mettre en péril la solidité mécanique de l'assemblage.[6]

Facteurs contribuants à la fissuration à chaud :

Vitesse de refroidissement : un refroidissement trop rapide accroît le danger de fissuration.

Composition chimique : le phénomène peut être aggravé par des teneurs élevées en soufre et en phosphore dans le métal de base ou dans le métal additionnel.

c. Fissuration à froid :

À la différence de la fissuration à chaud, la fissuration à froid apparaît une fois que le métal a été solidifié et refroidi. Ce genre de fissuration est généralement dû à des tensions résiduelles qui se manifestent lors du refroidissement du cordon de soudure. Il peut également être affecté par la présence d'hydrogène dissous dans le métal en fusion, qui crée des bulles de gaz pendant le processus de solidification. Ces bulles peuvent se rassembler dans certaines régions et causer des fissures ultérieurement, une fois le métal refroidi.[6]

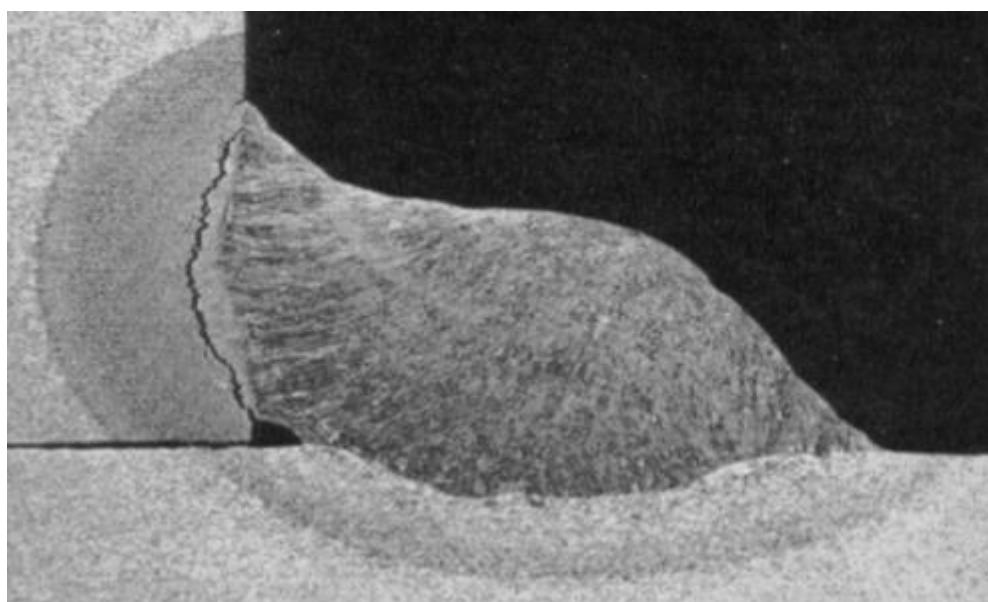


Figure II.3: apparition de fissures dans la soudure après refroidissement.[4]

d. Dendrites et Microstructure de la zone fondue :

La formation de structures appelées dendrites est généralement le résultat de la solidification du métal en fusion dans la région fondu. Ces structures cristallines en ramifications sont typiques des métaux qui se solidifient de manière progressive. Dans la région de fusion, les dendrites se créent lorsque le métal transitionne de l'état liquide vers l'état solide. La vitesse de formation et la dimension des dendrites sont influencées par la rapidité du refroidissement du bain de fusion ainsi que par la composition chimique du matériau. Une rapide solidification conduit généralement à la formation de dendrites fines et à une microstructure hétérogène, alors qu'un refroidissement plus graduel favorise une microstructure plus homogène. Ces variations peuvent significativement influencer la robustesse du matériau soudé.[6]

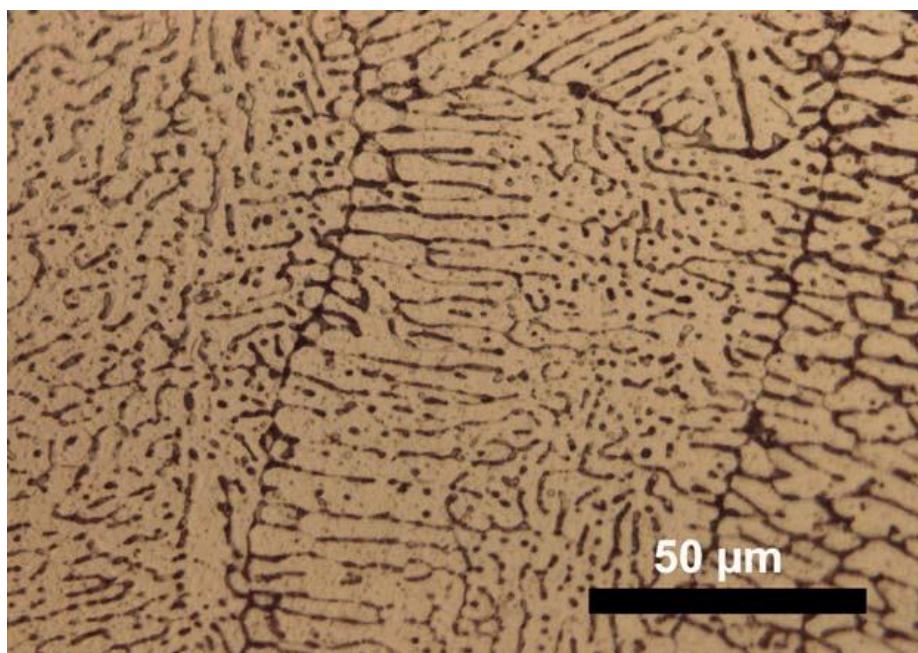


Figure II.4 : dendrites de la zone fondu après solidification .[6]

II.4. Procédés de soudage conventionnel

II.4.1. Soudage à l'électrode enrobée

Cette méthode de soudage couramment utilisée et très adaptable fait appel à des électrodes enrobées. Cette méthode peut être mise en œuvre pour tous les aciers inoxydables qui peuvent être soudés, et ce, dans un vaste éventail d'applications.

C'est une méthode manuelle généralement pratiquée à partir de 2 mm d'épaisseur (bien que réalisable jusqu'à 1 mm, mais complexe) ; en théorie, aucune limite maximale n'existe pour l'épaisseur. L'enrobage, par le biais du laitier et du gaz, garantit la protection des gouttes

métalliques et du bain de fusion. La solidification du laitier offre une protection à la soudure contre l'oxydation provoquée par l'air environnant. [7]

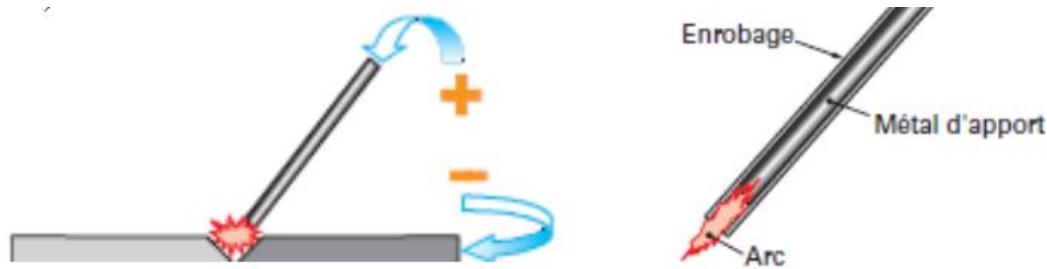


Figure II.5 : soudage à l'électrode enrobée [8]

-Types d'électrodes

Il y a une vaste gamme d'électrodes, garantissant qu'un type spécifique est accessible pour chaque variété d'acier inoxydable. Ces électrodes sont classées en divers groupes. Les électrodes couramment utilisées pour l'acier inoxydable sont classées en fonction de leur enrobage : rutile-acide, basique et rutile.

-Électrodes avec enrobage rutile acide

Les enveloppes des électrodes rutiles-acides constituent un aspect particulier des électrodes rutiles. Ces électrodes se distinguent par leur facilité d'amorçage et leur capacité à supporter des courants de soudure élevés. L'usage du courant continu avec électrode positive ainsi que du courant alternatif est possible, cependant avec le courant continu à l'électrode positive, l'arc est plus stable et le contrôle du bain de fusion est optimisé.

-Électrodes basiques

Le revêtement des électrodes basiques renferme une grande quantité de CaF₂ (flux) comparativement aux électrodes rutiles et rutiles-acides, ce qui se traduit par un point de fusion inférieur. Ce genre d'électrode offre aussi une excellente capacité de pénétration. La soudure est légèrement bombée et plus abrasive que celle réalisée avec les types rutiles. Il faut souder les électrodes basiques en utilisant un courant continu, avec la polarité positive.

-Électrodes rutiles

Les enrobages des électrodes rutiles possèdent une concentration élevée en TiO₂ (rutile), ce qui facilite le démarrage de l'arc et assure une surface lisse de soudure et un laitier facile à retirer.

Les caractéristiques mécaniques et plus particulièrement les performances en matière de résilience ne sont pas comparables à celles obtenues avec les électrodes basiques. [7]



Figure II .6. Exemple d'une électrode enrobée [4]

Avantages du soudage à l'électrode enrobée :

- L'équipement est simple et facile à ajuster.
- Les électrodes sont disponibles à partir de 2,0 mm de diamètre.
- Les meilleurs résultats sont obtenus en position plate ou position à plat, mais dans toutes les positions le soudage est possible.
- Les électrodes de soudage sont disponibles pour l'ensemble de la gamme d'aciers inoxydables et d'alliages.
- Une fois le laitier enlevé, le nettoyage post-soudage est relativement facile.
- Ce processus de soudage est idéal pour le chantier et est idéalement adapté aux espaces confinés ou espaces difficiles d'accès.
- Les compétences du processus sont relativement faciles à acquérir.[7]

Inconvénients du processus de soudage à l'électrode enrobée :

- Peut-être sujet à des éclaboussures et des coups accidentels.
- Vitesses de soudage lentes – faible taux de dépôt
- Pas adapté aux tôles minces.
- Une large gamme de diamètres d'électrodes doit être gardées en stock.

- La cuisson et le séchage des électrodes peuvent être nécessaire pour garantir des soudures de bonne qualité, et cela doit être fait conformément aux recommandations du fabricant.
- Les électrodes ont tendance à surchauffer, ce qui réduit l'efficacité du revêtement de flux.
- L'enchevêtrement de laitier provenant des électrodes revêtues peuvent poser des problèmes.

Le nettoyage entre passes est essentiel pour éviter L'entraînement de laitier lors de plusieurs passes.

Pour tous ces problèmes le processus de soudage des aciers inoxydables a l'électrode enrobée est dépassé par le temps, on opte généralement en industrie a des processus avancés qui permettent une meilleure productivité et une qualité améliorée. [7]

Principe du soudage TIG :

II.4.2. Soudage TIG.

Le soudage TIG, aussi connu sous le nom de GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) en anglais, est une technique de soudage qualifiée de « par fusion ». L'idée derrière le TIG est de générer un arc électrique entre une électrode en tungstène, qui n'est pas fusible, et le matériau à souder.

Un bouclier de gaz inerte, généralement de l'argon pur, protège l'électrode et le bain fondu contre l'oxydation due à l'air. Il arrive qu'un mélange Argon-Hélium soit employé pour améliorer la profondeur du bain de fusion, l'incorporation d'Hélium servant à renforcer la tension d'arc en raison du potentiel d'ionisation supérieur de ce dernier. L'Hydrogène, qui peut être présent dans le mélange gazeux, joue un rôle comparable à celui de l'Hélium.

À l'inverse de méthodes de soudage telles que le laser ou le faisceau d'électrons, qui nécessitent des densités d'énergie élevées, et entraînent la vaporisation partielle du métal, le TIG ne cause que la fusion du métal, avec, dans certains cas, une vaporisation très localisée.

Le soudage TIG ne transfère que de la chaleur à la pièce à souder et se réalise sans ajout de métal, contrairement à d'autres techniques à l'arc (comme l'électrode enrobée, MIG, MAG...). Toutefois, il est possible d'ajouter un complément de matière, que ce soit sous forme de fil ou de baguette. Le métal d'apport peut être identique au métal de base (soudage homogène), ou différent de celui-ci (soudage hétérogène).

Le TIG se prête aisément à la mécanisation. On l'emploie largement, notamment dans le secteur nucléaire, pour la fabrication des conduites du circuit primaire des centrales nucléaires. Effectivement, le TIG convient parfaitement à la production de tubes en acier inoxydable austénitique soudés et roulés.

Dans ce scénario, on emploie le courant continu, avec la polarité positive connectée à l'objet à souder (polarité directe), ce qui facilite la localisation du plus grand apport thermique sur le métal à fusionner. [10]

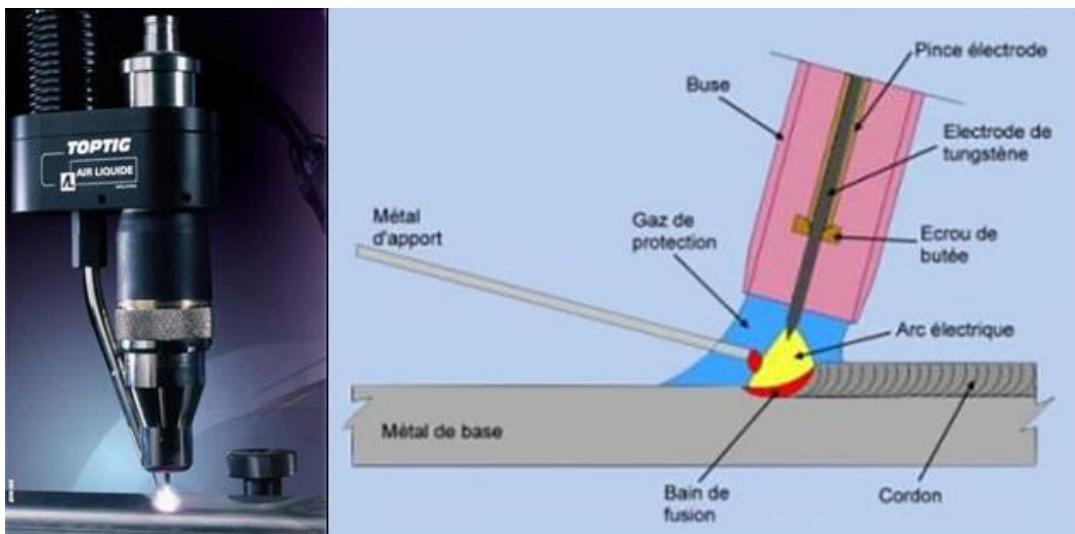


Figure II.7. Principe de soudage TIG[4]

Matériel utilisée en soudage TIG :

Le matériel nécessaire au soudage TIG inclut :

- Une torche de soudage.
- Un générateur HF (haute fréquence) pour l'amorçage de l'arc
- Une alimentation électrique.
- Une buse a gaz avec régulateur.
- Un équipement de contrôle. [10]

Torche de soudage

La torche de soudage doit être facile à manier et parfaitement isolée, ceci est particulièrement vrai, bien entendu, en soudage manuel



Figure II.8 : Torche de soudage TIG[4]

Il existe 2 types de torches :

- la torche refroidie par air (intensité max de soudage environs 200A)
- la torche refroidie par eau (intensité maximale de soudage environs 400 A)

Il est très important que les flexibles à gaz soient de matériaux anti-diffusion capables d'empêcher que de l'humidité de l'azote ou de l'oxygène de l'air environnant puisse y pénétrer et contaminer le gaz

Les électrodes

On opte pour le tungstène en raison de sa haute résistance à la fusion (3410 °C) et de son excellente conductivité électrique.

