

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



**Université Saad Dahleb Blida 1**  
**Faculté des Sciences et Technologies**  
**Département de mécanique**



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Master en  
**Génie des matériaux**

**Thème :**

*Caractérisation microstructural et mécanique de la jonction gaine-  
bouchon en Zercaloy-4 réalisée par les deux procédés de soudage TIG et  
Résistance.*

Réaliser par :

**SADOUKI Mohammed**

Encadré par :

**Dr. A. SAHLI**

**Dr. K. TAHARCHAOUCH**

Promotion: 2022/2023

## Résumé

Le présent travail porte sur l'étude microstructurale et du comportement mécanique des jonctions bouchons-tubes soudées par les deux procédés TIG et soudage par résistance. Il représente une approche théorique et pratique sur l'effet des paramètres de soudage sur la microstructure et les propriétés mécaniques des jonctions soudées. Les observations visuelles confirment que pour obtenir des soudures acceptables il faut appliquer des programmes de soudage bien déterminés. Elles affirment que plus la quantité de chaleur fournie est grande plus l'étendue de des zones ZAT et ZF sont importantes. Par ailleurs, les observations microstructurales révèlent que la jonction est constituée plus de la zone fondue de, la zone recristallisée, la zone partiellement transformée et de la zone complètement transformée constituée de structure de Widmanstätten. Cette dernière, est obtenue uniquement avec le procédé TIG. Les valeurs de microduretés mesurées varient le long du cordon de soudure selon la microstructure obtenue. Elles enregistrent des valeurs maximales de l'ordre de 270 Hv pour les deux procédés de soudage TIG et STR réalisés.

**Mots clé:** Zircalloys-4, soudage par TIG, soudage par résistance.

# **Remerciements**

*Au terme de ce travail je tiens à remercier Allah qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour terminer ce projet. الحمد لله*

*J'exprime ma reconnaissance envers les membres du jury pour avoir acceptés d'évaluer ce travail.*

*Mes sincères remerciements sont adressés à mes responsables scientifiques Dr. A. SAHLI, et Dr. K. TAHARCHAOUCH pour m'avoir permis de réaliser ce travail, et pour m'avoir aidé et encouragé*

*Je voudrais remercier, en premier lieux, mon responsable scientifiques Mr. O. MENCHI, -Attaché de recherche- pour m'avoir permis de réaliser ce travail, et pour m'avoir aidé et encouragé.*

*J'adresse mes remerciements chaleureux à Mr. O. MENCHI, -Attaché de recherche- et A. BENDIFFALLAH -Assistant Ingénieur Spécialisé- pour sa disponibilité et son aide précieuse .Merci.*

*Je remercie également Mr A. SEHISSEH et Mr O.AZOUANI pour leur aide et leurs précieux conseils.*

*Je tiens également à remercier tous les membres du CRND-DTC.  
Merci pour l'accueil et la bienveillance.*

*Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin, en particulier mes collègues*

## Liste des figures

### A-I-Le zirconium et ses alliages

- Figure -1** : Diagramme pression température de zirconium.  
**Figure -2** : Structure de Widmanstätten.  
**Figure -3** : Influence des éléments d'addition sur les domaines de phase du zirconium  
**Figure -4** : Domaine de phase du Zircaloy-4.  
**Figure -5** : Microstructure du Zircaloy-4 standard et du Zircaloy-4 trempé.  
**Figure -6** : Microstructure de zry4 par microscopie électronique à balayage. La photo à droite montre bien les phases de Laves (précipités  $Zr(Fe,Cr)_2$  noirs).

### A-II- Le Soudage :

- Figure -7** : Classifications des procédés de soudage.  
**Figure -8** : Schéma illustrant les zones principales dans un cordon de soudure par fusion.  
**Figure -9** : Germination par épitaxie à la ligne de fusion et de la croissance de grain compétitive en métal soudé.  
**Figure -10** : Représentation schématique d'un bain de fusion elliptique.  
**Figure -11** : Profil de la température actuelle et la température d'équilibre du liquidus, effet du gradient de température  $G$  et le  $\Delta T_c$  sur le mode de solidification.

### A-III- Soudage à l'arc électrique TIG :

- Figure -12** : Principe du soudage TIG.  
**Figure -13** : Aspects de l'arc suivant les polarités. A : Courant continu polarité (-). B: Courant continu polarité (+), et C : courant alternatif.  
**Figure -14** : Angle d'affutage de l'électrode.  
**Figure -15** : L'influence de l'angle d'affutage de l'électrode sur le rapport  $p/L$  est petit.  
**Figure -16** : La zone d'affutage.  
**Figure -17** : Les stries d'affutage.

### A-IV- Soudage par résistance :

- Figure -18** : Schéma de soudage par résistance.  
**Figure -19** : Schéma des différentes étapes du procédé de soudage par résistance en bout.

### B -Techniques expérimentales

- Figure -20** : a) Les bouchons utilisés pour le soudage TIG. b) Les bouchons utilisés pour le soudage STR. c) tube en zircaloy-4.  
**Figure -21** : Équipement de Soudage par procédé TIG.  
**Figure -22** : Chambre de soudure.  
**Figure -23** : Le cycle de soudage (TIG).  
**Figure -24** : Equipement de soudage par résistance.  
**Figure -25** : Chambre de soudage et emplacement du tube (1) et du bouchon (2).  
**Figure -26** : Coupe axiale d'un assemblage gaine-bouchon.  
**Figure -27** : Assemblage tube- bouchon enrobé.  
**Figure -28** : Microscope optique Carl Zeiss type Axio.

**Figure -29 :** Dimensions de l’empreinte et formule de calcul de la dureté selon Vickers.

**Figure -30 :** Microduromètre semi-automatique.

### **C- Résultats et interprétation**

**Figure -31 :** Equilibre global du bain de fusion.

**Figure -32 :** Bonne soudure (Equilibre global du bain de fusion).

**Figure -33 :** Soudure incomplet.

**Figure -34 :** Défaut de soudage.

**Figure -35 :** Mauvaise soudure.

**Figure -36 :** Observation visuelle des échantillons soudés par le procédé STR.

**Figure -37 :** L’observation macrographique d’un assemblage gaine-bouchon par les procédé TIG et STR (A : TIG12 et B : STR 5).

**Figure-38 :** L’observation macrographique des assemblages gaine-bouchon avec différents paramètres de soudage TIG.

**Figure-39 :** Observation macrographique des assemblages gaine-bouchon avec différents paramètres de soudage STR.

**Figure -40 :** Microstructure du métal de base du bouchon (A) ainsi que de la gaine (B).

**Figure -41 :** Gradient de microstructure observé entre les différentes zones de soudage Gaine-Bouchon par le procédé TIG

**Figure-42 :** Présentation schématique des différentes parties constitutives du joint soudé Gaine-Bouchon par le procédé TIG.

**Figure -43 :** Gradient de microstructure observé entre les différentes zones de soudage Gaine-Bouchon par le procédé STR.

**Figure -44 :** Discontinuités entre la gaine et le bouchon.

**Figure -45 :** Microstructure du métal de base (Z1), Zone recristallisée (Z2) et de la zone partiellement transformé (Z3). (A) bouchon et (B) gaine. [TIG]

**Figure -46 :** Microstructure du métal de base (Z1), Zone recristallisée (Z2) et de la zone partiellement transformé (Z3). (A) bouchon et (B) gaine. [STR]

**Figure -47 :** Microstructure de la Zone surchauffé (Zone 4) (A) bouchon et (B) gaine. [TIG]

**Figure -48 :** Microstructure de la Zone surchauffé (Zone4) (A) bouchon et (B) gaine. [STR]

**Figure -49 :** Structure de Widmanstätten.

**Figure -50 :** Microstructure de la Zone fondu (Zone5). [TIG]

**Figure -51 :** Profil de Microdureté obtenu sur le joint soudé par le procédé TIG.

**Figure -52 :** Profil de Micro dureté obtenu sur le joint soudé par le procédé STR.

## Liste des tableaux

### A- Le zirconium et ses alliages:

**Tableau 1:** Principales propriétés physiques du zirconium.

**Tableau 2:** Composition chimique des alliages de zirconium utilisés dans les réacteurs nucléaires.

**Tableau 3:** Composition chimique du Zircaloy-4 (% massique).

### B- Techniques expérimentales:

**Tableau 4:** Composition massique du Zry-4 suivant la certification du fournisseur.

**Tableau 5:** Concentration des impuretés dans le Zry-4 suivant la certification du fournisseur.

**Tableau 6:** Temps de révolution du tube en fonction de la position du potentiomètre.

**Tableau 7:** Les différents paramètres appliqués aux soudures réalisées.

**Tableau 8:** Périodes de soudage.

**Tableau 9:** Courants de soudage.

**Tableau 10:** Les sticks out pour les différents échantillons.

### C- Résultats et interprétation:

**Tableau 11:** Les différents paramètres de soudages et les résultats obtenus.

**Tableau 12:** Tableau des valeurs mesuré.

**Tableau 13:** Les valeurs de la microdureté mesurées dans différentes zones.

**Tableau 14:** Les valeurs moyennes de microdureté mesurée dans différents zones.

## Table des matières

	Résumé	
	Remerciement	
	Liste des tableaux	
	Liste des figures	
	<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>A</b>	<b>Etude bibliographique</b>	
<b>A-I</b>	<b>Généralités sur le zirconium et ses alliages</b> .....	<b>2</b>
1-	Le zirconium.....	2
2-	Caractérisation morphologique de la microstructure.....	2
3-	Les propriétés physiques du zirconium.....	4
4-	Le soudage de zirconium et ses alliages.....	4
5-	Les alliages de zirconium.....	6
6-	L'influence de quelques éléments additifs sur les propriétés du Zirconium...	6
7-	Le Zircaloy-4.....	7
8-	Rôle des éléments d'addition.....	7
9-	La microstructure du zircaloy-4.....	9
<b>A-II</b>	<b>Le Soudage</b> .....	<b>10</b>
1-	Définition.....	10
2-	Classification et principe des procédés de soudage.....	10
3-	Caractéristiques d'un cordon de soudure par fusion.....	11
4-	Processus de solidification des soudures.....	12
<b>A-III</b>	<b>Soudage à l'arc électrique TIG</b> .....	<b>16</b>
1-	Définition et principe du procédé.....	16
2-	Mécanismes de l'arc électrique.....	17
3-	Paramètres associés au soudage TIG.....	17
4-	Effet des paramètres de soudage sur la morphologie du cordon.....	18
5-	Avantages du procédé.....	20
<b>A-IV</b>	<b>Soudage par résistance</b> .....	<b>21</b>
1-	Définition.....	21
2-	Principe.....	21
3-	Différents modes de soudage par résistance.....	22
4-	Soudage en bout par résistance pure.....	22
5-	Les paramètres à prendre en compte.....	22
6-	Le cycle de soudage.....	22

7-	Phénomènes physiques au cours du procédé.....	24
8-	Avantage du soudage par résistance.....	24
<b>B</b>	<b>Techniques expérimentales</b>	
B-I	Introduction.....	25
B-II	Matériaux de gainage.....	25
B-III	Préparation les gaines et les bouchons pour soudée.....	26
B-IV	Exécution du soudage.....	26
B-IV.1	Soudage par le procédé TIG.....	26
B-IV.2	Soudage par le procédé STR .....	30
B-VI	Caractérisation des soudures.....	33
B-VI-1	Préparation des échantillons pour analyse.....	33
B-VI-2	Examen au microscope optique (MO).....	34
B-VI-3	Essai de microdureté.....	34
<b>C</b>	<b>Résultats et interprétation</b>	
C-1	Introduction.....	36
C-I-	L'observation visuelle.....	36
C-I-1.	Le procédé TIG .....	36
C-I-2.	Le procédé STR.....	39
C-II-	L'observation Macrographique.....	40
C-II-1.	Soudage TIG.....	41
C-II-2.	Soudage STR .....	42
C-III-	Observation par microscope optique .....	43
C-III-1.	Le métal de base.....	43
C-III-2.	Soudage TIG.....	43
C-III-3.	Soudage STR .....	44
C-III-4.	Les différentes zones.....	45
C-IV.	Mesure de microdureté du joint de soudure .....	49
	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>
	Référence bibliographique	

## Introduction Générale

Dans le cœur des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP), les pastilles d'oxyde d'uranium sont isolées du circuit primaire par des gaines métalliques en alliage de zirconium. L'utilisation de ces alliages est liée à leur très faible absorption aux neutrons thermiques, à leur bonne résistance à la corrosion ainsi qu'à leurs bonnes propriétés mécaniques à chaud lors de leur séjour en réacteur. Les alliages de zirconium les plus utilisés sont le Zircaloy-2 et le Zircaloy-4.

Une grappe combustible de type CANDU est composée de 37 crayons; Chaque crayon est formé d'un tube mince de Zry-4, remplie de matière fissile sous forme de pastilles d' $\text{UO}_2$ . Le bouchon de Zry-4 est soudé à ses extrémités pour assurer le confinement de la matière fissile et les produits de fission à l'intérieur du crayon.

Différents procédés de soudure sont utilisés lors de la fabrication des crayons de combustible, à savoir:

- le soudage par laser qui permet de réaliser une soudure circulaire au moyen d'un faisceau laser induisant une fusion des matériaux de la gaine et du bouchon,
- le soudage par TIG (Tungstène Inerte Gaz) qui est un procédé de soudure à l'arc induisant à une fusion des matériaux de la gaine et du bouchon, en utilisant une électrode non fusible et un gaz inerte pour protéger l'électrode,
- le soudage par USW (Upset Shape Welding) dans lequel le procédé est basé sur l'échauffement qui provient de la résistance des pièces à souder à l'aide un courant électrique. Une force de rapprochement est appliquée sur les éléments à souder.

Afin de garantir un comportement fiable du crayon combustible; il est nécessaire de connaître le comportement de ce dernier vis-à-vis des conditions de sollicitations au cœur du réacteur et de leurs répercussions sur la microstructure et les propriétés mécaniques de la jonction tube-bouchon soudée. A cet effet, plusieurs paramètres de soudage feront l'objet de notre étude, à savoir effet de la vitesse et de l'intensité du courant de soudage pour l'étude de soudage par le procédé TIG et celle du courant de soudage, le courant de forgeage ainsi que les périodes et le stick out pour le procédé de soudage par résistance.

Ce travail sera présenté comme suit :

La première partie de ce rapport présente une synthèse bibliographique sur le zirconium et ses alliages. On s'intéressera plus particulièrement aux domaines de phases du Zircalloy-4 en fonction de la température. On abordera également les généralités sur le soudage, et nous développerons particulièrement les procédés de soudage à l'arc électrique (TIG) et le soudage en bout par résistance électrique pure

Dans la deuxième partie, on présentera le matériau étudié et ses caractéristiques, ainsi que la procédure de préparation des tubes-bouchons à souder et les équipements utilisés. On

présentera également les techniques utilisées pour la visualisation des cordons de soudures obtenus en l'occurrence la microscopie optique et la microdureté

Enfin, la dernière partie de ce rapport sera consacrée à la présentation des résultats et leur discussion. On présentera précisément l'effet des paramètres de soudage sur la création et l'étendue de différentes zones (ZAT, ZF) obtenues, ainsi que l'évolution de la microdureté à travers des différentes zones de soudage formées.

Enfin nous terminons notre rapport par une conclusion et des perspectives envisagées pour cette étude.

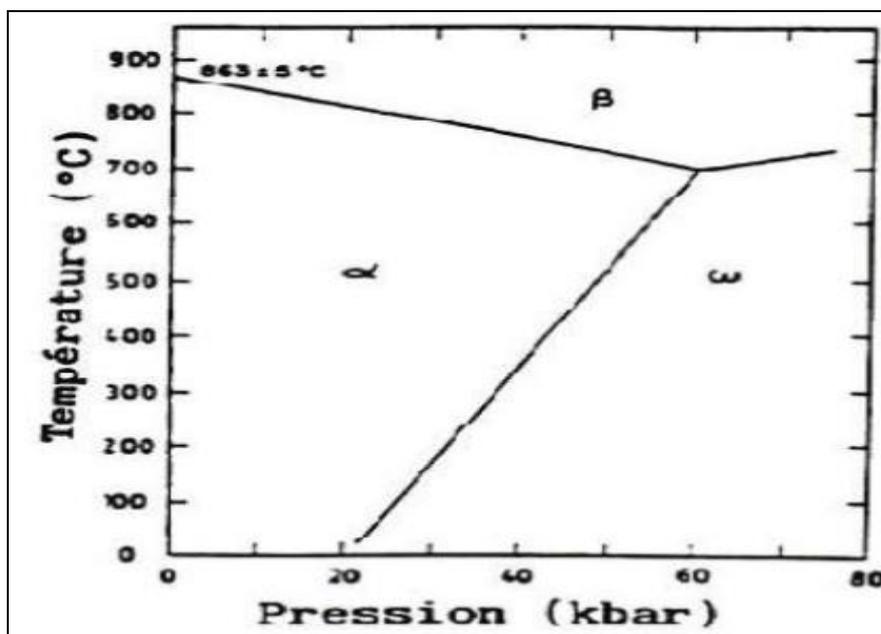
## A–I Généralités sur le zirconium et ses alliages:

Les alliages de zirconium sont principalement employés pour la fabrication des tubes de gainage du combustible nucléaire. L'utilisation de ces alliages s'explique d'abord par leur très faible section efficace de capture des neutrons thermiques, ce qui contribue à l'amélioration du bilan neutronique du réacteur, la stabilité de ces caractéristiques sous irradiation, leur résistance à la corrosion par l'eau et leur résistance mécanique dans le domaine de fonctionnement.

### 1– Le zirconium:

Le zirconium, élément chimique de numéro atomique 40, de masse atomique 91,22. Présente deux formes allotropiques :

- La phase  $\alpha$ , stable à basse température ( $T < 863 \text{ }^\circ\text{C}$ , c'est-à-dire dans le domaine de fonctionnement du réacteur) et de structure cristalline hexagonale compacte ( $a = 0.323 \text{ nm}$  et  $c/a = 1.594$  à température ambiante). [1]
- La phase  $\beta$ , cubique centrée ( $a = 0.361 \text{ nm}$ ), stable à haute température ( $T > 863 \text{ }^\circ\text{C}$ ) jusqu'à la température de fusion ( $T_f = 1855 \text{ }^\circ\text{C}$ ). [1]
- Une troisième forme cristalline à haute pression (à température ambiante sous une pression de 2,2 GPa) appelée w-Zr s'ajoute ou autre phase, elle est de structure hexagonal avec un rapport des paramètres de maille  $a/c = 0,627$  ( $a=0,504 \text{ nm}$ ). (Figure 1) [2]



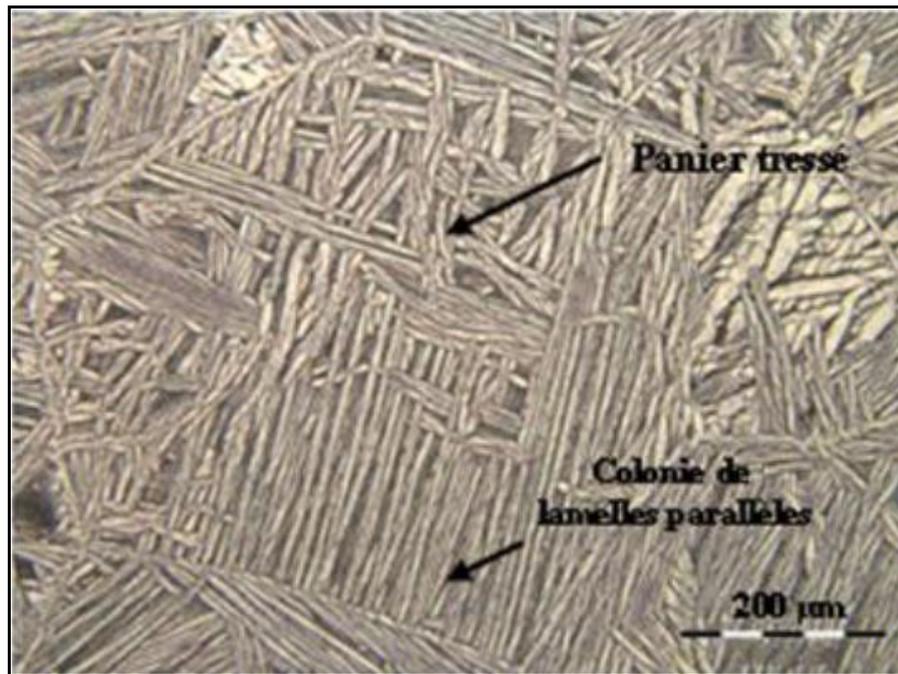
## 2– Caractérisation morphologique de la microstructure : [3]

La microstructure qui résulte de la transformation  $\beta \rightarrow \alpha$  dans les alliages de zirconium est fortement influencée par la vitesse de refroidissement. Une microstructure martensitique, sous forme d'aiguilles très fines, pour une vitesse de refroidissement supérieure à 2000 K/s. A des vitesses plus faibles, et notamment au-dessous de 200 K/s, toutes les observations montrent une microstructure lamellaire dite de Widmanstätten (figure 2).

Cette microstructure de Widmanstätten apparaît sous deux formes principales. La première est appelée «panier tressé» et se traduit par de courtes lamelles enchevêtrés qui paraissent avoir germé de façon aléatoire à l'intérieur de l'ancien grain bêta. La deuxième est appelée «platelets parallèles» et se caractérise par de longues lamelles parallèles qui font apparaître des grains alpha appelés colonies. Ils paraissent germer et se propager à partir des anciens joints de grain bêta.

