

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science de l'ingénierat
Département : Métallurgie et génie de matériau
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Métallurgie
Spécialité : Génie Métallurgique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Soudage des aciers inoxydables austénitiques par le
procédé TIG**

Présenté par : *AOUNI Aimen*

Encadrant : *BOUZID Kheireddine* Dr Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance :

KHETTACHE Abdelkader	Pr	UBM Annaba	Président
BOUZID Kheireddine	Dr	UBM Annaba	Encadrant
HADJI Alli	Pr	UBM Annaba	Examineur
MEBAREK Abdelmalek	Pr	UBM Annaba	Deuxième examinateur

Année Universitaire : 2019/2020

DEDICACE

Je dédie ce Mémoire

A ma mère et mon père pour leur soutien indéfectible,

A la mémoire de mon beau-père Mohamed, ainsi qu'à ma belle-mère pour son continuel soutien et encouragement,

A mes frères et sœurs, Alla, Ahlem, Nesrine

A tous mes proches, Mokdad Abdenour, Aymen, Nour

A tous mes enseignants du primaire à l'université notamment mon encadreur D^r Kheir-Eddine BOUZID,

A toute la promotion MasterII 2019/2020.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier Mr le **Pr A. KITTACHE** d'avoir accepté de présider mon jury, je lui exprime mon éloge et gratitude pour l'encouragement et l'attention constante qu'il a portés à cette étude.

Je remercie tout particulièrement mon directeur de mémoire Mr **Dr K. BOUZID**, pour son encadrement, sa confiance, pour ses conseils techniques qu'il m'a prodigués et pour l'encouragement et l'attention constante qu'il a porté à cette étude, et pour être rendu disponible tout au long de mes travaux je lui exprime de tout mon cœur respect et considération dans les moments les plus difficiles que j'ai rencontrés.

Je suis très sensible à l'intérêt que Mr **Pr A. HADJI**, en acceptant de faire partie de ce jury et je l'en remercie vivement.

Mes remerciements vont également à Mr **Pr A. MEBAREK** pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de faire partie de ce jury malgré ces occupations, j'exprime mes sentiments très respectueux et reconnaissants.

Je tiens à remercier **Mr BENLAMNOUAR Mohammed Farid, Mr IDDIR Mohamed, Mr SOUALILI Med Amine** du centre de soudage et contrôle CSC, pour leurs aides précieuses qu'il m'a portée tout au long de la réalisation de la soudure, pour leurs patiences, leurs très grandes disponibilités mais également pour leur gentillesse.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
I.1 Historique des aciers inoxydables	3
I.2 Généralités sur les aciers inoxydables	4
I.3 Résistance à la corrosion des aciers inoxydables :	5
a) Les aciers inoxydables martensitiques	8
b) Les aciers inoxydables ferritiques.....	9
c) Les aciers inoxydables austénoferritiques (duplex)	10
d) Les aciers inoxydables austénitiques.	12
I.4 Rôle des principaux éléments d'addition :	14
I.3.1 Les éléments alphagènes.....	14
I.3.2 Les éléments gammagènes.....	15
I.5 Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques	16
II. Le soudage.....	21
II.1 Le soudage homogène et hétérogène.....	21
II.2 Le Brasage	21
II.3 Zones constitutives d'un joint soudé	22
II.4 Procédés de soudage.....	23
II.4.1 Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique	23
a) Soudage par point.....	24
b) Soudage a la molette :	25
II.4.2 Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique ...	26
a) Soudage par diffusion	27
b) Soudage par friction	27
II.4.3 Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage :.....	28
a) Soudage par ultrasons	28
b) Soudage par explosion	28
II.4.4 Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique.....	28
a) Soudage à la flamme :	28
b) Soudage aluminothermique	30
b) Soudage par faisceau d'électrons.....	30
c) Soudage par faisceau Laser	31

II.4.5	Soudage à l'arc	32
a)	Soudage à l'arc avec électrode enrobé	32
c)	Soudage semi-automatique	33
II.5	Le procédé de soudage TIG	34
II.5.1	Paramètres technologiques :	36
II.5.2	Effet des paramètres de soudage :	38
II.6	Les principaux défauts de soudures :	39
a)	Les inclusions gazeuses :	39
b)	Les inclusions solides :	39
c)	Défauts de fusion (collage) :	39
d)	Défauts de pénétration :	39
e)	Retassures de cratère :	40
f)	Les fissures de solidification :	40
g)	La fissuration à froid :	42
II.7	Domaines d'applications	44
III 1.	Microstructure du cordon de soudure :	47
III-2	La zone ZAT :	50
III-3	Mesure de microdureté:	51
IV-	Conclusion :	53

Liste des figures :

Figure 1 : Diagramme Fer-Chrome – Influence de l’addition d’éléments gammagènes.	5
Figure 2 : Représentation schématique du film passif des aciers inoxydables, selon Okamoto et Shibata.	6
Figure 3 : Modèle bicouche du film passif.....	7
Figure 4 :Micrographie d’un acier inoxydable martensitique.	8
Figure 5 :Micrographie d’un acier inoxydable ferritiques.	10
Figure 6 : Acier duplex attaqué par électrolyse avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 40 %, montrant de l'austénite marron et de la ferrite bleue. Fond clair.	11
Figure 7 :Micrographie d’un acier inoxydable austénitique.	13
Figure 8 : Diagramme de Schaeffler [Schaeffler, 1949].	17
Figure 9 : Mise en évidence de la formation de phase σ et de ses conséquences sur la résilience en fonction du traitement thermique – Acier 317 [Kennedy, 1968].	17
Figure 10 : Appauvrissement local en Chrome pouvant être à l’origine de corrosion.	18
Figure 11 : Représentation schématique du joint soudé.....	22
Figure 12 : Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point.	24
Figure 13 :Soudage à la molette.	26
Figure 14 :Soudage par friction en rotation.	27
Figure 15 :Soudage oxyacétylénique.	29
Figure 16 :Matériel propre au soudage oxyacétylénique.	29
Figure 17 : Soudage par faisceau d’électron.	30
Figure 18 : Soudage par faisceau Laser.	31
Figure 19 : principe de Soudage à l’électrode enrobée.	33
Figure 20 : principe Soudage semi-automatique.....	34
Figure 21 : Principe Soudage à l’électrode réfractaire.	36
Figure 22 : Caractéristiques des modes de fonctionnement possibles pour le soudage.	36
Figure 23 : Défauts de pénétration.	40
Figure 24 :Localisation de fissures de solidification.....	41
Figure 25 :exemple de fissuration à froid.	43
Figure 26 : Illustration schématique du procédé de soudage TIG [25].	46
Figure 27 : Microstructure du cordon de soudure de l’échantillon T2 du côté de l’acier 304L	48
Figure 28 : Microstructure du cordon de soudure de l’échantillon T2 du côté de l’acier 316L	49
Figure 29 : Microstructure du cordon de soudure de l’échantillon T5.....	50
Figure 30 :Mesure de la microdureté.	52

Liste des tableaux :

Tableau 1: Composition chimique des principaux aciers inoxydables martensitiques.....	9
Tableau 2: Principaux aciers inoxydables Duplex et Superduplex	12
Tableau 3: Principaux aciers inoxydables austénitiques.....	13
Tableau 4: Emploi des gaz en soudage TIG.	38
Tableau 5: Composition chimique des aciers étudiés	46
Tableau 6: Paramètre de soudage TIG des aciers 304 L et 316L (T2+T5).....	47

Introduction générale.

L'utilisation des aciers inoxydables est actuellement largement répandue en raison de leurs bonnes propriétés mécaniques et de leur grande résistance à la corrosion. Ils sont aujourd'hui utilisés dans de nombreux domaines réunissant à la fois de sévères conditions d'environnement et des sollicitations mécaniques élevées (industries, navale, chimique, pétrochimique, du papier... etc).

Du fait qu'une grande partie de leurs applications utilise le soudage comme procédé de fabrication ou de maintenance, la compréhension de la métallurgie du soudage de ces aciers joue un rôle primordial dans leur mise en oeuvre. Différents procédés de soudage sont appliqués aux constructions réalisées en aciers inoxydables, parmi ces procédés le soudage TIG (tungsten inert gas) est largement utilisé dans le domaine pétrochimique.

L'apport de la chaleur lors du soudage est à l'origine de nombreuses transformations métallurgiques. Dans certains cas, ces transformations induisent des microstructures complexes qui peuvent présenter une certaine hétérogénéité mécanique et structurale à travers des joints soudés. Encore, des contraintes résiduelles importantes peuvent provenir des phénomènes mécaniques qui accompagnent le soudage et qui se manifestent lors de la mise en service des assemblages soudés, en conséquence, des ruptures brutales graves peuvent être occasionnées. Selon l'importance de ces contraintes, des traitements de décontraction sont donc à prescrire ou non avant la mise en service des joints soudés.

Dans ce présent travail, une étude compréhensive est faite sur l'évolution des propriétés des joints soudés en acier austénitique et les différentes techniques de soudage.

Ce travail de mémoire sera structuré essentiellement en trois chapitres.

Dans le premier chapitre, quelques rappels théoriques de base et des définitions des aciers inoxydables. Le deuxième chapitre sera consacré aux techniques de soudages des aciers inoxydables. Le troisième chapitre, étude approfondie d'un joint soudé par la technique TIG d'acier inoxydable 304L d'un côté et de l'autre côté acier inoxydable 316L. Et à la fin il aura une conclusion, présentée en fin du mémoire résumera l'essentiel de conclusions obtenues dans le cadre de ce travail.

Chapitre I

Les aciers inoxydables

I.1 Historique des aciers inoxydables

L'histoire des aciers inoxydables est intimement liée à celle du chrome et aux travaux du chimiste français Nicolas-Louis Vauquelin (1763-1889) qui, en 1797, fut le premier à isoler cet élément [1].

Les premières observations des propriétés « inoxydables » du fer allié au chrome furent faites par Berthier, un autre français. Il montra dès 1821 que l'alliage fer-chrome était d'autant plus résistant à certains acides que sa teneur en chrome était plus élevée. Par contre, la quasi-impossibilité d'abaisser la teneur en carbone de l'alliage constitua un obstacle majeur à son développement.

En 1904, Léon Guillet puis Albert Portevin publièrent une série d'études relatives à la structure et aux propriétés des alliages fer-chrome couvrant les nuances martensitiques à 13 % de chrome et les nuances ferritiques à 17 % de chrome.

En 1909, L. Guillet publia une étude sur les aciers inoxydables au chrome-nickel ou aciers inoxydables austénitiques complétant ainsi ses études précédentes sur les alliages fer-chrome et couvrant pratiquement l'ensemble de la famille des aciers inoxydables. Le métallurgiste allemand W. Giesen fit, de son côté, et à la même époque, des recherches comparables.

Les études de L. Guillet, A. Portevin et W. Giesen permirent ainsi, dès 1909, de classer les aciers inoxydables en fonction de leur structure et de définir les trois familles principales : martensitique, ferritique et austénitique.

Le passage au stade industriel est attribué à Harry Brearley pour les aciers inoxydables martensitiques. Il serait à l'origine de la première élaboration réalisée à Sheffield en 1913.

Un mérite analogue reviendrait aux allemands Benno Strauss et Eduard Maurer pour la production des aciers inoxydables austénitiques et aux américains Frederick Becket et Christian Dantsizen pour celle des aciers inoxydables ferritiques.

La première description de la passivité des aciers inoxydables est attribuée à l'allemand Philipp Monnartz .

Les recherches ultérieures ont notamment porté sur le rôle des éléments d'alliage. Elles ont conduit à la mise au point des nuances à durcissement structural dont les propriétés aux températures élevées ont été mises en évidence par Pierre Chevenard . Enfin, c'est au début des années 1930 que J. Hochmann a découvert les nuances biphasées austénoferritiques appelées de nos jours duplex.

Si la période comprise entre 1904 et 1920 a été riche en travaux de laboratoire, il a fallu attendre presque un demi-siècle pour atteindre un stade véritablement industriel. [1]

I.2 Généralités sur les aciers inoxydables

Le Fer, le Chrome et le Nickel sont les éléments fondamentaux des aciers inoxydables. Ils sont équilibrés en fonction des conditions particulières de corrosion ou des impératifs de caractéristiques mécaniques à haute température.

Il en est de même du Molybdène qui présente une influence bénéfique sur la résistance à la corrosion en milieu sulfurique ou en présence de chlorures.

Le Carbone par ailleurs est maintenu bas ou stabilisé par du Titane ou du Niobium si l'acier est utilisé pour des raisons de résistance à la corrosion. Il sera plus haut si l'on désire des caractéristiques mécaniques élevées à haute température (fluage).

C'est cependant le Chrome qui est l'élément fondamental car responsable de la passivité des aciers. Ainsi, pour qu'un acier soit dit inoxydable, il est nécessaire mais aussi suffisant qu'il contienne au moins 13 % de Chrome.

Les différents diagrammes d'équilibre de la figure 1 montrent que selon la teneur en chrome on peut avoir ou ne pas avoir la transformation $\alpha \rightarrow \gamma$ en fonction de la température. Ils montrent par ailleurs que la teneur minimum en chrome qui provoque la disparition du domaine d'existence de la phase γ dépend du caractère plus ou moins gammagène ou alphagène des autres éléments d'alliage présents. Sur la base des diverses évolutions structurales possibles en fonction de la température, on distingue trois types d'aciers inoxydables :

- Les aciers inoxydables martensitiques (ils se transforment totalement en austénite au chauffage et en martensite au refroidissement du fait de leur forte trempabilité),
- Les aciers inoxydables ferritiques (ils présentent une structure ferritique à toute température),
- Les aciers inoxydables austénitiques
- Les aciers duplex (austeno-ferritique).[2]

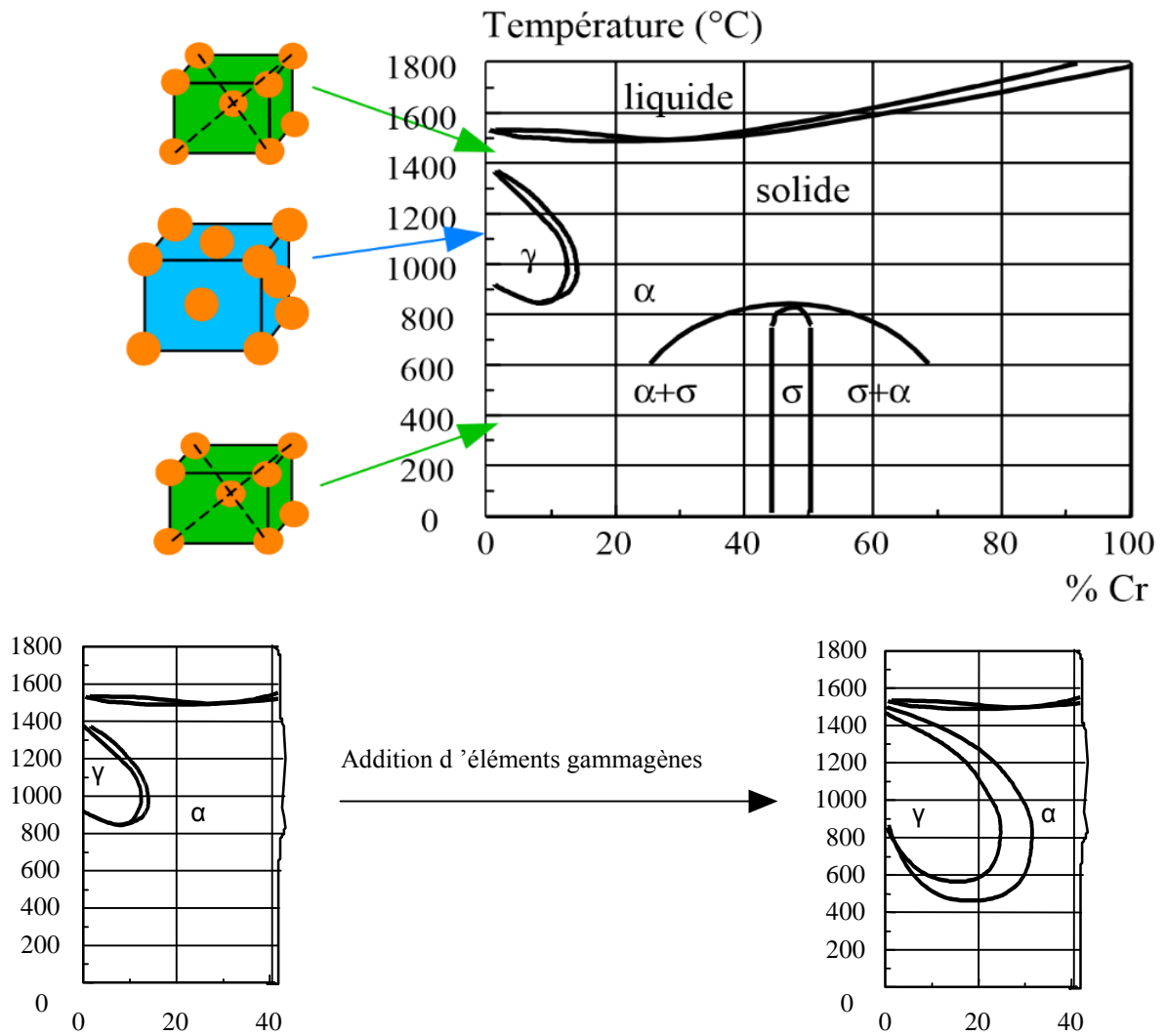


Figure 1 : Diagramme Fer-Chrome – Influence de l’addition d’éléments gammagènes.

I.3 Résistance à la corrosion des aciers inoxydables :

Le phénomène de passivité présente une très grande importance dans la mesure où il constitue la base du mécanisme de résistance à la corrosion des aciers inoxydables. Le phénomène de passivité se caractérise par la présence d’un film très mince (épaisseur de l’ordre de 10 à 20 nm), appelé film passif ou couche passive, à la surface de l’alliage métallique qui rend sa vitesse de corrosion négligeable. Le film passif, fortement solidaire du substrat métallique, empêche ou rend insignifiant le contact entre l’alliage et les agents plus ou moins agressifs du milieu environnant.

