

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE**

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Thème :

***Etude de la corrosion de l'alliage  
d'aluminium (2024 T3) dans un milieu  
basique (NaCl)***

*Proposé et dirigé par :*  
**Mr. YOUSFI Hamid**

*Réalisé par :*  
**Mr. BENGUESMI Zaid**

***Promotion: Juin 2012***

Ecole Nationale Polytechnique, HacénBadi, B.P.182, El-Harrach, 16200 Alger  
Tel: 021.52.53.01-03, Fax: 021.52.29.73 [www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz).

## ملخص

على الرغم من نقاط قوته كالخفة و مقاومة التآكل يعد الألمنيوم و خلائطه من المعادن المستعملة بكثرة في عدة مجالات إلا أن عيبه في ضعف خصائصه الميكانيكية. يتمثل هذا العمل في إعطاء لمحة شاملة عن تصرف الألمنيوم (2024 T3) تجاه التآكل و ذلك من خلال دراسة مجهرية لحالات سطح ثلاث عينات مختلفة من الألمنيوم قبل وبعد غمرها في وسط أساسي ، الأول في حالة خام والثاني في حالة متجانسة و الأخير في حالة تصلب نسيجي بالترسب. كما قمنا بقياس صلابته المجهرية.

**الكلمات المفتاحية:** الألمنيوم و خلائطه، التآكل، دراسة مجهرية، تصلب نسيجي بالترسب، التجانس، صلابته المجهرية ، الخليط 2024T3 .

## Résumé

A cause leurs atouts comme la légèreté et la tenue à la corrosion l'aluminium et ses alliages largement utilisés dans divers domaines. Ils Présentent des inconvénients tels que des propriétés mécaniques faibles.

Ce mémoire de PFE consistera à une présentation générale du comportement de l'alliage de l'aluminium (2024 T3) à la corrosion par une étude microscopique de l'état de surface après immersion dans un milieu basique de trois échantillons différents par leur état ; le premier est à l'état brut, le second est homogénéisé et le dernier est à l'état de durcissement structural. Puis nous avons effectué des mesures de microdureté.

**Mots clés :** L'aluminium et ses alliages, corrosion, métallographie, durcissement structural, homogénéisation, microdureté, alliage 2024T3.

## Summary

Despite their advantages like lightness and the corrosion behavior, the aluminum and its alloys largely used in various fields. It presents disadvantages such as low mechanical properties.

This memory of PFE will consist with a general presentation of the behavior of alloy of aluminum (2024 T3) to corrosion by a microscopic study of the surface quality after immersion in a basic medium of three different samples by their state; first is in a rough state, second is homogenized and the last is with the state of structural hardening. Then we carried out micro hardness measurements.

**Key words:** Aluminum and its alloys, corrosion, metallography, structural hardening, homogenization, microhardness, alloy 2024T3.

# *Remerciements*

*Je remercie Dieu le Tout puissant de m'avoir donné patience, santé et volonté tout au long de mes études.*

*Je tiens à remercier d'abord mon promoteur M.YOUSFI d'avoir accepté de m'encadrer et de me soutenir.*

*Je remercie également tous les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail : Monsieur Dr. ABADLI, Madame KECHOUD et Monsieur Pr. LARIBI respectivement président de jury et examinateurs de ce travail.*

*Mes remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont collaboré à la réalisation de ce travail.*

*J'exprime ma reconnaissance à tous les enseignants qui ont contribué de près ou de loin à ma formation.*

# DEDICACES

*Je dédie ce travail*

*A la plus chère personne au monde ma mère,*

*A mes frères ABDELHALIM, ISHAK, SEDDIK,*

*A mes sœurs,*

*A tous mes amis et surtout HAKIM, BADI,  
ABDELNOUR, SACI et LAMINE.*

*A tous mes collègues et surtout KACI,  
MOHAMED, OMAR, AMIR, YA3KOUB.....*

*A tous ceux qui me sont chers. A tous ceux qui  
m'ont aidé de loin et de près.*



## Sommaire

Introduction .....	1
I-Généralité sur l'aluminium .....	2
I.1. Introduction.....	2
I.2. L'élaboration de l'Aluminium .....	2
I.3. Propriétés d'usage des alliages d'aluminium.....	3
I.3.1. Propriétés physiques .....	3
I.3.2. Propriétés thermiques.....	3
I.3.3. Propriétés mécaniques.....	4
I.3.4. propriété électrique .....	5
I.3.5. Tenue à la corrosion.....	5
I.3.6. Légèreté.....	7
I.4. La métallurgie de l'aluminium.....	7
I.4.1. Constitution des alliages d'aluminium.....	7
I.4.2. Désignation des alliages d'aluminium .....	7
I.4.3. La désignation numérique est constituée de 4 chiffres : .....	8
I.4.4. Classification en fonction de mode de transformation.....	9
I.4.5. Les alliages à durcissement structural.....	10
I.5. Série 2000 (aluminium cuivre) .....	12
I.5.1. Propriétés générales .....	12
I.5.2. L'alliage d'aluminium 2024T3 .....	12
I.5.3. Séquences de la précipitation dans les alliages.....	13
I.5.4. Principe du durcissement de durcissement structural .....	13
I.5.5. Conclusion .....	17
II-Corrosion de l'aluminium et ses alliages .....	18
II.1. Introduction .....	18
II.2. Eléments de base.....	18
II.3. Les diverses formes de corrosion des alliages d'aluminium.....	20
II.3.1. Corrosion généralisée ou uniforme.....	21
II.3.2. Corrosion localisée .....	21
II.4. Protection contre la corrosion.....	26
II.4.1. Protection électrochimique .....	26
II.4.2. Ajout d'inhibiteurs de corrosion .....	26
II.4.3. Protection par traitement de surface .....	27
III-Dispositifs expérimentales .....	29
III.1. Introduction .....	29
III.2. Matériau utilisé.....	29

III.3. Préparation métallographique.....	29
III.3.1. Enrobage.....	29
III.3.2. Polissages .....	30
III.4. Four à résistance.....	30
III.5. Traitement d'homogénéisation.....	30
III.6. Durcissement structural.....	31
III.7. Attaque chimique .....	32
III.8. Observation microscopique.....	33
III.9. La dureté.....	33
III.10. Tests d'immersion en milieu corrosif.....	34
III.11. Calcul de la taille moyenne de grains et du taux de corrosion.....	34
IV-Résultats et interprétation .....	39
IV.1. Analyse microstructurale .....	39
IV.2. La structure métallographique de métal.....	39
IV.3. Résultats de l'essai de microdureté.....	41
IV.4. Résultats des tests d'immersion .....	43
IV.4.1. Structures bruts .....	43
IV.4.2. Structures d'homogénéisations .....	45
IV.4.3. Structures de durcissement structural.....	47
IV.5. Effet du milieu .....	51
IV.6. Effet de traitement.....	52
Conclusion générale .....	54
Bibliographies .....	55

## Listes des tableaux

Tableau I.1. Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température .....	4
Tableau I.2. Influence de la température sur le module d'élasticité .....	5
Tableau I.3. Désignation des alliages d'aluminium .....	8
Tableau I.4. désignation des états métallurgiques de base .....	9
Tableau I.5. Classification des alliages d'aluminium selon les éléments d'alliages .....	10
Tableau I.6. Composition chimique de l'alliage 2024 (%massique).....	12
Tableau I.7. Propriétés physiques. ....	12
Tableau I.8. Propriétés mécaniques .....	12
Tableau I.9. Evolution de la sursaturation .....	15
Tableau II.1 propriétés de formes de l'oxyde d'aluminium .....	20
Tableau III.1. Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024 T3 .....	29
Tableau III.2. Le réactif utilisé pour l'observation microscopique .....	8
Tableau III.3. Description des principales fonctions utilisées.....	35
Tableau IV.1. Les tailles de grain des structures initiales.....	39
Tableau IV.2. L'évolution du taux de corrosion de métal brut après différents temps d'immersion.....	50
Tableau IV.3. L'évolution de la corrosion de métal subie un traitement d'homogénéisation après différents temps d'immersion .....	50
Tableau IV.4. L'évolution de la corrosion de métal subie un traitement de durcissement structural différents temps d'immersion .....	51

## Listes des figures

Figure I.1. Influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium .....	4
Figure I.2. Vitesse de dissolution de l'aluminium en milieux aqueux en fonction du pH d'après Shatalov .....	6
Figure I.3. Diagramme de Pourbaix Potentiel-pH de l'aluminium à T 25°C .....	6
Figure I.4. Diagramme TTT d'un alliage d'aluminium à 4% de Cu .....	13
Figure I.5. Diagramme d'équilibre Al-Cu .....	14
Figure I.6. Microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°C .....	14
Figure II.1. Diagramme de Pourbaix E-pH de l'aluminium dans l'eau pure à 25°C .....	18
Figure II.2. Couches et phénomènes d'adsorption du film d'oxyde.....	19
Figure II.3. Mécanismes de corrosion par piqûres des alliages d'aluminium .....	22
Figure II.4. Corrosion intergranulaire.....	23
Figure II.5. Corrosion galvanique.....	23
Figure II.6. Les étapes de la corrosion par érosion.....	24
Figure II.7. Corrosion par effet de crevasse.....	24
Figure III.1. Dimensions de l'éprouvette étudiée.....	29
Figure III.2. Schéma du traitement d'homogénéisation appliqué.....	31
Figure III.3. Schéma de principe du traitement de durcissement structural d'un alliage Al-4%.....	32
Figure III.4. Microscope optique muni d'une caméra numérique connecté à un microordinateur.....	33
Figure III.5. a)- Microduromètre b) Dimensions de l'empreinte selon l'essai de la dureté Vickers.....	34
Figure III.6. L'interface de Visilog et principales fonctionnalités.....	35
Figure III.7. Les étapes de numérisation de l'image.....	37
Figure III.8. Les étapes de numérisation de l'image.....	38
Figure IV.1. Microstructure dans les trois états (a) brut, (b) homogénéisé et (c) durcissement structurale. ....	40
Figure IV.2. (a) Courbes isothermes de dureté, (b) Diagramme d'équilibre Al-Cu.....	41
Figure IV.3. Courbe isochrone de dureté.....	42
Figure IV.4. Etat des surfaces des échantillons brut après les teste d'immersion dans un milieu basique NaCl .....	45
Figure IV.5. Etat des surfaces des échantillons homogénéisé après les teste d'immersion dans milieu basique NaCl .....	47
Figure IV.6. Etat des surfaces des échantillons durcis structurellement après les teste d'immersion dans milieu basique NaCl .....	49
Figure IV.7. Evolution du taux de corrosion dans les trois états en fonction du temps d'immersion ;a) état brute ;b) état homogénéisé ;c) état durcissé.....	51
Figure IV.8. Évolution du taux de corrosion dans les trois états en fonction du temps d'immersion.....	52





# Introduction générale

---

La métallurgie de l'aluminium et ses alliages prend de plus en plus de l'ampleur et reste encore un domaine de recherche et d'actualité pour les différentes possibilités qu'ils peuvent engendrer. L'aluminium et ses alliages sont largement utilisés dans l'industrie : aéronautique, construction navale, automobile et éventuellement dans la construction métallique à cause de leurs propriétés mécaniques et physiques telle que, la faible densité, la très haute résistance à la corrosion, la bonne ductilité, la très bonne usinabilité, la bonne soudabilité et la très bonne conductibilité électrique et thermique.

Cependant, l'aluminium et ses alliages présentent une faible dureté qui représente un grand inconvénient pour l'utilisation de l'aluminium dans l'industrie. Les alliages Al-Cu-Mg sont considérés comme les alliages d'aluminium les plus durs.

Notre travail est une partie d'un projet de recherche d'étude globale de l'alliage d'aluminium 2024 T3. Le but de travail est consisté à étudier le comportement de cet alliage dans un milieu basique NaCl à deux concentrations 0.5N et 3N.

Ce travail est réparti en deux parties principales :

La première concerne la recherche bibliographique qui comporte deux chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur l'aluminium et l'alliage 2024T3 on cite les propriétés et les principes du durcissement de précipitation. Le deuxième chapitre sera réservé pour la corrosion de l'aluminium et de ces alliages.

La deuxième partie comporte deux chapitres. Le premier chapitre est consacré aux techniques expérimentales utilisées. On décrit le matériau utilisé et les différents traitements thermiques appliqués. À la préparation des échantillons pour l'observation microscopique, et finalement à l'essai de microdureté. Le deuxième concerne les résultats expérimentaux obtenus ainsi que leurs interprétations.

Enfin, ce travail sera achevé par une conclusion générale



**Chapitre I**  
**Généralités sur l'aluminium**

---

# Généralités sur l'aluminium

---

## I.1. Introduction

L'aluminium a connu un développement spectaculaire depuis sa naissance en 1854 symbolisée par la présentation à l'académie des sciences, par une chimiste française Sainte Claire Deville, Mais le véritable début du développement industriel de l'Aluminium et ses alliages se produit en 1886 avec l'invention du procédé d'électrolyse de l'Aluminium par Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux Etats-Unis. L'Aluminium est aujourd'hui le premier métal non ferreux ; en tonnage, il a supplanté l'Etain dans les années 1920, le Plomb dans les années 1940, le Zinc puis le cuivre dans les années 1950.