Plusieurs facteurs sont susceptibles de favoriser l'apparition de l'une ou l'autre. Les particules insolubles en phase  $\beta$ , tels que des carbures ZrC, des siliciures Zr<sub>3</sub>Si ou encore des phosphures ZrP, agissent comme sites de germination. Une différence de distribution spatiale à l'intérieur de l'ancien grain bêta conduit alors à des microstructures différentes. Il faut noter que les joints de grain  $\beta$  constituent également des sites de germination privilégiés. Lorsque la germination se fait plutôt en volume sur les impuretés, processus favorisé soit par de grandes tailles des anciens grains bêta ou bien par des vitesses rapides de refroidissement, une structure en vannerie apparaît. Alors qu'une germination préférentielle aux joints de grains, favorisée soit par de faibles tailles des anciens grains bêta ou bien par des vitesses de refroidissement lentes, conduit à une structure de plaquettes parallèles.

L'effet de la vitesse de refroidissement sur la microstructure peut être expliqué de la manière suivante : quand la vitesse de refroidissement est lente, les lamelles poussent à partir des anciens joints de grain bêta où la germination est plus facile du point de vue énergétique. En parallèle, leurs épaisseurs croissent avec le temps de diffusion des éléments alphagènes. Par contre, quand la vitesse de refroidissement est rapide, la germination sur les nano précipités distribués à l'intérieur de l'ancien grain bêta est favorisée du point de vue énergétique. Vu que le temps de diffusion des éléments alphagènes dans ces conditions est court, l'accroissement de leur épaisseur est limité.



**Figure 2:** Structure de Widmanstätten. [3]

### 3– Les propriétés physiques du zirconium : [4]

Le zirconium qui possède l'avantage d'être transparent aux neutrons, est identifié très tôt comme matériau prometteur pour les applications nucléaires. Ses principales propriétés physiques sont reportées dans le tableau -1.

Masse Volumique à 20°C (g/cm <sup>3</sup> )	6,5
Température de fusion (°C)	1850
Section de capture des neutrons thermiques (Barn)	0.185
Chaleur spécifique à 20°C (J/Kg/°C)	276
Diffusivité thermique à 20°C (10 <sup>2</sup> cm <sup>2</sup> /s)	11,8
Conductivité thermique à 20°C (W/m/°C)	21,1
Résistivité électrique à 20°C (μW cm)	44
Module d'élasticité à 20°C (MPa)	98 000
Module de cisaillement à 20°C (MPa)	36 500
Coefficient de Poisson à 20°C (-)	0,35

**Tableau 1:** Principales propriétés physiques du zirconium. [4]

### 4- Le soudage de zirconium et ses alliages : [5]

Malgré son point de fusion élevé, le zirconium ne peut pas être utilisé comme matériau réfractaire. Il possède en effet une trop grande réactivité vis à vis d'un certain nombre d'autres éléments et ce dès 300°C. Autre inconvénient, le soudage nécessitera un apport d'énergie

important afin d'atteindre la température de fusion du métal. Parmi ces caractéristiques thermiques, on peut noter un coefficient de dilatation linéaire ( $5.9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) faible qui limite la distorsion des ensembles notamment lors du soudage. La conductivité thermique particulièrement basse permet également d'avoir une bonne soudabilité opératoire.

Le zirconium s'oxyde en zircone  $\text{ZrO}_2$ . Cette couche protectrice résiste à de nombreux agents chimiques dans une large gamme de pH. L'oxyde à la fois très adhérent et imperméable confère au zirconium et à ses alliages une excellente tenue à la corrosion jusqu'à  $350^\circ\text{C}$ . On peut donc dire qu'il se comporte comme un métal "inoxydable" vis à vis d'une grande variété de produits chimiques. La couche d'oxyde protectrice ne se forme pas à haute température, le métal peut alors absorber une importante quantité d'azote (jusqu'à 4.8 % en masse) et d'oxygène (jusqu'à 2 % en masse) compte tenu des grandes limites de solubilité. Afin de limiter cette pollution, les opérations de mise en œuvre à haute température telles que le soudage ou les traitements thermiques devront se faire sous atmosphère protectrice ou sous vide.

Le zirconium et ses alliages possèdent une excellente soudabilité. Il faut néanmoins effectuer les opérations de soudage avec une grande précaution. A la température de soudage, la réactivité du métal vis à vis de son environnement peut entraîner l'absorption d'une grande quantité d'oxygène, d'air ou d'hydrogène. Il s'ensuit une fragilisation de la soudure. On peut facilement éviter ce problème par une protection adéquate lors de l'opération de soudage : vide ou gaz inerte (argon ou hélium). Cette protection doit non seulement être effectuée autour du point de soudage, mais également en dessous de la pièce et le long du cordon de soudure jusqu'à des températures de l'ordre de  $250^\circ\text{C}$ . On peut également utiliser des procédés de soudage à forte concentration d'énergie et forte pénétration (laser, plasma, faisceau d'électrons,...) qui limitent la zone contaminée.

Le soudage du zirconium et de ses alliages nécessite une préparation préalable. Les surfaces affectées par la soudure devront être brossées et nettoyées à l'alcool ou à l'acétone afin d'éliminer les produits restés en surface qui pourraient contaminer le métal.

La très basse conductivité thermique ainsi que le faible coefficient de dilatation thermique du zirconium permettent de limiter les dimensions de zones affectées thermiquement et les distorsions des assemblages soudés. Les procédés utilisés sont les suivants :

- TIG (Tungstène Inerte Gaz), procédé de soudage couramment employé qui donne les meilleurs résultats,
- MIG (Métal Inerte Gaz), pour les tôles épaisses avec un métal d'apport dans la même nuance,
- Plasma, bombardement électronique ou laser pour les assemblages dans les réacteurs nucléaires.

On peut néanmoins utiliser des techniques d'assemblage avec ou sans déformation plastique, sans passer par l'état liquide, tels que le soudage par diffusion, par forgeage extrusion ou le plaquage par explosion. Ce dernier procédé est notamment utilisé dans des applications où une grande épaisseur de paroi est nécessaire.

La soudure se présente sous forme de larges grains de phase bêta. Dans la partie de la ZAT (Zone Affectée Thermiquement) où la température a dépassé la température de transformation allotropique, il y a formation de larges grains de phase bêta. L'ensemble de cette structure présente une résistance plus importante et une plus faible ductilité que la fine structure alpha du matériau de base. La bonne ductilité du zirconium fait qu'il n'est pas toujours nécessaire d'effectuer le traitement de relaxation de contrainte (une heure à 500°C) après le soudage.

### 5– Les alliages de zirconium: [6]

Les principaux alliages développés et utilisés dans les réacteurs nucléaires peuvent être classés selon trois familles :

- Les alliages de type Zircaloy (Zy-2 et Zy-4) contenant principalement de l'étain (~ 1,5%) avec de faibles additions de fer, chrome et/ou nickel.
- Les alliages de type Zr-Nb contenant 1 à 2,5%Nb avec éventuellement des additions d'étain de fer.
- Les alliages de type ZrSnFeNb (E635 et Zirlo).

Les principaux alliages de zirconium sont reportés dans le tableau 2.

Eléments d'alliage (% mas.)		Fe	Cr	Sn	Ni	Nb	O	
Zircaloy	Zircaloy-2	0,07- 0,20	0,05- 0,15	1,2 -1,7	0,03 -0,08	/	0,10- 0,14	REB
	Zircaloy-4	0,18- 0,24	0,07- 0,13	1,2 - 1,7	< 0,007	/	0,10- 0,14	REP
Zr-Nb	Zr-1Nb (E110)	0,015-0,06	/	/	/	0,85- 1,15	0,09- 0,18	VVER
	M5	/	/	/	/	1	0,13	REP
	Zr-2.5Nb	< 0,15	< 0,02	< 0,05	< 0,007	2,4 - 2,8	0,09- 0,13	CANDU
ZrSnFeNb	E635	0,3 - 0,5	/	1,1 - 1,4		0,9 - 1,1	0,05- 0,07	VVER
	Zirlo	0,1	0,08	1	/	1	0,1	REL

**Tableau 2:** Composition chimique des alliages de zirconium utilisés dans les réacteurs nucléaires. [6]

### 6 – L'influence de quelques éléments additifs sur les propriétés du Zirconium : [3]

L'ajout d'éléments d'alliage au zirconium pur a pour rôle d'améliorer ses propriétés mécaniques tout autant que sa résistance à la corrosion. Ces éléments d'alliage font apparaître un domaine biphasé compris entre 810°C et 980°C caractérisé par la coexistence des deux phases  $\beta$  et  $\alpha$ . Ces éléments sont classés en deux catégories : des éléments dénommés alphagènes, comme l'étain et l'oxygène, qui sont insolubles en phase bêta mais solubles en

phase alpha, et des éléments dénommés bêtagènes, comme le fer, le chrome et le nickel, qui sont insolubles en phase alpha mais solubles en phase bêta. La (figure 3) donne les diagrammes de phase correspondants à ces différents éléments.

		Influence sur le diagramme de phase	Elements
<b>Alphagènes</b>			<b>O, Sn, Al, N, Hf</b>
<b>Bêtagènes</b>	<b>Isonorphes</b>		<b>Ti</b>
	<b>Eutectoïdes</b>		<b>Fe, Cr, Ni, Nb, Cu, V</b>

**Figure 3:** Influence des éléments d'addition sur les domaines de phase du zirconium [3]

## 7 – Le Zircaloy-4 :

Le Zircaloy-4 est un alliage à base de zirconium. Il résulte des évolutions de différents alliages élaboré pour l'industrie nucléaire. Ses éléments d'addition sont reportés dans le tableau 3.

	Sn	Fe	Cr	O	Zr
Norme ASTM B 350.90	1.2–1.7	0.18–0.24	0.07–0.13	0.1–0.14	bal.
Haut étain (ancien standard)	1.40	0.20	0.10	0.12	bal.
Bas étain	1.26	0.21	0.11	0.12	bal.

**Tableau 3:** Composition chimique du Zircaloy-4 (% massique). [1]

## 8 – Rôle des éléments d'addition : [3]

Les éléments d'alliages du Zircaloy-4 ont chacun des influences importantes sur les propriétés thermomécaniques et sur la résistance à la corrosion du matériau. Nous citons les plus importants :

**-L'étain :**

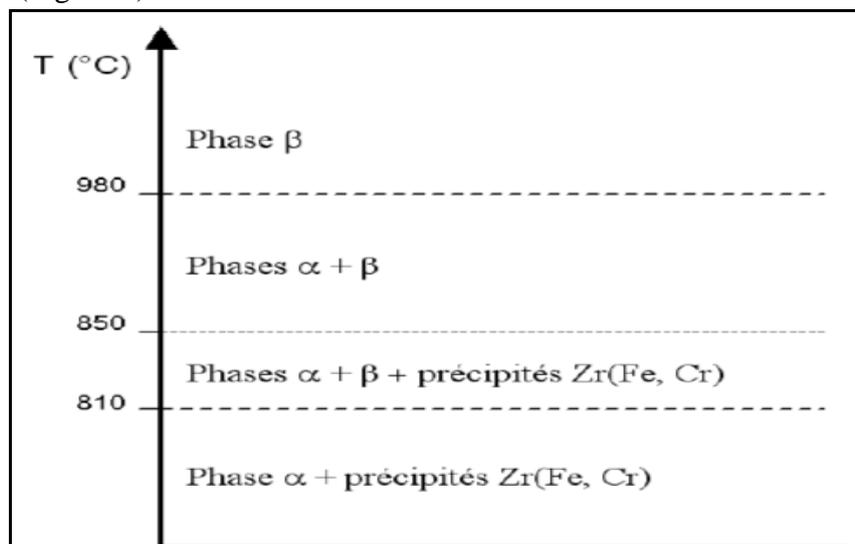
L'étain en solution solide dans le zirconium ne paraît avoir qu'une influence réduite sur les caractéristiques mécaniques en traction du produit final. En revanche, entre 1 et 1,5% surtout, il améliore fortement la tenue au fluage. La solubilité de l'étain en phase  $\alpha$  augmente avec la température, et semble être voisine de 1,5% à 650°C.

**-L'oxygène :**

L'influence de l'oxygène est très importante : d'une part sur la charge de rupture et la limite élastique à froid ou à 400°C qui augmentent (respectivement de 10 et 2,5 MPa/100ppm), d'autre part sur la tenue au fluage (action analogue à celle de l'étain, mais pour des teneurs 10 fois plus faibles). La solubilité de l'oxygène en phase  $\alpha$  est très élevée et aucune précipitation n'est à envisager : le durcissement et la diminution de la vitesse de fluage sont liés à l'accroissement de la résistance de la solution solide. Comme la solubilité est plus faible dans la phase  $\beta$ , un traitement thermique dans la zone  $\alpha+\beta$  entraîne une ségrégation de l'oxygène en phase  $\alpha$ , cette ségrégation au cours de la trempe règle la cinétique de transformation de phase  $\beta \rightarrow \alpha$ .

**-Le fer et le chrome :**

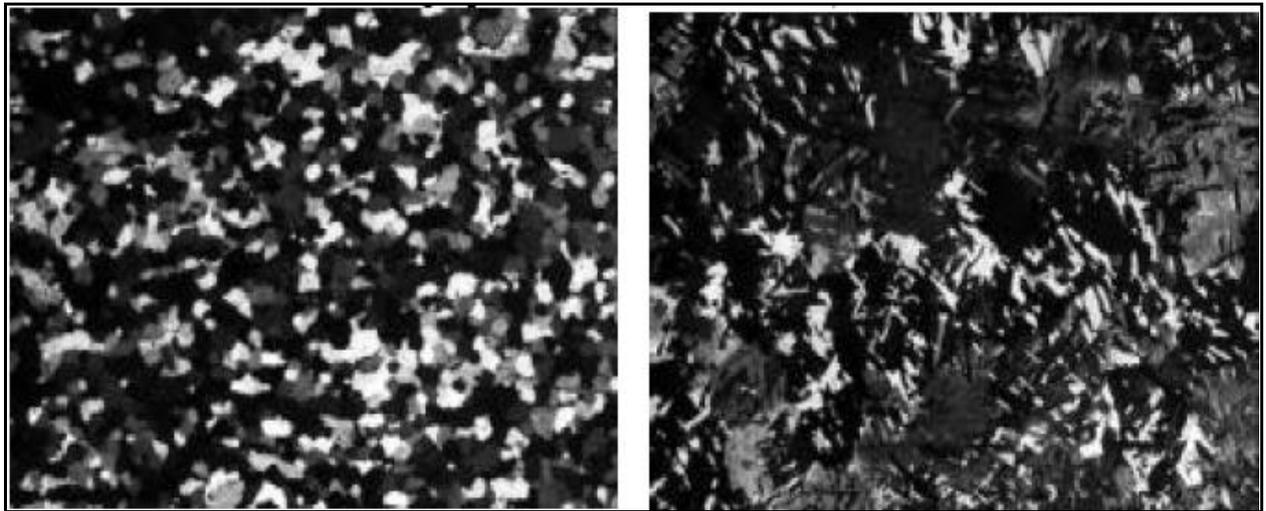
Ces deux éléments sont majoritairement présents sous forme de précipités. En effet, ils apparaissent principalement sous forme d'une phase secondaire  $Zr(Fe_{1-x},Cr_x)_2$  à l'interface des lamelles. La taille et la distribution de ces précipités influent beaucoup sur la résistance à la corrosion des alliages. Les précipités de petite taille et répartis de manière homogène absorbent les contraintes de compression et ralentissent ainsi l'apparition de fissures perpendiculaires à l'interface qui sépare le métal de la couche protectrice d'oxyde ( $ZrO_2$ ) qui se forme à haute température. Ces précipités assurent l'intégrité et la stabilisation de la couche d'oxyde à haute pression. Dans le cas de Zircaloy-2, les précipités issus d'un refroidissement rapide, de grande taille et de distribution moins dense, améliorent la résistance à la corrosion du matériau. Le domaine de début et de fin de précipitation de  $Zr(Fe_{1-x},Cr_x)_2$  se situe entre 850 et 810°C ( figure 4).



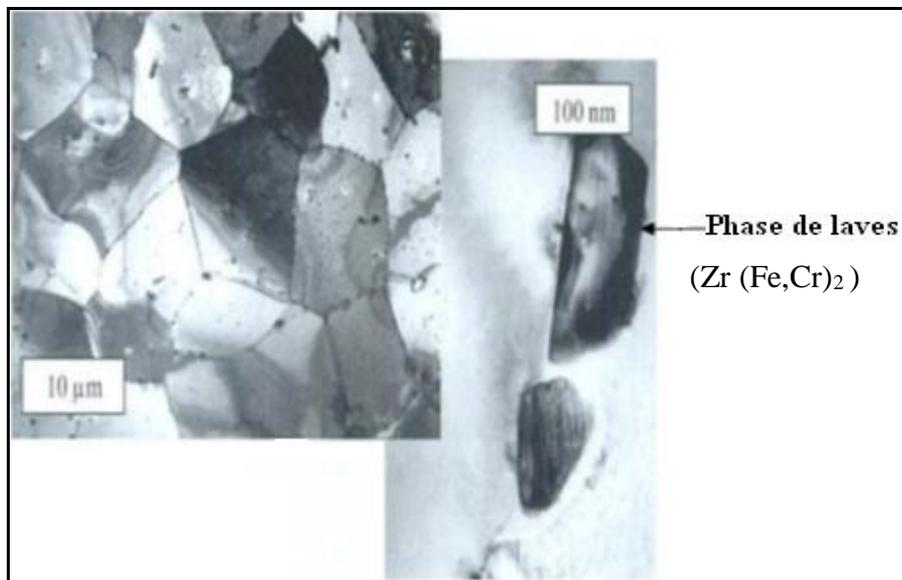
**Figure 4** : Domaine de phase du Zircaloy-4. [3]

## 9 – La microstructure du zircaloy-4 :

La microstructure de Zircaloy-4 dépend du traitement thermique, généralement à l'état recristallisé elle est constituée de grains équiaxes (phase  $\alpha$ ) avec des particules de seconde phase ( $Zr (Fe, Cr)_2$ ) trouvées à la fois dans les joints de grains et à l'intérieur des grains (Figure 6). Dans le zircaloy transformé à partir de la phase  $\beta$ , la microstructure est constituée de plaques a du type Widmannstätten. Ici les particules ( $Zr (Fe, Cr)_2$ ) se trouvent entre les plaques. Des exemples de ces deux structures sont donnés à la (figure 5). [7]



**Figure -5 :** Microstructure du Zircaloy-4 standard et du Zircaloy-4 trempé. [7]



**Figure -6 :** Microstructure de zry4 par microscopie électronique à balayage. La photo à droite montre bien les phases de Laves (précipités  $Zr (Fe,Cr)_2$ ) en noirs. [8].

## A–II Le Soudage :

Il existe aujourd’hui de nombreux procédés de soudage répondant à la très grande variété d’assemblages à réaliser et aux caractéristiques des métaux utilisés. A l’heure actuelle, le soudage compte parmi les modes d’assemblage les plus répandus dans l’industrie du fait de son efficacité et de sa fiabilité pour réaliser des assemblages indémontables.

### 1- Définition :

Le soudage est une opération qui consiste à assurer la liaison permanente de deux ou plusieurs parties constitutives de nature identique ou différente, soit par chauffage, soit par pression, soit par l’action simultanée des deux. Le soudage peut être effectué avec ou sans métal d’apport [9]. On peut distinguer le soudage autogène (assemblage de deux matériaux de base de même composition sans métal d’apport), le soudage homogène (les deux matériaux de base et le métal d’apport sont de même nature), et le soudage hétérogène (l’un au moins des trois matériaux, d’apport ou de base, est différent des autres) [10]. On associe aussi souvent au soudage deux autres techniques d’assemblage voisines, faisant appel à des mécanismes physiques de liaison de natures différentes : le brasage et le souda-brasage.

### 2- Classification et principe des procédés de soudage: [10]

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont très différents. La classification de ces différents procédés (Figure7) peut s’effectuer selon le mode d’apport de l’énergie nécessaire pour réaliser la jonction. Pour certains, l’assemblage est obtenu par fusion locale des éléments à assembler, sans action mécanique volontaire, en utilisant une source de chaleur telle qu’une flamme ou un arc électrique. Pour d’autres, la continuité métallique est obtenue par une action mécanique (frottement, pression), éventuellement associée à une fusion ou un échauffement localisé.

**Soudage par pression** : Cette catégorie regroupe tous les procédés de soudage dans lesquels on obtient une soudure, en général sans métal d’apport, par l’application d’une pression ou d’une friction suivie d’une pression, suffisante pour provoquer une déformation plastique à froid ou à chaud, assurant la continuité atomique entre les bords de la soudure.

**Soudage par pression et fusion** : On retrouve dans cette catégorie le procédé de soudage par étincelage, qui consiste à fondre les surfaces à assembler à l’aide d’une décharge électrique avant d’appliquer une pression de contact. Et surtout les procédés de soudage par résistance, pour lesquels le contact électrique entre les pièces est assuré par l’application d’une pression à l’aide d’électrodes de géométries variables, qui permettent ensuite de faire passer un courant de forte intensité à l’endroit du contact entre les pièces, entraînant par effet joule leur fusion.

**Soudage par fusion sans pression** : La technique de soudage par fusion, la plus courante, consiste à fondre les bords des pièces à assembler, sans application de pression volontaire, à l'aide d'une source d'énergie produite par une flamme, un arc électrique ou un faisceau de particules. Le métal des deux pièces se mélange alors à l'état liquide, et constitue après solidification la soudure. Cette famille comprend un grand nombre de procédés, parmi lesquels les procédés de soudage à l'arc, qui sont les plus utilisés.