Il existe trois familles d'électrodes.

- tungstène pur ;
- tungstène à 1 ou 2 % d'oxyde de thorium (électrode thoriée);
- tungstène à 0,3 à 0,5% d'oxyde de zirconium .

Les oxydes de thorium et de zirconium visent à augmenter l'émissivité de l'électrode, ce qui facilite l'amorçage et améliore la stabilité de l'arc. Les électrodes en tungstène thoriées peuvent être employées en courant continu avec une polarité positive. En courant alternatif, elles entraînent des instabilités et des incorporations de tungstène dans le pot de soudure. On utilise des électrodes en tungstène pur et en tungstène avec oxyde de zirconium pour le courant alternatif.

Il faut tailler correctement l'électrode.

L'axe du cône doit être aligné de manière coaxiale avec celui de la section cylindrique de l'électrode.

Dans le cas du courant continu, l'angle du cône doit être compris entre 30 et 60°. Pour prévenir l'incorporation de tungstène dans le bain, un méplat doit être créé à l'extrémité du cône.

Cette surface plate réduit la décomposition de l'électrode.

Dans le cas du courant alternatif, le cône possède un angle de 90° à son sommet. Durant le processus de soudage, la pointe de l'électrode devient arrondie.[10].

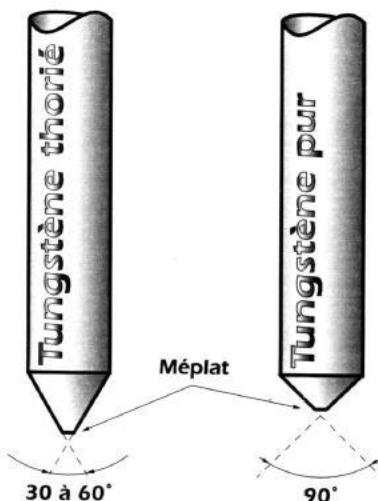


Figure II.9 : angles des électrodes de soudures TIG[4]

Générateur haute fréquence

L'arc est généralement amorcé par un générateur haute fréquence qui provoque l'étincelle permettant le passage de courant de soudage à basse tension. La fréquence de l'impulsion initiale peut atteindre plusieurs MHz avec une tension de plusieurs Kv. Cette technique présente l'inconvénient de provoquer de fortes interférences électriques.[10]

Alimentation électrique

Le soudage TIG est réalisé en courant continu (c.c.). L'électrode de soudage est connectée au terminal négatif du générateur de soudage, et la majeure partie de la chaleur est produite dans l'élément à souder. Quand on effectue une soudure de l'aluminium, l'élimination de la couche d'oxyde qui se crée n'est réalisable qu'en connectant l'électrode au terminal positif du générateur. Cela provoque une élévation excessive de la température de l'électrode, rendant ainsi le soudage de matériaux comme l'aluminium possible uniquement en courant alternatif. Les postes de soudage TIG sont généralement contrôlés électroniquement via un inverseur ou une installation de redressement à thyristor. La tension à vide devrait être approximativement

de 80 V, avec une caractéristique d'intensité constante. Lors de l'utilisation du soudage TIG en courant alternatif (onde sinusoïdale), le générateur HF doit émettre des impulsions continues pour empêcher l'extinction de l'arc au passage à zéro.[10]

Équipement de contrôle commande

Le type d'équipement de contrôle-commande est déterminé par le niveau d'automatisation du processus de soudage. Généralement, on surveille le fonctionnement du générateur ainsi que la durée de pré-gaz et de post-gaz pour le gaz protecteur destiné à prévenir l'oxydation de l'électrode et du bain de fusion. On peut aussi réguler la descente du courant pour garantir un remplissage optimal des cratères, ou encore orchestrer la génération automatique d'un courant pulsé.

Gaz de protections utilisées :

- Argon (Ar)
- Hélium(He)
- Mélange d'argon(Ar) et hélium (He)
- Mélange d'argon(Ar) et hydrogène
- Le dioxyde de carbone (CO₂)[10]

Exemple d'une soudure TIG des inox :



Figure II.10. tube inox soudé au TIG[4]

Avantages du soudage TIG :

- Soudure de qualité ;
- Pas de projections ;
- Avec ou sans métal d'apport ;
- Excellent contrôle de la pénétration de la soudure ;
- Sources de courant à coût modéré ;
- Contrôle précis des variables de soudage ;
- Contrôle indépendant de la source de chaleur et de l'apport de métal ;
- Amélioration du mouillage ;
- Pénétration plus large en racine ;
- Toutes positions ;
- Meilleure compacité ;
- Meilleure pénétration entre les passes ;
- Pas de laitier, pas de projections, arc très stable ;
- Applicable à tous les métaux ;
- Soudure lisse.

Inconvénients :

- Vitesse de dépôt faible ;
- Dextérité requise ;
- Moins économique ;
- Difficile de protéger la soudure dans les environnements extérieurs ;
- Inclusions de tungstène ;
- Coupure ou soufflage de l'arc.[10]

II.4.3. Procédé de soudure MIG/MAG

La technique de soudage MIG avec protection gazeuse (active en MAG) est utilisée par la plupart des industries de nos jours . Ce processus consiste à établir un arc électrique entre la pièce à souder et le fil d'apport, dont le diamètre varie de 0,6 mm à 2,4 mm. Quand l'arc est créé, on déroule ce fil de soudure à un rythme constant et ininterrompu dans le mélange en fusion produit par la force puissante de cet arc.

Un cordon de soudure est obtenu en mélangeant le métal d'apport et le métal de base, qui fusionnent lors de la formation de l'arc. Il est effectué sous atmosphère contrôlée (actif pour la

méthode de soudure MAG et inerte pour la méthode de soudure MIG). Les facteurs qui affectent la production du cordon sont :

- la vitesse de fil (l'intensité)
- le débit en gaz
- le diamètre du fil électrode
- la position de soudage
- la préparation
- la dimension et les matériaux à souder

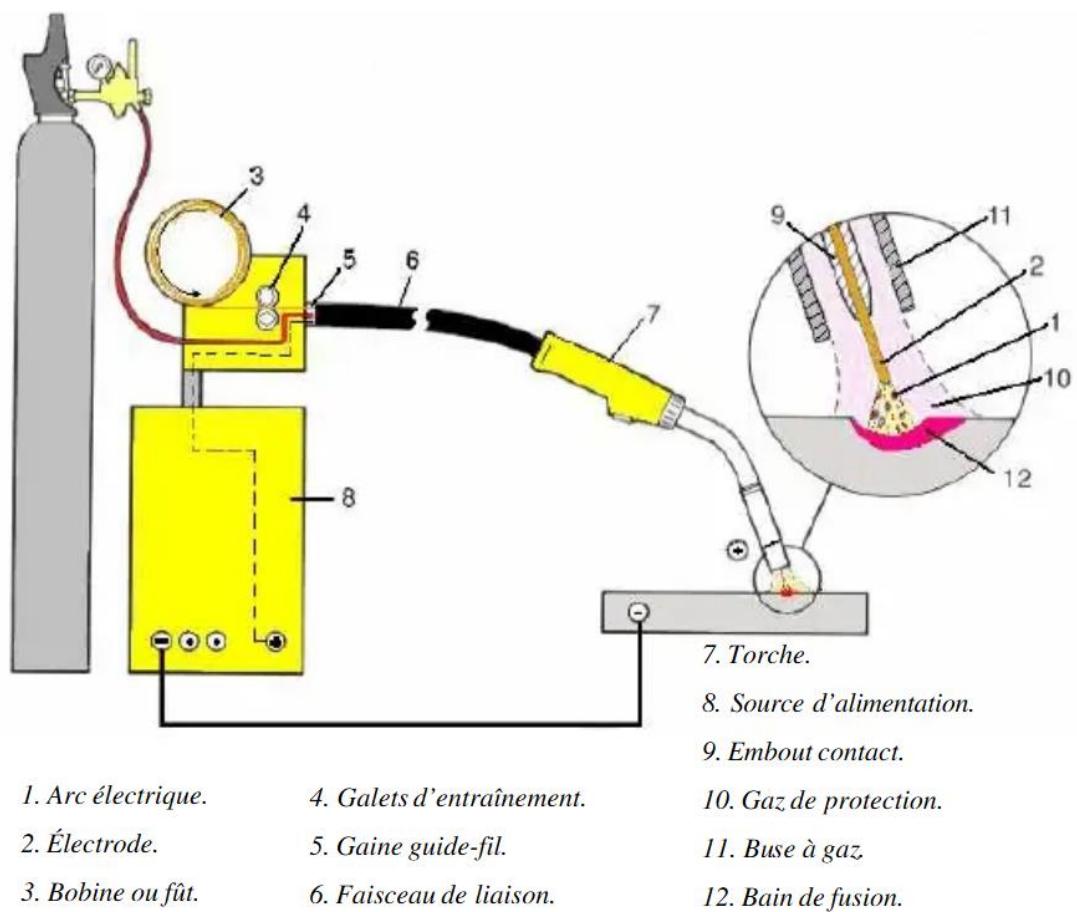


Figure II.11 : schéma installation MIG/MAG[4]

Il existe trois variantes de base du processus GMAW(GAS METAL ARC WELDING), en fonction de la méthode de transfert du métal.

Le transfert pulvérisé : était la première développée et se caractérise par un arc relativement chaud et une flaque de fluide.

Le transfert court-circuit : utilise des fils de petits diamètres et il est particulièrement efficace pour les matériaux fins.

Le soudage à l'arc pulsé : en tant que variante la plus récente du GMAW ce processus est caractérisé par un métal en vol libre contrôlé à un taux de chute de 60 gouttes par seconde à un courant plus faible en densité que le soudage à l'arc par pulvérisation conventionnel.

Cela augmente l'utilité de la GMAW de base, en particulier dans les industries où les aciers inoxydables minces sont fabriqués. [10]

Sélection du gaz inerte pour GMAW :

Le rôle principal des gaz dans le soudage MIG/MAG est de protéger le bain de soudure et réduire le contenu en oxygène.

Gaz utilisés :

- mélange Argon / CO₂ (CO₂ augmente la pénétration mais aussi le risque de projections.)
- Argon(Pénétration profonde)
- Hélium(permet un soudage large et Plus de chaleur dans la pièce)
- Le dioxyde de carbone CO₂. [10]

Exemple d'une soudure en MIG :



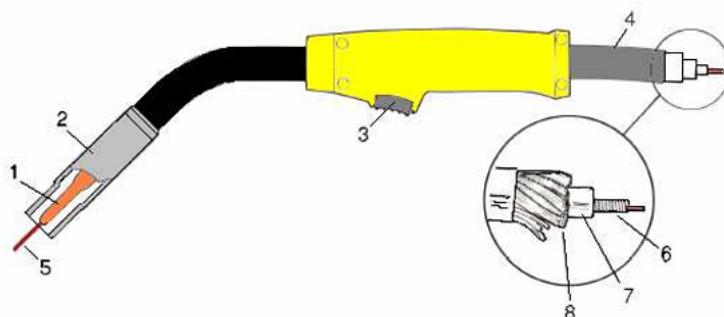
Figure II.12 : piece en inox soudee en MIG[4]

Torche de soudage

Les torches de soudage peuvent être soit refroidies par eau, soit auto-refroidies. Les éléments essentiels d'une torche de soudage sont les suivants :

- Embout contact
- Buse à gaz
- La gâchette.

- L'embout contact transfère le courant dans le fil et peut être remplacé pour recevoir différents diamètres et différents types de fils.
- L'élément du fil qui transporte le courant est nommé électrode-fil.
- L'embout contact est entouré d'une buse à gaz, servant à amener le gaz de protection jusqu'à l'électrode-fil, l'arc et le bain de fusion.
- La buse à gaz est également remplaçable, pour que l'opérateur s'adapte, en fonction du débit de gaz, du métal de base et du courant de soudage.
- Afin de fournir un bon gaz de protection, il est nécessaire de nettoyer la buse à gaz régulièrement.



La torche et son faisceau de liaison

1. Embout contact
2. Buse à gaz
3. Gâchette
4. Faisceau
5. Fil (électrode)
6. Gaine guide-fil (flexible)
7. Tuyau de gaz
8. Câble d'alimentation

Figure II.13 : torche de soudage mig et ses composants[4]

Alimentation et systèmes de contrôle commande

Pour le soudage MIG/MAG, l'usage de sources d'alimentation en courant continu, est privilégié. Trois types de systèmes sont envisageables :

Les contrôleurs progressifs (redresseurs à changeur de prise) sont les plus anciens et les plus répandus.

Les redresseurs à thyristor, qui sont fréquemment plus volumineux et offrent de meilleures performances en permettant un ajustement progressif et en étant insensibles aux fluctuations de tension du réseau électrique.

Les alimentations ondulées constituent les plus avancées technologiquement. Leurs performances sont remarquables et leur maîtrise est aisée. On les emploie fréquemment pour des soudures sur de l'aluminium ou de l'acier inoxydable en utilisant le soudage MIG pulsé.

Les équipements de soudage conventionnels fonctionnent sans contrôle. La tension de soudage fluctue uniquement en fonction des variations de la tension d'alimentation secteur. [10]

Avantages soudage MIG/MAG :

- Le fil continu est alimenté à partir d'une bobine car c'est un processus semi-automatique. Le soudage MAG aura donc moins d'arrêts et démarages par rapport aux procédés MMA et TIG.
- Les vitesses de soudage sont plus rapides que celles du MMA ou TIG et aucune élimination de flux n'est requise.
- Un fil de diamètre unique peut couvrir une large plage d'épaisseurs de matériau de base. Les diamètres de fil courants sont de 0.8 mm, 0.9mm, 1.0mm et 1.2mm.
- Le processus peut être mécanisé pour couture longitudinale et soudures circonférentielles.
- Très faible gaspillage de consommables avec 97% de récupération.
- Convient aux méthodes automatiques et manuelles.