Un tel développement repose bien évidemment sur les propriétés particulières de l'Aluminium : légèreté, ténacité, résistance à la corrosion, conducteur de chaleur et de l'électricité, décoratif ; les alliages d'Aluminium se prêtent également à tous les processus de transformations : laminage ,filage, matriçage, moulage ,etc....Ceci explique qu'ils soient aujourd'hui utilisés dans la plupart des grands marchés industriels : transports terrestres, maritimes ou aérospatiaux, bâtiment, électricité et mécanique[1].

## I.2. L'élaboration de l'Aluminium

Le seul minerai utilisé pour la production de l'Aluminium est la Bauxite, elle contient 45 à 60 % d'Alumine, 20 à 30 % d'Oxyde Ferrique  $Fe_2O_3$ , le reste est formé de Silice, d'oxyde de Titane et d'eau. Les réserves en Bauxite, très importantes, peuvent assurer 200 années de production au rythme actuel. Les lieux de production se trouvent en Australie, à la Jamaïque, en Guinée et au Brésil.

L'élaboration de l'Aluminium consiste à extraire l'alumine pure de la bauxite, puis à réduire cette dernière en aluminium pur. Le cycle de fabrication est celui du procédé Bayer, breveté en 1887 et toujours en service [2].

### I.3. Propriétés d'usage des alliages d'aluminium

#### I.3.1. Propriétés physiques

➤ **Propriétés atomique et cristallines**

- Numéro atomique : 13.
- Masse atomique : les valeurs actuellement acceptées sont:
  - 26,981 5 (valeur basée sur 12C) ;
  - 26,989 74 (valeur basée sur 16O).
- Isotopes :

Le principal isotope,  $^{27}\text{Al}$ , est stable et comprend 14 neutrons et 13 protons ; à l'exception de l'isotope  $^{26}\text{Al}$  qui a une demi-durée de vie de l'ordre de 106 années, les autres isotopes, produits artificiellement, ont une demi-durée de vie très courte .

- Valence de l'aluminium dans les composés chimiques : 3
- Structure cubique à faces centrées.
- Paramètre cristallin :  $4,049\ 596 \times 10^{-10}\text{m}$  à 298 K.
- Diamètre atomique :  $2,86 \times 10^{-10}\text{m}$ .
- Volume atomique :  $9,999 \times 10^{-30}\text{m}^3$ [3].

➤ **Masse volumique**

La masse spécifique de l'aluminium et des alliages d'aluminium-magnésium varie de 2.7 (Al pur) à 2.63 selon la teneur en élément d'addition. Cette légèreté est un avantage pour la manutention des ensembles de grande dimension.

#### I.3.2. Propriétés thermiques

➤ **Température de Fusion**

L'aluminium pur fond à 650 °C. Pour les alliages Al-Mg et Al-Cu la température de fusion décroît avec l'augmentation de teneur en Mg et en Cu.

➤ **Vaporisation**

- La température d'ébullition est de 2500 °C environ.
- La chaleur de vaporisation est de 10 780 kJ/kg

A l'état liquide, l'aluminium liquide a une très faible tension de vapeur à basse température mais qui s'élève très vite avec celle-ci [4].

➤ Conductivité thermique

La conductivité thermique est de 237 w / (m × k) à la température ambiante .Elle varie en fonction de la température (Tableau I.1).

Tableau I.1. Variation de la conductivité Thermique en fonction de la température [5].

<b>Conductivité thermique w/(m.k)</b>	<b>302</b>	<b>237</b>	<b>208</b>	<b>91</b>
<b>Température (°C)</b>	-173	20	660 (états solides)	666 (états liquides)

Au-dessous de -173°C, la conductivité thermique de l'aluminium de pureté titre à 99,99 % et plus, est très sensible au niveau des impuretés.

**I.3.3. Propriétés mécaniques**

➤ Module d'élasticité

La littérature cite pour le module d'élasticité de l'aluminium pur des valeurs comprises entre 63 et 71 GPa, avec 66,6 GPa comme valeur la plus probable. Cette valeur varie en fonction de différents paramètres :

1. elle augmente en présence d'éléments étrangers (additions ou impuretés), aussi la valeur de 69 GPa est-elle généralement admise pour l'aluminium dit commercialement pur (figure I.1) ;
2. elle diminue lorsque la température augmente (tableau I.2).

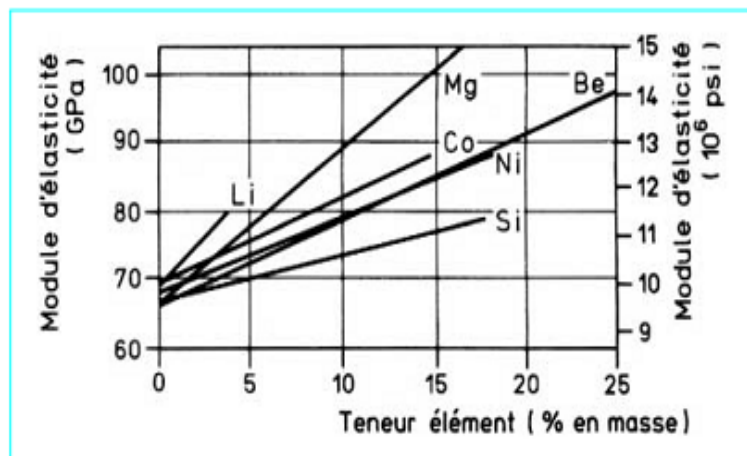


Figure I.1. Influence des éléments d'addition sur le module d'élasticité de l'aluminium [3].

Tableau I.2 : Influence de la température sur le module d'élasticité [3].

Température (°C)	Module d'élasticité (%)
-195	112
-85	105
-29	102
24	100
100	98
149	95
204	90
260	80

### I.3.4. propriété électrique

La conductibilité électrique de l'aluminium commercial atteint 62% de celle du cuivre .par ailleurs, la masse du cuivre est plus élevée que celle de l'aluminium. Un conducteur en aluminium dont la masse est inférieure à celle d'un conducteur en cuivre, s'échauffe moins. L'aluminium conduit très bien l'électricité puisqu'il se place immédiatement après le cuivre dans les métaux communs. Les impuretés et les éléments d'addition ont une influence plus ou moins importante sur la résistivité. La forme sous laquelle ces éléments sont intégrés dans la matrice d'aluminium modifie ses propriétés.

### I.3.5. Tenue à la corrosion

Le potentiel de l'aluminium dans la plupart des milieux aqueux à 25 °C est de l'ordre de -0,5 V par rapport à l'électrode de l'hydrogène alors que le potentiel standard est de -1,66 V. Cette différence très importante entre les deux potentiels est due à la présence d'un film d'oxyde  $Al_2O_3$  sur la surface du métal qui se forme spontanément dès que l'aluminium entre en contact avec un oxydant : oxygène de l'air et de l'eau. La présence de ce film continu d'alumine rend le métal passif puisqu'il isole le métal du milieu extérieur. Ce film d'oxyde forme un écran, une barrière entre le métal et le milieu, c'est lui qui contrôle les échanges entre le métal et le milieu dans lequel est placé [7].

La formation du film d'alumine sur l'aluminium se fait par la migration des ions  $Al^{3+}$  du métal vers sa surface pour réagir avec l'oxygène de l'air ou du milieu environnant.

Dans les milieux aqueux, l'aluminium n'est passif que dans la mesure où il est recouvert de son film d'oxyde naturel dont la stabilité dépend du pH.

L'aluminium est très insoluble dans la zone des pH voisins de la neutralité, ainsi que nous montre le diagramme établi par Shatalov. Figure I.2 qui montre aussi que la couche d'alumine résiste peu à des pH acides et des pH basiques.

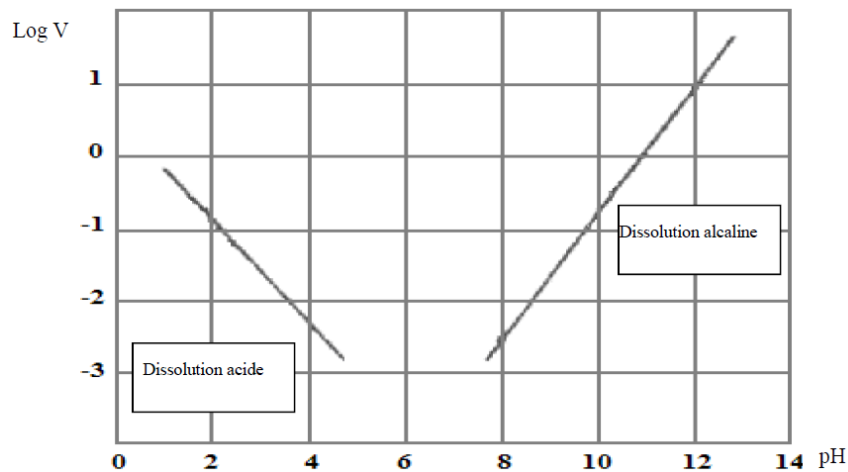


Figure I.2. Vitesse de dissolution de l'aluminium en milieux aqueux en fonction du pH d'après Shatalov [7].

Le diagramme de Pourbaix illustré par la figure I.3, rend compte du comportement de l'aluminium vis-à-vis de la corrosion. Il prévoit les domaines de stabilité des différentes formes du métal et les sens des transformations probables [7].

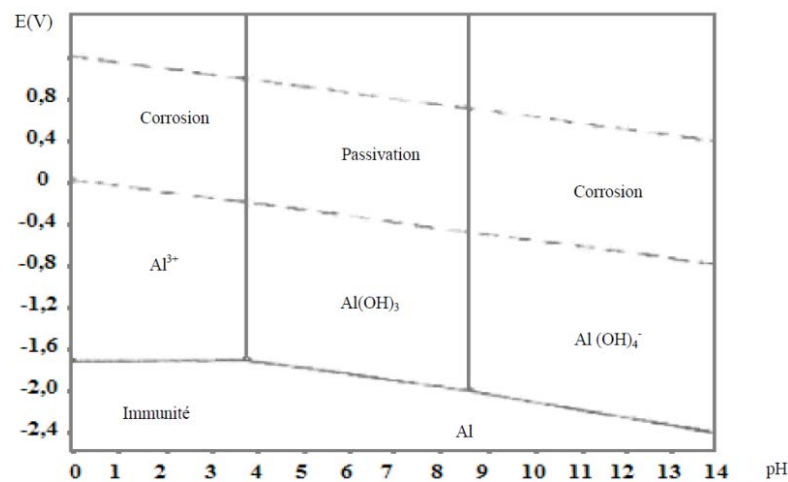


Figure I.3 : Diagramme de Pourbaix Potentiel-pH de l'aluminium à T 25°C [7].



### I.3.6. Légèreté

L'aluminium est le plus léger de tous les métaux usuels, sa masse volumique est de  $2700 \text{ kg/m}^3$ , soit presque trois fois moins que celle des aciers. La masse volumique des alliages l'aluminium est comprise entre  $2600$  et  $2800 \text{ Kg /m}^3$ . Cette propriété lui permet d'être un matériau de premier choix pour de multiples utilisations ; aéronautique, transport et construction [8].

## I.4. La métallurgie de l'aluminium

### I.4.1. Constitution des alliages d'aluminium

Ils sont constitués d'aluminium (élément de base) et :

- d'éléments d'alliages ;
- d'éléments d'addition ;
- d'impuretés.

#### ➤ **Eléments d'alliages**

Ils sont ajoutés en quantités de 1 à 7 pour les alliages de corroyage, et jusqu'à 20% dans les alliages de moulage. Ces éléments sont le Mg, Mn, Si, Cu et Zn ; certains de ces éléments peuvent être ajoutés simultanément.

#### ➤ **Eléments d'addition**

Ils sont ajoutés en plus faibles quantités (en générale environ 1 %) pour améliorer certaines propriétés telles que la finesse des grains, la trempabilité et la soudabilité. Les éléments d'addition classiques sont : Cr, Mn, Ni, Pb et Be.

#### ➤ **Les impuretés**

Le fer et le silicium sont les deux principales impuretés utilisées, le rapport Fe / Si est environ de 2 % pour la plupart des alliages d'aluminium [9].

### I.4.2. Désignation des alliages d'aluminium

La désignation permet de comprendre comment sont classées les différentes nuances des alliages d'aluminium. Certains utilisent des désignations alphanumériques et d'autre simplement la désignation numérique. Cette dernière est la désignation internationale de l'aluminium Association qui est adoptée et retenue entre autres par la France, les États-Unis, la Grande-Bretagne, le Canada, le Japon. Bien que la désignation alphanumérique soit bien souvent encore très utilisée dans la pratique [3].

### I.4.3. La désignation numérique est constituée de 4 chiffres :

Le premier chiffre indique la série ou famille de l'alliage d'aluminium. Ce chiffre va de 1 à 9 d'où le nombre de séries d'alliages d'aluminium (neuf séries) dont les sept premières séries sont les plus répandues et connues.

Le deuxième chiffre indique la variation de l'alliage de base ; ce chiffre est toujours 0 pour une composition originale de la série. A chaque variation d'un ou plusieurs éléments d'alliage de l'ordre de 0.15-0.50% on remplace le chiffre 0 par un chiffre représentatif de la nouvelle composition de l'alliage principal.