Pour que le phénomène de passivité puisse s’établir, et se maintenir, il est nécessaire que l’alliage fer-chrome ait une teneur minimale en chrome de l’ordre de 11 %. Autrement dit, il existe un effet de seuil au-delà duquel le phénomène de passivité peut exister et au-dessous

duquel il est impossible. De plus, si la couche passive devait être détruite localement par suite d'un endommagement accidentel (rayure par exemple), elle possède la propriété de pouvoir se reconstituer dans un grand nombre de milieux, ce qui traduit la propriété d'autopassivation de l'alliage métallique dans ce milieu.

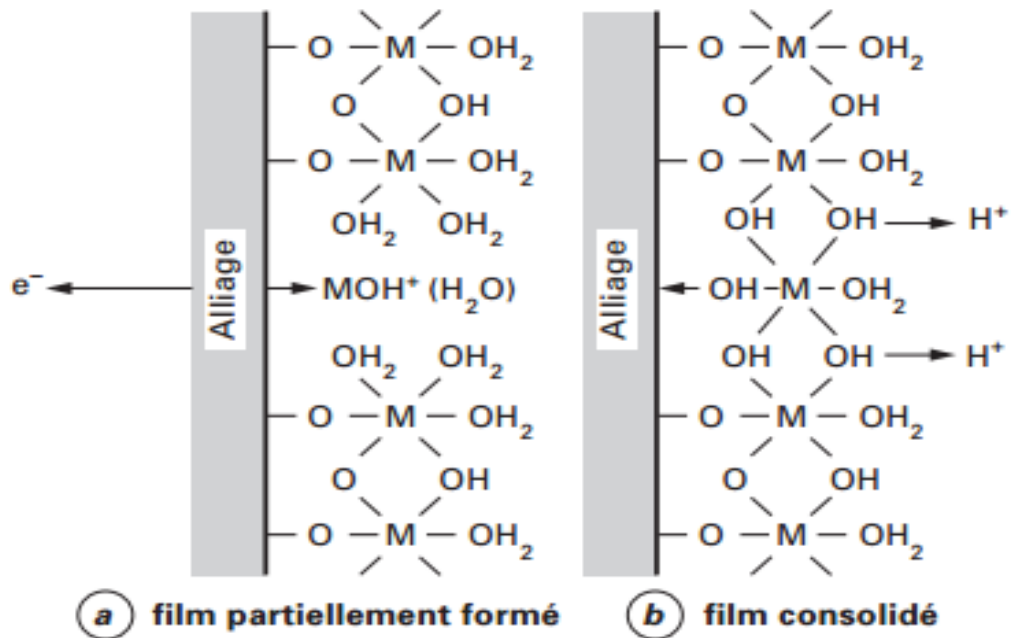


Figure 2: Représentation schématique du film passif des aciers inoxydables, selon Okamoto et Shibata.

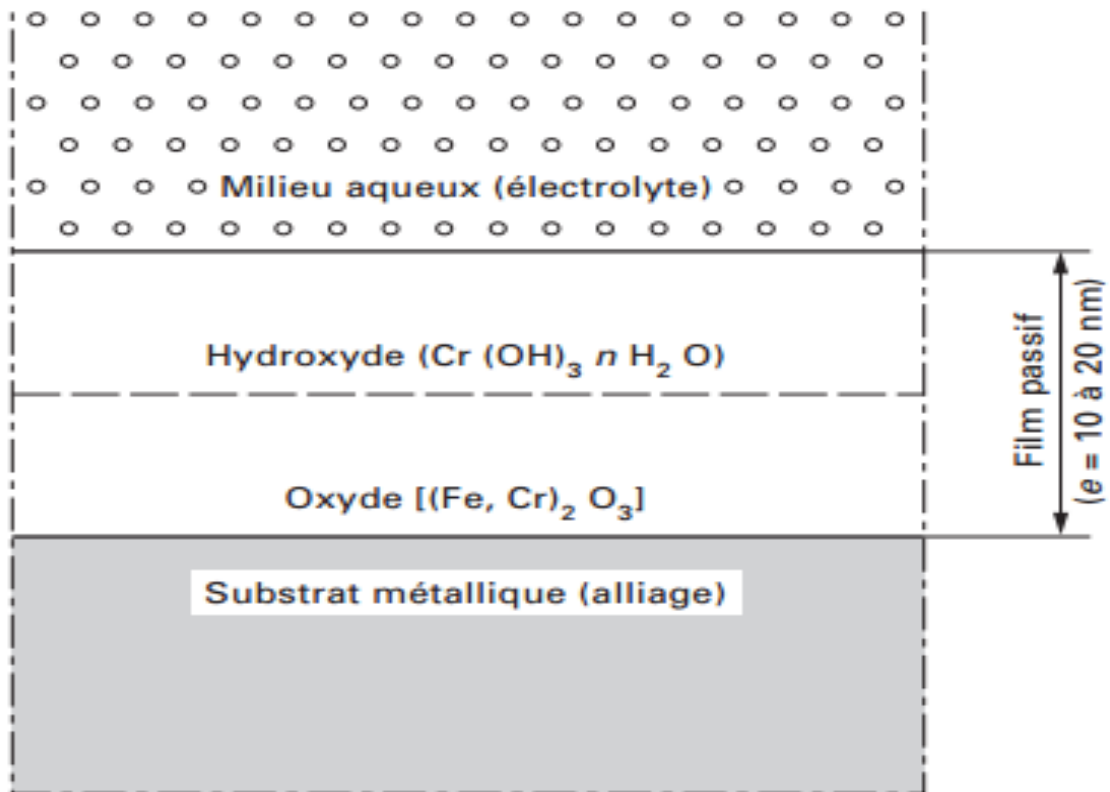


Figure 3: Modèle bicouche du film passif

Les aciers inoxydables sont autopassivables et le schéma le plus utilisé pour décrire le mécanisme de formation de leur couche passive est emprunté à Okamoto et Shibata. Sa représentation schématisée est donnée à la figure 2. Les principaux éléments constituant le film passif sont d'une part des cations M^{Z+} de valence z provenant du substrat et ayant une grande affinité pour l'oxygène. Il s'agit, pour l'essentiel, de Cr^{3+} et de Fe^{3+} , bien que le fer puisse se trouver sous la forme de Fe^{2+} . D'autre part, aux éléments en provenance du substrat, vont être associées des molécules d'eau provenant de la solution. Certaines molécules d'eau ayant perdu des protons H^+ , de manière à équilibrer la présence des cations métalliques donnent naissance à des ions OH^- et O^{2-} , constitutifs de l'hydroxyde ou de l'oxyde. Le film passif des aciers inoxydables est de type « bicouche ». La couche interne, en contact direct avec le substrat métallique, est formée d'oxydes de type $(Fe, Cr)_2O_3$ et la couche externe est essentiellement constituée par des hydroxydes de type $Cr(OH)_3 \cdot n H_2O$. La représentation schématisée de ce modèle bicouche est donnée à la figure 3. [3]

I.2.3 Les différentes familles d'aciers inoxydables

a) Les aciers inoxydables martensitiques

Ces alliages comprennent de 12 à 18% de chrome et des teneurs en carbone pouvant atteindre environ 1% et ils peuvent contenir jusqu'à 7% de nickel, et jusqu'à 3% de molybdène. Ils présentent des propriétés intéressantes en termes de limite d'élasticité, de résistance à la corrosion et de dureté. Ils possèdent une structure martensitique (quadratique, notée α') obtenue après trempe de la phase austénitique. Cette transformation homogène se produit avec une augmentation de volume, responsable de fortes contraintes de compression et qui tend à stabiliser de l'austénite résiduelle. Ces aciers sont utilisés pour leur résistance mécanique élevée.

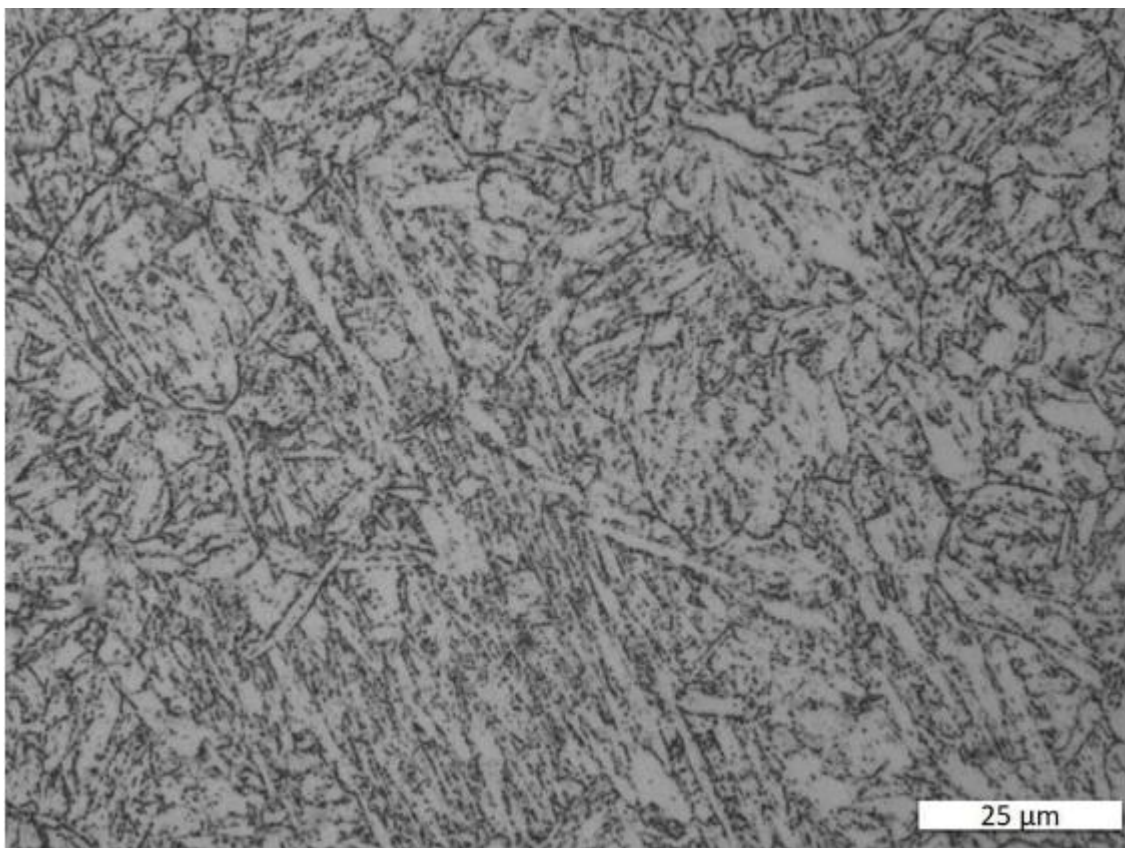


Figure 4: Micrographie d'un acier inoxydable martensitique.

Ils sont utilisés comme matériaux de construction, outillage à main, coutellerie (aubes de turbines, soupapes, boulons, arbres et hélices marines, et pour les plus chargés en carbone : coutellerie, lames de rasoir et instruments de chirurgie). [4]

Tableau 1:Composition chimique des principaux aciers inoxydables martensitiques.

Normes		C	Mn	Si	S	P	Cr	Autres
AISI	Afnor							
403	Z8C13	<0,15	1,00	0,50	0,030	0,040	11,5 / 13	
410	Z12C13	<0,15	1,00	1,00	0,030	0,040	11,5 / 13	
414		<0,15	1,00	1,00	0,030	0,040	11,5 / 13	Ni: 1,25 / 2,50
416	Z12CF13	<0,15	1,25	1,00	0,15	>0,060	12 / 14	Zr,Mo < 0,60
420	Z20C13	>0,15	1,00	1,00	0,030	0,040	12 / 14	
431		<0,20	1,00	1,00	0,030	0,040	15 / 17	Ni: 1,25 / 2,50
440A		0,60 / 0,75	1,00	1,00	0,030	0,040	16 / 18	Mo < 0,75
440B		0,75 / 0,95	1,00	1,00	0,030	0,040	16 / 18	
440C	Z100CD17	0,95 / 1,20	1,00	1,00	0,030	0,040	16 / 18	Mo < 0,75

b) Les aciers inoxydables ferritiques

La proportion de chrome dans ces alliages varie de 11 à 17 % et peut atteindre jusqu'à 24 à 28 %. On parle alors d'aciers ferritiques à haute teneur en chrome ou encore d'aciers super-ferritiques. Ces derniers présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres et par crevasses en milieux riches en chlorures.



Figure 5:Micrographie d'un acier inoxydable ferritique.

Les aciers inoxydables ferritiques possèdent une structure cubique centrée (notée α) et ils sont caractérisés par une remontée de la température de transition α - δ du diagramme de phase, qui fait qu'en pratique leur structure reste ferritique dans tout l'intervalle de température c'est-à-dire il y a l'absence de transformation structurale (ils sont à l'état d'équilibre).

Pour garantir une structure ferritique aux hautes températures, on rajoute des éléments d'alliage dits « stabilisants » (Ti, Nb, Zr) qui ont la propriété de piéger le carbone et l'azote, éléments hautement austénitisants .

Ces aciers ont une très bonne résistance à la corrosion mais des caractéristiques mécaniques faibles. Ils sont ainsi facilement mis en forme par emboutissage. Ils sont utilisés dans le domaine des ustensiles ménagers (cuillères, éviers...), dans le domaine alimentaire et en milieu très agressif (eau de mer) [4]

c) Les aciers inoxydables austénoferritiques (duplex)

Contenant moins de Nickel (4 à 7%) que les aciers inoxydables austénitiques classiques, les aciers duplex sont équilibrés chimiquement pour présenter à la température ambiante une structure mixte composée sensiblement de 50% d'austénite et de 50% de ferrite.



Figure 6: Acier duplex attaqué par électrolyse avec une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium à 40 %, montrant de l'austénite marron et de la ferrite bleue. Fond clair.

Leur intérêt vient de ce qu'ils possèdent :

- Une forte teneur en Chrome, Molybdène et Azote qui leur confère une excellente résistance à la corrosion dans de nombreux milieux.
- Une dureté élevée qui les rend très résistant aux phénomènes d'abrasion – corrosion,
- Une résistance à la rupture et une limite d'élasticité beaucoup plus élevées que les aciers inoxydables austénitiques (+35 à 40 %) ce qui permet de réduire les épaisseurs et donc le coût des constructions.

Toutefois, le domaine d'application des aciers Duplex est limité en température à l'intervalle $-50^{\circ}\text{C} / + 280^{\circ}\text{C}$:

- En dessous de -50°C ils présentent une fragilité excessive liée à leur forte teneur en ferrite,
- Au-dessus de 280°C , ils sont le siège de précipitations (Phases α' , χ et σ) qui les fragilisent et altèrent leur résistance à la corrosion. [2]

Tableau 2: Principaux aciers inoxydables Duplex et Superduplex .

Normes			Ni	Cr	Mo	N	Cu
RFA	UNS	AFNOR					
W 1.4362	32 304	Z2CN26.4 Az	3,00 / 5,5	21,5 / 24,5	< 0,6	0,05 / 0,20	-
W 1.4462	31 803	Z2CND22.5 Az	4,50 / 6,50	21,0 / 23,0	2,50 / 3,50	0,08 / 0,20	-
W 1.4460	31 250	Z2CND25.7 Az	4,50 / 6,0	25 / 28	1,30 / 2,00	0,05 / 0,20	-
-	32 550	Z2CNDU25.7 Az	5,50 / 7,50	24 / 26	2,70 / 3,90	0,14 / 0,25	1,0 / 2,0

d) Les aciers inoxydables austénitiques.

Ce sont les aciers inoxydables les plus répandus mais aussi les plus coûteux. Fondamentalement, ce sont des alliages Fer - Chrome - Nickel avec des additions variables de Carbone et d'autres éléments qui permettent d'obtenir des propriétés particulières vis à vis de la corrosion, l'oxydation ou la résistance mécanique à haute température (fluage).

Ils présentent une structure austénitique à toutes températures (cubique à faces centrées) et ne peuvent donc pas durcir par trempe. Ils sont beaucoup moins sensibles au phénomène de grossissement de grain à haute température que les aciers ferritiques et, du fait de leur structure (cfc), ils ne présentent pas de rupture par clivage (rupture fragile) ce qui minimise considérablement les conséquences du grossissement des grains et fait d'eux des matériaux de choix pour les applications cryogéniques.

L'absence de transformation structurale en fonction de la température fait que les propriétés mécaniques de ces aciers dépendent uniquement de leur composition chimique (effet de solution solide) et éventuellement du degré d'écrouissage. [2]

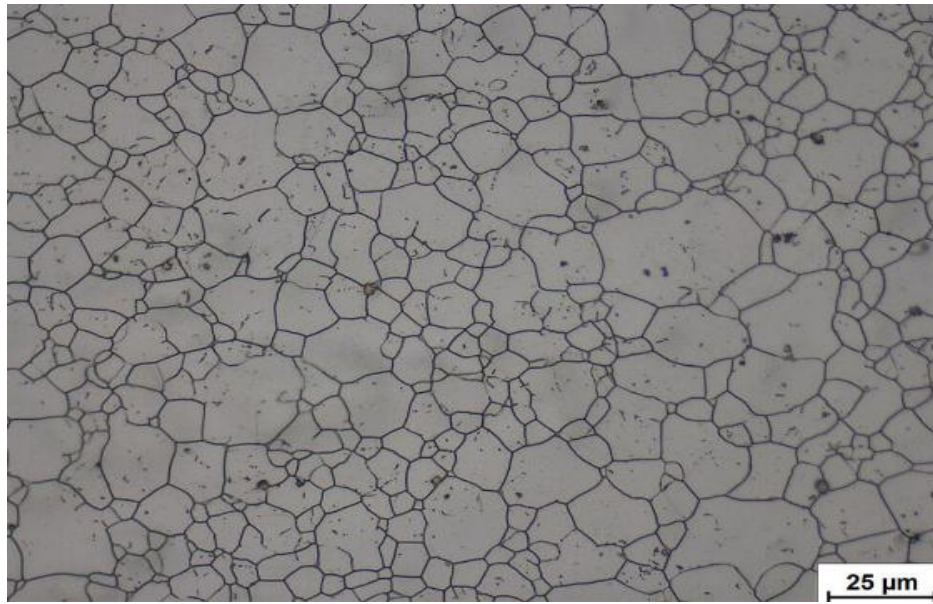


Figure 7:Micrographie d'un acier inoxydable austénitique.

