

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**Faculté de Génie de la Construction**  
**Département de Génie Mécanique**



# Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master Académique en Génie Mécanique

Option : Génie Des Matériaux

## Thème :

---

**Effet de la déformation par ECAP sur le soudage de l'alliage  
d'aluminium 6063 par diffusion**

---

**Dirigé par :** Mr ZAZI Nacer ( Encadreur)

Mr HADJ ALI Youcef (Co-Encadreur)

**Réalisé par :** BEN AISSOU Samir

AMIAR Farid

**Membres de jury :**

Président	ILLOUL Cherif	MCB	à	UMMTO
Encadreur	ZAZI Nacer	Professeur	à	UMMTO
Co-Encadreur	HADJ ALI Youcef	MAB	à	UMMTO
Examineur	FILALI Said	MAA	à	UMMTO

2022/2023



# Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu le très miséricordieux qui a bien voulu nous donner la force et le courage d'effectuer le présent travail.

On exprime nos sincères gratitude et remerciements à notre encadreur **Pr ZAZI NACER** pour ses conseils précieux, son aide dans le cheminement de cette étude et pour la peine qu'il s'est donné tout au long de ce travail afin de faire de ce document ce qu'il représente.

Nos remerciements s'adressent aussi à notre Co-Encadreur Mr **HADJ ALI YUCEF** pour l'encadrement dont on a bénéficié, pour l'attention, la disponibilité dont il a fait preuve, ainsi que son suivi durant ce travail. Sans oublier Mme **Benabdeslam Djidjiga** doctorante à l'université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou pour son soutien moral et ses précieux conseils.

Nous voudrions ensuite remercier tous les membres du jury, qui nous ont fait l'honneur d'examiner attentivement notre travail.

On remercie également Mr **OUADADA KAMEL**, ingénieur à l'entreprise Algal plus pour son aide et ses précieux conseils.

On tient à remercier également les membres du laboratoire SDM, RDM et Génie Civil (UMMTO), pour leurs disponibilités et leurs gentillesse.

Nous sommes également reconnaissants aux personnels qui travaillent au hall technologique d'Oued Aissi.

Nos remerciements s'adressent également à tous ceux qui ont contribué de près et de loin.

# Dédicace

Je dédie ce travail :

- ✓ À la mémoire de **mon père** qui de son vivant, a toujours et tellement investi pour me voir réussir, il est maintenant très heureux - là où il est.
- ✓ À ma très chère **maman**  
<<Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.>>
- ✓ À mes chers frères **Salah, Salim et Nabil**  
<< Pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui en plus de m'avoir encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici car ils ont toujours cru en moi, merci pour tous les bons moments passés ensemble. >>
- ✓ À ma très chère sœur **Cylia** et son mari **Aghilasse**.
- ✓ À mes chers cousins, **Amara, Farid, Boualem** et surtout **Saadi**.
- ✓ À mon cher oncle paternel **Hacène** qui a toujours été là pour moi.
- ✓ À tous les enfants de la famille **Azzedine, Mohand, Amel, Nouara, Dyhia, Melissa** et **Sabrina**,
- ✓ Sans oublier mon binôme **Farid** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

**Et à tous ceux qui me sont chers.**

**Ben aissou Samir**

# Dédicace

- ✓ À la mémoire de mon défunt père **AMIAR ABERKANE** ;
- ✓ Ma mère qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde ;
  - ✓ À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants ;
- ✓ À ma grand-mère, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie ;
- ✓ À tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.
- ✓ Sans oublier mon binôme **Samir** pour son soutien moral, sa Patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

**Et à tous ceux qui me sont chers.**

**Amiar Farid**

# Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Listes des symboles

**Introduction générale ..... 1**

**Chapitre I : L'aluminium et ses alliages. .... 3**

I.1 Aluminium : ..... 3

I.2 l'historique de l'aluminium : ..... 3

I.3 Production de l'aluminium : ..... 3

I.3.1 la source de l'aluminium : ..... 3

I.3.2 les procédés de traitement de la bauxite : ..... 4

I.4 Propriétés de l'aluminium pur : ..... 5

I.4.1 propriétés physiques : ..... 5

I.4.2 propriétés chimiques : ..... 5

I.4.3 Propriétés mécanique : ..... 6

I.5 Les alliages d'aluminium : ..... 7

I.6 Désignation des alliages d'aluminium : ..... 8

I.6.1 Désignation AFNOR : ..... 8

I.6.2 Désignation numérique : ..... 8

I.7 Classification des alliages d'aluminium : ..... 9

I.7.1 Alliages à durcissement structural : ..... 9

I.7.2 Alliages sans durcissement structural : ..... 10

I.8 Effet des éléments d'addition dans les alliages d'aluminium : ..... 11

I.9 Traitements thermiques : ..... 12

I.9.1 Traitements d'homogénéisation : ..... 12

I.9.2 Traitements d'adoucissement : ..... 13

I.9.3 Traitements de trempe structural : ..... 14

I.10 Application de l'aluminium et ses alliages : ..... 14

**Chapitre II : La déformation plastique sévère par ECAP : ..... 18**

II.1 Introduction : ..... 18

II.2 Les matériaux à grains ultra fins : ..... 18

II.3 Les mécanismes de la déformation plastique : ..... 19

II.3.1 La déformation par glissement :.....	20
II.3.2 Déformation par maclage :.....	20
II.3.3 Restauration et recristallisation dynamiques :.....	21
II.4 Les principaux techniques de déformation plastique sévère :.....	22
II.4.1 Technique HPT : .....	23
II.4.2 Technique ARB :.....	24
II.4.3 La déformation plastique sévère par ECAP :.....	24
II.4.4 La microstructure des matériaux produits par ECAP :.....	32
II.4.5 Les avantages de la technique ECAP :.....	33
II.4.6 Domaines d'utilisation des matériaux obtenue par ECAP :.....	33
<b>Chapitre III : Corrosion de l'aluminium et ses alliages :.....</b>	<b>37</b>
III.1 Introduction : .....	37
III.2 Diagrammes d'équilibre électrochimique de Pourbaix :.....	37
III.3 les principaux types de corrosion : .....	39
III.3.1 Corrosion généralisée (uniforme) :.....	39
III.3.2 corrosion localisée : .....	39
III. 4 facteurs influençant la corrosion de l'aluminium :.....	45
III.4.2 Teneur en oxygène :.....	45
III.4.3 Température : .....	45
III.4.4 Le potentiel hydrogène (pH) :.....	47
III.5 Influence des éléments d'addition sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages :....	47
III.6 Influence des impuretés sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages :.....	50
III.7 Caractérisation de la corrosion :.....	50
III.7.1 La chrono potentiométrie (mesure du potentiel de la corrosion libre) :.....	50
III.7.2 Test de polarisation :.....	50
III.7.3 Test d'impédances électrochimiques :.....	51
III.7.4 Test gravimétrique : .....	52
III.7.5 Tests climatiques :.....	53
III.8 Lutte contre la corrosion :.....	54
III.8.1 la protection par revêtement métallique ou organique :.....	54
III.8.2 La protection cathodique :.....	54
III.8.3 La protection anodique : .....	54
III.8.4 La protection par l'utilisation d'inhibiteur :.....	54
<b>Chapitre IV : généralités sur le soudage.....</b>	<b>56</b>
IV.1 Introduction :.....	56

VI.2 Soudabilité des alliages d'aluminium : .....	56
VI.2.1 Définition de la soudabilité : .....	56
VI.2.2 La soudabilité dans le cas des alliages d'aluminium : .....	57
IV.3 Procédés de soudage : .....	57
IV.3.1 Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique : .....	58
IV.3.1.1 Le soudage à la flamme : .....	58
IV.3.2 Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique : .....	60
IV.3.3 Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage : .....	64
IV.3.4 Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique : .....	65
IV.4 Effet des paramètres de soudage : .....	68
IV.4.1 Zone fondue ou (métal fondu) : .....	68
IV.4.2 La zone de liaison (ZL) : .....	69
IV.4.3 Zone affectée thermiquement (ZAT) : .....	69
IV.4.4 Le métal de base (MB) : .....	69
IV.5 La métallurgie de soudage de l'aluminium : .....	69
IV.5.1 Cas du soudage avec métal d'apport : .....	69
IV.5.2 Cas du soudage sans métal d'apport : .....	70
IV.6 Défauts de soudage dans l'aluminium : .....	70
IV.6.1 Porosités localisées : .....	71
IV.6.2 Porosités alignées : .....	71
IV.6.3 Porosités uniformément réparties : .....	71
<b>Chapitre V : Techniques expérimentales .....</b>	<b>74</b>
V.1 Le matériau étudié : .....	74
V.2 Présentation de la technique ECAP : .....	75
V.3 Réalisation de la matrice, du canal et poinçon : .....	75
V.3.1 La matrice et le canal : .....	77
V.3.2 Poinçon de pression : .....	78
V.4 La presse de manipulation : .....	78
V.5 Protocol de l'ECAP : .....	80
V.6 Les problèmes rencontrés durant les expériences : .....	80
V.7 Préparation des échantillons pour l'observation microscopique, le test de dureté et le test de corrosion : .....	81
V.7.1 Découpage des échantillons : .....	81
V.7.2 Enrobage des échantillons : .....	81
V.7.3 Polissage des échantillons : .....	83

V.7.4 L'attaque chimique : .....	83
V. 8 Soudage des échantillons :.....	84
V.8.1 Mécanisme de serrage :.....	84
V.8.2 Paramètres de soudage :.....	84
V.8.3 Conditions de soudage :.....	85
V.9 Traitements thermiques : .....	86
V.9.1 Recuit : .....	86
V.10 Caractérisation électrochimique : .....	86
V.10.1 Potentiel libre de corrosion : .....	86
V.10.2 Teste de polarisation : .....	88
V.11 Caractérisation microstructurale :.....	89
V.11.1 Observation au microscope optique :.....	89
V.12 Caractérisation mécanique :.....	90
V.12.1 Essai de dureté VICKERS : .....	90
<b>Chapitre VI : résultats et interprétation.....</b>	<b>92</b>
VI.1 Caractérisation microstructurale :.....	92
VI.1.1 évolution de la microstructure des échantillons avant soudage :.....	92
VI.1.2 Caractérisation des échantillons après soudage :.....	100
VI.2 Caractérisation mécanique : .....	104
VI.2.1 Dureté Vickers :.....	104
VI.3.1 Evolution du potentiel libre de corrosion durant 1 heure (OCP) :.....	108
VI.3.2 Evolution du potentiel libre de corrosion durant 6 jours (OCP) :.....	108
IV.3.3 courbes de polarisation après 1heures et 6 jours d'immersion dans la solution de 0.3% en masse de NaCl : .....	109
VI.4 Détermination du potentiel de corrosion et de la résistance de polarisation sur les différentes courbes de polarisation : .....	110
VI.4.1 Potentiel de corrosion : .....	110
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>111</b>

## Liste des figures :

<b>Figure I.1</b> : l'aluminium non allié et sa structure CFC.....	3
<b>Figure I.2</b> : les étapes de fabrication de l'aluminium [4]. .....	4
<b>Figure I.3</b> : Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural [8]. .....	10
<b>Figure I.4</b> : les applications de l'aluminium et ses alliages.....	16
<b>Figure II.1</b> : Grains et joints de grains. [3].....	19
<b>Figure II.2</b> : Schéma de déformation par maclage. ....	21
<b>Figure II.3</b> : Représentation schématique de : a) état déformé, b) état restauré, c) état partiellement recristallisé, d) état complètement recristallisé, e) croissance normale des grains et f) croissance anormale des grains. [5] .....	22
<b>Figure II.4</b> : Représentation schématique du procédé de torsion sous pression intense (High Pressure Torsion – HPT). .....	23
<b>Figure II.5</b> : Protocole d'un cycle de la technique du laminage accumulé (ARB). .....	24
<b>Figure II.6</b> : (a) Schéma ECAP, (b) Différentes routes de déformation ECAP. ....	25
<b>Figure II.7</b> : principe de la technique ECAP.....	26
<b>Figure II.8</b> : les quatre routes fondamentales de L'ECAP. ....	27
<b>Figure II.9</b> : Section d'une matrice ECAP montrant les deux angles $\emptyset$ et $\Psi$ . ....	28
<b>Figure II.10</b> : Illustration schématique des matrices utilisées pour évaluer l'influence de l'angle $\Phi$ [10]. .....	29
<b>Figure II.11</b> : Taille du grain après l'ECAP par rapport à la température de pression pour les alliages Al et Al-3 %Mg et Al-3 %Mg-0,2 %SC purs [13]. ....	31
<b>Figure II.12</b> : Principe d'application ECAP avec une contre pression. ....	32
<b>Figure II.13</b> : aspect macroscopique dans les plans X, Y et Z, de l'aluminium après ECAP en une passe. [17].....	32
<b>Figure II.14</b> : Implants médicaux nanostructurés par ECAP [19].....	34
<b>Figure III.1</b> : Diagramme d'équilibre potentiel (en $V=ENH$ ) - pH du système aluminium-eau à 25°C [3]. .....	37
<b>Figure III.1</b> : Mécanisme de corrosion par piqure [6].....	40
<b>Figure III.2</b> : Mécanisme de corrosion caverneuse [6]. .....	40
<b>Figure III.3</b> : Principe de la corrosion galvanique [6].....	41
<b>Figure III.4</b> : Phénomène de la corrosion érosion [7]. .....	42
<b>Figure III.5</b> : corrosion transcristalline et intercristalline [9].....	43

<b>Figure III.6:</b> Corrosion feuilletante [11].	44
<b>Figure III.7:</b> Corrosion à la ligne d'eau.	44
<b>Figure III.8 :</b> Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium [13].	48
<b>Figure III.9 :</b> Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées dans ces alliages	48
<b>Figure III.10 :</b> Détermination des paramètres électrochimiques a partir des droites de Tafel [16].	51
<b>Figure III.11 :</b> Exemple de diagrammes de Nyquist pour les mesures de corrosion [17].	52
<b>Figure IV.1 :</b> Soudage oxyacétylénique [4].	59
<b>Figure IV.2 :</b> Soudage par point [4].	61
<b>Figure IV.3 :</b> Soudage à la molette [5].	62
<b>Figure IV.4 :</b> Soudage par bossage [6].	63
<b>Figure IV.5 :</b> Soudage en bout par étincelage [7].	64
<b>Figure IV.6 :</b> Soudage par explosion [9].	65
<b>Figure IV.7 :</b> Soudage par friction en rotation [11].	65
<b>Figure IV.8 :</b> Schéma de principe de soudage par diffusion [12].	66
<b>Figure IV.9 :</b> Représentation schématique des différents stades du soudage par diffusion d'un assemblage homogène [13].	67
<b>Figure IV.10 :</b> Porosité.	70
<b>Figure V.1 :</b> Spectromètre à émission optique.	74
<b>Figure V.2:</b> Schéma de la matrice ECAP sur SolidWorks.	75
<b>Figure V.3 :</b> Schéma du canal.	76
<b>Figure V.4 :</b> Schéma du poinçon sur SolidWorks.	76
<b>Figure V.5 :</b> Assemblage poinçon- matrice.	77
<b>Figure V.6 :</b> Plan de coup et dimension de la filière.	77
<b>Figure V.7 :</b> Plan de coup et dimension de poinçon.	78
<b>Figure V.8 :</b> La presse.	79
<b>Figure V.9 :</b> Partie fonctionnelle de la presse.	79
<b>Figure V.10 :</b> La partie de manipulation commande de la presse.	79
<b>Figure V.11:</b> Les éprouvettes et la graisse utilisé.	80
<b>Figure V.12:</b> Découpage des éprouvettes à l'aide d'une scie à métaux.	81
<b>Figure V.12 :</b> Procédure de d'enrobage des échantillons.	82
<b>Figure V.13 :</b> Les échantillons après enrobage.	82

<b>Figure V.14:</b> La machine utilisé pour le polissage des échantillons. ....	83
<b>Figure V.15:</b> Dispositif de soudage par contact. ....	84
<b>Figure V.16 :</b> Fourre électrique--- <b>Figure V.17 :</b> presse hydraulique .....	85
<b>Figure V.18 :</b> Le schéma et le matériel utilisé pour l'OCP. ....	87
<b>Figure V.19 :</b> Fourbe de potentiel libre de corrosion pour un matériau dans différents milieux (électrolyte). ....	87
<b>Figure V.20 :</b> Dispositif expérimental des tests de polarisation.....	88
<b>Figure V.21 :</b> Microscope optique.....	89
<b>Figure V.22:</b> Principe déroulement d'un essai de dureté. ....	90
<b>Figure V.23 :</b> Duromètre. ....	91
<b>Figure VI.1 :</b> Figure VI.1 : Microstructures des échantillons non déformés : A) –Sans immersion, B) – Après une heure d'immersion, C) –Avec polarisation après une heure d'immersion, D) –Après 6 jours d'immersion, E) –Avec polarisation après 6 jours d'immersion. ....	94
<b>Figure VI.2 :</b> Microstructures des échantillons déformés : A) – Sans immersion, B) –Après une heure d'immersion, C) –Avec polarisation après une heure d'immersion, D) –Après 6 jours d'immersion, E) –Avec polarisation après 6 jours d'immersion .....	96
<b>Figure VI.3 :</b> Microstructures des échantillons non déformés recuit à 600°C avec un temps de maintien de 2 heures : A) -Sans immersion, B) - Après une heure d'immersion C)- Avec polarisation après une heure d'immersion, D)-Après 6 jours d'immersion, E)- Avec polarisation après 6 jours d'immersion. ....	98
<b>Figure VI.4 :</b> Microstructures des échantillons déformés recuit : Microstructures des échantillons déformés recuit à 600°C avec un temps de maintien de 2 heures : A)- Sans immersion, B)- Après une heure d'immersion, C)- Avec polarisation après une heure d'immersion, D)-Après 6 jours d'immersion, E)- Avec polarisation après 6 Jours d'immersion. ....	100
<b>Figure VI.5 :</b> Microstructures des échantillons non déformés soudés : A)- Sans immersion, B)- Après une heure d'immersion, C)- Avec polarisation après une heure d'immersion, D)-Après 6 jours d'immersion, E)- Avec polarisation après 6 Jours d'immersion.....	102
<b>Figure VI.6 :</b> Microstructures des échantillons déformés soudés : A)- Sans immersion, B)- Après une heure d'immersion, C)- Avec polarisation après une heure d'immersion, D)-Après 6 jours d'immersion, E)- Avec polarisation après 6 Jours d'immersion.....	104
<b>Figure VI.7 :</b> Histogramme de dureté Vickers des échantillons (non déformé, déformé, soudé déformé, soudé non déformé, non déformé et déformé après recuit).....	105
<b>Figure VI.8 :</b> Courbes de corrosion libre (OCP) des différents échantillons pendant une heure d'immersion dans la solution de 0,3% en masse de NaCl. ....	108
<b>Figure VI.9 :</b> Courbes de corrosion libre (OCP) des différents échantillons pendant 6 jours d'immersion dans la solution de 0,3% en masse de NaCl. ....	108

**FigureVI.10** : Courbes de polarisation, après 1h d'immersion et après 6 jours dans une solution de 0.3% de NaCl,  $i=f(E)$  de tous les échantillons..... 109

## Liste des tableaux :

<b>Tableau I.1:</b> Propriétés physiques [5].	5
<b>Tableau I.2 :</b> Propriétés chimiques.	6
<b>Tableau I.3 :</b> Propriétés mécanique de l'aluminium.	7
<b>Tableau I.4 :</b> Désignation des séries principales des alliages d'aluminium [7].	9
<b>Tableau II.1 :</b> Systèmes de glissement des différentes structures pour les hexagonaux B : basal, PR : prismatique, PY : pyramidal. [4].	20
<b>Tableau III.1</b> Température et formes de corrosion de l'aluminium [13].	46
<b>Tableau III.2 :</b> Classement des séries alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la Corrosion, formes de corrosion généralement observées dans ces alliages [13].	49
<b>Tableau IV.1 :</b> La numérotation des procédés de soudage pour la représentation symbolique des dessins est conforme à la norme ISO 4063 [16].	68
<b>Tableau VI.1 :</b> Composition chimique de l'alliage étudié.	74
<b>Tableau V.2 :</b> Les paramètres de soudage.	85
<b>Tableau : V.1 :</b> Effet de la déformation, du recuit et eu soudage sur la dureté Vickers	104
<b>Tableau VI.2 :</b> Dureté Vickers des échantillons non déformé.	106
<b>Tableau VI.3 :</b> Dureté Vickers des échantillons déformé.	106
<b>Tableau VI.4 :</b> Dureté Vickers de l'échantillon déformé soudé.	106
<b>Tableau VI.5 :</b> Dureté Vickers de l'échantillons non déformé soudé.	107
<b>Tableau VI.6 :</b> Dureté Vickers de l'échantillons non déformé recuit.	107
<b>Tableau VI.7 :</b> Dureté Vickers de l'échantillons déformé recuit.	107
<b>Tableau VI.8 :</b> Potentiel de corrosion après 1 heure et après 6 jours de tous les échantillons.	110
<b>Tableau VI.9 :</b> La résistance à la polarisation des éprouvettes (non déformés, déformés, soudés, éprouvettes recuit).	110

## **Listes des symboles :**

**CFC : Cubique à faces centrées**

**$\Phi$  : L'angle d'intersection du canal**

**A : Ampèremètre**

**V : Voltmètre**

**HV : dureté Vickers**

**F : d'essai**

**d : Diagonale (moyenne de d1 et d2) de l'empreinte en mm**

**OCP : Potentiel du circuit ouvert (potentiel de corrosion libre)**

**Log(i) : logarithme du courant**

**$E_{\text{corr}}$  : Potentiel**

**$R_p$  : La résistance de polarisation**

**$\Psi$  : L'angle de courbure**

**$\lambda$  : La conductivité thermique**

**$\rho$  : Résistivité électrique**

**E : module de Young**

**I : Densité de courant**

**ECAP : equal channel angular pressing**



# Introduction générale

## Introduction générale

L'aluminium et ses alliages ont des propriétés physico-chimiques et mécanique intéressantes et sont utilisés dans plusieurs domaines industriels : automobile, aéronautique, marine, transmission et conversion d'énergie électrique, protection solaire, emballage pharmaceutique et alimentaire.

Les propriétés physico-chimiques des matériaux dépendent de plusieurs paramètres, tels que les éléments ajoutés, la taille des grains, les taux de défauts nuls, uni, bi et tridimensionnels et leur distribution. L'obtention d'un aluminium à grain fin améliore ses propriétés mécaniques et modifie sa susceptibilité à la corrosion.

Les matériaux à grain ultrafin représentent une nouvelle génération de matériaux avancés avec une attrait technologique unique. Aujourd'hui, il existe plus de 30 procédés de fabrication différents pour les matériaux nano-structurés, dont certains incluent des méthodes basées sur la déformation plastique sévère (SPD). L'ECAP (Equal-channel angular pressing) est l'une d'entre elles et est l'une des techniques les plus couramment utilisées et les plus prometteuses pour l'élaboration des métaux à grains ultrafins aujourd'hui.

Dans ce contexte, nous avons étudié, l'effet de la déformation ECAP sur le procédé de soudage, et l'évolution des propriétés mécaniques et physicochimiques, ainsi que l'évolution de la microstructure de notre alliage.

Ce projet est constitué de trois parties :

- 1- Synthèse bibliographique ;
- 2- Techniques expérimentales ;
- 3- Résultats et discussion

Et se termine par une conclusion

**La première partie** : est constituée de quatre chapitres

- Le premier chapitre présente l'aluminium et ses alliages, les différentes caractéristiques (chimique, mécanique et physicochimique), et les différentes désignations des alliages d'aluminium.

- Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de la déformation plastique sévère, ainsi que les techniques d'obtention d'une déformation plastique sévère, et plus précisément la technique ECAP (Equal-channel angular pressing).
- Le troisième chapitre présente le phénomène de corrosion des métaux en général et de l'aluminium et ses alliages en particulier, ainsi que les différentes formes de corrosion.
- Le quatrième chapitre est consacré pour le soudage en présentant, le principe et les différents procédés.

**La deuxième partie :** A été réservée pour la présentation du matériau étudié, et les différentes techniques de caractérisations.

**La troisième partie :** Présente les résultats obtenus et leurs interprétations et discussion.

# Chapitre I

## Chapitre I : L'aluminium et ses alliages.

### I.1 Aluminium :

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13, il a une structure cristalline cubique à face centrée (CFC), de couleur argentée et il appartient qu'à la famille des métaux pauvres. C'est le troisième élément le plus présent sur terre après l'oxygène et le silicium.

L'aluminium est le second métal le plus utilisé en industrie après le fer et ses alliages, sa production industrielle n'a commencé qu'au début de 20<sup>ème</sup> èmesiècle.

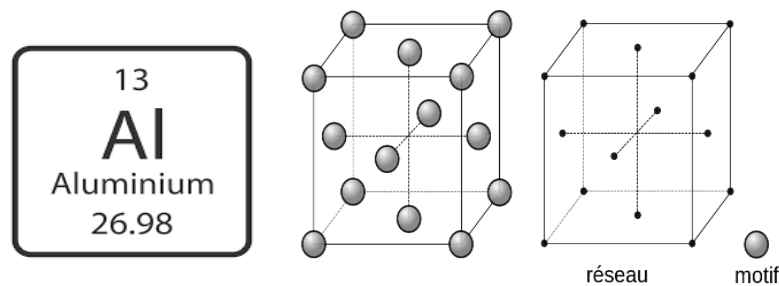


Figure I.1 : L'aluminium non allié et sa structure CFC.

### I.2 P'historique de l'aluminium :

Au milieu de XXI siècle, grâce aux progrès de la chimie, de nouveau métaux sont découverts, dont l'aluminium, il a été nommé d'après l'alun appelé "alumen" en latin. Le nom a été octroyé par le chimiste britannique Humphrey Davy en 1808. [1]

En 1888, l'autrichien Karl Josef Bayer crée un procédé d'extraction de l'alumine à partir du minerai de bauxite par dissolution dans de l'hydroxyde de sodium. La poudre d'oxyde d'aluminium ainsi recueillie les unités d'électrolyse, pour réduire l'alumine en aluminium primaire. [2]

### I.3 Production de l'aluminium :

#### I.3.1 la source de l'aluminium :

L'aluminium est obtenu généralement à partir du minerai de bauxite. Ce minerai est utilisé a plus de 90% pour obtenir l'aluminium, elle se présente sous la forme de poussière de roches ou de granulés d'argile et peut être de couleur blanc cassé, rouge, marron, jaune ou gris. La bauxite contient 45 à 60 % d'oxyde d'aluminium ( $Al_2O_3$ ), c'est ce qu'on appelle l'alumine. Les différentes forme et couleurs de la bauxite sont dues à la présence d'autre constituants, notamment : [3]

- Oxyde de fer (bauxite rouge) ;
- Oxyde de silicium (bauxite blanche) ;
- Oxyde de titane.

### I.3.2 les procédés de traitement de la bauxite :

Pour extraire l'alumine de la bauxite, le procédé le plus utilisé est celui de Bayer, il repose sur 5 étapes : broyage de la bauxite, l'attaque par une solution de soude, décantation et le lavage des boues, cristallisation de l'hydrate et calcination.

- **Broyage** : la bauxite est broyée en fines particules pour faciliter l'extraction.
- **Attaque** : la bauxite est mélangée avec de la soude et de la chaux dans des réacteurs à haute températures et à haute pression.
- **Décantation** : on sépare la phase liquide, riche en aluminium, de la phase solide dans des clarificateurs. Les résidus sont lavés plusieurs fois et forment les "boues rouges". Leur couleur est due à leur forte concentration en oxyde de fer.
- **Cristallisation de l'hydrate** : la liqueur est refroidie et diluée pour faire précipiter l'aluminium sous forme d'hydrate d'alumine ( $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ ).
- **Calcination de l'hydrate** : l'alumine chauffée à plus de 1000 °C pour la déshydratée.

La figure I.2 résume les étapes principales pour l'obtention de l'aluminium :

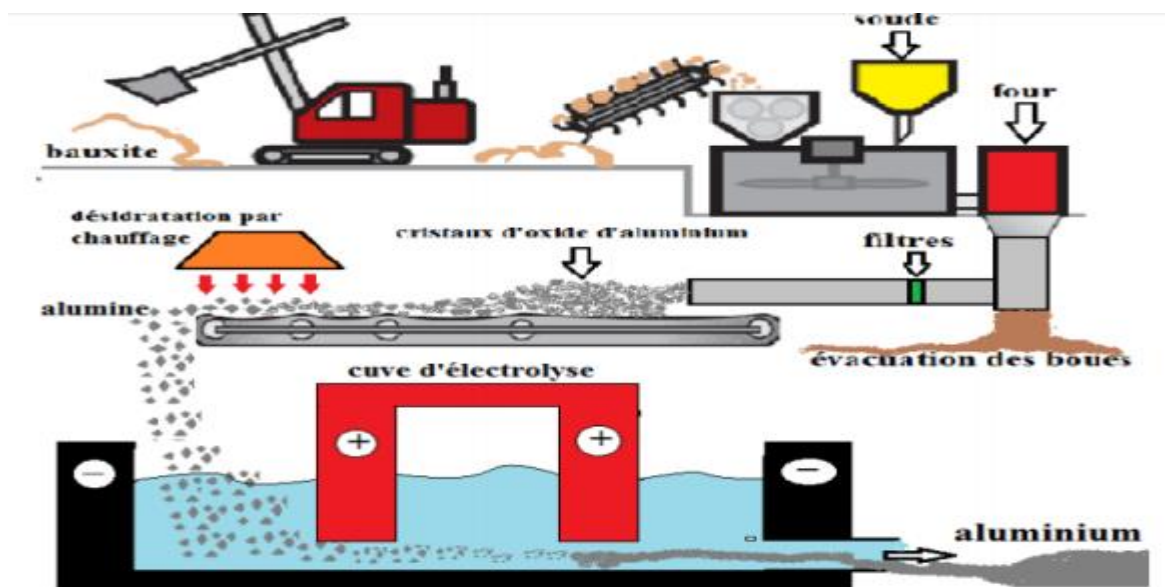


Figure I.2 : Les étapes de fabrication de l'aluminium [4].

## I.4 Propriétés de l'aluminium pur :

### I.4.1 propriétés physiques :

Les propriétés physiques les plus importantes de l'aluminium non alliés sont résumées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I.1 Propriétés physiques [5].**

N°	Propriétés	Valeurs
1	Structure cristalline	CFC
2	Numéro atomique	13
3	Masse volumique	$2698 \text{ Kg.m}^{-3}$
4	Point de fusion	$660.45^\circ\text{C}$
5	Point d'ébullition	$2056^\circ\text{C}$
6	Pression de vapeur	$3.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
7	Capacité thermique massique	$879 \text{ J.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
8	Energie interne massique	$3.98.10^5 \text{ J Kg}^{-1}$
9	Résistance électrique	$26.544.10^{-9} \Omega\text{m}$
10	Conductivité thermique	$237 \text{ wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$

### I.4.2 propriétés chimiques :

La chimie est la réaction de substances avec d'autres substances. Autrement dit, les substances réagissent avec différentes substances ou changent d'une substance à l'autre.

Dans les cas standard, les substances chimiques sont plus facilement identifiées à un moment donné d'une réaction chimique. La réaction d'une substance peut être un changement dû à la combustion, à la rouille, au chauffage, à l'explosion, au changement de couleur, etc. Voici les propriétés chimiques de l'aluminium :

**Tableau I.2 : Propriétés chimiques.**

Propriétés	La description
Oxydation	En général, les métaux d'aluminium ne réagissent pas à l'air car leur surface recouvre une fine couche d'oxydes, qui aident à protéger le métal de l'érosion par l'air. Cependant, si la couche d'oxyde est endommagée et que l'aluminium métallique est exposé, il réagira à nouveau pour former un oxyde amphotère.
Réaction avec l'acide	L'aluminium réagit facilement avec l'acide inorganique pour former une solution contenant des ions aluminium hydratés tandis que l'hydrogène est libéré. Dans le cas de la réaction avec l'acide nitrique, il réagit passivement en formant une couche d'oxyde protectrice à la surface de l'alumine.
Réaction avec l'alcali	L'aluminium réagit à la base pour former un aluminate tout en libérant de l'hydrogène
Réaction avec l'eau	Réactif à l'eau chaude.
Composé	L'aluminium, l'oxygène et d'autres éléments de mélanges produisent des mines d'aluminium, la mine d'aluminium est la principale source d'aluminium.
Alliage	Lorsqu'il est combiné avec des éléments tels que le cuivre, le silicium ou le magnésium, il formera des alliages à haute résistance.

**I.4.3 Propriétés mécanique :**

Elles concernent la déformation d'un matériau soumis à une force, les principales sont :

- La résistance : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre
- La dureté : résistance d'un matériau à la pénétration
- La ductilité : capacité du matériau à se déformer de manière irréversible avant de rompre
- La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules (module de rigidité par exemple : module d'Young)
- La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture (la résilience).

On trouve dans le tableau ci-dessous les différentes propriétés :

**Tableau I.3 : Propriétés mécaniques de l'aluminium.**

Allongement à la rupture	Module d'élasticité (Young) E	Coefficient de poisson	Capacité Calorique volumique	Limite élastique à la traction Re	Module de torsion	Limite de résistance à la rupture Rm
%	(MPa)	(Sans Dim)	(MJ /m 3°K)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
20 à 30	67000	0.34	2.39	30	27000	60 à 125

Sa faible dureté et sa faible limite élastique sont défavorables pour son emploi en mécanique, c'est pour cela que l'élaboration des alliages d'aluminium sont nécessaire afin d'améliorer ces caractéristiques qui convient à son utilisation en mécanique.

### **I.5 Les alliages d'aluminium :**

Les propriétés de l'aluminium non allié sont médiocres et pour l'amélioration, des éléments qui forment des solutions solides et/ou des précipités seront ajoutés, qui entraînent à des compositions d'alliages industriels de plus en plus complexes, seuls neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium parce qu'ils ont une solubilité dans l'aluminium à l'état solide supérieure à 0,5 %. Ce sont : l'argent, le cuivre, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Pour diverses raisons de coût (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficultés de mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, sur uniquement cinq éléments d'alliage qui sont : le cuivre ; le manganèse ; le magnésium ; le silicium ; le zinc.

## **I.6 Désignation des alliages d'aluminium :**

### **I.6.1 Désignation AFNOR :**

La désignation AFNOR est constituée de deux parties :

1/ La première comporte la lettre A suivie éventuellement du chiffre représentant le titre par exemple A5.

2/ La deuxième est formée d'un groupe de lettres symbolisant les éléments d'addition, rangés par ordre de teneur.

Un chiffre placé dans le groupe des lettres précises la teneur de l'élément symbolisé par des lettres dont les principales lettres utilisées sont : Cuivre(U), Manganèse (M), Magnésium (G), Zinc (Z), Nickel (N), Silicium (S) et Titane (T) [6].