Le troisième et quatrième chiffre n'ont aucune signification spécifiques. Ils désignent simplement le numéro de l'alliage dans la série [10].

Le tableau I.3 ci-dessous résume le mode de désignation des alliages d'aluminium (1, 2, 3,4, ..., 9).

**Tableau I.3 : Désignation des alliages d'aluminium [10].**

Série	Alliage	Elément d'alliage
1xxx	1000	Aluminium Pur
2xxx	2000	Cuivre
3xxx	3000	Manganèse
4xxx	4000	Silicium
5xxx	5000	Magnésium
6xxx	6000	Magnésium- Silicium
7xxx	7000	Zinc
8xxx	8000	Autres élément (ex : Li,fer,etain,)
9xxx	9000	Non désignés

En plus de la désignation numérique les alliages d'aluminium sont indiqués par l'état métallurgique et l'état de livraison.

L'état métallurgique de base est indiqué par une lettre F, O, H ou T conformément à la norme AFNOR NF EN 515. (Tableau 1-4).

Tableau I.4: désignation des états métallurgiques de base[11].

Les lettres	Les états de base
F	Brut de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui et restauré ou stabilisé
T	Durci par traitement thermique

#### I.4.4. Classification en fonction de mode de transformation

##### ➤ Les alliages de moulage

Les alliages de moulage sont utilisés en fonderie pour la fabrication des pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans des moules. On distingue les alliages [11].

- De premières fusions, élaborées à partir d'aluminium primaire, issu de l'électrolyse.
- De secondes fusions, appelés aussi alliage de finage. Ils sont élaborés par refusions des déchets récupérés.

Les alliages de moulage sont utilisés et choisis principalement pour leurs caractéristiques de coulabilité.

##### ➤ Les alliages de corroyage

Ils sont coulés en fonderie sous forme de plaques ou de billettes ensuite transformés en demi-produits (tôles, profilés, ...). Suivant le mode de durcissement, les alliages de corroyage se divisent en deux familles [12].

- Alliages à durcissement structural qui font preuve d'une très bonne résistance à la corrosion atmosphérique ainsi que d'un très bon comportement à basses températures [11].
- Alliages à durcissement par écrouissage dans lesquels les propriétés mécaniques et la dureté sont augmentées en dépit de la ductilité.

**Tableau I.5.** Classification des alliages d'aluminium selon les éléments d'alliages

Éléments d'alliage	Famille des moulés	Famille des corroyés	
Aucun	10000	Alliages à durcissement structural	1000
Manganèse	3000		3000
Magnésium	50000		5000
Cuivre	20000	Alliages à durcissement par écrouissage	2000
Silicium	40000		4000
Magnésium + Silicium	6000		6000
Zinc	70000		7000

### I.4.5. Les alliages à durcissement structural

Le principe du durcissement structural est basé sur la précipitation, c'est-à-dire la diminution de la solubilité d'éléments d'alliage avec la température. L'élément d'alliage cuivre est ajouté en teneur de l'ordre de 2 à 6% massique. Il permet, lors des processus thermomécaniques, la précipitation de phases appelées phases durcissantes, à l'origine des bonnes propriétés mécaniques des alliages de cette série. Le phénomène de « durcissement structural », découvert en 1906 par Wilm dans le cas des alliages légers, a abouti au premier alliage industriel, le Duralumin en 1916 (l'alliage 2017 A). Il existe de nombreux protocoles de traitement thermique, désigné par la lettre T dans la nomenclature des alliages (T1 à T8). Ce n'est donc pas un protocole particulier qui sera décrit ici mais certaines grandes étapes pouvant être suivies lors d'un traitement thermique :

- **La mise en solution** consiste à porter l'alliage à une température supérieure à la température de solvus de manière à ce que tous les atomes de soluté (éléments d'alliages et d'addition) se retrouvent en solution. La température de mise en solution est généralement comprise entre 400 et 550°C.
- **La trempe** est un refroidissement suffisamment rapide après mise en solution, de manière à empêcher la décomposition de la solution solide en précipités d'équilibre grossiers. Une solution solide sursaturée dite de « substitution » est ainsi obtenue, dans laquelle les atomes de soluté sont positionnés aux nœuds du réseau CFC de l'aluminium.
- **La maturation** ou vieillissement naturel est le maintien, après la trempe, à température ambiante ou inférieure. Cette étape permet une décomposition

lente de la solution solide sursaturée et la formation de petits amas d'atomes de soluté, les zones de « Guinier- Preston » ou GP. L'étape de maturation peut s'accompagner d'un écrouissage (ou traction contrôlée) de 1 à 2% de déformation du matériau de manière à relaxer les contraintes et à augmenter la densité de lacunes par déformation plastique et donc à augmenter la densité des sites de germination des précipités durcissants.

- **Le revenu** est un chauffage ultérieur à des températures inférieures aux températures de mise en solution, typiquement de l'ordre de 100 à 200°C. Cette étape permet d'accélérer les phénomènes de décomposition de la solution solide sursaturée et donc la précipitation, responsable du durcissement de l'alliage [13].

Les traitements thermiques aboutissent à une microstructure complexe composée de nombreux intermétalliques. Il est possible de les classer en trois catégories.

- **Les précipités durcissant** sont une taille allant du nanomètre jusqu'à plusieurs centaines de nanomètres. Ils sont formés lors de la trempe ou de manière contrôlée lors de la maturation ou du revenu. Il s'agit des amas d'atomes décrits précédemment ou de phases métastables issues de leur précipitation. Les mécanismes de durcissement structural sont complexes mais il est possible de retenir que ces précipités jouent le rôle de frein dans le mouvement des dislocations, en partie responsables de la déformation plastique. Ces phases doivent donc être cohérentes ou semi-cohérentes avec la matrice.
- **Les dispersoïdes** sont de taille variant de vingt à quelques centaines de nanomètres, et se forment par précipitation à l'état solide. Ils ne peuvent pas être complètement dissous après leur formation. Ils ne sont pas cohérents avec la matrice et ne participent donc pas directement au durcissement structural.
- **Les particules intermétalliques sont dites «grossières»** lorsque leur taille dépasse des dimensions de l'ordre du micromètre. Elles peuvent atteindre des tailles de l'ordre de la vingtaine de micromètres et ne participent donc pas au durcissement de l'alliage. Elles jouent en revanche un rôle important dans la sensibilité à la corrosion localisée. Il s'agit soit de phases ordonnées (composés définis,  $Al_2Cu$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_2CuLi$  pour les alliages de la série 2000 ou  $MgZn_2$  pour ceux de la série 7000) soit de particules issues d'une décomposition eutectoïde ( $Al(Cu,Mn,Fe)$  ou bien d'autres) et donc de composition en générale non homogène[13].

## I.5. Série 2000 (aluminium cuivre)

### I.5.1. Propriétés générales

Les alliages Al-Cu de la série 2xxx peuvent être classés en plusieurs familles suivant leur utilisation. Les alliages pour déformation plastique prennent en compte les alliages possédant une bonne résistance à la corrosion, une bonne aptitude à la mise en forme par emboutissage et au soudage (ex. l'alliage 2117 2,2-3% Cu et 0,2-0,5% Mg, % en poids). Les alliages à résistance mécanique élevée qui contiennent un pourcentage de cuivre de l'ordre de 4% sont caractérisés par une bonne tenue à chaud mais une soudabilité et une tenue à la corrosion faible. Parmi ces alliages, l'alliage 2024 est utilisé dans des applications concernant les transports aéronautiques et la mécanique. La dernière famille est celle des alliages pour décolletage. Pour cette application, des additions de Bismuth et/ou Plomb sont effectuées pour obtenir des copeaux cassants [14,15].

### I.5.2. L'alliage d'aluminium 2024T3

L'alliage 2024 est un alliage d'Al-Cu voire Al-Cu-Mg de composition chimique et de propriétés physiques et mécaniques données par les tableaux 1,2et 3 respectivement.

**Tableau I.6.** Composition chimique de l'alliage 2024(%massique) [16].

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Autres
90.7-94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	<0.5	<0.5	<0.25	<0.15	<0.1	<0.15

**Tableau I.7.** Propriétés physiques [10].

Etat	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficient d'expansion 20-100°C 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>	Conductivité thermique Wm <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup>	Résistivité μ Ω cm	Module d'élasticité M Pas ×10 <sup>3</sup>
T3	2.77	23	\	5.7	73
T6	2.77	23	151	5.7	73

**Tableau I.8:** Propriétés mécaniques [10].

Etat	Re(2%)MPa	RrMPa	A% L0=5mm 5.65√s0	Resistance au cisaillement (MPa)	HB (P=5D <sup>2</sup> )	Contrainte de fatigue(MPa) 500MHz
T3	345	485	18	285	120	140
T6	396	475	10	/	/	/

### I.5.3. Séquences de la précipitation dans les alliages

Le durcissement structural des alliages d'aluminium s'effectue en 3 principales étapes:

- Mise en solution à une température suffisamment élevée pour mettre le plus grand nombre d'éléments durcissant ;
- Refroidissement rapide ou trempe à l'eau ou à l'huile ; On évite ainsi le nez de la courbe TTT (figure I.4) et on obtient à température ambiante une solution solide fortement sursaturée.
- Maturation ou revenu pendant lesquels se produit la décomposition contrôlée de la solution solide sursaturée. C'est durant cette dernière étape qui sera responsable du durcissement structural. C'est des phénomènes complexes que nous allons présenter dans le cas des alliages Al-Cu et Al-Cu-Mg [10].

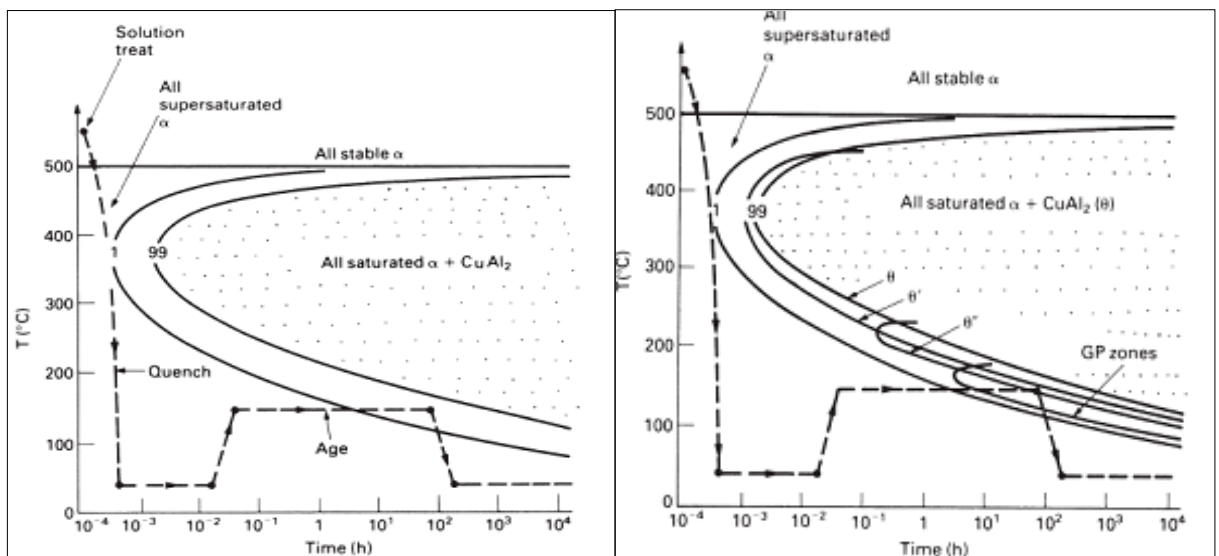


Figure I.4. Diagramme TTT d'un alliage d'aluminium à 4% de Cu [10].

### I.5.4. Principe du durcissement de durcissement structural

#### Diagramme d'équilibre Al-Cu :

Le diagramme de phases Al-Cu est donné sur la figure I.5. Il nous indique qu'entre 500 et 580°C, l'alliage Al—4%Cu est monophasé : le cuivre fait dans l'aluminium une solution solide désordonnée de substitution. En dessous de 500°C l'alliage devient biphasé  $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ . Au fur et à mesure que la température diminue, la proportion d' $\text{Al}_2\text{Cu}$  augmente. A la température ambiante, les proportions d'équilibre sont de 93% de phase  $\alpha$  de 7% d' $\text{Al}_2\text{Cu}$  [17].

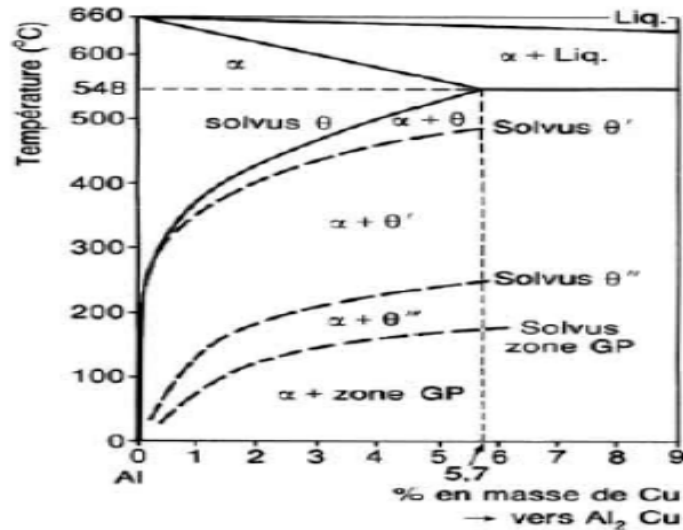


Figure I.5. Diagramme d'équilibre Al-Cu [10].