La composition chimique des principaux aciers inoxydables austénitiques est indiquée dans le tableau 3.

Tableau 3:Principaux aciers inoxydables austénitiques.

Normes		C max	Ni	Cr	Mo	Autres
AISI	AFNOR					
304L	Z2CN18.10	0,030	9 / 11	17 / 19		
304	Z6CN18.09	0.07	8 / 10	17 / 19		
321	Z6CNT18.11	0.08	10 / 12	17 / 19		5C <Ti < 0,6
347	Z6CNNb18.11	0.08	10 / 12	17 / 19		10C < Nb+Ta < 1
316L	Z2CND17.12	0,030	11 / 13	16 / 18	2 / 2,5	
316	Z6CND17.11	0.07	10 / 12	16 / 18	2 / 2,5	
310	Z12CN25.20	0.12	19 / 21	24 / 26		

I.4 Rôle des principaux éléments d'addition :

Les éléments additionnels sont divisés en deux familles : les éléments alphagènes (silicium, aluminium, chrome, molybdène, tungstène, titane, niobium) et les éléments gammagènes (nickel, manganèse, azote, carbone, cuivre, cobalt). Certains éléments ont des effets plus importants que d'autres, notamment l'azote et le carbone dont l'effet gammagène est environ trente fois plus puissant que celui du nickel.

I.3.1 Les éléments alphagènes

Le chrome (Cr)

Élément de base de tous les aciers inoxydables qui offre la résistance à la corrosion par la formation d'un film passif en se combinant avec l'oxygène et augmente la résistance à la corrosion (sauf en milieu sulfurique) et la résistance à l'oxydation à chaud.

Lorsqu'il est associé avec le molybdène et le nickel, il confère de bonnes propriétés mécaniques à des températures allant jusqu'à 500°C.

Le molybdène (Mo)

Élément alphagène, trempant très actif. Il augmente la résistance au fluage des aciers au chrome. Il diminue la fragilité au revenu. Il améliore sensiblement la résistance à la corrosion intercrystalline et par piqûres. Il confère une plus grande sensibilité à la décarburation et au phénomène d'oxydation pour maintenir entre 1000 et 1100 °C. De plus, il augmente la résistance mécanique à chaud.

Le silicium (Si)

C'est un élément également alphagène, il améliore la résistance à la corrosion et améliore les propriétés d'emploi à haute température ce qui lui confère une bonne résistance à l'oxydation à chaud dans le cas de l'acide nitrique mais diminue la résistance à la fissuration lors du soudage.

Le vanadium (Va)

Il est un fort stabilisateur de ferrite. Il améliore la résistance mécanique au choc.

Le titane (Ti)

Il se combine dans les aciers ferritique et austénitique avec le carbone pour former un carbure de titane, et l'azote pour former un nitrure de titane, dont l'existence rend l'acier insensible à la corrosion intercrystalline.

Le niobium (Nb)

C'est un élément alphasène, il se combine avec le carbone dans les aciers inoxydables et forme les carbures pour s'opposer à la corrosion intergranulaire. [5]

I.3.2 Les éléments gammagènes

Le nickel (Ni)

Au-delà de 6 % à 8 %, sa présence se traduit par un effet gammagène et l'acier devient austénitique à toutes températures. Il élargit ainsi le domaine d'existence de l'austénite. Il favorise la mise en œuvre par déformation plastique, améliore la résistance à la corrosion, en particulier la résistance à la corrosion sous tension, il affine le grain et améliore la ductilité. Le nickel a une influence favorable sur la trempabilité, la résistance au choc et la ténacité des calamines.

Le manganèse (Mn)

Bien que classé comme élément gammagène, a un rôle alphasène pour des teneurs supérieures à 7 %, rend ainsi difficile la transformation de l'austénite en martensite dans les aciers Cr-Ni et lors des sollicitations mécaniques aux basses températures.

Le carbone (C)

Il stabilise la structure austénitique introduit pour accroître les propriétés mécaniques de l'acier (dureté, charge à la rupture, fluage...), particulièrement sous l'effet des traitements thermiques, le carbone joue cependant un rôle néfaste vis-à-vis de la résistance à la corrosion (précipitation de carbures de chrome lorsque la teneur en carbone dépasse 0,030 % conduisant à la corrosion intergranulaire). Ceci a encouragé le développement de nuances d'aciers inoxydables à très faible teneur en carbone (inférieur à 0,03%).

L'azote (N)

Stabilisateur d'austénite, associé à une basse teneur de carbone, l'azote permet d'atteindre des limites d'élasticité élevées sans diminuer la résistance à la corrosion intergranulaire.

Il a une influence bénéfique sur la résistance à la corrosion par piqûres et la résistance à la corrosion par crevasse par précipitation du nitrure de chrome Cr_2N moins riche en chrome que $Cr_{23}C_6$ provoquant un moindre appauvrissement en chrome au voisinage des joints de grains. L'azote augmente aussi la résistance à la traction et diminue la ductilité des aciers inoxydables austénitiques [4].

Le soufre (S)

À des teneurs de l'ordre de 0,2 %, il améliore considérablement l'usinabilité (tournage, fraisage, perçage, etc.) mais cela se fait au détriment de la résistance à la corrosion par piqûres.

Le cuivre (Cu)

Il est additionné aux aciers austénitiques dans des cas particuliers pour améliorer la résistance à la corrosion ou pour accroître l'aptitude à la frappe à froid, le cuivre aide aussi à la lutte contre la corrosion bactérienne. En outre le cuivre améliore l'usinabilité des aciers inoxydables austénitiques [4].

I.5 Soudabilité des aciers inoxydables austénitiques

Ces aciers ne subissent pas de transformation de phase en fonction de la température. Ils sont donc insensibles au phénomène de trempe et ne présentent donc pas d'augmentation de dureté dans la zone affectée thermiquement.

De plus dans le cas de constructions soudées, ils sont la plupart du temps utilisés à l'état hypertrempé (refroidissement rapide depuis 1050 à 1100° C), c'est-à-dire non écroui.

- suivant la composition, il existe ou non à très haute température, un domaine de stabilité de la ferrite δ . Or, l'expérience montre que la formation d'un minimum de ferrite δ dans la zone fondue lors de la solidification permet de diminuer considérablement les risques de fissuration à chaud. La composition chimique du métal d'apport devra dans la mesure du possible, être ajustée de manière à avoir de 2 à 10 % de ferrite dans le métal fondu (en dessous de 2 %, les risques de fissuration à chaud augmentent fortement, au delà de 10 % on observe une baisse sensible de la ténacité à basse température),
- la quantité de ferrite formée dépend de l'ensemble des éléments alphagènes et gammagènes de la zone fondue. Elle peut être prédite avec une approximation souvent suffisante en calculant les concentrations en chrome et nickel équivalents et en se reportant au diagramme de Schaeffler (figure 8).

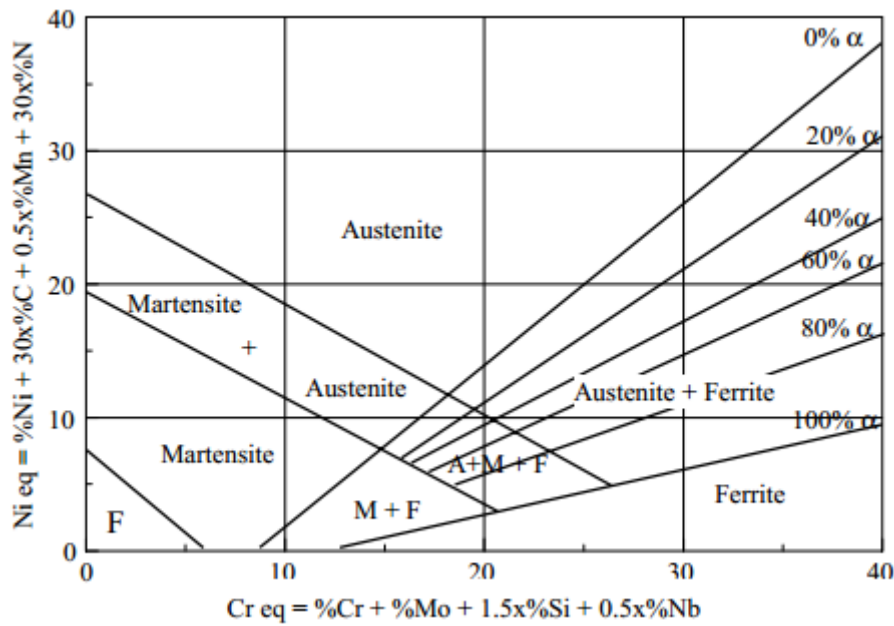


Figure 8: Diagramme de Schaeffler [Schaeffler, 1949].

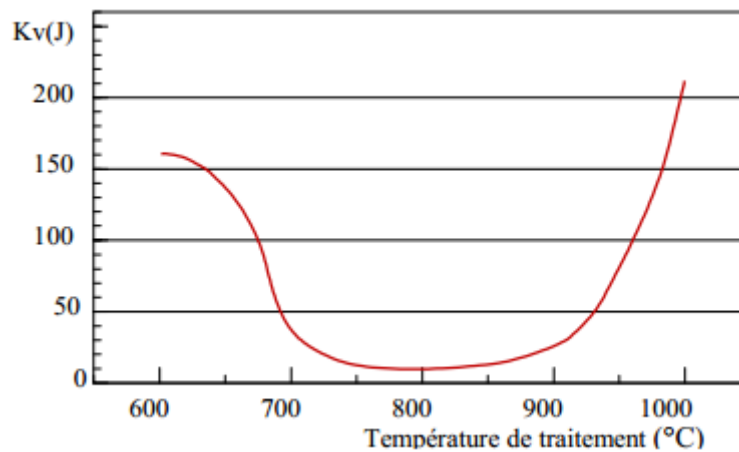


Figure 9: Mise en évidence de la formation de phase σ et de ses conséquences sur la résilience en fonction du traitement thermique – Acier 317 [Kennedy, 1968].

– la ferrite δ dans la zone fondue a une action très favorable en petite quantité puisqu'elle limite fortement les risques de fissuration à chaud. Elle peut cependant être à proscrire dans le cas d'une utilisation des matériaux à haute température. En effet, après un maintien prolongé entre 450° et 900° C environ, elle donne naissance à la phase σ particulièrement fragile. L'apparition de cette phase (composée Fe-Cr à 45% de chrome) provoque une importante diminution de la résistance à la corrosion, de la ductilité ainsi que de la résilience (figure 9) et une augmentation de la dureté. Cette phase peut être dissoute par un chauffage à une température supérieure à 1000° C.

– la précipitation de carbures de chrome Cr_{23}C_6 (94 % de Cr) après maintien entre 420 et 650 °C peut entraîner, suivant la teneur en carbone de l'acier, une déchromisation importante au voisinage des joints de grains et donc une grande sensibilité à la corrosion de ces zones (corrosion intergranulaire figure 10). Le temps de maintien nécessaire à la précipitation étant très court, ce phénomène se produira dans la zone affectée thermiquement par le soudage.

Pour éviter cette corrosion, on dispose de plusieurs moyens :

- utiliser des aciers à basse teneur en carbone ($\text{C} < 0,03$). Dans ces conditions, la quantité de carbures précipités sera faible et la teneur en chrome au voisinage des joints de grains ne descendra pas en dessous du seuil critique d'inoxydabilité (13 %),
- effectuer une hypertrempe : un chauffage vers 1050°C suivi d'un refroidissement rapide permet la redissolution des carbures de chrome. Cette opération est cependant souvent impossible à réaliser industriellement après soudage.
- Utiliser des aciers stabilisés par des additions d'éléments fortement carburigènes (Ti, Nb, Zr, Ta) : l'affinité de ces éléments pour le carbone étant supérieure à celle du chrome, les carbures de chrome ne se formeront généralement pas.[2]

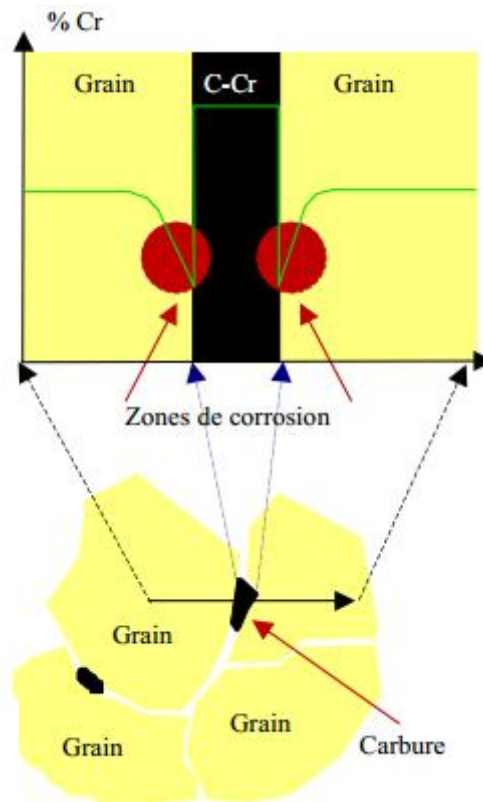


Figure 10: Appauvrissement local en Chrome pouvant être à l'origine de corrosion.

Les quelques phénomènes métallurgiques qui viennent d'être exposés permettent de comprendre la quasi-totalité des problèmes que peut poser le soudage des aciers inoxydables austénitiques. Dans ces conditions, il est clair que ces aciers présentent une excellente soudabilité.

En fait, la variation des cycles thermiques de soudage n'entraînant pas de modification significative de la microstructure de ces aciers, les procédés se distinguent principalement par la morphologie des cordons qui est propre à chacun d'entre eux et par la compacité des joints qu'ils permettent de réaliser. Ces différences de morphologie se traduisent par des différences dans les taux de dilution. En ce sens, les caractéristiques mécaniques des joints soudés pourront varier selon les procédés utilisés puisque la composition chimique de la zone fondue dépend de la composition des métaux de base et d'apport par l'intermédiaire du taux de dilution. Mais, si l'on compare, à composition chimique identique, les caractéristiques mécaniques de joints obtenus dans des conditions normales de soudage avec les différents procédés, on s'aperçoit que celles-ci sont relativement voisines. Seule la résilience peut présenter des variations notables car cette caractéristique est fortement tributaire de la teneur en oxygène du métal déposé (et du taux de ferrite), laquelle peut varier dans de grande proportion selon les procédés et les produits de soudage :

- Procédé T.I.G. - Plasma : $O_2 < 100$ ppm (ou O_2 métal de base)
- Procédé M.I.G. : $200 < O_2 < 400$ ppm
- Procédés AS et Electrode enrobée : $400 < O_2 < 1100$ ppm

A taux de ferrite équivalent, plus la teneur en oxygène est faible, moins le dépôt contient d'inclusions et plus l'énergie de rupture ductile est élevée (il n'y a pas de rupture fragile dans une structure cubique à faces centrées). C'est la raison pour laquelle lorsque l'on doit obtenir de bonnes valeurs de résiliences aux températures de l'azote ou de l'hélium liquide, les procédés de soudage sous flux solide (Electrode enrobée ou Arc Submergé) ne pourront être envisagés qu'à condition d'utiliser des produits relativement basiques qui seuls conduisent à des teneurs en oxygène compatibles avec le niveau de résilience exigé. [2]

Chapitre II

Soudage des aciers inoxydables

II. Le soudage

Le soudage est une technique d'assemblage permanent qui établit la continuité métallique entre les pièces soudées. La soudure est le nom donné au joint formé par la fusion des bords des pièces à souder entre elles, avec ou sans adjonction d'un métal d'apport. La soudure peut donc être le résultat du seul mélange des métaux de base (les métaux à souder) ou du mélange des métaux de base et d'un métal d'apport. Beaucoup de métaux sont soudables moyennant des études préalables et la mise au point de modes opératoires spécifiques ; citons les aciers, le cuivre, l'aluminium, le nickel et leurs alliages.

Contrairement aux idées reçues, les techniques de soudage sont en pleine évolution, pour ne pas dire révolution. Si les premières réalisations soudées ou brasées remontent à l'âge de bronze, ce n'est que depuis le début du 20^{ième} siècle que la maîtrise d'un arc électrique permet de réaliser la fusion puis la solidification de matériaux pour constituer un assemblage dit par soudage. Il faut pourtant attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour que des constructions soudées soient utilisées dans la réalisation de structures ou bâtis. [6]

II.1 Le soudage homogène et hétérogène

Le soudage hétérogène : Sous cette appellation sont rassemblés les assemblages de matériaux identiques au moyen de produits d'apport ou non appelé soudage autogène permettant d'obtenir un métal fondu de structure et donc de propriétés très différentes de celles du métal de base mais aussi, les assemblages de matériaux différents.[7]

Le soudage homogène : les pièces assemblées, de même nature ou de composition voisine, participent à la constitution du joint ou de cordon de soudure. L'assemblage est dit homogène, c'est à dire (fait du même métal). [8]

II.2 Le Brasage

Le brasage est une opération qui consiste à assurer l'assemblage de pièces métalliques en utilisant un produit d'apport dont la température de fusion est nettement inférieure à celle des métaux de base.

On distingue :

— le brasage tendre (improprement appelé soudage à l'étain) qui est réalisé avec une brasure dont la température de fusion est inférieure à 450 °C.

— le brasage fort qui est réalisé avec une brasure dont la température est supérieure à 450°C.[9]

II.3 Zones constitutives d'un joint soudé

Afin d'obtenir un joint soudé, en faisant fondre le métal de base des deux composants à relier avec ou sans métal d'apport. Dans la macrographie d'une section transversale d'un joint soudé on distingue cinq zones (figure 11).