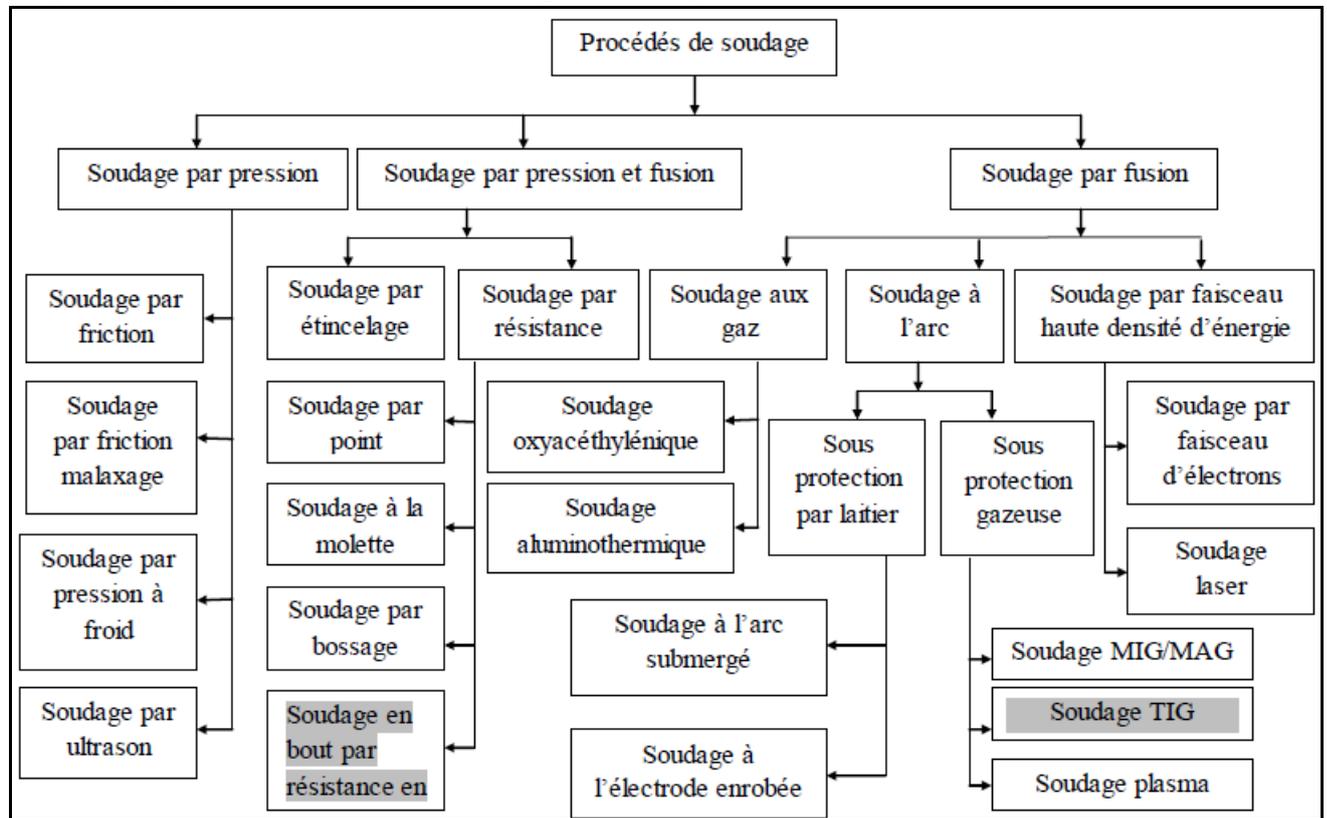


Figure -7: classifications des procédés de soudage. [10]

### 3- Caractéristiques d'un cordon de soudure par fusion:

On obtient après la solidification, un joint homogène de même composition que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents. Quel que soit le procédé de soudage par fusion, la structure d'une soudure typique d'un alliage est composée de 6 zones principales, comme il est illustré dans la (figure 8) : [11]

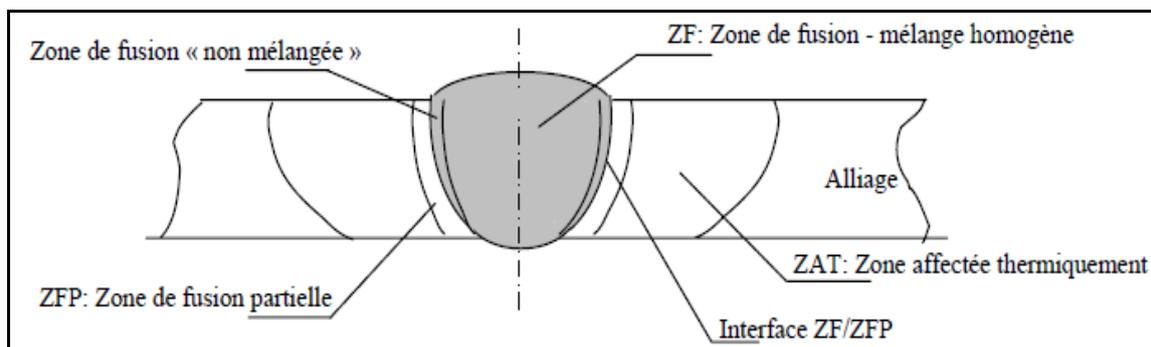


Figure -8 : Schéma illustrant les zones principales dans un cordon de soudure par fusion [11]

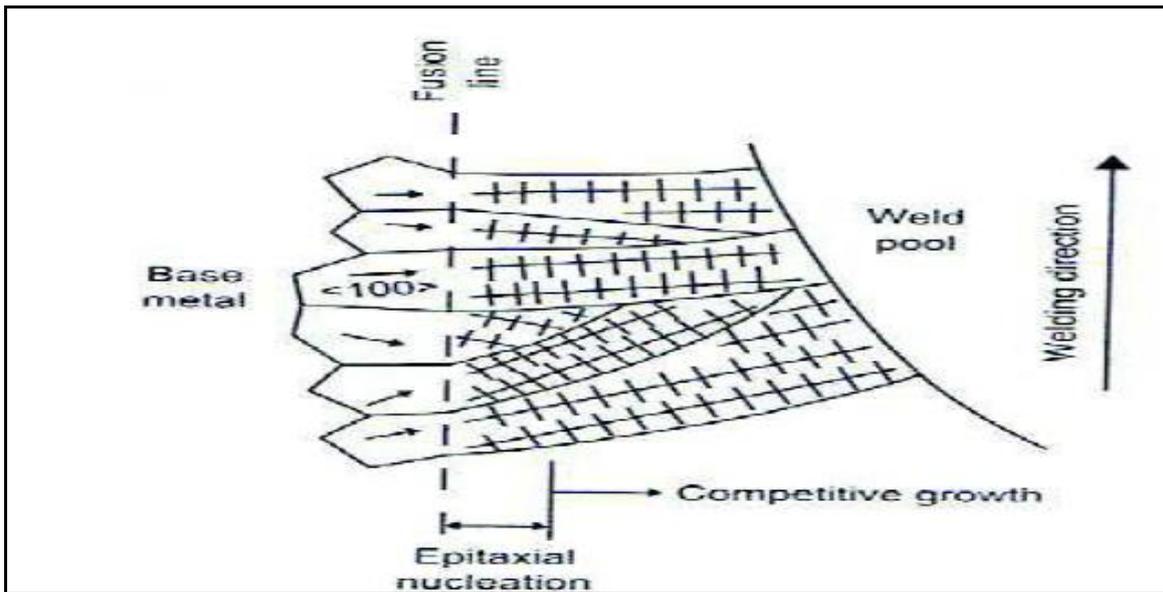
**La zone de fusion (ZF)** est la région chauffée au-dessus de la température du liquidus. La structure du métal de base initiale est changée par les processus de fusion et solidification, et la composition peut également varier par évaporation de certains éléments de l'alliage. Un mélange complet des éléments est obtenu par les mouvements de convection forcés. La zone étroite à l'extrémité du bain de fusion est **la zone « non mélangée »** : dans cette zone les forces de convection étant inférieures aux forces de friction des fluides, la composition chimique est identique à celle du métal de base. Même si cette zone est présente dans toutes les soudures, elle n'est facilement visible que dans les soudures utilisant un métal d'apport de composition chimique différente du métal de base.

Le bain de fusion est délimité par l'interface de soudure qui est la surface formant clairement la frontière entre le métal de base non fusionné et le métal de la soudure solidifiée. Directement adjacente à l'interface de soudure se trouve une **zone de fusion partielle (ZFP)**; le cycle thermique de soudage s'opère dans cette zone à des températures comprises entre le liquidus et le solidus de l'alliage. Dans certains alliages contenant des inclusions et des impuretés à bas points de fusion, ou des ségrégations d'éléments d'alliages aux joints de grain, la liquation de ces régions microscopiques peut se produire et s'étendre de l'interface de soudure à l'intérieure de la zone de fusion partielle.

La vraie zone affectée thermiquement (ZAT) est la zone où la température est comprise entre le solidus et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide et pour modifier la structure du métal de base. Finalement la seule partie de la pièce qui ne subit pas de modifications microstructurales est le métal de base non affecté [11] Cette partie de la structure soudée est suffisamment loin de la source de chaleur pour qu'il n'y ait pas eu de transformation métallurgique significative lors de l'opération de soudage. [12]

#### **4-Processus de solidification des soudures : [12]**

En fonderie la solidification s'effectue par un procédé de germination hétérogène et croissance, la solidification des soudures s'effectue par croissance épitaxiale à partir des grains non fusionnés de la zone affectée thermiquement adjacente (zone de fusion partielle). La croissance des grains progresse parallèlement à la direction du gradient maximal de température produit par le mouvement de la source de chaleur, perpendiculairement au front de solidification. Notons que la croissance des grains se fait de manière compétitive dans des directions cristallographiques privilégiées et les grains favorablement orientés (direction cristallographique  $\langle 100 \rangle$  pour les cristaux cubiques) tendent à croître plus vite que leurs voisins qui seraient défavorablement orientés, comme le montre la (fig9).



**Figure -9:** Germination par épitaxie à la ligne de fusion et de la croissance de grain compétitive en métal soudé [12]

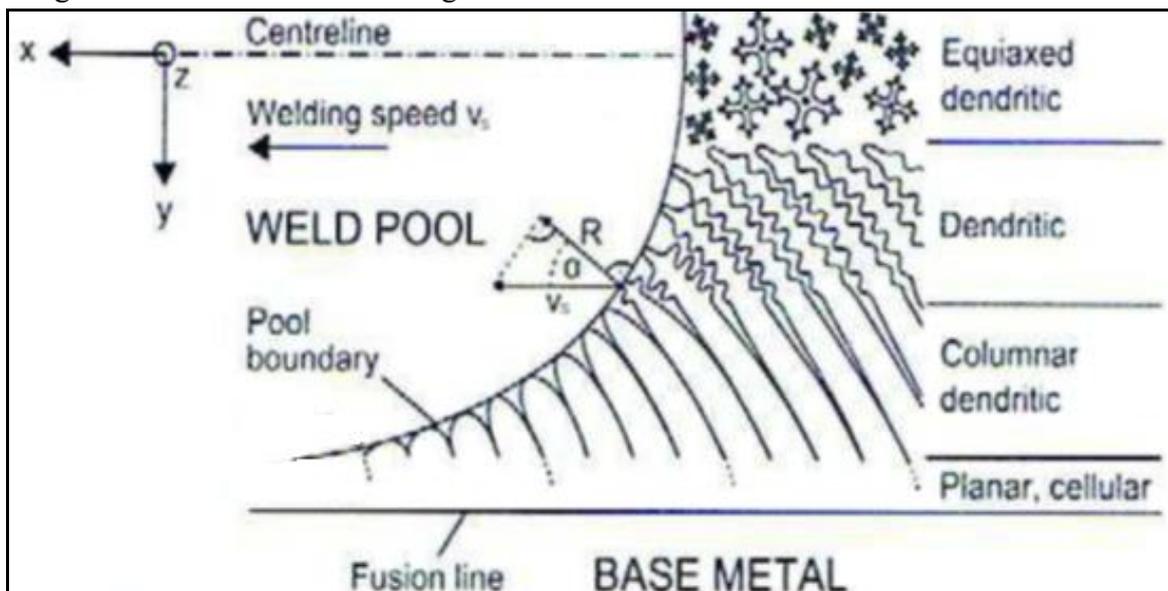
La forme du bain de fusion dépend principalement de la vitesse de soudage qui influence la cinétique de solidification par le contrôle de la vitesse de croissance du front de solidification. Cette vitesse est décrite sur la (figure 10), et s'exprime par la relation suivante:

$$R = V_s \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

R : vitesse de croissance linéaire en tout point du front de solidification (cm/min)

$V_s$  : vitesse de soudage (cm/min)

$\alpha$  : angle entre la direction de soudage et la direction de croissance des cristaux

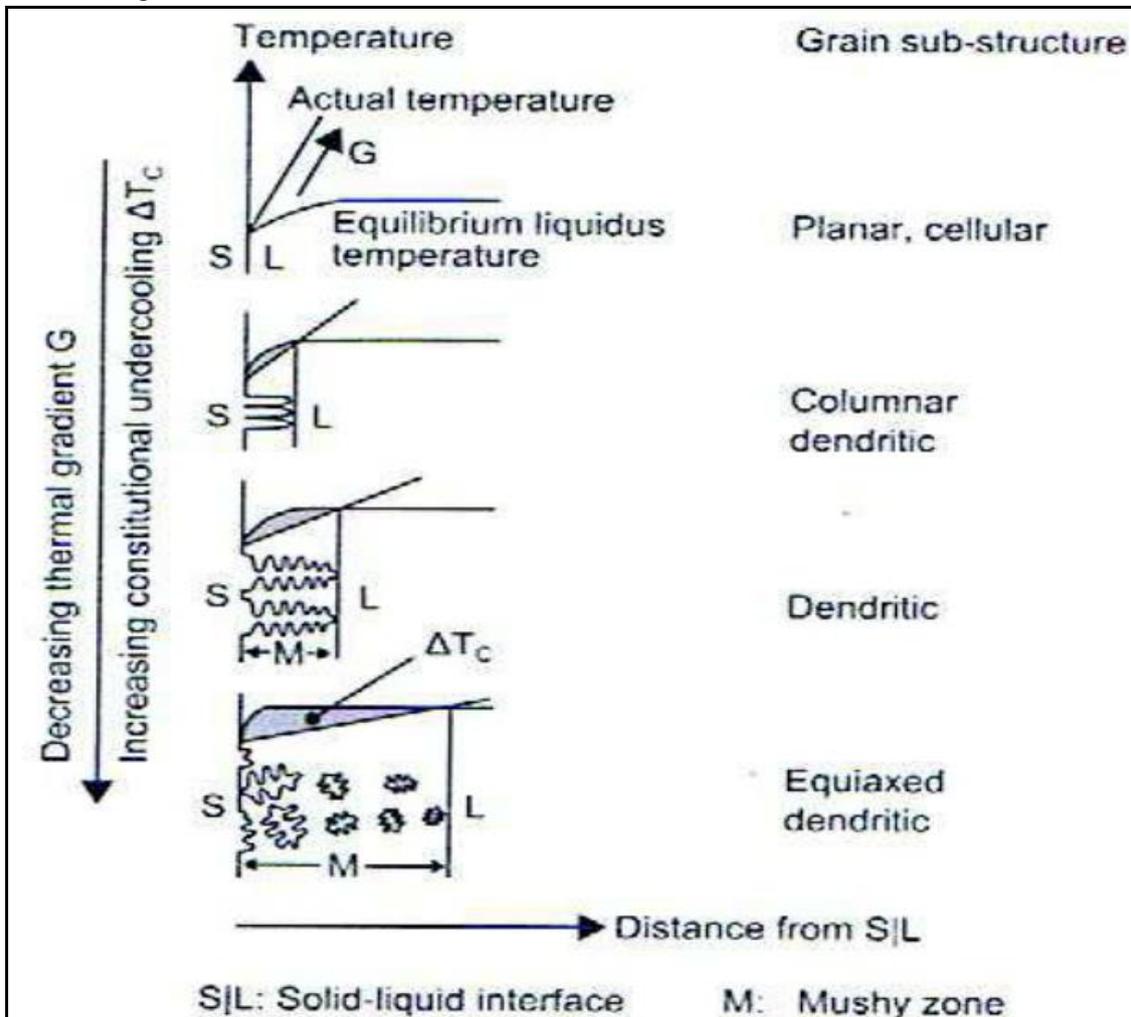


**Figure -10:** Représentation schématique d'un bain de fusion elliptique : la variation du gradient thermique locale G, vitesse de croissance linéaire de solidification R et la substructure des grains correspondant [12]

Chaque grain colonnaire de la structure d’une soudure d’un alliage contient une sous structure de solidification sous forme cellulaire ou dendritique représentent des formes de microségrégations même si la composition globale de la soudure est homogène. La microségrégation est caractérisée par une différence de composition entre le cœur et la périphérie des cellules individuelles ou des dendrites cellulaires.

Les cellules sont des protubérances de métal solide microscopiques en forme de crayon qui refroidissent en avant de l’interface solide-liquide. Les dendrites sont plus développées que les cellules et ont une forme d’arbre avec un bras de dendrite primaire et des branches orthogonales appelées bras de dendrite secondaires. Généralement, les paramètres importants contrôlant les sous structures cellulaires ou dendritiques dans les soudures sont :

- Le coefficient de partage à l’équilibre  $K$  qui indique le potentiel de ségrégation d’un alliage.
- La composition de l’alliage elle-même.
- Le gradient de température ( $G$ ) dans le liquide à l’interface (en  $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$ ) (Figure 11).
- La vitesse de croissance ou vitesse d’avance du front de solidification à l’interface ( $R$ ) en ( $\text{mm}/\text{s}$ ) (Figure 10).



**Figure -11:** Profil de la température actuelle et la température d’équilibre du liquidus, effet du gradient de température  $G$  et le  $\Delta T_c$  sur le mode de solidification [12].

En induisant un gradient de température extrêmement élevé (pente importante) il n'y a pas de surfusion constitutionnelle et la structure de solidification est plane. Quand le gradient décroît légèrement, les protubérances du métal solide à l'interface croissent plus vite que l'interface plate restante car le solide croît dans une zone de liquide en surfusion. De ce fait les protubérances solides sont présentes à une température en dessous du liquidus de l'alliage. Il en résulte une sous structure cellulaire dans chaque grain à croissance épitaxiale. Si la valeur du gradient de température décroît encore, la zone de surfusion est si importante que des bras secondaires se forment et une croissance dendritique cellulaire ou dendritique colonnaire est observée. Dans une sous structure dendritique cellulaire chaque grain contient plusieurs dendrites cellulaires alors que dans une structure dendritique colonnaire, un grain est occupé par une seule dendrite.

## A–III Soudage à l'arc électrique TIG

### 1 – Définition et principe du procédé: [13]

Le soudage TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) est un procédé de soudage à l'arc sous protection de gaz inerte avec une électrode infusible (tungstène). Il s'utilise avec ou sans métal d'apport. Le métal d'apport est amené manuellement ou automatiquement.

Le soudage est réalisé à partir d'un arc électrique créé et entretenu entre l'électrode infusible de tungstène et la pièce à souder (Figure12). L'énergie calorifique de l'arc fait fondre localement la pièce à assembler et le fil d'apport métallique pour constituer le bain de fusion. Le bain de fusion est protégé de l'atmosphère externe par un cône invisible de gaz de protection (Argon ou Argon + Hélium ou Argon + H<sub>2</sub> pour les procédés automatiques). Un générateur électrique fournit le courant continu ou alternatif avec une intensité variant de 5 à 300 ampères en fonction de différents paramètres comme le diamètre du fil, la position de soudage, le type d'assemblage, la dimension et la nuance des pièces à assembler. La torche de soudage, composée de l'électrode de tungstène (W), d'une arrivée de gaz, et d'une buse en céramique permettant de canaliser le flux gazeux, et éventuellement équipée d'un circuit de refroidissement. En soudage manuel, la torche est équipée d'une gâchette qui permet d'amorcer l'arc électrique et de démarrer le cycle de soudage. La torche de soudage est reliée sur la borne électrique de sortie négative du générateur de soudage à courant continu ou alternatif. La masse est reliée au générateur sur la borne positive et est placée sur la pièce à souder. Une alimentation en gaz de soudage est branchée sur le poste par l'intermédiaire d'une bouteille et d'un détendeur / débitmètre.

Lorsque le poste n'est pas équipé d'un amorçage haute-fréquence, l'arc jaillit lorsque le soudeur actionne la gâchette électrique de la torche et que la pointe de l'électrode infusible touche superficiellement la pièce à souder en créant un court-circuit (avec le risque de créer des inclusions métalliques de tungstène). Avec un équipement d'amorçage par haute fréquence, l'arc de soudage est allumé par l'intermédiaire d'un étincelage d'arc électrique de plusieurs milliers de volts avec une fréquence de 1 à 2 MHz délivré entre l'électrode de tungstène et la pièce pendant un très court instant.