Inconvénients soudage MIG/MAG :

- Ne peut pas être utilisé dans des conditions de courants d'air ou de vent forts sans équipement spécial.
- Le travail en position nécessite un niveau plus élevé de compétence.
- Des précautions doivent être prises lors de dépôt des cordons de racine, en utilisant le mode pulvérisation comme mode de transfert.[10]

II.5. Procédés de soudage avancés

II.5.1. Soudage laser

- Définition et principe de fonctionnement du soudage au laser

Le soudage laser est la technique qui permet d'assembler plusieurs composants métalliques à l'aide d'un faisceau laser concentré.

Par conséquent, le laser, ou faisceau laser, est une source de chaleur hautement concentrée qui facilite des soudures étroites et profondes à un rythme soutenu. Par ailleurs, le faisceau laser est dirigé vers la tête de soudage depuis la source à l'aide d'un ensemble de miroirs ou via une fibre optique. Il traverse ensuite un mécanisme de focalisation qui permet de diminuer son diamètre. Une fois focalisé, le faisceau est projeté directement sur la surface des pièces à souder. L'impact d'un faisceau laser sur la matière provient de son absorption en surface qui se convertit en chaleur. Le procédé de soudure au laser est défini par des densités de puissance laser élevées, allant de 1 à 20 MW/cm².[12]

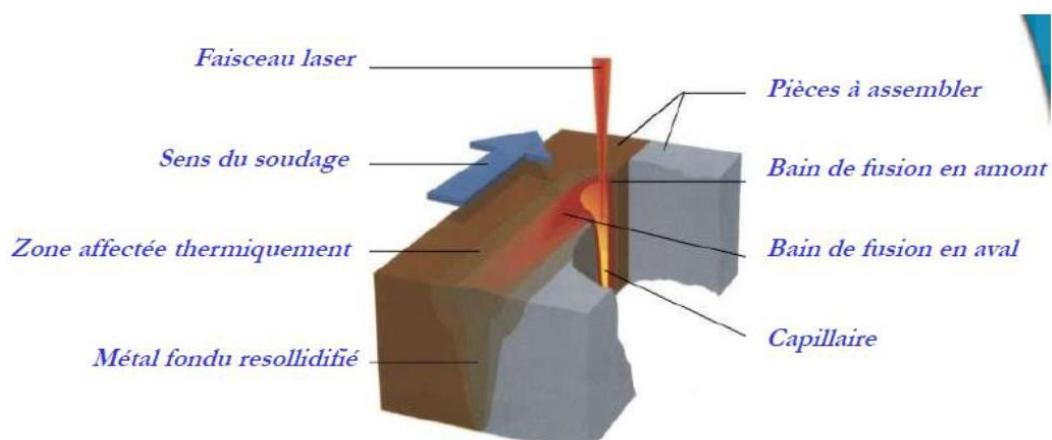


Figure II.14 : vue schématique de l'interaction faisceau-matière pendant le soudage au laser[12]

- Les différents types de soudages au laser

On distingue deux types de soudage au laser :

a. Le soudage laser par conduction :

Ce genre de soudage demande une densité de puissance basse (< 1 MW/cm²). En principe, ce procédé est similaire au soudage traditionnel, les faibles densités de puissance utilisées

n'ayant qu'un impact superficiel sur le métal à souder. Par conséquent, les cordons de soudure réalisés sont peu profonds (< 3 mm) et étroits. Contrairement aux méthodes traditionnelles, le soudage laser par conduction offre la possibilité d'obtenir des zones affectées thermiquement (ZAT) plus restreintes, ce qui réduit significativement les déformations dues à la chaleur de la tôle. C'est l'avantage majeur de ce genre de soudure laser par rapport aux autres méthodes traditionnelles de soudage.[12]

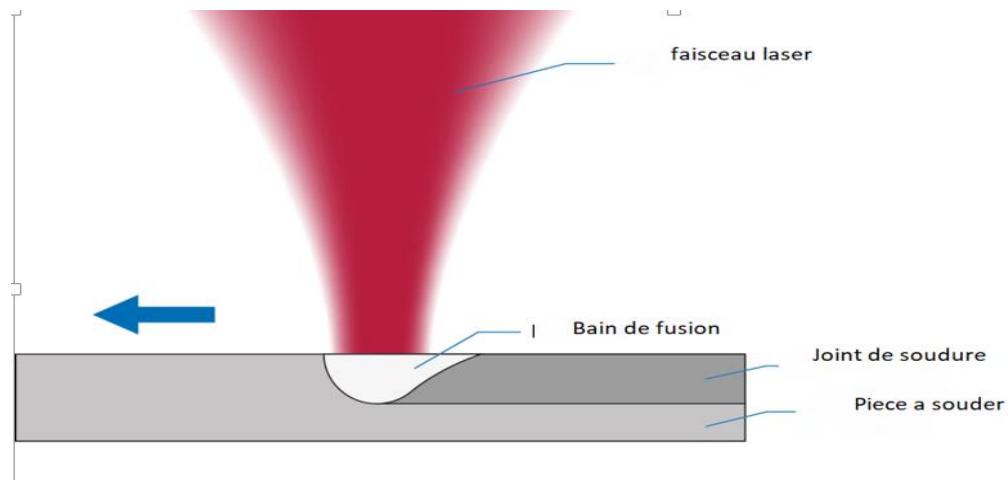


Figure II.15: le soudage au laser par conduction[12]

Le soudage laser de forte profondeur

Ce type de soudage requiert des densités de puissance laser à la surface du matériau considérablement plus importantes ($>5 \text{ MW/cm}^2$) . Ce procédé implique une fourniture substantielle d'énergie à la surface du matériau, ce qui fait dépasser sa température au-delà de son point de vaporisation. La détente de cette phase vapeur entraîne une pression régressive qui plonge localement le bain de métal en fusion dans la région d'interaction. Un mince et profond filament de vapeur se crée alors dans le liquide.

À l'instar du soudage laser par conduction, le soudage laser à grande profondeur maintient une zone affectée thermiquement (ZAT) restreinte. Quand le faisceau progresse le long de la ligne de soudure, le métal liquéfié est repoussé vers l'arrière, comblant ainsi le capillaire pour former un cordon de soudure et garantissant l'intégrité métallurgique des pièces.

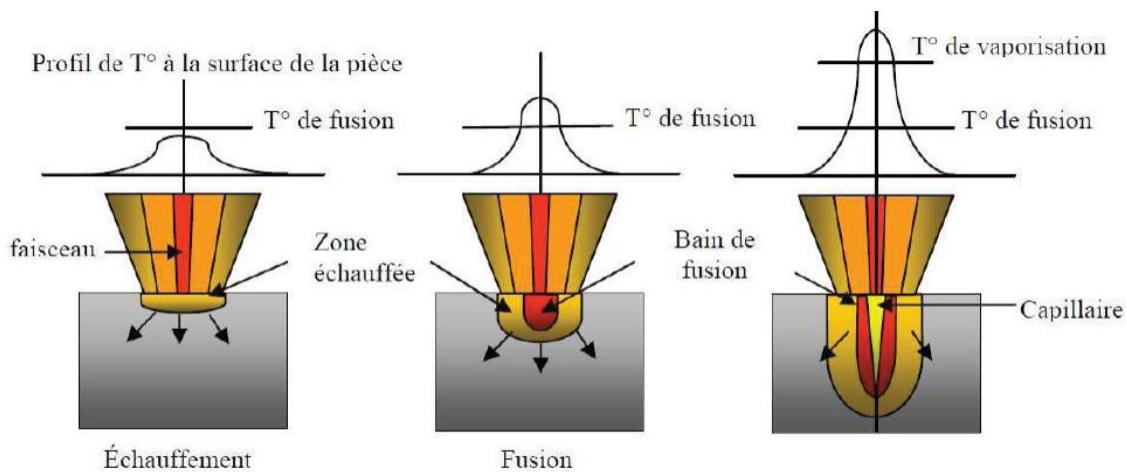


Figure II.16 : le soudage laser de forte profondeur [12]

Avantages de soudage laser :

- Vitesse du processus, absence de métal supplémentaire.
- Précision et propreté.
- Possibilité d'assembler divers matériaux.
- L'espace minimal requis pour permettre l'accès du faisceau à la pièce.
- La maîtrise importante des projections.
- Les distorsions très minimales, ZAT diminuée.
- L'option de soudage par transparence.
- La capacité de réaliser des joints totalement étanches
- Le joint soudé présente une bonne résistance mécanique.

Désavantages soudage laser :

- Le coût d'acquisition et le coût de maintenance sont extrêmement élevés.
- Niveau crucial de formation des opérateurs.
- Niveau de précision nécessaire pour la préparation des joints.
- Aspects de sécurité (rayonnement invisible et énergétique) avec l'utilisation d'équipements de protection appropriés, très chers.
- Occasionnellement, des problèmes métallurgiques surviennent en raison du taux élevé de refroidissement.[12]

II.5.2. Soudage par friction malaxage FSW (Friction StirWelding):

Soudage friction :

Le soudage par friction est une technique de soudage qui consiste à joindre les surfaces à souder en les frottant l'une contre l'autre, et ce, sous une pression maîtrisée. La friction entre les pièces à unir génère de la chaleur. La température à la surface de contact s'élève sans toutefois atteindre le point de fusion. Lorsque la température souhaitée est obtenue, le frottement est interrompu et les pièces qui ont été rendues plastiques sont comprimées ensemble pour réaliser l'assemblage. Grâce au mouvement relatif, les impuretés ou les oxydes sont ôtés de la région de la soudure. Pour tous les processus qui reposent sur le frottement, les variables à surveiller sont la force de contact, la vitesse relative et la durée du frottement.[13]

Avantages :

- Assemblages de grande qualité, dotés d'une structure métallurgique solide, car le matériau n'est pas exposé à la fusion.
- Méthode de soudage « en une seule fois ».
- Aucun traitement particulier des pièces n'est nécessaire.
- Les déformations après soudage sont minimes grâce au court délai de soudage et à la température maximale réduite.
- Il est possible de souder des pièces de sections très variées, à condition d'adopter certaines précautions.
- Les matériaux qui ne peuvent être soudés avec d'autres méthodes sont susceptibles d'être soudés grâce à la technique de friction, comme c'est le cas pour l'aluminium ou le cuivre sur l'acier.
- Excellente capacité de reproduction et possibilités d'automatisation.
- Aucune nécessité d'ajout de métaux. [13]
- **Soudage par friction-malaxage**

La technique de soudage par friction-malaxage (FSW), a été développée et protégée par The Welding Institute (UK). Dans le processus de soudage par friction-malaxage, un instrument tournant comportant un pion profilé et un épaulement est enfoncé dans le matériau jusqu'à ce que l'épaulement atteigne la surface du matériau à souder. Par conséquent, la substance est

réchauffée par frottement à des températures qui la rendent librement modelable sans se transformer en liquide.

Lorsque l'outil progresse entre les plaques, la matière se déplace de l'avant vers l'arrière du pion afin de créer le joint soudé.[13]

Avantages

- absence de fissures à chaud ou de porosités.
- pas d'utilisation de gaz de protection ou de métaux ajoutés.
- préparation des joints restreinte (seulement le dégraissage).
- Faible adoucissement ou déformation.
- Méthode entièrement automatisée.
- soudure de qualité stable.
- haute productivité
- large gamme d'épaisseurs pouvant être soudées en une seule opération (0,3 mm à 75 mm) [13]

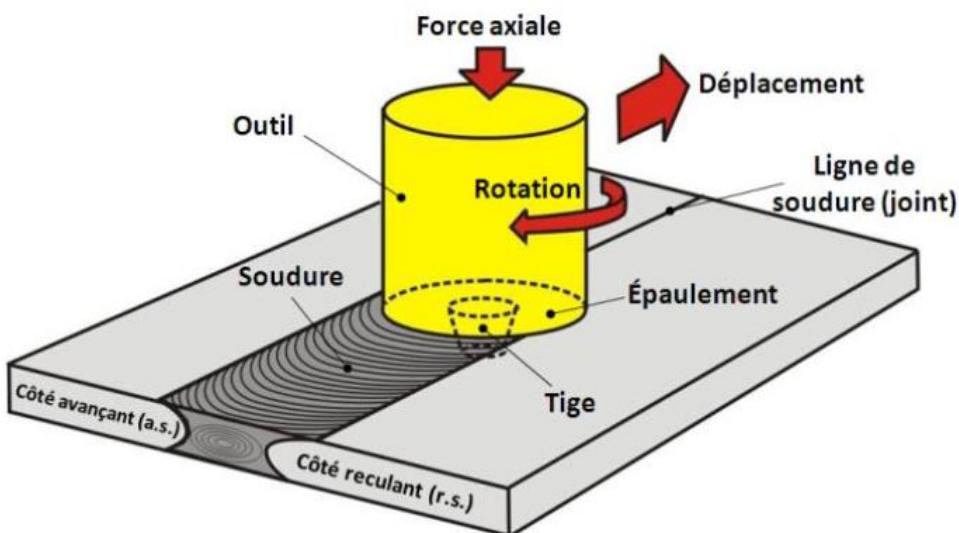


Figure II.17 : illustration du principe de soudage par friction malaxage. [13]

II.6. Les procédés hybrides

II.6.1. Le procédé de soudage hybride laser/MIG-MAG

Très récemment, l'association des deux procédés de soudage a présenté un intérêt auprès des industriels. En effet, le soudage hybride permet de cumuler les avantages des deux procédés.