#### I.5.4.1. Morphologie de la précipitation

Dans le cas d'un refroidissement lent, les précipités sont grossiers et très espacés. Et dans le cas d'un refroidissement rapide, ils sont fins et très rapprochés. Figure I.6

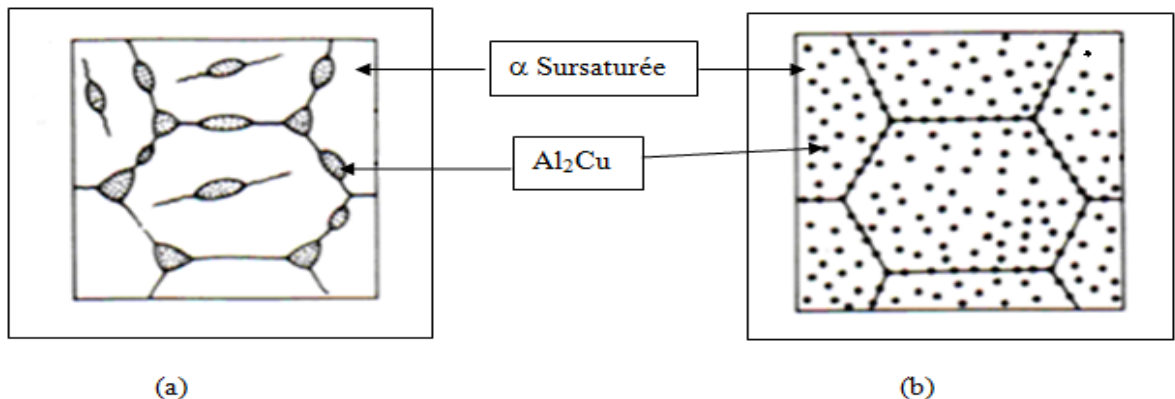


Figure I.6. Microstructures obtenues à l'ambiante dans un alliage Al-4% Cu. a) par refroidissement lent à partir de 550°C. b) par refroidissement rapide à partir de 550°C [18].

Quand on refroidit lentement, l'enthalpie libre de précipitation est faible et le taux de germination est faible aussi. Pour assurer la proportion d'équilibre en Al<sub>2</sub>Cu, les rares germes doivent croître en de gros précipités très distants les uns des autres. Les dislocations n'ont pas de mal à contourner les précipités et l'alliage ainsi obtenu a de faibles caractéristiques mécaniques.



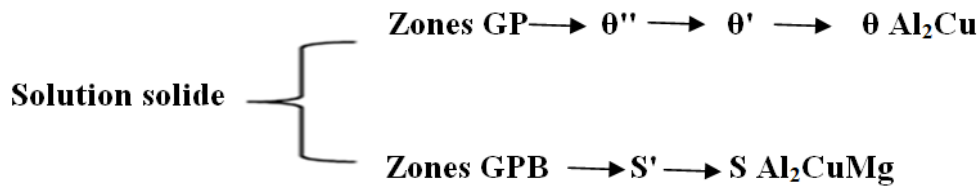
Si au contraire, on refroidit l'alliage rapidement, la structure obtenue est beaucoup plus fine. Comme l'énergie motrice est élevée, le nombre de germes l'est aussi. Les précipités, quoique petits, sont très rapprochés. Les dislocations mobiles ont du mal à les franchir et l'alliage est ainsi plus dur.

Si on refroidit trop rapidement, on n'a pas de précipitation du tout. Cependant, il est possible d'augmenter considérablement la dureté de l'alliage en lui faisant subir un vieillissement [18].

**I.5.4.2. Microstructure de l'alliage**

Comme cela a déjà été écrit précédemment, le cuivre est ajouté à l'aluminium de manière à obtenir une phase durcissante et par conséquent de meilleures propriétés mécaniques. L'addition de magnésium à l'alliage Al-Cu entraîne également une augmentation significative des propriétés mécaniques de l'alliage lors de l'étape de maturation. L'addition de silicium et de manganèse favorise la formation de composés quaternaires. Par dispersion, ces derniers améliorent les propriétés de la matrice.

L'alliage 2024 T3 présente donc, suite au traitement de durcissement structural, une séquence de coprécipitation mixte [14].

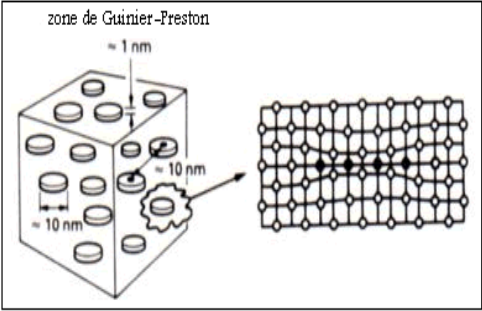
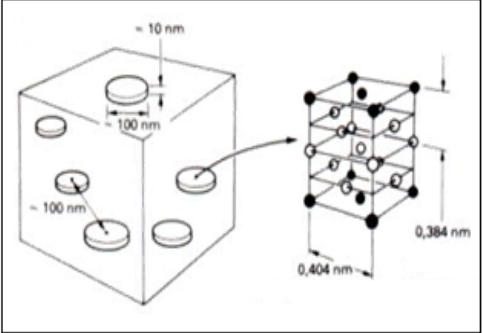
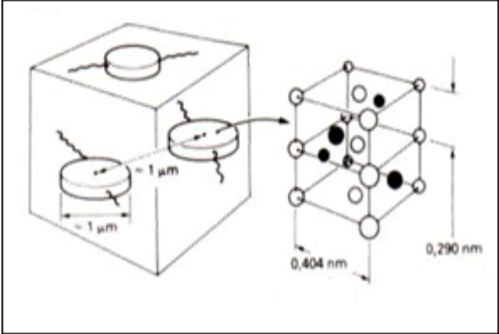


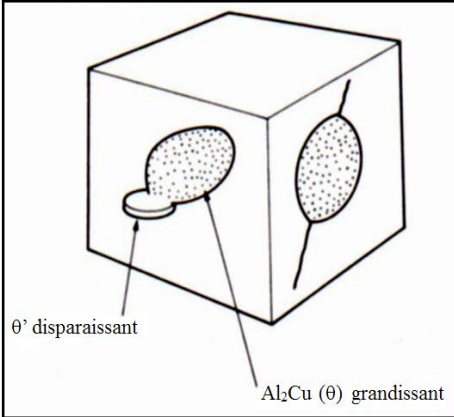
**I.5.4.3. Evolution de la sursaturation**

En fait, la solidification se fait en 4 états successifs : solution solide sursaturée  $\alpha$  → zones Guinier -Preston → phase  $\theta''$  → phase  $\theta'$  → phase  $\theta$  [13].

Tableau I.9. Evolution de la sursaturation [19].

<p>Solution solide sursaturée :</p> <p>La solution solide <math>\alpha</math> est sursaturée. Les atomes de Cuivre sont en substitution au hasard.</p>	
--	--

<p>Zones de Guinier – Preston :</p> <p>Des zones GP sous forme de disques germent à partir de la solution solide. Les faces des disques sont parfaitement cohérentes avec la matrice. Les côtés des disques sont aussi cohérents mais avec une forte déformation.</p>	 <p>zone de Guinier-Preston          ≈ 1 nm          ≈ 10 nm          ≈ 10 nm</p>
<p>Formation des précipités <math>\theta''</math> :</p> <p>Certaines zones GP croissent pour former les précipités <math>\theta''</math>. Les autres zones GP se dissolvent alors et le cuivre ainsi libéré est incorporé par diffusion aux précipités <math>\theta''</math> qui grossissent. Les faces des disques sont cohérentes avec la matrice. Les côtés des disques le sont aussi mais l'écart paramétrique génère des contraintes élastiques de cohérence.</p>	 <p>≈ 10 nm          ≈ 100 nm          ≈ 100 nm          0,404 nm          0,384 nm</p>
<p>Formation des précipités <math>\theta'</math> :</p> <p>Des précipités <math>\theta'</math> germent sur les dislocations de la matrice. Les précipités <math>\theta''</math> se dissolvent alors et le cuivre libéré est incorporé à la phase <math>\theta'</math> qui grossit, ni les unes ni les autres ne génèrent de contrainte de cohérence mais pour des raisons différentes.</p>	 <p>≈ 1 μm          ≈ 1 μm          0,404 nm          0,290 nm</p>

<p>Formation de la phase d'équilibre <math>\theta</math>:</p> <p>La phase d'équilibre (<math>\theta</math>) <math>\text{Al}_2\text{Cu}</math> germe aux joints des grains et aux interfaces <math>\theta'/\text{matrice}</math>.</p> <p>Les précipités <math>\theta'</math> se dissolvent et transfèrent le cuivre à la phase <math>\theta</math> qui précipite.</p> <p><math>\text{Al}_2\text{Cu}</math> est complètement incohérent avec la matrice. Il ne croît plus sous forme de disque, mais sous forme de globules.</p>	
--	--

Par ailleurs, l'addition de magnésium à ce système, avec une quantité de magnésium supérieure à 1 % en poids, modifie la séquence de précipitation de la manière suivante :

Solution solide sursaturée  $\rightarrow$  Zones Guinier Preston  $\rightarrow$   $S'$   $\rightarrow$  Phase S ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ )

En fait, il a été montré que, dans les alliages Al-Cu-Mg, la nature des précipités formés lors d'un vieillissement artificiel dépend du rapport Cu / Mg. Bagaryatsky a montré que, pour un rapport Cu / Mg égal à 2,2, la phase d'équilibre est  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (S) et a observé la séquence de précipitation suivante :

Solution solide sursaturée  $\rightarrow$  Zones GPB  $\rightarrow$   $(S'' + S')(S' + S) \rightarrow S \rightarrow$

D'un point de vue général, et cela est vrai en particulier pour les alliages de la série 2000, les propriétés mécaniques d'un alliage dépendent fortement de sa microstructure [20].

### I.5.5. Conclusion

À l'état pur, l'Aluminium n'est pratiquement utilisé que pour les applications électriques. Mais il est le plus souvent associé à d'autres métaux, pour former une gamme étendue des alliages avec des propriétés divergentes s'adaptant remarquablement à tous les procédés de mise en forme et répondant à des exigences variées de propriétés physiques, chimiques et mécaniques.



**Chapitre II**  
**Corrosion de l'aluminium et ses**  
**alliages**

# Corrosion de l'aluminium et ses alliages

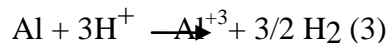
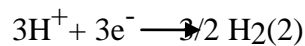
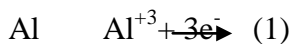
## II.1. Introduction

La corrosion est une réaction interfaciale irréversible d'un matériau avec son environnement, qui implique une consommation du matériau ou une dissolution dans le matériau d'une composante de l'environnement.

Selon le point de vue de l'ingénieur constructeur, la corrosion est une dégradation du matériau ou de ses propriétés par réaction chimique avec l'environnement [21].

## II.2. Eléments de base

De manière générale, la corrosion de l'aluminium en milieu aqueux se traduit par la somme d'une demi-réaction électrochimique d'oxydation et d'une demi-réaction électrochimique de réduction, telles que :

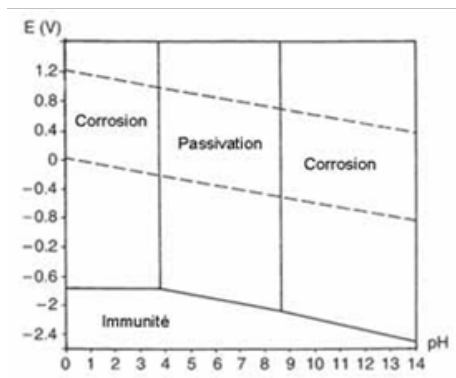


Ou bien



Le diagramme de Pourbaix de l'aluminium dans l'eau présenté sur la Figure II.1

Définit les domaines de stabilité en fonction du pH et du potentiel.