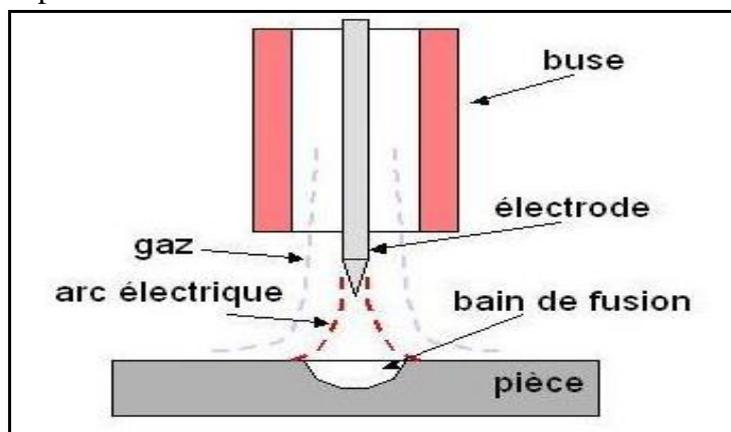


Figure -12: Principe du soudage TIG [14]

## 2 – Mécanismes de l'arc électrique : [15]

L'arc est une variété de décharges électriques établies sous la pression atmosphérique. Les gaz constituant son atmosphère ne sont pas conducteurs de l'électricité dans les conditions ambiantes de température et de pression, puisque composés de molécules électriquement neutres. L'arc de soudage est un conducteur gazeux qui transforme l'énergie électrique en chaleur. Il donne naissance à un mécanisme où les électrons éjectés de la cathode sont transférés vers la région du gaz chaud et ionisé jusqu'à l'anode. L'arc de soudage peut être divisé en cinq parties :

- **la tache cathodique** : partie de l'électrode négative à partir de laquelle sont émis les électrons. Cette émission peut être assurée par deux mécanismes: soit par émission thermique soit par émission par champ électrique.
- **la zone de la chute cathodique** : région gazeuse proche de la cathode où la tension diminue considérablement.
- **la colonne d'arc**: partie visible de l'arc caractérisée par une haute température et un faible gradient de tension. Elle est constituée d'un plasma, le gaz étant à l'état ionisé et donc conducteur de courant.
- **la zone de la chute anodique** : région gazeuse proche de l'anode où l'on observe également une chute de tension.
- **la tache anodique** : partie de l'anode sur laquelle les électrons sont absorbés. Elle est considérée comme le chemin par lequel le courant entre dans l'anode. Cette partie est importante dans la mesure où elle détermine la densité du courant et donc la zone où l'énergie électrique est transmise.

## 3 – Paramètres associés au soudage TIG : [15]

La diversité des paramètres régissant le soudage et leurs interdépendances complexes ne sont pas toujours simples à qualifier. Les variables de soudage peuvent être séparées en deux catégories essentielles : les variables d'entrée; et les variables de sortie.

### a) Les variables d'entrée:

#### a.1) Les paramètres de base:

- la composition du gaz de protection.
- le débit du gaz de protection.
- le diamètre de la buse.
- le diamètre de l'électrode, sa nature et son angle d'affûtage.
- le diamètre du fil d'apport.

#### a.2) Les paramètres d'assemblage:

- l'épaisseur des pièces.
- Le type d'assemblage
- la préparation et l'état de surface des interfaces.

#### a.3) Les variables de fonctionnement:

- La tension de soudage  $U_s$ .
- L'intensité de soudage  $I_s$ .

- La vitesse de soudage  $V_s$ .
- La vitesse du fil d'apport  $V_f$ .
- L'écartement des tôles  $E_e$ .
- Direction du déplacement.
- Angle d'attaque du pistolet.

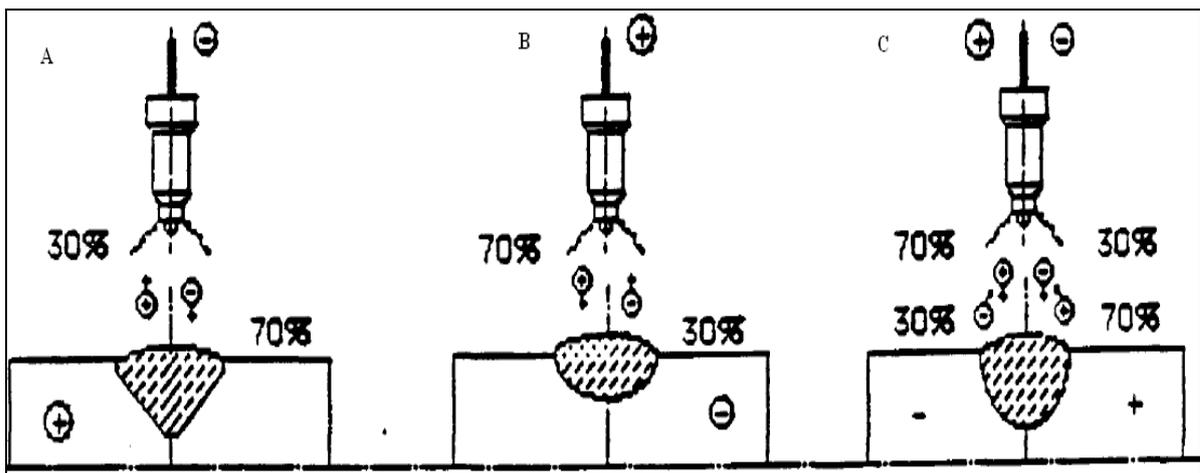
**b) Les variables de sortie:**

- la pénétration du cordon  $P$ .
- la largeur du cordon  $L$ .
- la section du cordon  $S$ .
- la surface du bain de fusion.

**4 – Effet des paramètres de soudage sur la morphologie du cordon : [15]**

**a. La polarité choisie :**

La (figure –13) (a, b et c) nous donne trois aspects de l'arc suivant des polarités différentes.



**Figure –13:** Aspects de l'arc suivant les polarités. A : Courant continu polarité (-). B: Courant continu polarité (+), et C : courant alternatif [15]

**b. Courant de soudage :**

Le courant de soudage est un paramètre qui détermine largement la morphologie du bain de fusion. Un courant de plus en plus fort entraîne un accroissement de l'apport calorifique, ce qui favorise l'augmentation du volume du métal fondu. La force électromagnétique, a un rôle important sur la pénétration du cordon qu'est en fonction de la densité de courant.

**c. Longueur de l'arc :**

(Distance électrode-pièce) intervient sur la formation du cordon par son effet sur la tension d'arc. Pour un courant donné, la tension d'arc varie en fonction de la longueur d'arc. Cette variation modifie l'apport calorifique, qui influe sur la morphologie du cordon.

**d. Vitesse de soudage :**

L'influence de la vitesse de soudage peut être évaluée par son effet sur l'apport calorifique linéaire de soudage. L'apport calorifique est lié à la vitesse de soudage par la relation:

$$V=I.U/Q \tag{2}$$

Avec:  $Q=m C \Delta T$  Et  $\Delta T =T_f-T_i$

- V : Vitesse de soudage (cm/min).
- I : Courant (A).
- U : Tension (V).
- Q : Apport calorifique (Kj/cm).
- m : la masse de la marie fondu.
- C : chaleur spécifique du métal.
- T<sub>f</sub>: température de fusion
- T<sub>i</sub>: température ambiante.

Une augmentation de la vitesse de soudage diminue la quantité de chaleur par unité de longueur de soudure, ce qui aboutit à une diminution de la section de la zone fondue.

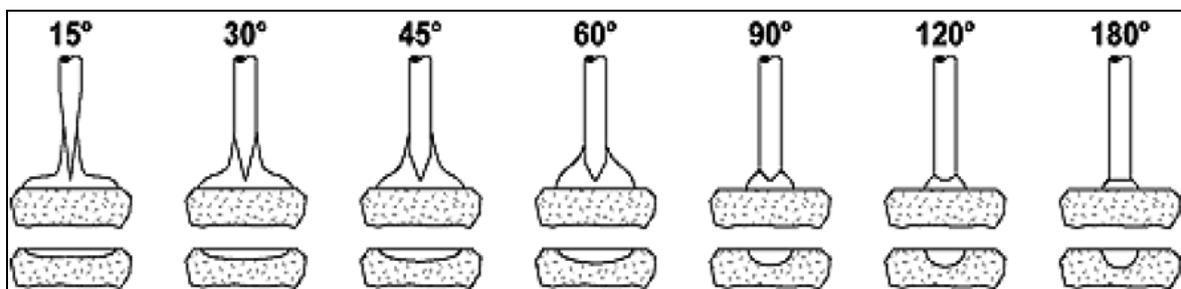
**e. L'affûtage de l'électrode:**

- **L'angle d'affûtage :** Il est très important pour l'électrode soit correctement affûté. Si la pointe n'est pas correcte, l'arc risque d'être instable. La (figure14) montre l'angle  $\alpha$  d'affûtage qui correspond à l'intensité de courant de soudage. Si le courant augmente l'angle doit être plus élevé.

Courant de soudage (A)	Angle d'affûtage ( $\alpha$ )
20	30°
20-100	60- 90°
100-200	90-120°
>200	120°



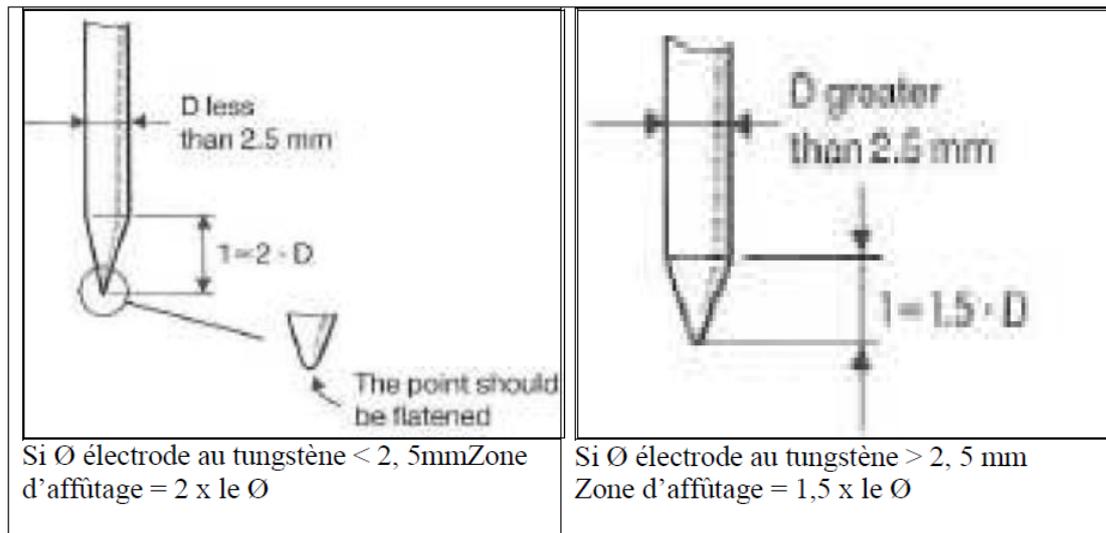
**Figure -14 :** angle d'affûtage de l'électrode. [15]



**Figure -15:** l'influence de l'angle d'affûtage de l'électrode sur le rapport p/L. [15]

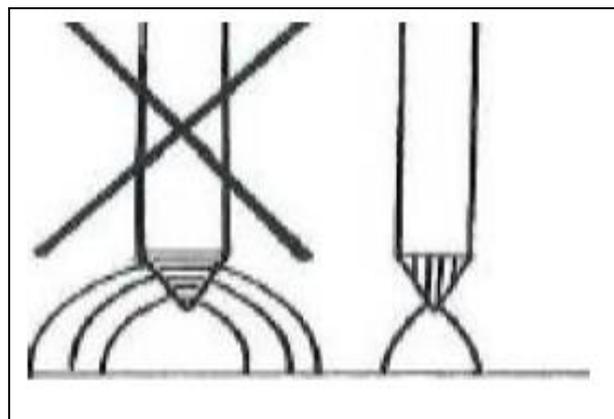
Plus la pointe est fine et plus l'arc est large (L) plus la pénétration (P) est moine donc le rapport p/L est petit. (figure15)

- **La zone d'affûtage :** La (figure -16) montre la longueur de la zone d'affûtage en fonction du diamètre d'électrode.



**Figure -16:** La zone d'affûtage. [15]

- **les stries d'affûtage:** Il faut que les stries soient dans le sens de la longueur de l'électrode et donc du courant, (Figure17).



**Figure -17:** les stries d'affûtage. [15]

### 5- Avantages du procédé : [16]

- Large gamme d'épaisseurs à souder.
- Simple d'emploi.
- Travail précis et esthétique.
- Peu de fumées.
- Soudage dans toutes les positions.
- Procédé automatisable.
- Aspect de cordon très correct.
- Très bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.

## A–IV Soudage par résistance :

### 1. Définition :

Le soudage par résistance est réalisé par la combinaison d'une forte intensité électrique (500 à 150.000Amperes) et d'une pression ponctuelle (de moins d'un N a30.000daN). Ce procédé ne nécessite pas d'apport extérieur (sauf en Souda-brasage). L'intensité électrique traverse la matière (durant 5ms a 3secondes suivant les épaisseurs et nuances matières) et chauffe la matière jusqu'à sa fusion. La pression maintient le contact et donc les résistances entre l'électrode et l'assemblage. Cette technique est donc dépendante de la résistivité (résistances électrique) des matières, de l'épaisseur totale de l'assemblage et du diamètre des électrodes. [17]

### 2. Principe :

L'invention du soudage par résistance est due à l'Américain Thomson en 1877.Ce procédé met en œuvre l'effet Joule d'un courant de forte intensité traversant les pièces à assembler, mises au contact l'une de l'autre et sur lesquelles il est naturellement ou convenablement concentré (Figure 18). La chaleur produite  $Q$  s'exprime par la formule :

$$Q = \int_0^T RI^2 dt \quad (3)$$

Avec :

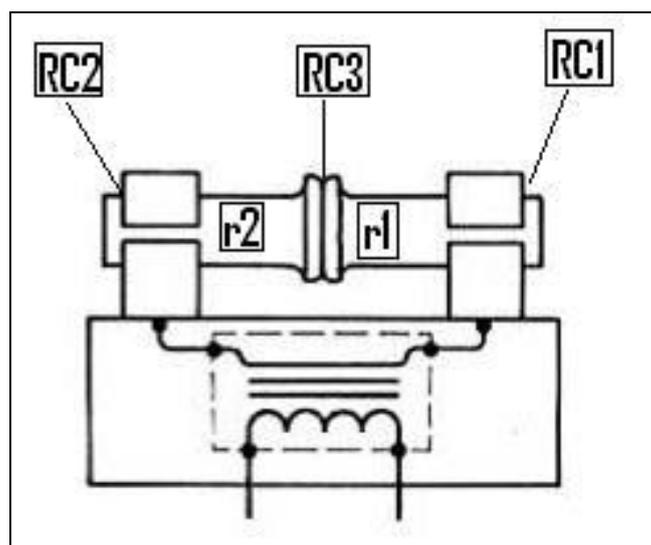
$R$  : résistance électrique rencontrée par le courant

$$R = R_{C1} + R_{C2} + R_{C3} + r_1 + r_2 \quad \text{et} \quad R_{C1} + R_{C2} + R_{C3} > r_1 + r_2$$

$I$  : intensité du courant,

$T$  : durées du phénomène,

$t$  : variable temps.



**Figure -18:** schéma de soudage pare résistance [19]

Si la puissance électrique fournie est suffisante pour compenser les pertes thermiques diverses ( $r_1 + r_2$ ), la chaleur produite conduit à la fusion des matériaux métalliques usuels. Le soudage par résistance consiste à faire en sorte que cette fusion se développe dans le plan de joint des deux pièces mises en contact.

Les différentes formes du soudage par résistance incluent (à quelques variantes près) une phase de forgeage dont l'importance métallurgique est fondamentale. [18]

### **3. Différents modes de soudage par résistance : [20]**

Selon ISO 4063 (20 procédés). Les plus usuels :

1. Soudage par résistance par point donnant lieu à une soudure par recouvrement discontinue.
  2. Soudage par résistance à la molette ou soudage au galet donnant lieu à une soudure par recouvrement continue et étanche
  3. Soudage par résistance par bossage ou protubérances.
  4. Le soudage en bout : on distingue le soudage en bout par résistance pure et par étincelage.
- Autres procédés par résistance comme Soudage par résistance des Goujons. Soudage par résistance à haute fréquence.

### **4. Soudage en bout par résistance pure: [20]**

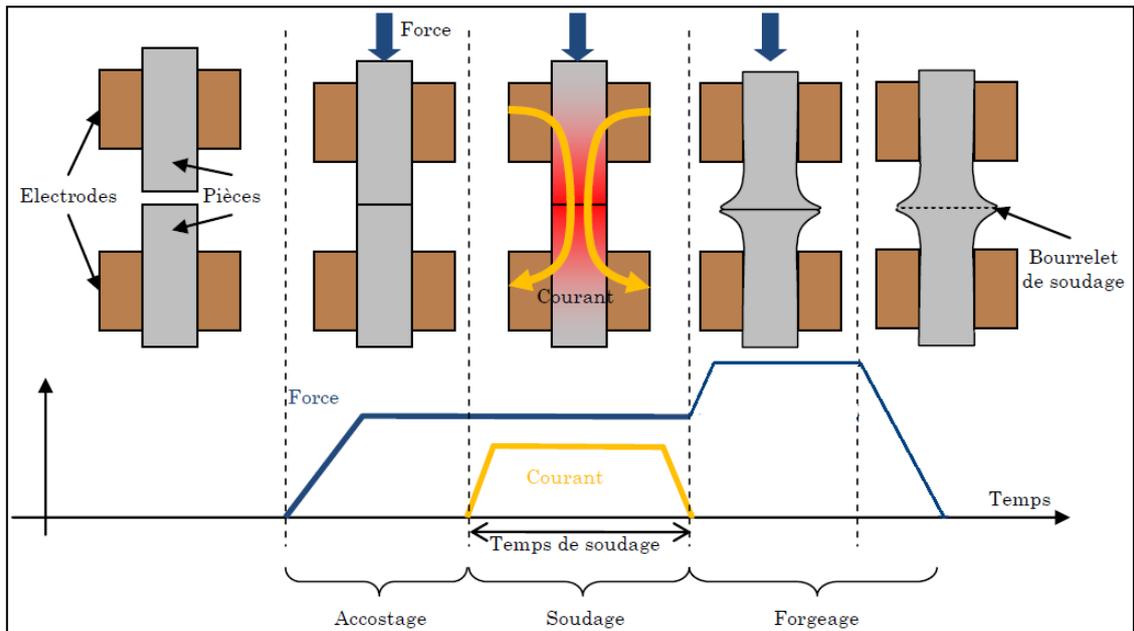
Les deux pièces à souder sont maintenues dans des mâchoires reliées électriquement à chacune des bornes du secondaire du transformateur de soudage. Un jeu de mâchoires est solidaire de la table fixe tandis que l'autre est fixé sur une table mobile. Ces mâchoires mobiles transmettent aux pièces un mouvement relatif de translation l'une vers l'autre et exercent un effort de compression sur les faces à souder. Les extrémités des pièces à souder sont amenées en contact sous pression assez forte avant de provoquer un passage de courant dans les pièces. L'interface des pièces à souder offrent une résistance largement supérieure à tous les autres éléments du circuit deviennent le siège d'un échauffement important par effet joule.

### **5. Les paramètres à prendre en compte: [18]**

- L'intensité de courant.
- Le temps de pression et le temps de passage du courant.
- L'effort de pression
- Le séquençage si procédé automatisé (accostage soudage maintien..).

### **6. Le cycle de soudage : [21]**

Le procédé de soudage par résistance en bout se déroule en plusieurs étapes comme présenté sur la (Figure 19).



**Figure -19:** Schéma des différentes étapes du procédé de soudage par résistance en bout. [21]

D'abord Les pièces sont prises dans des électrodes. Une force de contact est ensuite appliquée entre les deux pièces afin de réaliser la mise en place et le maintien de celle-ci. Cette phase est appelée l'étape d'accostage.

Un courant est alors imposé à travers les pièces. Ce courant peut avoir différentes formes (alternatif, redressé, lissé...). Durant cette étape, les pièces chauffent par effet Joule. C'est l'étape de soudage.

Enfin, la force est maintenue après le passage du courant pendant que les pièces refroidissent. La valeur de la force peut être volontairement modifiée durant cette étape.

La force est enfin relâchée et les pièces laissées libres de tout bridage mécanique.

#### a) Accostage : [17]

L'accostage est le temps nécessaire à la fermeture de la pince ou de la machine. Lors séquence on assure la mise en serrage les deux pièces à assembler et l'on détermine donc la valeur de résistance sur laquelle va s'appliquer l'effet Joule.

- Un temps d'accostage trop court provoque : des points brûlés, des éclatements aux électrodes, des points sans résistance mécanique, une usure anormale des électrodes
- Un temps d'accostage trop long provoque : un ralentissement de la cadence.
- Un effort trop important provoque une réduction des résistances, et un effort insuffisant provoque une augmentation des résistances.

#### b) Soudage: [17]

Le soudage est un chauffage obtenu par l'effet Joule d'un courant électrique traversant les pièces à assembler. L'intensité et le temps de soudage exigent la plus grande précision. Une fluctuation de plus ou moins 5% peut différencier une bonne soudure d'une mauvaise soudure. Les temps en soudage par résistance sont exprimés soit en milliseconde, soit en période. La période correspond à 20 ms pour une fréquence réseau de 50Hz (ou 16,66ms pour 60Hz).

Un temps trop long provoque des projections de métal en fusion et si un temps est trop court pas ou peu de fusion.

**c) Le forgeage:** [17]

Le but de son application est :

- Diminuer le volume de retassure.
- Affiner le grain du métal.
- Augmenter les caractéristiques mécaniques.
- Limiter les défauts internes.

**7. Phénomènes physiques au cours du procédé :** [21]

Lorsque deux solides sont mis en contact, il y a formation d'une zone macroscopique de contact qui à l'échelle microscopique est formée par un nombre réduit d'aspérités en contact mécanique. On peut alors observer une résistance de contact électrique et thermique entre ses deux solides. Ces résistances dépendent des propriétés physiques des matériaux et de leur état de surface (rugosité, impuretés...). Au cours de l'accostage, s'il y a écrasement à froid des aspérités sur les surfaces des pièces en contact et augmentation de la taille du contact à l'échelle microscopique. On observe alors une diminution des résistances de contact électrique et thermique.

Au début du passage du courant, l'échauffement est localisé sur la surface de contact entre les pièces sous l'effet de la résistance de contact électrique. Le chauffage est très rapide au niveau des aspérités qui s'écrasent du fait d'un dépassement de la limite élastique et de la possibilité de fusion locale. La résistance de contact électrique entre les pièces diminue. La température augmente dans les matériaux par la conduction depuis le contact entre les pièces et aussi par la résistivité électrique propre des matériaux. En cas de formation de métal fondu, celui-ci peut être expulsé sous l'effet de la force appliquée. Il y a alors déformation plastique des pièces avec formation d'un bourrelet de soudage.