- La zone de fusion (ZF) mélangé : la zone où de métal d'apport et le métal de base sont mélangés de façon homogène (Bain de fusion) sous une température élevée adaptée dit température de liquidus.
- La zone affectée thermiquement (ZAT) : ou zone affectée par la chaleur est la zone de métal de base où ses propriétés mécaniques et microstructures sont modifiées par la chaleur du soudage.
- La zone fondue partiellement (ZFP) : elle est nommée aussi par la zone de liaison, elle se situe entre la zone de fusion et la zone affectée thermiquement.
- La racine : endroit jusqu' où le métal d'apport a pénétré.
- Le Face ou surépaisseur : surface extérieure de la soudure.[10]

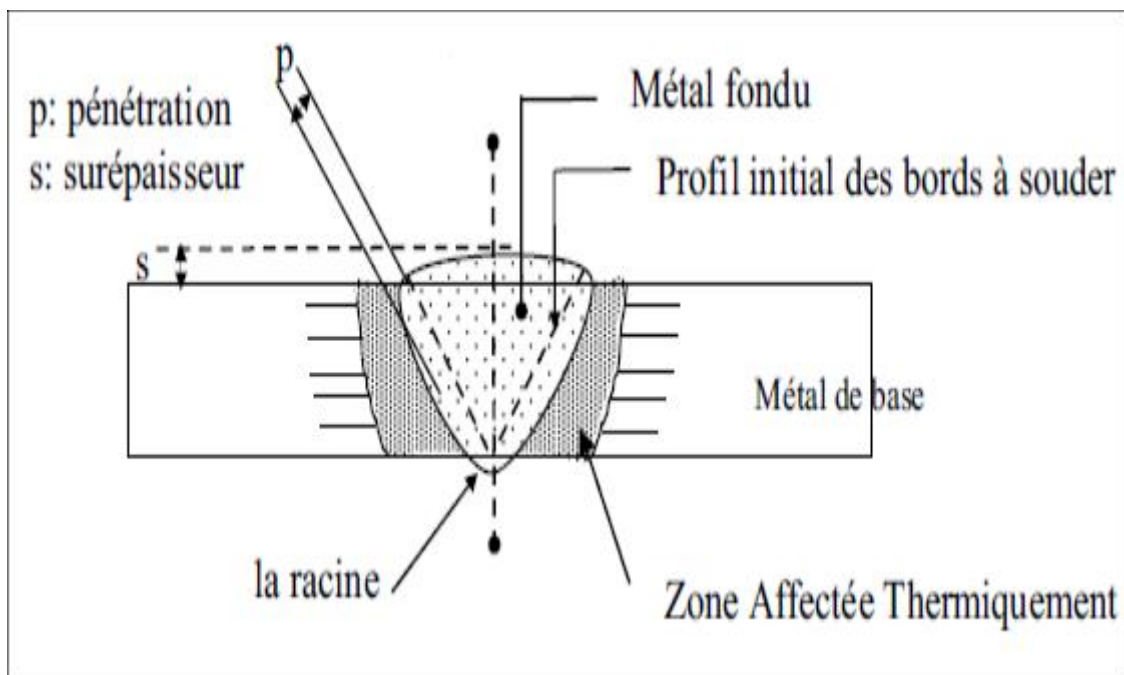


Figure 11: Représentation schématique du joint soudé.

II.4 Procédés de soudage

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. Pour les uns, l'assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue sans fusion par effets purement mécaniques. Les sources d'énergie utilisées dans le domaine du soudage sont des types chimiques, électriques, ou mécaniques.

Ces procédés sont classés ici selon :

- Les procédés faisant intervenir la fusion locale avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec une action mécanique.
- Les procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage
- Les procédés faisant intervenir la fusion locale sans une action mécanique [11].

II.4.1 Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique

Dans ces procédés, la chaleur utilisée pour former le bain du métal fondu est assurée par la combinaison entre l'effet Joule d'un courant électrique alternatif à haute intensité et une pression ponctuelle. L'énergie nécessaire de la fusion des métaux est obtenue par effet Joule, caractérisée par :

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

Avec W : quantité d'énergie engendrée par l'effet joules en joules

R : la Résistance en Ohm

I : intensité en ampère

t : temps de soudage en millisecondes (très court).

Ces procédés ne nécessitent pas d'apport extérieur (Soudage autogène) car la résistance de contact entre les surfaces des deux pièces à assembler permet la localisation de la fusion dans ce plan. Ces procédés sont :

- Le soudage par point
- Le soudage à la molette

a) Soudage par point

Principe du soudage par points schématisé sur la figure 12, les deux tôles d'acier prises en étau entre deux électrodes afin de maintenir l'assemblage en contact. Cet assemblage est ensuite traversé par un courant de forte intensité qui va créer un noyau fondu à l'interface tôle/tôle. En refroidissant, le noyau maintient localement les deux tôles entre elles.

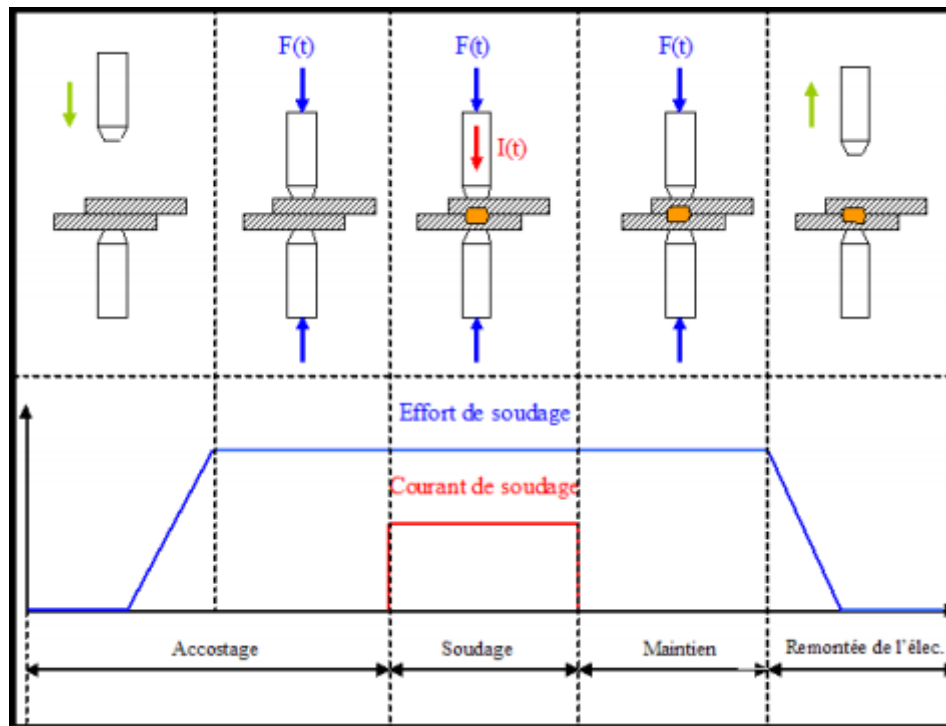


Figure 12: Représentation schématisée des phases du procédé de soudage par point.

Le cycle de soudage schématisé sur la Figure 12, se décompose en trois phases principales :

-l'accostage : Les électrodes se rapprochent et viennent comprimer les pièces à souder à l'endroit prévu et sous un effort donné. Dans le cas de la soudeuse du CRDM, seule l'électrode supérieure descend. L'électrode inférieure est fixée au bâti de la soudeuse. Cette phase se termine dès que l'effort est stabilisé.

- le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur du circuit de puissance, et doit, par effet Joule, produire assez de chaleur à l'interface tôle/tôle pour qu'une zone fondue apparaisse. En termes de variation de la résistance électrique, il y a deux étapes consécutives pour l'apparition de la soudure.

Au début du soudage, la résistance de contact entre deux tôles est plus importante que celle de la tôle à basse température. Par conséquent, l'interface chauffe plus rapidement que les pièces.

Lorsque la température augmente, la résistance de contact diminue considérablement avec la température. Le développement du noyau progresse alors dans l'assemblage par l'augmentation de la résistivité de la tôle avec la température.

- le maintien : cette phase a pour but de solidifier le noyau et la ZAT. La qualité des phases métallurgiques résiduelles et le comportement mécanique du point dépendent directement de la durée de cette phase. Les pièces sont maintenues par un effort, qui a généralement la même magnitude que celui de soudage. La chaleur s'évacue vers le circuit de refroidissement par l'eau dans deux électrodes. La durée du temps de maintien est normalement la même que celle du soudage. En fin d'un cycle, c'est la remontée de l'électrode supérieure.

L'ensemble des deux tôles peut alors être translaté afin de procéder à un nouveau soudage par point.[12]

b) Soudage a la molette :

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce que les électrodes classiques sont ici remplacées par des disques en cuivre, ou molettes rotation permettent de faire des soudures par recouvrement, continues et étanches.

La soudure se réalise de façon progressive et continue, associant serrage des tôles et passage du courant, sur toute la longueur du cordon à réaliser. Un cycle de soudage comporte donc les phases suivantes, similaires à celles du soudage par points :

- L'accostage : les deux molettes viennent serrer, pour les accoster et localiser le courant, les deux pièces à souder au point de départ.
- Le soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire, et la rotation des molettes est engagée, créant une liaison continue.
- L'arrêt qui commande l'écartement des molettes en fin de cordon.

Le cycle de soudage est celui de la figure 13 où l'on a également représenté machine typique et les différentes phases opératoires.

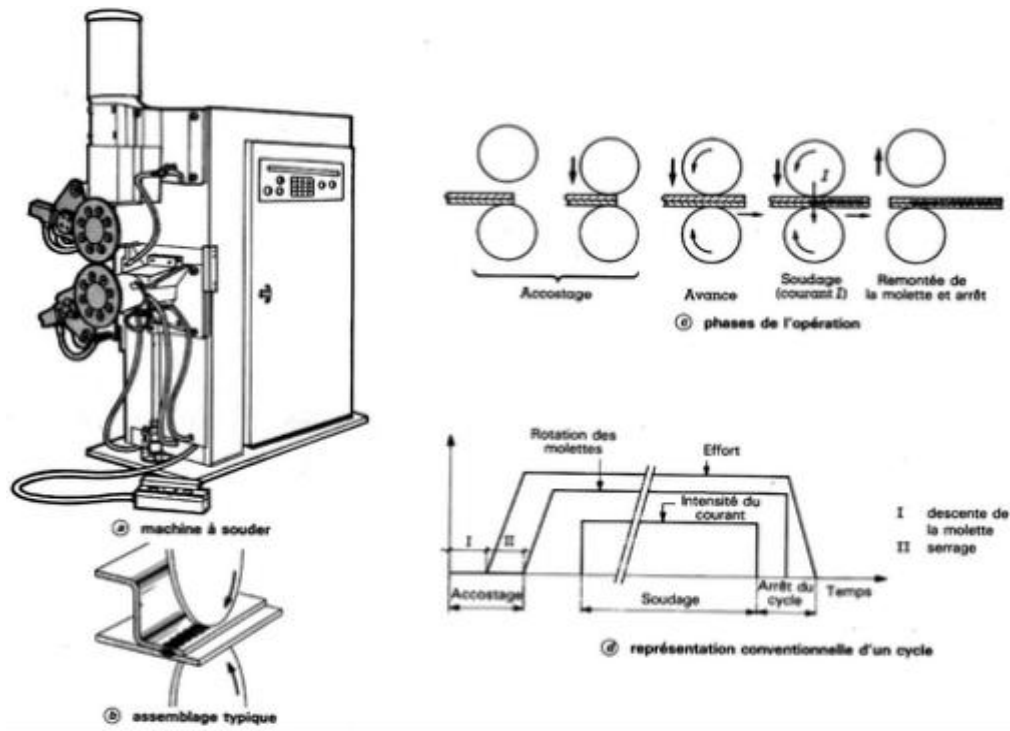


Figure 13:Soudage à la molette.

Ainsi qu'il en sera question plus loin, la soudure peut être due au passage de façon continue d'un courant alternatif, ou à celui d'un courant dit modulé donnant lieu à une soudure formée de points juxtaposés se chevauchant. Dans ce dernier cas, les molettes sont entraînées soit de façon continue, soit de façon discontinue, leur arrêt correspondant à la formation d'un point sur lequel il devient alors possible d'exercer un forgeage réglable, indépendant de la vitesse. On utilise également le procédé pour réaliser des soudures discontinues non étanches, les molettes maintenues serrées réalisant alors entre les points un accostage mécanique des tôles qui ont toujours tendance à s'écarter naturellement.[13]

II.4.2 Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique

Le chauffage peut être effectué par apport extérieur de chaleur ou par action mécanique (frottement). Les efforts appliqués doivent être soigneusement pilotés.

Ces procédés exigent donc des équipements très spécifiques et elles regroupent :

- Le soudage par diffusion
- Le soudage par friction.[14]

a) Soudage par diffusion

Procédé de soudage en phase solide dans lequel les pièces à assembler, maintenues en contact sous une pression adaptée, sont portées et maintenues à une température suffisamment élevée pour que la diffusion des atomes à travers le plan de joint, aidée par les déformations plastiques locales, puisse assurer la continuité métallique. Les surfaces à assembler doivent avoir subi une préparation soignée par polissage fin (pour assurer le contact le plus intime) et nettoyage (pour éliminer toute pollution susceptible de gêner la diffusion). Des précautions doivent être prises pour éviter toute réaction à chaud de ces surfaces avec l'atmosphère (soudage sous vide ou en atmosphère neutre) [15]

b) Soudage par friction

Procédé de soudage en bout par pression qui implique une rotation relative des pièces l'une par rapport à l'autre afin de provoquer, par frottement, un échauffement à l'interface. Lorsque la température nécessaire est atteinte, la rotation est arrêtée et l'effort axial est augmenté pour réaliser le soudage par forgeage. Un bourrelet se forme à la périphérie du joint ; il doit être éliminé. Le nettoyage des surfaces à assembler est assuré par le frottement ; ce procédé n'exige donc ni préparation soignée des surfaces ni protection de celles-ci en cours d'opération. [15]

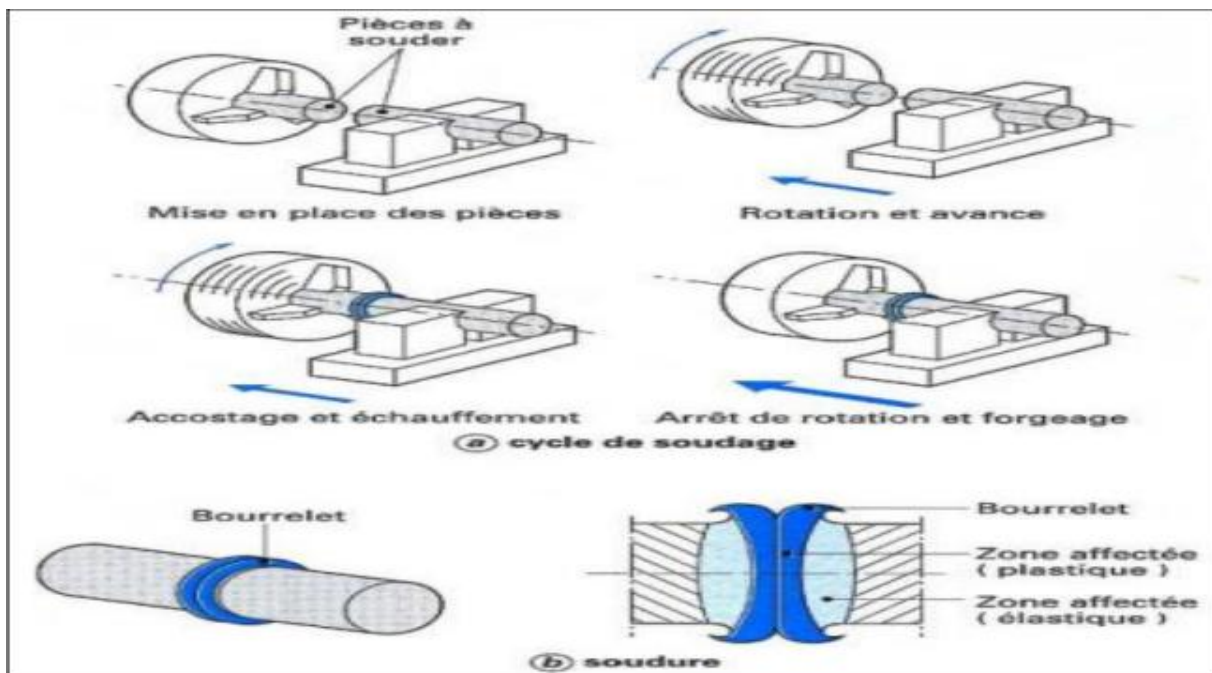


Figure 14: Soudage par friction en rotation.

II.4.3 Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage :

Ces procédés l'assemblage des pièces se fait par recouvrement et seulement par une action mécanique (pression) à la mise en œuvre des outils particuliers, et elles contiennent :

a) Soudage par ultrasons

Procédé de soudage sous pression de contact au cours duquel des vibrations ultrasonores (15 à 60 kHz) sont appliquées brièvement de telle sorte que les deux faces à assembler soient mises en mouvement l'une par rapport à l'autre ; un volume infime de métal, de part et d'autre du plan de joint, est ainsi porté à la température de recristallisation et assure de ce fait la liaison.

b) Soudage par explosion

Procédé de soudage utilisable pour réaliser des assemblages par recouvrement ou des placages, le métal de recouvrement ou le métal de placage est violemment projeté de proche en proche contre le métal de base par la détonation progressive d'une couche d'explosif répartie sur sa face extérieure. L'onde de choc, en se propageant, provoque l'éjection, en avant de la zone de contact, d'un jet de métal qui nettoie parfaitement les faces à assembler et permet l'établissement de la liaison. Il est néanmoins nécessaire que ces faces aient été préalablement décapées. [15]

II.4.4 Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique

La fusion locale des pièces à assembler peut-être décrite en distinguant le mode de chauffage utilisé et le moyen de protection du métal fondu contre l'action chimique de l'atmosphère ambiante. C'est ainsi on peut répertorier :

- le soudage à la flamme
- le soudage aluminothermique
- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie
- soudage à l'arc

a) Soudage à la flamme :

Le soudage à la flamme (procédé 311 selon l'ISO 4063) est connu par le soudage oxyacétylénique (OA), ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène O₂) et un gaz combustible (généralement l'acétylène C₂H₂), en créant une flamme qui peut atteindre une température située entre 2850°C et 3200 °C à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré.[16]

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion (figure 15).