Définition et principe du soudage hybride laser/MIG-MAG :

Le soudage hybride fait appel à l'association d'un faisceau laser et d'un arc électrique traditionnel (MIG/MAG) dans une zone de fabrication partagée. Ce procédé offre de nombreux bénéfices : en plus des atouts de chaque technique employée, il procure une meilleure pénétration et une vitesse accrue. Ceci résulte de la combinaison de l'arc et du laser dans un même bain. De plus, la taille du bain obtenu est supérieure à celle des autres techniques, ce qui autorise le gaz piégé dans le bain de fusion à s'évader, diminuant ainsi le niveau de porosité une fois solidifié.[17]

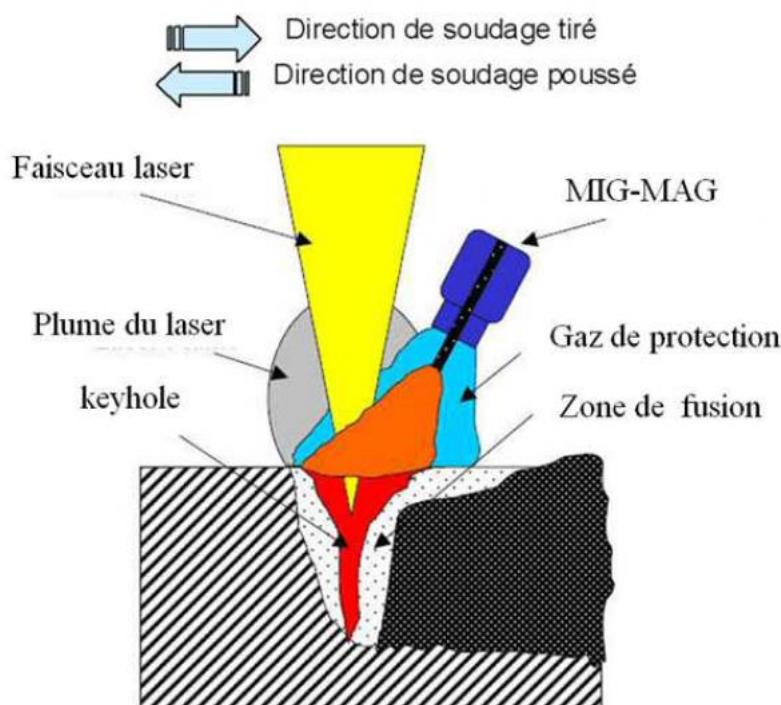


Figure II.18 : Schéma de principe de fonctionnement du soudage hybride laser/MIG-MAG[13]

Les bénéfices obtenus par la méthode hybride découlent principalement de la synergie des procédés liés. L'association de l'énergie de l'arc et du laser renforce la stabilité du processus, augmente sa productivité et améliore la qualité des cordons soudés. Par exemple, lorsqu'on associe un laser à un arc MIG/MAG, on peut envisager des vitesses de soudage considérablement plus élevées (de 2 à 10 fois supérieures aux vitesses de soudage à l'arc seul en fonction des épaisseurs concernées).[12]

II.6.2 Soudage à énergie réduite

Le soudage à faible énergie (Low Energy Welding, LEW) se caractérise par sa capacité de souder sans engendrer de déformation du substrat, sans création de zone affectée thermiquement (ZAT) et sans induire des contraintes ou déformations résiduelles dans le matériau.

Cette méthode implique l'utilisation d'un micro-arc pulsé, produit par une décharge capacitive contrôlée électroniquement, qui dépose un matériau fondu sur une surface théoriquement conductrice.

Comme le suggère son appellation, le soudage à basse énergie injecte un minimum d'énergie dans la jointure

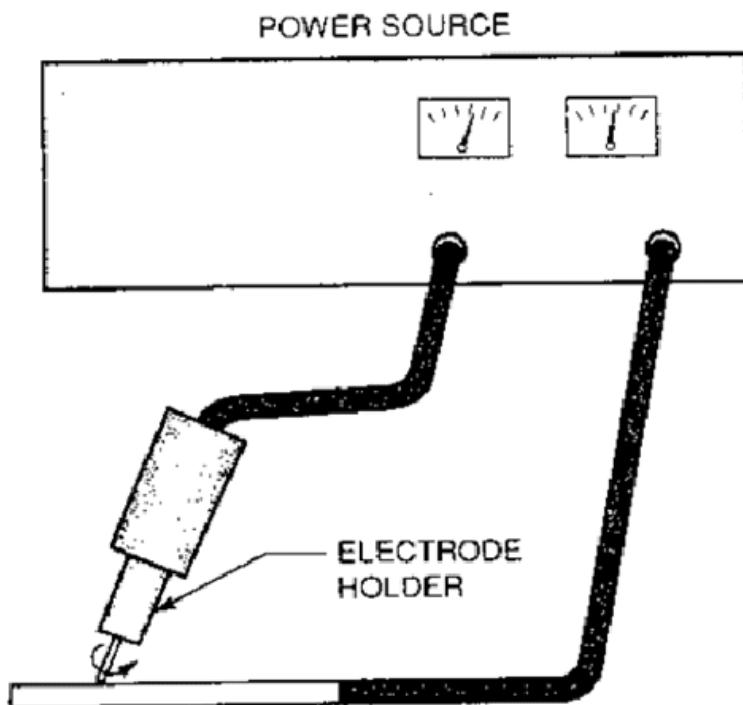


Figure II.19 : schéma d'équipements du LEW [14]

Sources de Croissance du Soudage à Faible Énergie (LEW)

Automatisation :

La méthode de soudage à faible énergie (LEW) offre une grande polyvalence. Le processus d'automatisation a également évolué en même temps que les exigences et les potentialités de l'impression métallique et de la production additive.

Le LEW, grâce à sa capacité de refroidissement rapide et à sa faible contribution thermique, diminue le risque de diffusion, ce qui offre la possibilité d'employer des matériaux moins performants traités par LEW pour répondre aux mêmes critères de performance que des alliages plus onéreux.

LEW applique le matériau en instaurant un court-circuit temporaire entre une électrode mobile, composée du matériau complémentaire ou d'additif, et le substrat. Étant donné que le court-circuit ne réchauffe qu'une infime portion du substrat proche de l'arc électrique, et que cet arc est éphémère par nature, la somme totale de chaleur produite et diffusée au substrat reste assez modeste.

Les intérêts du LEW :

Les bénéfices du LEW sont considérables dans des matériaux tels que les cermets, les matériaux réfractaires, ainsi que les matériaux réactifs à la chaleur (alliages précipités, alliages à faible point de fusion). De même pour les composés sensibles aux contraintes résiduelles tels que les composants légers et précis à parois minces. Ce procédé profite également aux industries qui cherchent à élaborer des tolérances plus élevées, des alliages complexes, des traitements thermiques sophistiqués ou à créer de nouveaux matériaux sensibles aux dommages thermiques issus des méthodes de soudage conventionnelles. De plus, le LEW présente une attractivité économique manifeste en raison de ses coûts d'investissement inférieurs comparés à d'autres méthodes avancées de soudage.[15]

Au cours de ses premières années, le LEW était principalement employé pour la réparation et le revêtement de matrices, d'outils et de carbures de grande valeur. Il est souvent possible de réaliser des applications simples à l'extérieur, sans avoir besoin de gaz inertes, en n'utilisant qu'une tension domestique. Le LEW est pratique à transporter, facile à manipuler et représente une option moins onéreuse comparée à d'autres méthodes de soudage. Le dispositif LEW, grâce à sa portabilité, rend les réparations sur place plus simples.

Nombre de ces réparations peuvent se faire rapidement et à moindre coût, sur place, avec un minimum de formation ou de préparation. L'augmentation rapide des demandes de brevets liées au LEW ces dernières années témoigne de son adoption accrue et de l'élargissement des études sur ses potentialités.[15]

Contrôle Numérique et en Ligne du Soudage à Faible Énergie (LEW) :

Ce qui est innovant, c'est l'accroissement du contrôle numérique programmable et de la surveillance en ligne du procédé LEW lui-même. Les équipements LEW les plus récents et

avancés proposent un contrôle minutieux de la vitesse de charge, des modes de décharge ainsi qu'une supervision en direct de la tension et de la fréquence. Des réglages de vitesse et de mode de mouvement sont disponibles sur les applicateurs LEW pour s'ajuster à différentes applications. Des options variées d'alimentation sont aussi proposées pour s'adapter aux besoins particuliers des matériaux.[15]

II.7. Perspectives futures du soudage des inox

Le soudage des aciers inoxydables est en développement sans cesse, stimulé par les avancées technologiques, les normes environnementales strictes et la demande grandissante du secteur industriel.

On en mentionne quelques axes principaux :

- Robotisation et automatisation

Les robots de soudage trouvent leur application dans divers domaines, tels que le soudage MIG/MAG, le soudage TIG, le soudage par points et le soudage au laser. Ils sont particulièrement utiles pour accomplir les tâches qui demandent une qualité de soudure stable sur le long terme et une exactitude lors de l'assemblage de pièces petites ou complexes. Ils offrent une souplesse qui leur donne la capacité de s'ajuster à diverses procédures de soudage. On peut configurer les robots pour réaliser des séquences précises de soudage et de soudure dans n'importe quelle position.

-Soudage par intelligence artificielle (IA) :

Le soudage des aciers inoxydables grâce à l'intelligence artificielle (IA) représente une technique de pointe qui fait appel à des algorithmes de machine learning, des capteurs contrôlés et des systèmes robotiques afin de gérer, perfectionner et superviser en direct les paramètres de soudure des inox.

L'intelligence artificielle offre la capacité d'examiner des données complexes (comme la température, la composition de l'alliage, la géométrie des joints, etc.) et de modifier le processus de manière dynamique afin de :

- supprimer les anomalies (porosités, fissures, déformations).
- Améliorer la répétabilité (soudure identique en série).
- Diminuer les dépenses (réduction des déchets, économies d'énergie et de matière).

Progrès dans les alliages et traitements thermiques :

En innovant dans la formulation des alliages inoxydables, il serait possible de créer des matériaux plus adaptés au soudage, moins sensibles aux fissures et aux imperfections de fusion.

Ces progrès rendraient les processus plus simples tout en assurant des joints de plus grande fiabilité.

De même, l'utilisation de traitements thermiques après la soudure, tels que le recuit ou le vieillissement contrôlé, pourrait devenir une pratique standard. Ces méthodes pourraient durablement améliorer la résistance à la corrosion et la solidité des joints soudés en inox, même dans les conditions environnementales les plus rigoureuses.

Développement de techniques sans gaz de protection :

En raison des avancées dans les systèmes de sécurité, il est possible que certains procédés de soudage de l'inox n'aient plus besoin de gaz inertes - une amélioration significative pour diminuer les dépenses.

Réduction de l'empreinte carbone et impact environnemental :

Il sera indispensable de passer à des techniques de soudage plus écologiques. En optant pour des technologies moins consommatoires d'énergie (comme le soudage laser ou par friction-malaxage) et en privilégiant l'utilisation de matériaux recyclables, le secteur industriel pourrait considérablement diminuer ses émissions de CO₂ et sa dépense énergétique. En associant ces avancées à une gestion optimisée des ressources, on parviendra finalement à concilier efficacité technique et responsabilité environnementale, un équilibre essentiel pour se conformer aux exigences futures.

En résumé :

La tendance dans le soudage des aciers inoxydables se dirige vers une méthode où l'innovation technologique, la durabilité et la numérisation sont étroitement liées. Pour relever les défis des industries futures, les recherches à venir devront se baser sur une approche multidisciplinaire, qui combine des domaines tels que la science des matériaux, la robotique et l'intelligence artificielle. L'avancement des techniques à faible consommation d'énergie et l'apparition de matériaux intelligents vont créer des opportunités pour des applications qui semblent encore éloignées, tout en contribuant à la diminution de l'impact environnemental.

Chapitre III

Paramètres de soudage et contrôle qualité

Les paramètres de soudage définissent la manière dont le métal de base et le métal d'apport interagissent pendant le processus de soudage. Il est essentiel d'ajuster ces paramètres avec précision pour assurer des soudures solides, pérennes et esthétiques.

Généralités physiques

Dans un environnement gazeux, un arc électrique peut être initié et soutenu entre deux électrodes placées à un potentiel approprié. L'anode, qui constitue l'une des deux électrodes, est branchée au terminal positif d'une source de courant. La cathode, l'autre électrode, est reliée au terminal négatif. En raison du potentiel électrique différentiel entre les deux électrodes, qui sont très proches l'une de l'autre, des électrons surgissent de la cathode et sont attirés par l'anode. Au cours de leur parcours dans le milieu gazeux, les électrons libèrent d'autres électrons lorsqu'ils heurtent les atomes du gaz. Cette réaction en chaîne facilite la mise en place de l'arc. Dans le contexte du soudage à l'arc en atmosphère protégée, on identifie deux catégories d'arc :

-Soudage TIG

Il s'agit d'un arc simple créé dans une ambiance de gaz. Il n'y a pas de vapeurs métalliques, toutes les particules qui transportent le courant proviennent de l'ionisation du gaz.

-Soudage MIG MAG

L'arc est réalisé par transfert de métal. Contrairement au soudage TIG, une forte concentration de vapeurs métalliques fournit la majorité des particules chargées électriquement.[16]

III.1.Role des paramètres électriques en soudage

III.1.1.Intensité du Courant :

Lors d'un processus de soudage, notamment avec le soudage MIG/MAG ou d'autres techniques à l'arc, l'intensité du courant électrique employé a un impact crucial sur la qualité, la durabilité et la structure de la soudure. Ce paramètre a un impact direct sur le volume de chaleur transféré au matériau, ce qui influence la profondeur de soudage, la création du cordon de soudure, la zone affectée par la chaleur (ZAT) et les caractéristiques mécaniques finales de l'assemblage.[17]

Effets d'une intensité de courant élevée :

L'arc électrique génère une plus grande quantité d'énergie thermique à mesure que sa température s'élève.

Cela permet une intégration plus profonde du métal d'apport dans le métal de base, ce qui est généralement souhaité pour souder des épaisseurs considérables ou assurer une grande résistance structurelle.

Cependant, cette situation peut engendrer divers risques, notamment :

Un échauffement du matériau, susceptible de provoquer une déformation excessive, surtout sur les composants minces ou les aciers inoxydables sensibles à la dilatation.

Une élévation excessive de la ZAT entraîne une détérioration des propriétés mécaniques et de la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable.

Si la régulation thermique n'est pas strictement appliquée, cela pourrait entraîner la formation de microfissures, de porosités ou de régions de vulnérabilité.[17]

Effets d'une intensité de courant trop faible

Une intensité trop basse entraîne :

- Une température inadéquate pour garantir une fusion appropriée entre le métal d'apport et le métal de base.
- Une infiltration trop superficielle, ce qui compromet la robustesse mécanique de la soudure.
- Il existe des risques de collage, c'est-à-dire une soudure sans fusion intégrale entre les bords de la jointure.
- L'apparition de défauts visuels tels que des soudures irrégulières, des manques de matière ou des cordons excessivement convexes.
- La fusion insuffisante peut augmenter le risque de corrosion intergranulaire en favorisant la formation de zones appauvries en chrome.[11]

III.1.2 Tension de l'Arc :

La tension de l'arc, mesurée en volts (V), est un élément essentiel du processus de soudage à l'arc (MIG/MAG, TIG, etc.). Elle s'associe à l'intensité du courant pour déterminer la puissance et la longueur de l'arc et influence la stabilité du bain de fusion ainsi que la forme du cordon soudé.