**8. Avantage du soudage par résistance :** [22]

- Pas de modification structurale (Faible grossissement du grain).
- La dispersion thermique dans la masse des pièces assemblées est faible, comparée à d'autres procédés tels que l'arc ou la flamme.
- Pas de déformations des pièces soudées.
- Autogène, ne nécessite pas de produits d'apports.
- Soudure "propre" et de très haute qualité (face d'aspect).
- Assure la continuité métallique et étanchéité

## B – Techniques expérimentales.

### B-I Introduction :

Dans cette partie nous présentons les différentes techniques expérimentales ainsi que les équipements utilisés lors de la réalisation de ce travail. Nous explicitons également les démarches faites pour arriver à un bon fonctionnement des équipements afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles. Il s'agit bien la maîtrise des équipements tels que les soudeuses STR et TIG ; la micro tronçonneuse pour la découpe de bouchons et tubes, la polisseuse mécanique pour la préparation des couples à souder, le microscope optique pour la prise de photos des microstructures, enfin le microduromètre pour la mesure des valeurs des microduretés au niveau des jonctions soudées.

### B-II Matériaux de gainage:

Le matériau de gainage utilisé dans notre étude est un alliage de Zirconium, de grade nucléaire, appelé Zircalloys-4 (Zry-4). Il est livré sous forme de barres de diamètre 14 mm, utilisé pour l'usinage des bouchons des crayons combustibles. Il est aussi livré sous une autre forme à savoir de tubes de diamètre intérieure 12.3mm et extérieur  $13.4 \pm 0,3$  mm pour fabriquer les gaines, figure 20.

# CONFIDENTIEL

**Figure -20:** Formes des bouchons, **a)** utilisés pour le soudage TIG, **b)** pour le soudage STR.  
**c)** tube en Zircalloys-4

- Composition chimique de l'alliage Zry-4:

Eléments	Sn	Fe	Cr	O	Fe+Cr	Zr
Poids. %	1.43	0.19	0.093	0.094	0.283	97.91

**Tableau -4:** Composition chimique du Zry-4 en poids %.

- Concentration des impuretés dans le Zry-4:

Eléments	Hf	Nb	Si	Ti	Al	Cu
P.P.M	46	50	30	21	21	13

**Tableau -5 :** Concentration des impuretés dans le Zry-4 suivant le certificat du fournisseur.

### **B-III Préparation des gaines et des bouchons:**

#### **a. Découpage des gaines.**

Le découpage des gaines pour la réalisation des assemblages bouchon-gaine est effectué à l'aide d'un tour. Cette opération nous permet d'obtenir des surfaces bien dressées et droites. Les éprouvettes découpées possèdent des dimensions entre 5 et 10 cm de longueur. Leur assemblage avec les bouchons est effectué d'une manière très intime est sous atmosphère inerte pour éviter tous type de contamination.

#### **b. Chanfreinage des tubes pour le procédé de soudage STR:**

Cette opération permet de mettre bien en forme les extrémités des pièces à assembler. On effectue le chanfreinage des tubes à l'aide d'un tour spéciale, conçue pour la mise en forme des crayons combustibles.

#### **c. Nettoyage des tubes et des bouchons:**

Le nettoyage des tubes à souder est une étape très importante dans le processus de soudage. Elle s'effectue d'une manière pour éliminer les résidus de graisse et les saletés des surfaces à souder, qui sont très néfastes et qui empêchent la formation de bonne soudure.

1. Pour la procédure de soudage **TIG**, les tubes et les bouchons sont immergés dans un bécher contenant de l'acétone puis séchés à l'aide d'un papier absorbant propre.
2. Pour la procédure de soudage **STR**, le nettoyage s'effectue à l'aide de l'acétone dans le un bac à ultrason.

### **B-IV Opération de soudage:**

Le soudage des couples gaine-bouchon est réalisé à l'aide de deux procédés (TIG et STR) et avec des paramètres propres à chaque procédé.

#### **B-IV.1 Soudage par le procédé TIG**

##### **a. Description de l'équipement:**

**CONFIDENTIEL**

**Figure -21:** Equipement de soudage par procédé TIG.

# CONFIDENTIEL

**Figure -22:** Chambre de soudage.

**b. Déroulement de l'opération:**

# CONFIDENTIEL

**c. Exécution du soudage :**

**c.1 Fixation du programme de soudage :**

Afin d'optimiser le programme de soudage nous allons :

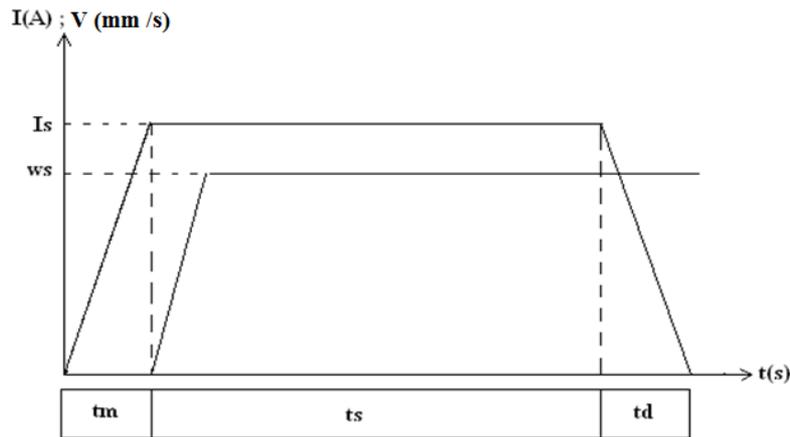
- Déterminer le temps nécessaire  $T(s)$  pour que le tube fasse un tour (temps de révolution du tube). Ce temps est en fonction de la position du potentiomètre  $P$ .

<b>P</b>	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
<b>T(r)</b>	12	10	9	8	7	6.2	6	5.7	4.8	4.5	4.3	3.9
<b>V (mm /s)</b>	3.5	4.1	4.7	5.3	6.2	6.8	7	7.38	8.8	9.4	9.9	10.8

**Tableau -6:** Temps de révolution du tube en fonction de la position du potentiomètre.

**Remarque :** l'erreur est de l'ordre de seconde parce que les valeurs ont été mesurées manuellement (Avec un chronomètre et à partir d'un repère).

- Ensuite, déterminer le temps réel  $t_r$  d'un cycle de soudage pour une vitesse donnée.



**Figure -23:** le cycle de soudage (TIG).

$$t_{sr} = t_m + t_s + t_d \quad (4)$$

Avec :  $I_s$  : courant de soudage.

$V_s$ : vitesse de soudage.

$t_m$  : temps de monter du courant de soudage.

$t_s$  : temps de soudage.

$t_d$  : temps de descente du courant de soudage.

$t_{sr}$  : temps de soudage réel.

Il faut toujours prendre en considération les temps  $t_m$  et  $t_d$ . Le temps de soudage  $t_s$  sera donc égal ou légèrement supérieur au temps de révolution du tube. Dans notre cas le temps maximal d'allumage de l'électrode est 10 secondes.

- Le vide : 0.04 mbar
- Gaz de protection : l'argon à pression 130mbar.
- L'électrode en tungstène théorie à 2% de diamètre 2.4mm.
- La longueur d'arc : entre 0.6 et 1mm.
- L'intensité de courant et la vitesse de soudage sont déterminées par les relations (2) :

$$I = VQ / U \quad (2)$$

Donc l'intensité de courant est liée directement à la vitesse de rotation du tube et la quantité de chaleur nécessaire pour fusionner la jonction tube-bouchon.

**c.2. Le soudage :**

Nous avons soudé des éprouvettes gaines-bouchons avec différents paramètres de soudage tels que l'intensité et la vitesse de soudage. Le tableau7, montre les différents paramètres appliqués aux soudures réalisées.

n°	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
I <sub>s</sub> (A)	30	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40
t <sub>sr</sub> (s)	8.6	9	9	9	9	6.5	10	7.5	7.5	7.5	8.5	09
V(mm /s)	6.2	6.2	4.1	5.3	7	8.8	6.2	9.9	9.9	8.8	7	6.2

n°	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
I <sub>s</sub> (A)	40	35	35	35	35	35	25	25	25	50	50
t <sub>sr</sub> (s)	10	10	8.5	9	9	8.5	10	10	10	8	5
V(mm /s)	4.7	4.7	6.2	7	8.8	9.9	4.7	6.2	4.1	7	10.8

**Tableau -7:** Les différents paramètres de soudage appliqués.

D'où : n° : numéro de l'échantillon.

**I** : Intensité du courant A.

t<sub>sr</sub> : temps de soudage réel.

**V** : Vitesse linéaire de rotation du tube (mm /s).

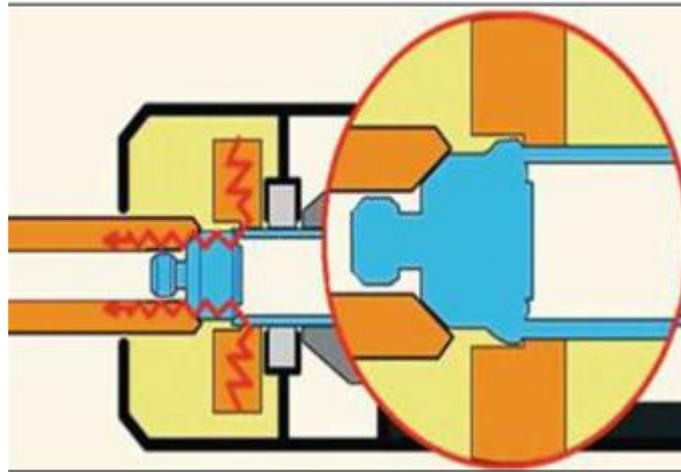
**B-IV.2 Soudage par le procédé STR (Soudage Tube Résistance)****a. Description générale de l'équipement:**

Cet équipement est spécialement conçu pour le soudage de gaine et de bouchon par la méthode de soudure par résistance avec force magnétique (STR). L'équipement est composé des principaux éléments suivants:

**CONFIDENTIEL**

**Figure -24 :** Equipement de soudage par le procédé STR.

### 1-Chambre de soudage



**Figure -25:**Schéma [21] et chambre de soudage et emplacement du tube (1) et du bouchon (2).

### Déroulement de l'opération de soudage:

Le déroulement des opérations de soudage s'effectue suivant les étapes suivantes :

**CONFIDENTIEL**

#### b. L'opération de soudage :

Ils nous ont été fournis pour subir la caractérisation dans notre étude. Le programme de soudage appliqué à ces échantillons est explicité ci-dessous:

#### - Programme de soudage :

**CONFIDENTIEL**

**Tableau -8:** Périodes de soudage.

- Le courant :

**CONFIDENTIEL**

**Tableau -9:** Courants de soudage.

**Le stick out :**

Le paramètre stick out représente la distance entre l'extrémité de la gaine (dans la chambre de soudage) et la mâchoire de sa fixation.

**CONFIDENTIEL**

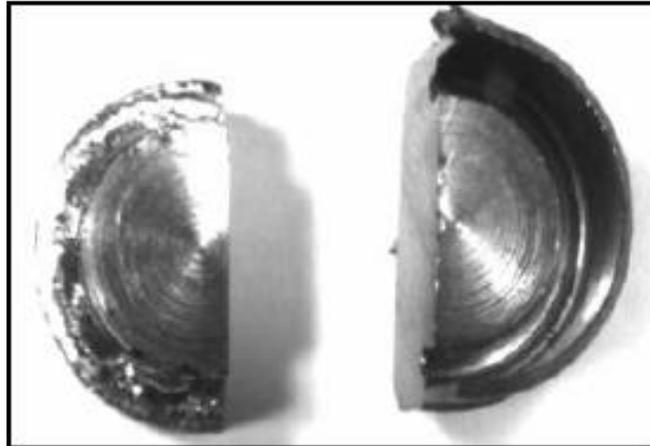
**Tableau -10:** Les sticks out pour les différents échantillons.

## **B-V Caractérisation des soudures:**

### **B-V-1 Préparation des échantillons pour analyse:**

#### **a) Découpage :**

L'opération de découpage des échantillons est effectuée à l'aide d'une microrançonneuse à scie diamantée. Elle permet la caractérisation des échantillons soudés par la microscopie optique (métallographie) et la réalisation des mesures de microdureté à travers les cordons soudés. La figure 26, présente une coupe axiale, d'un assemblage tube-bouchon.



**Figure -26 :** Coupe

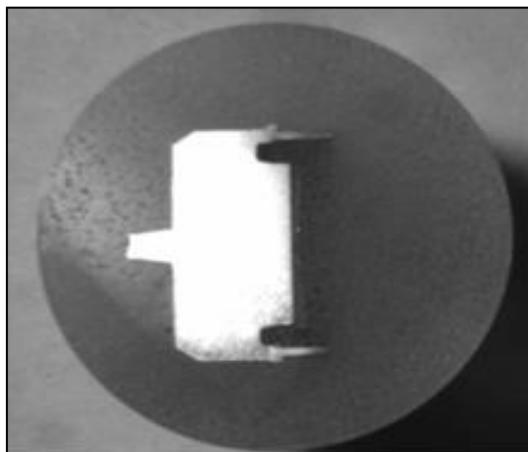
assemblage gaine-bouchon.

axiale d'un

#### **b) Enrobage :**

Sur le plan pratique, il existe deux types d'enrobage: il s'agit bien d'enrobage à froid et celui à chaud. Ce dernier est effectué à chaud et sous pression. Il dépend principalement de la nature de la résine, de la pression appliquée et de la température de chauffage exercée.

Les échantillons destinés à l'examen métallographique et la mesure de microdureté sont enrobés à froid dans un moule en caoutchouc à partir d'une résine et d'un durcisseur. La figure 27, présente un exemple d'assemblage tube- bouchon enrobé.



**Figure -27:** Assemblage tube- bouchon enrobé.

#### **c) polissage mécanique:**

Les échantillons enrobés sont polis à l'aide de la polisseuse mécanique pour obtenir une surface plane pour l'observation au microscope optique sans rayures.

Les échantillons ont subi un polissage mécanique avec des papiers abrasifs de granulométrie décroissante (120, 240, 400, 600, 1000, 1200, jusqu'au grade P 2400).

#### **d) Attaque chimique :**

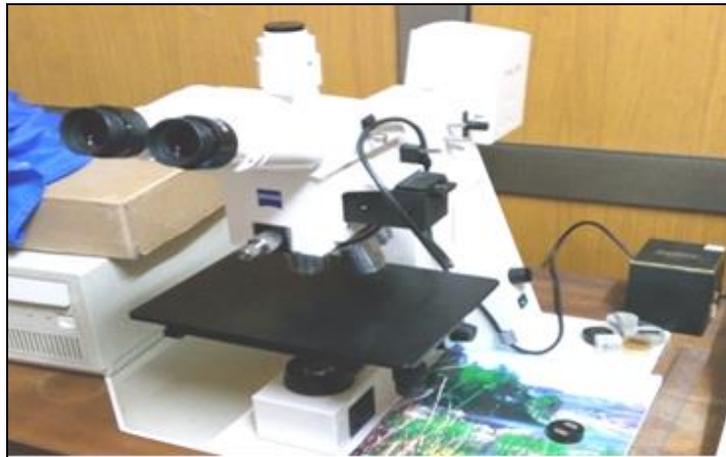
Les échantillons destinés pour l'observation métallographique ont subi une attaque chimique avant d'être observé au microscope optique. La solution d'attaque utilisée est composée de: 3% Hf + 47% HNO<sub>3</sub> + 50% H<sub>2</sub>O.

#### **B-V-2 Examen au microscope optique (MO) :**

Le microscope optique permet de visualiser des objets ou des détails invisibles à l'œil. Il est composé principalement d'un système de lentilles appelé objectif, pour agrandir l'objet d'analyse ; et d'un oculaire pour l'observation.

L'observation de l'échantillon est effectuée avec un microscope optique de marque Carl Zeiss type Axio teck de grossissement global allant jusqu'à 500X.

Le microscope est équipé d'une caméra de marque Axio Cam. Une acquisition numérisée des images observées au M.O ce fait à travers une carte d'acquisition incorporée dans un micro-ordinateur (PC).



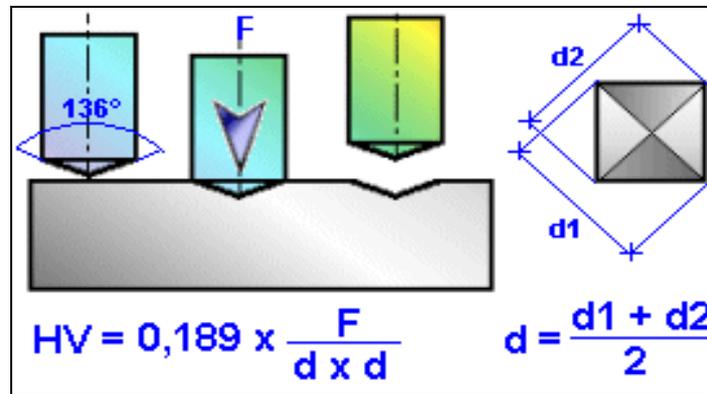
**Figure -28:** Microscope optique Carl Zeiss type Axio.

#### **B-V-3 Essai de microdureté :**

L'essai consiste à appliquer sur une éprouvette à mesurer un pénétrateur sous une charge d'appui donnée. La dureté est mesurée par rapport aux dimensions des empreintes laissées par le pénétrateur sur la surface du matériau contrôlé. Ces empreintes sont d'autant plus importantes que le métal est qualifié de mou, en d'autres termes, la dureté peut être définie comme la résistance à la pénétration.

- Essai de microdureté Vickers :

Dans le cas de la dureté Vickers le pénétrateur a la forme d'une pyramide droite à base carrée et d'angle de  $136^\circ$  au sommet. La charge de l'essai est 1N. Cette charge est appliquée d'une manière progressive et constante jusqu'à ce que la charge choisie soit atteinte (0.999N/s), elle est ainsi maintenue pour une période de temps 5s



**Figure -29:** Dimensions de l’empreinte et formule de calcul de la dureté selon Vickers.

Dans notre cas, les échantillons à caractériser sont prélevés dans le sens perpendiculaire à l’axe du cordon de soudure. Ces échantillons ont subis préalablement un polissage mécanique à l’aide de papiers abrasifs pour obtenir une surface plane.

La mesure de la microdureté dans notre cas a été réalisée en partons du métal de base de la gaine au métal de base du bouchon, en passant par les différentes zones du joint soudé Gaine-Bouchon, pour les deux procédés de soudage.



**Figure -30:** Microduromètre semi-automatique.

## C– Résultats et interprétation

### C-1 Introduction :

Dans cette partie nous présentons les résultats obtenus et leurs discussions. La démarche adoptée dans cette partie sera une présentation comparative entre les résultats obtenus dans les deux procédés TIG et STR.

Dans un premier temps, nous commençons de donner les résultats obtenus par les observations visuelles afin de présenter une idée sur la qualité des soudures obtenues et les défauts constatés. Ceci sera suivi une présentation des macrographies pour estimer l'effet des différents paramètres de soudage appliqués sur l'étendus des différentes zones créées (ZAT et ZF) par TIG et STR. On passera par la suite à présenter les résultats de l'observation par microscope optique pour mettre en évidence les structures des différentes zones observées. En fin, nous terminerons par présenter l'évolution des microduretés à travers des différentes zones obtenues afin de mettre en évidence les propriétés mécaniques de la jonction soudée et d'estimer leur durée de vie en réacteur.

### C-I. L'observation visuelle :

L'observation visuelle nous permet d'avoir une idée sur la morphologie des différents cordons de soudure réalisés tels que la largeur pour le procédé TIG et la course de refoulement pour le procédé STR. Cela nous permet également d'identifier les causes de certains défauts créés durant le soudage.

#### C-I-1. Le procédé TIG:

Il est à noter que la forme du front de solidification durant le soudage dépend de l'action des forces de gravité (poids), de la poussée de l'arc, de la tension superficielle et des forces électromagnétiques. L'interaction de ces forces conditionne les variations de la morphologie du cordon, Figure 31.

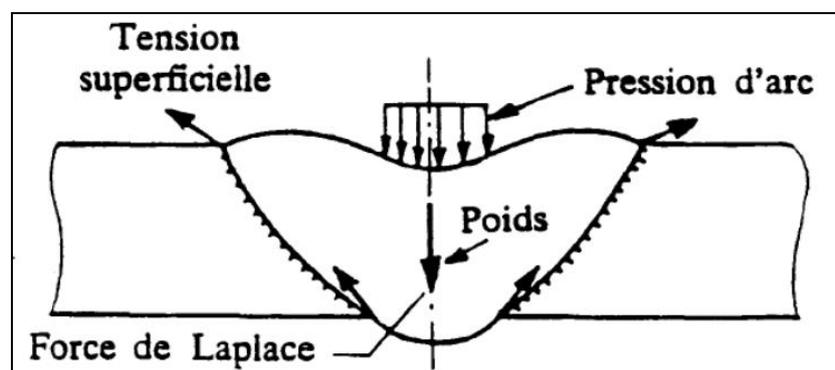


Figure-31: Equilibre global du bain de fusion.

Le tableau 11, présente les résultats du soudage tube-bouchon par le procédé TIG avec différents paramètres.