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce à assembler et le métal d'apport pour constituer le bain de fusion et le cordon de soudure après le refroidissement. Le soudage O.A est limitée pour les pièces de faible épaisseur environ de 5 mm.[17]

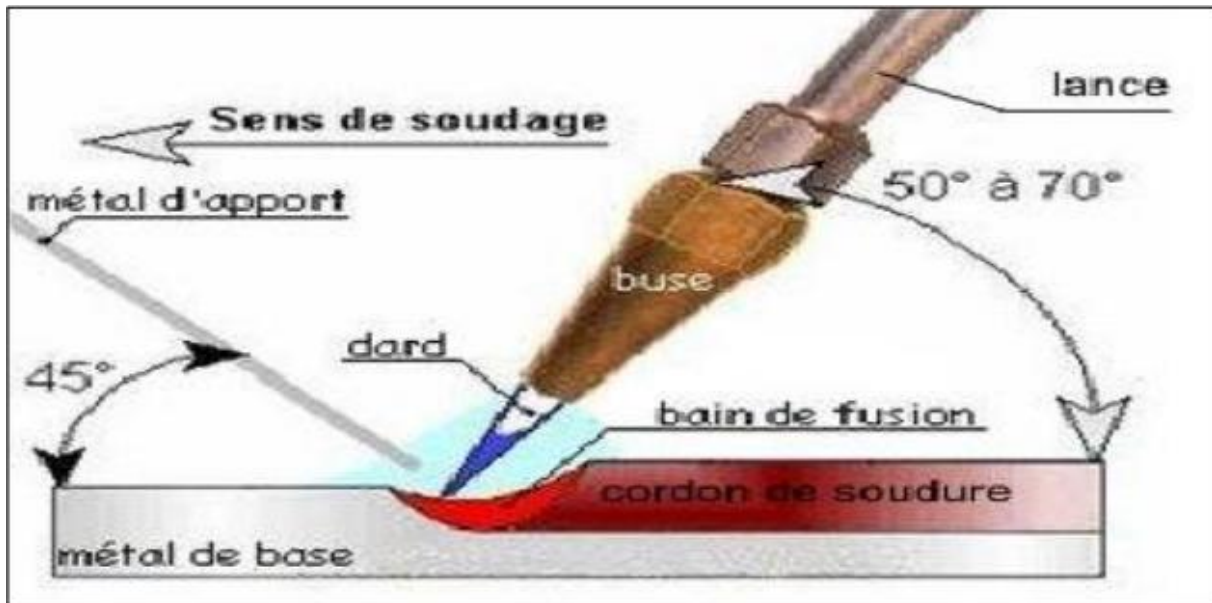


Figure 15: Soudage oxyacétylénique.

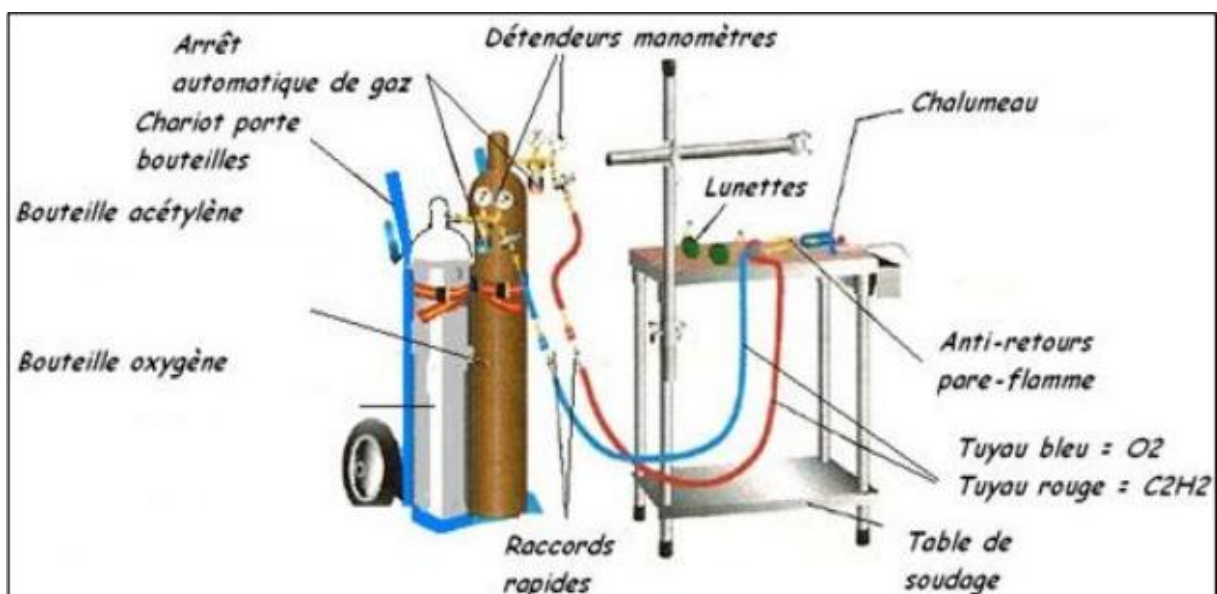


Figure 16: Matériel propre au soudage oxyacétylénique.

b) Soudage aluminothermique

Dans ce procédé, la soudure est réalisée par coulée d'un métal en fusion (le métal d'apport) dans un moule constitué entre les deux faces des pièces à assembler placées bout à bout et, éventuellement, préchauffées. Le métal liquide est élaboré sur place par aluminothermie, c'est-à-dire par réaction exothermique entre des oxydes (du métal qui doit constituer le métal d'apport) et de l'aluminium en poudre. Lors de la coulée du métal d'apport, la surface des pièces à assembler est fondue avant que la solidification ne constitue l'assemblage. La protection du métal fondu est assurée par le laitier qui se forme au cours de la réaction aluminothermique. [15].

b) Soudage par faisceau d'électrons

Est un procédé de soudage par fusion utilisant l'interaction d'un faisceau d'électrons avec les pièces à assembler où la chaleur est générée par l'impact d'électrons émis à forte vitesse et accélérés dans le vide par un canon à électrons (figure 17).

Ce procédé de soudage est essentiellement automatisé et il permet de souder des épaisseurs importantes en une seule passe ainsi que de très fines épaisseurs sans besoin du métal de base généralement.

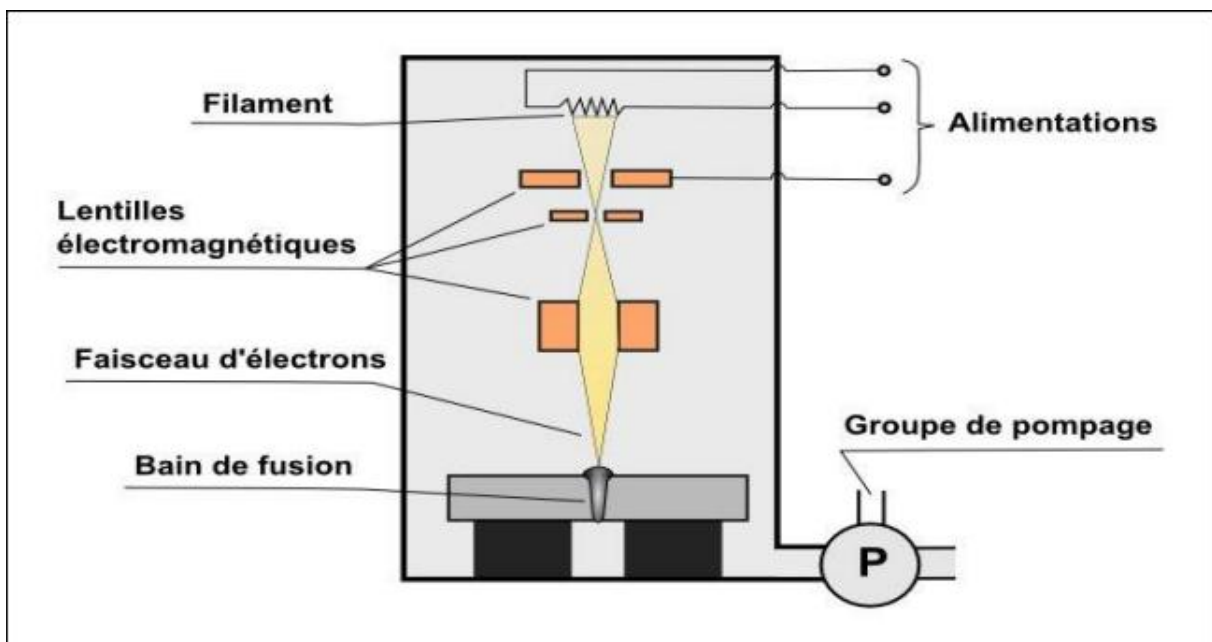


Figure 17: Soudage par faisceau d'électron.

c) Soudage par faisceau Laser

Le mot laser indique « amplification de lumière par émission stimulée de radiation » (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), le faisceau laser rempli de vapeur métallique dit capillaire est la source de chaleur qui est extrêmement concentrée et guidé vers le joint soudé, ce qui permet des soudures étroites, profonds, à une cadence rapide (procédé 52 selon l'ISO 4063).

Une opération de soudage par laser (figure 18), se conduit au moyen d'une machine automatique ou d'un robot. La démarche est similaire à celle du soudage automatique par fusion à l'arc TIG/plasma ou par faisceau d'électrons avec les particularités suivantes :

- la source laser prend la place du générateur de courant d'arc ;
- une tête de focalisation remplace la torche ;
- un conduit optique amène le rayon de la source à la tête.

Cette technique est souvent utilisée dans le cas de gros volumes de production comme l'industrie automobile rempli de vapeurs métalliques.[18]

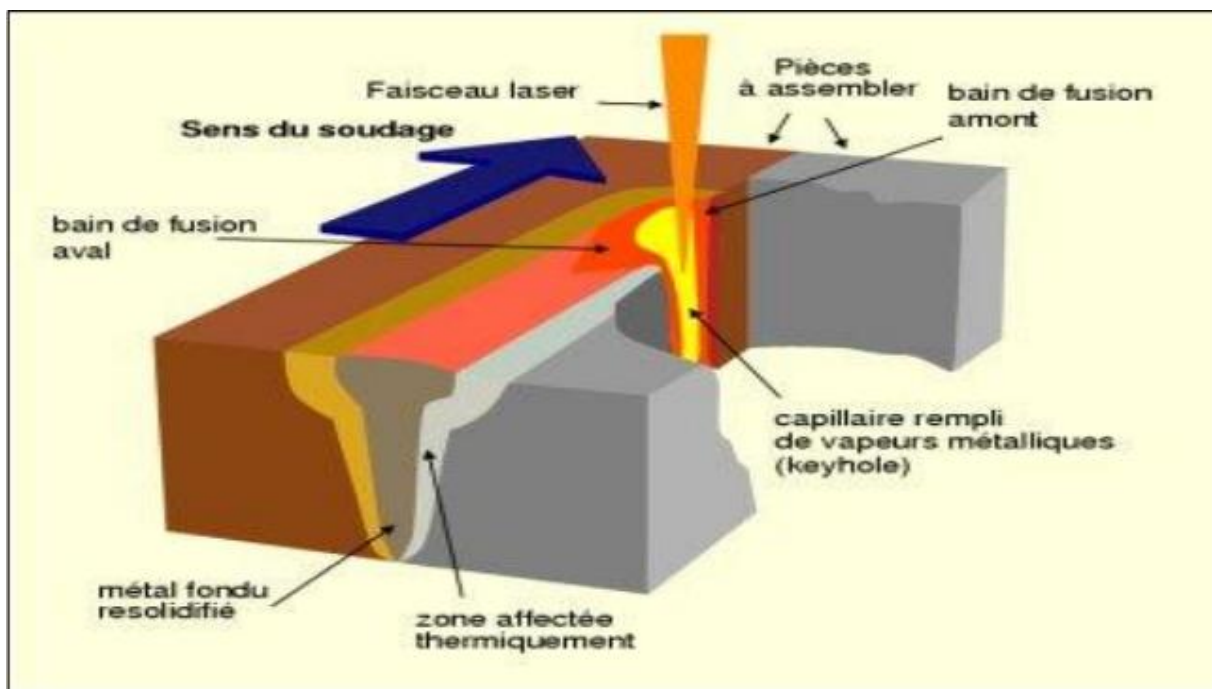


Figure 18: Soudage par faisceau Laser.

II.4.5 Soudage à l'arc

bernardos (1887) puis Kjellberg (1914) ont été les tout premiers à utiliser le pouvoir de fusion d'un arc électrique en vue de réaliser la soudure des métaux. L'énergie est fournie par un banc d'accumulateurs et le soudage s'exécute au moyen d'une électrode qui va fondre au fur et à mesure, puis va se solidifier en un dépôt qui s'associe intimement au métal des pièces en formant une liaison continue. Le procédé se développe essentiellement grâce à la mise au point d'une électrode enrobée en cellulose qui, du fait de sa vaporisation formant écran de protection, réalise l'impérative condition, pour obtenir des soudures saines, de soustraire les métaux en fusion à l'action de l'air. Les principes fondamentaux de tous les procédés de soudage à l'arc par électrode fusible sont dès lors posés, de même que dans une certaine mesure le principe des procédés à électrode réfractaire. [19]

a) Soudage à l'arc avec électrode enrobée

Le soudage à l'arc à l'électrode enrobée (SAEE), appelé soudage manuel à l'arc (manual arc welding, shielded metal arc welding process), s'exécute d'une façon très simple, schématisée sur la figure 19.

L'appareillage comporte une source de courant continu ou alternatif, une pince porte-électrode et l'électrode proprement dite, un câble de liaison et un câble de masse. L'opérateur tient, en outre, un masque de protection contre le rayonnement lumineux intense de l'arc éblouissant et dangereux pour la vue. La source étant sous tension, l'arc s'amorce par contact électrode-pièce et produit instantanément la fusion de l'électrode, la production de vapeurs et la formation du cordon qui, après refroidissement, se présente comme indiqué sur la figure 19, recouvert du laitier vitrifié dû à l'enrobage fondu et que l'on évacue ultérieurement.

La fusion de l'électrode et la formation progressive du cordon entraînent un réflexe d'approche de la main de l'opération conditionné par le maintien d'un arc stable.

Toutes les caractéristiques du procédé, à savoir son fonctionnement, sa mise en œuvre et les caractéristiques des soudures obtenues, reposent sur deux éléments fondamentaux :

- la technologie des électrodes ;
- l'habileté de l'opérateur.

L'électrode enrobée (au sens générique du terme) constitue en effet le paramètre essentiel de ce procédé. Déterminée et construite en fonction du matériau à souder, elle impose, entre autres, la nature et l'intensité du courant que devra délivrer le générateur et est à l'origine des taux de dépôt, de la qualité des soudures, etc. Quant au soudeur, il contrôle la fusion du métal et la régularité du cordon, et doit avoir pour cela une formation professionnelle appropriée.

Le soudage à l'électrode enrobée s'applique particulièrement bien à toutes les formes d'assemblages en aciers au carbone, peu ou fortement alliés, et sous certaines conditions aux alliages d'aluminium et de cuivre. .[19]

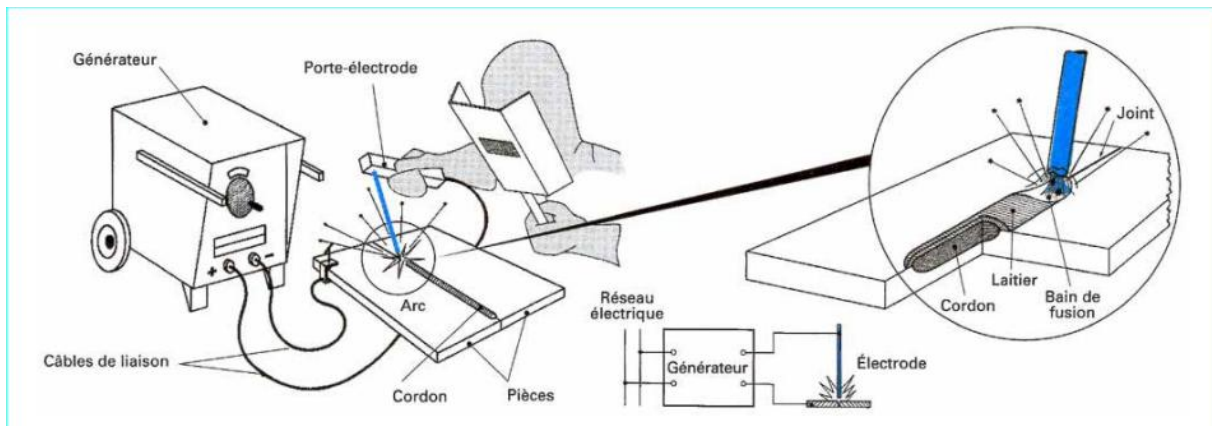


Figure 19: principe de Soudage à l'électrode enrobée.

c) Soudage semi-automatique

La figure 20 représente une installation de soudage semi-automatique, procédé que l'on désigne également par les expressions MIG et MAG selon que le gaz est respectivement inerte ou actif (Metal Inert Gas et Metal Active Gas). Dans les pays anglosaxons, on utilise aujourd'hui de préférence et indifféremment les expressions suivantes : semi-automatic welding, gas metal arc welding ou GMA, gas shielded arc welding process.

Le soudage semi-automatique s'apparente par le fil électrode au soudage sous flux. Bien que parfois actif, le gaz de protection joue un rôle métallurgiquement beaucoup plus restreint que le flux mais simplifie la mise en œuvre du procédé. L'appareillage comporte : une source de courant continu, un ensemble de dévidage d'une bobine de fil constitué par un dévidoir et un entraîneur, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires. L'arc étant visible, les accessoires de protection sont identiques à ceux du soudage à l'électrode enrobée.

La torche a pour rôle de guider le fil sur la soudure et d'amener le courant à son extrémité par un tube-contact de la même façon qu'en soudage sous flux. Lors du soudage, l'appui sur la gâchette commande l'ouverture automatique de la vanne de gaz, la fermeture du contacteur qui met le générateur sous tension faisant apparaître la tension à vide, et également le moteur de l'entraîneur qui dévide le fil. L'arc s'amorce au contact électrode-pièce et la fusion s'installe instantanément pour former le cordon.

L'avance du fil-électrode à vitesse constante, conjuguée avec la caractéristique horizontale du générateur, rend le fonctionnement de l'arc et le processus de fusion indépendants de

l'opérateur dont le seul rôle ne réside plus que dans le guidage du cordon sur le joint, d'où le caractère semi-automatique du soudage manuel.