Rôle de la tension dans la stabilité de l'arc :

Un réglage approprié de la tension assure la stabilité de l'arc, ce qui est primordial pour réaliser un cordon uniforme, sans rupture ni éclaboussures.

Elle régule la distance entre l'électrode et la pièce, influençant ainsi la configuration du bain de fusion et la capacité du métal d'apport à s'accumuler de façon homogène.[11]

Une alimentation électrique stable garantit un approvisionnement en énergie cohérent, prévenant ainsi les fluctuations ou irrégularités susceptibles d'affecter la qualité de la soudure. [11]

Effets d'une tension trop élevée ou trop basse

Une tension élevée :

L'arc devient excessivement long, ce qui :

- Provoque la création d'éclaboussures et d'imperfections de surface.
- L'accroissement de la zone affectée thermiquement (ZAT) peut compromettre la résistance à la corrosion de l'acier inoxydable.

Une tension basse :

L'arc est trop court ou instable, ce qui peut entraîner :

- Réaliser un collage aléatoire du métal d'apport, avec une fusion partielle.
- Former des soudures rugueuses, présentant des zones de fusion insuffisante.
- Augmenter les risques de porosité et absence de fusion .[11]

III.2.Rôle du gaz de protection

Il préserve le bain de fusion des effets néfastes de l'air environnant, qui contient de l'oxygène, de l'azote et de l'humidité. Cela peut sembler contradictoire puisque dans certains scénarios, l'oxygène, l'hydrogène ou l'azote sont intentionnellement incorporés au gaz de protection. Cela dans le but d'améliorer la facilité d'utilisation opérationnelle, l'apparence de la soudure ou l'exploration des propriétés métallurgiques. Ces combinaisons de gaz ne sont employées que si le gaz additionnel ne provoque pas d'impact métallurgique défavorable dans le matériau. Dans le soudage à l'arc électrique sous atmosphère contrôlée, la protection par gaz peut être divisée en quatre sections :

-Protection endroit

Souvent désignée comme protection primaire, dans le but de préserver le bain de fusion des influences de l'air ambiant afin d'éviter les imperfections lors du soudage.

-Protection dite secondaire

Elle vise à sécuriser la soudure finie jusqu'à ce qu'elle soit refroidie. De ce fait, le matériau est protégé de toute réaction avec l'oxygène et l'azote.

- Protection envers

Elle prévient l'oxydation et diminue le risque de défaut dès la source. Cette tâche est accomplie par un mécanisme situé à l'arrière du joint, dans lequel un gaz est laissé s'écouler.

-Soudage en boîte à gants

Se rapporte à des usages spécifiques sur des matériaux hautement sensibles à l'oxydation. C'est un conteneur hermétique complètement rempli de gaz. Le soudeur travaille de l'extérieur du boîtier en utilisant des gants longs et flexibles. Au-delà de son rôle dans la métallurgie, le gaz doit posséder des caractéristiques adéquates pour établir des conditions idéales pour l'arc électrique :

- Faciliter un amorçage aisément
- Être facilement ionisé pour générer un arc à tension réduite
- Assurer une stabilité en racine d'arc. .[10]

Physique des gaz de soudage

Dans la gamme des gaz et mélanges gazeux, il faut prendre en compte les propriétés physiques des gaz.

Gaz	Symb. Chim.	Origines	Point ébullition°	Masse vol 15°C atm	Densité	l/m³*	Caractère chimique atmosphère contrôlée	Caractéristiques
Argon	Ar	Extrait de l'air par liquéfaction	- 185°C	1.69 kg/m³	1.38	0,83	Inerte	Faible potentiel ionisation
Hélium	He	Source naturelle du gaz naturel	- 269°C	0,169 kg/m³	0.14	0,74	Inerte	Fort potentiel ionisation
Azote	N₂	Extrait de l'air par liquéfaction	-196°C	1.17 kg/m³	0.96	0,69	Inerte T° ambiante actif en soudage	Utilisation très limitée en soudage
Dioxyde de carbone	CO₂	Synthèse chimique	-78°C	1.87 kg/m³	1.53	1,59	Inerte T° ambiante actif en soudage	Très utilisé en gaz d'addition
Oxygène	O₂	Extrait de l'air par liquéfaction	-183°C	1.35 kg/m³	1.11	0,85	Oxydant	Utilisé en mélanges < 6 %
Hydrogène	H₂	Pétrochimie Électrolyse	-253°C	0.085 kg/m³	0.07	0,84	Réducteur	Très utilisé en gaz d'addition

Tableau III .1 : les gaz de protection et leurs caractéristiques [16]

Dans les gaz employés, les gaz lourds comme l'argon et le dioxyde de carbone créent une couche couvrante au-dessus du bain de fusion. Autrement, l'hélium, l'azote et l'hydrogène ont tendance à former des tourbillons autour de la buse. C'est pourquoi le flux d'hélium doit être supérieur à celui de l'argon.

La conductivité thermique représente la transmission de chaleur qui se réalise du centre vers l'extérieur de l'arc, c'est-à-dire depuis l'axe central de l'arc où la température est la plus élevée.[16]

III.3. Contrôle qualité

III.3.1. Méthodes non destructives

Historique :

L'histoire des CND (contrôles non destructifs) débute avec l'émergence de la physique moderne à la fin du XIXe siècle, marquée par la découverte des rayons X, des courants de Foucault, etc.

C'est seulement après la Seconde Guerre mondiale que les méthodes du Contrôle Non Destructif (CND) ont connu une expansion dans le secteur industriel. Par la suite, vers les années 60/70, une dynamique intense de progrès et d'évolution des technologies CND s'est illustrée par l'évolution rapide de secteurs très sollicités tels que le génie des centrales nucléaires, l'aéronautique civile, ainsi que les plateformes offshore.

Finalement, la dernière décennie a vu l'apparition du contrôle non destructif (CND), qui n'aurait pas été possible sans le soutien d'une électronique intégrée et d'une informatique performante.[18]

Définition

:

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D) est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (par exemple : les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut). soit en cours d'utilisation (apparition de défaut).

Il faut donc déterminer quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce, et la remplacer si besoin est.

On parle aussi d'Essais Non Destructifs ou d'Examen Non Destructifs (E.N.D).

Les Contrôles Non Destructif (CND) sont des essais physiques pour l'individuation de l'éventuelle présence de défauts dans une pièce sans l'abîmer ou la détruire en évitant ainsi de la rendre inutilisable.

Les CND ont pour but de localiser les défauts d'une certaine importance et de consentir d'émettre un jugement d'acceptabilité sur les pièces examinées.

La possibilité d'étendre les contrôles à toutes les pièces d'une construction donnée permet de prévenir les incidents.

Le contrôle d'un matériel ou d'un produit peut être effectué non seulement pour détecter des défauts, mais aussi pour la détermination des caractéristiques physiques, l'examen de la structure, l'analyse de la composition.[18]

Domaine d'utilisations des méthodes de (C.N.D) :

Ces méthodes sont très utilisées dans :

- * L'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs).
- * L'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs).
- * L'industrie navale (contrôle des coques).
- * L'inspection alimentaire.
- * L'industrie de l'énergie (réacteurs, chaudières, tuyauterie, turbine, ..).
- * L'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissement ...).
- * Le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies).
- * La sidérurgie.
- * La fonderie.
- * Le génie civil et le bâtiment.[18]

Classification des défauts détectés :

Le mot défaut est subjectif et vague, mais son implication négative souligne le rôle que le contrôle non destructif joue dans la quête de qualité. En réalité, identifier une anomalie dans un composant implique, d'un point de vue physique, de mettre en lumière une disparité matérielle, un changement localisé de propriété physique ou chimique qui pourrait nuire à son utilisation appropriée. On peut classifier les défauts en deux principales catégories en fonction de leur localisation : les défauts de surface et les défauts internes.

-Les défauts de surface :

Accessibles à l'observation directe, mais pas toujours visibles à l'œil nu. Ils peuvent être classés en deux catégories distinctes :

a) Les défauts ponctuels :

Il s'agit des défauts les plus nuisibles technologiquement, notamment les criques, piqûres et fissures, qui sont généralement susceptibles de provoquer la rupture de la pièce à long terme en initiant des fissures de fatigue. Dans le domaine des pièces métalliques, la taille de ces fissures est généralement très minime et elles deviennent préjudiciables dès que leur profondeur excède quelques dixièmes de millimètre. Cela nécessite l'utilisation de techniques non destructives sensibles pour leur identification, à l'image du ressuage, de la magnétoscopie, des courants de Foucault et des ultrasons.

b) Les défauts d'aspect :

Il s'agit d'une modification des paramètres géométriques ou physiques (rugosité, épaisseur supplémentaire) qui rend le produit hors d'usage. Dans ce contexte, la vérification visuelle est réalisable, cependant, l'objectif est de la substituer par des vérifications optiques automatisées.

-Les défauts internes :

Sont des hétérogénéités de natures, de formes, de dimensions extrêmement variées, localisées dans le volume du corps à contrôler [19]

III .3.2. Les techniques de contrôle non destructif

On a élaboré plusieurs méthodes afin de détecter des anomalies dans diverses sortes de structures et matériaux. Toutefois, toutes les méthodes ne sont pas identiques, chacune étant adaptée à l'examen d'un type spécifique de matériau.

Abréviations :

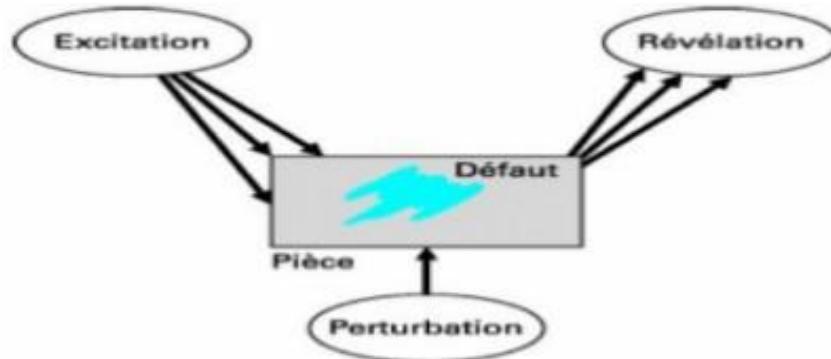
Méthode d'essaie	Abréviation
Essaie par courants Foucault	ET
Essaie par magnétoscopie	MT
Essaie ressuage	PT
Essaie par radiographie	RT
Essaie par ultrasons	UT
Contrôle visuel	VT

Tableau III.2 : abréviations des examens CND**a. Examen visuel (VT):**

Cela consiste à examiner la surface d'un objet pour détecter d'éventuelles irrégularités. Pour réaliser cette observation, il faut une source lumineuse dont l'intensité et la longueur d'onde correspondent aux capacités naturelles de l'œil de l'opérateur effectuant le test. L'état extérieur d'une pièce peut donner des informations essentielles sur l'état de celle-ci :

- Des défauts évidents (comme des pliures, des cassures, de l'usure, de la corrosion ou fissures ouvertes).
- Des défauts cachés sous-jacents présentant une irrégularité sur la surface extérieure peut être une indication de défaut plus grave à l'intérieur.

Cette technique est essentielle lors du contrôle non destructif.[19]

**Figure III.1 : Processus mis en jeu lors d'un examen visuel.[19]****b. Ressuage (PT) :**

Cette technique révèle les irrégularités de surface sous une lumière colorée ou fluorescente. Son fonctionnement est simple et se déroule en différentes phases.

La première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. On applique alors un fluide coloré ou fluorescent, dit « pénétrant », à la surface à vérifier.

Il va se faufiler à travers les anomalies (fissures, porosités...).

Par la suite, l'excès de pénétrant est retiré grâce à un lavage approprié. Une mince couche de « révélateur » est ensuite appliquée sur la surface, ce qui吸orbe le produit pénétrant présent dans les anomalies. Cela crée une marque colorée à la surface plus étendue que l'anomalie, facilitant ainsi sa localisation.

Ces indications sont alors perceptibles sans l'aide d'un instrument. Dans divers secteurs, un pénétrant fluorescent est employé, et il se révèle sous une lumière UV.

Schéma de principe de ressuage : Le ressuage consiste à appliquer sur une surface à contrôler préalablement nettoyée, un pénétrant coloré ou fluorescent qui va pénétrer par capillarité dans les défauts débouchant, et pour faire cette opération de ressuage nous allons suivre les étapes ci-dessous:

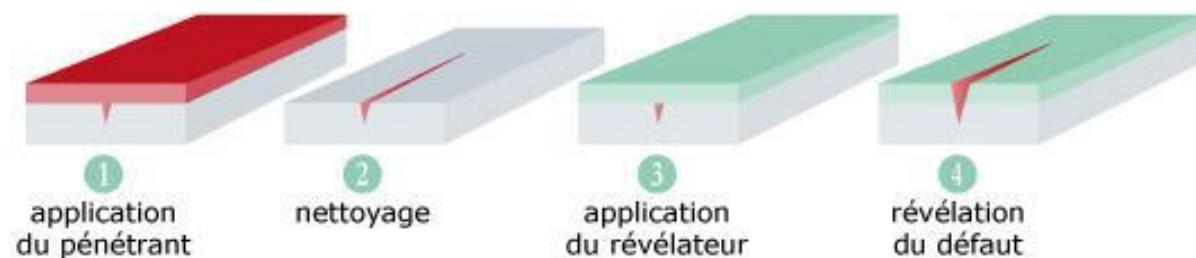


Figure III.2: Schéma de principe de ressuage [19]

Les avantages et inconvénients :

- Coût faible
 - Facilité de mise en œuvre
 - Facilité de lecture du défaut
 - Fiabilité de l'analyse
 - Impossibilité de détecter les défauts non débouchant

c. Magnétoscopie(MT) :

C'est une méthode qui révèle les imperfections visibles ou internes.

Elle concerne uniquement les matériaux et alliages ferromagnétiques. L'inspection par magnétoscopie implique l'exposition de l'objet à un champ magnétique dont la valeur est déterminée en fonction de la pièce examinée. On projette ensuite une poudre magnétique sur la surface, qui devrait se répartir uniformément si la pièce est en bon état. Des fuites magnétiques sont provoquées à leurs emplacements par les discontinuités superficielles.