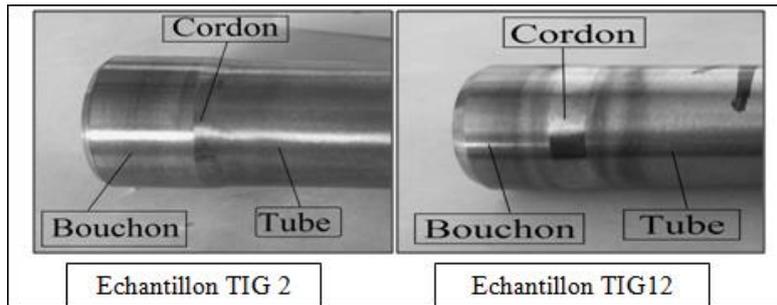
n°	I	t <sub>s</sub>	V	observation
01	30	8.6	6.2	Défaut de soudure à cause de l'état de l'interface gaine-bouchon (défaut de fabrication du tube ou / et du bouchon).
02	30	9	6.2	Bonne soudure; le couple (P ; Ts)= (50 ; 9) est <b>acceptable</b> .
03	30	9	4.1	Cordon incomplet, le temps de soudage est insuffisant par rapport à la vitesse de rotation. Avec présence de défauts sur le cordon formés à cause de l'état de l'interface tube-bouchon.
04	30	9	5.3	Observations similaires avec l'échantillon 3.
05	30	9	7	Bonne soudure au démarrage. Puis altération de la qualité de soudure à cause de la vitesse de soudage trop élevée et l'état de l'interface tube-bouchon.
06	30	6.5	8.8	Fusion insuffisante due à une vitesse de soudage élevée.
08	30	7.5	9.9	Observations similaires avec l'échantillon 6.
09	40	7.5	9.9	Aspect très propre, mais cordon incomplet, vitesse de soudage élevée.
11	40	8.5	7	cordon complet avec un bon aspect visuel. <b>Acceptable</b> .
12	40	09	6.2	cordon complet ; large avec un bon aspect visuel. <b>Acceptable</b>
13	40	10	4.7	cordon incomplet avec un bon aspect visuel. Temps de soudage insuffisant.
14	35	10	4.7	cordon presque complet. Retard d'enclenchement de la rotation du tube
15	35	8.5	6.2	cordon presque complet avec diminution de la largeur. Intensité du courant trop faible par rapport à la vitesse de soudage.
17	35	09	8.8	Cordon complet et acceptable et bon aspect visuel. <b>Acceptable</b>
18	35	8.5	9.9	Très bon aspect visuel, largeur moyenne mais cordon incomplet
19	25	10	4.7	Cordon incomplet et bon aspect visuel. La largeur est la plus petite rencontrée.
20	25	10	6.2	Fusion incomplète, l'aspect est très brillant, la largeur trop petite
21	25	10	4.1	Cordon incomplet mais la partie soudée est plus importante que précédemment. Le cordon est très brillant et étroit.
22	50	8	7	Cordon complet très large et mauvais aspect. <b>acceptable</b>
23	50	05	10.8	Cordon incomplet moins large que l'échantillon n° 23.

**Tableau -11** : Les différents paramètres de soudages et les résultats obtenus.

Les résultats obtenus sont divisés en deux catégories :

### 1- Bonne soudure:

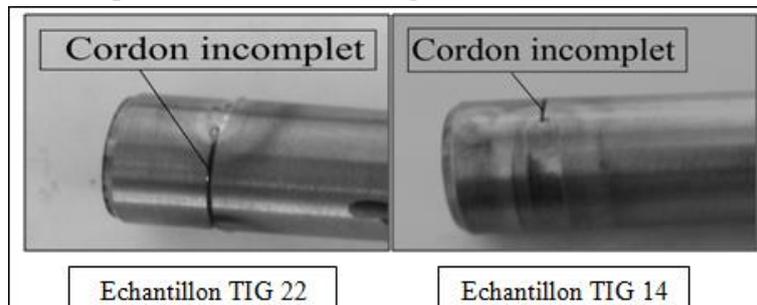
Soudure acceptable avec des paramètres de soudage différents tels que l'intensité du courant et la vitesse de soudage. Il ya une différence dans la largeur du cordon : Plus l'intensité du courant est grande et la vitesse de soudage petite, plus le cordon sera large.



**Figure-32:** Bonne soudure (Equilibre global du bain de fusion).

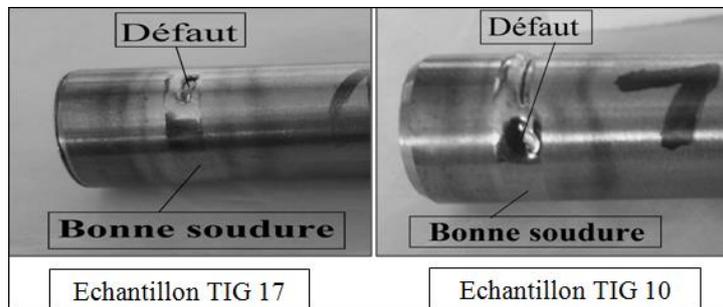
**2- Soudures avec défauts :**

- a. Cordon incomplet: le cordon est incomplet (non entièrement soudés) car le temps de révolution du tube dépasse celui de l’allumage de l’électrode.



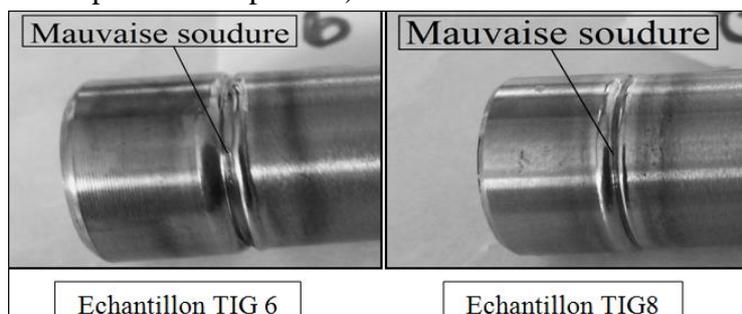
**Figure -33:** Soudure incomplet.

- b. Mauvaise soudure à cause de l’état de l’interface gaine-bouchon (défaut de fabrication du tube et du bouchon).



**Figure -34:** Défaut de soudage

- c. Mauvaise soudure ou absence de soudure à cause de la vitesse de soudage trop élevée et d’une trop faible intensité du courant. La quantité de chaleur est insuffisante pour former un cordon de soudure .la force de tension superficielle est plus importante que la force de gravité (la force de poids est trop faible).



**Figure-35:**Mauvaise soudure.

**C-I-2. Le procédé STR :**

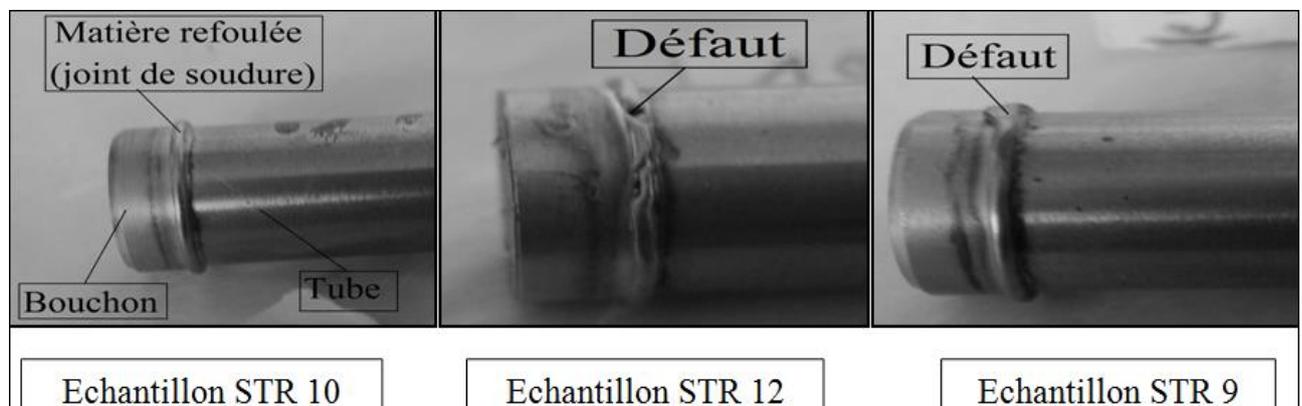
Le tableau-12, présente les principales valeurs enregistrées sur les instruments de mesure de sorte que :  $\Delta L$  : Course de refoulement, Q : Energie calorifique et D : stick out.

Échantillon	D (mm)	Q%	$\Delta L$ (mm)
1	/	45%	1.34
2	/	45.6%	1.42
5	1.40	34.4%	0.55
7	3.20	33.4%	2.75
8	2.0	32.7%	1.03
9	2.51	33%	1.67
10	2.54	34.3%	1.56
12	2.54	31.7%	1.48

**Tableau -12:** Tableau des valeurs mesuré

On constate que la valeur mesurée de la course de refoulement ( $\Delta L$ ) augmente avec l'augmentation du stick out (D). On constate également une légère différence sur l'énergie calorifique entre l'échantillon 10 et l'échantillon 12 alors que les paramètres de soudage sont les même dans les deux cas (courants, périodes et stick out), cela est due probablement à la différence d'état de surface de la jonction tube-bouchon. En effet, cet état de surface affecte la résistance au courant ainsi que la quantité d'énergie thermique mesurée.

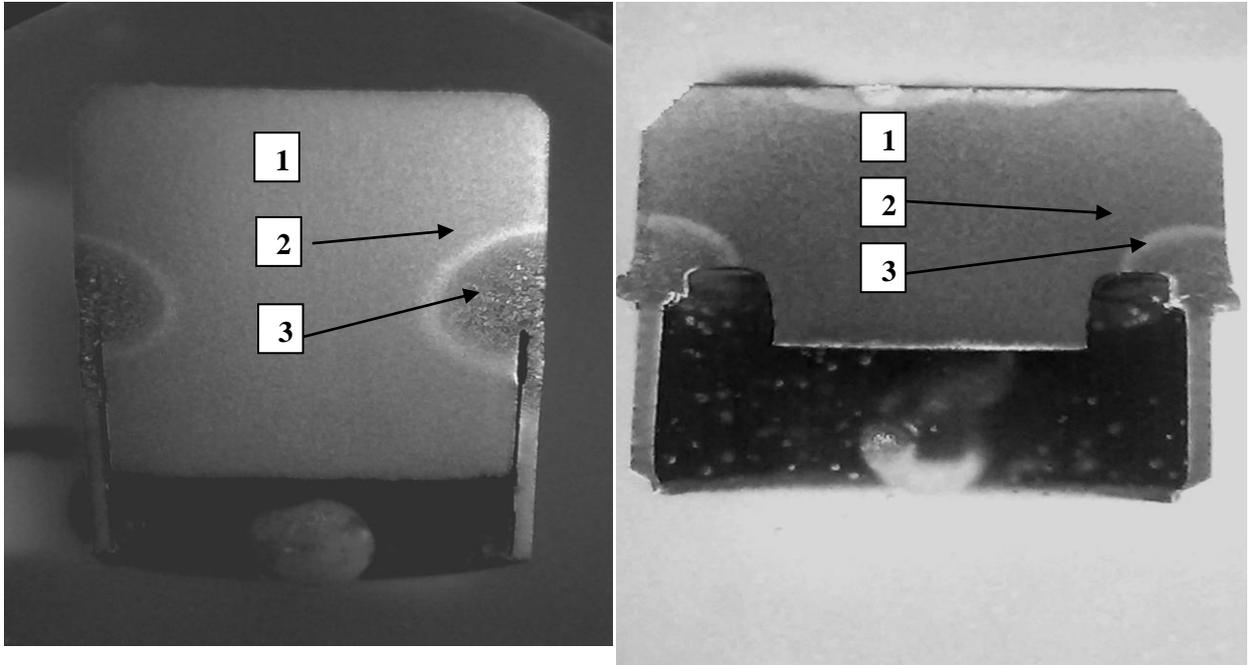
La figure 36, présente des observations visuelles du cordon soudé par le procédé STR. Elle montre une soudure de bonne qualité (cas de l'échantillon 10) bien représentée par la forme du cordon de la matière refoulée. Cependant, les échantillons 9 et 12 présentent une mauvaise forme de la matière refoulée. Cette dernière trouve probablement son origine dans les défauts de fabrication du tube et bouchon comme elle peut apparaitre lorsque le temps de soudage est assez long (cas de l'échantillon 9) qui conduira à une projection du métal. Par contre, si le temps de soudage est assez court, on assiste à des fusions non continues dans certains endroits du cordon, comme illustre l'échantillon 12.



**Figure-36:** Observation visuelle des échantillons soudés par le procédé STR.

## C-II. L'observation Macrographique:

L'observation macrographique des échantillons soudés par TIG et STR sont bien illustrées par la figure-37. On distingue les différentes zones créées et leurs étendues dans chaque procédé de soudage. Chaque échantillon a subi au préalable une attaque chimique. Les examens macrographiques ont été effectués sur les sections transversales des joints soudés.

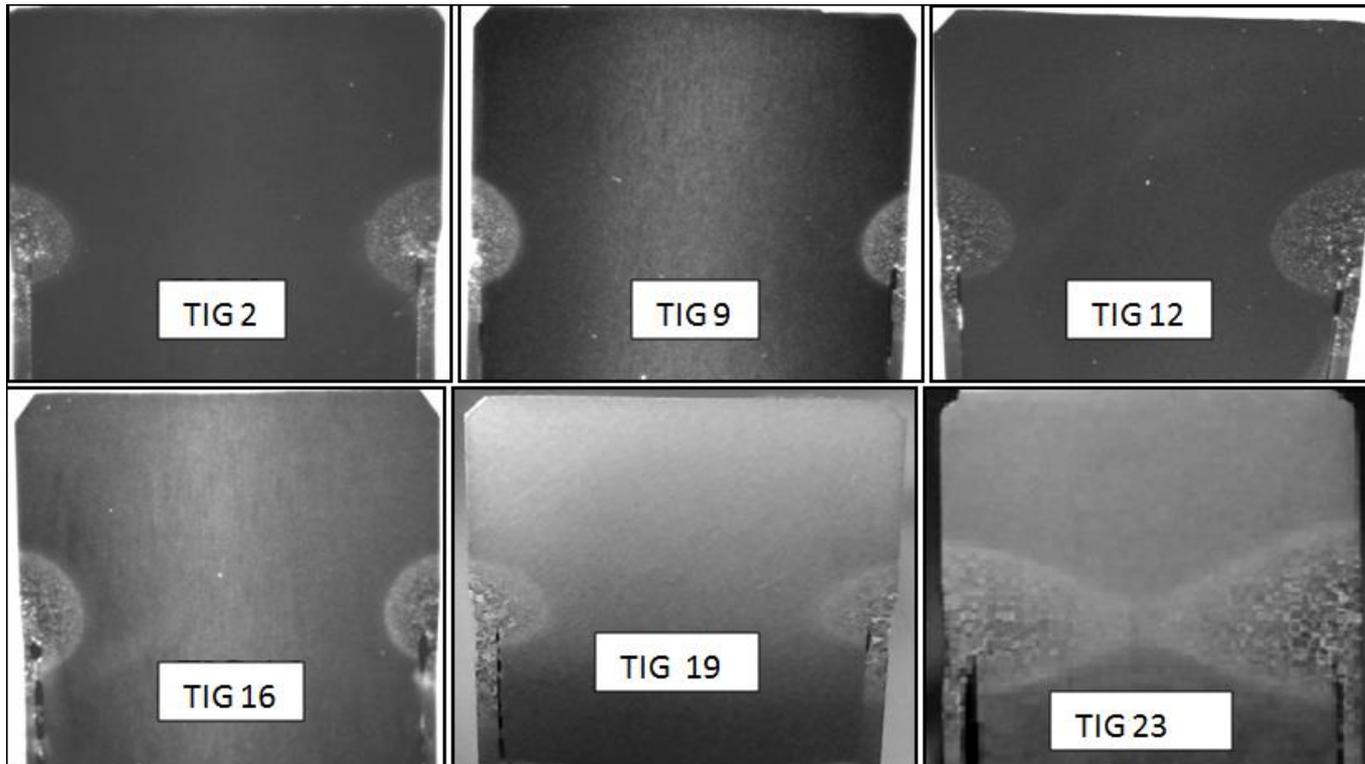


**Figure-37:** L'observation macrographique d'un assemblage gaine-bouchon par les procédés TIG et STR (A : TIG12 et B: STR 5)

La différence des contrastes noir et blanc permet de distinguer les différentes zones existantes. L'ensemble des échantillons soudés par les procédés TIG et STR présentent trois (03) zones bien distinctes en contraste, Figure 37.

- Zone 1 : métal de base (MB).
- Zone 2 : zone affectée thermiquement (ZAT).
- Zone 3 : zone fondu (ZF).

## C-II-1. Soudage TIG



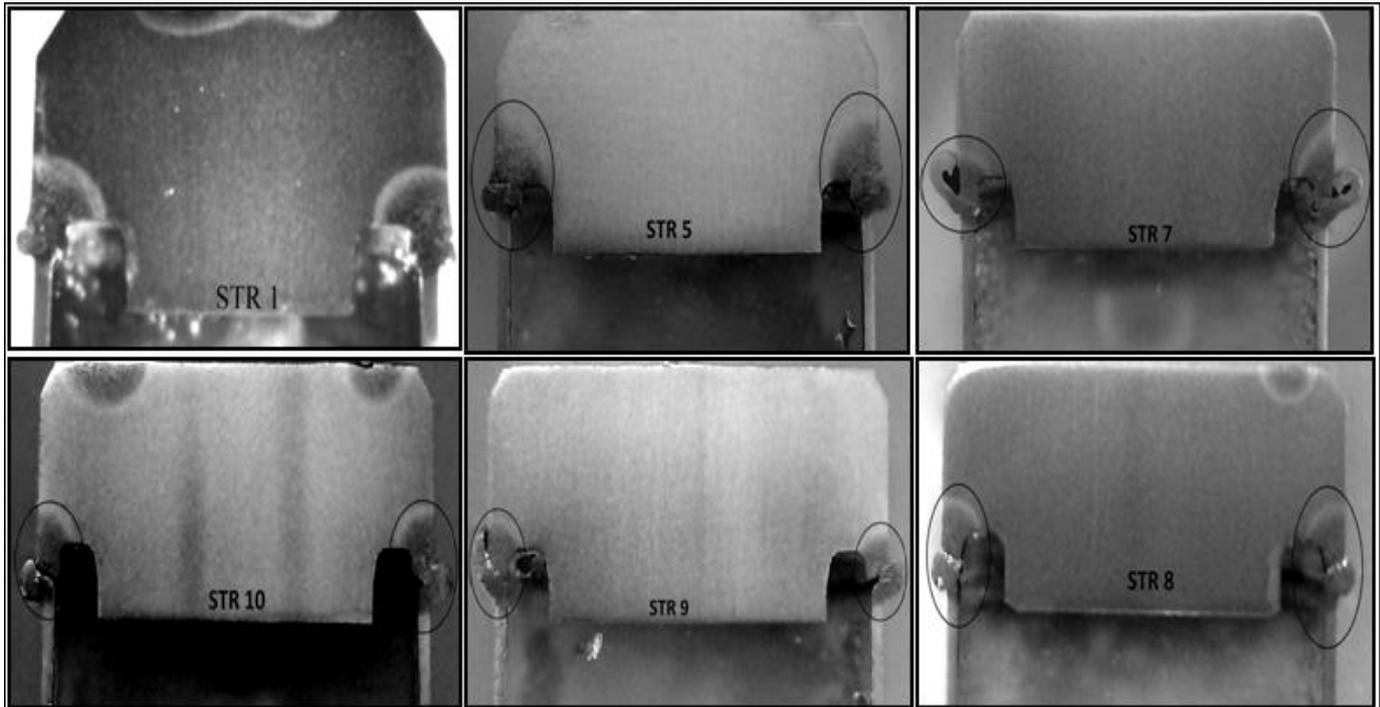
**Figure-38:** L'observation macrographique des assemblages gaines-bouchons avec différents paramètres de soudage TIG.

La figure 38, montre l'étendue des zones (ZAT, ZF) en fonction des paramètres de soudage appliqués. Cette différence s'explique par la variation de quantité de chaleur fournie en fonction de la vitesse de rotation de la gaine et l'intensité du courant. On peut évaluer l'influence de la vitesse d'avancement et de l'intensité du courant sur l'apport calorifique de soudage par la relation suivante :

$$V=I.U/Q \quad (2)$$

A partir de l'expression (2), on connaissant l'apport calorifique (**Q**), on peut déduire la masse de la matière fondu ce qui nous permettra d'obtenir la taille de l'étendue de la zones fondu (ZF) et celle de la zone affectée thermiquement (ZAT). Les observations correspondantes mettent en évidence une différence d'étendues entre deux points soudés sur un même échantillon. Cette différence trouve probablement son explication dans la variation de la longueur d'art induit par les vibrations de l'axe de fixation du couple à souder ou du mauvais réglage de la vitesse de soudage par rapport au temps nécessaire au soudage. Cette opération peut conduire à une répétition de soudage sur un même point et par conséquent elle produit un mauvais soudage.

### C-II-2. Soudage STR :



**Figure -39 :** Observation macrographique des assemblages gaine-bouchon avec différents paramètres de soudage STR.

L'importance de l'étendue des différentes zones (ZAT, ZF) diffère également en fonction de la variation de quantité de chaleur fournie qui varie selon les facteurs de soudage appliqués (Courant, périodes de soudage, résistance électrique rencontrée par le courant).

La formule ci-dessous met en évidence la relation entre ces paramètres et la quantité de chaleur fournie.