### **I.6.2 Désignation numérique :**

Conformément aux directives de l'aluminium association (Washington DC, USA), les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres. [4] Le premier chiffre de 1 à 8 indique la famille d'alliages, Il est déterminé par l'élément principal de l'alliage. Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial, Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage. Les deux derniers chiffres sont des numéros d'ordre et servent à identifier l'alliage. La seule exception est la série 1000, dont ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium (i.e. 1050 = 99,5 % Al, 1070 = 99,7 % Al, 1100 = 99 % Al). Ces désignations on les trouves dans le tableau 1.4 ci-dessous :

**Tableau I.4 : Désignation des séries principales des alliages d'aluminium [7].**

Série	Désignation	Elément d'alliage principale	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al <sub>2</sub> Cu-Al <sub>2</sub> CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al <sub>6</sub> Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg <sub>2</sub> Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn <sub>2</sub>
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	9XXX	Non utilisé	-

## I.7 Classification des alliages d'aluminium :

On peut classer les alliages d'aluminium en deux grandes familles :

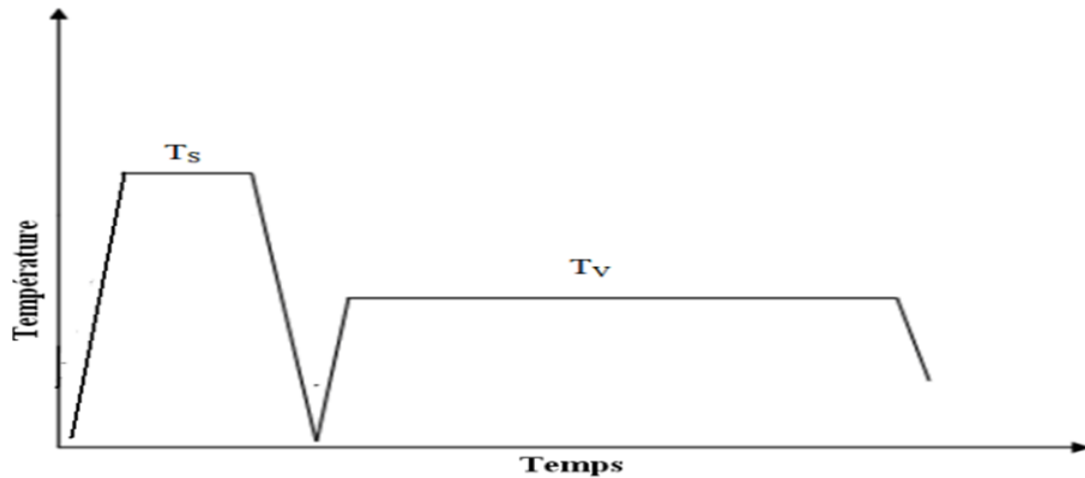
- Alliages à durcissement structural (alliages trempant)
- Alliages à durcissement par écrouissage ou à durcissement par addition d'éléments d'alliages, et sans durcissement structural (alliages non trempant).

### I.7.1 Alliages à durcissement structural :

C'est l'un des processus le plus utilisé dans la métallurgie des alliages d'aluminium qui permet d'obtenir des niveaux élevés de la résistance mécanique. Ce durcissement structural est obtenu par un processus comportant :

- La mise en solution des éléments durcissant (chauffage de mise en solution).
- La trempe, c'est-à-dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- Maturation (à la température ambiante) ou vieillissement à une température (inférieure ou égale à 300°C), afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

Les principales familles d'alliages à durcissement structural sont : Al-Cu (série 2000), Al-Mg-Si (série 6000), et Al-Zn-Mg (série 7000). La figure I.3 représente le diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural.



**Figure I.3 : Diagramme typique de température de traitement en fonction du temps pour un traitement de durcissement structural [8].**

$T_s$  : La température minimale de mise en solution.

$T_v$  : La température de maturation ou du revenu (vieillissement) (allant de 20°C à 300°C).

### **I.7.2 Alliages sans durcissement structural :**

Différents mécanismes de durcissement interviennent dans ces alliages pour moduler les propriétés mécaniques tels que :

-Le durcissement par écrouissage, tels que la déformation par laminage, l'étirage, le tréfilage, permet d'accroître la limite élastique au détriment de l'allongement. La restauration des propriétés initiales des alliages peut être obtenue suite aux traitements thermique appropriés.

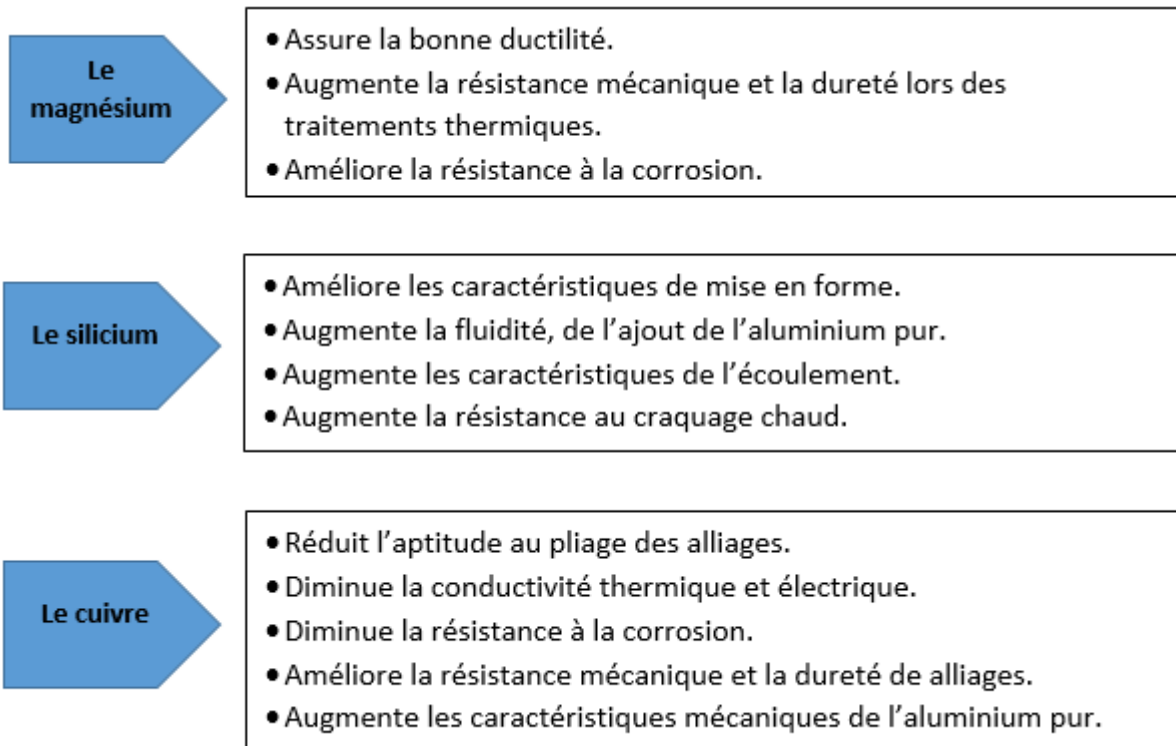
-Le durcissement par addition en solution : la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la déformation et confère à l'alliage des propriétés des résistances mécaniques. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage.

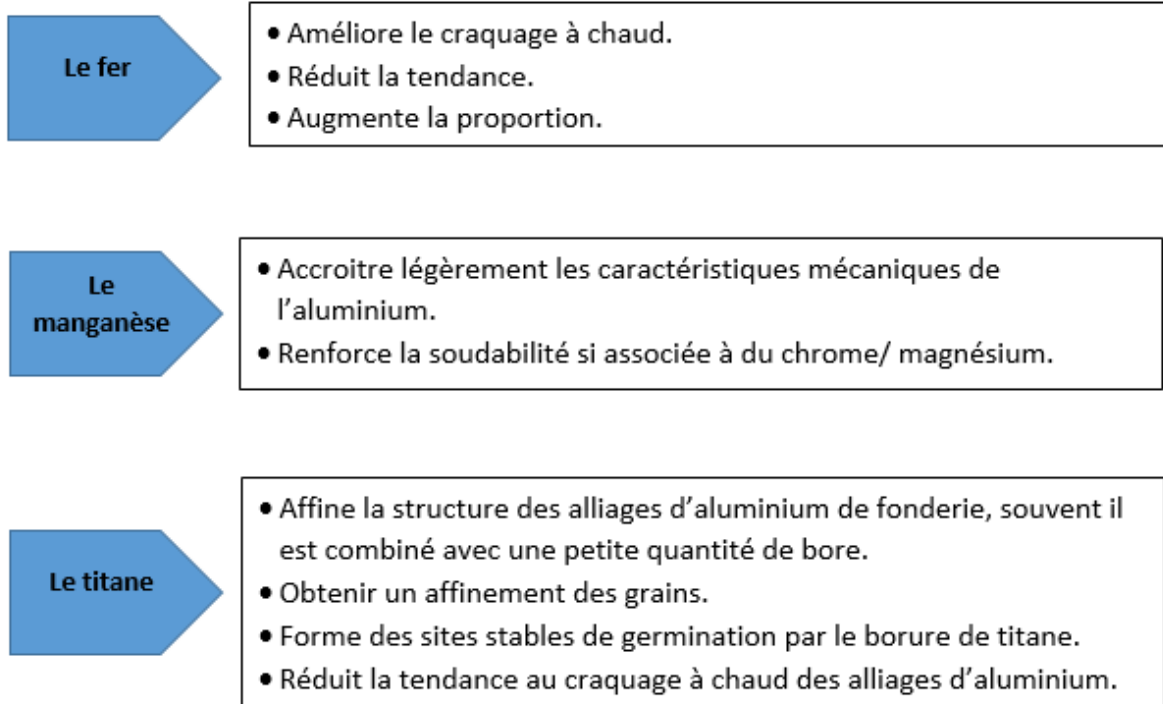
-Le durcissement par effet de phase dispersée : lorsque les teneurs des éléments d'addition dépassent leurs limites de solubilité, les éléments d'addition se séparent de la matrice riche en aluminium pour former une seconde phase dont l'effet durcissant est d'autant plus marqué lorsque les particules sont plus dispersées dans la matrice et que leur taille est petite.

Les principales familles d'alliages d'aluminium sans durcissement structural sont : Al-Mn (série 3000) et Al-Mg (série 5000).

### **I.8 Effet des éléments d'addition dans les alliages d'aluminium :**

Les éléments d'addition peuvent être ajoutés pour augmenter et améliorer les propriétés des alliages d'aluminium notamment les propriétés mécaniques. Une liste non exhaustive des éléments d'alliage les plus couramment rencontrés est ici proposée. [9]





## I.9 Traitements thermiques :

Le traitement thermique est par définition avant tout un couple temps-température, le traitement thermique est une technique expérimentale permettant d'améliorer, de modifier et d'augmenter les propriétés physiques d'alliages ou de matériaux, de l'adapter à l'usage auquel il est destiné sans toucher ni modifier sa composition chimique.

### I.9.1 Traitements d'homogénéisation :

Il s'agit de traitements impliquant des chauffages à température relativement élevée appliqués à certains produits forgés ou ébauchés et destinés généralement à faciliter la transformation à chaud ou à froid d'un métal (filage, étirage, laminage, forgeage). Celles-ci comprennent typiquement un maintien pendant 6 à 48 heures de 450°C à 610°C, dont le but général est de dissoudre les phases métalliques en excès et d'obtenir une homogénéisation compositionnelle de la solution solide.

Le corroyage est une opération qui comprend la déformation du métal avec allongement, en général, mais pas nécessairement dans le sens privilégié : il s'effectue à chaud, tiède, à température normale et permettant une déformation convenable (forgeage, emboutissage, laminage, filage, etc.) pour obtenir un produit de la forme désirée. Elle est déterminée par le rapport S/s moude avec :

S : section avant déformation ;

s : section après déformation;

Il ne faut pas confondre le corroyage avec l'écrouissage.

L'écrouissage est une modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage due à un corroyage ou à une déformation plastique à des températures normales (parfois à température ambiante, tiède). Elle est définie par le décrement  $[(S-s)/S] \cdot 100$ . Cette expression doit remplacer l'expression du taux de durcissement correspondant au rapport :  $[(S-s)/S] \cdot 100$ .

### **I.9.2 Traitements d'adoucissement :**

Leur but est d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou en trempant la structure. Dans le cas de l'écrouissage, voici les traitements de restauration et de recuit de recristallisation. Ces traitements ont le même effet que celui décrit pour l'aluminium. Seules des températures de traitement plus élevées sont disponibles pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300°C pendant 1-8 heures ; la structure ne change pas, mais les propriétés mécaniques changent davantage avec une température plus élevée et un temps de maintien plus long. Au niveau atomique il n'y a qu'un réarrangement ordonnés produits par l'écrouissage : certains s'annihilent, d'autres se réarrangent au niveau des joints et sous les joints de grains, d'où la ductilité de l'alliage.
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400°C pendant 0.5 à 3 heures ; les atomes se regroupent suivant des nouvelles directions pour former un petit cristal d'orientation quelconque. Avec le temps de nouveaux atomes viennent s'agglutiner autour du petit cristal jusqu'à ce que les nouveaux grains se rejoignent pour donner la structure macrographique de recristallisation primaire. Si l'on augmente la température ou la durée de maintien, on obtient des structures de recristallisation secondaire à très gros grains. Au contraire, Si l'on stoppe ce traitement de recuit par un temps trop court, on obtient des états partiellement recristallisés.

Dans le cas de la trempe structurale, il s'agit d'un recuit de précipitation impliquant un chauffage pendant une durée considérable à des températures comprises entre la température de revenu et la température de mise en solution du produit trempé et mûri ou revenu, afin d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

### **I.9.3 Traitements de trempe structural :**

#### **- Principe :**

Le traitement de durcissement de la structure de l'alliage d'aluminium comprend un traitement en solution solide suivie :

- Refroidissement suffisamment rapide pour maintenir une solution solide à température ambiante qui existe à des températures plus élevées ;
- Un revenu ultérieur à température ambiante (=durcissement) ou plus entraîne un durcissement de l'alliage.

#### **- Traitement industriel de trempe structurale :**

Ce traitement sera déterminé par :

- Un traitement de mise en solution : la température de ce traitement est très précise car dans le cas général, le domaine  $T_s - T_l$  n'est pas important. Il faut en particulier éviter d'atteindre la température de brûlure pour laquelle l'alliage commence à fondre aux joints de grains. La régénération de l'alliage par traitement thermique ou mécanique est alors impossible. Pour éviter la brûlure due à la ségrégation mineure on évite de dépasser la température TE (eutectique).
- La vitesse de refroidissement critique est la vitesse minimale à laquelle une solution solide sursaturée peut être obtenue à température ambiante.
- Un traitement de maturation ou de revenu. Certains alliages sont favorablement influencés par un temps d'attente entre trempe et revenu. Un écrouissage entre trempe et revenu est conduit à des effets favorables dans certains cas.

### **I.10 Application de l'aluminium et ses alliages :**

En tenant compte des caractéristiques mécaniques et électriques de l'aluminium et ses alliages on peut citer la principale utilisation de l'aluminium et ses alliages [10] :

**Les transports (25%) :** Aéronautique, automobile, train, bateau.

Grâce à sa légèreté qui permet de réduire la consommation de carburant, l'aluminium est apprécié dans le domaine du transport, Cela engendre une diminution du taux d'émission des

gaz de combustion. De plus il se lie facilement avec du cuivre de silicium ou de magnésium pour former des alliages résistants qui évacuent bien la chaleur, qui sont idéal pour les moteurs à combustion. L'utilisation de l'aluminium réduit également le bruit et les vibrations.

**Le bâtiment (21%) :** Toitures, façade, aménagements intérieurs.

Étant facilement malléable et résistant en alliages, l'aluminium permet de fabriquer des formes complexes dans une gamme variée de coloris. De ce fait, il est très populaire en architecture moderne et ne nécessite que très peu d'entretien. Ces avantages en font un matériau polyvalent utilisé dans tous types de bâtiments. Par exemple, il est utilisé pour construire des structures vitrées, des cloisons, des portes, des gouttières, etc.

**L'électricité (9%) :** Câble et appareillage pour la fabrication des appareils ménagers, emballage et décoration.

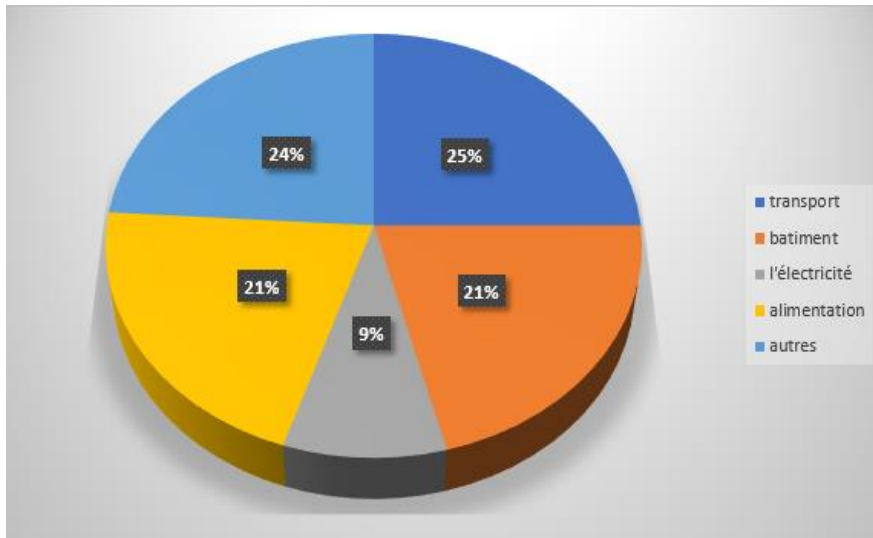
L'aluminium est très apprécié dans ce domaine en raison de sa conductivité électrique élevée, de ses propriétés non magnétiques et de son inertie chimique. L'aluminium a remplacé le cuivre dans les lignes à haute tension et constitue désormais le moyen le plus économique de transmettre l'énergie électrique. Depuis les années 1950, l'aluminium a pratiquement remplacé le laiton comme base standard pour l'ampoule électrique.

**L'alimentation (21%) :** les boites de boissons, les feuilles minces.

L'emballage en aluminium est largement utilisé en raison de son faible coût de fabrication, de sa légèreté et de son isolation thermique. Une fine feuille d'aluminium (environ 0,1 mm) suffit à isoler le produit du monde extérieur : imperméable à la lumière, à l'air, aux UV, à la vapeur d'eau, à l'oxygène et aux micro-organismes. De plus, la résistance à la corrosion et la stabilité métallurgique de l'aluminium protègent l'aluminium contre les dommages causés par certains produits. A titre d'exemple d'emballage en aluminium, on peut citer la canette. Celle-ci n'altère pas le goût des aliments, est solide, légère, recyclable et constitue le type d'emballage de boisson le plus courant.

**Autre aspect intéressant (24%) :**

L'aluminium fait partie des métaux ininflammables : l'aluminium ne s'enflamme pas même après avoir fondu (au-dessus de 650°). Sa conductivité thermique élevée facilite la dissipation de la chaleur en cas d'incendie. (Sa diffusivité thermique est 6fois supérieure à celle de l'acier). Ces deux propriétés en font un matériau avantageux et pratique dans la lutte contre l'incendie.



**Figure I.4 : Les applications de l'aluminium et ses alliages.**

## Références

- [1] Aluminium leader. (2017). Historique en ligne repère [http : www.aluminiumleader.com](http://www.aluminiumleader.com).
- [2] A Fleury : conception en fatigue de joint soudés par friction malaxage dans les tabliers de pont en aluminium. Université Québec, Chetoni.
- [3] D Beaulieu : les caractéristiques de l'aluminium structural. La presse de l'université LARA 2022.
- [4] M. Bayarassou : Effet des traitements de vieillissement sur l'évolution de la structure et les propriétés mécaniques des fils en alliages d'aluminium (AGS) tréfilés à L'ENICAB. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider, Biskra, (2018).
- [5] B.Barlas Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (2004).
- [6] S.Yahi : Contribution à l'étude microstructurale des Alliages d'aluminium AlMgSi. Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi,(2012).
- [7] R.Guemini,These de magistère, Universite Mentouri,-Constantine, 1981
- [8] M2104 – Mise en œuvre et comportement des matériaux Université paris sud
- [9] M Colombidé et all : matériaux métalliques 2<sup>ème</sup> édition ; Dunod, paris, 2001,2008, JSBN 978-2-10-0553918-5. M.
- [10] F.Z Lemadi : caractérisation des alliages à base d'aluminium et l'étude de l'effet des traitements thermiques sur la microstructure et la taille des grains. Thèse de doctorat Université Mohammed Khider, Biskra, 2014.

# Chapitre II

## Chapitre II : La déformation plastique sévère par ECAP :

### II.1 Introduction :

La déformation plastique sévère est une méthode utilisée pour affiner la microstructure d'un matériau est pour cela, la déformation sévère s'exécute par le principe d'écroutissage intensive. Ces procédés sont largement utilisés, au cours des dernières décennies, est un moyen largement reconnu dans les domaines de la production des matériaux d'une structure ultra fine (<1 μm). Les procédés de déformation plastique sévères permettent d'améliorer les propriétés mécaniques ou physiques des matériaux, parfois grâce à ces procédés on peut attendre des propriétés qui sont difficiles à obtenir avec d'autres procédés. Les principales priorités visées à améliorer ou à modifier par ces procédés (la dureté, la résistance élastique, la résistance en fatigue ou encore la résistance à la corrosion). La technique de déformation plastique sévère est une technique prometteuse dans le domaine des matériaux métallique, elle attire donc l'attention de nombreux chercheurs du monde entier.

### II.2 Les matériaux à grains ultra fins :

Les matériaux à grains ultra fins ce sont les matériaux polycristallins ayant une taille de grain comprise entre (0,1 à 1 μm). D'un autre côté, on dit matériaux nanocristallins pour les matériaux à une taille de grains inférieure à (100 nm), Nanocristallin ou polycristallins la composition chimique reste la même. Cependant la taille des grains, influence directement sur la plupart des propriétés physique et mécanique d'un matériau, une bonne résistance, une dureté importante [1]. L'ensemble de ces comportements est trop recherché dans plusieurs domaines d'application, par exemple dans l'automobile pour assurer la sécurité des conducteurs et des passagers, les tôles utilisées doivent être étudié d'une manière très approfondie (jusqu'à la forme et la taille des grains).

L'influence de la taille de grains sur les propriétés des matériaux cristallins est donnée par l'équation de HALL-PETCH [2] :

$$\sigma_c = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \dots\dots\dots \text{Eq (II.1)}$$

Où  $\sigma_c$  est la contrainte critique,  $\sigma_0$  est la limite élastique d'origine du matériau,  $k$  est une constante,  $d$  est la taille des cristallites.

Cette équation décrit l'évolution de la contrainte en fonction de la diminuons de la taille des grains qui est de même l'origine de l'ensemble des propriétés mécaniques.

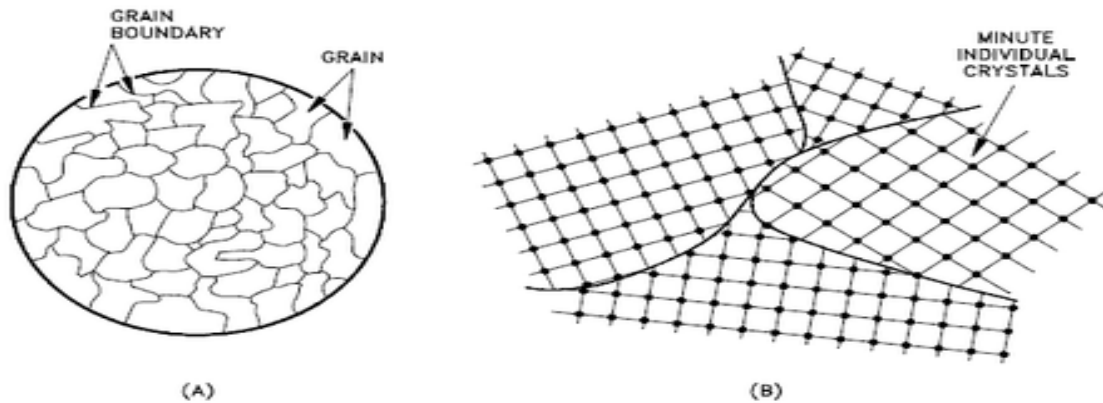
Par exemple :

- Pour des grains plus petits on a tendance à augmenter la résistance à la traction et la ductilité de matériau.
- Pour des grains a des tailles plus grandes on porte une amélioration sur les propriétés de fluage à haute température de matériau.

On peut expliquer ce gain en propriétés mécanique, lors de la diminution da taille de cristallite (grain) par l'augmentation de nombre de grains qui se trouvent dans le matériau qui implique aussi, l'augmentation de nombre de plans de glissement. Cela donne une plus grande possibilité pour qu'un glissement se produit sous l'application d'une contrainte. Pour les limites du grain (joint de grain) par raison de concentration des défauts dans cette zone. Ils forment un barrage ou un obstacle au mouvement des dislocations par les raisons suivantes :

- En raison de l'orientation compliqué des grains, le mouvement des dislocations doit souvent changer de direction.
- La discontinuité des plans de glissement d'un grain à l'autre.

La **Fig (II.1)** illustre cette situation :



**Figure II.1: Grains et joints de grains. [3]**

### **II.3 Les mécanismes de la déformation plastique :**

La déformation plastique se produit lorsque des matériaux polycristallins sont soumis à des contraintes mécaniques externes. Ceci est principalement généré par le mécanisme de glissement des dislocations sur des plans cristallins précis et/ou par un maclage mécanique. Le déclenchement de l'un ou l'autre mécanisme dépend du matériau et conditions expérimentales de déformation tels que l'intensité de la contrainte, la température).

### II.3.1 La déformation par glissement :

Le glissement des dislocations est en général caractérisé par un plan  $\{hkl\}$  et une direction  $[uvw]$  contenue dans ce plan donnant la direction du vecteur de Burgers (c'est-à-dire la plus petite période du réseau). Plusieurs systèmes de glissement sont possibles mais le glissement est généralement traduit par le système de glissement de plans cristallographique dit active qui correspond au plan avec la plus grande compacité (le plan le plus dense) qui est caractérisé par la direction la plus dense.

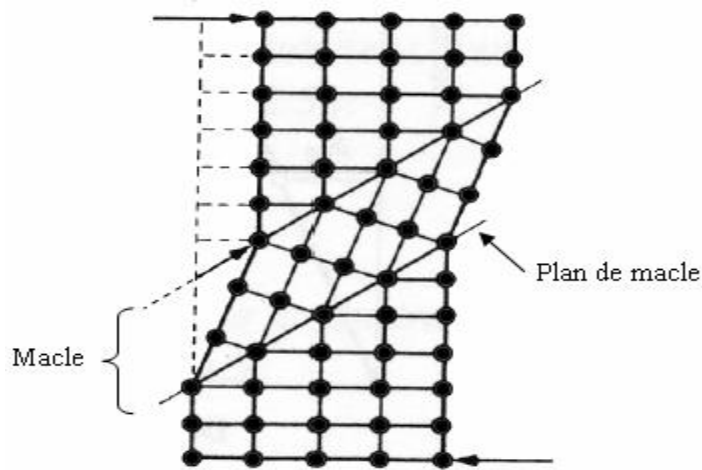
Plus un métal a de plans et de directions de glissement, plus sa capacité à se déformer plastiquement est grande. Les métaux du réseau cubique sont très plastiques et le glissement dans ces métaux peut se produire dans plusieurs directions. La plasticité des métaux à réseau hexagonal à empilement compacte est plus faible, ils se prêtent donc plus mal au laminage et à d'autres modes de déformation que les métaux à réseau cubique. **Tab (II.1)** présent les systèmes de glissement des différentes structures :

**Tableau 1 Tableau II.1 : Systèmes de glissement des différentes structures pour les hexagonaux B : basal, PR : prismatique, PY : pyramidal. [4].**

Structure	Direction de glissement	Plan de glissement	Nombre de système
CFC	$\langle 110 \rangle$	$\{111\}$	12
CC	$\langle 111 \rangle$	$\{110\}$	12
		$\{112\}$	12
		$\{123\}$	24
HC	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{0001\}$ B	3
	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{10\bar{1}0\}$ PR	3
	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{10\bar{1}1\}$ PY1	6
	$\langle 11\bar{2}3 \rangle$	$\{1122\}$ PY2	6

### II.3.2 Déformation par maclage :

La déformation plastique par maclage se fait quand le glissement ne peut pas se produire. Lors du maclage une partie du cristal est cisailés entre deux plans vont former les interfaces avec la partie non déformée comme montré sur la **Fig (II.2)** :



**Figure II.2 : Schéma de déformation par maclage.**

Dans les matériaux CFC, le maclage est favorisé par de basses températures ou de fortes vitesses de déformation, ainsi que par une faible énergie de défauts d'empilement.

On doit noter que la déformation par glissement conserve l'orientation du cristal, par contre la déformation par maclage change l'orientation ce qui explique que ce mode de déformation produise des textures de déformation extrêmement maquées.

### **II.3.3 Restauration et recristallisation dynamiques :**

En raison de l'introduction de nombreux défauts cristallins, l'énergie stockée dans le matériau augmente lors de la déformation plastique. Le matériau est dans un état thermodynamiquement instable. Lors du recuit, il a tendance à revenir à un état plus stable grâce à l'activation de phénomènes tels que la restauration et la recristallisation :

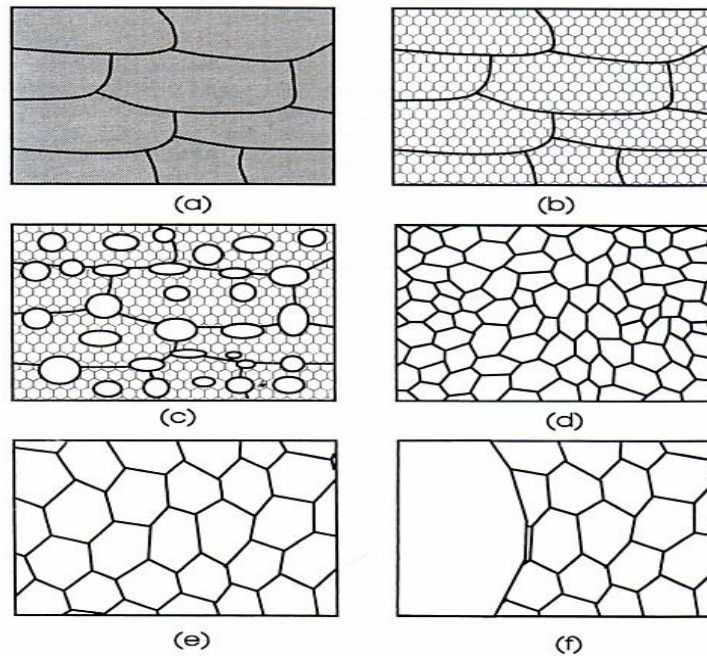
- la recristallisation se traduit par la formation de nouveaux grains aux dépens de la structure écrouie comme le montre la **Fig (II.3 c)**.

- la restauration permet un adoucissement du matériau par le réarrangement et l'annihilation, en général partielle, des défauts cristallins **Fig (II.3 b)**.

On distingue encore :

- La croissance normale des grains, continuation du processus de recristallisation primaire lorsque tout le métal écroui a été consommé, conduisant à un accroissement continu de la dimension moyenne des grains **fig (II.3 e)**.

- La croissance anormale, ou recristallisation secondaire, au cours de laquelle un petit nombre de grains croissent aux dépens des autres (déjà recristallisés), **fig (II.3 f)**.



**Figure II.3 : Représentation schématique de : a) état déformé, b) état restauré, c) état partiellement recristallisé, d) état complètement recristallisé, e) croissance normale des grains et f) croissance anormale des grains. [5]**

Il est à noter que les phénomènes de récupération et de recristallisation qui se produisent lors du recuit des matériaux déformés sont statiques. Si le processus de récupération se produit simultanément avec la déformation, ça s'appelle récupération dynamique et recristallisation dynamique.

#### **II.4 Les principaux techniques de déformation plastique sévère :**

De nombreuses méthodes ont été utilisées pour but d'obtenir des dimensions de grains ultra fines. Ces processus comprennent : Le raffinement des grains lors de la solidification à l'aide de divers éléments, les transitions mécaniques de phases, dépôt électrolytique par impulsion, qui sont des techniques très coûteuses. Récemment les techniques de déformation plastique sévère commencent de plus en plus de prendre place dans le monde de l'industrie des matériaux.

Pour les matériaux doux comme par exemple les alliages d'aluminium, les structures nanométriques des grains est plus demandé par rapport aux propriétés mécaniques améliorées. La déformation plastique intense est capable d'atteindre cet objectif. Les techniques les plus couramment utilisées sont :

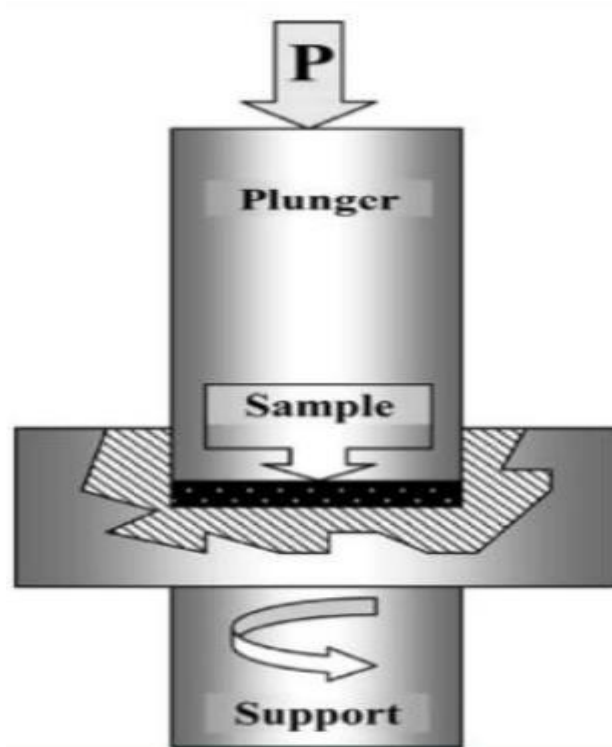
- ECAP (passage angulaire à canaux égaux).

- HPT (la torsion à haute pression).
- ARB (la liaison à cumulée par roulement).
- CEC (l'extrusion et la compression cyclique).
- PCS (l'ondulation et le redressement répétitif).

Toutes ces procédures ont pour principe général d'introduire de grandes déformations plastiques qui va conduire à un raffinement microstructural important dans le matériau. La plupart ces techniques, telles que (ECAP), (HPT) et (ARB), sont des méthodes bien étudiées actuellement pour l'obtention des structures matérielles souhaitées.

#### II.4.1 Technique HPT :

Les premières techniques de déformation en torsion sous pression intense ont été mises au point dans les années 80 pour étudier les transformations de phases pendant de larges déformations ou pour étudier l'effet d'une forte déformation plastique sur la température de recristallisation. C'est dans les années 90 que la technique dite de HPT a permis la formation de nanostructures homogènes avec des joints de grains fortement désorientés [6].



**Figure II.4 : Représentation schématique du procédé de torsion sous pression intense (High Pressure Torsion – HPT).**

### II.4.2 Technique ARB :

Cette technique peut être utilisée pour déformer de nombreux métaux (Figure 3) [6].

- le matériau se présente sous forme de feuilles empilées les unes sur les autres. D'où l'épaisseur est de plusieurs centaines de micromètres (1  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$ ), sa largeur est généralement de 20 mm ;
- la déformation du matériau par laminage jusqu'à l'obtention d'une épaisseur de tôle de 100 à 200  $\mu\text{m}$  ;
- la tôle soit découpée en plusieurs autres tôles ;
- Cet empilement peut ensuite être encore déformé par laminage.