Le cordon ne se recouvre d'aucun laitier après soudage ; c'est un des avantages de ce procédé qui peut se conduire dans toutes positions.

Le soudage semi-automatique peut s'automatiser facilement. Il peut s'appliquer sur la presque totalité des matériaux soudables sans grande difficulté pour le mettre en œuvre, de là son intérêt dans tous les domaines industriels. [19]

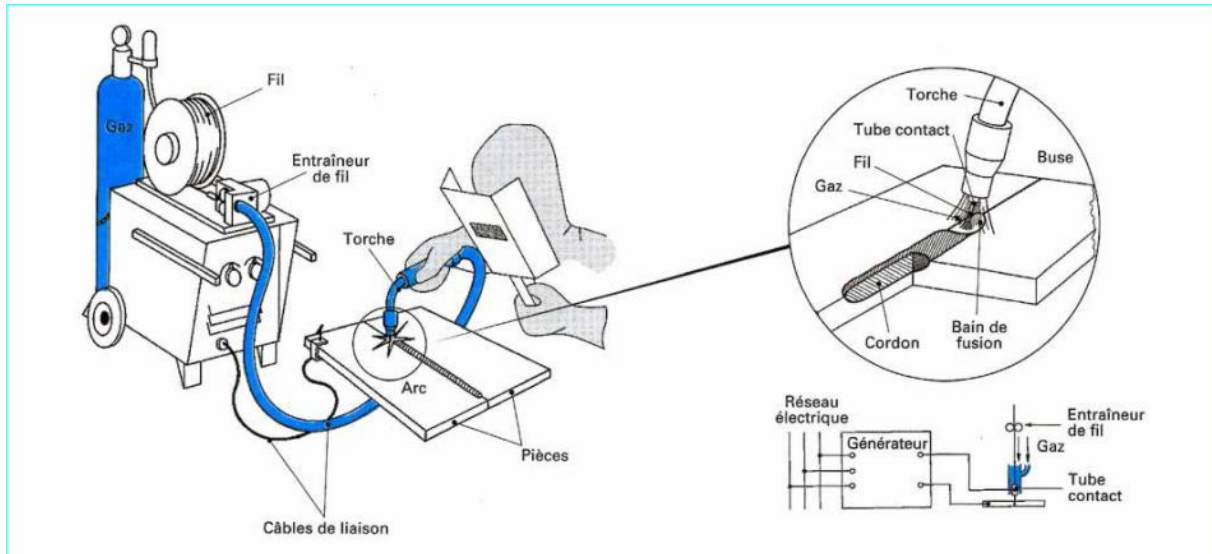


Figure 20: principe Soudage semi-automatique.

II.5 Le procédé de soudage TIG

Le soudage à l'électrode réfractaire est communément appelé soudage TIG (Tungsten Inert Gas). Dans les pays anglo-saxons, on le désigne également par GTAW ou Gas Tungsten Arc Welding. On le désigne souvent en France par soudage à l'argon.

Le principe du soudage à l'électrode réfractaire est représenté sur la figure 21 sous sa forme manuelle.

L'appareillage comporte une source de courant alternatif ou continu, un dispositif d'amorçage, une bouteille de gaz avec détendeur et débitmètre, une torche spécifique du procédé et divers accessoires. Un arc TIG est visible et nécessite une protection.

L'opération s'exécute avec ou sans apport de métal :

- sans apport de métal, l'opérateur tient la torche d'une main et de l'autre le masque de protection.
- avec apport de métal (fil métallique), l'opérateur tient la torche d'une main, introduit de l'autre le fil d'apport dans le bain de fusion ; dans ce cas il a un casque spécial (figure 21). En

polarité directe, l'électrode est meulée en pointe côté soudage (figure 22). Elle se forme en boule pour le soudage des alliages d'aluminium en courant alternatif ou en polarité inverse.

L'opération se conduit de la façon suivante : l'opérateur place la torche en regard du point de départ en prenant soin de maintenir l'extrémité de l'électrode à quelques millimètres du métal à fondre, valeur approximative de la longueur d'arc. Il actionne ensuite l'interrupteur de torche, ce qui a pour effet d'ouvrir le circuit du gaz, de fermer le contacteur de la source, la tension à vide apparaissant alors entre pièce et électrode, puis de fermer le circuit d'amorçage. Ce circuit a pour rôle de produire entre l'électrode et la pièce une étincelle de faible puissance et de haute fréquence, pendant le temps (très bref) nécessaire à l'établissement du courant de soudage dans le circuit. Le bain fondu se forme et l'opération de soudage peut alors se conduire.

Le soudage TIG produit une simple fusion caractérisée par sa largeur et sa pénétration. On réalise un apport de métal en introduisant directement dans le bain un fil de même nature que le métal de base. Ce fil qui fond dès son arrivée n'a aucune liaison avec le circuit de soudage. Il n'est pas une électrode et son taux de dépôt est indépendant de la puissance de l'arc. Ce fait est une des caractéristiques importantes du procédé à électrode réfractaire qui le distingue des procédés à électrodes fusibles.

De même que les procédés à fils fusibles, le procédé TIG peut s'automatiser facilement.

Le procédé TIG s'applique à tous les métaux soudables. Les courants généralement employés vont de quelques ampères à 400 A environ en courant continu (pour le soudage du cuivre, les intensités nécessaires sont de l'ordre de 600 à 800 A). En courant alternatif, la gamme utile est comprise entre 5 et 525 A. Sa puissance limitée à une vingtaine de kilowatts et son apport de métal séparé le réservent à des épaisseurs généralement faibles, de quelques millimètres. Son coût élevé, relativement aux autres procédés et dû essentiellement au coût du gaz de protection, fait qu'on le réserve aux applications requérant qualité et précision.[19]

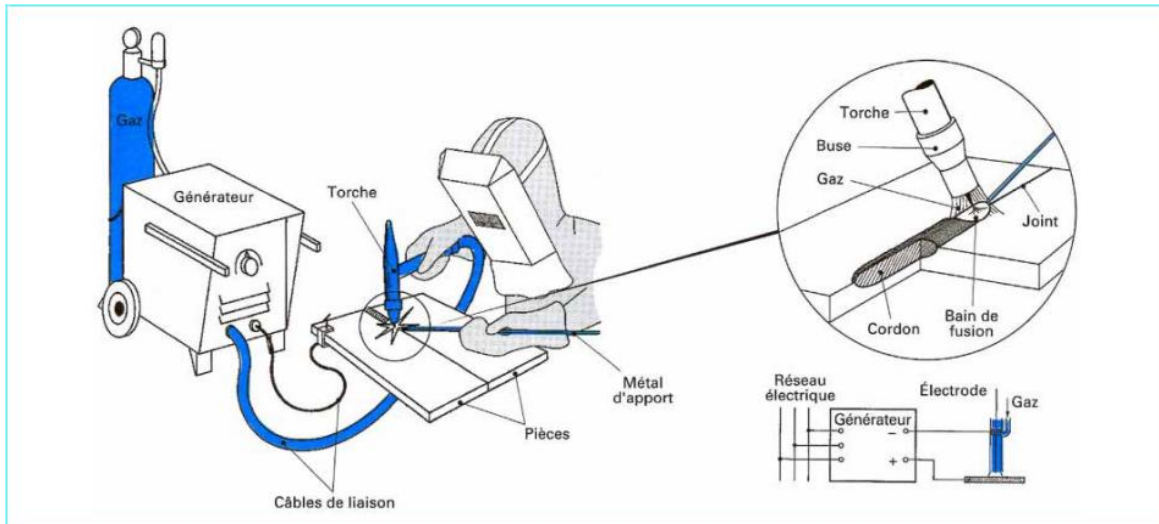


Figure 21: Principe Soudage à l'électrode réfractaire.

II.5.1 Paramètres technologiques :

a) Nature du courant de soudage :

Les procédés de soudage à l'arc peuvent être utilisés en courant continu (DC), avec l'électrode négative (EN) ou positive (EP), ou en courant alternatif (AC). Ces différentes configurations présentées sur la figure 22 se traduisent par des différences de morphologies du bain de fusion.

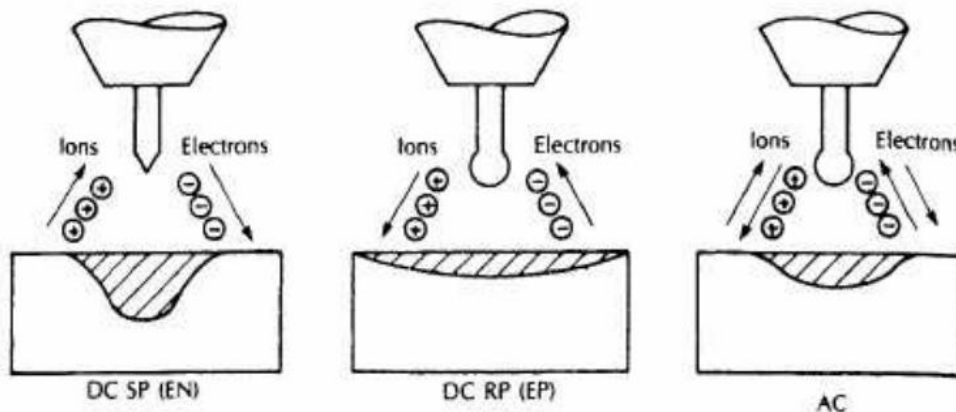


Figure 22 : Caractéristiques des modes de fonctionnement possibles pour le soudage.

En courant continu, lorsque l'électrode est connectée à la borne négative (DC-), les électrons sont émis de l'électrode de tungstène vers la pièce de travail de polarité Ces électrons hautement énergétiques rentrent en collision avec la pièce en abandonnant leur énergie cinétique et génèrent un échauffement considérable.

Il en résulte une pénétration importante, un cordon de soudure étroit mais aussi un apport de chaleur significatif pouvant induire des contraintes résiduelles et des déformations non désirables.

Ce pendant ce mode est le plus employé pour des procédés comme le TIG où l'électrode est non consommable. Lorsque l'électrode est connectée à la borne positive (DC+) l'effet de l'apport de chaleur des électrons par leur énergie cinétique se concentre sur l'électrode plutôt que sur la pièce de travail.

Ceci nécessite un refroidissement plus important des électrodes et cela engendre un cordon moins pénétrant, plus large, et un faible échauffement de la pièce de travail. De plus les ions positifs qui rentrent en collision avec la pièce de travail en provenance de l'électrode positive ont un effet nettoyant sur la surface oxydée.

Ce mode de soudage est préconisé pour le soudage de faibles épaisseurs des métaux s'oxydant rapidement comme l'aluminium et le magnésium. Le courant continu en mode pulsé engendre une succession de temps froids, avec maintien de l'arc, et de temps chauds (pics d'intensité) assurant la pénétration.

Cette technique permet de mieux maîtriser l'énergie apportée à la pièce.

Enfin le courant alternatif peut être utilisé pour alterner les avantages des deux modes cités précédemment durant la moitié des cycles ; la pénétration est assez bonne avec une action de nettoyage des surfaces. [7]

b) Intensité et vitesse de soudage :

L'intensité et la vitesse de soudage sont les paramètres les plus importants à contrôler parce qu'ils sont directement liés à la profondeur de pénétration, à la largeur du bain de fusion, et à la qualité du joint soudé.

L'intensité affecte également la tension si la longueur de l'arc (distance entre la pointe de l'électrode et la pièce à souder) est fixée.

Les structures de solidification à gros grains sont reliées à un rapport P/L de la zone de fusion important. Par conséquent, afin de réduire la taille des grains en zone de fusion tout en conservant une pénétration débouchant nécessaire pour la tenue mécanique de l'assemblage, un compromis vitesse/intensité de soudage doit être établi.

c) Nature de l'électrode :

L'électrode est généralement en tungstène, le tungstène assure une efficacité du courant produit ce qui donne une meilleure condition de soudabilité pour le procédé TIG.

d) Gaz de protection :

Traditionnellement le soudage TIG dans le domaine pétrochimique et pétrolier est effectué sous atmosphère de gaz inerte, mais le soudage à l'air est très pratiqué avec l'utilisation de techniques de protections gazeuses adaptées.

Tableau 4: Emploi des gaz en soudage TIG.

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

Pour le soudage TIG des aciers inoxydables l'électrode est protégée par un gaz inerte comme l'argon ou l'hélium. L'argon est le gaz le plus utilisé actuellement dû à un moindre coût et à son faible potentiel d'ionisation qui favorise la formation d'un plasma au passage de l'arc électrique. [7]

II.5.2 Effet des paramètres de soudage :

Les paramètres de soudage contrôlent la forme, les dimensions et les structures des régions chauffées du cordon de soudure.

L'énergie nécessaire à la fusion du métal, qui dépend des paramètres tel que la puissance et la vitesse de soudage, contrôle la vitesse de refroidissement.

La vitesse de soudage régit directement la vitesse de croissance du front de solidification et donc également la forme du bain de fusion.

La structure et le mode de croissance des grains dépendent de l'apport calorifique linéaire. La croissance des grains devient très rapide et donne lieu à une structure grossière avec un apport calorifique croissant alors qu'une structure fine est obtenue avec une énergie linéaire modérée.

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites qui s'appliquent sur la soudure et qui entraînent la formation de contraintes résiduelles et des distorsions géométriques. [20]

II.6 Les principaux défauts de soudures :

Les défauts les plus importants qui risquent de donner lieu à une reprise du joint ou à mise en cause de la résistance de ces derniers sont :

a) Les inclusions gazeuses :

Elles sont causées par la présence de gaz résultant des réactions chimiques dans le métal d'apport et dans les enrobages, par l'humidité des pièces ou des électrodes. Les moyens d'éviter ces défauts sont :

- Utilisation d'aciers calmés.
- Utilisation d'électrodes soumises à des tests d'agrégation.
- Séchage des pièces avant soudage.
- Séchage des électrodes à 400°C et conservation à 100°C avant soudage.

b) Les inclusions solides :

Ce sont les restes de laitier ou d'autres matières étrangères au joint, disposantes entre les passes ou au croisement de deux ou plusieurs soudures. Pour les éviter, il faut un nettoyage convenable des cordons, et un choix d'électrodes d'un diamètre correspond à l'épaisseur des pièces dessouder.

La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et éventuellement le contrôle radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries).

c) Défauts de fusion (collage) :

Elles sont causées par une intensité très faible du courant de soudure, vitesse très rapide ne permettant pas la fusion du métal. Pour les éviter, il faut faire un choix judicieux de l'intensité du courant et la vitesse d'avancement de l'électrode.

d) Défauts de pénétration :

Les défauts de pénétration peuvent être des manques ou des excès de pénétration (figure 23). L'excès de pénétration est un surplus du métal d'apport soit à la racine ou à la surface du cordon de soudure, par contre le manque de pénétration est l'insuffisance du métal d'apport au-dessus ou au-dessous de cordon de soudure. Les principales causes de ce type des défauts sont classées pour le manque et l'excès respectivement :

- Vitesse petite de soudage /trop grande.
- Apport calorifique forte/ trop faible.
- Distance électrode courte /pièce trop large.

La méthode d'inspection est le contrôle visuel après l'adaptation des paramètres de soudage et éventuellement le contrôle radiographie si la racine est inaccessible (soudures de tuyauteries).

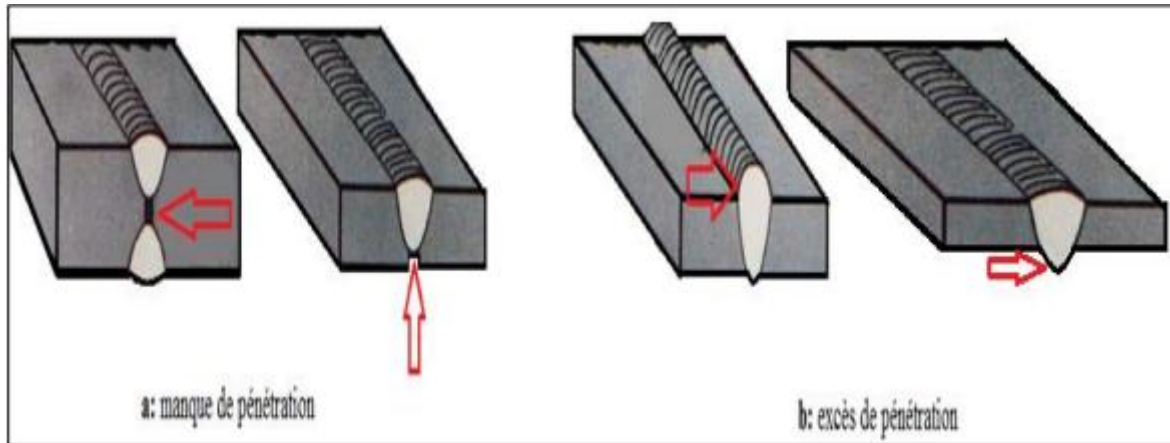


Figure 23 : Défauts de pénétration.

e) Retassures de cratère :

Ce sont des cavités à l'extrémité des cordons, souvent remplies de laitier et pouvant donner lieu à fissuration. Elles sont causées par une solidification rapide du métal après interruption de l'arc. Pour les éviter, il faut un contrôle visuel pendant le soudage, interruption progressive de l'arc en fin d'exécution des cordons. [21]

f) Les fissures de solidification :

Elles apparaissent en fin de solidification. Elles peuvent être internes ou débouchées en surface mais elles sont toujours localisées dans les espaces interdendritiques et suivent donc les directions de solidification, De ce fait, elles sont en tous points perpendiculaires aux isothermes figure 24.