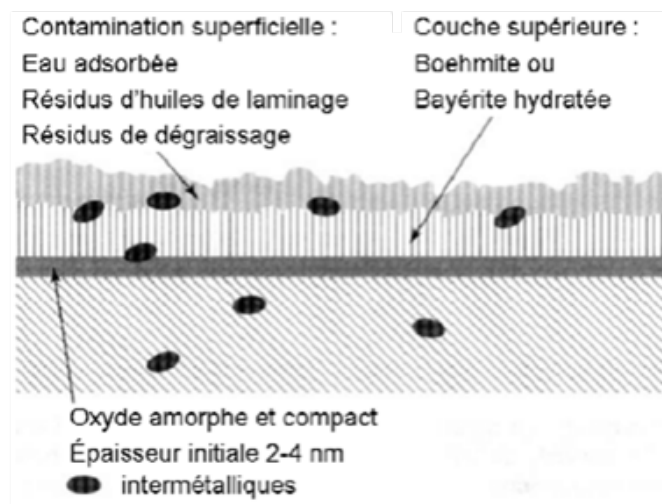


**Figure II.1.** Diagramme de Pourbaix E-pH de l'aluminium dans l'eau chimiquement pure à 25°C [22].

Ce diagramme illustre la nature amphotère de l'aluminium : il est attaqué aussi bien en milieu acide qu'en milieu basique. Pour des milieux avec un pH proche de la neutralité (de 4 à 9), l'aluminium est passif c'est-à-dire qu'un film insoluble d'oxyde ou d'hydroxyde s'est formé à sa surface. Ce dernier influence le comportement électrochimique de l'aluminium et gouverne sa résistance à la corrosion. Le paragraphe qui suit décrit la formation et la nature de ce film passif.

Il est bien connu que l'aluminium est un métal réactif qui forme facilement une couche d'alumine  $Al_2O_3$  à l'air et un film d'hydroxyde lorsqu'il est exposé à un milieu aqueux à température ambiante. Le film d'oxyde naturel est composé de deux couches dont l'épaisseur totale est comprise entre 4 et 10 nm (Figure II.2) :

- la première couche compacte et amorphe est appelée couche barrière à cause de ses propriétés diélectriques. Elle se forme en quelques millisecondes quelle que soit la température, à partir du moment où le métal est en contact avec le milieu oxydant ou l'air ; la température joue un rôle sur l'épaisseur finale ;
- la seconde couche croît sur la première en réagissant avec l'environnement extérieur. L'épaisseur finale de cette couche, poreuse et moins compacte que la couche barrière, ne sera pas atteinte avant des semaines voire des mois, en fonction des conditions physico-chimiques. De plus, elle réagit avec l'environnement extérieur au cours des différentes étapes de mise en forme du matériau ou pendant son service formant ainsi une couche de contamination superficielle. La composition de la surface est donc complexe [22].



**Figure II.2.** Couches et phénomènes d'adsorption du film d'oxyde [14].

Lors d'un contact prolongé avec l'eau, la couche externe croît et se transforme en bayérite ou böhmite en fonction de la température du milieu.

**Tableau II.1** propriétés de formes de l'oxyde d'aluminium [14].

Espèce	Structure cristalline	Formule chimique	Température de formation (°C)	Densité
Alumine	amorphe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<50-60	3,40
Bayérite	Monoclinique	α-Al(OH) <sub>3</sub>	60-90	2,53
Böhmite	Orthorhombique	γ-AlOOH	>90	3,01

Il convient de noter qu'en plus de l'aluminium, les alliages contiennent des impuretés et des éléments d'addition en solution solide et sous forme de composés intermétalliques. Les éléments plus nobles que l'aluminium comme le cuivre vont s'accumuler à l'interface métal/oxyde au cours de l'oxydation. Ils ne passeront dans l'oxyde qu'au-delà d'un certain seuil variable en fonction de l'élément considéré.

En outre, en ce qui concerne le comportement à la corrosion, les hétérogénéités de la surface vont localiser l'adsorption des ions Cl<sup>-</sup> sur la surface du film. La présence de particules à la surface du matériau peut engendrer la formation de défauts dans le film passif lors des étapes de mise en forme pouvant faciliter sa rupture (défauts dus à la différence de ductilité entre la matrice et les particules). On notera également que, au vu des différences de densité de l'alumine (3,4) avec l'aluminium sous-jacent, le film d'oxyde se trouve en compression (il peut donc supporter des déformations sans se rompre)[14].

### II.3. Les diverses formes de corrosion des alliages d'aluminium

Malgré son aptitude à la passivité, l'aluminium (et ses alliages) est sensible à la corrosion. Les diverses formes de corrosion localisée peuvent être classées en trois groupes selon qu'elles sont liées à des hétérogénéités intervenant au niveau :

- du milieu : un effet de couplage galvanique se produit lorsqu'il y a une variation locale de composition du milieu ;
- des conditions physico-chimiques à l'interface : corrosion par crevasse ;
- du matériau : corrosion galvanique, corrosion intergranulaire et corrosion par piqûres.

De manière générale, il n'existe pas de forme de corrosion spécifique de l'aluminium ou de ses alliages. La prépondérance d'un certain type de corrosion dépendra des propriétés du métal, du milieu et des conditions d'utilisation. Cependant, la présence d'espèces agressives spécifiques (au-delà d'une concentration limite) est nécessaire tels que les ions halogénures et plus particulièrement les ions chlorures (agressivité plus élevée que celles des bromures et des iodures).

Deux grandes formes de corrosion peuvent être distinguées : la corrosion généralisée et la corrosion localisée. La corrosion généralisée (ou uniforme) se traduit par une diminution uniforme et régulière d'épaisseur de toute la surface.

Le paragraphe suivant énumère les principales formes de la corrosion généralisée et la corrosion localisée des alliages d'aluminium et on rappelle les principales caractéristiques.

### II.3.1. Corrosion généralisée ou uniforme

L'aluminium mis à nu se recouvre instantanément d'une couche d'oxyde de 5 à 10 nm d'épaisseur et sa résistance à la corrosion dépend de la stabilité de cette couche d'oxyde vis-à-vis du milieu corrosif. La corrosion généralisée se caractérise par une diminution d'épaisseur uniforme sur toute la surface du métal : la couche d'oxyde étant dissoute d'une façon régulière par l'agent corrosif dans une atmosphère naturelle, rurale ou marine, la vitesse de corrosion de l'aluminium est extrêmement faible, voire insignifiante. Elle ne dépasse pas  $5 \mu\text{m}/\text{an}$ . D'une manière générale, la résistance à la corrosion généralisée de l'aluminium dépend du pH du milieu corrosif, la corrosion ne pouvant pratiquement se produire que dans les milieux acides avec  $\text{pH} < 4$  et dans les milieux basiques avec  $\text{pH} > 9$ . Mais en fait, pour un pH donné, la vitesse de corrosion dépend fortement des ions présents dans la solution. Il existe des exceptions aux limites de pH à l'intérieur desquelles on peut utiliser l'aluminium : ainsi l'aluminium résiste à la corrosion dans l'acide nitrique concentré ( $\text{pH} = 1$ ) et dans l'ammoniaque ( $\text{pH} = 13$ ) [23].

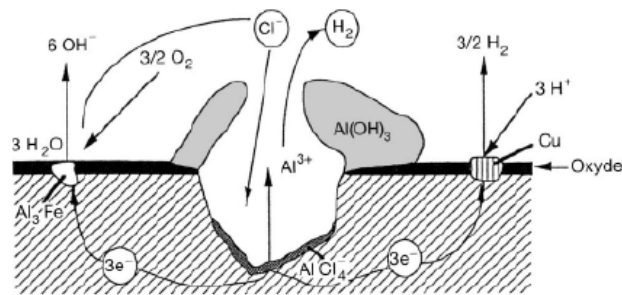
### II.3.2. Corrosion localisée

#### II.3.2.1. La corrosion par piqûres

L'aluminium et ses alliages sont sensibles à la corrosion par piqûres dans les milieux dont le pH est proche de la neutralité (milieux naturels tels que l'eau de mer). Cette forme de corrosion se développe suivant une phase d'amorçage pendant laquelle les ions  $\text{Cl}^-$  sont adsorbés dans le film d'oxyde entraînant sa rupture aux points faibles. A l'endroit des ruptures du film, il y a oxydation rapide de l'aluminium et formation d'un complexe chloruré intermédiaire  $\text{AlCl}_4^-$ . Une partie des piqûres initiées va se propager grâce à deux réactions électrochimiques d'oxydation et de réduction. La formation d'ions ou la consommation d'ions  $\text{H}^+$  va modifier le pH vers un pH alcalin. Au fond de piqûre, la dissolution de l'aluminium sous forme d'ions  $\text{Al}^{3+}$  crée un champ électrique qui déplace des ions  $\text{Cl}^-$  vers le fond de la piqûre. Ces ions neutralisent chimiquement la solution et forment des chlorures d'aluminium. L'hydrolyse des chlorures d'aluminium  $\text{AlCl}_4^-$  provoque une acidification du fond de piqûre à  $\text{pH} < 3$  causant l'auto-propagation de la piqûre. En diffusant vers l'ouverture de la piqûre, les ions  $\text{Al}^{3+}$  vont rencontrer un milieu de plus en plus alcalin et vont précipiter sous forme d'hydroxyde  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Les microbulles d'hydrogène produites par la réaction de



réduction des ions  $H^+$  poussent l'hydroxyde vers l'ouverture de la piqûre où il se dépose. La Figure II.3 décrit les mécanismes mis en jeu lors des phénomènes de corrosion par piqûres dans les alliages d'aluminium.



**Figure II.3.** Mécanismes de corrosion par piqûres des alliages d'aluminium [24].

L'accumulation des produits de corrosion en surface peut obstruer l'ouverture de la piqûre et ainsi ralentir ou arrêter le processus. La corrosion par piqûres peut être caractérisée par trois paramètres principaux à savoir la densité de piqûres par unité de surface, la vitesse de propagation et la probabilité de piqûres [24].

### II.3.2.2. Corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire que l'on rencontre sur différents métaux et certains alliages d'aluminium est une corrosion qui se propage dans le métal en consommant uniquement les joints de grain. De nature électrochimique, elle résulte de la présence aux joints des grains d'une zone continue et anodique par rapport à l'intérieur des grains. Pour les alliages d'aluminium, cette zone anodique a deux origines :

Soit la précipitation directe aux joints de grains de phases anodiques par rapport à l'intérieur des grains :

- Cas des phases  $Mg_2Al_3$  dans les alliages série 5000 ;
- Cas des phases  $Mg_2Si$  dans les alliages série 6000 ;
- Cas des phases  $MgZn_2$ , Al-Zn-Mg dans les alliages série 7000 ;

Soit la constitution aux joints de grain d'une zone anodique appauvrie en éléments nobles : dans les alliages de la série 2000 en particulier, la précipitation intergranulaire de phases du type  $Al_2Cu$ , Al-Cu-Mg ( $Al_2-Cu-Mg$ ) peut entraîner une diminution de la teneur en cuivre dans la zone adjacente aux joints de grains et donc un couplage galvanique entre cette zone et le reste du grain.

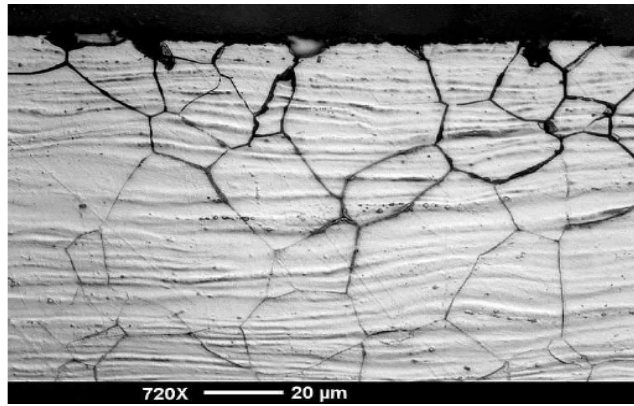


Figure II.4. Corrosion intergranulaire [25].

### II.3.2.3. Corrosion galvanique

Lorsque deux métaux différents sont en contact électrique dans un milieu corrosif, ils forment une pile qui produit du courant en consommant le métal le plus électro-négatif qui constitue l'anode (**Figure II.5**). L'aluminium est anodique par rapport à la plupart des métaux (à l'exception du zinc et du magnésium). L'aluminium sera donc souvent la victime des assemblages mixtes en contact avec de l'eau ou un liquide qui constituera l'électrolyte de la pile. En fait, la vitesse d'attaque de l'aluminium dépend :

- De la différence de potentiel entre les deux métaux en présence ;
- De la résistance électrique entre les deux métaux ;
- Du rapport des surfaces cathode et anode ;
- Du milieu corrosif et plus particulièrement de sa conductivité : l'eau de mer, de très faible résistivité (quelques ohms / cm<sup>2</sup>) est particulièrement agressive à cet égard[25].

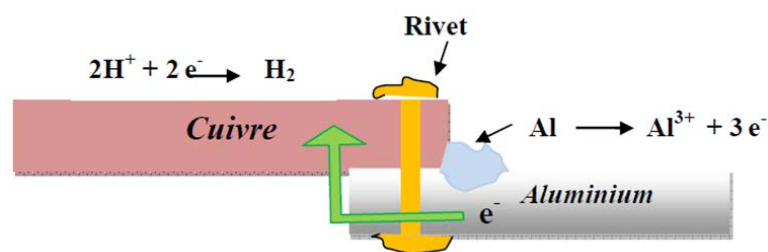
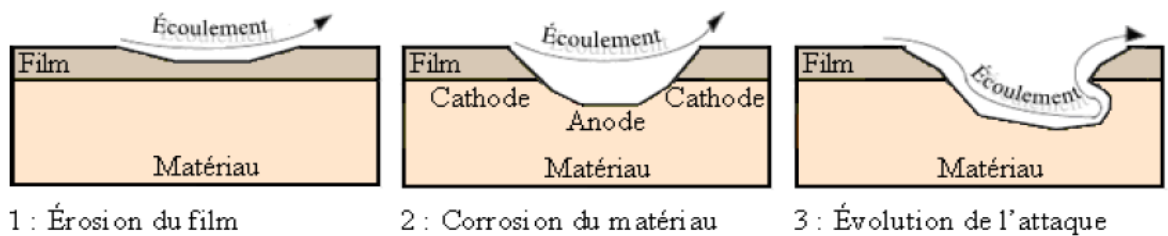


Figure II.5. Corrosion galvanique [23].