La pression hydrostatique appliquée lors de la déformation est inférieure à 0,8 GPa, soit la même amplitude que la pression appliquée dans l'ECAP.

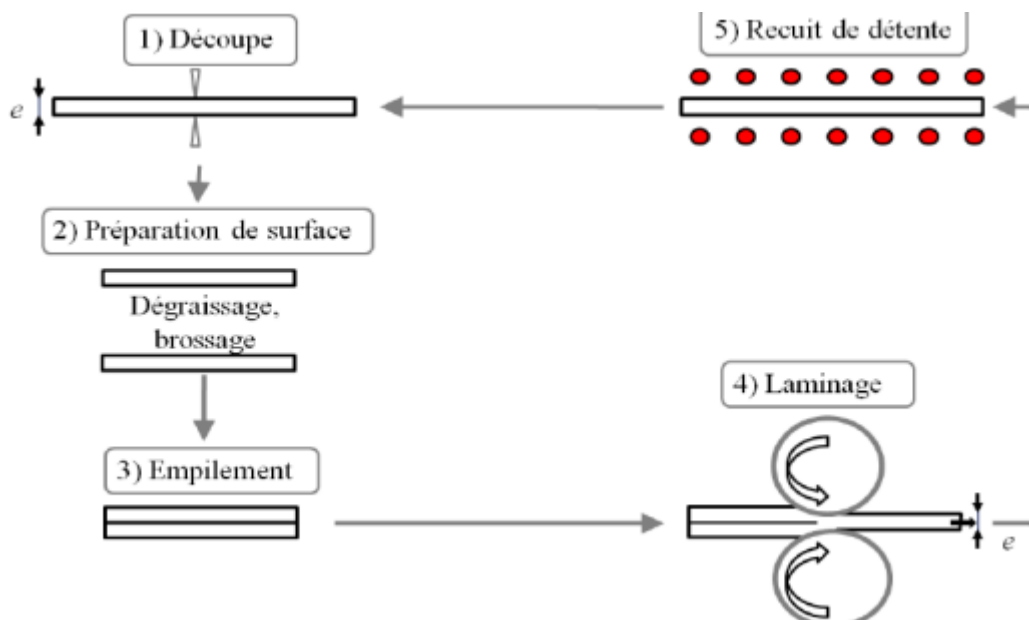
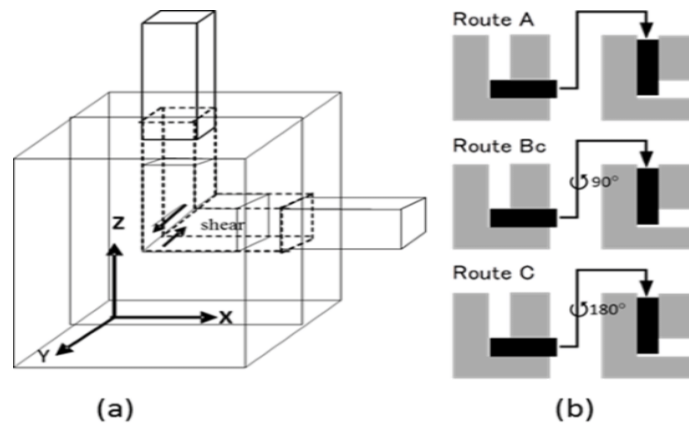


Figure II.5: Protocole d'un cycle de la technique du laminage accumulé (ARB).

### II.4.3 La déformation plastique sévère par ECAP :

#### II.4.3.1 Technique ECAP :

Cette technique a été inventée dans les années 80 par SEGAL, dans le but de procéder à une déformation par cisaillement pur. Cette technique a ensuite été reprise dans les années 90 par VALIEV, pour atteindre des tailles de grains nanométriques. De nombreuses études ont été menées à ce jour sur cette technique qui présente l'avantage de produire des échantillons de larges dimensions. Une revue de ces travaux à récemment été effectuée par VALIEV et Langdon [7].

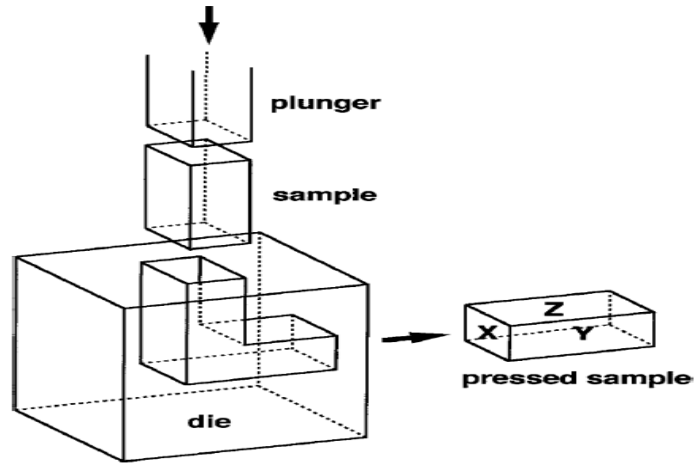


**Figure II.6: (a) Schéma ECAP, (b) Différentes routes de déformation ECAP.**

#### II.4.3.2 Principe de la méthode :

Le principe de cette technique repose sur la déformation limitée due au cisaillement, d'une bielle en forme de cylindre ou cylindre, sous l'action de la force du piston, dans une matrice coudée et de dimensions fixes, qui provoque alors une déformation plastique déformation, par simple cisaillement dans une petite partie de la bielle, au niveau du plan d'intersection des deux canaux. La bielle est ensuite retirée du moule. L'opération est répétée autant de cycles que nécessaire pour obtenir une distorsion importante et affiner la microstructure [7].

La figure II.7 schématise le principe de technique ECAP :



**Figure II.7 : Principe de la technique ECAP.**

### **II.4.3.3 Les facteurs influençant sur les propriétés des matériaux issus de la technique ECAP :**

#### **II.4.3.3.1 Nombre de passes :**

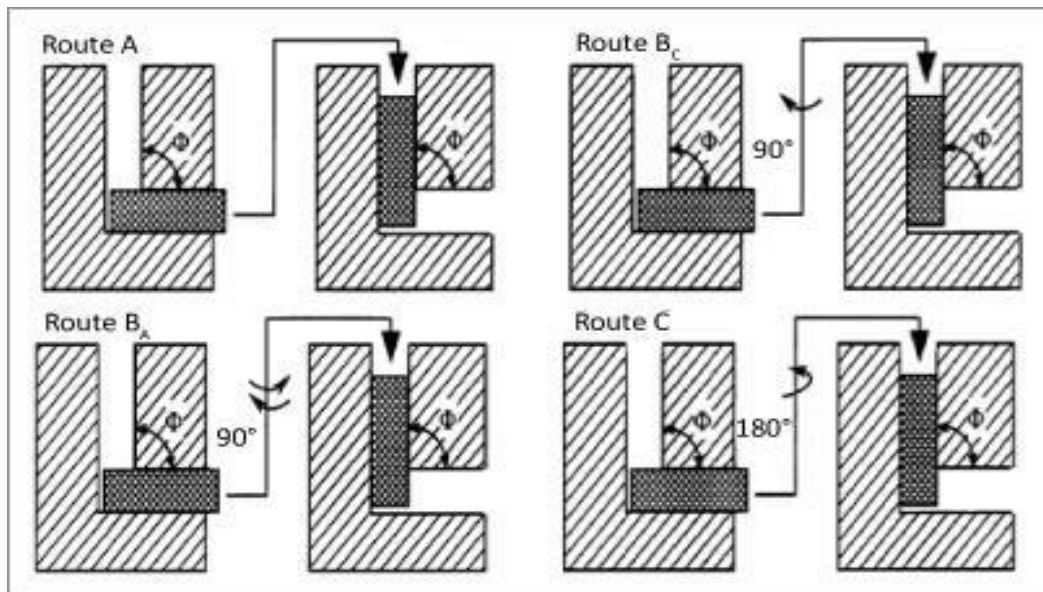
Une limitation importante dans l'ECAP classique est que l'échantillon doit être retiré de la filière et remonté, avec ou sans rotation intermédiaire, pour obtenir le grand nombre de passes et les fortes contraintes appliquées dues à la section constante. le même échantillon peut être pressé plusieurs fois pour obtenir une déformation particulièrement élevée. Par exemple, l'utilisation de tapotements répétés permet d'invoquer différents systèmes de glissement à chaque mouvement successif en faisant tourner les motifs de différentes manières entre différents passages.

#### **II.4.3.3.2 Emploi de lubrifiant :**

Les lubrifiants permettent d'atteindre des conditions de compression quasi-hydrostatiques, réduisant efficacement la force requise pour l'ECAP. En fait, il a été démontré que la réduction du coefficient de frottement de 0,1 à 0,01 réduit la force requise et il permet d'augmenter le nombre de cycles qui peuvent être effectués. Le lubrifiant agit également comme dégriffants pour éviter le phénomène de collage de l'échantillon dans le canal et facilite son extraction. Enfin, l'utilisation de lubrifiants conduit à des distributions de déformation uniforme.

### II.4.3.3 séquences de rotation :

Dans la terminologie associée à la technique ECAP, on appelle route la séquence de rotations spécifiques de la billette autour de son axe longitudinal entre deux passes consécutives à travers le moule. Lorsqu'un échantillon est pressé de façon répétitive à travers une matrice ECAP, il a été reconnu que les caractéristiques générales de cisaillement à l'intérieur de l'échantillon cristallin peuvent être modifiées par une rotation de l'échantillon entre les pressages individuels [9]. Il existe quatre voies de traitement de base dans ECAP qui introduisent différents systèmes de glissement pendant le processus de pressage, ce qui entraîne des différences significatives dans les microstructures produites par ECAP. Les quatre voies de traitement sont résumées schématiquement à la figure II.8.



**Figure II.8 : Les quatre routes fondamentales de L'ECAP.**

La définition des quatre voies :

- **Route A** : L'orientation de la billette reste inchangée entre toutes les passes répétitives.
- **Route BA** : Après chaque passe, la billette est tournée autour de son axe longitudinal d'un angle de  $90^\circ$  alternativement dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire.
- **Route BC** : Après chaque passe, la billette est tournée autour de son axe longitudinal d'un angle de  $90^\circ$  dans le sens des aiguilles d'une montre.
- **Route C** : Après chaque passe, la billette est tournée, dans le même sens, autour de son axe longitudinal d'un angle de  $180^\circ$ .

Diverses combinaisons de ces voies sont également possibles, Par exemple route BC et route C, en alternant des rotations à  $90^\circ$  et  $180^\circ$  à chaque passage. Cependant, en pratique, les connaissances expérimentales acquises jusqu'à présent indiquent que ces combinaisons plus complexes ne conduisent pas à une amélioration supplémentaire des propriétés mécaniques du matériau sous pression.

#### II.4.3.3.4 les angles $\Phi$ et $\Psi$ :

Il existe des facteurs directement liés à l'installation ECAP expérimentaux, tels que les valeurs d'angle dans la matrice entre deux parties du canal  $\Phi$ , et les valeurs d'angle dans l'arc de courbure extérieur  $\Psi$  où le canal se croise. La figure II.9 illustre une section à travers la filière et définit deux angles  $\Phi$  et  $\Psi$  :

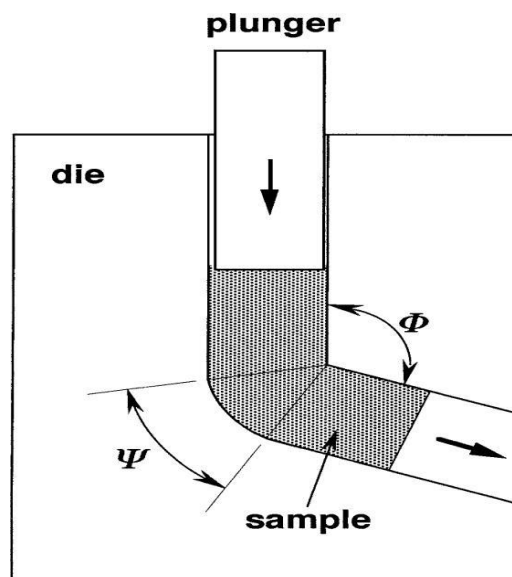
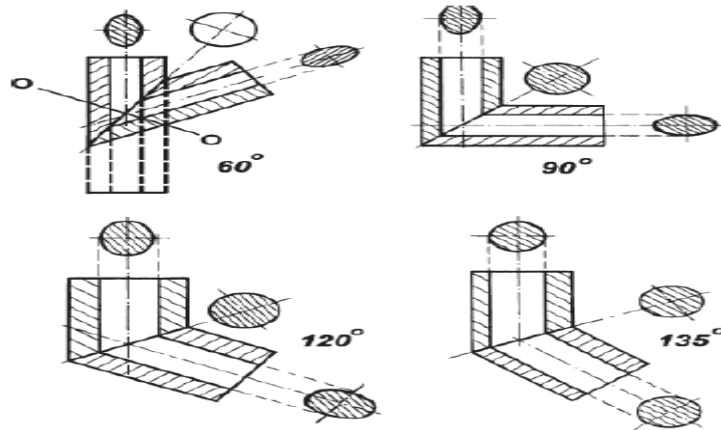


Figure II.9 : Section d'une matrice ECAP montrant les deux angles  $\Phi$  et  $\Psi$ .

##### a) Influence de l'angle $\Phi$ :

L'angle de canal  $\Phi$ , comme le précédent de la figure II.10, détermine la contrainte globale imposée à chaque passage et affecte ainsi directement les propriétés microstructurales.



**Figure II.10: Illustration schématique des matrices utilisées pour évaluer l'influence de l'angle  $\Phi$  [10].**

La microstructure résultante permet d'obtenir plus facilement des réseaux de grains fins à des axes égaux, lorsque l'échantillon est soumis à de très fortes contraintes plastiques en utilisant des réseaux avec un angle de canal de  $90^\circ$ . De plus, ces résultats confirment que, du moins pour l'aluminium pur, la déformation totale cumulée n'est pas un facteur significatif dans la détermination de la microstructure de l'échantillon issue de l'ECAP. En pratique, cela signifie que l'angle idéal du canal de ECAP est de près de  $90^\circ$ , et des microstructures similaires sont pas possibles avec d'autres techniques par exemple, l'extrusion multi-passes conventionnelle ou de petites déformations progressives sont imposées dans chaque passage séparé.

Malgré l'efficacité des matrices ECAP avec des angles de canal de  $\Phi=90^\circ$ , montré par Harris et al [11] grâce à la modélisation par éléments finis des configurations de presse ECAP avec  $\Psi = 0^\circ$ , Il est alors difficile de remplir complètement les coins de matrice en pressant un matériau moins ductile. La pression est appliquée à la sortie de la matrice. Par conséquent, il est important de comprendre qu'il est plus facile de presser des échantillons dans des matrices avec des angles supérieurs à  $90^\circ$ . Pour certains matériaux très rigides ou moins ductiles, cela peut être une considération importante.

#### **b) Influence de l'angle de courbure $\Psi$ :**

L'angle de courbure  $\Psi$  marque l'arc extérieur où les deux parties du canal se croisent dans la matrice. Bien que cet angle ne joue qu'un rôle mineur dans la détermination de l'échantillon, il est important d'étudier l'effet de cet angle dans la fabrication de matériaux à grains ultrafins.

De nombreuses études ont été menées par différents auteurs sur l'effet de l'angle entre les canaux sur la répartition des déformations et des contraintes. Les travaux effectués à différents angles de coude (0, 22, 60 et 90°) montrent une diminution progressive des valeurs de dureté à mesure que la valeur de l'angle extérieur augmente. Cette étude montre également que l'angle de courbure joue un rôle majeur dans la non-uniformité de la répartition des contraintes. Ce résultat ne supporte pas l'affirmation selon laquelle l'utilisation de matrices avec des coins arrondis augmente la taille basée sur des considérations d'éléments finis. La non-uniformité des billettes et l'uniformité aux angles (0° et 22°) sont également moins prononcées. Le flux et l'uniformité de la distribution restreinte, et le potentiel de ces angles, par conséquent, ce paramètre doit être pris en compte dans la procédure de construction du dispositif ECAP [12].

#### **II.4.3.3.5 L'influence de vitesse d'extrusion :**

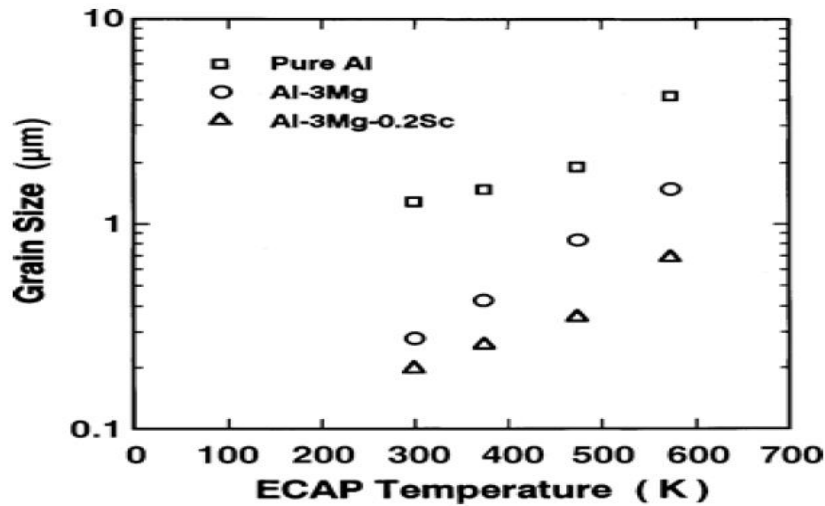
La vitesse d'extrusion est un paramètre tout aussi important qu'il faut prendre en compte pour optimiser le procédé. L'ECAP est généralement réalisée à l'aide de presses hydrauliques fonctionnant à des vitesses relativement élevées. Selon VALIEV, la vitesse de pression est généralement comprise entre 1 et 20 mm/s. Cependant, il est possible de construire des matrices qui permettent une plus large gamme de vitesses de pression de relaxation. Des recherches sur l'effet de la vitesse d'extrusion ont montré que cela n'affecte pas de manière significative la taille finale des grains ultrafins quand il s'agit d'une haute pression, mais la vitesse à basse pression semble produire une microstructure plus stable.

#### **II.4.3.3.6 L'influence de la température d'extrusion :**

La température à laquelle l'extrusion ECAP se produit est un paramètre clé pour les propriétés mécaniques et structurelles finales du matériau extrudé, influencé par des processus tels que la récupération ou la recristallisation. Des études sur l'effet de la température d'extrusion ont révélé deux tendances importantes.

- Tout d'abord, la taille du grain final augmente avec l'augmentation de la température.
- Deuxièmement, la proportion de désorientations aux petits angles augmente avec l'augmentation de la température.

La figure ci-dessus nous montre la taille de grain des alliages Al et Al-3 %Mg et Al-3 %Mg-0,2 %SC purs après déformation par ECAP en fonction de la température :



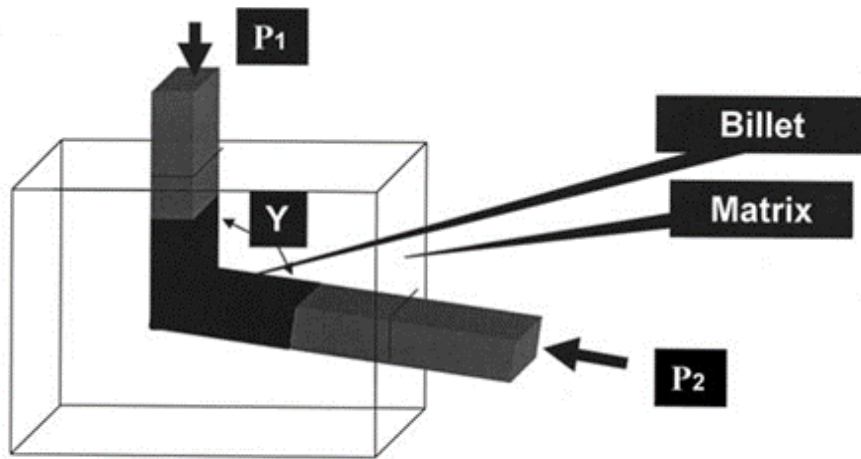
**Figure II.11: Taille du grain après l'ECAP par rapport à la température de pression pour les alliages Al et Al-3 %Mg et Al-3 %Mg-0,2 %SC purs [13].**

#### II.4.3.3.7 L'influence de la contre pression [14] :

Le rôle important de l'utilisation de la contre-pression a été souligné pour la première fois dans les premiers travaux sur la mécanique ECAP. Cependant, il est devenu un domaine d'intérêt particulier ces dernières années, principalement parce que les matrices ECAP ont été conçues pour guider les opérations de traitement avec une contre-pression précise contrôlée par ordinateur.

- Un avantage important de l'application d'une contre-pression est qu'elle conduit à une amélioration très significative de l'aptitude au traitement des échantillons traités ;
- Un autre avantage important est l'amélioration apparente de l'uniformité du flux de métal introduite pendant le fonctionnement ECAP.

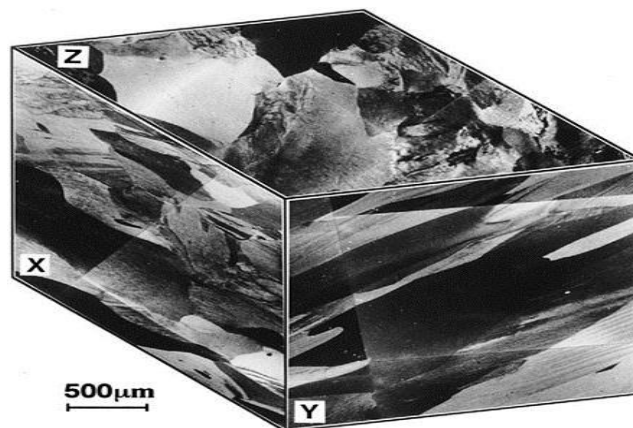
La figure suivante schématise l'application de l'ECAP avec une contre pression :



**Figure II.12 : Principe d'application ECAP avec une contre pression.**

#### **II.4.4 La microstructure des matériaux produits par ECAP :**

Au niveau microstructural, les processus de déformation plastique conventionnels tels que le laminage, l'étirage et l'extrusion n'atteignent pas le degré exceptionnel de finition microstructurale obtenu à partir de déformations plastiques sévères. Les matériaux déformés par les méthodes conventionnelles présentent une structure cellulaire (ou parfois fibreuse), marquée par des joints de grains avec de petits angles de désorientation [15]. De leur côté, les matériaux ayant subi de fortes déformations plastiques sont à la base d'une transition progressive de leur type structural, en fonction de la quantité de déformation stockée. En effet, dans les premiers stades de déformation, les microstructures observées sont de type cellulaire, mais au fur et à mesure que la déformation plastique augmente, ce sont ces matériaux qui donnent naissance à une structure granulaire contenant majoritairement des joints de grains. De plus, l'effet de frottement entre la pièce et la paroi de la matrice peut affecter les microstructures internes lorsque le diamètre de la pièce (cylindrique) est inférieur à 5 mm [16].



**Figure II.13 : Aspect macroscopique dans les plans X, Y et Z, de l'aluminium après ECAP en une passe. [17]**

#### **II.4.5 Les avantages de la technique ECAP :**

De nombreux avantages le distinguent des autres procédés de déformation plastique sévère, parmi eux :

- L'ensemble des pièces utilisées pour l'exécution de cette technique sont facile à réaliser par des simples machines de tournage ;
- La taille du matériau extrudé est presque inchangée ;
- Des déformations très importantes, uniformes et unidirectionnelles peuvent être obtenues après un ou plusieurs passages dans la matrice ;
- Cette technique peut être appliquée à des échantillons ayant une longueur importante ;
- la possibilité de produire des matériaux à grains fins avec différentes microstructures, simplement en changeant l'orientation de la pièce par rapport au sens d'extrusion est considérée comme un avantage principal de la technique.

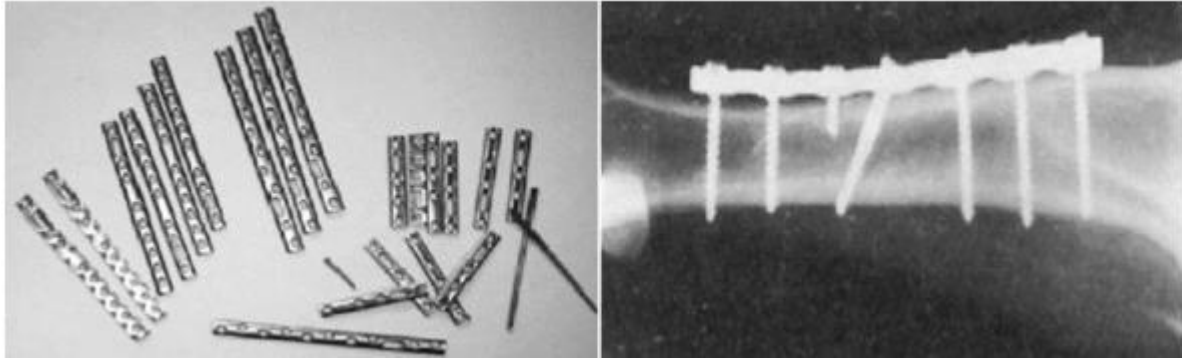
#### **II.4.6 Domaines d'utilisation des matériaux obtenue par ECAP :**

Actuellement, les techniques SPD commencent à apparaître dans le domaine de la recherche partout dans le monde. Laboratoires et envisagent sérieusement leur potentiel en production commerciale de divers matériaux à grains ultrafins.

En effet, les propriétés des matériaux nanostructures dues à une déformation plastique sévère les rendent adaptés à de nombreuses applications modernes. La première utilisation pratique est l'utilisation de ces matériaux comme cibles de pulvérisation pour les techniques de dépôt physique dans phase vapeur (PVD pour dépôt physique en phase vapeur). En effet, les cibles sont faites avec le processus ECAP présentent des propriétés supérieures aux cibles conventionnelles. Parmi les avantages de ces matériaux à particules ultrafines, on prend en compte la prolongation de la durée de vie des cibles, non problèmes d'arc, plus grande uniformité des couches de dépôt et de la texture cristalline Optimal [18]

Une autre application est l'utilisation de produits semi-finis à partir de ces matériaux, tels que les implants dans l'industrie médicale pour remplacer et reconstruction osseuse et vertébrale. En effet, ces matériaux biocompatibles avec les tissus humains réunissent plusieurs caractéristiques recherchées ; Une Très haute résistance à la traction et à la fatigue, élasticité réduite garantie traumatisme osseux et complications postopératoires, très bonne

résistance à la corrosion grâce à contact avec les fluides corporels, longue durée de vie et sans additifs nocifs.



**Figure II.14 : Implants médicaux nanostructurés par ECAP [19]**

L'émergence d'autres applications va certainement suivre, profitant des avantages conférés par les matériaux nanostructures comme leur performance mécanique élevées et leur légèreté très prisée dans certains segments de l'industrie comme l'aérospatial et l'automobile. En résumé, la qualité et la fonctionnalité de ces matériaux de choix répondent clairement aux besoins et attentes des divers secteurs du marché dans les prochaines décennies.

**Références :**

- [1] R.Z. Valiev, F. Chmelik, F. Bordeaux, G. Kapelski, B. Baudelet, *Scripta Metal. Mater.* 27 (1992) 855.
- [2] R.Z. Valiev, D.A. Salimonenko, N.K. Tsenev, P.B. Berbon, T.G. Langdon. *Scripta Mater*, 37 (1997) 1945
- [3] Source: Département américain de l'énergie, Science des matériaux. DOE Fundamentals Handbook, Volume 1 et 2. Janvier 1993.
- [4] Philibert J., A. Vignes, Y. Bréchet, P. Combrade, *Métallurgie de minerai au matériau*, Ed. Masson, Paris (1998).
- [5] Humphreys F.J., M. Hatherly, *Recrystallization and related annealing phenomena*, Pergamon Press, Oxford (1995).
- [6] R.Z. Valiev, Y.V. Ivanisenko, E.F. Rauch, B. Baudelet, *Acta Mater.* 1996, 44, 4705.
- [7] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, *Prog. Mater. Sci.* 2006, 51 (7), 881.
- [9] V. M. SEGAL, *ibid.* 197 (1995) 157.
- [10] T. C. Lowe et R. Z. Valiev, Éd., *Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000. doi: 10.1007/978-94-011-4062-1
- [11] Huang WH, Chang L, Kao PW, Chang CP. *Mater Sci Eng* 2001 ; A307 :113.
- [12] Bowen JR, Gholinia A, Roberts SM, Prangnell PB. *Mater Sci Eng* 2000 ; A287 :87.
- [13] Yamashita A, Yamaguchi D, Horita Z, Langdon TG. *Mater Sci Eng* 2000 ; A287 :100.
- [14] Semiatin SL, DeLo DP, Shell EB. *Acta Mater* 2000 ; 48:1841.
- [15] R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov, *Progr. Mater. Sci.*, 45 (2000) 103.
- [16] P.B. Berbon, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon, *Metall. Mater. Trans.*, 30A (1999) 1989.
- [17] Iwahashi Y, Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon TG. *Metall Mater Trans* 1998;29A:2245.
- [18] S. Ferrase, F. Alford, S. Grabmeier, A. Düvel, R. Zedlitz, S. Strothers, J. Evans, B. Daniels, *Technology Honeywell International Inc.*, 2003.

[19] V. Latysh, Gy. Krallics, I. Alexandrov, A. Fodor, *Current Applied Physics*, 6 (2006) 262

# Chapitre III

## Chapitre III : Corrosion de l'aluminium et ses alliages :

### III.1 Introduction :

Les premiers tests connus de corrosion de l'aluminium ont commencé vers 1890, lorsque le métal était présent en quantité suffisante pour envisager des applications dans la construction et les ustensiles de cuisine. C'est ainsi que le premier test de résistance à la pluie, et au contact de plusieurs liquides alimentaires [1].

L'aluminium ne se corrode pas de manière spécifique, mais se corrode sous diverses formes lors de son utilisation en fonction de facteurs inhérents au métal (éléments d'alliage) et à l'environnement.

Différentes formes de corrosion peuvent apparaître sur le graphique expérimental obtenu en mesurant le potentiel de chaque type (corrosion, piqûres, passivation) en fonction du pH. Le diagramme de Pourbaix du potentiel E en fonction du pH a été tracé pour un équilibre aluminium/eau et ne peut donc pas représenter les phénomènes se produisant en milieu chlorure [2].

### III.2 Diagrammes d'équilibre électrochimique de Pourbaix :

La figure III.1 présente le diagramme de Pourbaix de l'aluminium. Suivant les conditions de pH et de potentiel E, l'aluminium peut se trouver dans les trois configurations (immunité, dissolution et passivation).

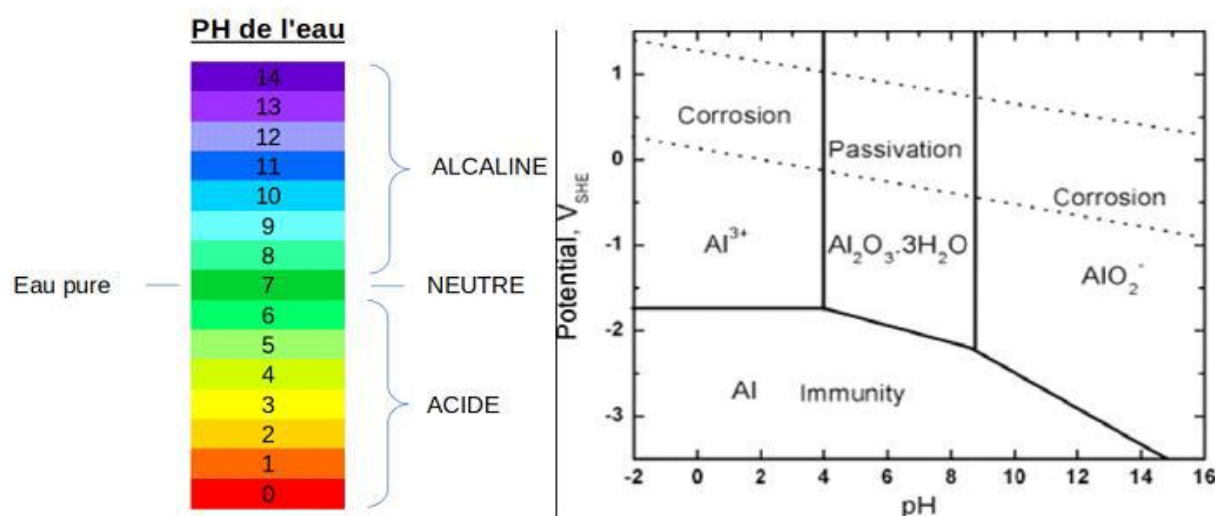
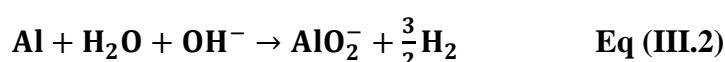
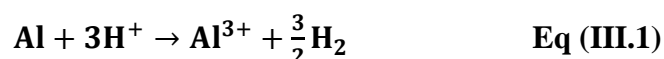


Figure III.1 : Diagramme d'équilibre potentiel (en V=ENH) - pH du système aluminium-eau à 25°C [3].

**-Immunité :** L'immunité de l'aluminium est obtenue pour des potentiels très bas, très inférieurs à la plage de potentiels correspondant au domaine de stabilité de l'eau. Cet état ne peut donc pas être atteint naturellement en solution aqueuse [4].

**-Dissolution :** La dissolution de l'aluminium se produit de façon généralisée pour des pH inférieurs à 4 ou supérieurs à 8 dans la gamme de potentiels où se trouve en général l'aluminium. Pour ces valeurs de pH, l'acidité et l'alcalinité de la solution à l'interface métal - solution favorisent respectivement les réactions **III.1** et **III.2**.



**-Passivation :** La passivation de l'aluminium se produit dans la gamme de pH de 4 à 8. Dans cette gamme, la faible teneur en H et OH<sub>i</sub> ne permet plus les réactions **(III.1)** et **(III.2)**. La réaction **(III.3)**, correspondant à la formation d'un film passif à la surface du matériau, est actuellement la réaction prédominante.



Dans ce cas, c'est la réduction de l'oxygène dissous qui permet de faire croître le film de passivité. De passivité. Il existe différents niveaux d'hydratation de l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Le corindon d'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  formé dans l'air n'est pas hydraté. La boehmite se lie à une molécule d'eau ( $\text{Al}_2\text{O}_3:3\text{H}_2\text{O}$ ). Hydrargillite et bayerite, toutes deux apparentées avec trois molécules d'eau ( $\text{Al}_2\text{O}_3:3\text{H}_2\text{O}$ ). Formant le film le plus stable en solution aqueuse. La nature et la résistance du film sont étroitement liées au temps de trempage, à la température et au pH. En général, l'augmentation du temps de trempage améliorera les propriétés protectrices du film formé. Il est à noter que l'ajout d'éléments dans une solution d'aluminium modifie souvent la nature de la couche d'oxyde formée. Citons l'exemple de l'ajout de Mg afin d'obtenir un film d'oxyde mixte avec de meilleures propriétés anticorrosion que l'alumine seule [5].