[18]

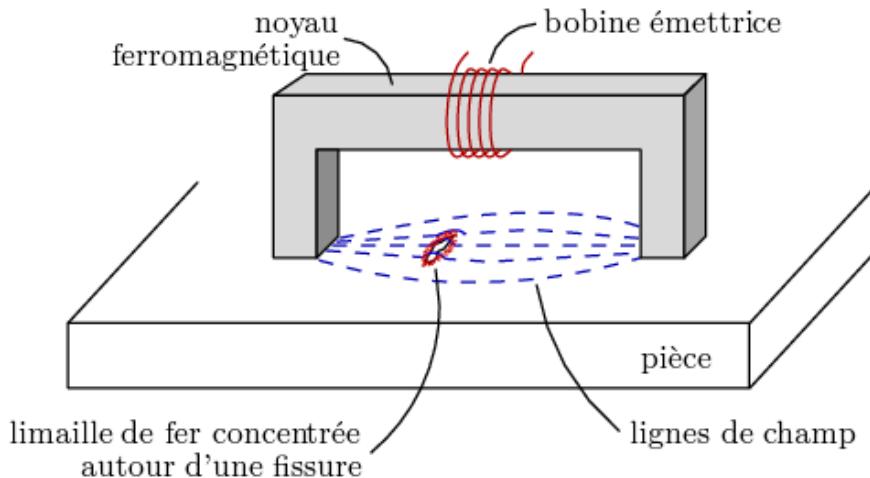


Figure III.3 : Principe de la magnétoscopie.[20]

Les avantages et inconvénients :

* Les indications de particules magnétiques sont produites directement sur la surface de la pièce où se trouve la faille.

- * Des défauts de surface ou sous la surface peuvent être détectés.
- * Les grandes surfaces des pièces complexes peuvent être inspectées rapidement.
- * Les pièces doivent être démagnétisées et nettoyées après inspection.
- * Les surfaces doivent être relativement lisses.
- * Des courants importants peuvent être nécessaires pour des pièces très imposantes.
- * Seuls les matériaux ferromagnétiques peuvent être inspectés avec cette méthode.[17]

d. Ultrasons (UT)

Définition de contrôle par ultrasons :

Le contrôle par ultrasons repose sur la propagation d'une onde vibratoire engendrée par un palpeur piézoélectrique. Elle est réfléchie dès lors qu'elle rencontre un milieu différent de la nature du milieu de propagation.

Principe de contrôle par ultrasons :

Les ultrasons, sont des ondes élastiques ; leur unique distinction réside dans leur gamme de fréquence. Si ces ondes ultrasonores sont projetées de manière perpendiculaire à la surface d'un objet à faces parallèles, elles vont se renvoyer sur la paroi opposée et revenir vers le cristal qui acheminera le signal vers l'équipement à ultrasons. Un défaut se manifeste par l'apparition d'un écho intermédiaire et/ou par une diminution de l'écho de fond.[21]

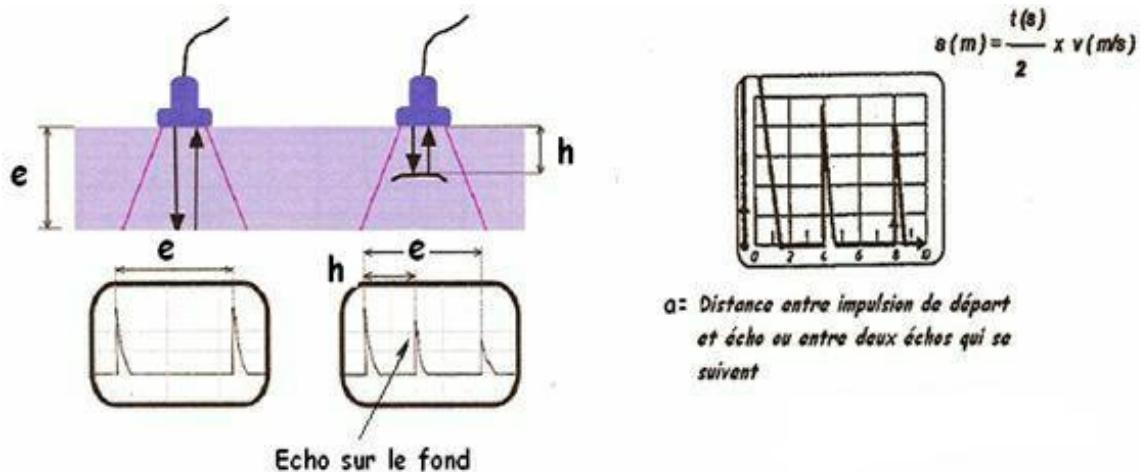


Figure III.4 : Schéma contrôle par ultrasons [19]

e. Radiographie (RT)

La radiographie industrielle est un contrôle non destructif qui consiste à traverser le composant à contrôler avec un faisceau de rayonnement électromagnétique ionisant (rayons gamma ou X). ce rayonnement sera plus ou moins absorbé par les défauts internes de la pièce, pour arriver jusqu'à l'autre côté de cette pièce, avec une intensité de rayonnement différente et s'incruster sur un film radiographique. Une fois développé, celui-ci révèlera la localisation des défauts. [18]

Les avantages et inconvénients :

- * Détection surfacique ou volumique dans tous les matériaux
- * Possibilité de radiographier des formes complexes et des épaisseurs d'acier variant de quelques micromètres à 600 mm
- * Dimensionnement et identification possibles des défauts
- * Sensibilité de détection des défauts très élevée pour certaines techniques

* Coûts de fonctionnement élevés (source de rayonnement, entretien matériel, films radiographiques, contrôles obligatoires, radioprotection ...)

* L'interprétation des radiogrammes est souvent délicate et nécessite une formation des opérateurs de niveau élevé ainsi que d'une grande expérience.[19]

f. Le contrôle par courants Foucault (ET)

Définition de de contrôle par courants Foucault :

L'inspection par courants de Foucault trouve une application dans tous les domaines de l'industrie. Il s'agit de l'une des multiples techniques d'essai électromagnétique appliquées dans le cadre de contrôles non destructifs (CND), utilisant l'induction électromagnétique pour identifier et analyser les anomalies de surface et sous-surface dans les matériaux conducteurs, en particulier les métaux.[19]

Principe de contrôle par courants Foucault :

L'inspection par courants de Foucault se base sur la génération de courants électriques dans le matériau à examiner et l'analyse de leur comportement. En faisant intervenir un champ magnétique variable à proximité d'un matériau conducteur, des courants de Foucault sont générés. Ces derniers représentent des boucles fermées de courants induits qui circulent sur des plans perpendiculaires au flux magnétique qui les a engendrés. Ils se déplacent en parallèle avec les spires de la bobine et le plan de la surface. Les champs de Foucault génèrent à leur manière un champ magnétique qui va à l'encontre du champ d'excitation. Dans ce cas, le champ d'équilibre est affaibli, entraînant une modification de l'impédance de la bobine.[19]

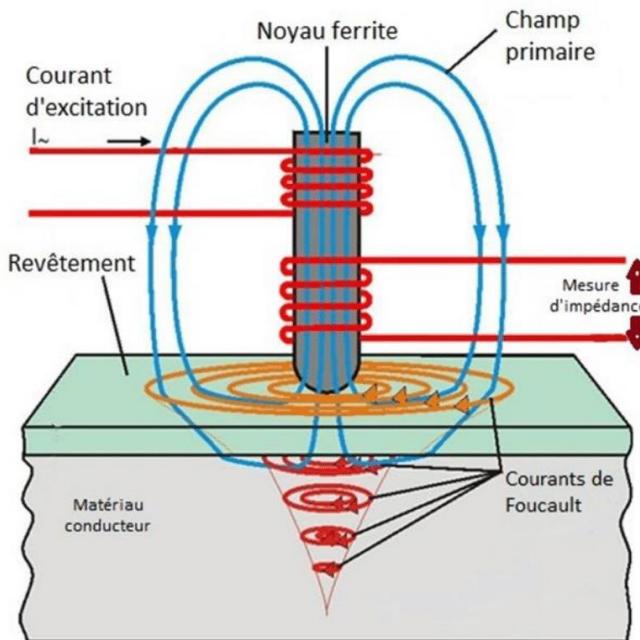


Figure III.5 : schéma de contrôle par courants de Foucault [19]

Les avantages et inconvénients :

- * Une préparation minimale des pièces est nécessaire.
- * Peut détecter les défauts de surface et ceux près de la surface.
- * Des normes de références sont nécessaires pour la configuration.
- * La finition et la rugosité de la surface peuvent interférer.
- * Méthode restreinte aux matériaux conducteurs. [19]

g.Thermographie

La thermographie est une méthode qui permet de déterminer la distribution de chaleur à l'intérieur d'une pièce.

Une quantité de chaleur représente une quantité d'énergie contenue dans la matière, et la température en constitue un indicateur quantifiable. L'analyse des thermogrammes des surfaces examinées est ce qu'on appelle la thermographie.

Des différences de température sur l'image sont causées par les discontinuités présentes dans la pièce. On obtient alors les images thermiques en utilisant une caméra thermographique.[18]

Il y a deux concepts principaux : la thermographie passive, où l'environnement fournit les variations de température, et la thermographie active ou dynamique, où l'utilisateur crée l'excitation thermique. Tandis que l'excitation optique n'affecte que la surface du matériau, l'application d'ultrasons peut augmenter la température des fissures par frottement, les rendant

ainsi plus visibles. Comme les ultrasons, l'excitation thermique par courant de Foucault a la capacité de produire une source de chaleur à l'intérieur du matériau, ce qui constitue un atout non négligeable par rapport à la technique optique. [18]

III .3.3. Essais destructifs :

Les tests destructifs représentent une catégorie d'essai employée dans le processus de fabrication, qui entraîne la destruction de l'échantillon examiné. Les tests destructifs, fréquemment employés pour vérifier la résistance, la sûreté et la longévité des produits, sont couramment utilisés pour contrôler les soudures.

Les soudures, plus précisément, font l'objet de diverses épreuves destructives lorsqu'elles sont appliquées à des produits. Elles sont testées pour leur résistance, leur capacité d'impact et leur dureté.

L'enregistrement des conditions de rupture fournit aux chercheurs des informations importantes sur l'utilisation de ce type de soudure et les conditions qui peuvent la rendre dangereuse.

Les standards internationaux définissent les dimensions des échantillons et les méthodes à suivre pour effectuer ces tests, afin d'obtenir des données concernant les sortes, les tailles et la distribution des imperfections internes, comme les soufflures, les fissures, le collage, l'insuffisance de pénétration et les inclusions solides sur la surface rompue. En ce qui concerne les soudures, elles concernent tous les types de produits en métaux d'une épaisseur minimale de 2 mm, réalisés par soudure à l'état de fusion.[22]

Méthodes d'essai de soudure destructif

III.3.3.1. Test par gravure macro

Cette technique exige le prélèvement de petits fragments de l'assemblage soudé. Ces petits échantillons sont par la suite polis sur leur coupe transversale et gravés avec un type de mélange d'acide léger, selon le matériau de base employé. L'utilisation de l'acide pour la gravure offre une représentation visuelle précise de la structure interne de la soudure.

L'examen de l'échantillon gravé permet de déterminer la profondeur d'infiltration et d'apporter des éléments probants (si nécessaire) concernant l'absence de fusion, une porosité interne ou des fissures apparentes sur la ligne de fusion (zone de transition entre le matériau soudé et celui de base).

Ce genre d'évaluation offre une vue d'ensemble de la qualité de la soudure sur toute sa longueur. Les essais de macrogravure sont aussi employés dans les études de défaillance pour repérer avec précision les problèmes de soudage, comme l'apparition de fissures.[22]

III.3.3.2.Essai de rupture de soudure d'angle

Ce genre de test implique de rompre une soudure d'angle sur un échantillon qui est soudé d'un seul côté. On applique une contrainte sur le côté non soudé de l'échantillon, généralement à l'aide d'une presse, et cette contrainte est augmentée jusqu'à la rupture de la soudure. Par la suite, l'échantillon défectueux est examiné afin de déterminer l'existence et l'étendue de toute irrégularité de soudure.

Les essais de rupture de soudure d'angle donnent une indication fiable des irrégularités le long de toute la longueur de la soudure examinée, contrairement au test de macrogravure qui ne présente qu'une vue instantanée en coupe transversale. Cette forme d'examen de soudure est capable d'identifier des défauts comme le manque de fusion, la porosité interne et les impuretés de laitier. [22]

III.3.3.3. Test de tension transversale

Une portion significative du processus repose sur les caractéristiques de traction de l'assemblage soudé. Donc, les éléments suivants doivent respecter des critères de conception comme les Propriétés de traction du métal primaire et du métal en fusion. L'essai de tension transversale confirme tout ceci en tirant sur les échantillons jusqu'à ce qu'ils se brisent, puis en divisant la charge maximale nécessaire pendant l'essai par la section transversale. L'issue est donnée en termes d'unités de tension par unité de surface.[22]

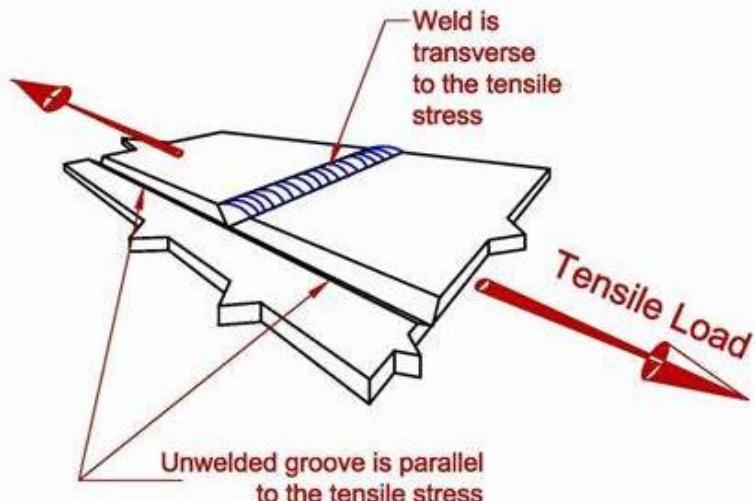


Figure III.6 : Schéma du test de tension transversale [21]

III.3.3.4.Test de pliage guidé

C'est une technique d'essai qui implique le pliage d'un échantillon à un rayon de courbure déterminé. On utilise plusieurs sortes d'essais de pliage pour juger de la souplesse et de la résistance des joints soudés. Les tests de pliage supervisés sont habituellement réalisés perpendiculairement à la ligne de soudure et peuvent être effectués sur des équipements de test comme les pistons ou dans des moules de pliage enveloppants. Les tests de pliage à l'endroit sont réalisés avec la face soudée sous tension, alors que les essais de pliage à l'envers se déroulent avec la racine soudée soumise à la tension. Au cours de l'essai de pliage sur des tôles d'épaisseur, les échantillons d'essai de pliage côté sont généralement coupés sur l'assemblage soudé et pliés avec la section transversale de la soudure en tension.