**II.3.2.4. Corrosion par érosion**

La corrosion par érosion se produit dans un fluide en mouvement. Cette forme de corrosion est liée à la vitesse de passage du fluide, elle se caractérise par un amincissement local du métal qui prend la forme de rayures, de ravinements, d'ondulations, toujours orientés dans une même direction [26].

Suite à la disparition du film protecteur par érosion, une pile de corrosion se crée. Le matériau de base se trouve ainsi exposé à deux types d'attaque par la figure II.6 [1].



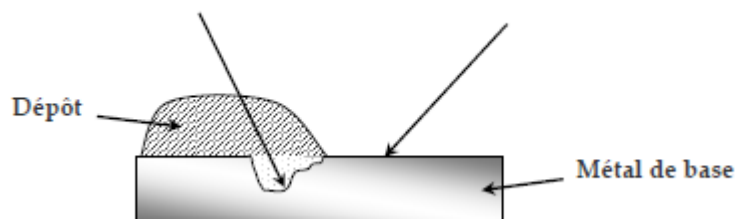
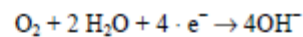
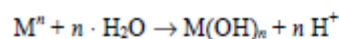
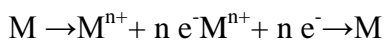
**Figure II.6.** Les étapes de la corrosion par érosion [1].

Le matériau de constitue l'anode de la pile créée. Il se corrode, il est aussi soumis à l'érosion suite à l'écoulement de fluide.

**II.3.2.5. Corrosion caverneuse**

La corrosion caverneuse ou par crevasse est un phénomène d'attaque rapide dans des zones confinées. Pour pouvoir fonctionner comme site de corrosion, une crevasse doit être suffisamment large pour permettre la pénétration des corrodant, mais aussi suffisamment enfermée pour assurer que les corrodants restent dedans. La présence d'un dépôt à l'interface métal/solution peut constituer une zone d'aération différentielle qui entraîne des attaques corrosives localisées sous le dépôt (figure II. 7).

Réactions anodiques (zone désaérée) Réaction cathodique (zone aérée)



**Figure II.7.** Corrosion par effet de crevasse.

**II.3.2.6. La corrosion exfoliante ou feuilletante**

C'est une forme de corrosion intergranulaire se propageant suivant une multitude de plans parallèles à la direction de transformation. Des feuillets de métal inattaqués très minces subsistent entre ces plans et sont repoussés par le gonflement des produits de corrosion et s'écartent de la surface du métal comme les feuilles d'un livre[14].

**II.3.2.7. Corrosion sous contrainte**

Est un mode d'endommagement de matériaux exposés à un environnement corrosif et soumis à une contrainte mécanique. Ce mode de corrosion est caractérisé par la propagation de fissures perpendiculairement à la contrainte mécanique et en général lelong des joints de grains dans le cas des alliages d'aluminium [25].

La propagation de ces fissures de corrosion sous contrainte peut être décrite selon deux mécanismes :

- ❖ La propagation électrochimique et la fragilisation par l'hydrogène.

Le premier mécanisme est relativement intuitif, la contrainte jouant le rôle d'accélérateur de la corrosion intergranulaire détaillée précédemment. La dissolution anodique des joints de grains où zones adjacentes est accentuée par la contrainte mécanique qui empêcherait notamment une repassivation en pointe de fissure par concentration des contraintes et déformation plastique.

- ❖ Un second mécanisme mettrait en jeu la fragilisation par l'hydrogène.

Les réactions de dissolution de l'aluminium et de tout métal dans l'eau, produisent de l'hydrogène (produit de la réaction cathodique de réduction de l'eau). En pointe de fissure, l'hydrogène peut s'insérer dans le métal sous forme atomique, diffuser et s'accumuler dans les zones de déformation plastique où il est plus soluble. L'hydrogène va ensuite accentuer la décohésion intergranulaire et favoriser la propagation des fissures de corrosion sous contrainte [28].

## **II.4. Protection contre la corrosion**

Ils peuvent être classés en trois catégories électrochimiques, inhibitrices et d'isolation ou de recouvrement du matériau.

### **II.4.1. Protection électrochimique**

Il existe deux types de protection par cette méthode : protection cathodique et protection anodique.

#### **II.4.1.1. Protection cathodique**

Le principe de la protection cathodique consiste en l'apport des électrons nécessaires à la structure métallique à protéger, pour supprimer ou réduire sa dissolution. Cet apport se fait par deux méthodes, soit par un courant imposé à partir d'une source extérieure de courant continu, soit par couplage galvanique (anode sacrificielle) avec un métal moins noble qui se corrode à la place de la structure à protéger. Dans les deux cas, le potentiel du métal à préserver est déplacé vers les valeurs négatives, ce qui permet de diminuer ou d'éviter les réactions anodiques de dissolution.

#### **II.4.1.2. Protection anodique**

Ce type de protection est réservé aux matériaux possédant un domaine de passivation anodique sur leurs courbes intensité-potentiel. Le principe consiste à maintenir le métal dans ce domaine anodique par application du potentiel correspondant. Dans ce cas, le courant de corrosion est fortement réduit. Il est généralement assuré par une source extérieure de courant [29].

## **II.4.2. Ajout d'inhibiteurs de corrosion**

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique qui ajoute par petites quantités et diminue de façon significative la vitesse de corrosion. Il existe trois types d'inhibiteurs suivant leurs modes d'action sur les réactions électrochimiques : les inhibiteurs anodiques qui agissent sur les réactions anodiques, les inhibiteurs cathodiques qui agissent sur les réactions cathodiques et enfin les inhibiteurs mixtes qui modifient les vitesses des deux réactions partielles de corrosion ; anodiques et cathodiques. Les inhibiteurs sont surtout caractérisés par leur souplesse d'utilisation (avant ou en cours de fonctionnement) et par leur pouvoir d'action élevé. Ils s'adsorbent et forment un film mince.

### II.4.3. Protection par traitement de surface

Elle se pratique soit par conversion de la surface, soit par application d'un revêtement extérieure.

#### II.4.3.1. Conversion de la surface

Les différentes couches de conversion sont suivant le procédé de fabrication, la passivation, l'anodisation, la phosphatation et la chromatisation.

- **La passivation**

Après traitement de l'aluminium dans une solution d'acide nitrique concentrée, les propriétés de la surface sont modifiées de telle façon qu'elles ne réagissent plus avec des solutions moins concentrées; c'est le phénomène de passivation . Autrement dit, la passivation est la formation d'un film d'oxyde métallique en surface qui constitue un écran séparant le métal de son milieu.

- **L'anodisation**

Procédé pratiqué surtout sur l'aluminium, le titane et leurs alliages, il consiste à renforcer la couche d'oxyde naturelle déjà existante, par une oxydation anodique. Il se forme à la surface du substrat une couche d'oxyde épaisse et parfaitement adhérente par le passage d'un courant électrique entre la structure à protéger qui est placée en anode et une cathode qui est généralement en nickel ou en plomb. La solution d'électrolyse est une solution d'acide sulfurique, chromique ou oxalique [9].

- **La phosphatation**

Elle concerne principalement l'acier, le zinc, l'aluminium, le cadmium et leurs alliages. Ce procédé consiste en l'immersion du métal à protéger dans une solution aqueuse d'acide d'un phosphate primaire, le produit de l'attaque corrosive sur le métal précipite à la surface de ce dernier en formant une couche de phosphate. L'épaisseur de la couche formée est suivant les cas, mince lors de son utilisation comme couche d'accrochage pour les peintures et épaisse lors de son utilisation comme couche protectrice contre la corrosion. Ce type de traitement est aussi appliqué pour éviter le grippage et l'usure des pièces mécaniques qui subissent des frottements.

- **La chromatisation**

S'applique principalement au zinc et à l'aluminium. Le procédé consiste en l'immersion du métal à protéger dans une solution acide de chromate ou de bichromate, une couche d'oxydes de chromate se forme à la surface. Ce traitement est complémentaire à la phosphatation ou à l'anodisation pour renforcer leurs effets [29].

**II.4.3.2. Protection par revêtement**

L'un des procédés les plus anciens pour la protection et le prolongement de la durée d'un métal est l'élaboration des revêtements protecteurs, qui peuvent être non métalliques ou métalliques. Les premiers sont de deux types : organiques, engendrant les revêtements en bitume, polymériques, les peintures, les vernis et non organiques tel que l'émail, le ciment et les céramiques réfractaires. Les dépôts métalliques sont aussi divers qui varient allant du simple étamage jusqu'aux dépôts des métaux précieux d'argent ou de dorure.

Le choix du métal à déposer, la technique d'élaboration et les paramètres opératoires sont en fonction de l'objectif à atteindre qui est le plus souvent l'amélioration des caractéristiques des surfaces pour accroître leur résistance vis-à-vis de la corrosion et de l'usure, ainsi que leur comportement aux frottements. Des revêtements sont aussi élaborés dans le but d'obtenir un meilleur aspect extérieur [9].



**Chapitre III**  
**Dispositifs expérimentaux**



# Dispositif expérimentale

## III.1. Introduction

Les différentes techniques et étapes de préparation, de caractérisation ainsi que les techniques de mesure sont bien expliquées dans ce chapitre.

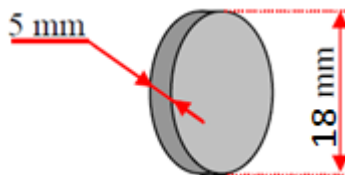
## III.2. Matériau utilisé

Pour l'étude expérimentale on a utilisé l'alliage d'aluminium de nuance 2024 T3 (norme américaine), qui a subi un traitement de mise en solution à une température de  $495 \pm 5^\circ\text{C}$ , trempé à l'eau, écroui et muri (vieillessement naturel), avec une composition chimique donnée par le tableau III.1

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'alliage d'aluminium 2024 T3 [3].

Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Cr	Autres
90.7 -94.7	3.8-4.9	1.2-1.8	0.3-0.9	<0.5	<0.5	<0.25	<0.15	<0.1	<0.15

Les éprouvettes sont tirées d'un barreau cylindrique de diamètre de 20 mm, sous forme de disques de 5 mm d'épaisseur (figure III.1).



**Figure III.1.** Dimensions de l'éprouvette étudiée.

## III.3. Préparation métallographique

### III.3.1. Enrobage

L'enrobage se fait pour faciliter le polissage et l'observation par la microscopie. Il consiste à mettre les échantillons dans des petits moules puis de remplir ces moules par une résine polymère qui après solidification piège l'échantillon. Nous avons utilisé l'enrobage à froid pour éviter toutes transformations et changements structuraux.

### **III.3.2. Polissages**

L'observation microscopique nécessite une surface plane et bien polie de l'échantillon observé, pour notre travail nous avons utilisé le polissage mécanique, avec l'utilisation de l'eau comme lubrifiant, pour éviter le chauffage de la surface pour permettre aussi d'éliminer les débris causés par l'abrasion. Il y a deux types de polissage :

➤ **Un polissage grossier**

Est considéré comme l'étape critique du processus de préparation d'un échantillon métallographique. Les papiers abrasifs de granulométries croissantes (400, 600, 1000 et 1200). L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible taille de grain. A chaque fois que la granulométrie est changée, il faut effectuer une rotation de 90° pour éliminer les stries.

➤ **Polissage de finition**

nous avons utilisé un feutre, avec de une pâte diamantée de granulométrie 3 µm, cette opération peut durer plus de 5 min pour obtenir une surface miroir sans stries.

### **III.4. Four à résistance**

C'est un four ayant une chambre de forme parallélépipédique de volume de 6 L. Le chauffage est obtenu par effet Joule grâce à une résistance encastrée tout autour de la chambre dont la température maximale atteinte est de 1200°C. Le four est équipé d'un système de régulation assez précis, ainsi que d'une minuterie permettant de réaliser des traitements thermiques en pallier : c'est à dire des maintiens à températures constantes pendant des périodes de temps préalablement définies.

### **III.5. Traitement d'homogénéisation**

La durée du traitement d'homogénéisation est généralement fonction de la section des produits, qui elle-même est souvent en relation avec l'importance des ségrégations et sursaturations présentes à l'état brut de coulée. Les durées habituelles sont de l'ordre de 5 à 48 h et donc d'autant plus longues que la section du produit est plus importante. Il faut distinguer à ce sujet le temps nécessaire pour atteindre la température effective d'homogénéisation (variable suivant les dimensions et la forme du produit, la charge des fours, leur conception et leur puissance) du temps de séjour à la température désignée : c'est le temps de séjour à la température d'homogénéisation qui doit être considéré comme seul efficace [12].