### **III.3 les principaux types de corrosion :**

#### **III.3.1 Corrosion généralisée (uniforme) :**

Ce type de corrosion, le plus connu, est aussi le plus facile à détecter et à prévoir. Une corrosion importante entraînant des défaillances catastrophiques est rare mais pas impossible. Pour cette raison, une corrosion importante est souvent considérée comme une horreur plutôt qu'un problème sérieux. La corrosion généralisée attaque les surfaces métalliques de manière relativement uniforme. La réduction progressive de l'épaisseur de paroi d'une pièce doit être prise en compte lors du calcul de la pression nominale. La vitesse de dissolution peut varier de quelques microns par an, dans un milieu non agressif, à plusieurs microns par heure selon la nature de l'acide ou de l'hydroxyde en solution.

#### **III.3.2 corrosion localisée :**

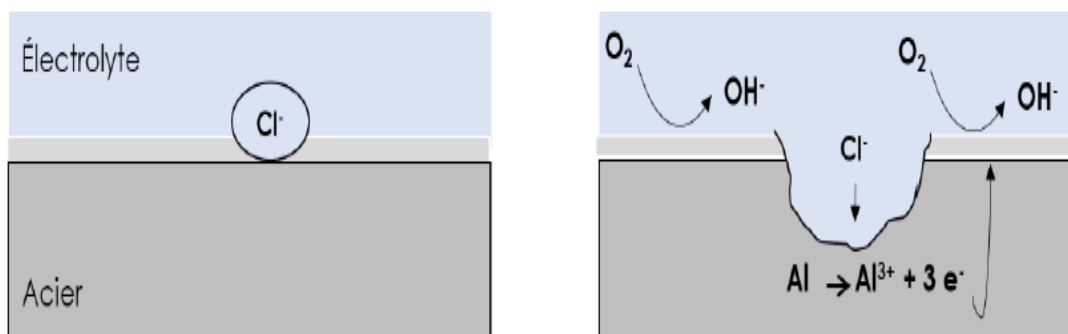
##### **III.3.2.1 Corrosion par piqure :**

L'aluminium est très sensible à la corrosion par piqûres, qui se développe sur les sites où le film d'oxyde naturel présente des défauts pouvant être dus à des procédés de mise en forme ou à des éléments complémentaires.

La piqûre, caractérisée par des trous bien définis, est l'une des formes de corrosion les plus insidieuses. Ils descendent fréquemment du haut de la surface horizontale dans une direction presque verticale. La corrosion par piqûres peut provoquer une perforation tout en ne produisant qu'une faible perte de poids sur le métal. Cette perforation peut être difficile à détecter et se développe rapidement, entraînant une perte de fonction inattendue. La corrosion par piqûres est également liée à la corrosion cavernueuse et électrochimique.

Les causes de la corrosion par piqûres comprennent :

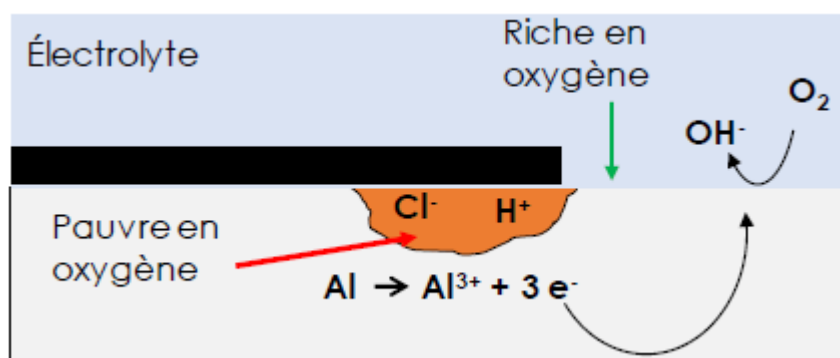
- Inhomogénéité locale sur la surface métallique
- Perte locale de passivité
- Rupture mécanique ou chimique d'un revêtement d'oxyde protecteur
- Corrosion galvanique d'une cathode relativement éloignée.



**Figure III.1 : Mécanisme de corrosion par piqure [6].**

### III.3.2.2 Corrosion caverneuse sous dépôt :

La corrosion caverneuse est un type de corrosion par piqûres qui se produit surtout dans la région à faible débit de la crevasse. Ce type d'attaque implique généralement de petites quantités de stagnation de fluide causées par des trous, des surfaces de joint, des joints, des dépôts de surface et des crevasses sous les têtes de boulons et de goujons. Les dommages se produisent en raison des différences de concentration des composants, principalement l'oxygène, dans les surfaces affectées. La corrosion caverneuse peut progresser très rapidement (des dizaines à des centaines de fois plus vite que la vitesse de corrosion générale normale dans la même solution).



**Figure III.2 : Mécanisme de corrosion caverneuse [6].**

### III.3.2.3 Corrosion sous contraintes :

La fissuration par corrosion sous contrainte (SCC) est une autre forme de corrosion structurelle qui peut être rencontrée avec les alliages d'aluminium. Lorsqu'un alliage sensible à la corrosion sous contrainte est simultanément soumis à des contraintes mécaniques et à des contraintes Dans un environnement corrosif, les fissures commencent dans une direction perpendiculaire à la contrainte appliquée et se propagent jusqu'à la rupture de la pièce. Deux

mécanismes possibles interfèrent avec la propagation des fissures CSC, la propagation électrochimique et la fragilisation par l'hydrogène (HPF).

### III.3.2.4 Corrosion galvanique :

La corrosion galvanique se produit lorsque deux métaux différents sont immergés dans une solution conductrice en présence d'une certaine différence de potentiel et qu'il y a un flux d'électrons entre les métaux. Cela peut également se produire avec des métaux présentant une hétérogénéité (par exemple, inclusion d'impuretés, particules de tailles différentes, différences de composition des particules ou différences d'application de la force mécanique). Le métal le moins résistant devient l'anode et le métal le plus résistant devient la cathode. La corrosion des matériaux avec moins de résistance à la corrosion est généralement augmentée et l'attaque sur les matériaux avec une résistance à la corrosion plus élevée est réduite. Une différence de potentiel existe entre différents métaux et sert de force motrice pour que le courant circule à travers le corrosif ou l'électrolyte. La corrosion galvanique ne se produit que si les conditions suivantes sont remplies :

- Deux métaux différents doivent être présents
- Les deux métaux doivent être en contact, ou un chemin électriquement conducteur entre les deux doit être présent.
- Il doit y avoir un chemin électriquement conducteur pour que les ions se déplacent de "l'anode" à la "cathode".

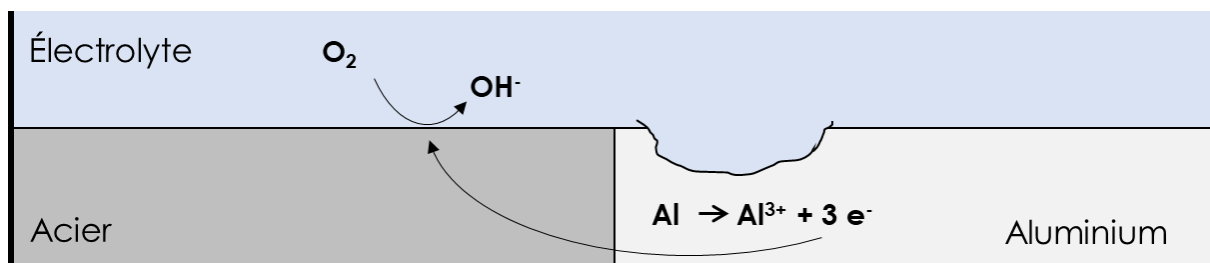


Figure III.3 : Principe de la corrosion galvanique [6].

### III.3.2.5 Corrosion érosion :

La corrosion érosion est le dommage cumulé causé par les réactions de corrosion électrochimique et les effets mécaniques du mouvement relatif entre l'électrolyte et la surface

corrosive. L'érosion peut également se produire conjointement avec d'autres formes de dégradation, telles que la corrosion. C'est ce qu'on appelle l'érosion-corrosion. L'érosion corrosive est un processus de détérioration d'un matériau dû à l'action combinée de la corrosion et de l'usure. Presque tout liquide corrosif en écoulement ou turbulent peut provoquer une corrosion érosive. Le mécanisme peut être décrit comme suit :

- érosion mécanique du matériau, ou couche d'oxyde protectrice (ou passive) à sa surface,
- corrosion accrue du matériau, si la vitesse de corrosion du matériau dépend de l'épaisseur de la couche d'oxyde.

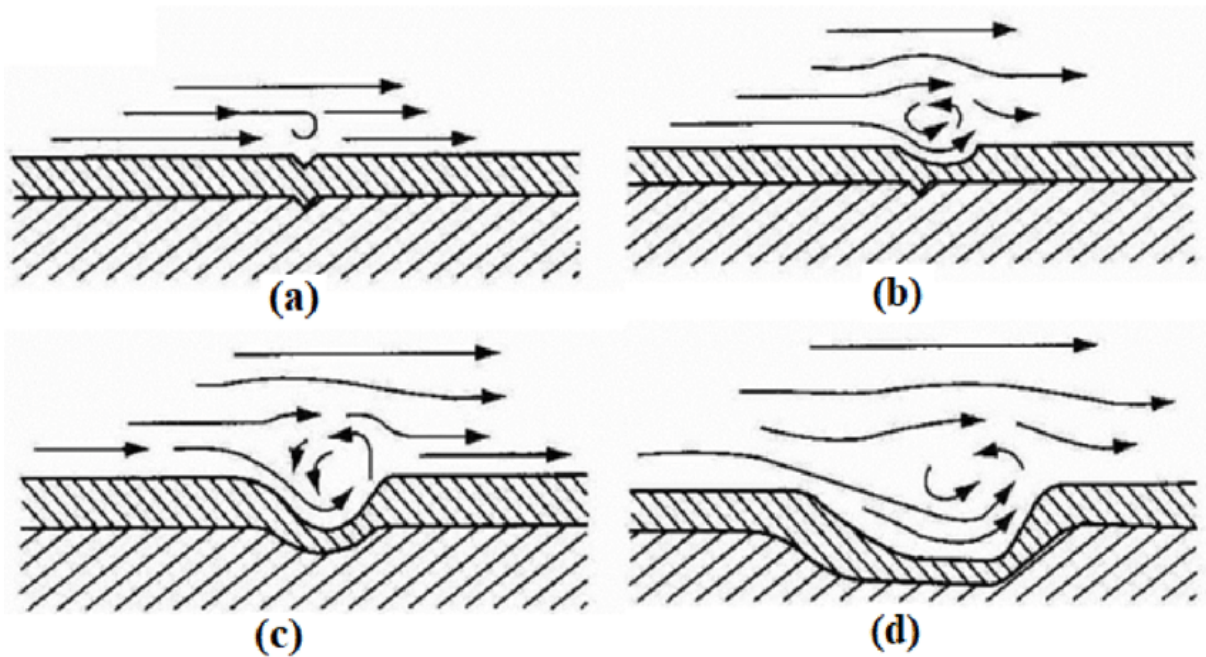


Figure III.4 : Phénomène de la corrosion érosion [7].

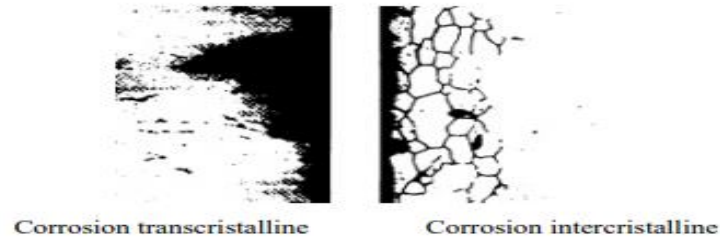
### III.3.2.6 Corrosion trans ou inter cristalline :

Elle peut se propager de deux manières :

- Progresser dans toutes les directions : corrosion transcristalline.
- Emprunter un chemin préférentiel le long des joints de grains : la corrosion inter cristallin.

Ce type de corrosion ne peut être détecté que par inspection micrographique, il peut entraîner une dégradation très importante de propriétés mécaniques et provoquer un

effondrement structurel s'il se propage en profondeur. Elle concerne presque exclusivement les alliages des familles 2000 et 7000. On la retrouve également sur les alliages 5000 chargés en magnésium à plus de 4%. [8]



**Figure III.5 : Corrosion transcristalline et intercrystalline [9].**

### **III.3.2.7 Corrosion feuilletante ou exfoliante :**

La corrosion feuilletante (ou exfoliante), comme la corrosion intergranulaire, est une conséquence du « passé » thermomécanique des pièces. Seul alliage à haute propriétés mécaniques est concerné : ces phénomènes sont liés à la structure métallurgique spécifique de l'alliage laminé. Cette forme de corrosion n'affecte que certains alliages (ceux des séries 2000, 5000 et 7000) pour se développer si les conditions de traitement thermique ou de soudage ne sont pas adaptées. La corrosion feuilletante se caractérise par une déformation locale des couches métal et provoquer l'apparition de cloques à la surface du matériau. C'est une attaque qui se propage généralement entre les particules le long de plans parallèles à la surface, séparés par de fines plaques de métal. Le décollement des particules est dû aux produits de La corrosion formée, qui est plus grande que les espèces originales non corrodées. Le mécanisme de propagation est souvent assimilé à la corrosion intergranulaire préféré par les contraintes causées par les produits de corrosion. Dans certaines Dans ce cas, la propagation est de type Trans granulaire [10].

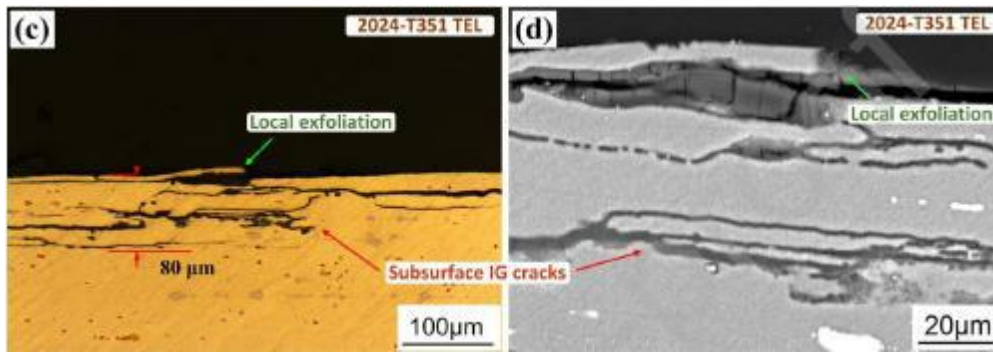


Figure III.6: Corrosion feuilletante [11].

### III.3.2.8 Corrosion à la ligne d'eau :

Cette forme de corrosion concerne les structures métalliques, notamment en acier, à l'état semi-immersé : les zones inondées, très proches de la limite air/eau, peuvent subir une corrosion préférentielle, parfois sévère. Pour l'aluminium, cette corrosion est due à la différence de concentration de chlorure produite par évaporation dans la partie la plus fine du film d'eau mouillant le métal **Fig (III.7)**. Il en résulte une différence de potentiel de dissolution significative entre le bas et le haut du ménisque anodique, donc corrodé.

L'aluminium et ses alliages ne sont pas très sensibles à cette forme de corrosion dans l'eau de mer. Ainsi, la ligne de flottaison des barges, des navires dont la coque n'est pas peinte, n'est pas préférentiellement corrodée dans l'eau de mer. Il en est de même des pieux de soutien et des flotteurs des pontons des ports de plaisance.

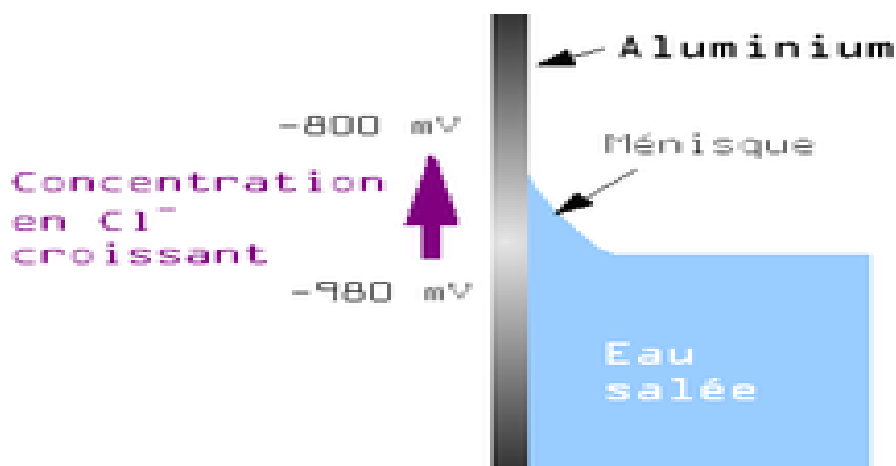


Figure III.7: Corrosion à la ligne d'eau.

### III. 4 facteurs influençant la corrosion de l'aluminium :

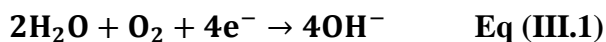
#### III.4.1 Hétérogénéité du métal :

La vitesse de corrosion peut être fortement influencée par la composition du métal, si l'on suppose généralement que le métal pur se corrode plus lentement que l'un de ses alliages. Les métaux à très faibles titres en fer et en silicium (1199) ne sont pas plus résistants à la corrosion atmosphérique que le 1070 ou le 1050. Des titres en fer et en silicium beaucoup plus élevés sont nécessaires ( $Fe > 0,50$  et  $Si > 0,25$ ), comme c'était courant jusqu'à la fin années 1940, la résistance à la corrosion a donc été modifiée [12].

De plus, la présence de traitement thermique, telle que la présence de soudure, accélère la corrosion de la conduite. En effet, des attaques anodiques apparaissent le long du cordon de soudure et peuvent conduire à la perforation du matériau [12].

#### III.4.2 Teneur en oxygène :

L'oxygène est un agent oxydant et un élément corrosif dans le sens où il traverse la cathode en entretenant la réaction cathodique.



Cela a pour effet de favoriser une réaction d'oxydation au niveau de l'anode, c'est-à-dire qu'une corrosion se produit.

Avec l'aluminium, ce n'est pas si simple car la corrosion est dominée par le film d'oxyde naturel, qui a besoin d'oxygène pour s'auto réparer.

#### III.4.3 Température :

La température de l'eau a un triple effet néfaste au fur et à mesure qu'elle s'élève. Il interfère en réduisant la résistivité et le pH, et en augmentant la vitesse des réactions. De plus, une augmentation de la température réduit la solubilité de tous les gaz si la corrosion est contrôlée par la diffusion de l'oxygène, qui est augmentée à mesure que la vitesse de diffusion de l'oxygène augmente en raison de la viscosité de l'eau qui diminue.

Dans le cas de la corrosion de l'aluminium, cela est vrai pour les acides et les bases inorganiques et également dans certains milieux organiques, en particulier lorsque les températures approchent leur point d'ébullition.

En revanche, dans l'eau purifiée, l'eau distillée ou l'eau peu minérale, une augmentation de la température a pour effet de modifier la forme corrosive de l'aluminium en raison du film

d'oxyde naturel qui se forme. Peut réagir avec l'eau pour former une couche protectrice de boehmite. La résistance à la corrosion de l'aluminium dans l'eau dépend de la température.

En eau douce, jusqu'à environ 60-70°C, la tendance à la corrosion par piqûres prévaut. Lorsque la température augmente, la profondeur des piqûres diminue fortement, la densité cependant, peut augmenter dans certains cas. Au-dessus de 70°C et jusqu'à environ 150°C, la tendance à la corrosion par piqûres disparaît progressivement [13].

**Tableau III.1 Température et formes de corrosion de l'aluminium [13].**

<b>Domaine de température</b>	<b>Forme de corrosion</b>
< 100 °C	Corrosion par piqûres (dans les eaux douces, la tendance à la corrosion par piqûres diminue à partir de 60-70°C).
100-150 °C	Corrosion uniforme.
150-250 °C	Corrosion uniforme et corrosion inter cristalline.
> 250 °C	Corrosion inter cristalline avec destruction du métal.

Que ce soit dans l'eau distillée, dans l'eau douce ou dans l'eau de mer, nous avons observé, entre 60-70°C, la formation de couches réfléchissantes plus ou moins colorées avec une structure similaire à celle de la boehmite. L'épaisseur de ces couches d'oxyde augmente avec la température et avec le temps. Ils peuvent atteindre des valeurs de plusieurs micromètres à environ 100°C dans de l'eau distillée.

En général, la résistance à la corrosion de l'aluminium dans l'eau douce à 70-100°C est meilleure qu'à température ambiante. En dessous de 150°C, quelle que soit la nature de l'eau, la corrosion inter cristalline se développe rapidement en surface et en profondeur.

De plus, une augmentation de la température peut modifier le potentiel de dissolution et accélérer la corrosion galvanique [13].

#### **III.4.4 Le potentiel hydrogène (pH) :**

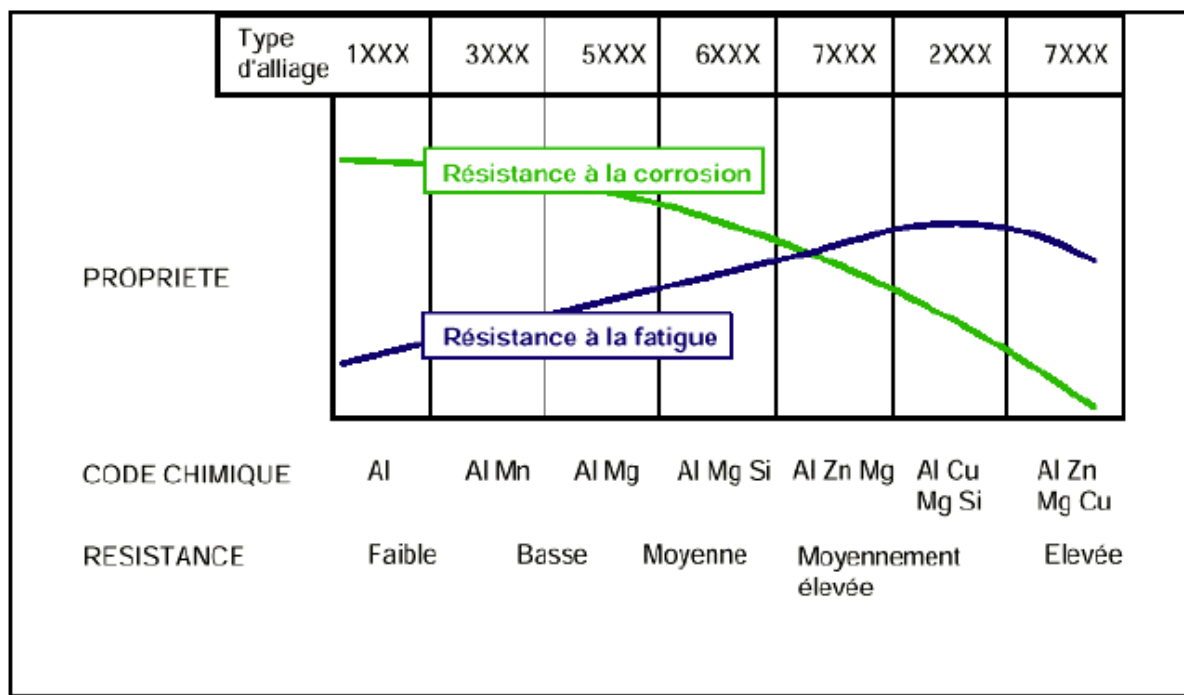
La stabilité du film d'oxyde naturel, qui régit la résistance à la corrosion de l'aluminium, dépend du pH.

L'eau de surface naturelle, non traitée et non polluée a un pH compris entre 6,5 et 7,5. Étant donné que la solubilité de l'alumine est minimale et pratiquement constante sur cette plage de pH, le pH n'est pas un facteur important pour la corrosivité de l'eau naturelle.

#### **III.5 Influence des éléments d'addition sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages :**

Le comportement électrochimique (passivité, sensibilité à la corrosion localisée...) est souvent attribué aux alliages d'aluminium [14]. Cependant la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium est classifiée en fonction des éléments additionnés au métal.

La formation de particules intermétalliques ou la séparation des secondes phases dans l'alliage de la matrice ou autour des fibres (cas du silicium) est responsable de la décomposition rapide de l'aluminium ou, au contraire, du ralentissement de la cinétique de corrosion des matériaux. Par conséquent, la **fig (III.8)** représente la diminution de La résistance à la corrosion des échantillons d'aluminium dans les environnements chlorurés dépend de la série. Il convient toutefois de noter que cet effet néfaste s'accompagne d'une augmentation des propriétés mécaniques [15].



**Figure III.8 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium [13].**

Depuis le début du XXe siècle, de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'effet de la plupart des éléments chimiques sur les propriétés de l'aluminium, en particulier la corrosion. Différents tests ont été mis en œuvre pour mesurer l'importance relative de chacun : observation de l'état de surface géométrique et physico-chimique de l'alliage, détermination de l'emplacement des zones de corrosion (joints de grains, etc.), mesure de la masse perdue dans l'électrolyte, mesure de potentiel de corrosion de l'alliage, L'effet du pourcentage d'éléments ajoutés sur le potentiel de corrosion de l'aluminium pur. Ces études ont permis de classer qualitativement la résistance à la corrosion des alliages selon leurs constituants minoritaires et la nature des impuretés produites, comme le montre le **tab (III.2)**.

	Particule intermétallique / Seconde phase	$E_{corr}$ (mV <sub>ECS</sub> )
particules cathodiques	Si	-170
	Al <sub>3</sub> Ni	-430
	Al <sub>2</sub> Cu	-440
	Al <sub>3</sub> Fe	-470
	Al <sub>6</sub> Mn	-760
particules anodiques	Al	-840
	Al <sub>2</sub> CuMg	-910
	MgZn <sub>2</sub>	-960
	Al <sub>3</sub> Mg <sub>2</sub>	-1150
	Mg <sub>2</sub> Si	-1190
	Al <sub>3</sub> Mg <sub>5</sub>	-1240

**Figure III.9 : Classement des alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la corrosion. Formes de corrosion généralement observées dans ces alliages**

La corrosion des alliages est étroitement liée au potentiel de corrosion de ces composés, puisqu'ils sont à l'origine de micro galvanique et affectent la piqûre de l'aluminium (corrosion localisée). La mesure des potentiels de corrosion des particules intermétalliques est cependant difficile en raison de leur petite taille (<100 µm).

**Tableau III.2 : Classement des séries alliages d'aluminium en fonction de leur résistance à la Corrosion, formes de corrosion généralement observées dans ces alliages [13].**

Série	Éléments d'alliages	Particules intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	$Al_2Mg_2$ , $Al_5Mg_5$	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour Les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	$Al_2Fe$ , $Al_6Fe$ $Al_{12}Fe_2Si_2$	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	$FeSiAl_5$ , $Fe_2SiAl_5$ $Al_5Si_6Mg_2Fe$ , $Mg_2Si$	Piqûres, généralisée,
3000	Mn	$Al_6Mn$ , $Al_6MnFe$	Piqûres, généralisée,
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg Ajout de Cu	$MgZn_2$	Piqûres, généralisée, sous contrainte feuilletante, intragranulaire (avec Cu)
2000	Cu	$CuFeMnAl_6$ , $Al_2Cu$ $Al_2CuMg$	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), feuilletante

Résistance à la corrosion

**-Influence de Manganèse :** L'existence de nombreux composés intermétalliques dans le système binaire Al-Mn induit une distribution de Mn entre la solution solide d'aluminium et les composés intermétalliques. Mn présente l'intérêt de former des composés intermétalliques avec l'aluminium dont le potentiel diffère très peu de celui de la matrice. Le potentiel de l'aluminium augmente lorsque la teneur en Mn en solution solide dans l'aluminium augmente.

**-Influence de silicium :** Le système binaire Al-Si ne présente aucun composé intermétallique et le Si est faiblement soluble dans l'aluminium. Si n'est donc pas allié avec l'aluminium dans les alliages Al-Si contenant plusieurs pourcents de Si sans autre élément d'alliage. Selon Meijers que l'inactivité du silicium serait liée à sa faible conductivité qui limiterait très fortement les processus de réduction envisageables sur un site de potentiel élevé [12].

**-Influence de cuivre :** l'ajout de cuivre à l'aluminium a tendance à rendre le potentiel de corrosion plus élevé. Ainsi les zones riches en cuivre seront cathodiques par rapport aux zones

pauvres. Le système binaire Al-Cu peut provoquer une corrosion galvanique de l'aluminium particulièrement dans un milieu humide. Cela peut s'expliquer par la sensibilité de l'alumine face au sel de cuivre.

**-Influence de magnésium :** dans les alliages Al-Mg, l'oxyde de magnésium se combine avec l'alumine ce qui améliore la résistance à la corrosion. Cela est dû au fait que le magnésium facilite la pénétration d'hydrogène dans le réseau.

**-Influence de zinc :** l'ajout de zinc en solution solide dans une matrice aluminium baisse le potentiel de corrosion. La présence de zinc dans la matrice va tendre à réduire la différence de potentiel entre les précipités intergranulaires et la matrice.

### **III.6 Influence des impuretés sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages**

:

Le fer et le silicium sont les impuretés les plus communes dans les alliages d'aluminium, formant lors de la coulée, des composés intermétalliques de plusieurs microns très stables (solubilité très faible du fer et du silicium dans l'aluminium). Au cours des différents processus de déformation plastique telle que le laminage ou l'ECAP, ces intermétalliques se décomposent et se répartissent en amas très allongés le long de la direction de déformation. Selon un mécanisme de type « PSN » (Particle Stimulated Nucleation), ils peuvent alors servir de sites de recristallisation. La présence de ces composés intermétalliques diminue la résistance à la corrosion de l'alliage.

### **III.7 Caractérisation de la corrosion :**

#### **III.7.1 La chrono potentiométrie (mesure du potentiel de la corrosion libre) :**

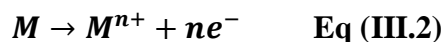
La chrono potentiométrie ou mesure OCP (Open Circuit Potential) est une technique électrochimique qui consiste à mesurer le potentiel libre d'une électrode lors d'une immersion dans un électrolyte sans courant appliqué. Ce potentiel représente un équilibre entre le métal et la solution. En effet, en milieu aqueux, les électrodes peuvent être le siège de nombreuses réactions électrochimiques mettant en jeu la solution et la composition chimique du matériau. Dans ce cas, le potentiel métal/solution a une valeur comprise entre les potentiels d'équilibre des différentes réactions : c'est le potentiel de corrosion  $E_{corr}$  ou potentiel mixte. Elle varie en fonction de l'environnement dans lequel le matériau est immergé et est directement liée à sa vitesse de corrosion. Cela dépend du potentiel de tous les composants de l'alliage.

#### **III.7.2 Test de polarisation :**

La mesure du potentiel de corrosion n'est pas suffisante pour déterminer la résistance à la corrosion d'un métal ou d'un revêtement dans un électrolyte. Il faut aussi déterminer la nature

des réactions qui se produisant à l'interface métal-solution et l'intensité du courant de corrosion, ces informations sont données par la courbe de polarisation  $E=f(I)$  ou  $E=f(\log I)$ . Cette courbe est appelée "courbe de polarisation globale", c'est le résultat de deux courbes de polarisation individuelles. On répète que lors de la dissolution d'un métal dont la surface est le siège de deux réactions :

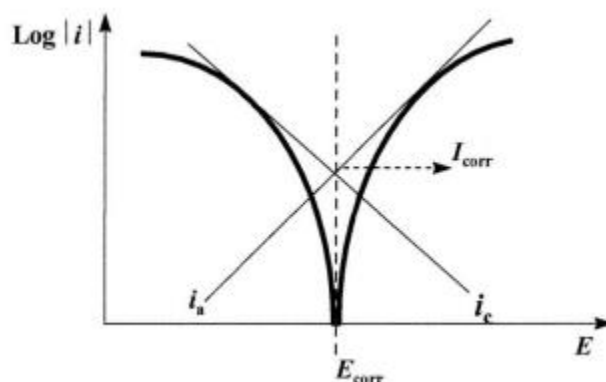
- Une réaction de dissolution d'un métal M de valence (n) :



- Une réaction cathodique de réduction :



On peut déterminer la valeur de l'intensité de courant de corrosion en extrapolant la droite de Tafel cathodique ou anodique ou les deux, jusqu'au potentiel de corrosion.

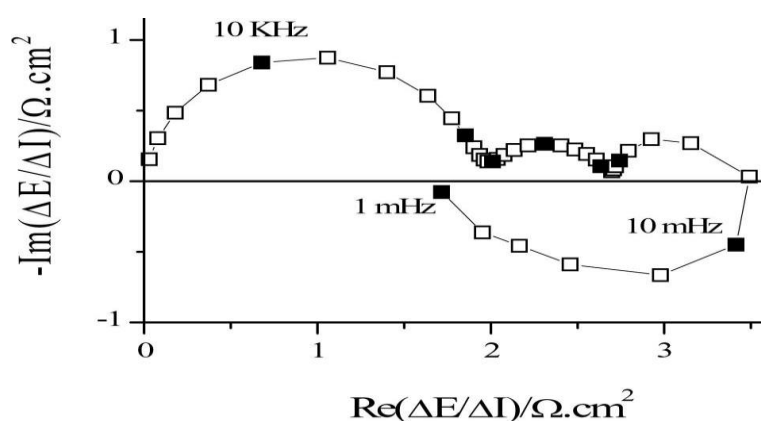


**Figure III.10 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel [16].**

### III.7.3 Test d'impédances électrochimiques :

La technique d'impédances est l'une des techniques de caractérisation électrochimique non-stationnaire largement utilisé dans le domaine de corrosion. Le principe de cette technique consiste à analyser à une perturbation de faible amplitude, le signal est plus souvent sinusoïdal. Une fois que l'interface a atteint un régime permanent, c'est là que les mesures seront effectuées à potentiel de polarisation constant en faisant varier la fréquence d'analyse sur une large gamme de fréquences (typiquement de 50 kHz à 0,001 Hz). Cette mesure est ensuite répétée sur toute la courbe courant-tension dans la plage de potentiel étudiée.

L'impédance contient des informations sur les processus qui se déroulent à l'interface (réactions électrochimiques et chimiques, diffusion, etc.) et sa structure. Tracé dans le plan complexe ( $\text{Re}[Z(f)], -\text{Im}[Z(f)]$ ), la limite haute fréquence donne généralement la résistance de l'électrolyte, et la limite basse fréquence donne la résistance de polarisation (inverse de la pente) (courbe courant-tension) comme montré sur la **fig (III.11)**. Aux hautes fréquences, il y a une boucle capacitive connectée en parallèle à la résistance de transfert de charge et au condensateur à double couche. Aux basses fréquences, on trouve des demi-cercles capacitifs ou inductifs représentant la relaxation des intermédiaires réactifs, les anneaux de diffusion capacitifs sont caractérisés par des sections à  $45^\circ$  par rapport à l'axe réel, une résistance négative dans le cas de la passivation...



**Figure III.11 : Exemple de diagrammes de Nyquist pour les mesures de corrosion [17].**

Les résultats expérimentaux peuvent être interprétés de deux manières. D'une part, on peut rechercher un circuit équivalent avec la même impédance. En revanche, il est possible de rechercher un modèle contenant les équations cinétiques décrivant la réaction et le transport de masse, et après linéarisation de calculer une impédance théorique pouvant être comparée aux données expérimentales.

#### **III.7.4 Test gravimétrique :**

Cette méthode a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et nécessite un équipement simple, mais ne permet pas d'accéder aux phénomènes impliqués dans le processus de corrosion. Son principe repose sur la perte de masse de l'échantillon de surface ( $s$ ), pendant le temps d'immersion  $t$ , dans une solution de corrosion maintenue à température constante. Le taux de corrosion est donné par la relation suivante :

$$V = \frac{m_i - m_f}{st} \quad \text{Eq (III.4)}$$

$V$  : vitesse de corrosion en  $[mg/cm^2.h]$ .