Comme elles se forment à haute température, elles sont oxydées au contact de l'air lorsqu'elles débouchent en surface. Enfin elles sont toujours larges du fait de la contraction du métal environnant durant le refroidissement. [21]

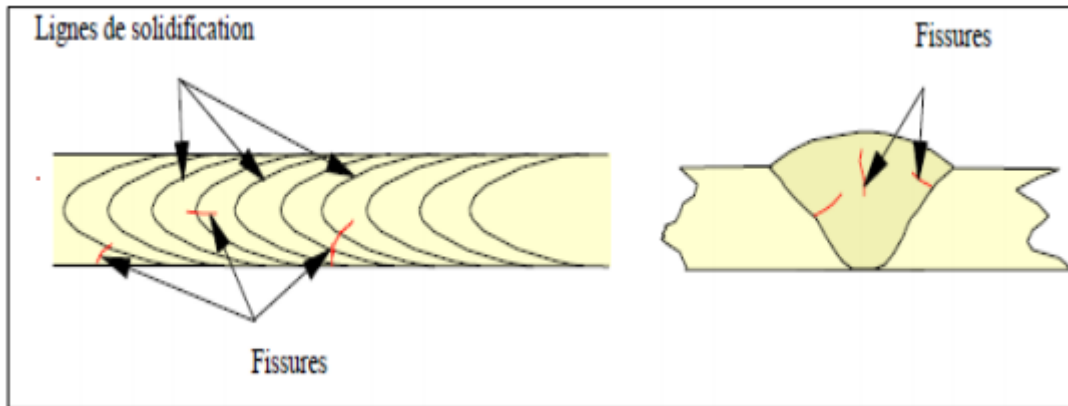


Figure 24: Localisation de fissures de solidification.

Les facteurs ayant une influence sur la fissuration à chaud sont pour une part tributaire de l'analyse du métal fondu et pour une autre part, de la procédure de soudage.

Un grand intervalle de solidification, la présence de composés à bas point de fusion, font que les phases solide et liquide vont coexister dans un grand domaine de température.

Durant le refroidissement dans ce domaine, le liquide se transforme en solide en se contractant (variation de volume à la solidification) tandis que le solide déjà formé se contracte selon son propre coefficient de dilatation.

On comprend alors que plus l'intervalle de solidification est grand, plus on a de risque d'avoir un manque de matière en fin de solidification et qu'une fissure apparaisse dans les zones qui se solidifient en dernier c'est à dire dans les espaces interdendritiques.

L'influence de la limite d'élasticité du métal de base et du bridage des pièces à assembler est d'une autre nature.

Lorsque la zone fondue refroidit, elle se contracte si bien que des contraintes aillent se développer si le retrait ne peut pas se faire librement. Ces contraintes de retrait vont s'appliquer sur le métal fondu en cours de refroidissement, l'obligeant à se déformer ce qu'il pourra ou non supporter. Elles seront d'autant plus grandes que le bridage interne ou externe sera important et limitera ainsi les déformations de l'assemblage.

Bien que souvent sous-estimée, la forme des cordons de soudure et la vitesse de soudage ont une influence capitale. La zone qui se solidifie en dernier concentre les impuretés du fait de leur rejet dans la phase liquide lors de la solidification.

Cela la rend chimiquement plus sensible au risque de fissuration et, lorsque la soudure a une surface concave, cette zone est aussi celle de plus faible section si bien que les contraintes résultant du retrait pourront plus facilement engendrer la fissuration que lorsque la surface est convexe (Figure 24).

De même, lorsqu'un cordon est très fortement pénétré (rapport Largeur / Pénétration faible), ses bords latéraux sont sensiblement parallèles bien que la phase finale de la solidification concerne toute sa hauteur (colonne centrale) ; au contraire, lorsque la forme est triangulaire, la solidification se termine en surface du cordon ce qui réduit les risques de fissuration.[7]

Enfin, une réduction de la vitesse de soudage et donc de solidification permet plus facilement au liquide encore présent de venir combler les vides créés entre les espaces interdendritiques par la diminution de volume lié au passage Liquide – Solide ; ainsi, les risques d'apparition de fissures s'en trouvent réduits. [22]

Ces considérations sont générales et s'appliquent donc à tous les types de matériaux, mais énoncer qu'un grand intervalle de solidification ou la présence de composés à bas point de fusion aggravent le risque de fissuration n'est pas en pratique d'une très grande utilité pour l'ingénieur soudeur qui doit mettre en œuvre des matériaux pour lesquels il ne connaît généralement pas ces caractéristiques. Il est pour lui plus intéressant de pouvoir appréhender les risques à partir de l'analyse chimique.[23]

g) La fissuration à froid :

Ces fissures apparaissent à basse température ($< 200\text{ °C}$). De ce fait, elles sont fines et présentent une surface non oxydée. Elles n'ont pas d'orientation privilégiée par rapport à la microstructure. Elles se développent le plus souvent dans la zone affectée par la chaleur mais peuvent parfois se rencontrer dans le métal fondu lorsque celui-ci possède une très haute limite d'élasticité. Sur la figure 25 elles sont tributaires du champ de contraintes ce qui explique qu'elles prennent naissance dans les zones de concentration que constituent les défauts de surface (mauvais mouillage, caniveaux) ou les discontinuités liées à la conception de l'assemblage (pénétration partielle par exemple).

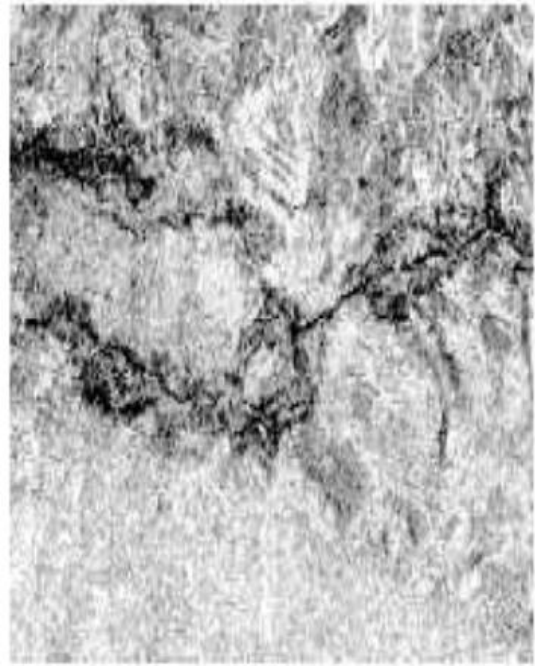
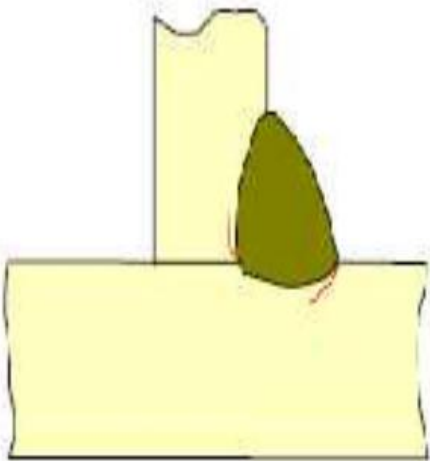


Figure 25:exemple de fissuration à froid.

Pour apparaître, ces fissures nécessitent la conjugaison de trois facteurs :

- Une structure peu ductile (martensite),
- Des contraintes,
- De l'hydrogène.

Ainsi l'hydrogène apparaît comme un facteur fondamental de la fissuration à froid. Comme nous l'avons indiqué précédemment, la fissuration à froid peut se produire dans le métal fondu lorsque l'on soude des aciers à haute limite d'élasticité.

Le plus souvent, elle est alors transversale au cordon mais peut aussi être longitudinale lorsqu'une discontinuité existe sous la racine du cordon (pénétration partielle) ou prendre l'apparence d'une fissuration en chevron (microfissures orientées à 45° par rapport à la direction de soudage) dans les soudures ayant des caractéristiques de traction intermédiaires.

Ce transfert de localisation de la fissuration à froid de la zone affectée thermiquement vers le métal fondu est d'autant plus probable que la limite d'élasticité du métal que l'on dépose est élevée et que l'on soude des aciers de conception moderne dont la teneur en carbone est faible. Ainsi, lors du soudage de ces aciers, ce n'est plus l'analyse du métal de base qui conditionne la température de préchauffage pour éviter la fissuration dans la ZAT, mais bien l'analyse du métal fondu afin d'éviter la fissuration du cordon.

En procédant ainsi, il a été montré que l'on pouvait diminuer la température de préchauffage de 50 à 100 °C par rapport à l'utilisation d'un produit unique et ceci bien entendu sans affecter les caractéristiques de traction du joint dans sa globalité.

Dans de nombreux cas, cela revient à supprimer le préchauffage ce qui en plus de présenter un avantage économique direct et immédiat pour le constructeur, améliore considérablement les conditions de travail du soudeur et se traduit généralement par une diminution du taux de défauts opératoires donc de réparations. [7]

II.7 Domaines d'applications

Le soudage par procédé TIG doit se comparer au soudage MIG/ MAG car, bien que différent dans le principe, il développe la même puissance et devrait par suite donner lieu à des résultats comparables. Mais ses avantages et ses inconvénients font qu'il trouve ses applications dans des domaines distincts. Ses avantages technologiques sont essentiellement dus au fait que l'échauffement et l'arrivée de fil sont indépendants. Par suite :

- une torche TIG est un chalumeau puissant et précis permettant des fusions sans métal d'apport, impossibles à traiter autrement que par plasma.
- l'apport de métal peut être réglé indépendamment de la puissance de l'arc et de l'énergie dispensée.

L'emploi de gaz onéreux, comme l'argon ou l'hélium, fait que ses applications sont réservées aux métaux et assemblages nobles : aciers inoxydables et réfractaires, alliages de nickel, alliages d'aluminium et de magnésium, de titane, de cuivre, etc.

D'exécution lente à des vitesses ne dépassant pas quelques dizaines de centimètres par minute, il autorise, par un excellent dosage thermique, les travaux de haute qualité et, par un contrôle facile des paramètres, les travaux de grande précision. C'est le procédé de soudage à l'arc de la construction aéronautique. À l'inverse, la productivité est médiocre et n'est pas un facteur qui puisse intervenir.[19]

Chapitre III
ETUDE D'UN JOINT
SOUDE

Une étude faite sur la soudure des aciers inoxydables 304L et 316L par la technique TIG [24], ce procédé de soudage utilise une électrode réfractaire en tungstène entre laquelle s'établit un arc électrique et des pièces à souder. L'opération s'effectue sous atmosphère contrôlée, le gaz plasmagène utilisé est l'argon à une pureté de 99,95%. Dans la figure ci-dessous une représentation schématique du procédé TIG.

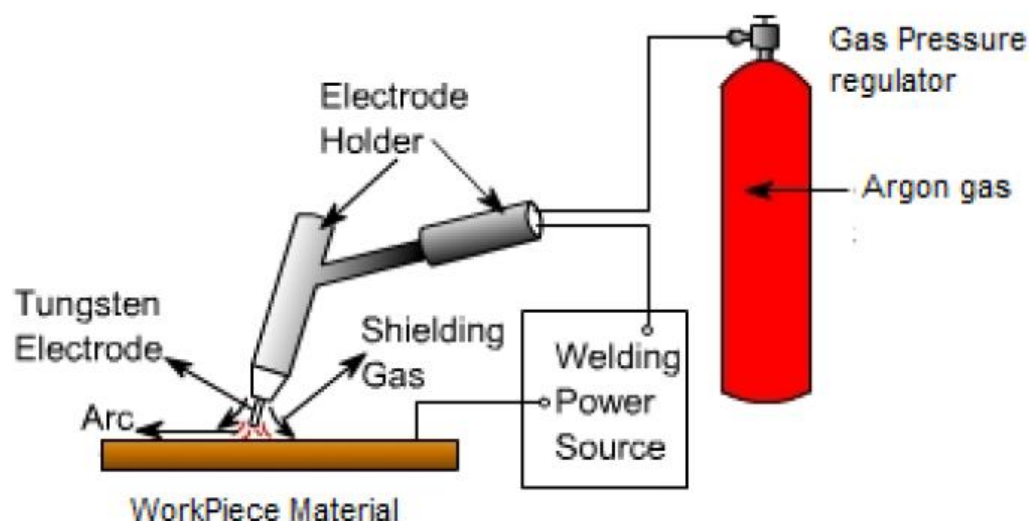


Figure 26: Illustration schématique du procédé de soudage TIG [25].

Les compositions chimiques des aciers à souder sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5: Composition chimique des aciers étudiés

Aciers inoxyable	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	S	P	Al	V	Ti	Co	W	Fe
304L	0.02	0.57	0.93	18.41	8.58	0.08	0.07	-	0.022	0.038	<0.03	0.09	<0.03	0.18	<0.03	MB
316L	0.02	0.71	1.88	17.34	12.08	0.23	2.88	<0.03	0.025	0.031	0.03	0.09	<0.03	0.1	0.05	MB

Le soudage a été effectué par une machine de type Fronius model Magic Wave 2000, Austria, selon les paramètres présentés dans le tableau 6.

Tableau 6: Paramètre de soudage TIG des aciers 304 L et 316L (T2+T5)

No	T2	T5
V(Volt)	9.7	9.7
I(A)	20	20
TERAVEL speed (mm/s)	1.9	1.9
Length of Arc (mm)	1.5	1.5
Backing gas	no	Yes

III 1. Microstructure du cordon de soudure :

Dans la zone de 304L, austénite de type Widmanstätten, austénite aciculaire et faible proportion de ferrite sont observées dans la première région de solidification (couche de transmission) (Fig27. 2b et 4c).

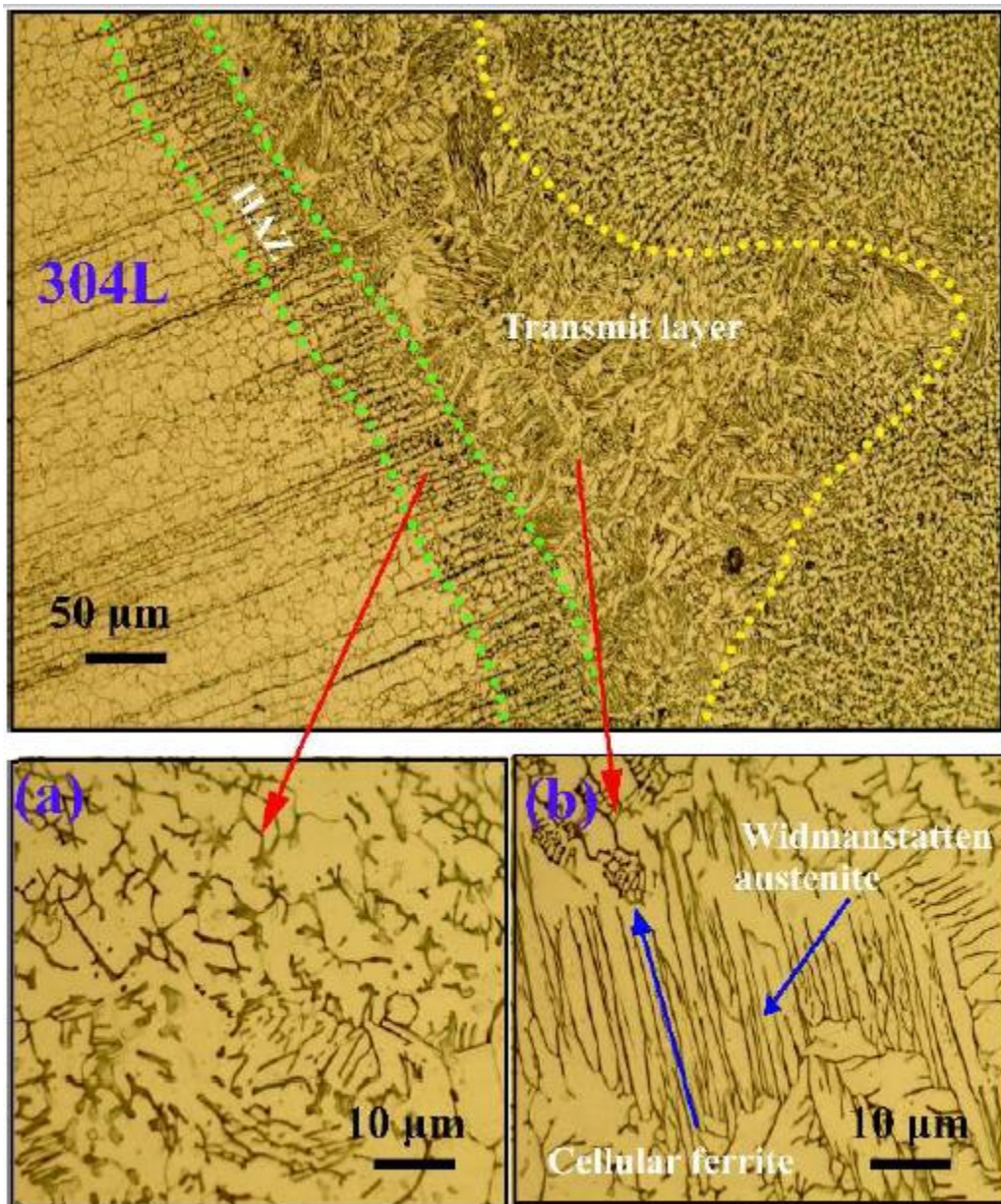


Figure 27: Microstructure du cordon de soudure de l'échantillon T2 du côté de l'acier 304L