Les températures d'homogénéisation dépendent essentiellement de la nature de l'alliage. Le traitement d'homogénéisation est fait dans un four électrique à la température de  $(495^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C})$  pendant 13 heures, après un refroidissement à l'air libre. Le schéma suivant :

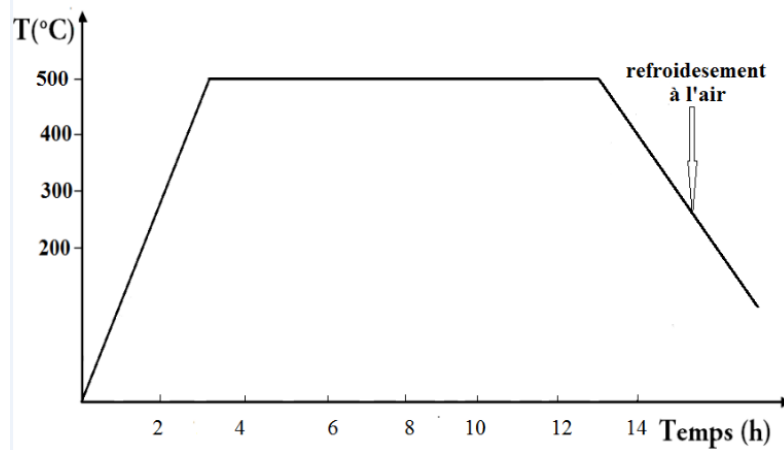


Figure III.2. Schéma du traitement d'homogénéisation appliqué.

### III.6. Durcissement structural

Le traitement du durcissement se fait en trois étapes comme le montre la **Figure III.3**.

**Une mise en solution** qui consiste à maintenir l'alliage à une température T comprise entre le solidus et le solvus. Ceci permet, d'une part, d'effacer l'histoire thermique du matériau et, d'autre part, d'obtenir une bonne homogénéisation des différents constituants de la solution solide. **Une trempe à l'eau est ensuite effectuée** : la solution solide est alors une solution sursaturée. **L'évolution de la solution sursaturée est ensuite contrôlée** : le matériau étant placé à une température dite de revenu, cette solution solide va progressivement se décomposer en une solution solide riche en aluminium et différentes phases précipitées. Ce sont ces précipités qui durcissent l'alliage, et il est donc nécessaire de parfaitement maîtriser leur croissance : leur taille, leur morphologies et leur nombre contrôlent en effet le durcissement de l'alliage.

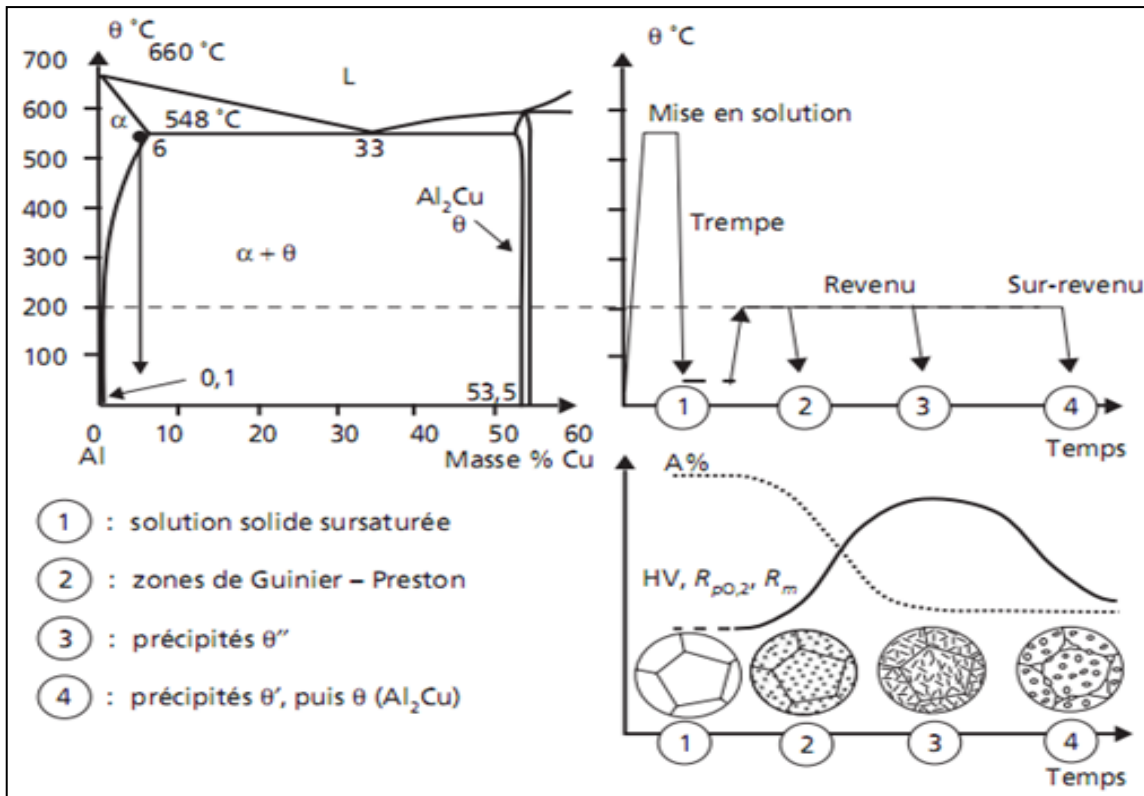


Figure III.3. Schéma de principe du traitement de durcissement structural d'un alliage Al-4%Cu.

Ce tableau donne la composition chimique du réactif Keller, utilisé pour l'observation microscopique.

III.7. Attaque chimique

Tableau III.2. Le réactif utilisé pour l'observation microscopique de nos échantillons, le réactif de Keller.

Désignation	Composition chimique	Condition d'utilisation	Emploi
<b>KELLER</b>	2,5 ml acide nitrique HNO <sub>3</sub> 1,5 ml acide chloridrique HCl 1 ml acide fluoridrique HF 95 ml eau H <sub>2</sub> O	Séchage de l'échantillon	L'attaque se fait de 7 à 12 secondes

### III.8. Observation microscopique

Les différentes analyses ont été effectuées grâce à l'utilisation d'un microscope optique « Olympus 250 » muni d'un logiciel « Archimed » qui permet de lire et sauvegarder les images sur le micro-ordinateur (Figure III.4).

L'avantage de ce microscope optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Il est relié à un micro-ordinateur et permet l'observation des échantillons avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000 fois (Figure III.5).



**Figure III.4.** *Microscope optique muni d'une caméra numérique connecté à un microordinateur.*

### III.9. La dureté

A l'inverse des essais de dureté usuels, les essais de microdureté sont destinés à définir les propriétés à l'intérieur des grains, soit de la matrice, soit de ses divers constituants. L'essai décrit sur la figure III.7, utilise un pénétrateur de type Vickers en diamant. Le diamant laisse une empreinte carrée et l'on mesure la longueur de la moyennedes deux diagonales de l'empreinte. Les mesures de la microdureté moyenne Vickers ont été effectuées sur la surface des échantillons traités, polis mécaniquement et attaqués.

#### ➤ Teste de la microdureté

La détermination de la microdureté HV a été réalisée au laboratoire du département métallurgie (ENP) par un Microduromètrede marque INSTRONWOLPERT TESTOR montré dans la **figure III.7**.

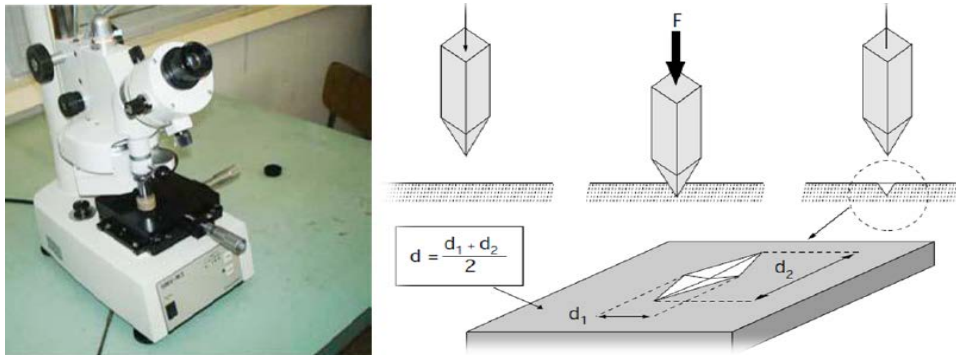
### ➤ Principe

La microdureté Vickers consiste à enfoncer un pénétrateur en diamant de forme pyramidale de base carrée et d'angle  $136^\circ$  dans l'échantillon sous l'effet d'une charge, comme le montre dans la figure III-8, après on obtient une empreinte. On calcule les diagonales de cette empreinte et on fait la moyenne puis on applique la loi:

$$H_V = \frac{2 \cdot P \cdot \sin(136^\circ)}{d^2} \longrightarrow H_V = 1854.4 \frac{P}{d^2}$$

Avec (P) charge appliquée et (d) diagonales de l'empreinte.

Nous avons fait plusieurs essais pour l'échantillon.



**Figure III.5.** a)- Microduromètre b) Dimensions de l'empreinte selon l'essai de la dureté Vickers.

### III.10. Tests d'immersion en milieu corrosif

Une série d'échantillons ont été polis et immergés dans la solution corrosive de NaCl à deux concentrations 0,5N et 3N pour des durées différentes de 1h, 4h, 7h, 24h, 3jours, 7jours et 12 jours respectivement afin de poursuivre l'évolution de la corrosion en fonction du temps et du milieu d'immersion. Cette corrosion a été évaluée par la microscopie optique

### III.11. Calcul de la taille moyenne de grains et du taux de corrosion

Le traitement d'images désigne une discipline de l'informatique et des mathématiques appliquées qui étudie les images numériques et leurs transformations, dans le but d'améliorer leur qualité ou d'en extraire de l'information.

Il s'agit d'un sous-ensemble du traitement du signal dédié aux images, tout en opérant dans le domaine numérique (par opposition aux techniques analogiques de traitement du signal, comme la photographie ou la télévision traditionnelles).

Dans le contexte de la vision artificielle, le traitement d'images se place après les étapes d'acquisition et de numérisation, assurant les transformations d'images et la partie de calcul permettant d'aller vers une interprétation des images traitées. Cette phase d'interprétation est d'ailleurs de plus en plus intégrée dans le traitement d'images, en faisant appel notamment à l'intelligence artificielle pour manipuler des connaissances, principalement sur les informations dont on dispose à propos de ce que représentent les images traitées (connaissance du domaine).

Bien qu'il n'y ait pas de substitut à la formation et l'expérience, Visilog.6 a été conçu à la fois pour rendre les choses plus faciles pour les débutants et pour gagner du temps de développement pour les plus expérimentés en matière d'imagerie numérique. Bien que Visilog.6 est un programme sophistiqué utilisant des modèles complexes de visualiser, traiter et analyser des images, l'interface utilisateur se compose de facilité à suivre les menus et les boîtes de dialogue comme le montre la *Figure IV.6*. et ces commentaires dans le *Tableau IV.3*.

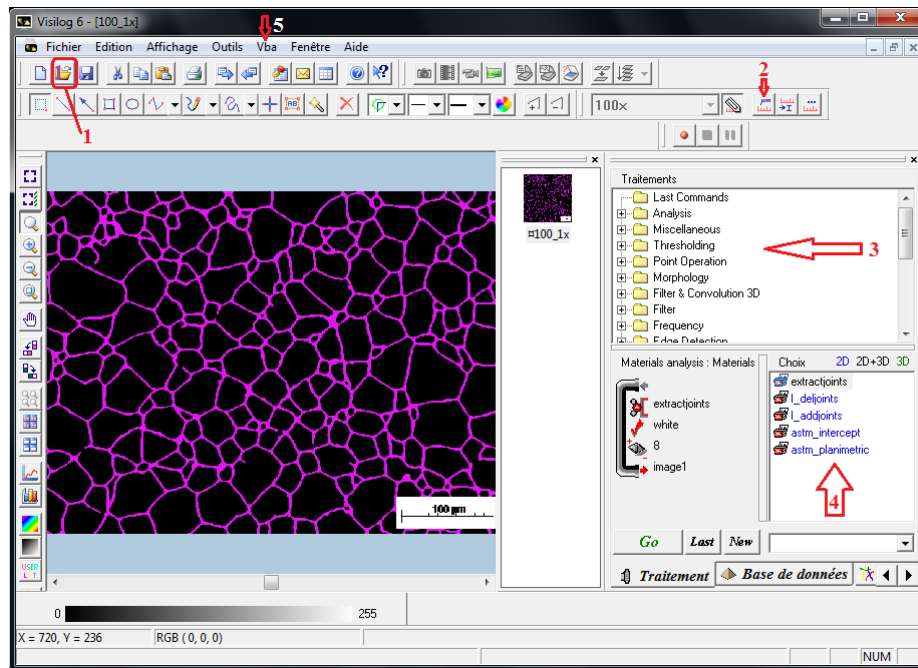


Figure III.6. L'interface de Visilog et principales fonctionnalités.