$m_i$  : masse de l'échantillon avant test en  $[g]$ .

$m_f$  : masse de l'échantillon après test en  $[g]$ .

$s$  : surface de l'échantillon exposé au milieu corrosif en  $cm^2$ .

$t$  : temps d'immersion en  $[h]$ .

### **III.7.5 Tests climatiques :**

Dans certaines applications agressives les matériaux peuvent subir une dégradation importante, on peut parler de plusieurs environnements comme (bord de mer, milieu industriel, environnement pollué ...). Il est donc important de caractériser le matériau et d'estimer l'évolution de sa dégradation afin de déterminer une durée de vie.

Pour cela plusieurs tests existent, qui permettent de suivre la résistance à la corrosion des matériaux métallique avec ou sans revêtement. Les tests climatiques les plus utilisés sont :

- Essais thermiques.
- Essais chaleur humide.
- Essais chocs thermiques.
- Essais de vieillissement UV.
- Essais de tenue aux fluides.
- Essais de corrosion au brouillard salin.
- Essais d'étanchéité / Tests IP.
- Essais poussière et vent de sable.

Le principe de ces tests est simple, il consiste à créer un environnement agressive accéléré en fonction des conditions dans une chambre. La durée de l'essai est déterminée en fonction du matériau et/ou de son revêtement, plus la résistance à la corrosion augmente plus la durée du teste augmente et vice versa.

### **III.8 Lutte contre la corrosion :**

#### **III.8.1 la protection par revêtement métallique ou organique :**

C'est une protection passive. En effet, il comprend un revêtement externe qui agit pour créer un effet de barrière électrique entre le métal du tuyau et son environnement. Cependant, ce revêtement n'offre pas une protection absolue et définitive en raison de défauts ou de blessures pouvant survenir lors de l'installation ou pendant la durée de vie de la structure. C'est pourquoi ces risques potentiels sont maîtrisés par la mise en place de protections actives complémentaires.

#### **III.8.2 La protection cathodique :**

La protection cathodique est définie comme une méthode de protection dans laquelle les surfaces anodiques sont rendues cathodiques et le métal est renvoyé dans sa région immunitaire (diagramme de Pourbaix) Dans cette région, à potentiel fixe, le métal ne peut pas être corrodé.

Thermodynamiquement. Il s'agit alors de donner des électrons au métal pour qu'il cesse de s'ioniser dans ce milieu et atteigne un potentiel défini.

#### **III.8.3 La protection anodique :**

La protection anodique est contrôlée par la formation d'un film passif (protecteur) sur une surface métallique en augmentant leur potentiel dans le domaine passif de la courbe de polarisation anodique. Le potentiel est maintenu automatiquement, à l'aide d'un potentiostat.

#### **III.8.4 La protection par l'utilisation d'inhibiteur :**

« Un inhibiteur est une substance qui on diminue la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration » [18].

L'inhibition ralentit les réactions des électrodes telles que le transport de charge ou de masse et en particulier le processus de corrosion. Elle implique l'utilisation de substances chimiques appelées inhibiteurs de corrosion qui, en les ajoutant en petites quantités à un milieu corrosif, réduisent la vitesse de corrosion des métaux en agissant sur l'environnement ou sur la surface métallique.

## Références :

- [1] Gimenez, P., Rameau, J. J. et al, Corrosion, 37, 12, pp. 673-682, 1981.
- [2] Luminita Din-Stirbu, E., Thèse de Doctorat, Comportement à la Corrosion des Alliages d'Aluminium Utilisés dans l'Industrie Automobile pour la Fabrication de Radiateur Chauffage, Génie des Matériaux, Université de Pitesti (Roumanie), p15, 2005.
- [3] Youcef HADJ-ALI, Thèse de Doctorat, Elaboration et Caractérisation de l'Aluminium à Grains Fins, Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, p19, 2022.
- [4] M. Pourbaix, Atlas des équilibres électrochimiques, Gauthier-Villars et Cie Ed, Paris, France, 1963.
- [5] C. Vargel, Corrosion de l'aluminium, Dunod, Paris, France, 1999.
- [6] Axel Gambou-Bosca, Ph.D, Tenue à la corrosion de l'aluminium, Centre de Métallurgie du Québec, 2019.
- [7] Metin Güner et al, Wear and its Effects in Centrifugal Pumps 569-582 vol-29 ,2019.
- [8] FABIEN BELLEGER, Etude et contrôle de la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium 2024 et 7449 par bruit électrochimique émission acoustique. Analyse microstructurale et caractérisation de l'endommagement, Lyon INSA France, 2002.
- [9] J.-P. Baillon & J. M. Dorlor : Des Matériaux.
- [10] Elena Luminița DIN – ȘTIRBU, Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage.
- [11] de Damborenea, "Stress corrosion cracking behaviour of 7989 AlLi alloy at 202 K[ The effect of grain structure," Corrosion Science, p. 10.
- [12] Smith, C.A., The Corrosion Story, Zinc, Lead and Aluminum, Anti-Corrosion, Part 3, Vol. 24, pp.13-15, 1977.
- [13] Vargel, C. Corrosion de l'aluminium, Edition. Dunod, ISBN 2-10-006569-6, 2002.
- [14] Ketcham, S.J., Shaffer, I.S., Exfoliation Corrosion of Aluminum Alloys, ASTM, STP 516, pp.3-16, 1972.
- [15] Triki, E. Phénomènes de la corrosion, Première Ecole Maghrébine de Corrosion, Hammamet, 1990.
- [16] G.BERANGER,,DABOSI, Corrosion et protection des métaux ,Edition cours Toulouse (1982).
- [17] C. Gabrielli, Identification of electrochemical processes by frequency response analysis, Ed. Solartron, page 36.
- [18] NACE, Glossary of corrosion Terms, Materials Protection, 4, 1, 79-80, 1965;

# Chapitre IV

## Chapitre IV : généralités sur le soudage.

### IV.1 Introduction :

Parmi les procédés d'assemblage mécanique, l'assemblage par soudage est le plus utilisé dans la plupart des secteurs industriels (transport, industrie pétrolière et gazière, construction navale, aéronautique, automobile, etc.).

Le soudage est une opération consistant à assembler deux ou plusieurs pièces constitutives d'un assemblage afin d'assurer une continuité entre les pièces à assembler, on utilise la chaleur ou l'énergie mécanique produite par divers procédés de mise en œuvre (combustion de gaz, arc électrique) sous action, pression, etc. Presque tous les métaux existants sont soudés en utilisant une variété de procédés. Il existe deux types de soudage :

- La soudure Autogène : Le métal qui compose le joint est de même nature que les pièces à souder.
- La soudure Hétérogène : Le métal qui compose le joint est de nature différente des pièces à souder.

### VI.2 Soudabilité des alliages d'aluminium :

#### VI.2.1 Définition de la soudabilité :

La définition donnée par l'Organisation Internationale de Normalisation (l'ISO) [1] :

« Un matériau est soudable à un degré donné, par un procédé et pour un type d'application donnés, lorsqu'il se prête, moyennant les précautions correspondant à ce degré, à la réalisation d'une construction entre les éléments de laquelle il est possible d'établir la continuité métallique par la constitution de joints soudés qui, par leurs propriétés locales et les conséquences globales de leur présence, satisfont aux caractéristiques requises et choisies comme bases de jugement. »

A partir de cette définition, on peut distinguer les différents axes de la notion de soudabilité. Ces axes peuvent être classés selon trois niveaux :

- **Soudabilité opératoire** : C'est la capacité physique d'un matériau à assurer une continuité (métallique) par solidification ou diffusion qui est conservée au fur et à mesure de l'obtention de la méthode par le procédé. Un bon exemple d'un problème de soudabilité en service est causé par la présence d'une couche d'oxyde réfractaire et durable à la surface de certains métaux et alliages (par exemple l'aluminium et le magnésium), qui empêche la diffusion et produit une solution continuité pendant la solidification.

➤ **Soudabilité locale :** Ce concept s'intéresse à l'évolution des propriétés du matériau au voisinage même de la soudure sous l'effet des cycles thermiques, mécaniques ou thermomécaniques provoqués par le mode opératoire de soudage utilisé. Par conséquent, les concepts de zone de fusion (ZF), de la zone de liaison (ZL) et de la zone affectée par la chaleur (ZAT) peuvent être introduits. Un bon exemple d'un problème de soudabilité locale est le durcissement martensitique lors du soudage des aciers trempés, qui entraîne la formation de (ZL) et de (ZAT) dans des zones trop minces sujettes à la fissuration.

➤ **Soudabilité globale :** Ce concept prend en compte l'évolution du comportement global de la structure soudée affectée par la susceptibilité à la fissuration (à froid ou à chaud) et la présence de contraintes résiduelles dans la zone soudée. Dans le cas des aciers non austénitiques, un problème typique de soudabilité globale est lié à la rupture fragile de la soudure.

#### **VI.2.2 La soudabilité dans le cas des alliages d'aluminium :**

L'aluminium a des propriétés physiques et chimiques spécifiques qui doivent être connues pour obtenir des assemblages de soudure de bonne qualité. La soudabilité des alliages d'aluminium est conditionnée par plusieurs phénomènes, parmi eux :

- La sensibilité à la fissuration et les modifications structurales apportées par le cycle thermique du soudage.
- Le cycle thermique introduit par certains procédés de soudage a des conséquences sur la microstructure et l'état métallurgique.
- Les températures élevées pendant le soudage détruit le durcissement structural et abaisse plus ou moins fortement la résistance mécanique.
- Une diminution de la résistance à la corrosion visée par certains alliages et/ou par les procédés de raffinement de grains le cas de l'laminage ou l'ECAP.

### **IV.3 Procédés de soudage :**

Il existe de nombreux procédés de soudage dont les principes et la mise en œuvre sont assez différents. Pour certains, les assemblages sont obtenus par fusion locale des éléments à assembler, pour d'autres, la continuité métallique est obtenue par des effets purement mécaniques sans fusion. Les sources d'énergie utilisées dans le domaine du soudage sont chimiques, électriques ou mécaniques [2].

Ces procédés sont classés selon :

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

#### **IV.3.1 Procédés faisant intervenir la fusion locale sans action mécanique :**

La fusion locale des pièces à assembler peut-être décrite en distinguant le mode de chauffage utilisé et le mode de protection du métal en fusion face à l'action chimique de l'atmosphère environnante. On peut les classer comme suit :

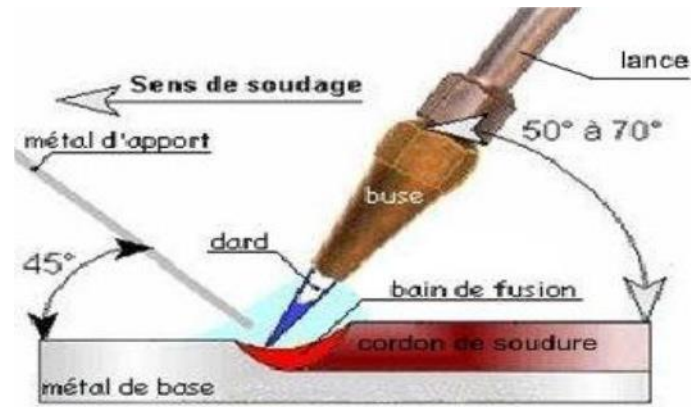
- Le soudage à la flamme.
- Le soudage à l'arc.
- Le soudage aluminothermique.
- Soudage par faisceau à haute densité d'énergie.

##### **IV.3.1.1 Le soudage à la flamme :**

Le soudage à la flamme (procédé 311 selon l'ISO 4063) est connu par le soudage oxyacétylénique (OA), ce type est réalisé à partir de combustion d'un mélange de comburant (l'oxygène  $O_2$ ) et un gaz combustible (généralement l'acétylène  $C_2H_2$ ), en créant une flamme qui peut atteindre une température située entre 2850°C et 3200 °C à l'extrémité d'un chalumeau lorsque ce mélange est correctement équilibré [3].

Le métal d'apport (baguette de fil dressé de 0,8 à 4 mm de diamètre et 500mm de longueur) est amené manuellement dans le bord de fusion (**fig IV.1**).

L'énergie calorifique de la flamme fait fondre localement la pièce assemblée et le métal d'apport pour former un bain de fusion et un cordon de soudure après refroidissement. Le soudage O.A est limité à des pièces aussi fines que 5 mm.



**Figure IV.1 : Soudage oxyacétylénique [4].**

#### **IV.3.1.2 Le soudage à l'arc :**

La soudure à l'arc est utilisée pour l'assemblage des pièces en acier, en fer, en inox ou même en fonte ayant une épaisseur supérieure à 1,5 mm.

La formation d'un bain de métal en fusion est assurée par un arc électrique fonctionnant en courant continu ou alternatif provoquant la fusion de l'électrode de métal d'apport présentant des propriétés mécaniques, chimiques et physiques à proximité du métal de base des deux pièces à souder, cette fusion assure une liaison après refroidissement des éléments entre eux.

L'arc doit être facilement amorcé et maintenu de manière stable par un réglage adéquat de la tension d'amorçage et l'utilisation d'émetteurs dans le revêtement ainsi que par une protection avec une atmosphère gazeuse appropriée pour favoriser le processus de soudage. Ce processus comprend des types de soudage qui utilisent un arc électrique comme source de fusion qui sont :

- Le soudage avec électrode enrobées ;
- Le soudage avec électrode réfractaire TIG ;
- Le soudage semi-automatique sous protection gazeuse : MIG ou MAG.
- Le soudage vertical sous laitier.

#### **IV.3.1.3 Soudage aluminothermique :**

Ce procédé est largement utilisé en soudage de rails ferroviaires (procédé 71 selon ISO 4063), il consiste à couler le métal d'apport dans un moule fermé en matériau réfractaire autour des deux pièces à assembler qui sont placées face à face à une distance (0.5 jusqu'à 2 mm).

Ce procédé de soudage est réalisé par une réaction chimique exothermique entre de la poudre d'aluminium et des particules d'oxyde de fer.

#### **IV.3.1.4 Soudage par faisceau à haute densité d'énergie :**

Le procédé de soudage par faisceau à haute densité d'énergie (FHDE) se caractérise par une très forte concentration de densité d'énergie au point d'impact sur le joint des pièces à assembler.

Le soudage est pris en charge automatiquement par de grandes machines qui permettent la vitesse, la précision et l'assemblage de pièces dans différents matériaux et dans des géométries complexes, de sorte que la qualité de la soudure est excellente.

#### **IV.3.2 Procédés faisant intervenir la fusion locale avec action mécanique :**

Dans ces procédés, la chaleur utilisée pour former un bain de métal en fusion est fournie par une combinaison de l'effet Joule du courant alternatif de haute intensité et de la pression ponctuelle.

L'énergie nécessaire de la fusion des métaux est obtenue par effet Joule, caractérisée par :

$$W = R \cdot I^2 \cdot t \quad \text{Eq (IV.I)}$$

(W) : quantité d'énergie engendrée par l'effet joules en joules.

(R) : la Résistance en Ohm.

(I) : intensité en ampère.

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

Ces procédés ne nécessitent aucun apport extérieur (soudure autogène) car la résistance de contact entre les surfaces des deux pièces assemblées permet la mise en place de cette fusion dans le plan. Ces processus sont :

- Le soudage par point.
- Le soudage à la molette.
- Le soudage par bossage.
- Le Soudage en bout par étincelage.

#### IV.3.2.1 Le soudage par point :

Le soudage par points (procédé 21 selon ISO 4063) est un procédé d'assemblage discontinu par recouvrement. Cette norme s'applique aux assemblages sous forme de tôles d'une épaisseur de 0,5 à 10 mm pour tous les matériaux conducteurs (acier, aluminium...).

Ces deux pièces sont placées et maintenues dans leurs positions d'assemblage respectives, puis insérées dans les ailes de la machine. L'actionnement de la pédale associée au soudeur déclenchera chacun des points pour effectuer un cycle complet composé des étapes suivantes [5] :

- L'accostage : les électrodes viennent appuyer et comprimer les pièces à souder.
- Le soudage : le passage du courant dû à la fermeture de circuit crée une zone fondue par l'effet de Joule.
- Le forgeage ou le maintien : effet de maintenir pour laisser le temps à l'assemblage de refroidir.
- Le remonté : la fin du procédé les électrodes s'écartent et reviennent au repos.

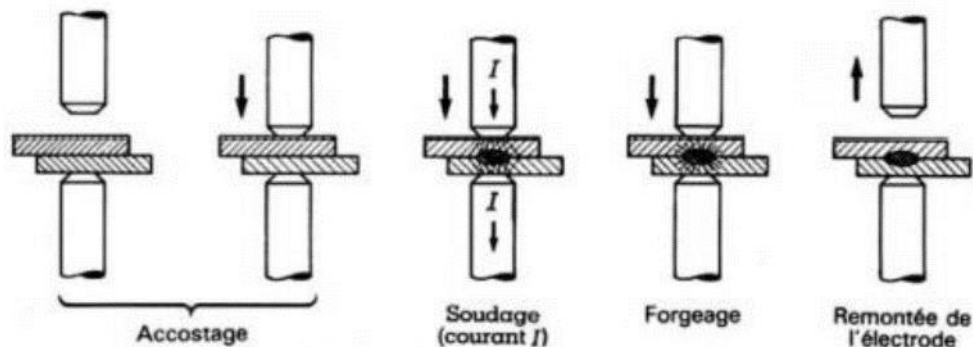


Figure IV.2 : Soudage par point [4].

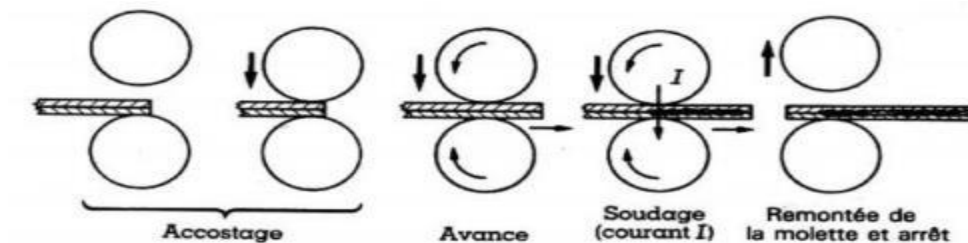
#### IV.3.2.2 Le soudage à molette :

Le soudage à la molette diffère du soudage par points en ce qui concerne les électrodes conventionnelles qui sont remplacées par des disques ou des cordons de cuivre, dont la rotation permet de créer des soudures superposées, continues et étanches.

Ce procédé de soudage est réalisé progressivement et en continu, intégrant serrage des plaques et passage de courant, sur toute la longueur du cordon à fabriquer (procédé 22 selon ISO 4063).

Le cycle de soudage (**Fig IV.3**), comporte des phases similaires à celles du soudage par point :

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



**Figure IV.3 : Soudage à la molette [5].**

#### IV.3.2.3 Le soudage par bossages :

Le soudage en bossage a le même principe que le soudage par points, la seule différence c'est que le trajet du courant est zoné par des reliefs appelés convexités créés sur une même surface de deux pièces à souder (**Fig IV.4**).

Ces bossages assurent la régularité des conditions de contact des pièces et facilitent ainsi la régularité de la quantité d'énergie dégagée à l'endroit de la jonction réalisée (procédé 23 selon ISO 4063).

On retrouve dans ce cycle les mêmes phases précédemment examinées en soudage par points :

- L'accostage : les deux outillages se serrent sur les pièces préalablement positionnées.
- Le soudage : le courant passe et s'accompagne de l'affaissement des bossages.
- Le forgeage : à la fin duquel les outillages s'ouvrent.

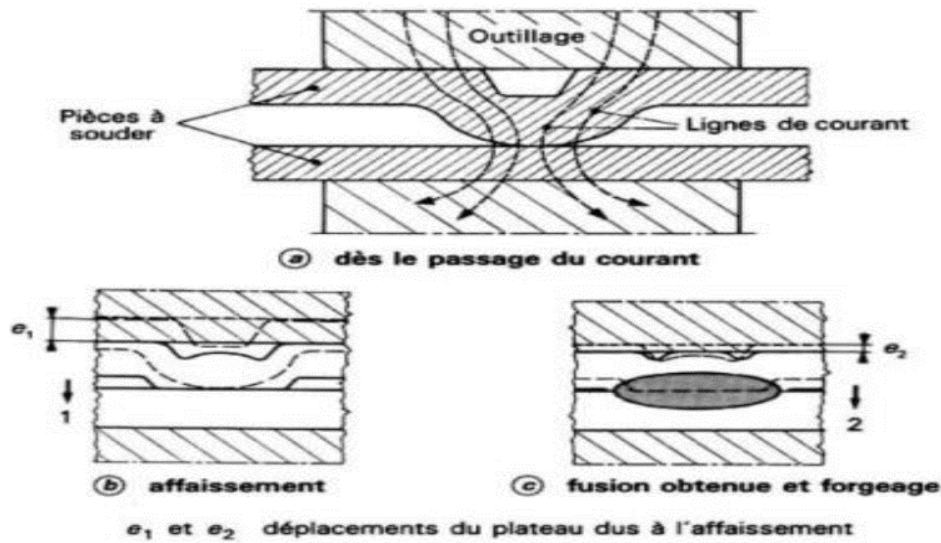


Figure IV.4 : Soudage par bossage [6].

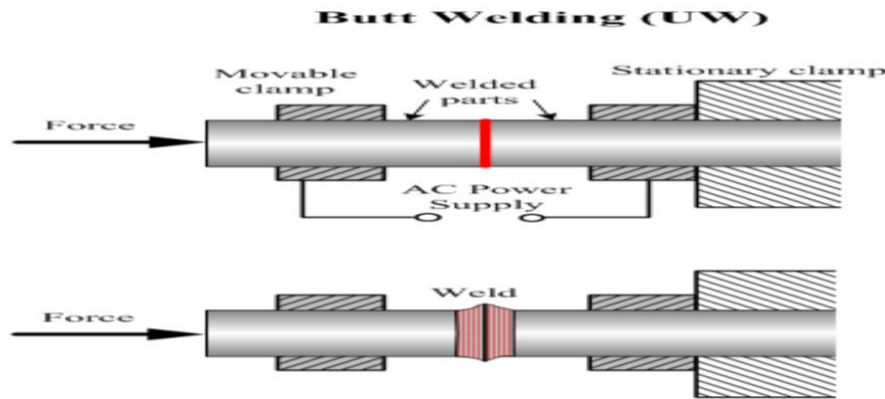
#### IV.3.2.4 Le soudage en bout par étincelage :

Le soudage bout à bout par étincelage est utilisé pour assembler des pièces (barres, tubes ou autres produits...) qui ont la même section. Les pièces à assembler sont mises en contact dans des pinces en cuivre dont l'une est fixée sur un chariot alternatif parallèle à l'axe de soudage (figure IV.5).

Les deux sont d'abord portés à la température de soudage par effet Joule en raison des courants élevés traversant ces surfaces, pour finir la soudure une force de forgeage est appliquée (procédé 24 selon ISO 4063).

Le cycle se déroule automatiquement de la façon suivante [7] :

- Avance et accostage : le chariot mobile entre en mouvement pour rapprocher les pièces qui viennent en contact sous un effort déterminé.
- Soudage : le courant passe, déclenché par la fermeture du contacteur primaire du circuit de puissance, et porte les parties en contact à la température de soudage.
- Forgeage ou maintien : exercé par l'effort du chariot mobile et à la fin duquel les mâchoires s'ouvrent en permettant le retour au repos du chariot.



**Figure IV.5 : Soudage en bout par étincelage [7].**

#### **IV.3.3 Procédés faisant intervenir une action mécanique sans chauffage :**

Les processus d'assemblage de ces pièces sont réalisés par chevauchement et uniquement par action mécanique (pression) à l'aide d'outils spéciaux et ils comprennent :

- Le soudage par ultrason.
- Le soudage par explosion.

##### **IV.3.3.1 Le soudage par ultrason :**

Un procédé similaire au soudage par friction, dans lequel les pièces à souder sont à 2 mm d'épaisseur généralement, qui sont superposées sous pression modérée entre une enclume et une sonotrode qui transmet à l'une d'elles des vibrations ultrasonores à haute fréquence (de 20 à 100 kHz) parallèles à la surface de contact [8].

Ainsi, suffisamment de micro-glissements se produisent pour expulser les matières étrangères et permettre une liaison parfaite entre les pièces sans fusion.

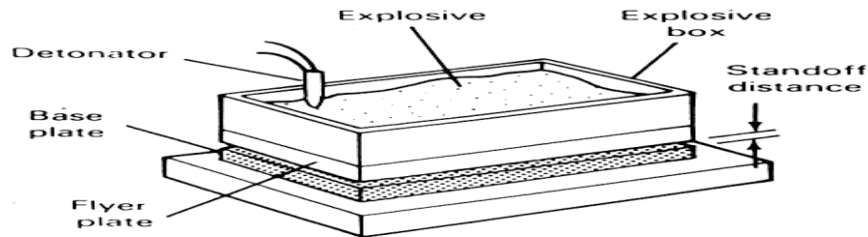
La conversion de l'énergie électrique en énergie vibratoire est assurée par un convertisseur magnétostrictif (procédé 41 selon ISO 4063).

##### **IV.3.3.2 Le soudage par explosion :**

Ce processus est utilisé pour créer des assemblages par superposition en raison de collisions à haute énergie de deux surfaces qui se chevauchent ou sont inclinées l'une par rapport à l'autre.

L'explosif est placé sur une plaque ou tôle supérieure (couverture métallique) placée à une certaine distance de la base à laquelle la plaque sera soudée, lors de l'éclatement (commandé par titulaire), une onde de choc se propage à travers la plaque et provoque une forte

pulvérisation du métal de revêtement, qui établit une liaison sur toutes les surfaces entre ces deux pièces (procédure 441 selon ISO 4063).



**Figure IV.6 : Soudage par explosion [9].**

#### **IV.3.4 Procédés faisant intervenir un chauffage sans fusion avec action mécanique :**

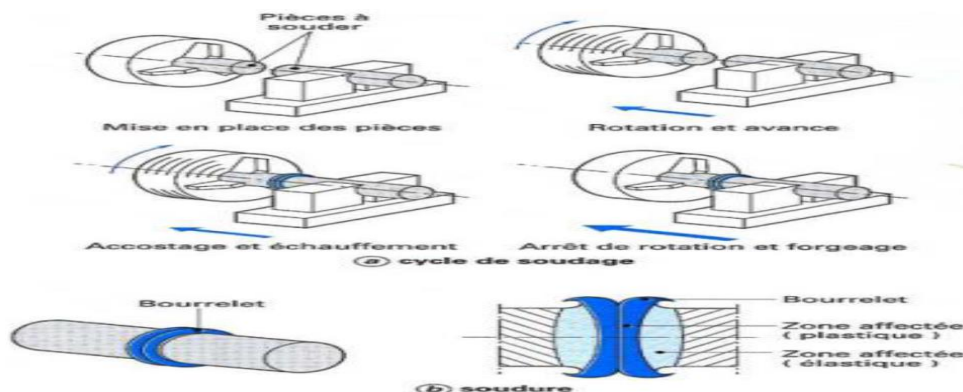
Le chauffage peut se faire par apport d'une chaleur externe ou par action mécanique (frottement). Les efforts d'application doivent être soigneusement contrôlés.

Ces procédés exigent donc des équipements très spécifiques et elles regroupent [10] :

- Le soudage par friction.
- Le soudage par diffusion.

##### **IV.3.4.1 Soudage par friction :**

Le soudage par friction (procédé 42 selon ISO 4063) est un procédé de soudage bout à bout de pièces cylindriques (soudage rotatif) ou de tôles (soudage par agitation) où la rotation est presque exclusivement le moyen utilisé pour produire du frottement.



**Figure IV.7 : Soudage par friction en rotation [11].**

Dans le soudage par friction rotative (**Fig IV.7**), l'une des deux pièces tourne par rapport à l'autre. L'application de la force axiale assure le frottement et donc l'échauffement des

extrémités des pièces à souder. Lorsque la température requise est atteinte, la rotation s'arrête et en même temps augmente la force de forgeage axiale pour former la soudure.

#### IV.3.4.2 Le soudage par diffusion :

Le soudage par diffusion consiste à assembler deux pièces à l'état solide en faisant diffuser les atomes à travers le plan de jonction, assurant une continuité du métal sous une pression adaptée et une température suffisante proche du point de fusion avec nécessité de nettoyage et de préparation de surface par polissage pour assurer un contact parfait et d'éliminer tout type de contamination pouvant interférer avec la diffusion (procédé 45 selon ISO 4063).

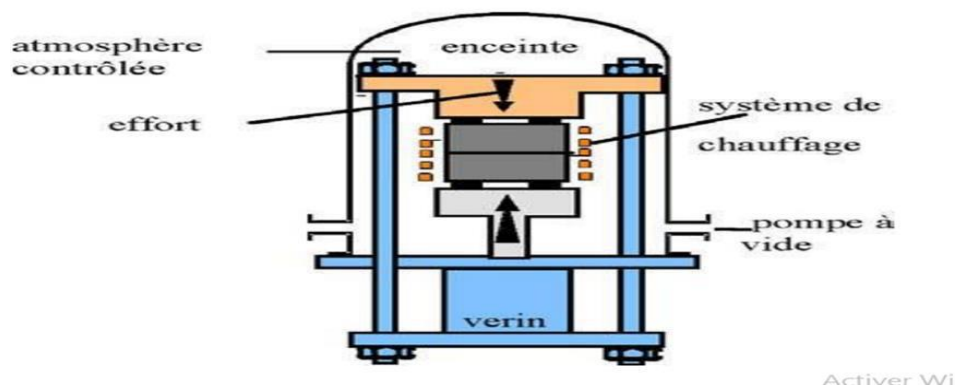
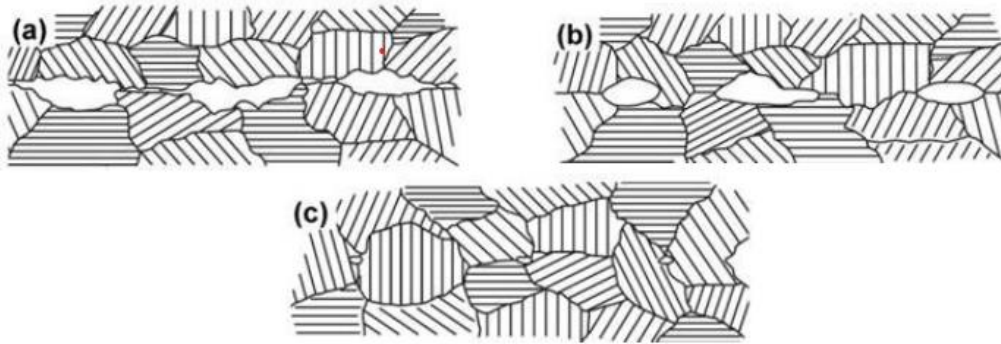


Figure IV.8 : Schéma de principe de soudage par diffusion [12].

#### IV.3.4.2.1 l'effet de la procédure sur la microstructure :

La formation de l'interface lors de soudage par diffusion est établie par la fermeture des porosités et des joints de grains traversant l'interface. Cette fermeture passe par deux stades, schématisé dans la figure IV.9 :

- Accostage et déformation plastique localisée au niveau des aspérités, (**Fig IV.9.a**),
- Puis résorption lente des cavités isolées par fluage et diffusion, (**Fig IV.9.b**). Cette étape est accompagnée par une croissance généralisée des grains permettant un franchissement de l'interface par les joints de grains, (**Fig IV.9.c**).



**Figure IV.9 : Représentation schématique des différents stades du soudage par diffusion d'un assemblage homogène [13].**

Le processus de franchissement des interfaces est alors associé à la croissance des grains. A cause de la température de soudage élevée, le franchissement de l'interface, par un processus de croissance de grains, intervient simultanément à la fermeture de la porosité. La migration des joints de grains peut se produire à travers la porosité résiduelle. Les pores se retrouvent alors isolés à l'intérieur d'un grain, à condition que la vitesse de migration des joints de grains soit plus rapide que celle des pores. La fermeture de ces pores est accélérée par la force appliquée durant ce procédé [14].

#### **IV.3.4.2.2 influence de la température, pression et le temps sur la qualité de soudage :**

Lors de soudage par contact, il faut prendre compte de plusieurs paramètres (la température, la pression, le temps de maintien...), dans le but d'obtenir un soudage de qualité qui dépend lui-même de la diffusion entre les deux surfaces à souder. Par exemple le temps de diffusion il est étroitement lié à la température, à la pression [15], mais dans le cas où la pression augmente, le temps nécessaire pour obtenir une diffusion efficace diminue.

#### **IV.3.4.2.3 L'évolution des propriétés mécanique :**

Dans le cas des d'écrouissage ou de déformation par la technique ECAP, le soudage des alliages d'aluminium peut entraîner une diminution de la résistance mécanique du métal de base à cause d'une température supérieure à  $350^{\circ}$  qui peut être atteinte à l'intérieur de la pièce pendant le processus de soudage. Il n'est pas possible de retrouver les propriétés mécaniques obtenues par écrouissage par traitement thermique après soudage. Selon l'application, il est important de tenir compte de cette perte résistive.

**Tableau IV.1 : La numérotation des procédés de soudage pour la représentation symbolique des dessins est conforme à la norme ISO 4063 [16].**

1	Soudage à l'arc		3	Soudage aux gaz
11	Électrode fusible sans protection gazeuse		311	oxyacétylénique
111	électrode enrobée		4	Soudage par pression (à l'état solide)
13	Sous protection gazeuse avec fil-électrode fusible		41	par ultrasons
131	MIG		42	par friction
135	MAG		45	par diffusion
14	Sous protection gazeuse avec électrode réfractaire		441	Par explosion
141	TIG		5	Soudage par faisceau
15	Au plasma		51	par faisceau d'électrons
2	Soudage par résistance		52	par faisceau Laser
21	par points		7	Autres procédés de soudage
22	à la molette		71	Par aluminothermie
23	Par bossage		72	vertical sous laitier
24	en bout par étincelage			

#### IV.4 Effet des paramètres de soudage :

La structure et le mode de croissance du grain dépendent de l'apport de chaleur linéaire. La croissance des grains devient très rapide et produit une texture grossière avec un apport calorifique accru.

Les paramètres de soudure contrôlent la forme, la taille et la structure des zones chauffées de la soudure. L'énergie nécessaire pour faire fondre le métal dépend de paramètres tels que la puissance et la vitesse de soudage, qui contrôlent la vitesse de refroidissement.

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

Ces paramètres affectent également les contraintes thermiques induites sur la soudure et conduisent à la formation de contraintes résiduelles et de déformations géométriques [17].

Par exemple, en soudage par fusion, ou par rotation par friction, les principales régions constitutives de la soudure sont :

##### IV.4.1 Zone fondue ou (métal fondu) :

C'est la zone chauffée au-dessus de la température du liquide. Le bain fondu est similaire à un système de coulée en ce que le métal de base servant de moule provoque la solidification du métal fondu par un processus de séparation, qui commence au niveau des

parois du moule provoquant la germination puis la croissance. La structure originale du métal de base est modifiée par la fusion et la solidification.

#### **IV.4.2 La zone de liaison (ZL) :**

La zone marque la limite entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement.