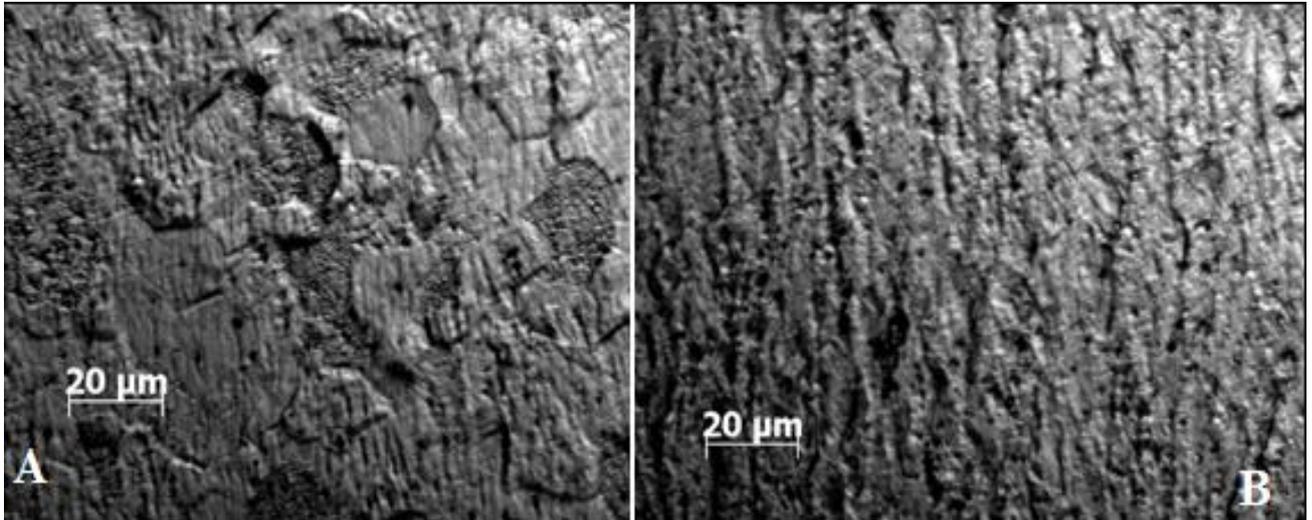
$$Q = \int_0^T RI^2 dt \quad (3)$$

La force de forgeage et le stick out influencent eux directement sur la course de refoulement.

### C-III. Observation par microscope optique :

L'observation par microscopie optique nous a permis d'identifier de nouvelles zones qui ne sont pas identifiées par l'observation macrographique. Elle permet également d'obtenir des informations sur la taille de grains, leurs orientations ainsi de nous informer sur l'évolution de la microstructure en fonction du gradient de température appliquée sur les jonctions soudées par TIG et STR.

#### C-III-1. Métal de base:

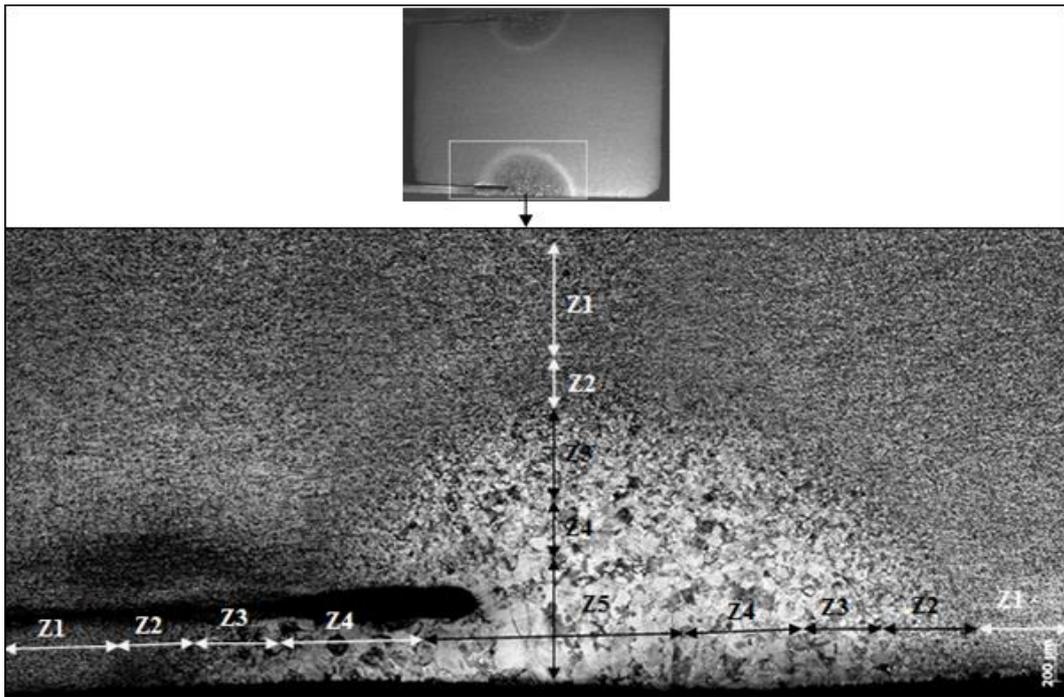


**Figure-40:** Microstructure du métal de base du bouchon (A) ainsi que de celle de la gaine (B).

La figure 40, représente la microstructure du métal de base du bouchon et celle de la gaine en Zircalloys-4. Il apparaît clairement sur les microstructures obtenues que les tailles des grains de la gaine sont plus fines que celles du bouchon.

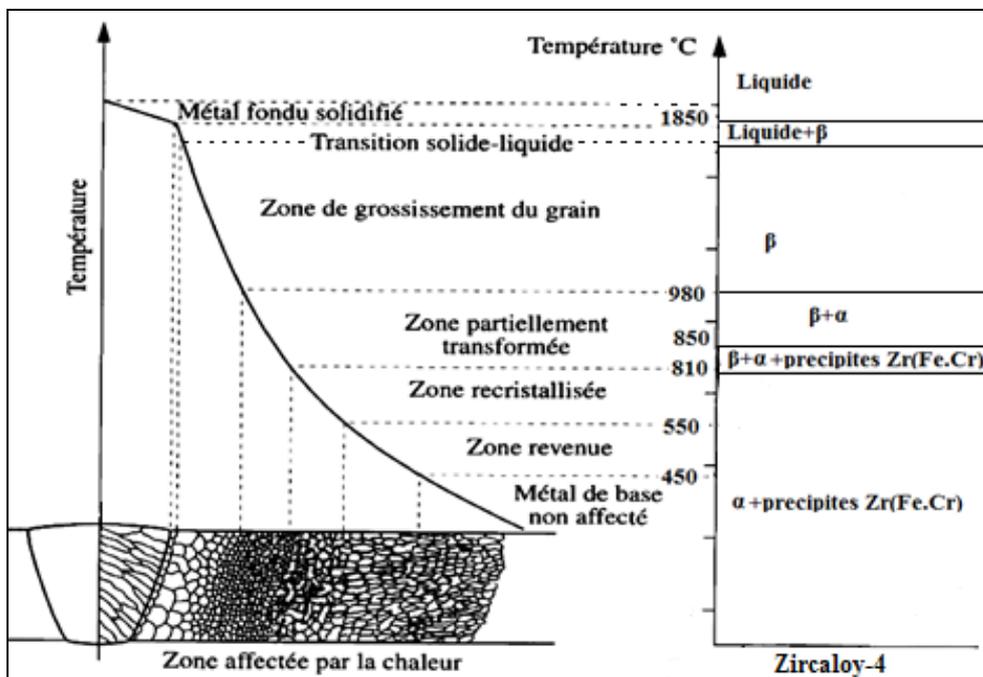
La microstructure de la gaine (B) présente des grains très allongés dans la direction axiale du procédé de mise en forme au cours de l'opération de laminage. Par contre, celle relative au bouchon, elle présente des grains équiaxes plus gros que les grains rencontrés sur la gaine. Cette différence nous permet de prédire la diminution de la microdureté et par conséquent de la résistance mécanique de la gaine.

#### C-III-2. Soudage TIG:



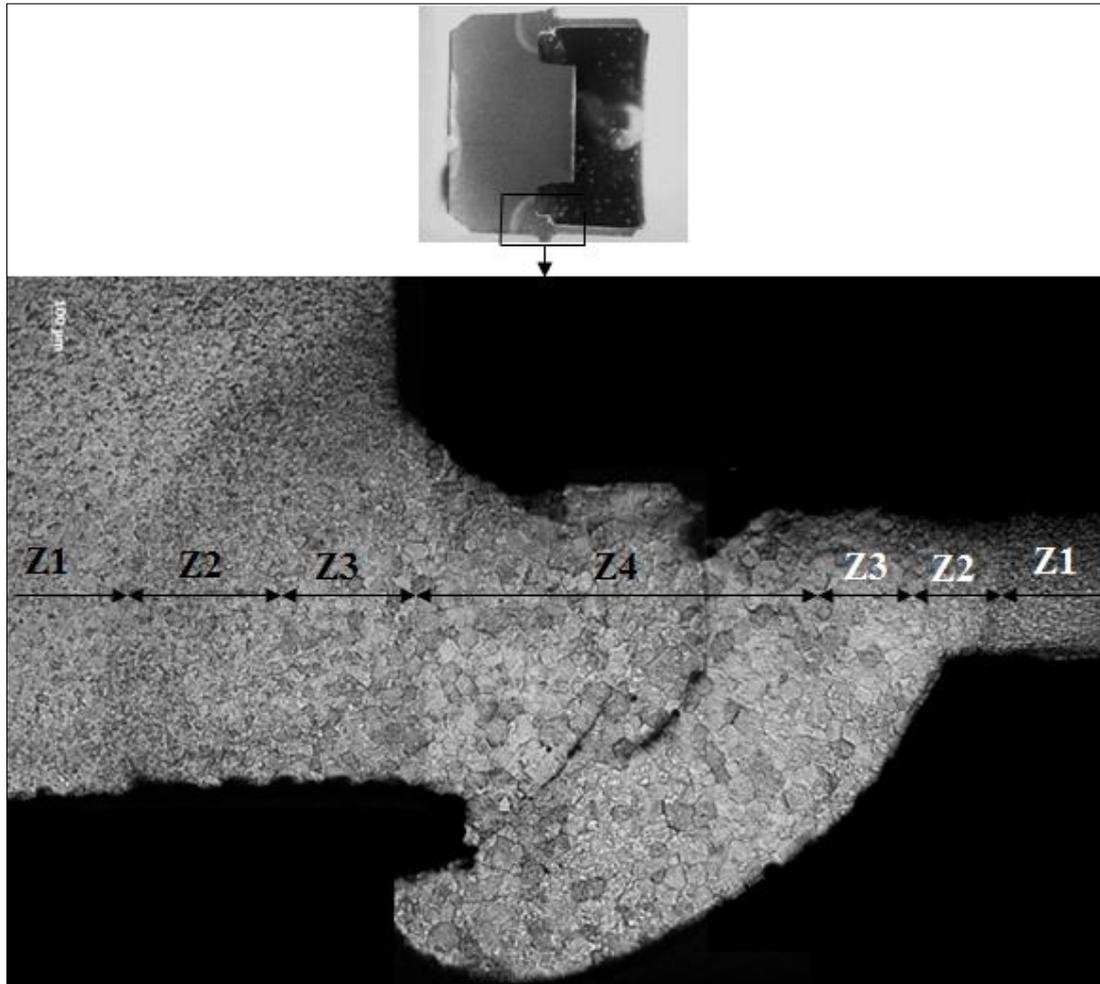
**Figure -41:** Gradient de microstructure observé entre les différentes zones de soudage Gaine-Bouchon par le procédé TIG.

Le caractère rapide des cycles thermiques de soudage ne permet pas d'utiliser les diagrammes d'équilibre pour prévoir la nature exacte des différentes phases au voisinage de la ligne de fusion. Cependant, il est commode de raisonner à partir de ce type de diagramme pour interpréter qualitativement les modifications microstructurales. Donc, nous pouvons représenter schématiquement la figure 41 par la figure 42 ci-dessous.



**Figure -42:** Présentation schématique des différentes parties constitutives du joint soudé Gaine-Bouchon par le procédé TIG.

### C-III-3. Soudage STR :

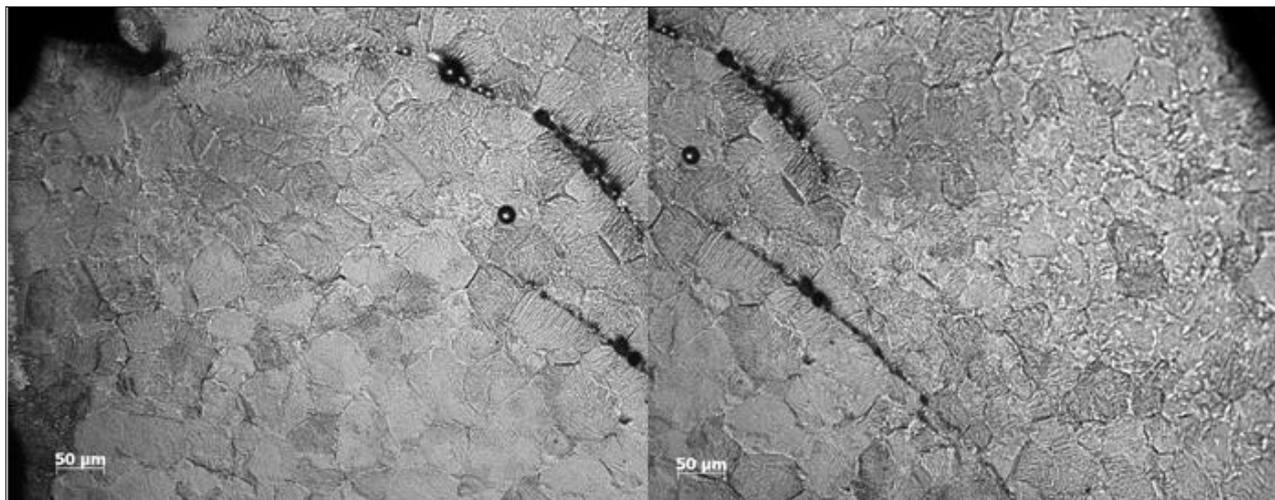


**Figure -43:** Gradient de microstructure observé entre les différentes zones de soudage Gaine-Bouchon par le procédé STR.

Les figures 41 et 43, présentent les différentes zones microstructurales (en coupe axiale) des soudures obtenue par les procédés de soudage TIG et STR.

Nous noterons qu'il existe cinq (05) zones différentes pour le procédé TIG et (04) quatre zones pour le procédé STR. Les dimensions des différentes zones pour le procédé STR sont plus petites comparativement à celles obtenues pour le procédé TIG.

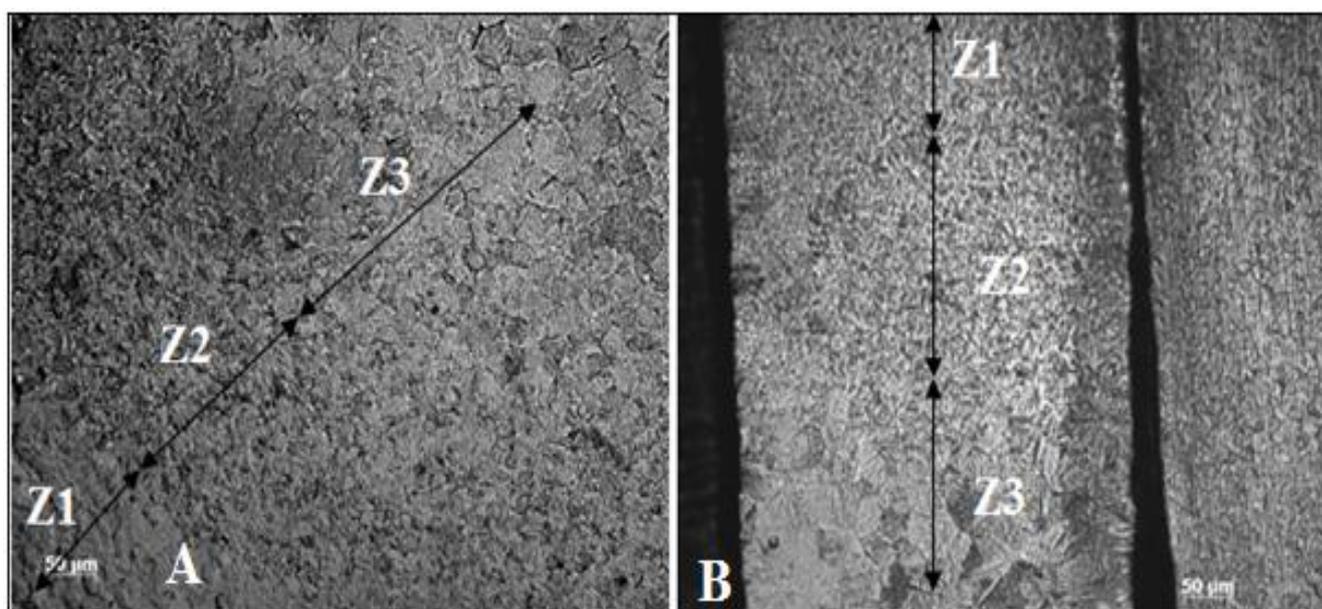
Lors du procédé STR, on observe la présence d'une discontinuité entre la gaine et le bouchon (Figure 44). Ce phénomène peut être expliqué soit par une faible énergie thermique fournie ou bien par une force de forgeage trop forte.



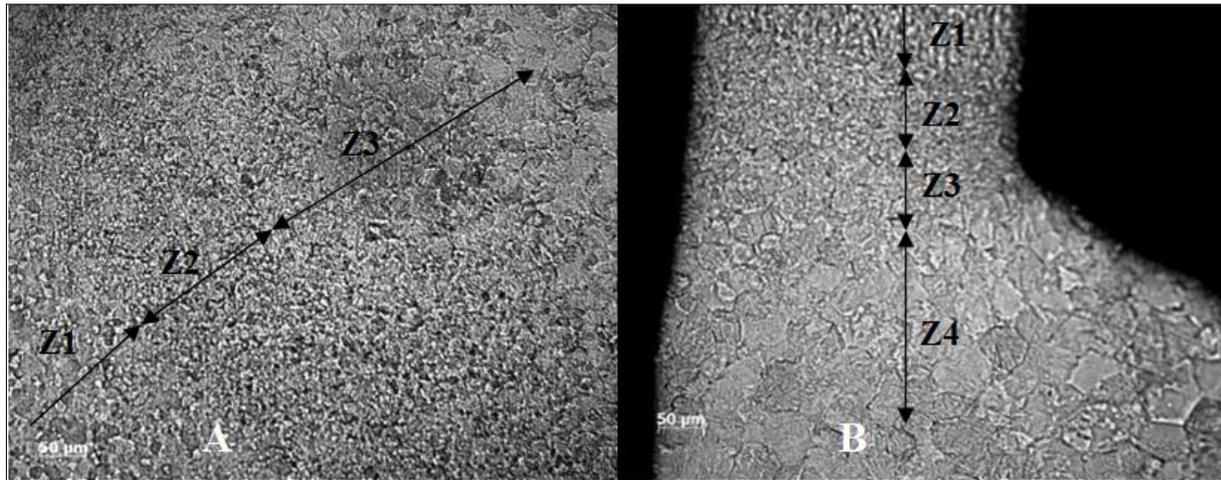
**Figure 44:** Discontinuités entre la gaine et le bouchon.

**C-III-4. Les différentes zones:**

- Zone 2 et 3 :



**Figure-45 :** Microstructure du métal de base (Z1), Zone recristallisée (Z2) et de la zone partiellement transformé (Z3). (A) bouchon et (B) gaine. [TIG]



**Figure -46:** Microstructure du métal de base (Z1), Zone recristallisée (Z2) et de la zone partiellement transformé (Z3). (A) bouchon et (B) gaine. [STR]

### Zone 2 :

Zone sub-critique ; la température est entre 450 et 810 °C, où l'on ne constate pas encore de changement de phase. Certains phénomènes tels que les revenus, ou des recristallisations, etc.... peuvent éventuellement intervenir.

La microstructure de la zone2 montre une naissance de grains sur la gaine de taille légèrement plus importante par rapport aux grains initiaux. Elle montre également l'apparition sur le bouchon de grains plus fin comparée aux grains du métal de base. L'évolution de la microstructure est due au phénomène de recristallisation. Le Zy-4 dit « recristallisé » subit un traitement thermique à une température supérieure à 550°C. Le Zy-4 recristallisé a des grains plutôt équiaxes.

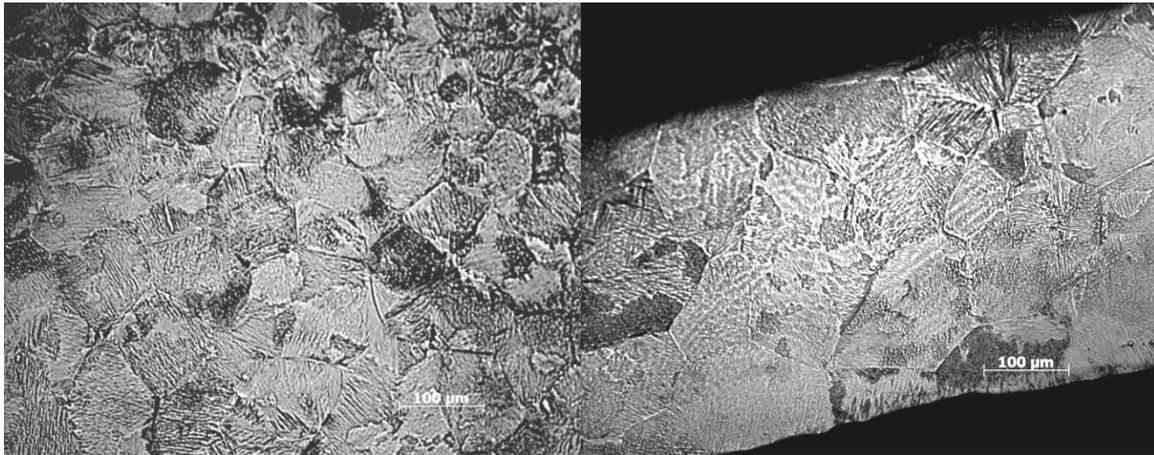
### Zone 3 :

Zone de transformation partielle (ou inter critique), dans laquelle la température maximale est comprise entre 810°C et 980 °C.