La méthode de pliage assisté est généralement utilisée dans les processus de soudage. Ce genre d'examen est spécialement utile pour repérer les anomalies de fusion du porte-fil, qui se manifestent fréquemment sur la surface de la tôle lors des tests. [22]

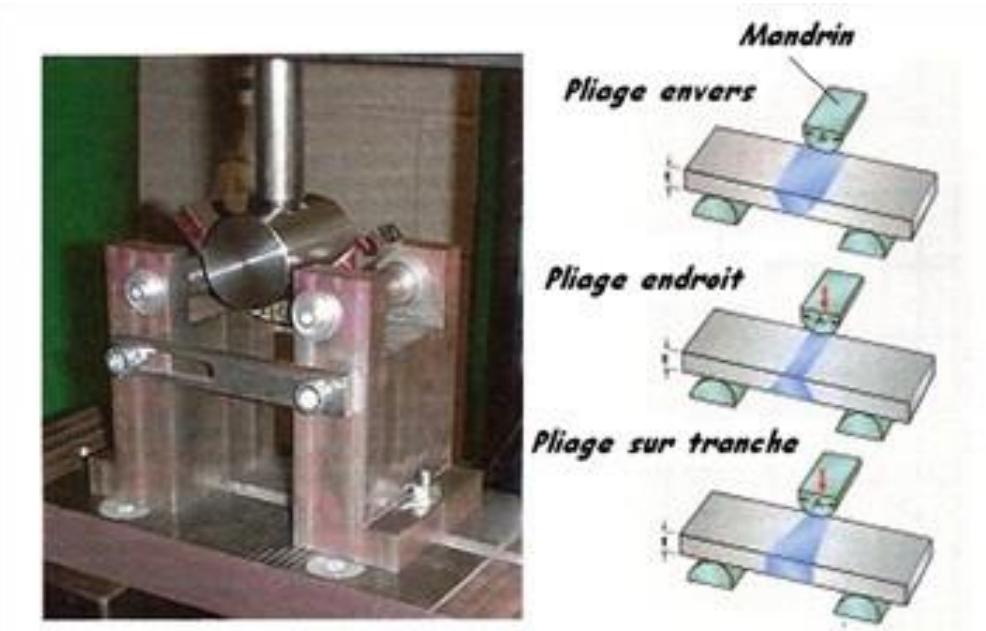


Figure III.7 : test de pliage guidé [21]

Chapitre IV

Partie expérimentale

Partie expérimentale

Introduction

Dans le cadre de la présente étude nous avons essayé d'effectuer des cordons de soudures avec des procédés différents et d'évaluer propriétés mécaniques de ces joints soudés en acier inoxydable 304.

IV.1.1 Matériaux d'étude :

Le matériau qu'on a eu est un acier inoxydable de nuance exacte inconnue. pour déterminer cette dernière on est obligé de passer par des tests supplémentaires dont la DRX (diffractions par rayons X) .

IV.1.2 Analyse DRX :

Afin d'effectuer l'analyse DRX on a préparé un échantillon de notre matériau de base de dimensions (20mm x 15mm x 7mm) puis un polissage a été effectué pour avoir une surface lisse et éliminer les impuretés de surfaces qui peuvent altérer les résultats du test.



Figure IV.1 : échantillon préparé pour l'analyse DRX

Le test a été effectué au plateau technique des analyses physico-chimiques (PTAPC)

Machine du test :

Machine : PANalytical EMPYRIAN



Figure IV.2 : machine Panalytical Empyrean

IV.1.3. Détermination de la nuance :

D'après les résultats obtenus par DRX, on peut analyser les pics caractéristiques en position 2θ allant de 0.005099997° jusqu'à 100.0000574° avec un nombre de points scanne de 3472 on peut déterminer qu'il s'agit d'un acier inoxydable

- on a un pic principal à 43.4° de 2θ qui correspond à la phase austénitique
- des pics secondaires pour l'austénitité : $50.8^\circ = 200$, $74.7^\circ = 220$, $90.5^\circ = 311$
- absence d'un pic important à 39.5° dû au Mo élimine la série 316

En prenant compte du fait que c'est une tôle plane d'environ 7mm d'épaisseur on peut le classer en tant qu'acier inoxydable 304

IV.2.L'acier inoxydable 304 :

Le matériau AISI 304(norme américaine s30400) et normalisé en europe sous NF EN 10088 est un acier austénitique à faible teneur en carbone, qui présente d'excellentes propriétés de soudage et une bonne résistance à la corrosion. Cette qualité d'acier inoxydable est légèrement magnétisable et convient au soudage.

IV.2.1. Composition chimique :

La composition chimique typique de l'acier inoxydable 304 est présente dans le tableau suivant

• Élément	• Teneur (%)
• Carbone (C)	• $\leq 0,08$
• Chrome (Cr)	• $18,0 - 20,0$
• Nickel (Ni)	• $8,0 - 10,5$
• Manganèse (Mn)	• $\leq 2,0$
• Silicium (Si)	• $\leq 1,0$
• Phosphore (P)	• $\leq 0,045$
• Soufre (S)	• $\leq 0,030$
• Fer (Fe)	• Solde (balance)

Tableau IV.1 : tableau de composition chimique de l'acier inoxydable 304**IV.2.2. Propriétés générales :**

Les propriétés physico-chimiques et mécaniques du S30400 en font un matériau de choix dans de nombreuses applications industrielles. Ses caractéristiques principales incluent :

- Excellente résistance à la corrosion, particulièrement en atmosphère humide et milieux légèrement acides.
- Très bonne formabilité et aptitude au pliage et à l'emboutissage.
- Excellente soudabilité sans besoin de traitement thermique post-soudage.
- Non magnétique à l'état recuit, légèrement magnétique après écrouissage.
- Utilisable jusqu'à 870 °C en continu et 925 °C en intermittent

IV.2.3. Applications industrielles :

- Industrie alimentaire : équipements de transformation, ustensiles, cuves.
- Construction : garde-corps, façades, visserie.
- Chimie : réacteurs, tuyauteries, échangeurs de chaleur.
- Médical : mobilier et instruments chirurgicaux non implantables.
- Électroménager, mobilier urbain, éléments décoratifs.

IV.3. Opérations de soudage

Pour toutes les opérations de soudages effectuées on utilise des échantillons rectangulaires de 100mm par 50 mm afin d'effectuer un cordon de soudure sur la longueur de 100mm.



Figure IV.3 : échantillon inox principal

IV.3.1. Soudage par électrode enrobée (MMA) :

Matériel et équipements :

Poste à souder SAFE AC 420 de 380v



Figure IV.4 : poste à souder SAFE AC 420

Électrode enrobée : électrodes inox enrobées rutiles avec la norme AWS :

E308I-16 de diamètre 3.2 mm

Courant : courant continue polarité positive (électrode en +, pièce en -)

Intensité de courant 90A

Préparation : chanfrein sur les pièces à assembler



Figure IV.5 : les deux pièces à assembler chanfreinées.

Vu l'épaisseur importante de nos pièces, on a effectué deux passes de soudage en retirant le laitier après refroidissement.



Figure IV.6 : retrait du laitier du procès MMA

IV.3.2. Soudage en TIG(1) :**a. Matériel et équipements :**

Poste SAF-FRO PRESTOTIG 210



Figure IV.7 : poste à souder TIG SAF-FRO

Réglages poste : intensité 80A

Courant continue (DC)

Polarité positive (torche +, masse de pièce en -)

Torche :



Figure IV.8 : torche de soudage TIG

Électrode : électrode en tungstène 2% thoriée diamètre 2.4 mm/ISO 6848



Figure IV.9 : électrode en tungstène

Gaz de protection : argon avec un débit de 12 l/min

Baguette d'apport : référence EA 316l diamètre 1.2mm



Figure IV.10. : Baguette d'apport TIG1

Résultats après opération de soudure :



Figure IV.11 : assemblage soudé en TIG 1

IV.3.3. Soudage en TIG(2) :

Matériels et équipements : Poste à souder ESAB Caddy TA33



Figure IV.12 : poste à souder ESAB caddy TA33

Réglages poste : intensité courant 100A

Courant continue (DC)

Polarité négative (torche -, masse de pièce en +)

Torche :



Figure IV.13 : torche de soudage ESAB

Électrode en tungstène 2% thoriée 2.4mm de diamètre ISO6848



Figure IV.14 : électrode tungstène 2% thorié

Baguette d'apport : référence EA308I diamètre : 1.6mm



Figure IV.15 : baguette d'apport TIG 2

Gaz de protection : Argon avec débit de 15l/min

Résultats après soudure :



Figure IV.16 : assemblage soude en TIG2

IV.4. Tests de dureté :

Afin d'effectuer les tests de dureté on est obligés de passer par l'étape de rectification des surfaces de nos 3 échantillons (assemblages soudés) afin d'avoir des empreintes claires et précises sur la machine

IV.4.1. Rectification de surfaces :

La rectification de surfaces a été effectué sur une rectifieuse plane, on a effectué deux passes jusqu'à obtention d'une surface adéquate pour les tests dureté.



Figure IV.17 : rectifieuse plane

Échantillon après rectification :



Figure IV.18 : échantillon après rectification

Pour chaque échantillon on a effectué un profil de dureté transversale ainsi qu'un profil de dureté du cordon de soudure, avec 7 points de repères pour les profils transversales et 4 points de repères pour les profils de cordons avec un espacement de 2mm entre chaque point.

Les tests de dureté sur nos 3 assemblages ont étaient effectuées sur la machine QNESS 250 CS evo avec une charge unifiée de 2.5.

Machine du test :



Figure IV.19 : machine d'essais de dureté QNESS 250 CS

Exemple d'une empreinte :



Figure IV.20 : exemple d'une empreinte de dureté

IV.5. Résultats et discussion :

D'après les résultats obtenus de l'ensemble des tests on peut tracer les courbes suivantes

Échantillon MMA : les points 1 et 2 sont de la cote de la plaque en dehors du cordon de soudure

-les points 3,4 et 5 sont pris dans le cordon de soudure

-les points 6 et 7 de l'autre côté du cordon de soudure

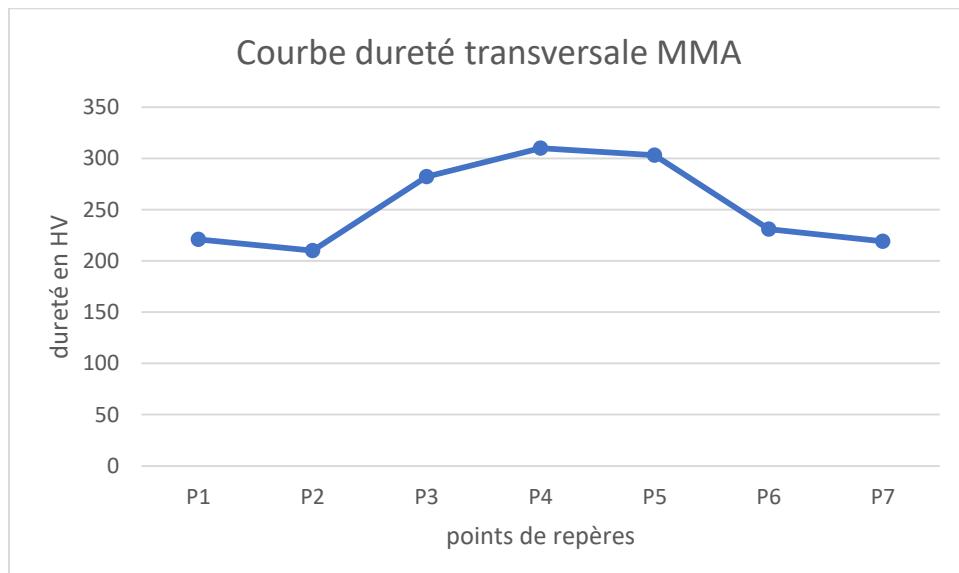


Figure IV.21 : courbe de dureté transversale MMA

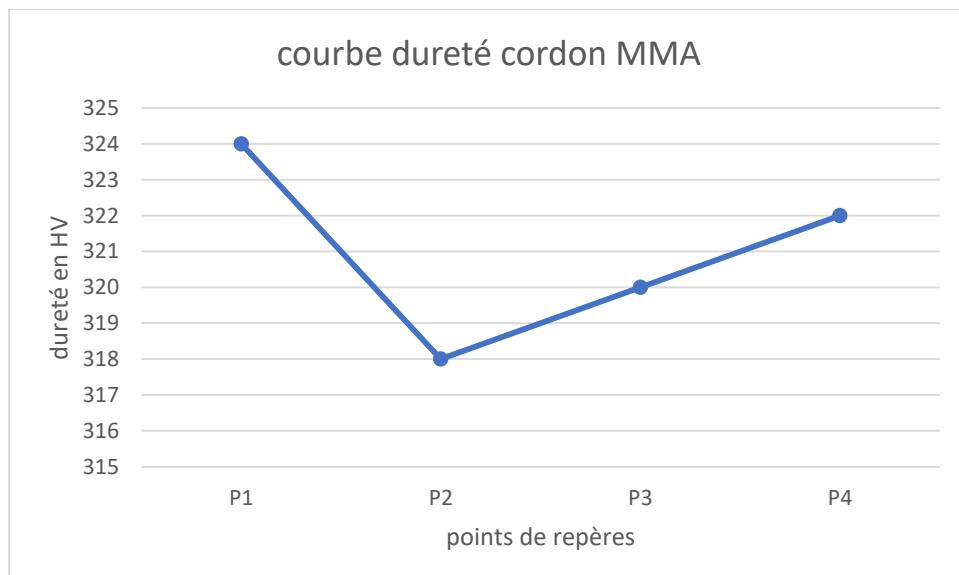


Figure IV.22 : courbe de dureté du cordon MMA

Échantillon TIG 1 : les points 1 et 2 sont de la cote de la plaque en dehors du cordon de soudure

-les points 3 et 4 sont pris dans le cordon de soudure (on n'a pas pu prendre plus vu que le cordon est étroit)