#### **IV.4.3 Zone affectée thermiquement (ZAT) :**

C'est le domaine où la température atteinte est comprise entre celle du solide et une température plus basse mais suffisamment élevée pour permettre des réactions ou des transformations à l'état solide, en modifiant la structure du métal de base.

#### **IV.4.4 Le métal de base (MB) :**

C'est une partie d'un matériau qui n'a subi aucune modification microstructurale. D'autre part, bien que d'un point de vue métallurgique ne change pas, (MB) est l'endroit où les contraintes résiduelles latérales et longitudinales se concentrent en fonction du degré d'étanchéité de la soudure. Dans le cas du soudage par contact à haute température, on ne parle que de la zone de soudage.

### **IV.5 La métallurgie de soudage de l'aluminium :**

#### **IV.5.1 Cas du soudage avec métal d'apport :**

La métallurgie du soudage présente une caractéristique différente de la métallurgie classique, qu'il s'agisse d'élaboration ou de traitement thermomécanique, par les faits suivants [18] :

- D'un point de vue thermique, le soudage se caractérise par des temps de chauffage et de refroidissement beaucoup plus courts. Si dans la métallurgie classique l'unité de temps est l'heure, alors dans le cas du soudage c'est la seconde : ce phénomène se caractérise donc par un déséquilibre dû à la forte variation de température aussi bien lors du chauffage que du refroidissement.

- Du point de vue de l'évolution métallurgique (combinaison métal de base et métal d'apport), le soudage se différencie de la métallurgie conventionnelle par le fait que le phénomène se produit étape par étape et est lié aux conditions de soudage (taux de dilution, protection du bain de soudage, courant de soudage). Tension d'arc, vitesse de soudage, etc.).

- Du point de vue de l'opération de coulée, du fait que la solidification se fait par étapes et implique l'assemblage de plusieurs pièces. Cette brève introduction montre que les phénomènes métallurgiques dans le cas du soudage sont à la fois complexes et spécifiques, et que si des connaissances en métallurgie que nous avons qualifiées de classiques sont nécessaires pour l'aborder, il ne suffit pas d'avoir des connaissances suffisantes en métallurgie du soudage.

#### **IV.5.2 Cas du soudage sans métal d'apport :**

La métallurgie du soudage dans le cas du soudage sans métal d'apport est dominée par des phénomènes se produisant lors du traitement thermique et de la fusion du métal ou de l'alliage tels que la diffusion, la recristallisation, etc.

#### **IV.6 Défauts de soudage dans l'aluminium :**

La porosité est l'un des principaux défauts rencontrés dans le cas du soudage de l'aluminium. Ce phénomène est dû au fait que l'hydrogène ne peut pas s'échapper du métal liquide et est alors piégé dans la microstructure après refroidissement.



**Figure IV.10 : Porosité.**

**IV.6.1 Porosités localisées :**

Sont s'observées :

- Au début du grain lorsque la vitesse n'est pas stable ;
- Aux endroits avec des agents de contamination locaux (graisse, humidité).

**IV.6.2 Porosités alignées :**

Ces pores sont dus à la forme du joint et sont liés à un manque de pénétration. Dans les soudures d'angle, elles sont causées par des impuretés gazeuses au fond de la soudure d'angle.

**IV.6.3 Porosités uniformément réparties :**

Ces pores sont généralement liés à la dissolution de l'hydrogène dans le bain fondu.

L'hydrogène dissous provient :

- De la décomposition dans l'arc de produit organique (graisse) ou d'humidité ;
- Gaz protecteur avec impuretés ;
- La présence d'hydrogène dans le métal de base ou le métal d'apport.

## Références :

- [1] A. Michel, « Pièces mécaniques soudées - rappels et définitions », Techniques de l'Ingénieur, vol. BM, no. 5185, 2006. – Cité pages 33, 34, 44 et 45.
- [2] Régis BLONDEAU. ‘‘Métallurgie et mécanique du soudage’’ .Edition LAVOISIER ,PARIS .pp23 .
- [3] Principaux procédés du soudage, description, démarche d'évaluation et prévention des risques. <https://www.slideshare.net/> consulté le 04/03/2017.
- [4] <http://www.ep-c.fr/services-industriel/le-soudage/131-soudage-oxyacetylenique.html> .consulté le 04/03/2017.
- [5] Roland CAZES. ‘‘Soudage par résistance’’ , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp3.
- [6] Roland CAZES .‘‘Soudage par résistance’’ , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp12.
- [7] Roland CAZES .‘‘Soudage par résistance’’ , techniques d'ingénieur , travail des matériaux – assemblage .Article B7720.pp16.
- [8] Régis BLONDEAU. ‘‘Métallurgie et mécanique du soudage’’ .Edition LAVOISIER ,PARIS .pp47
- [9] Amal BAHIJ - Hamza BENBOUBADDI, ‘‘ SOUDAGE PAR EXPLOSION’’ ,[http://documents.tips/documents/soudage-pa explosion.html](http://documents.tips/documents/soudage-pa-explosion.html).consulté le 28/03/2017.
- [10] Régis BLONDEAU. ‘‘Métallurgie et mécanique du soudage’’ .Edition LAVOISIER ,PARIS . pp45.
- [11] Roland CAZES. ‘‘Soudage par friction’’ , techniques d'ingénieur, travail des matériaux – assemblage. Article B7745.
- [12] Gerard, M. (s.d.). Soudage-diffusion hétérogène assiste par friction malaxage cas du couple Al/Fe. Ecole Centrale de Nantes.
- [13] Y. Bienvenu, Assemblage par diffusion (soudage ou brasage), Tech. Ing. M747 (2010) p11.
- [14] H.H. Yu, Z. Suo, An axisymmetric model of pore-grain boundary separation, J. Mech. Phys. Solids. 47 (1999) 1131–1155.
- [15] ATASOY E, KAHRAMAN N. Collage par diffusion de titane commercialement pur sur de l'acier à faible teneur en carbone à l'aide d'une couche intermédiaire d'argent. Caractérisation des matériaux, 2008, 59 : 1481–1490.
- [16] INTERNATIONAL STANDARD ISO 4063, ‘‘ Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers ’’. Third edition 1998-09-01.

[17] FERDINAND C, Mise en œuvre et caractérisation d'assemblages soudés par procédés TIG et laser de tôles d'alliages de titane réfractaires, thèse doctorale de l'institut national polytechnique de Toulouse, novembre 2005.

[18] Serdyuk G B, Experimental investigation of the stability limits of carbon welding arc in a transverse magnetic field, IZ vestiga Kievskogo Politechnikogo Instituta, 1995, Vol 16.

# Chapitre V

## Chapitre V : Techniques expérimentales

### V.1 Le matériau étudié :

Dans notre étude nous avons utilisé un alliage d'aluminium série 6063, il se compose principalement des éléments d'addition comme le magnésium et le silicium. Il contient aussi d'autres éléments d'addition comme : le cuivre, du manganèse et d'autres éléments en plus petite quantité.

L'analyse de la composition chimique a été effectuée chez (Algal+) situé à M'Sila, Algérie qui est spécialisée dans la transformation d'aluminium. À l'aide d'un spectromètre à émission optique (**fig V.1**) :



**Figure V.1 : Spectromètre à émission optique.**

Les résultats obtenus confirment que l'alliage étudié est de nuance 6063. Le (**tab V.1**) représente la composition chimique de notre l'alliage d'étude :

**Tableau VI.1 : Composition chimique de l'alliage étudié.**

<b>Eléments</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>
<b>Teneur en masse (%)</b>	<b>0.604</b>	<b>0.195</b>	<b>0.014</b>	<b>0.017</b>	<b>0.446</b>	<b>0.022</b>	<b>0.004</b>
<b>Eléments</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sn</b>	<b>Na</b>	<b>Al</b>	
<b>Teneur en masse (%)</b>	<b>0.001</b>	<b>0.0007</b>	<b>0.004</b>	<b>-0.002</b>	<b>0.011</b>	<b>98.691</b>	<b>//</b>

## V.2 Présentation de la technique ECAP :

Les propriétés de la microstructure déformée sont influencées par divers paramètres, dont la déformation totale appliquée et le mode de fonctionnement qui lui est associé, comme le nombre de passages dans la filière, le type de route, ainsi que les caractéristiques du matériau (tels que sa structure cristalline, l'énergie de défaut d'empilement, sa résistance mécanique).

Toutes ces propriétés interagissent de différentes manières, donc lorsqu'elles sont combinées avec des facteurs expérimentaux tels que les valeurs des angles du canal  $\Phi$  et  $\Psi$ , la vitesse et la température d'extrusion.

La matrice utilisée présente une section personnalisée, doté d'un canal de diamètre 12 mm et d'une longueur de 42 mm, le canal change de direction à 35 mm de profondeur avec un angle de  $90^\circ$ .

## V.3 Réalisation de la matrice, du canal et poinçon :

On a commencé cette partie par la réalisation d'un schéma sur le logiciel SolidWorks, qui va nous faciliter la conception de cette dernière.

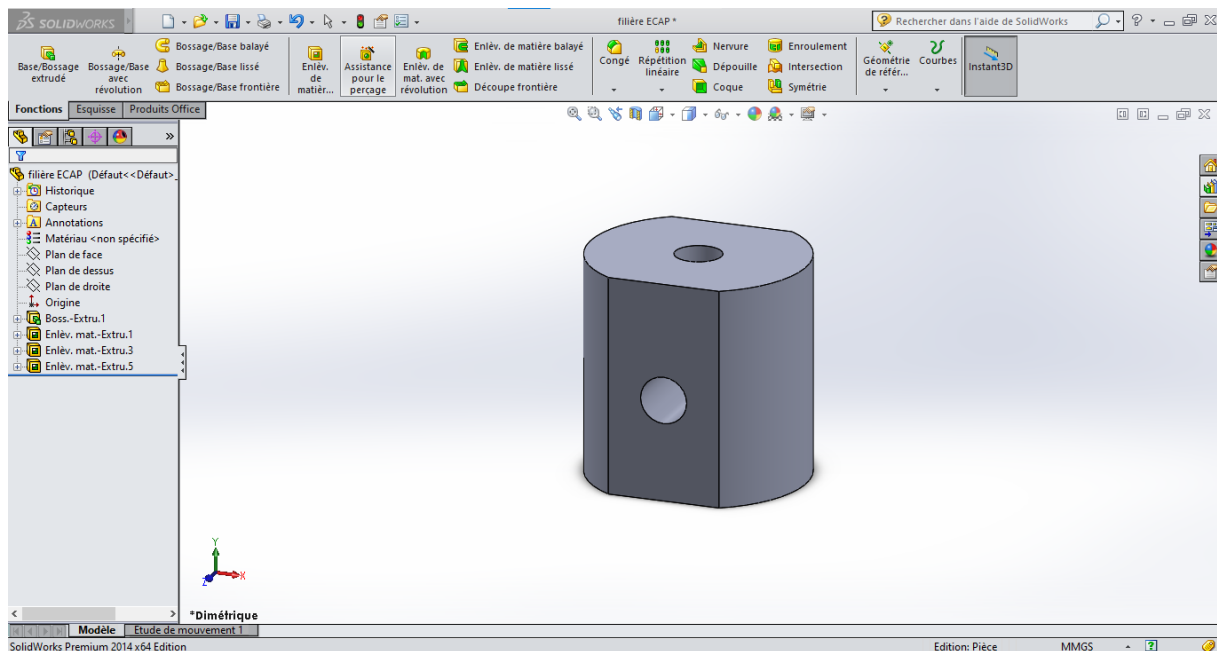


Figure V.2: Schéma de la matrice ECAP sur SolidWorks.

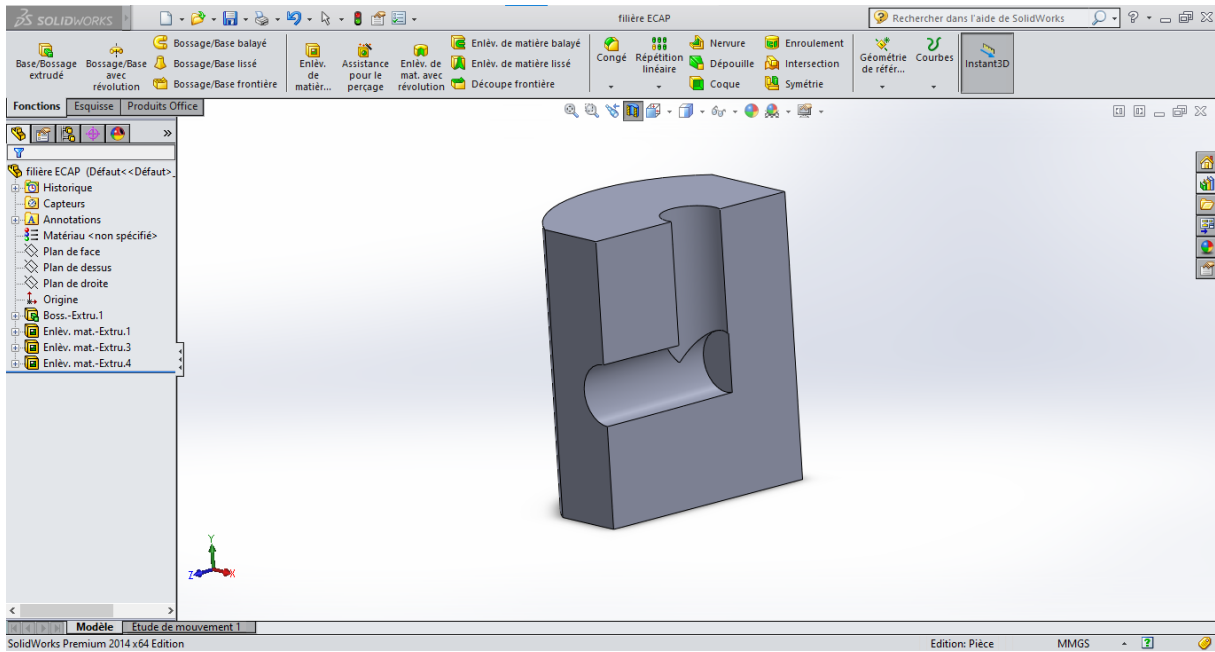


Figure V.3 : Schéma du canal.

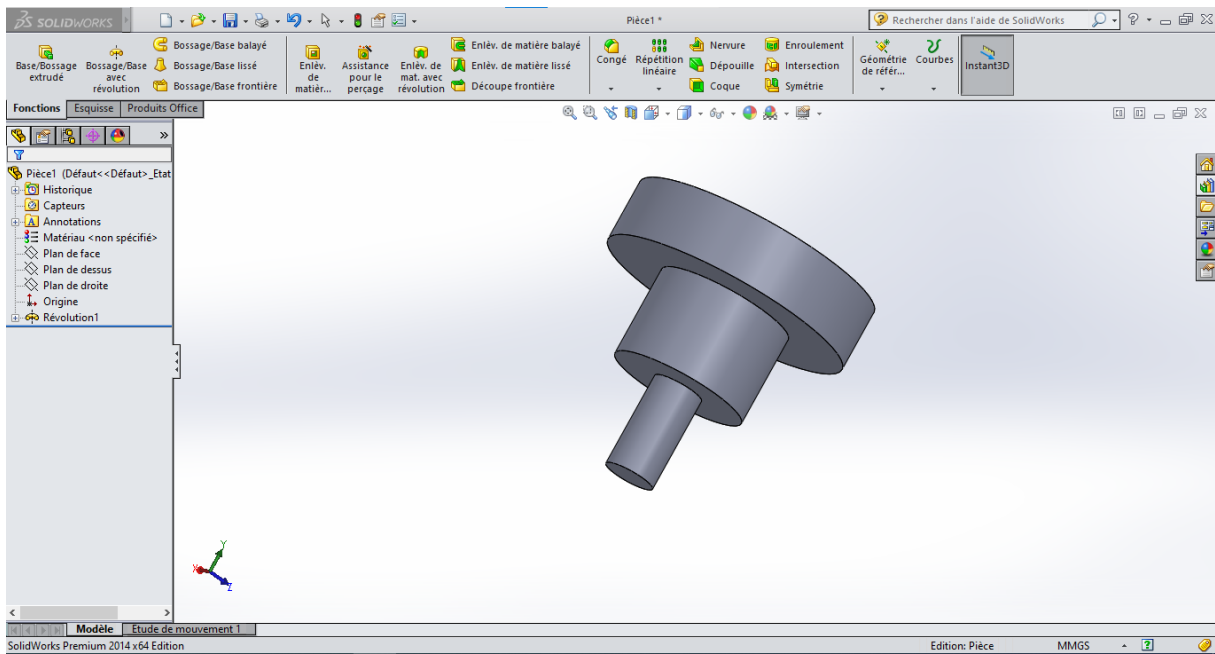
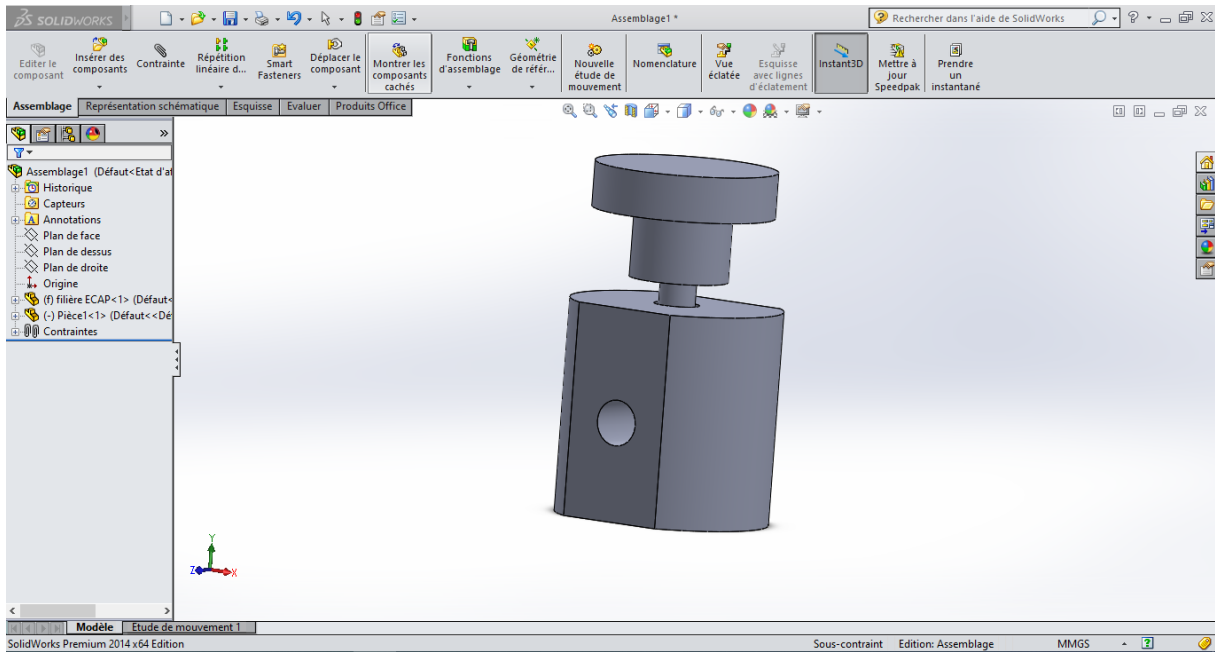


Figure V.4 : Schéma du poinçon sur SolidWorks.



**Figure V.5 : Assemblage poinçon- matrice.**

L'usinage de la matrice, le canal, et le poinçon a été fait au hall technologique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou à Oued Aissi.

### V.3.1 La matrice et le canal :

La matrice et le canal ont été réalisés par un acier dure de nuance XC48 dans le but supporter les contraintes appliquées par-là, durant notre processus de déformation sévère.

Nous avons commencé la réalisation du mécanisme, pour la déformation sévère, par le fraisage, nous avons commencé par aplatir les deux faces du matériau de forme cylindrique, par la suite nous avons percé le canal d'extrusion en changeant son orientation avec un angle  $90^\circ$  après une longueur de 35 mm le diamètre du canal est de 12 mm (**Fig.V.6**).

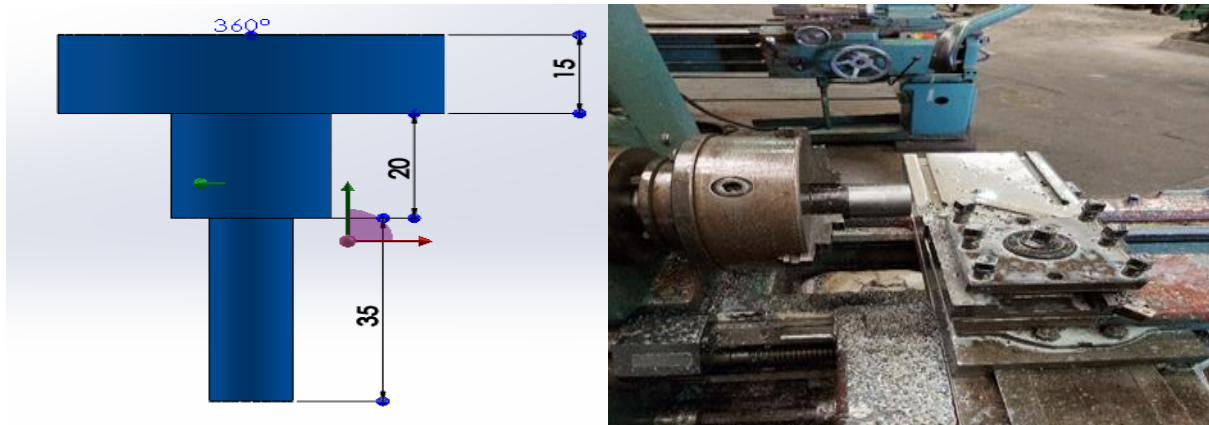


**Figure V.6 : Plan de coup et dimension de la filière.**

### V.3.2 Poinçon de pression :

Notre poinçon de pression est sous la forme cylindrique. Ce piston peut supporter de fortes contraintes, ce qui facilité la déformation des éprouvettes.

Le piston de compression fabriqué en tournage avec l'acier Z200 de dureté élevée, sa longueur est de 35 mm et son diamètre est de 12 mm (**Fig. V.6**). Le piston comporte une tête lui permettant de résister aux contraintes.



**Figure V.7 : Plan de coup et dimension de poinçon.**

### V.4 La presse de manipulation :

Durant nos essais, on a utilisé une presse pour essais de compression du béton se trouvant au niveau du laboratoire de tests mécaniques du département de génie civil de l'UMMTO, qui est composée en deux partie la partie fonctionnelle et la partie de manipulation. La partie fonctionnelle est composée, d'un bras mobile et d'un bras fixe (**Fig. V.9**), par contre la partie de manipulation représente un tableau de commande de la presse (**Fig. V.10**). Cette presse est commandée manuellement à partir du tableau de commande, peut exercer une force allant jusqu'à 1000 KN.

:



**Figure V.8 : La presse.**



**Figure V.9 : Partie fonctionnelle de la presse.**



**Figure V.10 : La partie de manipulation commande de la presse.**

### V.5 Protocol de l'ECAP :

On prend une éprouvette de l'alliage étudié, et nous appliquons les opérations suivantes :



**Figure V.11: Les éprouvettes et la graisse utilisés.**

- a) On lubrifie l'éprouvette, le poinçon et le chemin de déformation à l'intérieur de la matrice avec une graisse.
- b) Insérez l'éprouvette dans le canal.
- c) Posez le poinçon de pression dans le canal.
- d) Mettre le dispositif entre les deux bras de la presse Nous avons réduit la dimension des éprouvettes jusqu'à 20 mm pour qu'elles puissent traverser le canal.

### V.6 Les problèmes rencontrés durant les expériences :

Lors de notre expérience, on a rencontré plusieurs problèmes :

#### a) Le gonflement des éprouvettes :

Le gonflement des éprouvettes est probablement dû au fait que le diamètre des éprouvettes est égal à celui du canal. Cette situation nous empêche d'effectuer une deuxième passe pour l'échantillon.

#### b) Endommagement et blocage des poinçons :

Ces phénomènes sont dus à la haute pression exercée sur le piston atteignant environ 200 KN, et à la dureté insuffisante du piston. Ce problème nous a fait perdre plusieurs éprouvettes.

**c) Endommagement du canal de la filière :**

L'usure du chemin de déformation de la matrice qui est causé par le phénomène de l'usure à cause du frottement du poinçon et les parois de la matrice, ceci dit la dureté de la matrice n'est pas suffisante pour résister aux contraintes appliquées.

**V.7 Préparation des échantillons pour l'observation microscopique, le test de dureté et le test de corrosion :**

On commence par le découpage ; enrobage ; polissage et l'attaque chimique.

**V.7.1 Découpage des échantillons :**

Les échantillons obtenus après déformation ont été découpés à l'aide d'une scie à métaux. Lors de cette opération, la coupe doit être la plus précise possible.



**Figure V.12: Découpage des éprouvettes à l'aide d'une scie à métaux.**

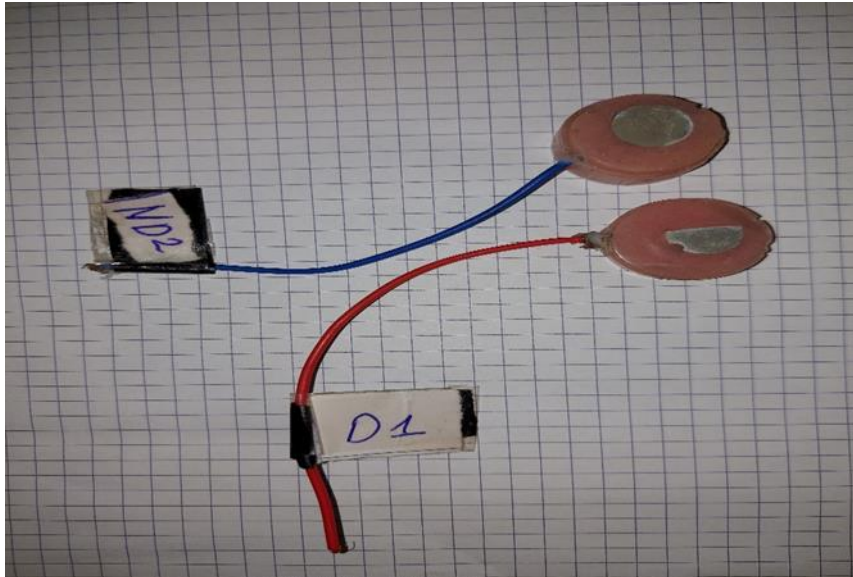
**V.7.2 Enrobage des échantillons :**

Les échantillons seront connectés à un fil conducteur pour les utiliser dans le teste d'immersion.



**Figure V.12 : Procédure de d'enrobage des échantillons.**

Les échantillons prélevés nécessitent un enrobage à froid par une résine époxy dans un moule plastique. Cette opération facilite la réalisation de différents tests comme la dureté et l'observation et permet aussi de délimiter la surface de contact entre les échantillons et la solution durant les tests d'immersion (**Fig. V.13**).



**Figure V.13 : Les échantillons après enrobage.**

### V.7.3 Polissage des échantillons :

Les échantillons ont subi un polissage mécanique à l'aide du papier abrasif de granulométrie variant entre 100 et 4000. Par suite une finition à l'aide de l'alumine, en suspension après 24 heures de sa préparation, permet d'obtenir une surface proche du miroir. Car le lubrifiant utilisé durant le polissage mécanique, est l'eau potable, et l'eau de préparation de l'alumine en suspension est l'eau potable. L'eau potable comporte des duretés.



**Figure V.14: La machine utilisée pour le polissage des échantillons.**

### V.7.4 L'attaque chimique :

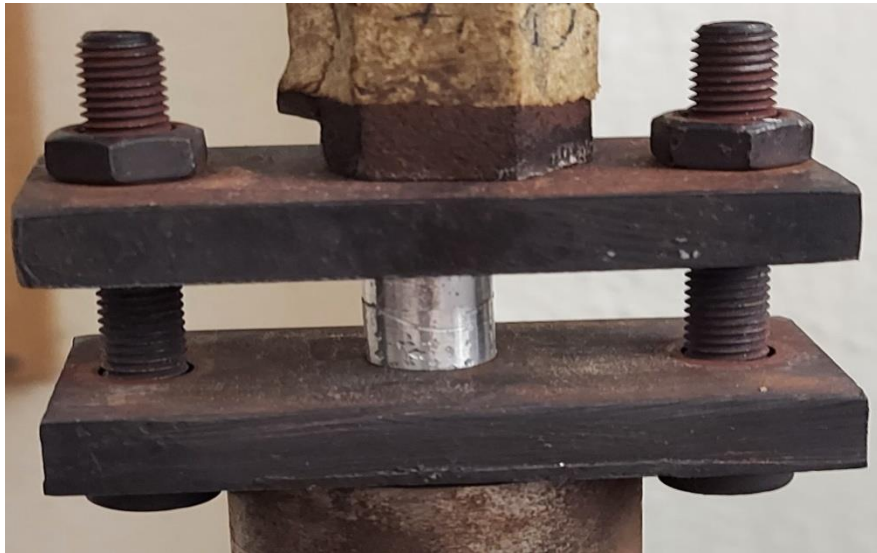
L'observation des échantillons au microscope optique nécessite une attaque chimique pour révéler les constituants de sa microstructure, pour cela nous avons utilisé le réactif de Keller de composition suivante :

- Acide fluorhydrique (HF) : 2 ml
- Acide chlorhydrique (HCl) : 3ml
- Acide nitrique (NHO<sub>3</sub>) : 5 ml
- Eau distillée (H<sub>2</sub>O) : 180 ml

## V. 8 Soudage des échantillons :

### V.8.1 Mécanisme de serrage :

Un mécanisme qui est composé de deux lames en acier pour ressorts percées aux deux extrémités afin de serrer deux échantillons entre eux, en contact l'un sur l'autre. Les deux lames sont fixées par 2 vis écrous d'usage mécanique voir la figure (**Fig. V.15**).



**Figure V.15: Dispositif de soudage par contact.**

### V.8.2 Paramètres de soudage :

Le procédé utilisé est le soudage par contact sous contraintes mécanique et thermique, les moyens mis en place sont :

- un four électrique à chambre horizontale.
- machine de traction/ compression.



**Figure V.16 : Four électrique**



**Figure V.17 : Presse hydraulique**

**V.8.3 Conditions de soudage :**

Les conditions de soudage sont résumées dans le tableau en dessous :

**Tableau V.2 : Les paramètres de soudage.**

<b>Conditions</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Température en (°C)</b>	600
<b>Temps de maintien en (S)</b>	7200
<b>Compression en (KN)</b>	30

**Le soudage a été effectué pour deux types d'échantillons :**

- **Echantillons 1** : échantillon vierge non déformé
- **Echantillons 2** : échantillon déformé par ECAP

## **V.9 Traitements thermiques :**

### **V.9.1 Recuit :**

On a choisi une température de recuit de 600°C, et un temps de maintien de deux heures et un refroidissement lent, dans le Four.

### **Le recuit à été effectué pour deux types d'échantillons :**

- **Echantillons 1** : échantillon non déformé
- **Echantillons 2** : échantillon déformé par ECAP

## **V.10 Caractérisation électrochimique :**

### **V.10.1 Potentiel libre de corrosion :**

Le potentiel de corrosion est le potentiel d'un métal par rapport à un électrolyte donné. Il n'est pas uniquement caractéristique au métal mais dépend des conditions expérimentales, à savoir de la nature, de la concentration, de la température, de l'agitation des réactifs ainsi que de l'état de surface du métal. Le potentiel de corrosion tend généralement vers une valeur fixe représentant une passivation.

Pour la mesure du potentiel de corrosion libre nous avons effectué le test de Chrono potentiomètre. Ce test consiste à plonger une électrode de travail (l'alliage étudié) dans un électrolyte (La solution corrosive) et à suivre l'évolution de son potentiel en fonction du temps avec ou sans courant électrique. En circuit ouvert ( $i = 0$ ), l'électrode métallique prend un potentiel par rapport à la solution, appelé potentiel de circuit ouvert, également appelé potentiel d'abandon ou potentiel de corrosion libre. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence. La (**Fig. V.17**) suivante schématise le montage pour la mesure du potentiel libre de corrosion :

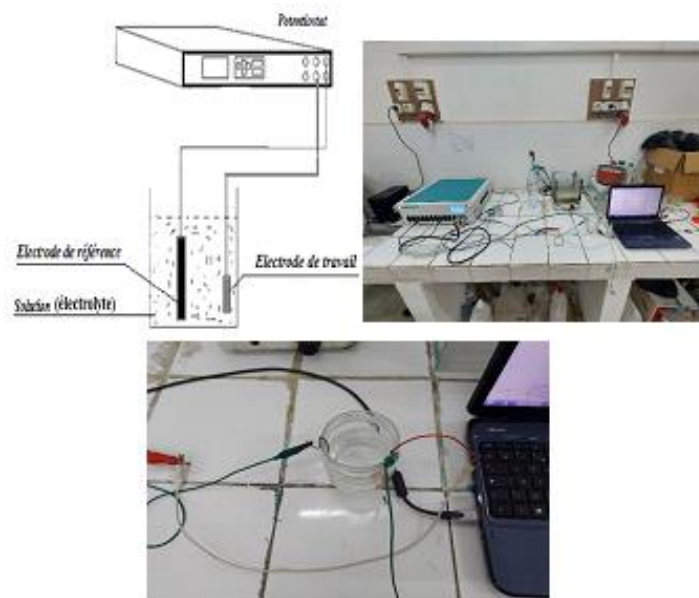


Figure V.18 : Le schéma et le matériel utilisé pour l'OCP.

La Fig. V.19 montre plusieurs comportements de potentiel de corrosion dans différents milieux électrolytiques, on peut constater suivant les allures (a à d) :

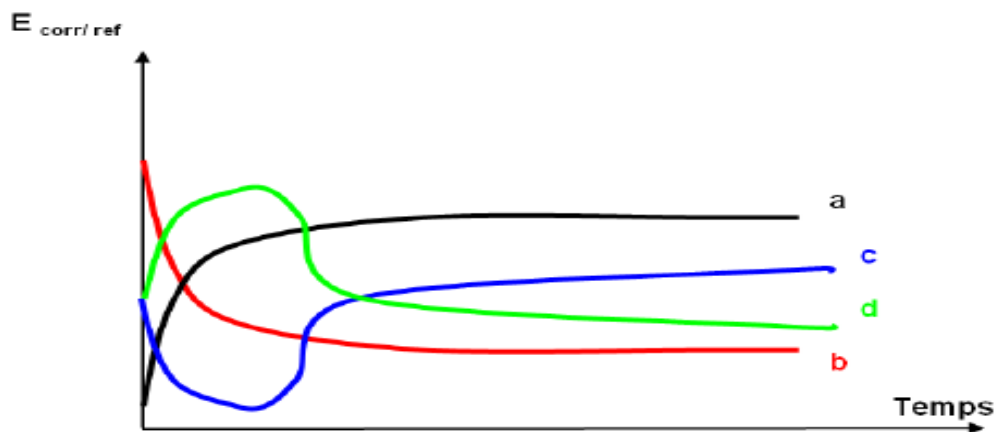


Figure V.19 : Courbe de potentiel libre de corrosion pour un matériau dans différents milieux (électrolyte).