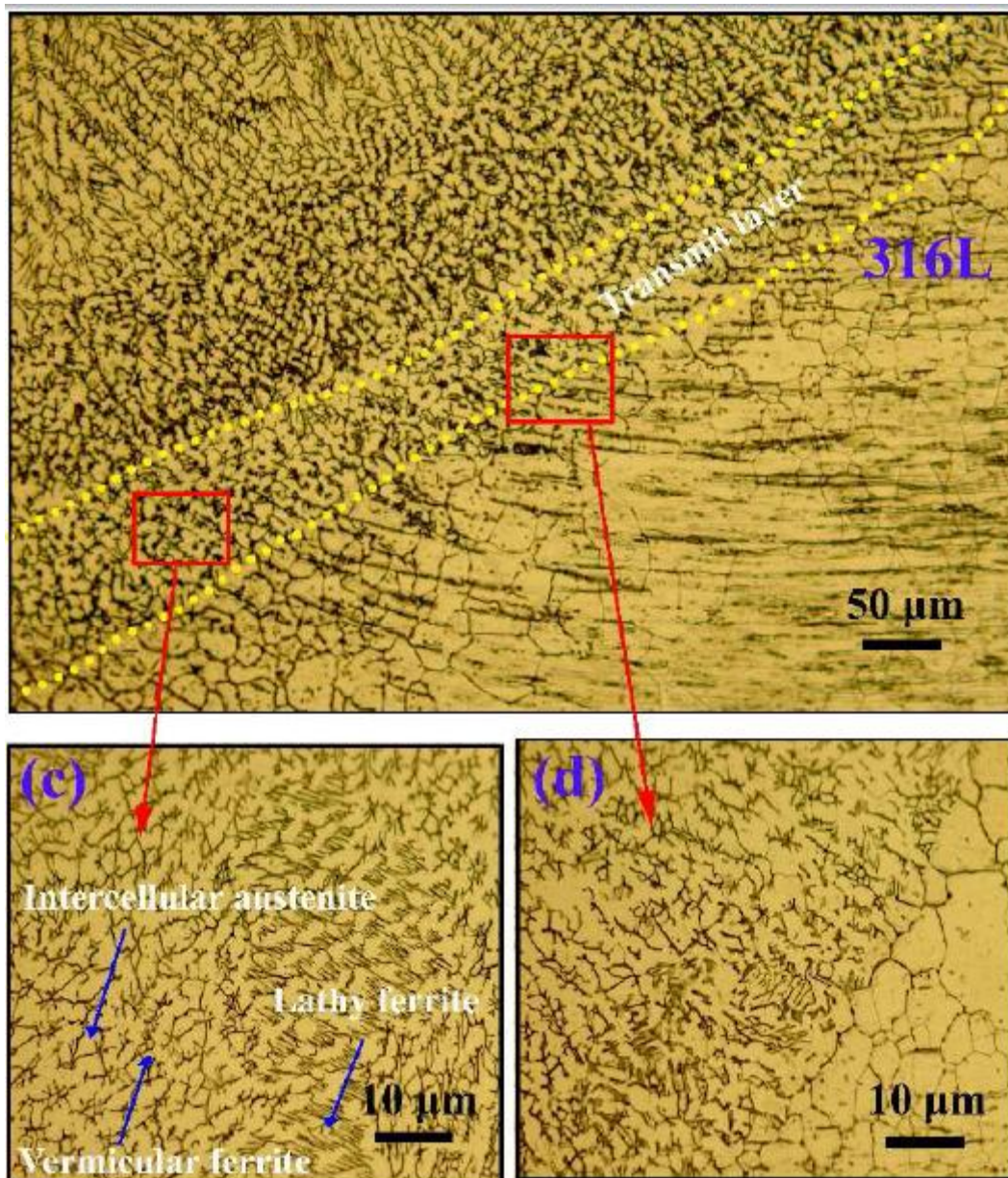


Figure 28: Microstructure du cordon de soudure de l'échantillon T2 du côté de l'acier 316L

L'austénite Intercellulaire, la ferrite sous deux formes différentes sont observées dans la zone de l'acier 316L (Fig. 3c et 4b). Selon les figures 27b, 28c, 28d, 29b and 29c, la quantité de la ferrite présente dans la première zone solidifiée du côté de 304 L, est plus faible que celle présente de la zone de l'acier 316 L. C'est à cause, du molybdène existe dans l'acier 316L qui joue un rôle important dans la stabilité de la ferrite comparativement au chrome.

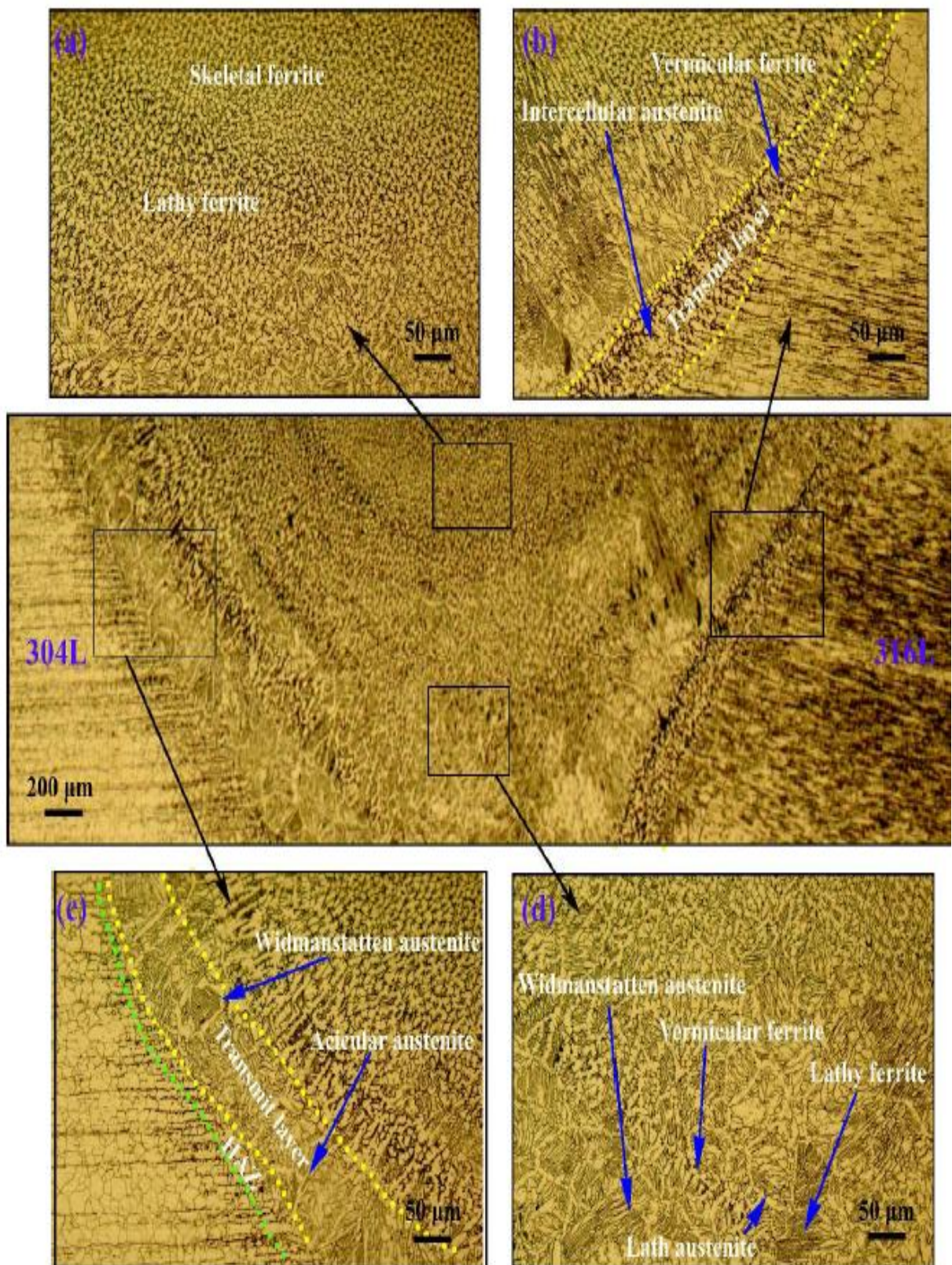


Figure 29 : Microstructure du cordon de soudure de l'échantillon T5.

III-2 La zone ZAT :

La quantité élevée du Mo et la faible présence de Niobium, titane, et vanadium sont efficaces pour la prévention de la croissance des grains dans les aciers.

Pour les deux joints de soudure, la croissance de grain dans le métal de base de l'acier 316L est freinée à cause du Mo présent en quantité considérable et la faible proportion du niobium, ce qui explique l'absence de la ZAT dans la microstructure (Fig 27d and 28b).

De la côte de l'acier 304L la croissance des grains dans la ZAT est limitée. Par conséquence, Dans le cordon de soudure la croissance significative de la taille de grain dans la ZAT n'a pas été créée [26].

Selon les figures 27a et 28c, la microstructure de la ZAT contient de la ferrite à cause du chauffage de l'acier austénitique a une température inferieure a la température de solidus.

D'autre part, il y a une grande la possibilité de la formation de la ferrite dans la ZAT si le rapport C_{req}/N_{ieq} est élevé, comme dans le cas d'acier 304L qui a un rapport C_{req}/N_{ieq} élevé. Cette ferrite est généralement formée dans les joints des grains ce qui diminue la croissance des grains et la sensibilité à la fissuration.

Les figures 27 et 28 montrent que la ZAT dans le cordon de soudure T2 est plus large que celle de T5. C'est à cause de la présence du gaz support It et l'absorption de la chaleur par les grains dans le cas de T5.

III-3 Mesure de microdureté:

La technique de soudage TIG est réputée par sa faible vitesse de refroidissement comparativement aux autres techniques de soudage. C'est pour cette raison, la dureté du joint soudé et inférieure à celle du métal de base.

En outré, en accord avec l'augmentation de vitesse de refroidissement depuis la ligne centrale de la soudure vers le métal de base, la dureté augmente. La dureté de la ligne centrale de soudure, la ZAT de la côté 304L et la limite de soudure de 316L de l'échantillon T5 est supérieure que la zone mentionnée en T2 du a la présence du gaz support et la diminution de la vitesse de refroidissement.

La dureté de la ZAT à l'acier 304L est supérieure que celle de la côte de l'acier 316L.il est causé par la dureté élevée du métal de base 304L comparativement à la dureté de 316L.

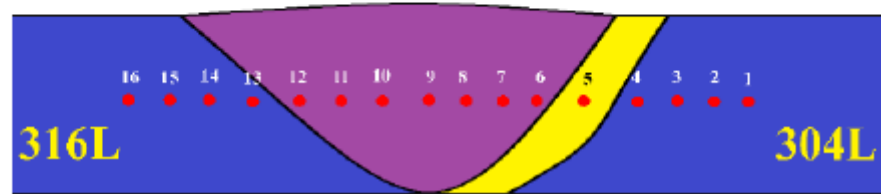
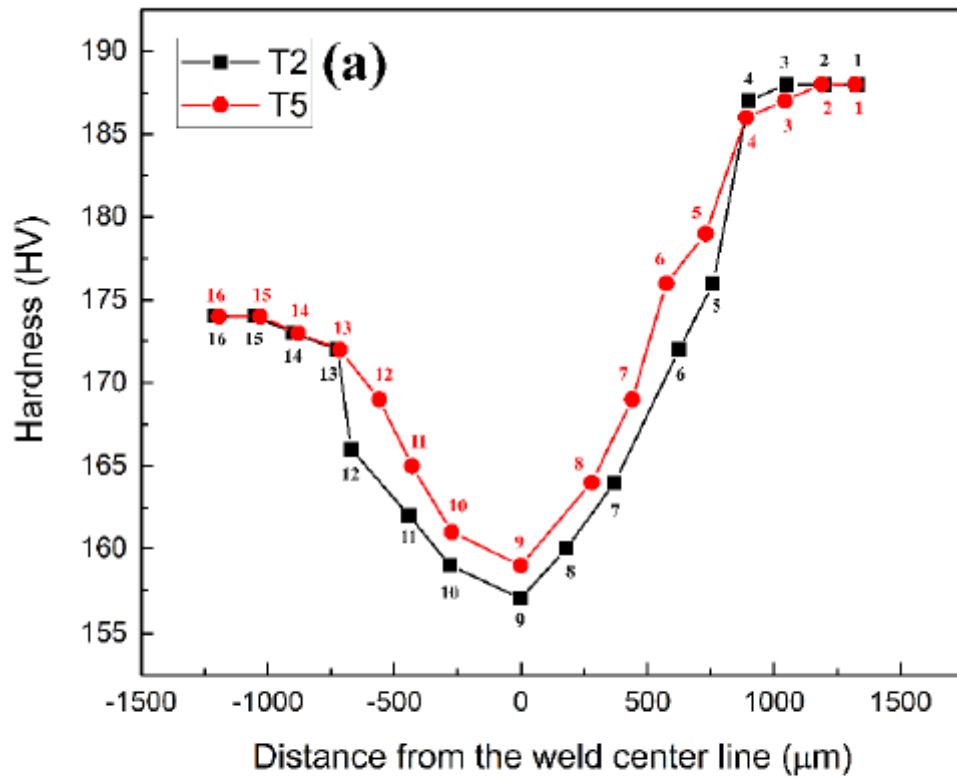


Figure 30: Mesure de la microdureté.

IV-Conclusion :

Les conclusions retirées de ce travail de mémoire sont :

1- La microstructure finale du cordon de soudure TIG est influencée par la formation primaire de la ferrite et austénite (qui dépend essentiellement la composition chimique), formation d'une phase secondaire causée par la transformation ferrite-austénite qui dépend des gradients de concentration et thermiques.

2- Dans la zone de transmission de l'acier 304L, l'austénite de type widmanstätten est formée et faible quantité de ferrite a été observée. Dans l'autre cas de la zone de transmission de l'acier 316L, l'austénite intercellulaire est formée, plus deux autres types de la ferrite sont observés. C'était à cause du Mo existe dans cette zone du 316L, la ferrite contenu dans la zone de transmission de 304L et plus bas que celle contenu dans la même zone de la côte de 316L.

3- Pour les deux cordons de soudure, la ZAT est observée de la côte de 304L, et absente dans l'autre côté de 316L, à cause des éléments chimiques notamment le Mo.

4- Par l'augmentation de la chaleur, la ZAT sera plus large. Les cordons de soudure qui ont la même condition de chaleur d'entrée, la ZAT apparait plus petite dans l'échantillon a eu le gaz support.

5- La dureté du cordon de soudure est plus base que celle du métal de base, à cause de la faible vitesse de refroidissement.

6- La dureté des échantillons dépend essentiellement la microstructure, les cordons de soudure TIG ont des microstructures des couches de solidification, les valeurs de dureté sont différentes selon les couches.

Références :

- [1] Pierre-Jean, CUNAT ; M 4 540-aciers inoxydables. critères de choix et structure ; centre français d'exploitation ; article ;page 2
- [2] Christian, Bonnet ; Le Soudage Métallurgie et Produits ; Air Liquide /CTAS 2001 ; Chapitre 3 page 41-44-46-47.
- [3] Pierre-Jean, CUNAT ; M 4 541-Aciers inoxydables. Propriétés. Résistance à la corrosion ; centre français d'exploitation ; article ;page 3
- [4] Amy, Zahia ;Azem, Said; caractérisation de l'acier inoxydable x5crni18-10 et étude de son oxydation à température ; année 2013 université mouloud mammeri de tizi-ouzou faculté du génie de la construction département de génie mécanique ;mémoire de magister ;tizi-ouzou page 14, 20 ,21.
- [5] Oulbani Said ; A.Ait Saada ; K.Rehouma; influence de la fatigue mécanique sur la microstructure et les propriétés mécanique d'un joint soude en acier inoxydable austénitique 316l ;2008 université mohamed bouara6 boumerdes faculté des sciences de l'ingénieur département maintenance industrielle ; mémoire de magister ;boumerdes ; page 5-6.
- [6] Emilie LE GUEN , Rémy FABBRO, Muriel CARIN, Etude du procédé de soudage hybride laser/MAG : Caractérisation de la géométrie et de l'hydrodynamique du bain de fusion et développement d'un modèle 3D thermique,2010, UNIVERSITÉ DE BRETAGNE-SUD thèse Paris page 18.
- [7] Badreddine MAALEM ; Omar ASSALA ; Résistance à la corrosion des joints soudés par le procédé TIG, d'un assemblage hétérogène 304L /A9étamé, dans NaCl 32g/l.2015, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA ; MEMOIRE ;Annaba ;p27- 4 -5-6-18-19.
- [8]Berkani Krime ;M. temmar ;étude comparative entre deux procédés d'assemblage, le soudage TIG et le rivetage en aéronautique ;2011 ; université de blida ; mémoire ;blida ; p21
- [9] Pierre-Jean, CUNAT ; M 4 542-Aciers inoxydables. Propriétés. Mise en œuvre; centre français d'exploitation ; article ;page 13.

- [10] BELABED Abdelmadjid ; BENACHOUR Mustapha ; BENACHOUR Nadjia; Analyse des défauts et étude de la fissuration par fatigue dans les soudures d'angles ;2017 ; Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen ;Mémoire ; Tlemcen ;p19
- [11] Régis BLONDEAU. Métallurgie et mécanique du soudage. Edition LAVOISIER, PARIS. p23.
- [12] Chainarong SRIKUNWONG ; Yves BIENVENU ; MODELISATION DU PROCEDE DE SOUDAGE PAR POINTS ; Le 14 octobre 2005 ;MINES PARISTECH – UNIVERSITE ; THESE ;Paris, p8.
- [13] SARKIS Elias ; Machine de soudage à la molette pour les gaines circulaires ;2012 ; Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université Libanaise ; Projet de fin d'étude ;p28,29.
- [14] Régis BLONDEAU. Métallurgie et mécanique du soudage. Edition LAVOISIER ,PARIS . p45.
- [15] Guy MURRY, Soudage et soudabilité métallurgique des métaux, Techniques de l'Ingénieur, centre français d'exploitation ; article ;page 5- 6.
- [16] Principaux procédés du soudage, 2017.description, démarche d'évaluation et prévention des risques .<https://www.slideshare.net/> .
- [17] Said BENSAADA ;Fonderie et soudage, les principes de bases de fonderie et du soudage ; Editions Universitaires Européennes p71.
- [18] Roland CAZES. Soudage par faisceaux à haute énergie : faisceau d'électrons Et laser'' techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage. Article.
- [19] Roland CAZES ; Soudage à l'arc ; Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique ; article ; pages 7-14-16-17.
- [20] Bonnet C., Soudage et Techniques connexes, Juillet - Août 1980, p 6.
- [21] BEN NAA SALIM ; ZAOUI MOUSSA ; Etude de l'effet des réparations successives sur l'état d'une construction soudée ;2016 ; Université de M'sila ; MEMOIRE ;p 32-33-34.
- [22] Kotecki D.J, Sievert T.A, Welding Journal, May 1992, p. 171-178.

[23]Bailey N., Jones S.B., « The solidification cracking of ferritic steel during submerged arc welding », *Welding Journal*, Aug. 1978 ; p 217.

[24] H.M. Soltani, M. Tayebi, Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding, *Journal of Alloys and Compounds* (2018), doi: 10.1016/j.jallcom.2018.06.302.

[25]G. Shanmugasundar, B. Karthikeyan , P. Santhosh Ponvell, V. Vignesh Optimization of Process Parameters in TIG Welded Joints of AISI 304L -Austenitic Stainless Steel using Taguchi's Experimental Design Method *Materials Today: Proceedings* 16 (2019) 1188–1195

[26]J. C. Lippold, D. J. Kotecki, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, A John wiley & sons INC., Publication, Hoboken, New Jersey, 2005.