-les points 5 et 6 de l'autre côté du cordon de soudure

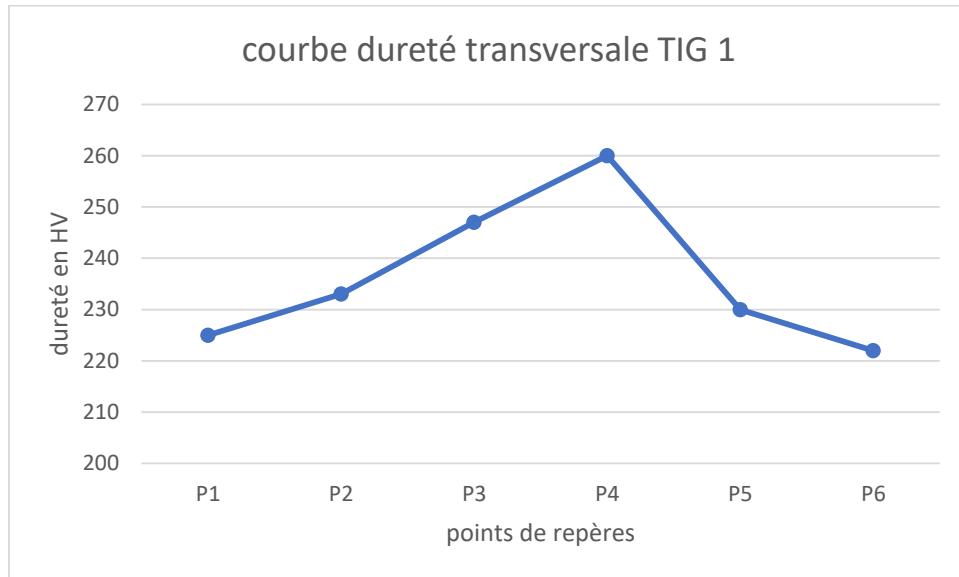


Figure IV.23 : courbe de dureté transversale TIG1

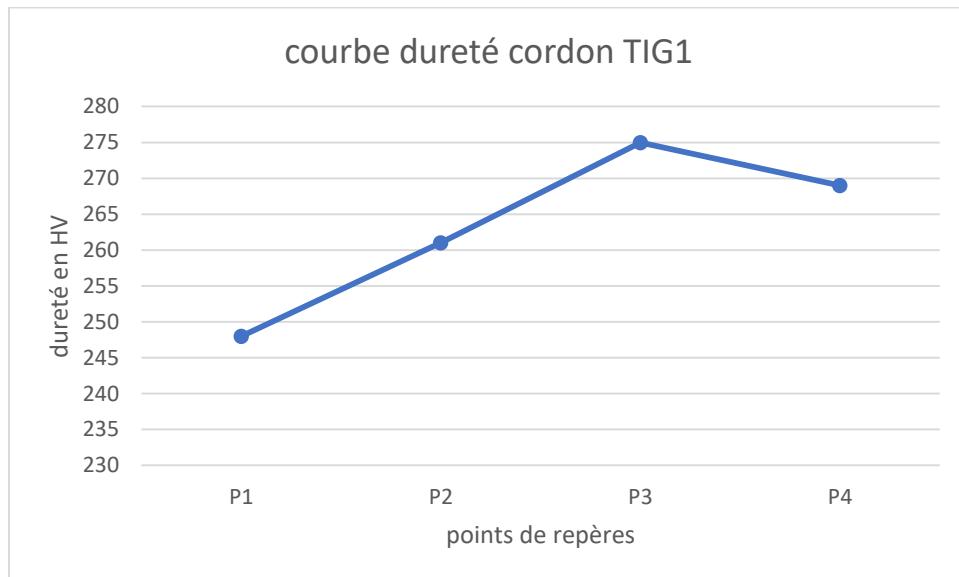


Figure IV.24 : courbe de dureté du cordon TIG1

Échantillon TIG 2 : les points 1 et 2 sont de la cote de la plaque en dehors du cordon de soudure

-les points 3,4 et 5 sont pris dans le cordon de soudure

-les points 6 et 7 de l'autre côté du cordon de soudure

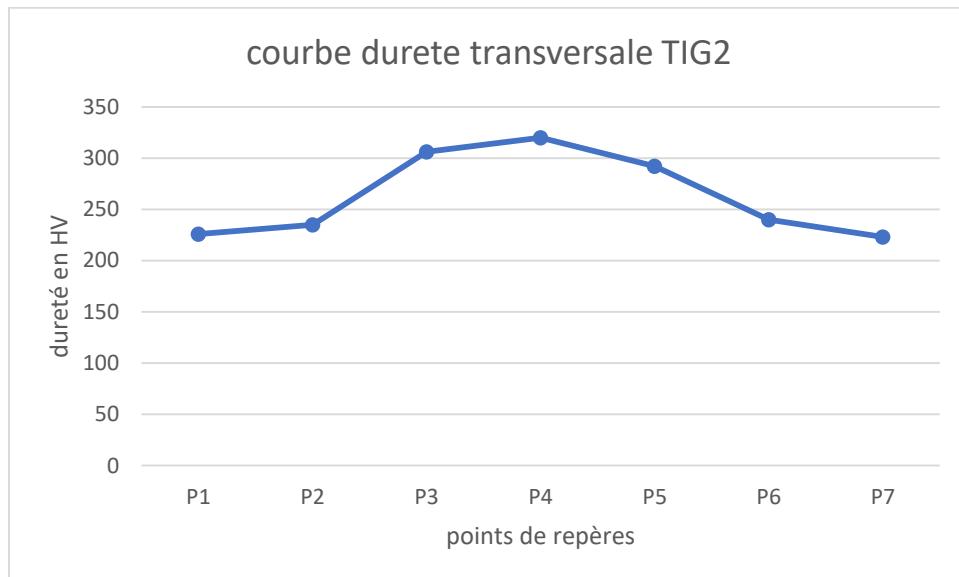


Figure IV.25 : courbe de dureté transversale TIG2

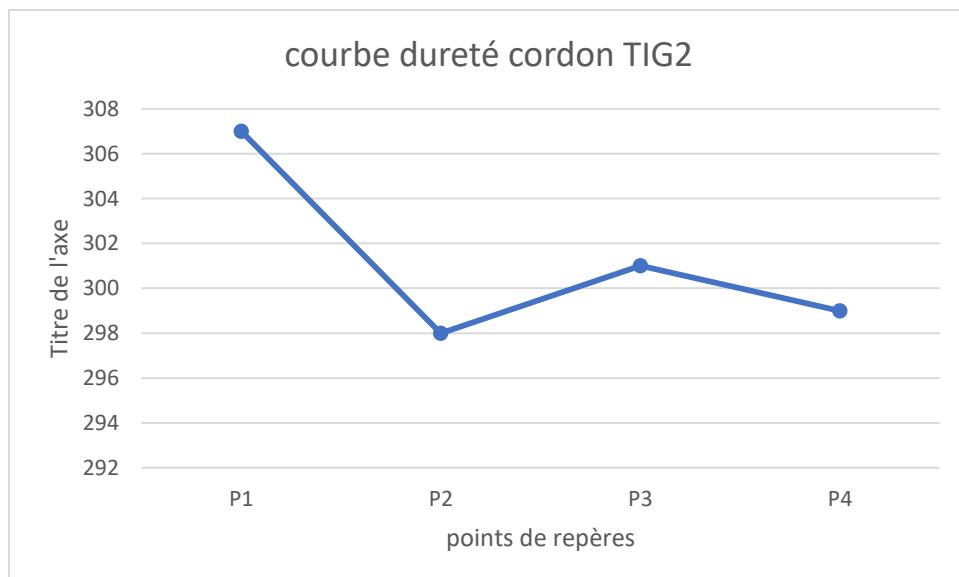


Figure IV.26 : courbe de dureté du cordon TIG2

- Comparaison des courbes de dureté transversale :

-Évolution presque identique pour les trois essais (MMA, TIG1, TIG2) :
 valeurs $\approx 200\text{HV}$ aux extrémités du cordon (extrémités de la ZAT).
 Les duretés augmentent jusqu'à des valeurs $\approx 300\text{ HV}$ au centre du cordon.

On pense que les phénomènes de fusion, puis de solidification, dans cette zone (centrale) donne une microstructure à grains fins. Alors que les zones périphériques (extrémités de la ZAT) sont juste soumises à des conditions de chauffage : la structure à gros grains (originale) est donc soumise à des conditions thermiques de coalescence des grains.

En partant du constat qu'une structure à grains fins (milieu du cordon) va donner des valeurs de dureté élevées par rapport à la même structure mais avec des gros grains, cette évolution constatée se trouve donc justifiée.

-l'évolution de dureté HV le long des cordons est presque insignifiante et ça doit être le cas. Les quelques différences en valeurs sont peut-être dues à des inclusions de laitier dans le bain de fusion.

Conclusion Général

Conclusion générale

Ce mémoire de master a fourni l'occasion d'étudier les aciers inoxydables et leur soudage, tout en examinant aussi bien les aspects théoriques que pratiques. Dans le premier chapitre, nous avons posé les fondations en caractérisant les aciers, en se focalisant sur les aciers inoxydables, leurs structures cristallines et leurs multiples usages industriels. Nous avons souligné leur rôle crucial dans divers domaines en raison de leurs propriétés mécaniques et de leur capacité à résister à la corrosion.

Le chapitre deux s'est attaché à étudier les modes de soudage fréquemment utilisées pour les aciers inoxydables, en exposant leurs principes, leurs avantages et leurs inconvénients, fournissant ainsi une vue d'ensemble des techniques appropriées à ces matériaux. Le chapitre trois a étudié les paramètres de soudage, indispensables pour assurer la qualité des assemblages, ainsi que les techniques de contrôle de qualité. Pour conclure, le chapitre quatre a introduit une recherche expérimentale dans laquelle des assemblages soudés ont été effectués, suivis de tests de dureté Vickers (HV). Les résultats obtenus ont permis d'examiner les caractéristiques mécaniques des soudures.

L'étude réalisée dans ce mémoire représente une contribution modeste mais réelle à la compréhension de l'influence des modes et paramètres de soudage sur la qualité des assemblages en acier inoxydable. En perspectives on mentionne, la mise en évidence des relations paramètres - dureté pour l'acier 304.

Ainsi que la Comparaison systématique MMA vs TIG, utile pour le choix de procédés en fonction des applications.

Ce mémoire doit être compléter avec des études complémentaires :

Une étude sur un assemblage avec MIG/MAG

Des tests mécaniques supplémentaires (tests de traction, test de compression)

Ainsi que l'étude microstructure, des tests DRX supplémentaires.

Ces perspectives illustrent que le soudage des aciers inoxydables est toujours un secteur en progression, à l'intersection de la métallurgie, de la mécanique, de l'ingénierie des procédés et des technologies avancées. Il propose un environnement fertile à la recherche appliquée, en réponse aux défis industriels présents et à venir.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] : F.ZOHRA FAIZI «Amélioration des propriétés micro structurelle et mécanique d'un acier soudé» Mémoire master .université Biskra 2020
- [2] : A.DJEBARAI ET ADJOU.T «caractérisation des couches de cémentations déposées sur l'acier XL38»Mémoire master .université bordj Bou Arreridj 2022
- [3] : Y.GHERIANI «soudage des aciers inox pour transport hydrocarbures »Mémoire master université biska2022
- [6] : M.POULAIN «micrographes présentant la microstructure ferritique de l'acier» Article scientifique
- [7] : R.MESLIER «la soudure autogène au chalumeau et a l'arc »Livre
- [8] : K.FEDAOUI «cours de technologies de soudage »École nationale de Sousse
- [9] : S.BENSAADA «le soudage» Article scientifiques novembre 2019
- [10] :K.WEMAN «Procédés de soudage » Dunod, Paris, 2020
- [11] : F.C.GVI CHARD «la soudure a l'arc électrique »Livre.
- [12] :E.LE GUEN «étude du procédés de soudage hybride laser /MAG» Thèse doctorat université. BRETAGNE-SUD 2010
- [13] : IR.KOEN FAEN : «le soudage par friction un procédé de soudage multiple et innovateur »Recherche 2017
- [14]: S.KEITAN «the process fundamentals and parameters of LEW» article scientifique2008
- [15]: N.SCOTCHMER ET. F .JIAO «recent developments in low energy welding» Article scientifique 2017
- [18] : S.E.KADOUS «control non destructifs des joints de soudure »Mémoire master .université annaba2021
- [19] : M.BOUKARA «inspection et contrôle des assemblages soudés par CND» Mémoire master université TLEMCEN
- [20] : C.RAVAT «conception de multiplicateurs a courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif »Thèse doctorat Université Paris-Sud décembre 2008.
- [22] : D.ABBOU KHEIRA «panorama des méthodes de contrôle de qualité en temps réel de soudage» mémoire master .université 2022
- [23] : C. DE RAGO «rocdacier soudage » Autoédition, 2022

Webographie

[4] : images trouvées via google images, disponibles sur <https://www.rocdacier.com> consultés le 12/13/14 mai 2025

[16]: les gaz de protection et leurs caractéristiques, <https://www.soudeurs.com> consulté le 28/04/2025

[17]: Low energy welding in modern days, <https://www.cabinetnpm.com> consulté le 30/04/2025

[21] : Les méthodes du contrôle non destructif <https://www.mpp.be> consulte le 25/05/2025

Résumé

Ce mémoire aborde les modes et les paramètres de soudage utilisés pour les aciers inoxydables, caractérisés par leur résistance à la corrosion et leurs excellentes propriétés mécaniques. Suite à l'exposition des diverses catégories d'aciers inoxydables et des techniques de soudage couramment employées (TIG, MIG/MAG, MMA), l'analyse s'est focalisée sur l'impact des paramètres opérationnels sur la qualité des assemblages.

Des tests expérimentaux, y compris des mesures de dureté Vickers (HV), ont été menés pour déterminer l'impact du soudage sur les propriétés mécaniques des assemblages. Les résultats obtenus soulignent l'importance d'un réglage précis des paramètres pour assurer la performance et la longévité des soudures.

Mots-clés : Soudage, Aciers inoxydables, TIG,MMA,MIG/MAG, dureté HV

Abstract

This thesis addresses the welding modes and parameters used for stainless steels, known for their corrosion resistance and excellent mechanical properties. Following an overview of the different categories of stainless steels and commonly used welding techniques (TIG, MIG/MAG, MMA), the analysis focused on the impact of operational parameters on the quality of the weld joints.

Experimental tests, including Vickers hardness (HV) measurements, were carried out to determine the effect of welding on the mechanical properties of the joints. The results highlight the importance of precise parameter adjustment to ensure weld performance and longevity.

Keywords: Welding, Stainless steels, TIG, MMA, MIG/MAG, HV hardness