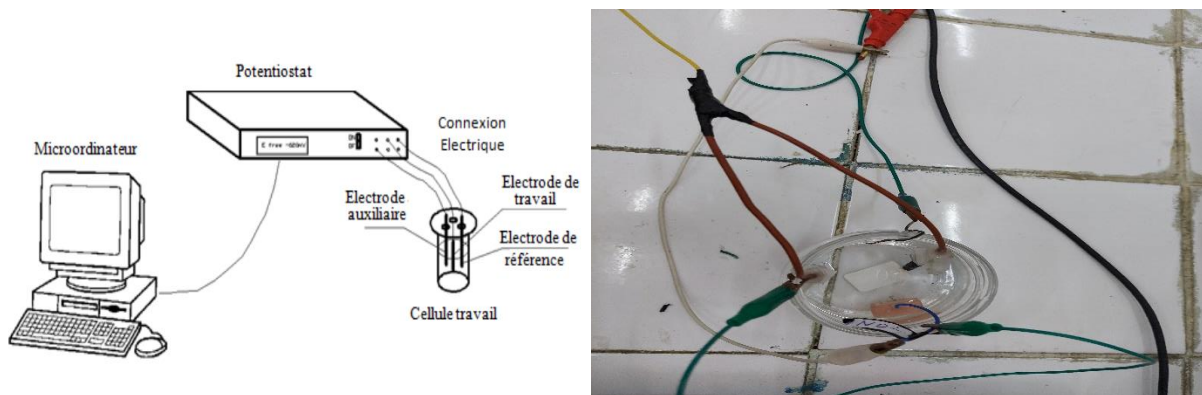
- ❖ a – Le potentiel de l'électrode est de plus en plus noble dans le temps (cathodique), il y a une passivation de la surface ;
- ❖ b – Le potentiel est de moins en moins noble dans le temps (anodique), il y a une dissolution (attaque) ;
- ❖ c – La passivation du métal intervient après une attaque continue du métal ;
- ❖ d – C'est le cas d'un film protecteur préexistant avant l'immersion qui disparaît.

Dans notre cas d'étude, des mesures d'OCP d'une durée allant d'une heure jusqu'à 6 jours ont été effectuées. La distance entre l'électrode de travail et l'électrode de référence a été respectée, pour tous les tests de mesure du potentiel de la corrosion libre. Les paramètres de montage de notre expérience sont comme suivants :

- **Electrode de travail** : il s'agit des échantillons à étudier, dans notre cas, ce sont des échantillons en aluminium série 6063, ayant subi ou non une déformation sévère par ECAP à 90° et enrobé à froid. Seulement une surface plane de l'échantillon est en contact avec l'électrolyte.
- **Electrode de référence** : nous avons utilisé l'électrode d'argent Ag/AgCl en contact direct avec l'électrolyte
- **L'électrolyte** : c'est un bain artificiel (environnement), avec une composition et une température connue. L'électrolyte a été sélectionné en fonction de l'objectif de la recherche. Dans notre étude, l'électrolyte était composé de 0,3 % de NaCl.

### V.10.2 Teste de polarisation :

Pour réaliser ce teste nous avons utilisé l'électrode de travail en (aluminium), l'électrode de référence (Ag/ AgCl) et la contre électrode en deux électrodes en graphites, les quatre sont immergés dans une solution électrolytique 0,3 % de NaCl et connectées à un potentiostat assisté par ordinateur.



**Figure V.20 : Dispositif expérimental des tests de polarisation.**

Les courbes  $E = f(i)$ ,  $E = f(\log i)$ , sont tracées à l'aide d'un logiciel NOVA. Le traçage de ces courbes permet donc de voir l'évolution de la densité du courant de l'électrode de travail en fonction du potentiel.

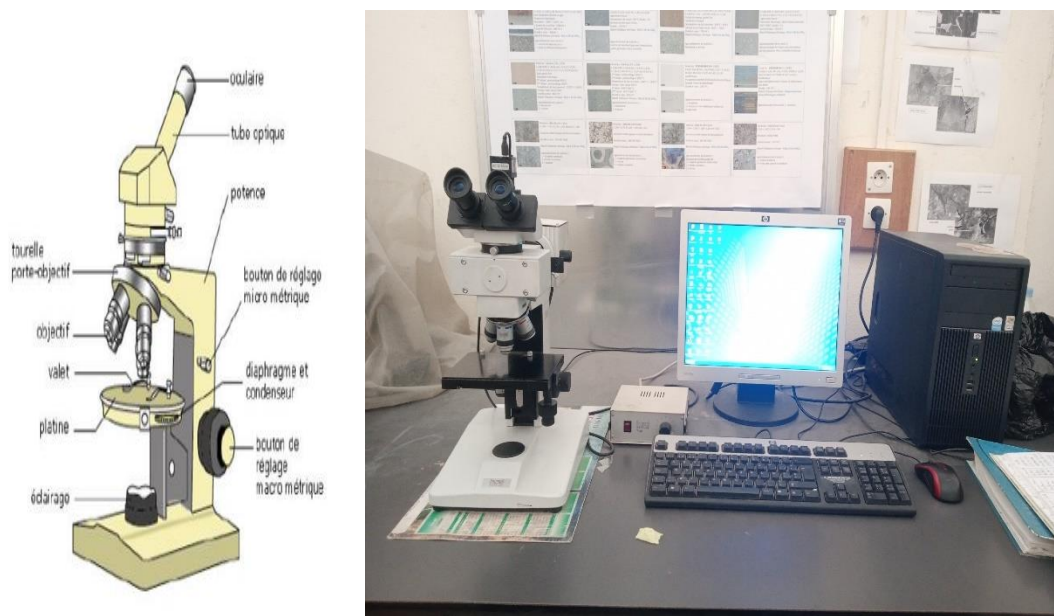
Nous avons effectué les premiers tests de polarisation après une heure d'OCP pour tous les échantillons, en suite après 6 jours de corrosion.

## V.11 Caractérisation microstructurale :

### V.11.1 Observation au microscope optique :

Pour suivre l'évolution de la microstructure avant et après déformation, ainsi que la morphologie de la corrosion après immersion dans une solution de NaCl à 0,3% pendant différents temps, des observations en microscopie ont été effectuées.

Un microscope est un instrument optique qui agrandit l'image d'un objet. Il se compose d'un banc optique, une partie devant le sujet pour l'éclairage et l'autre partie derrière le sujet pour l'observation. Une table rigide et qui comporte tous les dispositifs de centrage optique. (Fig. V.21).



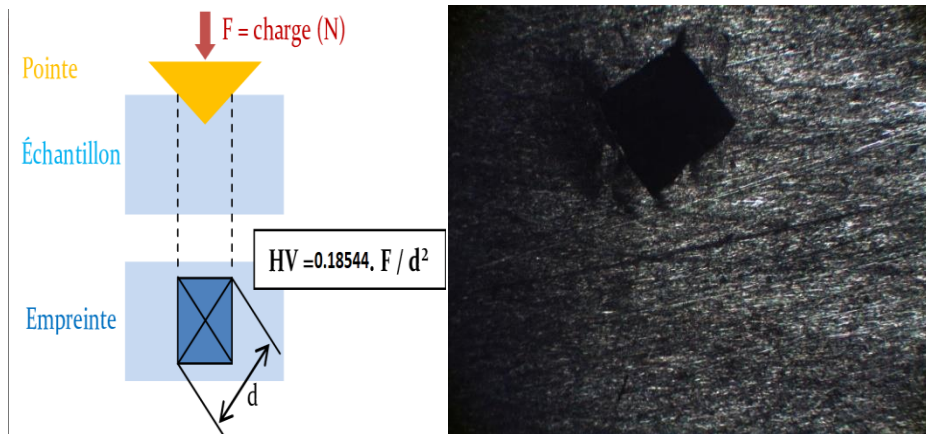
**Figure V.21 : Microscope optique.**

Durant cette étude Nous avons utilisé un microscope optique de marque Hund Wetzlar équipé d'une caméra vidéo de type UEYE permettant l'acquisition des micrographies sur ordinateur. Ce microscope est équipé de trois objectifs de grossissement 10, 20 et 40 fois et de deux oculaires avec un grossissement de 10 fois.

## V.12 Caractérisation mécanique :

### V.12.1 Essai de dureté VICKERS :

Les mesures de dureté VICKERS sont effectuées avec une pointe pyramidale normalisée en diamant a une base carrée et un angle entre les faces de 136°. L'empreinte a donc une forme carrée ; Les deux diagonales D1 et D2 de ce carré sont mesurées avec un instrument optique. La valeur D est obtenue en faisant la moyenne de D1 et D2. C'est d qui sera utilisé pour calculer la dureté (**Fig. V.22**).



**Figure V.22: Principe déroulement d'un essai de dureté.**

Norme Européenne pour la dureté VICKERS :

- EN ISO 6507-1 - Essai de dureté VICKERS - Méthode d'essai
- EN ISO 6507-2 - Essai de dureté VICKERS - Entretien de l'équipement

Pour cet essai nous avons fixé quelques paramètres comme la force appliquée qu'on a mis sur **15 kg** et la méthode de lecture suivante :

#### -Mesure de la diagonale (D) de l'empreinte :

La surface est calculée en fonction des diagonales de l'empreinte mesurées grâce au microscope optique. On mesure la première diagonale (D1) ; puis la seconde (D2) ; et on calcule la valeur moyenne en utilisant la relation v :

$$\mathbf{D = \frac{D1 + D2}{2}} \quad \mathbf{Eq(V.1)}$$

La valeur de la surface de forme pyramidale est donnée par la relation :

$$HV=18544. \frac{F}{D^2} \quad \text{Eq (V.2)}$$

Durant cet essai nous avons utilisé l'appareil de marque HOMMEL voir la (Fig. V.23) :



Figure V.23 : Duromètre.

# Chapitre VI

## Chapitre VI : résultats et interprétation.

### VI.1 Caractérisation microstructurale :

Les **Fig. (VI.1), (VI.2), (VI.3), (VI.4), (VI.5)** représentent l'observation au microscope optique, des différents échantillons.

#### VI.1.1 évolution de la microstructure des échantillons avant soudage :

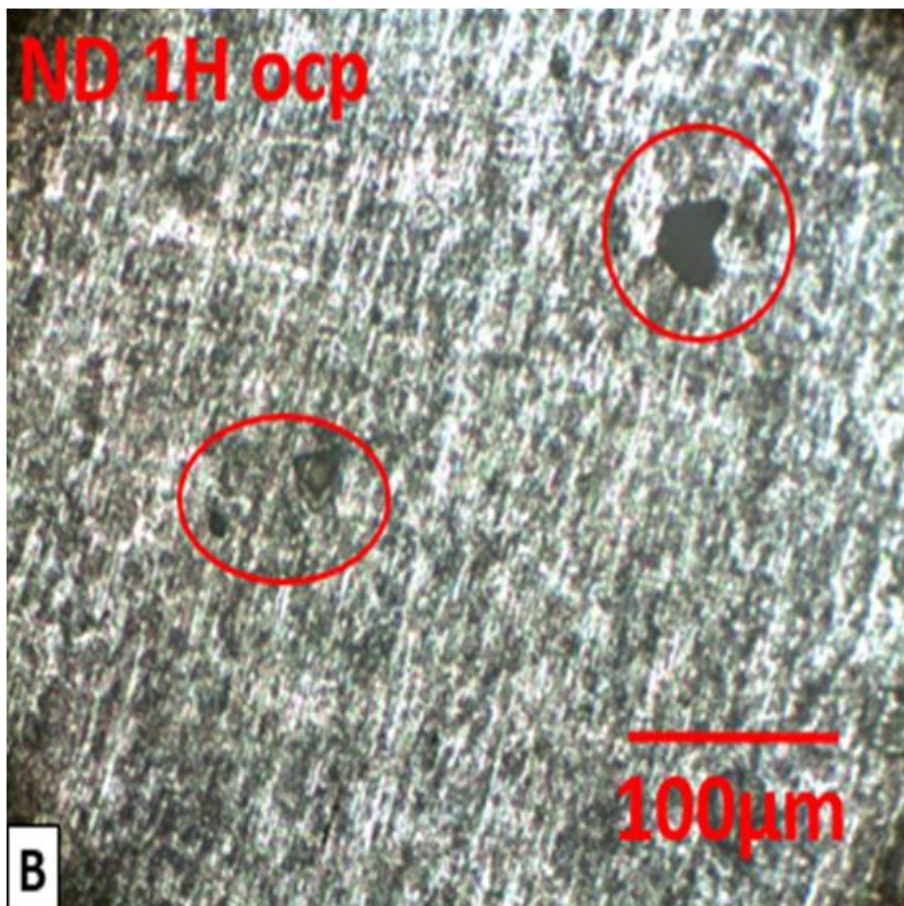
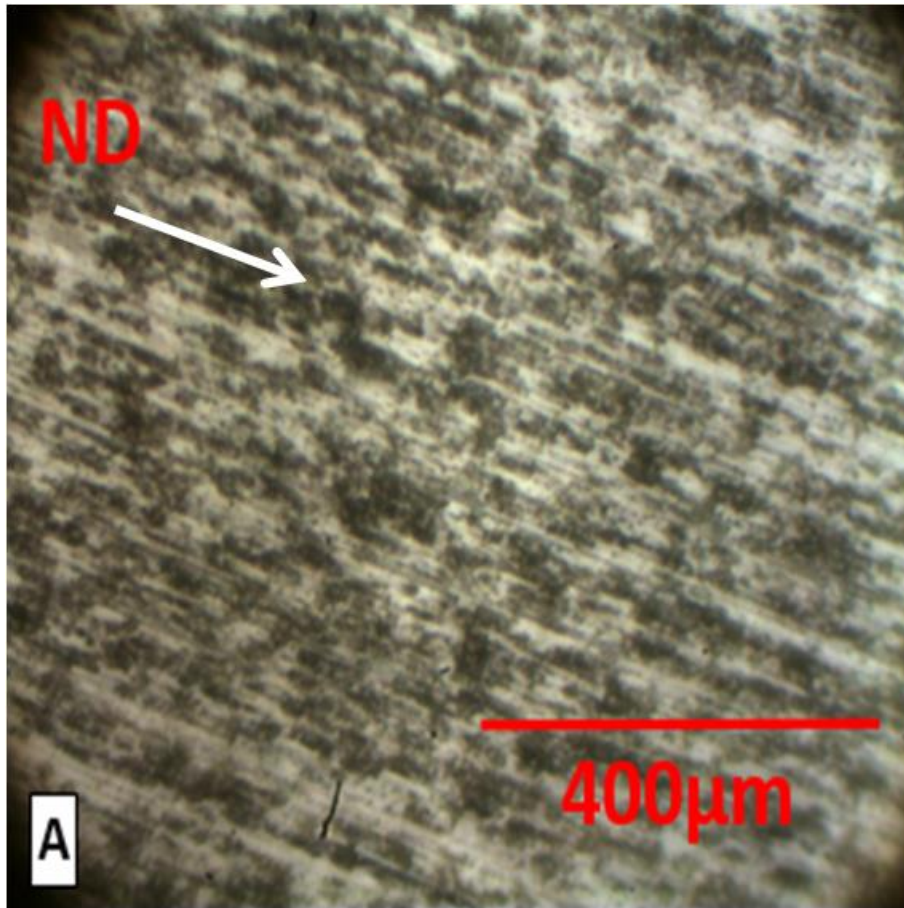
##### VI.1.1.1 Les échantillons Non déformé (ND) :

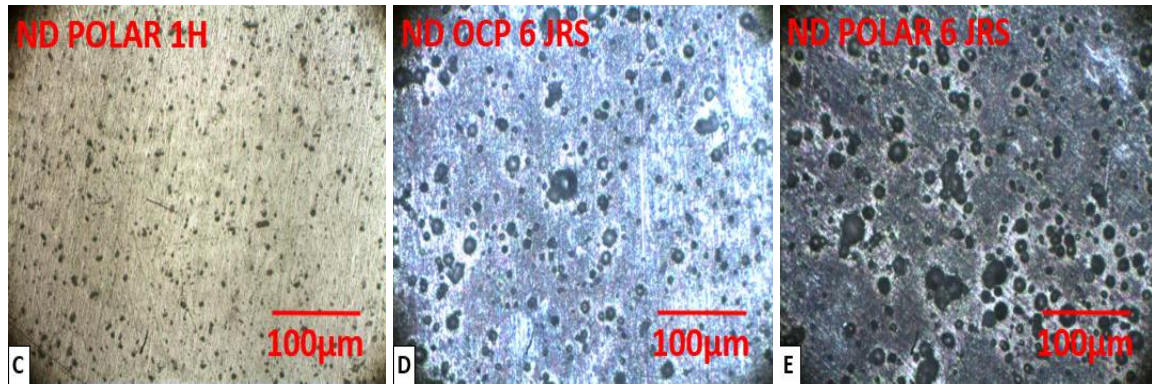
La **figure VI.1** représente l'observation au microscope optique, des échantillons non déformés (ND) par ECAP.

A) -Sur la **Fig. (VI.1.A)**, qui représente la microstructure de la surface longitudinale du barreau en aluminium cette microstructure est constituée de petits grains.

- **Fig. (VI.1.B)** représente la microstructure de l'échantillon non déformé après 1 heure d'émersion dans une solution de 0.3% en masse de NaCl. On remarque le début d'une corrosion localisée. Cette dernière due à la présence de phases moins nobles que la phase mère qui se corrodent, ou bien à la présence de phases plus nobles que la matrice, par la suite une corrosion de la matrice autour de ces particules se déclenche. Une immersion de 6 jours dans la même solution montre la formation de la corrosion localisée sur toute la surface **Fig. (VI.1.d)**.

- Les **Fig. (VI.1.C et E)** représente la microstructure de l'échantillon non déformé polarisés dans la même solution (0.3% en masse de NaCl). Après une heure et 6 jours d'immersion respectivement sur ces figures nous observons l'élargissement de la corrosion localisée.





**Figure VI.1 : Microstructures des échantillons non déformés : A) –Sans immersion, B) – Après une heure d’immersion, C) –Avec polarisation après une heure d’immersion, D) – Après 6 jours d’immersion, E) –Avec polarisation après 6 jours d’immersion.**

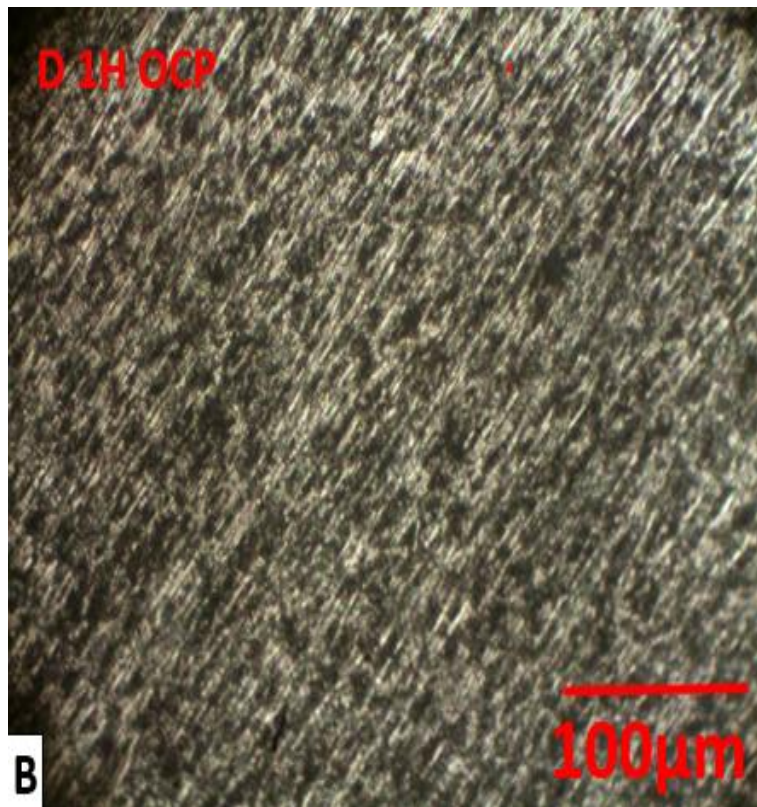
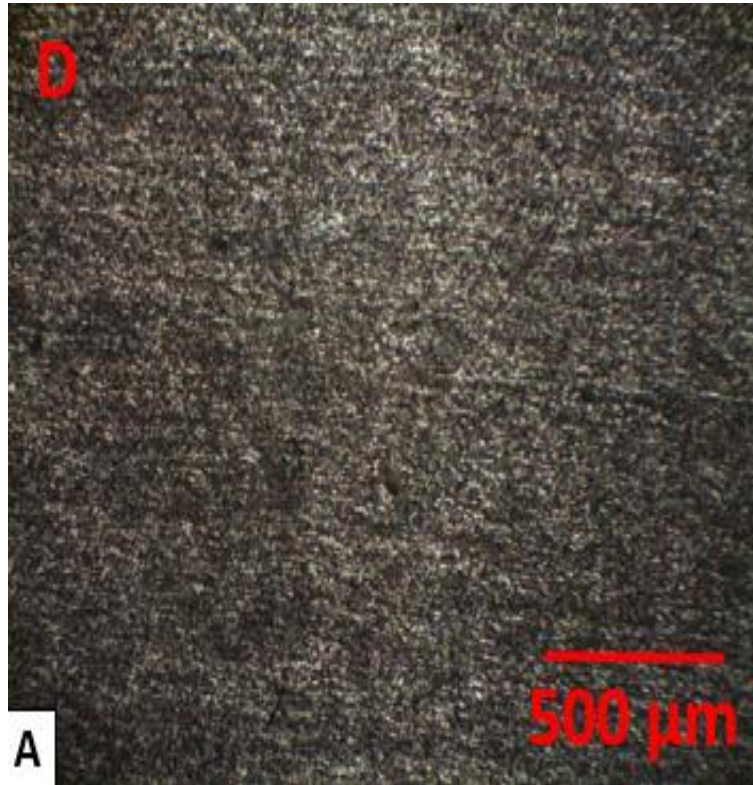
#### **VI.1.1.2 Les échantillons déformé (D) :**

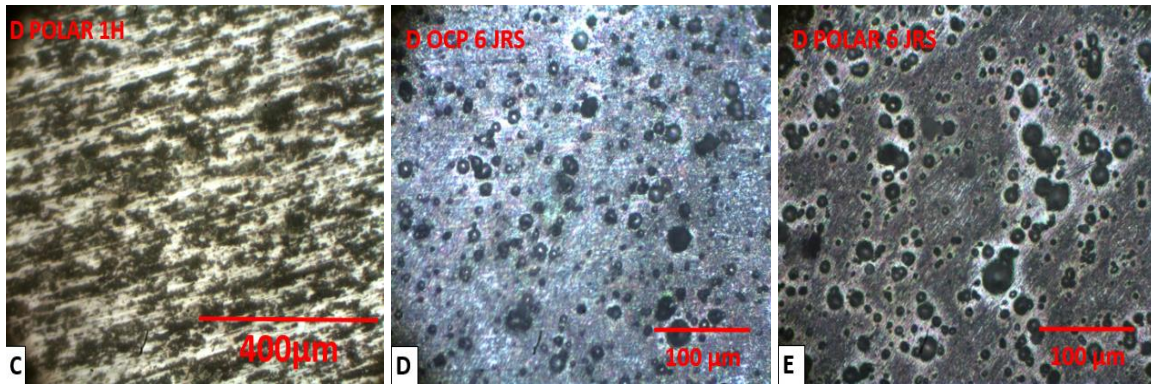
La (**Fig. VI.2**) représente l’observation au microscope optique, des échantillons déformés (D) par ECAP.

- La **Fig. (VI.2.A)** représente la microstructure d’un échantillon qui a subi une déformation par ECAP dans un canal d’un angle  $90^\circ$ , on remarque la formation de nouveaux grains de dimension plus petite la formation des grains fin est due à la recristallisation dynamique qui s’est produite lors de la déformation sévère. Cette déformation induit plusieurs phénomènes, tels que la recristallisation, la formation de nouvelles dislocations (dislocations fraîches). De ce fait les propriétés mécaniques et physico- chimiques changent énormément.

- la **Fig. (VI.2.B)** montre la microstructure de l’échantillon déformé après l’immersion pendant 1 heure, sur cette figure nous remarquons l’absence de la corrosion localisée et apparition d’une corrosion généralisée. Par contre sur la microstructure présentée sur la **Fig. (VI.2.C-E)** de l’échantillon ayant subi une polarisation après 1 heure d’OCP nous observe une corrosion localisée. Cette corrosion est plus marquée après six jours d’immersion suivi ou non d’une polarisation.

-La figure (VI.2.D) et (VI.2.E) représentent successivement la microstructure des échantillons déformé, après 6 jours d’OCP et la polarisation. On remarque une corrosion par piqure.





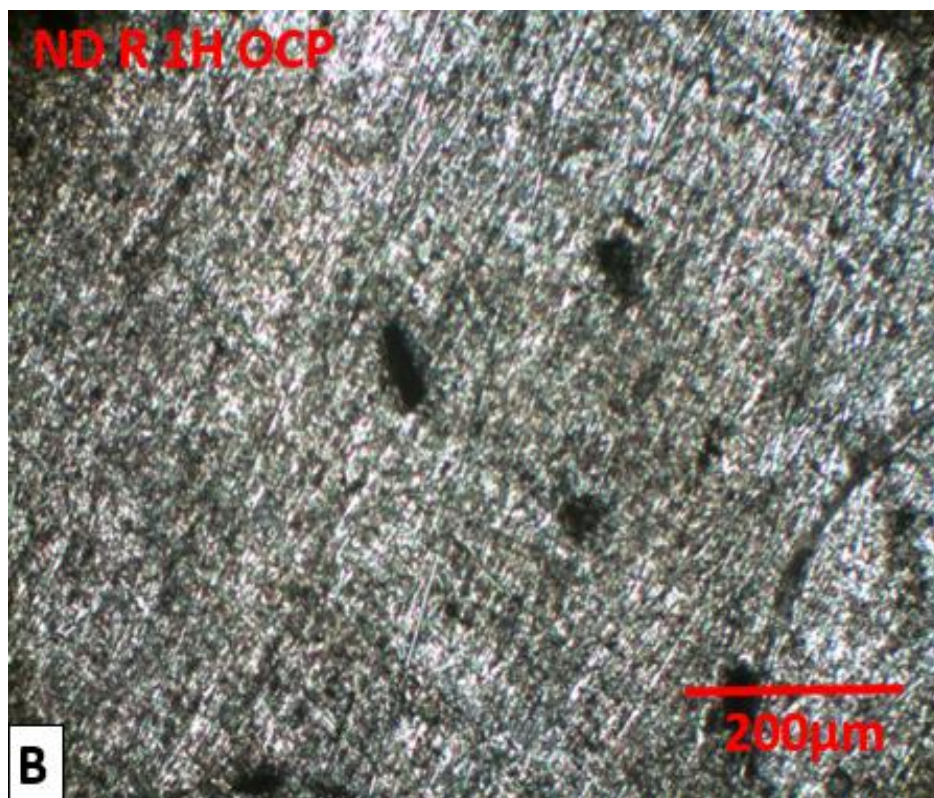
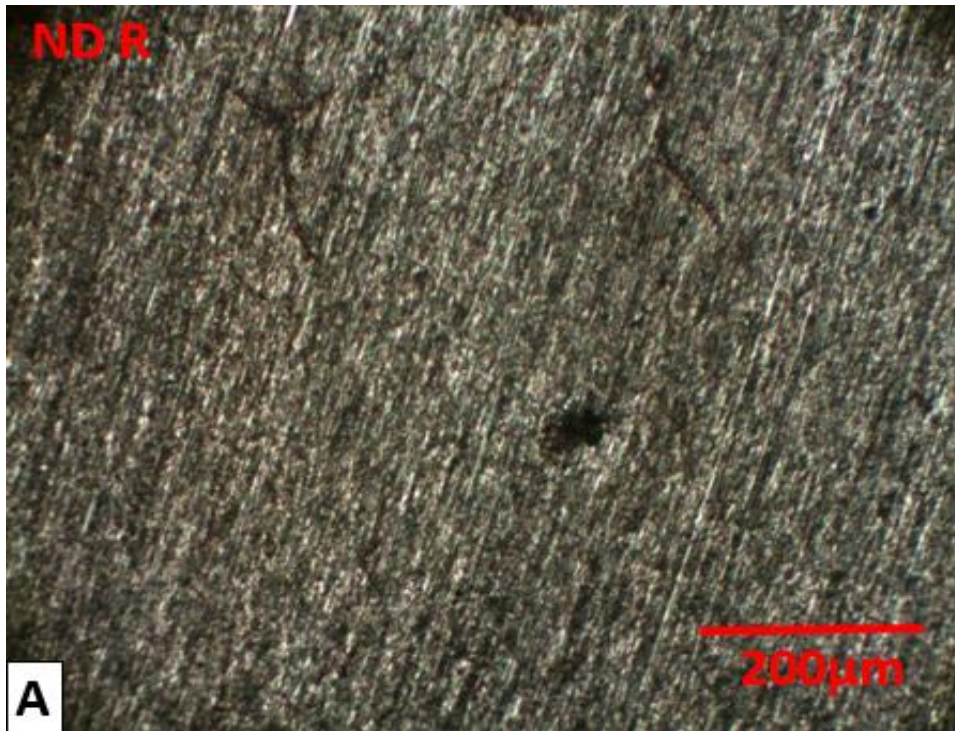
**Figure VI.2 : Microstructures des échantillons déformés : A) – Sans immersion, B) – Après une heure d’immersion, C) –Avec polarisation après une heure d’immersion, D) – Après 6 jours d’immersion, E) –Avec polarisation après 6 jours d’immersion.**

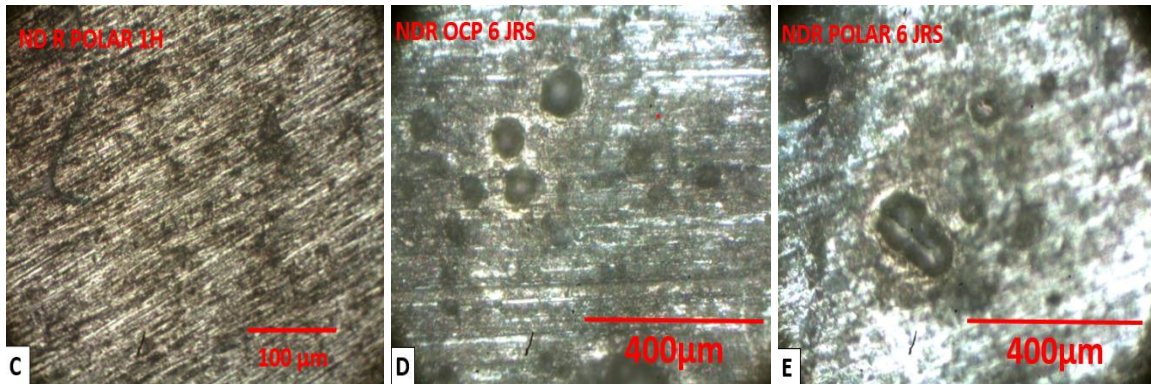
#### **VI.1.1.3 Les échantillons non déformé recuit (NDR) :**

La **Fig. (VI.3)** représente l’observation au microscope optique d’un échantillon non déformé recuit (NDR), le but du recuit à 600°C de 2 heures pour cet alliage, c’est de réaliser une mise en solution qui permettra d’homogénéiser la composition chimique dans tout le volume, de dissoudre tous les éléments chimiques, provoquer une nouvelle cristallisation en passant bien sûr par une restauration des propriétés, mécaniques et physico-chimique.

- Sur la **Fig. (VI.3.A)** représente l’observation au microscope optique d’un échantillon non déformé mais recuit à 600°C avec un temps de maintien de 2 heures. Nous avons remarqué sur cette microstructure la présence d’inclusion et un amorcement de fissures.

- Sur la **Fig. (VI.3.B)** représente l’observation au microscope optique d’un échantillon non déformé recuit à 600°C avec un temps de maintien de deux heures après 1h de corrosion libre dans la solution de 0.3% en masse de NaCl, nous avons remarqué la présence d’inclusions et des microfissures, la même observation a été faite sur la microstructure du même échantillon après polarisation **Fig. (VI.3.B.)** dans la même solution.





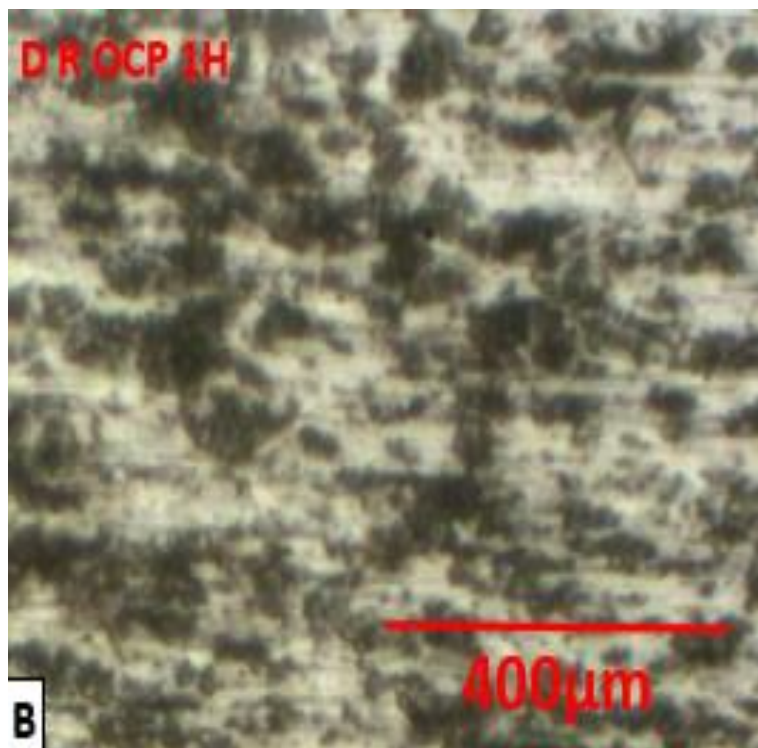
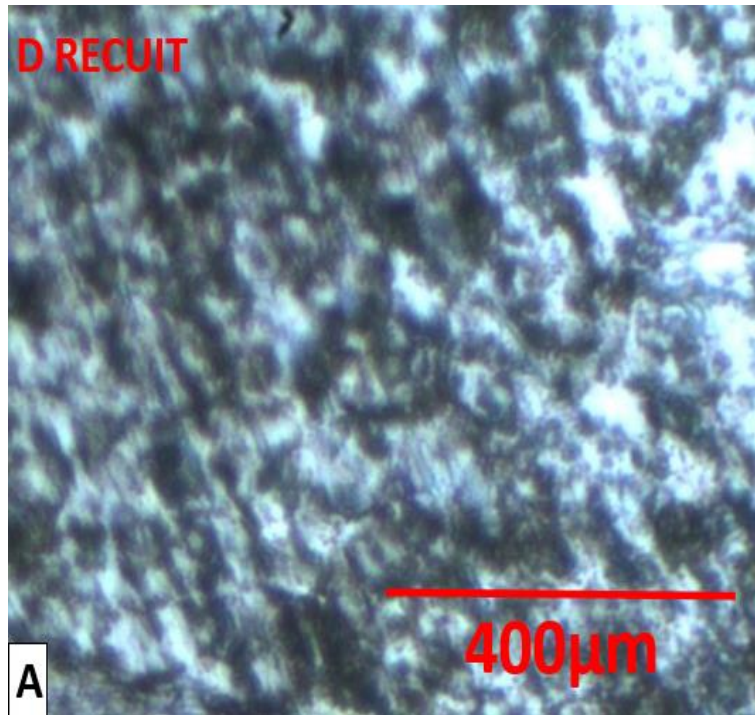
**Figure VI.3 : Microstructures des échantillons non déformés recuit à 600°C avec un temps de maintien de 2 heures : A) -Sans immersion, B) - Après une heure d’immersion C)- Avec polarisation après une heure d’immersion, D)-Après 6 jours d’immersion, E)- Avec polarisation après 6 jours d’immersion.**

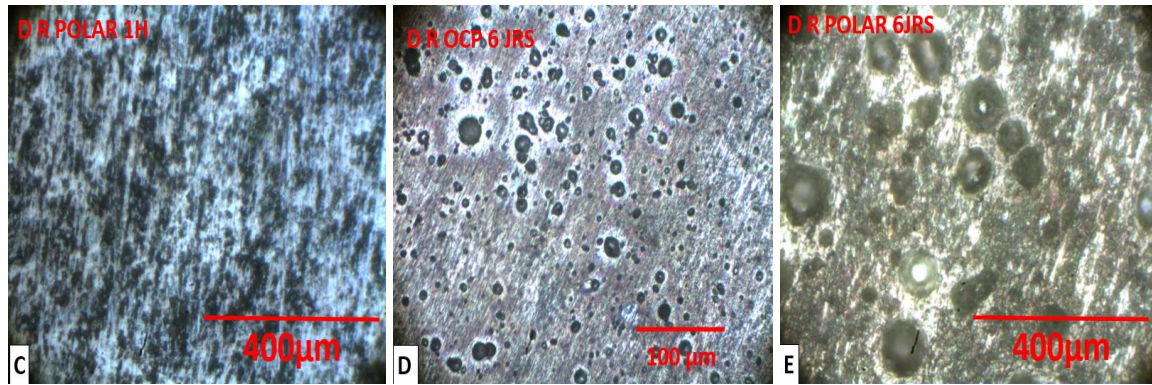
#### **VI.1.1.4 Les échantillons déformés recuit à T 600 °C avec un temps de maintien de 2 heures (DR) :**

La **Fig. (VI.4)** représente la microstructure des échantillons déformés recuit à T 600°C avec un temps de maintien de 2 heures.