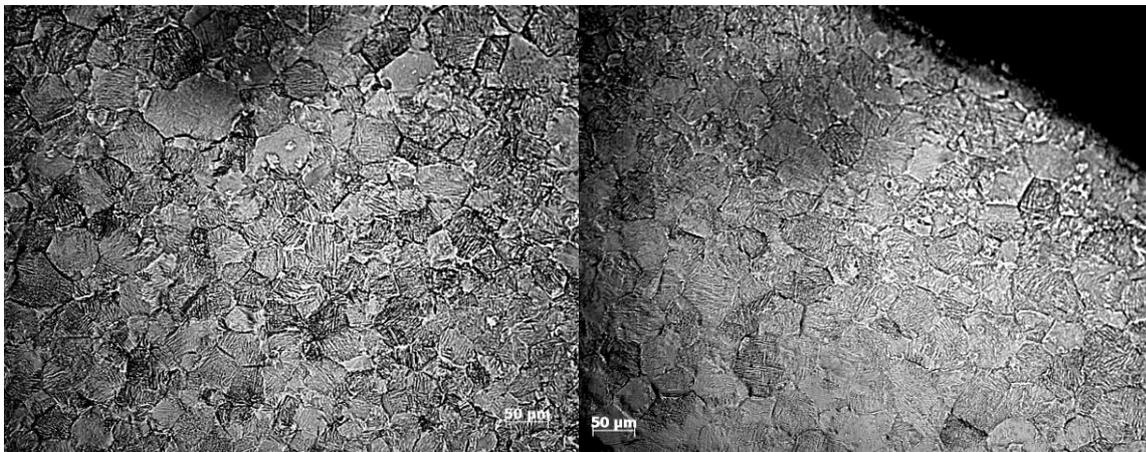
Dans cette région, la transformation de phase  $\alpha \rightarrow \beta$  et  $\beta \rightarrow \alpha$  est incomplète; une partie de la structure initiale n'est donc pas transformée. La transformation des grains  $\beta$  provoque une formation des zones  $\alpha$  à grains très fins, et la transformation des grains  $\alpha$  provoque une formation des zones  $\beta$  à grand grains. Lors du refroidissement à l'air ambiant la phase  $\beta$  devient la phase ex- $\beta$  à structure lamellaires (structure de Widmanstätten).

### Zone4 :

Zone surchauffe; Au plus près du métal fondu, la température élevée atteinte provoque un grossissement des grains  $\beta$ , l'étendue de cette partie appelée "zone à gros grains" est d'autant plus élevée que l'énergie de soudage est importante.

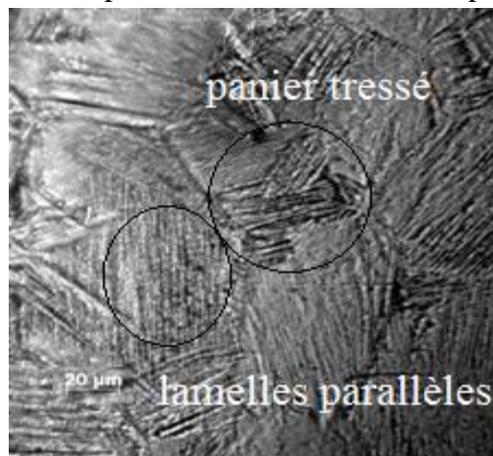


**Figure -47:** Microstructure de la Zone surchauffe (Zone 4) (A) bouchon et (B) gaine. [TIG]



**Figure -48:** Microstructure de la zone surchauffe (Zone4) (A) bouchon et (B) gaine [STR].

Dans cette zone la température maximale est nettement supérieure à  $980\text{ C}^0$ , la mise en solution des précipités Zr (Fe,Cr) peut être complète. Lors du refroidissement la phase  $\beta$  subit une transformation de phase  $\beta \rightarrow \alpha$ . La vitesse de refroidissement joue un rôle important sur la transformation et la microstructure. A un refroidissement à l'air ambiant la phase  $\beta$  devient la phase ex- $\beta$  à structure lamellaire (structure de Widmanstatten). On peut avoir deux structures à lamelles différentes : « panier tressé » et « lamelles parallèles » Figure 49.



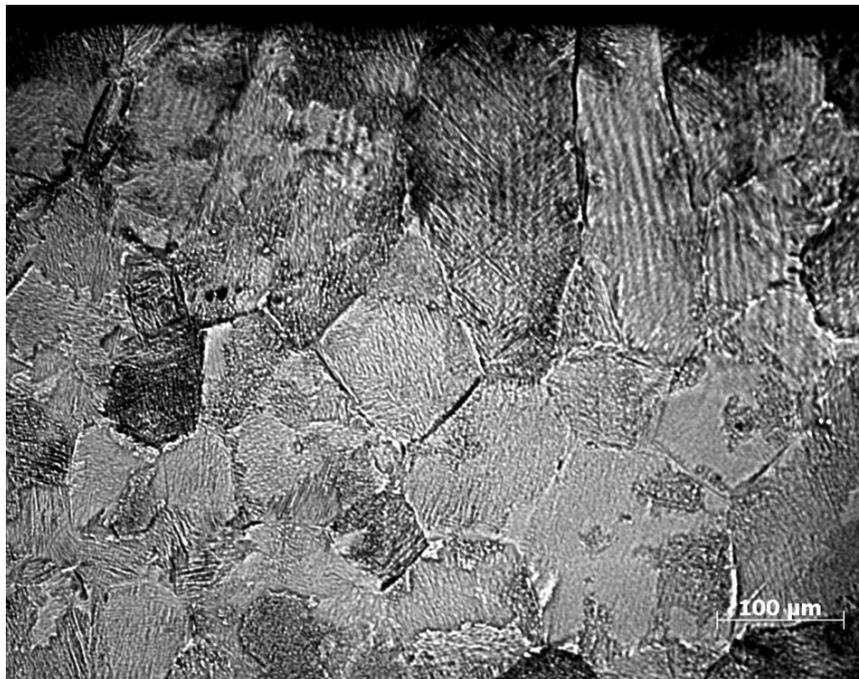
**Figure-49:** Structure de Widmanstatten.

La formation de la structure « panier tressé » est liée à la présence de particules Zr (Fe, Cr) qui sont insolubles dans  $\beta$ . Ces particules dispersées aléatoirement dans  $\beta$  servent de siège à la nucléation des lamelles  $\alpha$ , et la structure « panier tressé » est formée. En l'absence de particules Zr (Fe, Cr), la nucléation des lamelles  $\alpha$  a lieu au bord du grain  $\beta$ , et la structure « lamelles parallèles » est formée. Donc si on approche de la zone fondue la structure « lamelles parallèles » est prédominante.

#### Zone 5 :

Métal fondu, on observe dans cette zone des grains plus grand et allongé radialement, de structure lamellaires, la transformation  $L \rightarrow \beta \rightarrow \text{ex-}\beta$  (structure de Widmanstätten). Les lamelles parallèles est prédominante dans cette région,

Il est noté que d'après la littérature il existe à ce niveau une zone enchevêtrée entre les zones 4 et 5 qui correspond à une zone de transition solide-liquide. Cependant cette partie ne peut pas être observée par le biais du M.O.



**Figure -50:** Microstructure de la zone fondue (Zone5). [TIG]

Les premiers germes du métal fondu se solidifient par épitaxie sur les grains de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) en conduisant à la formation des gros grains radiaux. A proximité de la ligne de fusion, la vitesse de refroidissement est la plus rapide, la température maximale atteinte est la plus élevée et les temps de séjour à haute température sont les plus longs. Ces deux facteurs provoquent le grossissement du grain, la mise en solution complète des particules Zr (Fe, Cr) est un facteur qui favorise la formation de la structure « lamelles parallèles ».

Les investigations effectuées ont montré qu'ils existent différentes microstructures formées par les deux procédés TIG et STR. Il s'agit bien :

- Pour le procédé STR, on note une absence de la zone fondue contrairement au procédé TIG ou l'on retrouve la zone fondue avec des tailles grains importants.
- Pour le procédé TIG, on enregistre au niveau de la zone surchauffée (zone 4) des grains plus gros par rapport à ceux obtenus avec le procédés STR.
- L'étendu des différentes zones obtenus est plus importante pour le procédé TIG comparée au procédé STR.

#### C-4. Mesure de microdureté du joint de soudure:

Le tableau 12, présente les valeurs des microduretés mesurées sur les cordons soudés par TIG et STR. Ces mesures sont effectuées selon une ligne transversale en démarrant de métal de base du bouchon et traversant les différentes zones formées au niveau du joint soudé Gaine-Bouchon.

Procédé de soudage STR		Procédé de soudage TIG	
Distance [ $\mu\text{m}$ ]	Microdureté Hv	Distance [ $\mu\text{m}$ ]	Microdureté Hv
0	233	0	233,8
196,71	234,5	158,84	235,3
332,09	234,1	299,99	232,6
450,74	219,9	484,01	216,2
509,96	217,5	602,08	226,8
577,64	219,4	707,51	228,3
660,13	224,6	850,75	247,6
774,34	243,8	982,66	248,9
880,18	245,8	1096,21	254,5
971,23	247,1	1230,23	268,8
1077	268,8	1375,22	274,5
1182,75	265,7	1508,09	271,9
1286,41	268,8	1627,41	270,5
1402,74	267,8	1735,93	273,3
1505,58	263,1	1875,52	249,9
1648,44	266,6	1998,09	250,3
1782,07	264,7	2112,69	220,5
1890,3	263,9	2216,2	222,1
2007,59	244,3	2357,3	208,9
2122,01	246,9	2476,89	204,8
2226,18	214,2	2594,77	177,9
2327,47	210,4	2780,94	173,9
2431,89	170,9	2947,55	174,4
2567,59	169,2	3146,55	170,4
2708,88	174,2		

**Tableau-13:** Les valeurs de la microdureté mesurées dans différentes zones.

- **Profil de microdureté pour procédé TIG :**

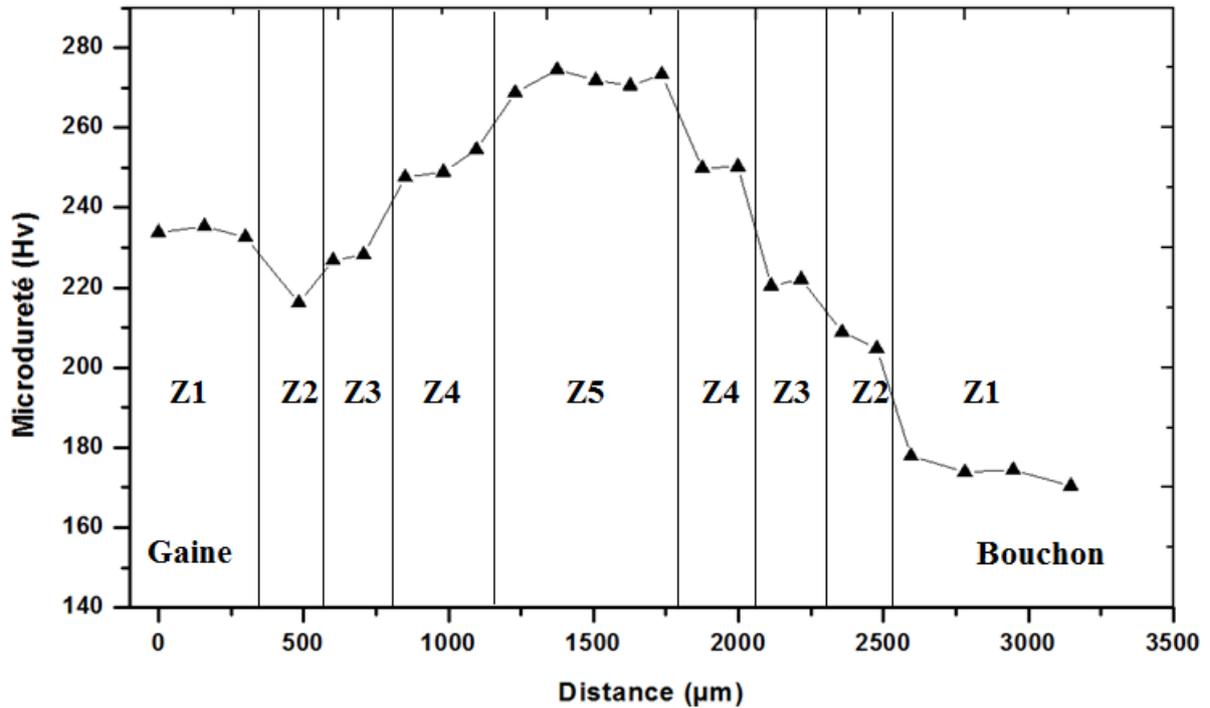


Figure -51: Profil de Microdureté obtenu sur le joint soudé par le procédé TIG.

- profil de microdureté pour procédé STR :

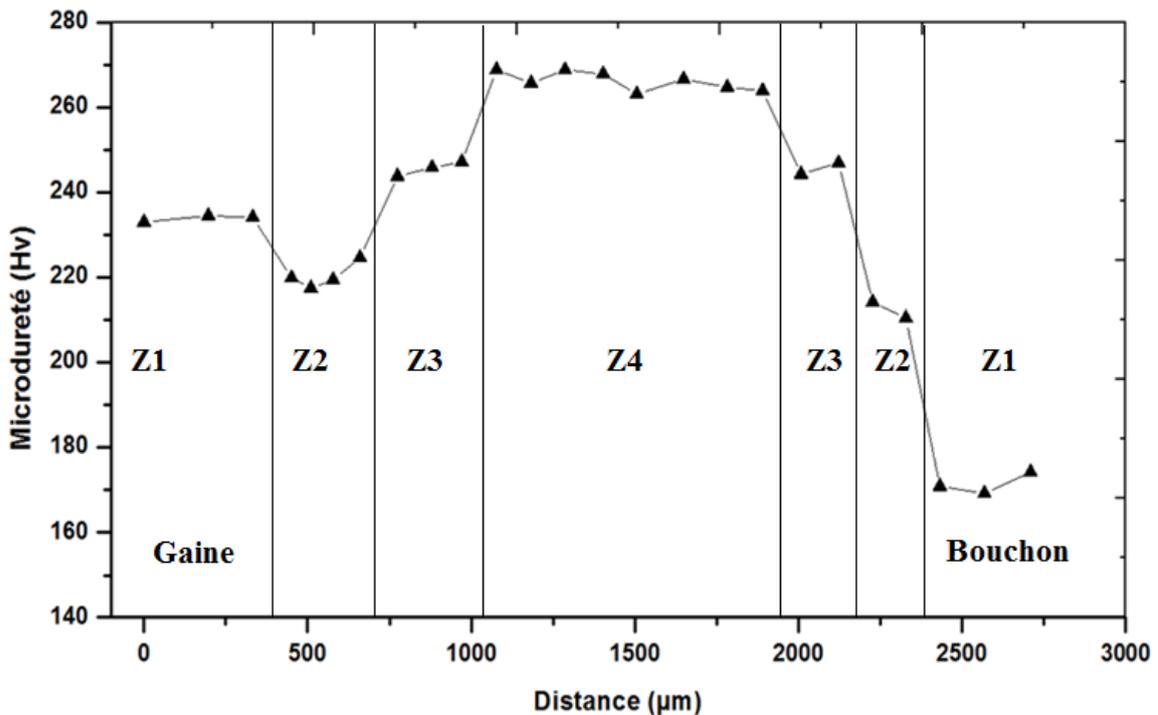


Figure -52: Profil de Micro dureté obtenu sur le joint soudé par le procédé STR.

Les résultats des microduretés effectuées sur l'ensemble des cordons soudés sont regroupés dans le tableau-14. Ces valeurs sont regroupées en neuf (09) intervalles équidistance pour le procédé TIG et sept (07) intervalles pour le procédé STR.

Intervalle de distance [ $\mu\text{m}$ ]		Microdureté Hv		La zone
TIG	STR	TIG	STR	
]0-299,99]	]0-332,09]	233,9	233,8	Z1:Métal de base de la gaine.
]299,99-484,01]	]332,09-660,13]	216,2	220,3	Z2:Zone recristallisée (gaine).
]484,01-707,51]	]660,13 -971,23]	227, 5	245, 5	Z3:Zone de transformation partielle (gaine).
]707,51-1096,21]	]971,23-1890,3]	250, 3	266,1	Z4:Zone de transformation complète
]1096,21-1735,93]		271,8		Z5 : Métal fondu.
]1735,93-1998,09]		250, 1		Z4:Zone de transformation complète.
]1998,09-2216,2]	]1890,3-2122,01]	221,3	245,6	Z3: Zone de transformation partielle (bouchon).
]2216,2-2476,89]	]2122,01-2327,47]	206,8	212,3	Z2 : Zone recristallisée (bouchon)
]2476,89-3146,55]	]2327,47-2708,88]	174,1	171,4	Z1 : métal de base du bouchon

**Tableau -14:** Les valeurs moyennes de microdureté mesurée dans différents zones.

### Zone 1 :

Les valeurs de microdureté rencontrée sur la gaine sont plus importantes que les valeurs de microdureté du bouchon ; en moyenne 233Hv sur la gaine et 174 Hv sur le bouchon. Cette écart s'explique par la différence du procédé de mise en forme (usinage pour le bouchon et laminage pour la gaine).

### Zone 2 :

On constate une diminution de la microdureté sur la gaine pour les deux procédés (en moyenne 216 Hv pour le procédé TIG et 220 Hv pour le procédé STR). En revanche la valeur de microdureté sur le bouchon augmente, (en moyenne 206 Hv pour le procédé TIG et 212 Hv pour le procédé STR). Ces observations sont dues au phénomène de recristallisation.

### Zone 3:

On observe une augmentation de la microdureté du bouchon(en moyenne 221Hv pour le procédé TIG et 245 Hv pour le procédé STR ), ainsi qu'une augmentation de la microdureté sur la gaine (en moyenne 227Hv pour le procédé TIG et 245 Hv pour le procédé STR ) cela s'explique par les transformation de phase partielle qui interviennent dans cette zone  $\alpha \rightarrow \beta$  et  $\beta \rightarrow \alpha$ . Il est à noter que la phase  $\beta$  est plus dure que la phase  $\alpha$ .

### Zone 4:

La microdureté augmente encore plus dans cette zone sur le bouchon et également sur la gaine pour les deux procédés (en moyenne 250 Hv pour le procédé TIG et 266 Hv pour le procédé STR). Cette augmentation est due à une transformation de phase complète  $\alpha \rightarrow \beta$ .

### Zone 5:

La microdureté atteint ses valeurs les plus élevées en moyenne 271 Hv, dans cette zone la structure « lamelles parallèles » est prédominante par rapport à la structure « panier tressé ». On peut en déduire que la structure « lamelles parallèles » est plus dure que la structure « panier tressé ».

Nous constatons également que les valeurs de la microdureté dans les zones 2, 3 et 4 du procédé STR sont supérieures à celles de leurs homologues du procédé TIG à cause de la force de forgeage qui intervient lors du procédé STR.

## Conclusion Générale

Ce travail présente l'étude de l'influence de différents paramètres de soudage sur la microstructure et le comportement mécanique de la jonction bouchon-tube soudée par les procédés de soudage TIG et STR.

Les deux procédés de soudage nécessitent l'établissement d'un programme de soudage bien déterminé et une grande précision dans le choix des valeurs des différents paramètres pour obtenir des soudures acceptables. Ces paramètres sont énumérés par l'intensité du courant et la vitesse de soudage pour le procédé TIG et par l'intensité du courant et le stick out pour le procédé STR. Par ailleurs, la propreté des pièces à souder ainsi que la précision des opérations d'usinage demeurent des étapes très importantes pour l'opération de soudage.

Les observations macrographiques des soudures réalisées par TIG et STR révèlent la formation de trois (03) zones: métal de base (MB), la zone affectée thermiquement (ZAT) et la Zone fondu (ZF). L'étendue de chaque zone dépend des paramètres de soudage appliqués.

L'exploration des macrographies des différentes zones formées a mis en évidence la formation des gros grains allongés pour les jonctions soudées par TIG ; cependant, les jonctions soudées par STR révèlent la formation des grains plus petits et équiaxes. Ces observations mettent en évidence que la zone fondue n'existe que dans le cas de soudage par le procédé TIG et absente dans le cas du procédé STR. Cette constatation nous permet de conclure que le soudage par TIG se fait à l'état liquide par contre le soudage par STR se fait à l'état pâteux.

La phase Zr- $\alpha$  du métal de base relative au bouchon se présente à gros grains comparativement à celle de la gaine qui est plus fine. Cette différence de structures mis en évidence des valeurs moyennes de microdureté de l'ordre de 170 Hv pour le bouchon et de 233 Hv pour la gaine. En effet, il existe une relation entre la microstructure des grains des différentes zones formées et les valeurs de microdureté obtenues. On enregistre dans la zone de transformation complète une phase unique (phase $\beta$ ) de structure lamellaire (structure de Widmanstätten). Cette dernière se présente sous deux formes (panier tressé et lamelles parallèles). Plus on se rapproche de la zone fondue, la structure est de forme « lamelles parallèles », et plus on se rapproche de la zone de transformation partielle on obtient une structure de forme « panier tressé ». Dans cette zone la valeur de microdureté moyenne mesurée est de 250 Hv pour le procédé TIG et 270 Hv pour le procédé STR.

En perspectives, il serait très intéressant de compléter cette étude par la réalisation des tests d'hydruration et de corrosion pour voir le comportement des cordons soudés vis-à-vis de l'hydrogène comme élément fragilisant ainsi son comportement sous l'effet de la corrosion à haute température. Par ailleurs des études plus pointues feront l'objet d'analyses par EDS et par DRX pour identifier la nature des phases formées, accompagnée par des mesures de microdureté pour estimer leurs propriétés mécaniques et leur comportement en réacteur.