- La **Fig. (VI.4.A)** représente une microstructure qui contient des grains grossiers de taille micrométrique, le grossissement des grains est dû au recuit ayant induit une recristallisation suivie par une coalescence des grains, la coalescence des grains est le grossissement des gros grains au dépend des petits grains. Sur cette figure nous observons une corrosion sèche lors du recuit.

- Sur les **Fig. (VI.4.B)** nous n’avons observé aucune autre corrosion à la surface, malgré l’immersion de 1 heure. Une heure d’immersion suivie par une polarisation **Fig. (VI.4.C)** ne montre pas une évolution notable. Par contre sur les deux **Fig. (VI.4.d)** et **(VI.4.E)**, représentant le même échantillon après immersion dans la solution de 0.3 en masse de NaCl nous observons l’apparition d’un mélange de corrosion localisée et généralisée.





**Figure VI.4 : Microstructures des échantillons déformés recuit à 600°C avec un temps de maintien de 2 heures : A)- Sans immersion, B)- Après une heure d’immersion, C)- Avec polarisation après une heure d’immersion, D)-Après 6 jours d’immersion, E)- Avec polarisation après 6 Jours d’immersion.**

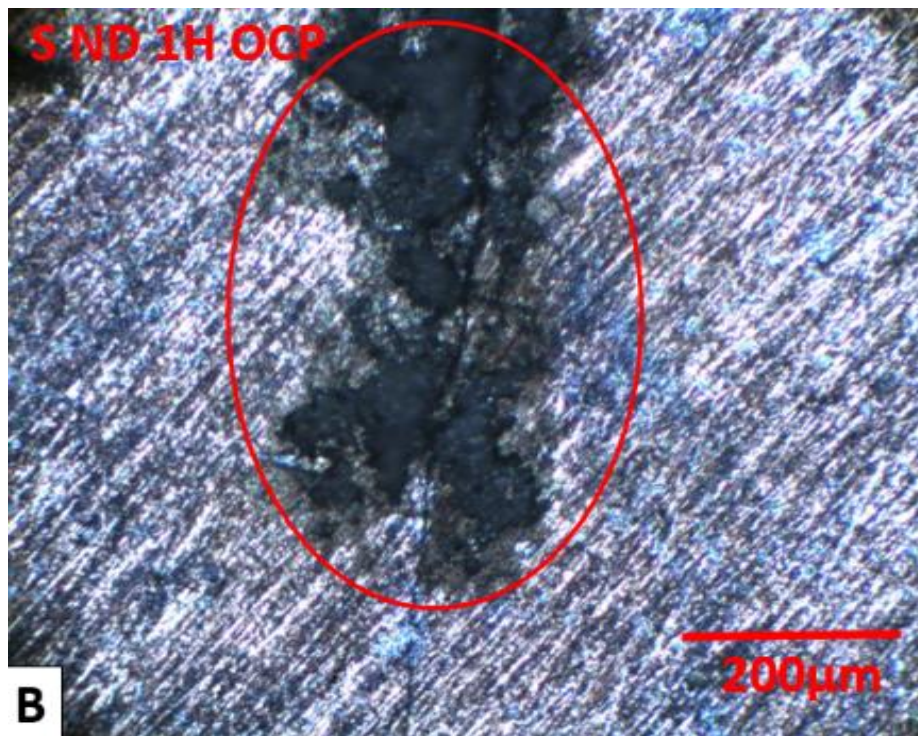
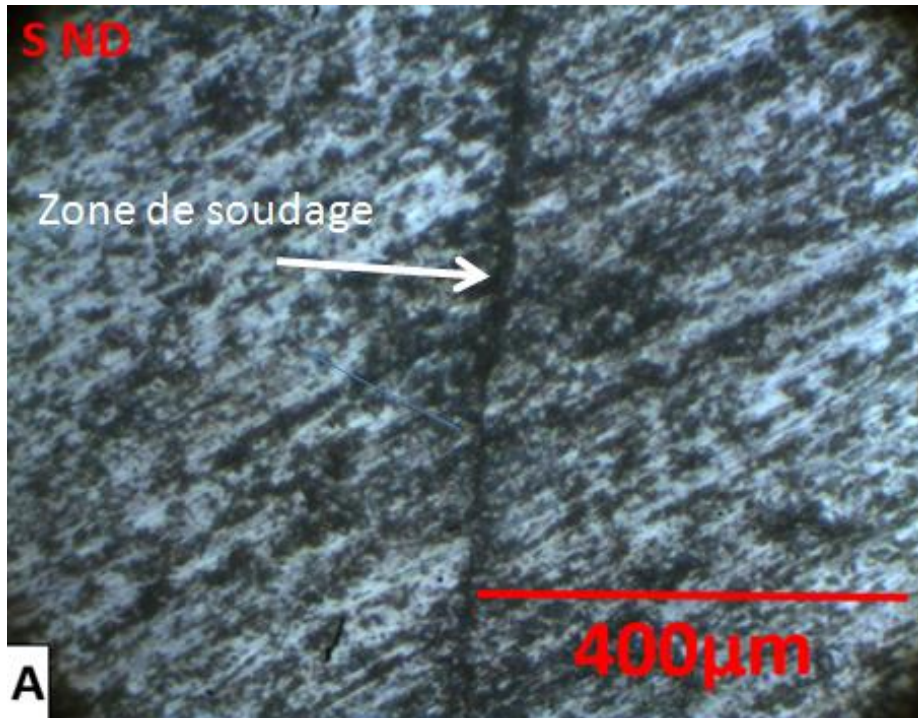
## **VI.1.2 Caractérisation des échantillons après soudage :**

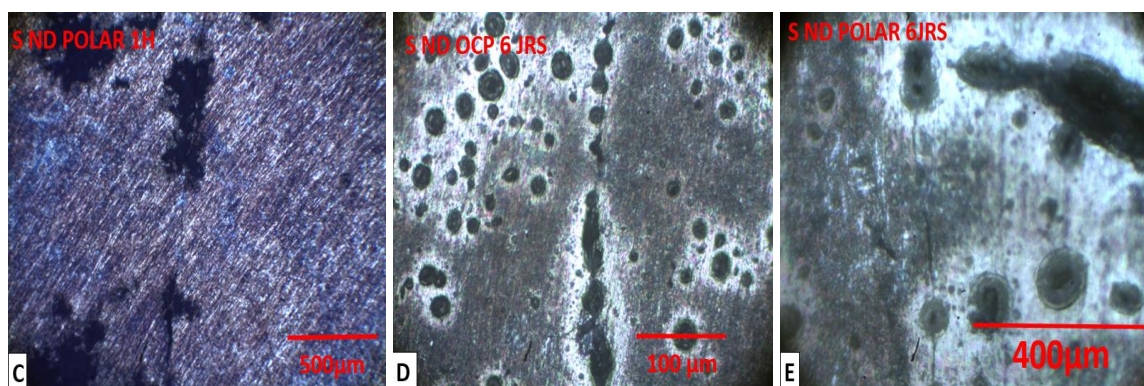
### **VI.1.2.1 Les échantillons non déformés soudés (NDS) :**

La **Fig. (VI.5)** représente la microstructure des échantillons non déformés après soudage par diffusion.

- Sur la **Fig. (VI.5.A)** qui représente la microstructure d’un échantillon soudé non déformé, nous observons l’apparition de la zone de soudage, qui est la zone de contact entre les deux échantillons soudés qui a donné naissance aux plusieurs phénomènes comme la diffusion, la recristallisation, et la croissance des grains à cause de la température élevée.

-Sur la **Fig. (VI.5.B) et (VI.5.C)** qui représentent les microstructures des échantillons soudé non déformé après 1 heure d’OCP, et d’une heure d’OCP suivi d’un test de polarisation respectivement. Nous observons une corrosion localisée autours de la zone de soudage par diffusion et une corrosion généralisée. La même observation à été faite pour le même échantillon, après 6 jours de corrosion dans une solution de 0.3% suivi et non suivi par une polarisation **Fig. (VI. (5.D-5. E))**.





**Figure VI.5 : Microstructures des échantillons non déformés soudés : A)- Sans immersion, B)- Après une heure d’immersion, C)- Avec polarisation après une heure d’immersion, D)-Après 6 jours d’immersion, E)- Avec polarisation après 6 Jours d’immersion.**

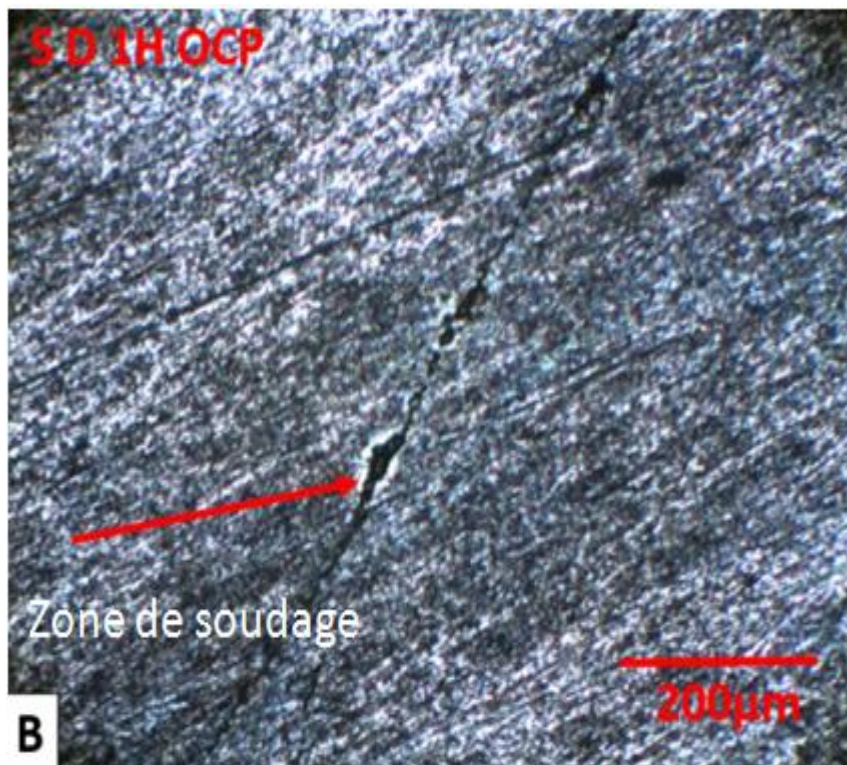
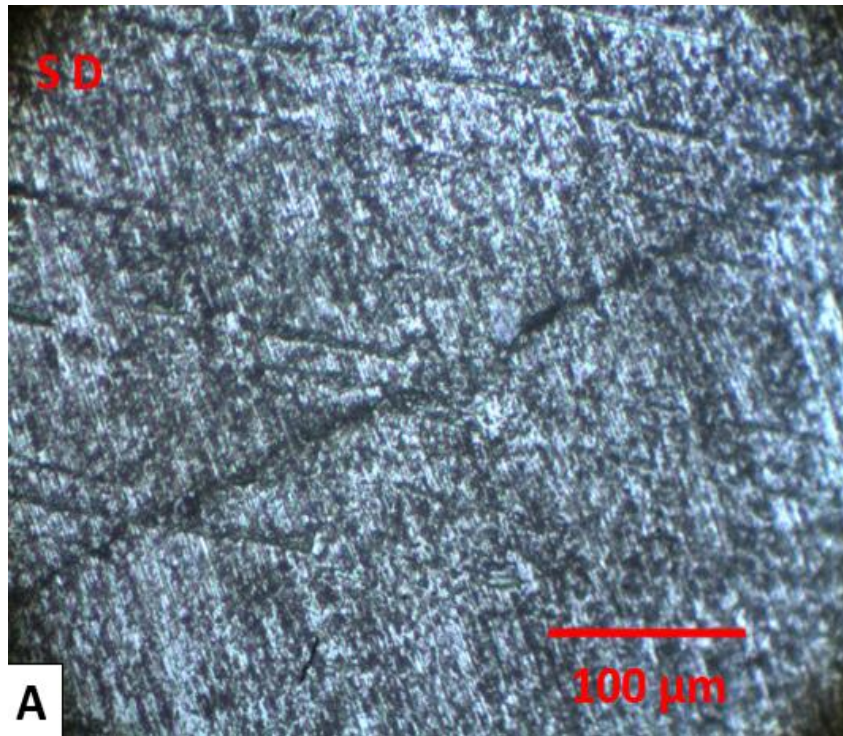
#### **VI.1.2.2 Les échantillons déformé soudé (DS) :**

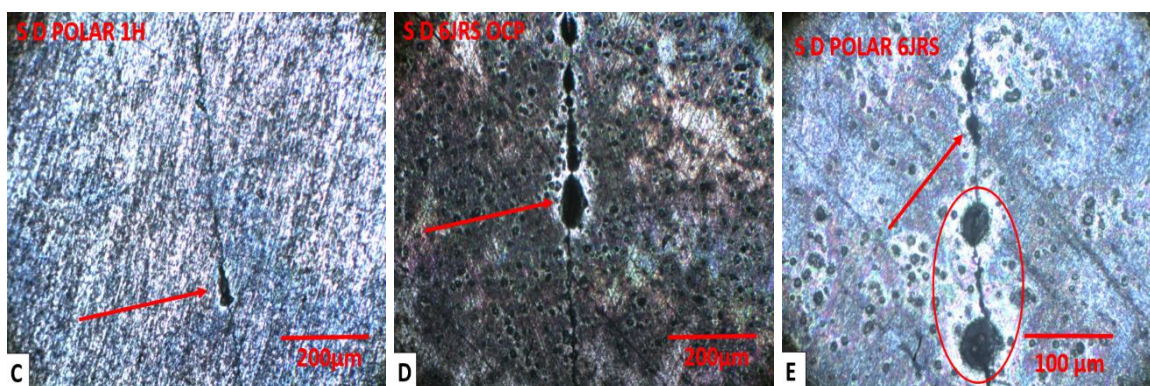
**Fig. VI.6** représente les microstructures des échantillons déformés par ECAP soudé.

-Sur la **Fig. (VI.6.A)** qui représente la microstructure des échantillons soudé par diffusion. La déformation sévère subi par ce dernier a provoqué un raffinement de grains.

-La **Fig. (VI.6.B) et (VI.6.C)** représentent successivement la microstructure de l’échantillon soudé déformé après 1 heure d’OCP dans une solution de 0.3% en masse de NaCl, après 1 heure d’OCP suivi d’un test de polarisation dans la même solution respectivement, Nous observons une corrosion localisée sur la zone de soudage et une corrosion généralisée en dehors de la zone de soudage.

-La **Fig. (VI.6.D-E)** qui représentent successivement la microstructure de l’échantillon soudé déformé après six jours d’OCP dans une solution de 0.3% en masse de NaCl, et celui soudé après six jours d’OCP dans la même solution suivie d’un test de polarisation respectivement, nous observons l’élargissement de la zone de la corrosion localisée et l’apparition d’une corrosion localisée en dehors de la zone de soudage.





**Figure VI.6 : Microstructures des échantillons déformés soudés: A)- Sans immersion, B)- Après une heure d’immersion, C)- Avec polarisation après une heure d’immersion, D)-Après 6 jours d’immersion, E)- Avec polarisation après 6 Jours d’immersion.**

## VI.2 Caractérisation mécanique :

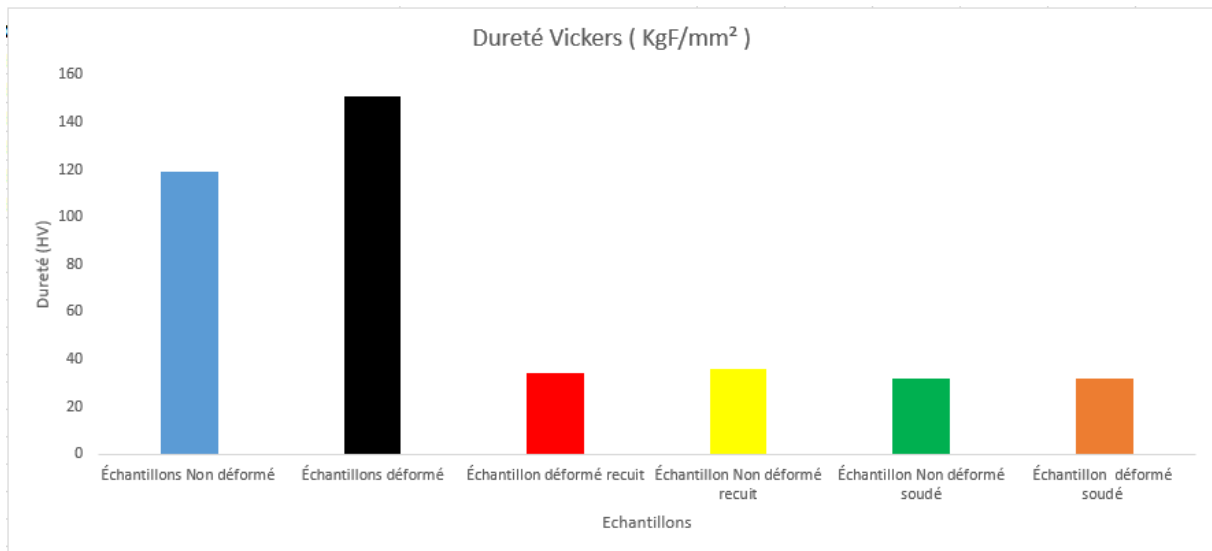
### VI.2.1 Dureté Vickers :

Tab (VI.1) représente la dureté Vickers des échantillons (non déformé, déformé, soudé déformé, soudé non déformé, non déformé et déformé après recuit).

Les résultats de dureté montrent que l’échantillon de référence déformé par ECAP, est le plus dur, celui non déformé est aussi dur, l’augmentation de la dureté suite à la déformation par ECAP et due à l’affinement des grains. L’application d’un recuit ou bien d’un soudage à cet échantillon fait chuter sa dureté de plus de 3 fois. Cette situation est due au phénomène de mise en solution se produisant lors du recuit et du soudage par diffusion.

**Tab : V.1 : Effet de la déformation, du recuit et eu soudage sur la dureté Vickers**

Échantillon	Dureté Vickers ( $F \frac{Kg}{mm^2}$ )
Échantillons non déformé	119.037
Échantillons déformé	150.970
Échantillon soudé déformé	32.008
Échantillon soudé non déformé	32.046
Échantillon non déformé recuit	36.071
Échantillon déformé recuit	34.408



**Figure VI.7 : Histogramme de dureté Vickers des échantillons (non déformé, déformé, soudé déformé, soudé non déformé, non déformé et déformé après recuit).**

Les duretés obtenues dans les échantillons avant et après déformation (**Tab. VI.2-7**) montrent que la déformation à influencer sur la valeur de dureté Vickers. Les échantillons ayant subi une déformation ont une plus grande dureté par rapport aux éprouvettes qui n'ont pas subi de déformation, cela est dû au raffinement de grains des éprouvettes qui ont subi une déformation par ECAP. Les duretés obtenues sur la coupe de la zone de soudage des éprouvettes déformés et non déformé après soudage, ont montré une diminution remarquable des valeurs de dureté, ceci est expliqué par l'influence de la température (600°C) lors de soudage qui a provoqué le grossissement de grains où on trouve une diminution de longueur de joint de grains. Les duretés obtenues sur la coupe de la zone centrale des éprouvettes déformés et non déformé après recuit, ont montré aussi une diminution de la dureté, dans ce cas la température de mise en solution permet le retour à l'état initial avant traitement thermomécanique laminage à chaud et à froid.

**Tableau VI.2 : Dureté Vickers des échantillons non déformé.**

Échantillons	Dureté Vickers ( $\frac{Kg}{mm^2} F$ )					Dureté Vickers Moyenne
ECH ND1	115.85	118.25	123.48	111.26	123.28	118.424
ECH ND2	119.32	120.46	119.17	121.60	115.39	119.188
ECH ND3	118.10	121.83	118.30	118.50	120.77	119.50
<b>Moyenne</b>						<b>119.037</b>

**Tableau VI.3 : Dureté Vickers des échantillons déformé.**

Échantillons	Dureté Vickers ( $\frac{Kg}{mm^2} F$ )					Dureté Vickers Moyenne
ECH D1	143.67	150.438	153.99	153.99	146.99	149.815
ECH D2	153.32	149.56	148.37	151.430	153.39	151.214
ECH D3	154.14	151.93	148.90	149.83	153.67	151.694
<b>Moyenne</b>						<b>150.907</b>

**Tableau VI.4 : Dureté Vickers de l'échantillon déformé soudé.**

Échantillon	Dureté Vickers ( $F \frac{Kg}{mm^2}$ )					Dureté Vickers Moyenne
ECH soudé déformé	34.17	30.51	31.07	32.41	31.88	32.008

**Tableau VI.5 : Dureté Vickers de l'échantillons non déformé soudé.**

Échantillon	Dureté Vickers ( $F \frac{Kg}{mm^2}$ )					Dureté Vickers Moyenne
<b>ECH soudé non déformé</b>	<b>30.23</b>	<b>33.80</b>	<b>31.75</b>	<b>31.63</b>	<b>32.82</b>	<b>32.046</b>

**Tableau VI.6 : Dureté Vickers de l'échantillons non déformé recuit.**

Échantillon	Dureté Vickers ( $F \frac{Kg}{mm^2}$ )					Dureté Vickers Moyenne
<b>ECH non déformé recuit</b>	<b>41.89</b>	<b>34.60</b>	<b>41.665</b>	<b>30.493</b>	<b>31.71</b>	<b>36.071</b>

**Tableau VI.7 : Dureté Vickers de l'échantillons déformé recuit.**

Échantillon	Dureté Vickers ( $F \frac{Kg}{mm^2}$ )					Dureté Vickers Moyenne
<b>ECH déformé recuit</b>	<b>32.95</b>	<b>33.88</b>	<b>33.50</b>	<b>35.83</b>	<b>35.88</b>	<b>34.408</b>

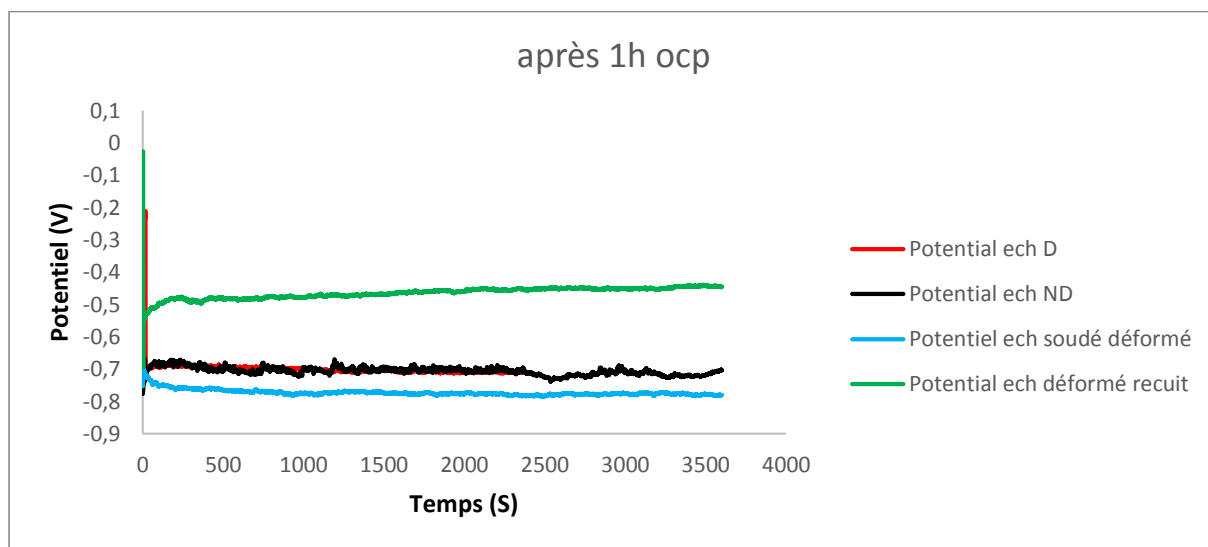
### VI.3 Caractérisation de la cinétique de corrosion :

Le suivie du potentiel de corrosion libre et la polarisation de tous les échantillons a été effectué dans une solution de 0.3% en masse de NaCl **Fig (VI.8-9)**.

La **Fig (VI.8)** représente l'allure des courbes du potentiel de corrosion libre (OCP) durant la première heure d'immersion, dans la solution de 0.3% en masse de NaCl, de tous les échantillons, le comportement de l'échantillon déformé recuit présente une valeur du potentiel d'environ -0.50V qui est plus grande que celle des autres échantillons qui ont des valeurs qui varient entre -0.65V et -0.80V, l'échantillon déformé et soudé est le moins noble. L'échantillon déformé et recuit est l'échantillon le plus noble. Le suivi du potentiel de corrosion libre durant les six jours montre que la stabilité de tous les échantillons n'est pas encore atteinte,

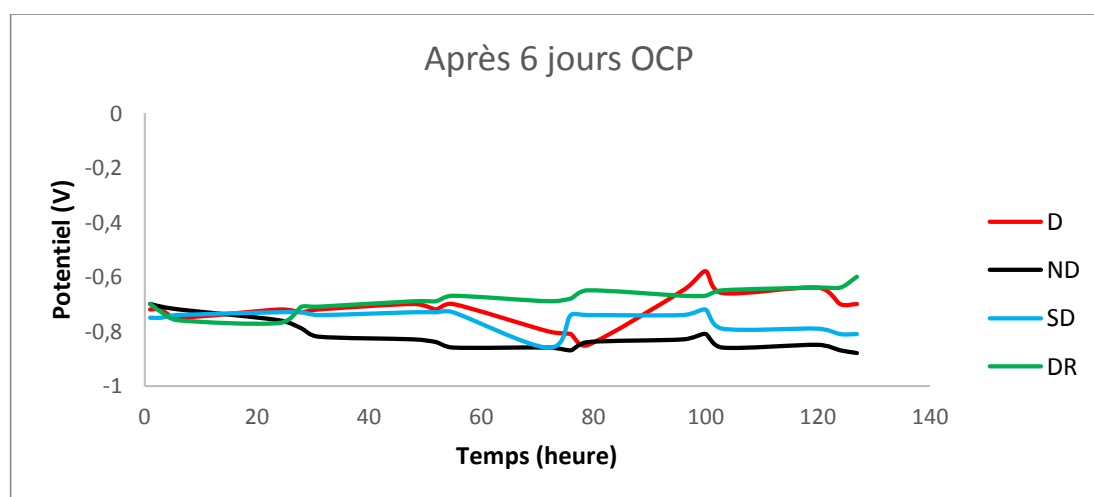
l'échantillon déformé devient plus noble et l'échantillon non déformé devient le moins noble Fig (VI.9).

### VI.3.1 Evolution du potentiel libre de corrosion durant 1 heure (OCP) :



FigureVI.8 : Courbes de corrosion libre (OCP) des différents échantillons pendant une heure d'immersion dans la solution de 0,3% en masse de NaCl.

### VI.3.2 Evolution du potentiel libre de corrosion durant 6 jours (OCP) :



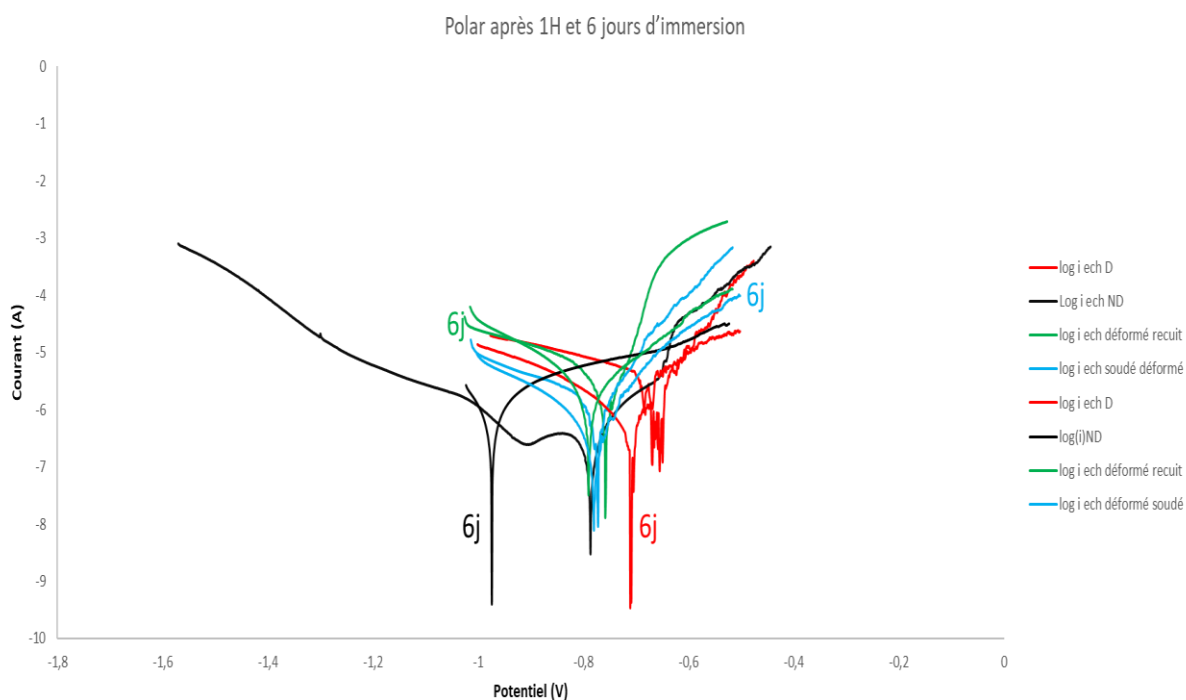
FigureVI.9 : Courbes de corrosion libre (OCP) des différents échantillons pendant 6 jours d'immersion dans la solution de 0,3% en masse de NaCl.

La fig (VI.9) représente les courbes de corrosion libre (OCP) de tous les échantillons les valeurs du potentiel de corrosion varient entre -0.50V et -1V.

#### IV.3.3 courbes de polarisation après 1 heures et 6 jours d'immersion dans la solution de 0.3% en masse de NaCl :

Les courbes de polarisation sur la **Fig (VI.10)** montrent que l'échantillon seulement déformé est plus noble après une heure d'immersion et après 6 jours d'immersion. Par contre l'échantillon non déformé est le moins noble après une heure et après 6 jours d'immersion. Ce résultat est presque le même que celui observé sur les courbes de potentiel libre de corrosion (ceci est confirmé par le **(tab VI.8)**). Seul le potentiel de corrosion de l'échantillon déformé et soudé qui augmente après six jours de corrosion.

La résistance de polarisation de l'échantillon déformé est la plus grande, celle de l'échantillon déformé et recuit est la plus petite.



**FigureVI.10 : Courbes de polarisation, après 1h d'immersion et après 6 jours dans une solution de 0.3% de NaCl,  $i=f(E)$  de tous les échantillons.**

## VI.4 Détermination du potentiel de corrosion et de la résistance de polarisation sur les différentes courbes de polarisation :

### VI.4.1 Potentiel de corrosion :

**Tableau VI.8 : potentiel de corrosion après 1 heure et après 6 jours de tous les échantillons.**

Echantillons	Ecorr en Volt après 1 heure D'immersion	Ecorr en Volt après 6 jours d'immersion
Ech ND	-0.7876	-0.9436
Ech D	-0.671	-0.7123
Ech soudé déformé	-0.7738	-0.78
Ech déformé recuit	-0.758	-0.7911

### VI.4.2 La résistance de polarisation :

**Tableau VI.9 : la résistance à la polarisation des éprouvettes (non déformés, déformés, soudés, éprouvettes recuit).**

Echantillons	Résistance à la polarisation Après 1H	Résistance à la polarisation Après 6 jours
Ech D	20553.388	36065.573
Ech ND	79136.690	25345.622
Ech soudé déformé	3558.718	12765.957
Ech déformé recuit	14341.5906	5461.767

# Conclusion générale

## Conclusion générale

En se basant sur les microstructures, la dureté, et les tests de cinétique de corrosion (OCP, et le tracé des courbes de polarisation) des différents échantillons avant et après corrosion nous avons tiré les conclusions suivantes :

1)- Une corrosion localisée a été observé sur tous les échantillons (D, ND, NDS, DS, DR, DRS), une corrosion généralisée a été observée surtout sur les échantillons soudés.

2)- Une corrosion autour de la zone de soudage par diffusion a été observée.

3)- Le soudage par diffusion a été obtenu sous une contrainte de 30 kN à 600 °C.

4)- Les échantillons ayant subi une déformation ont une plus grande dureté par rapport aux échantillons qui n'ont pas subi de déformation.

5)- Les courbes du potentiel de corrosion libre montre que l'échantillon déformé recuit est le plus noble après une heure et six jours de corrosion et l'échantillon déformé et soudé est le moins noble après une heure de corrosion. Par contre l'échantillon non déformé devient le moins noble après six jours de corrosion.

6)- Les courbes de polarisation montrent que l'échantillon seulement déformé est plus noble après une heure d'immersion et après 6 jours d'immersion. Par contre l'échantillon non déformé est le moins noble après une heure et après 6 jours d'immersion. Ce résultat est presque le même que celui observé sur les courbes de potentiel de corrosion libre.

7)- La résistance de polarisation de l'échantillon déformé est la plus grande, celle de l'échantillon déformé et recuit est la plus petite.