Tableau III.3 : Description des principales fonctions utilisées.

numéro	description
1	Ouverture de l'image
2	calibration
3	Les fonctions intégrées
4	Extraction des joints de grains et calcul de la taille moyenne de grains
5	Editeur VBA de programmation

Pour le calcul de la taille moyenne de grains Visilog offre pas mal de programmes selon la norme ASTM (American society for testing and material) et chaque programme requis une image de type donné. Visilog est également utilisé pour le calcul du taux de phase, de précipitation, d'inclusion ainsi que plusieurs fonctionnalités dans le domaine des matériaux et métallurgies.

Les étapes du traitement jusqu'à la numérisation complète de l'image ont fait automatiquement et sont montrés dans les figures ci-après pour les deux cas, la taille des grains (**Figure III.7**) et le taux de corrosion (**Figure III.8**).



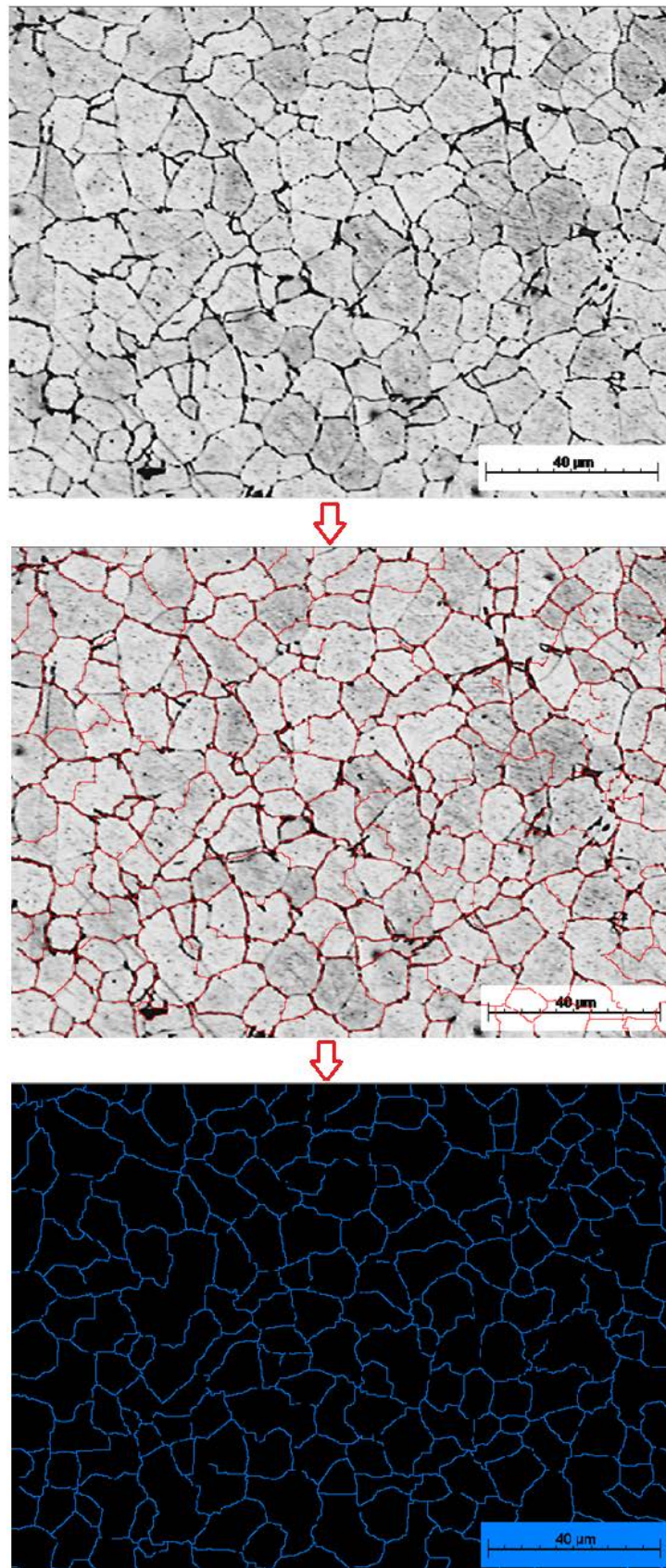


Figure III.7. Les étapes de numérisation de l'image.

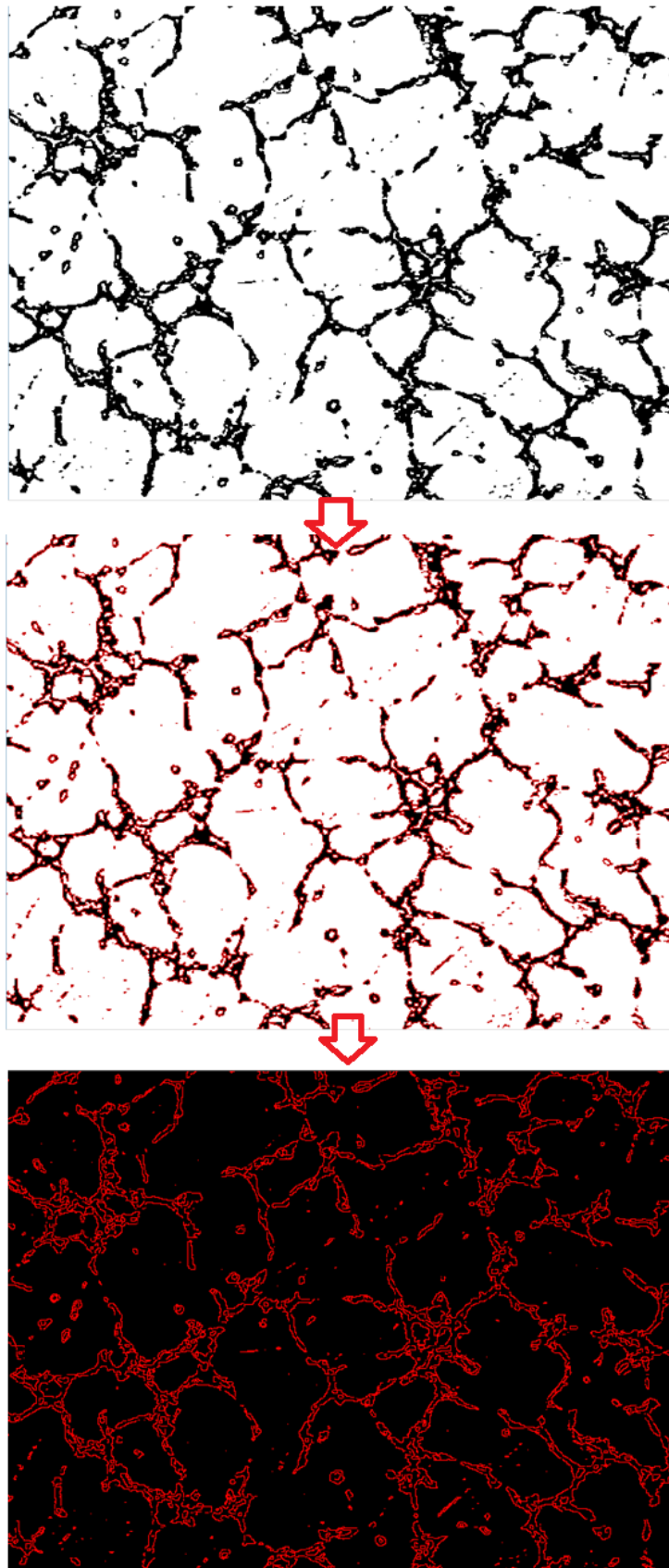


Figure III.8. Les étapes de numérisation de l'image.



**Chapitre IV**  
**Résultats et interprétations**

# Résultats et interprétation

L'interaction des matériaux avec l'environnement, est susceptible de provoquer la corrosion, se produit à la surface de ces matériaux. Il paraît donc évident qu'une bonne connaissance de la microstructure des matériaux est indispensable à la compréhension des phénomènes de corrosion. De ce fait, une analyse de la structure métallurgique de l'alliage 2024-T3 utilisé dans notre étude a été effectuée. Cette partie présente donc les résultats obtenus par des observations réalisées au microscope optique.

## IV.1. Analyse microstructurale

En fonction du mode opératoire et des techniques expérimentales effectuées dans cette partie, les analyses se font en trois étapes avant et après la corrosion

- L'analyse des échantillons de l'alliage à l'état brut ;
- L'analyse des échantillons ayant subi un traitement d'homogénéisation;
- L'analyse des échantillons ayant subi un durcissement structural

## IV.2. La structure métallographique du métal

La structure du métal de base est une structure entouré par de petites particules plus ou moins espacées représentative de la précipitation au joint de grain sachant que le rapport massique  $\text{Cu/Mg} = 2.47$ , la phase d'équilibre est du type  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ .

La matrice blanche représente la phase  $\alpha$  et les grains noirs aux joints de grains sont considérés comme étant le précipité  $\text{Al}_2\text{CuMg}$ . Quant aux petites particules sur la matrice du grain, elles sont considérées comme étant de fins précipités de type  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Les grosses particules (couleur grises) sont considérées comme des précipités  $\text{Al}_2\text{Cu}$  insolubles (non remis en solution) comme montre dans la figure (IV.1) [10].

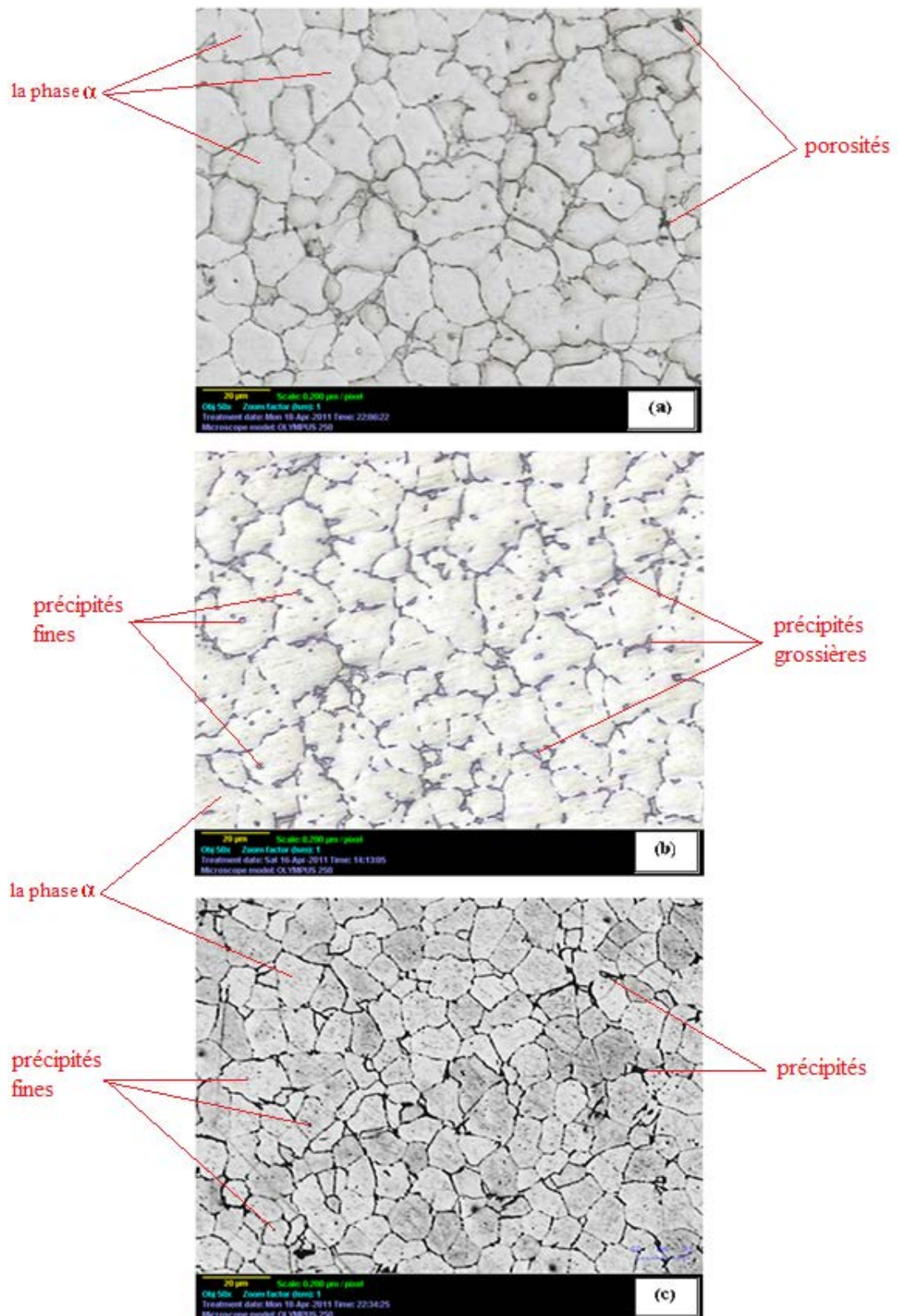
Les valeurs de la taille moyenne des grains sont montrées sur le tableau ci-dessous.

**Tableau IV.1.** Les tailles de grain des structures initiales.

Echantillon	Taille de grain ( $\mu\text{m}$ )
A l'état brut	11.547
A l'état homogénéisé	13.716
A l'état de durcissement structural	7.815

Ces valeurs montrent clairement l'accroissement des grains durant le traitement d'homogénéisation, cependant, leurs affinements après durcissement structurale.



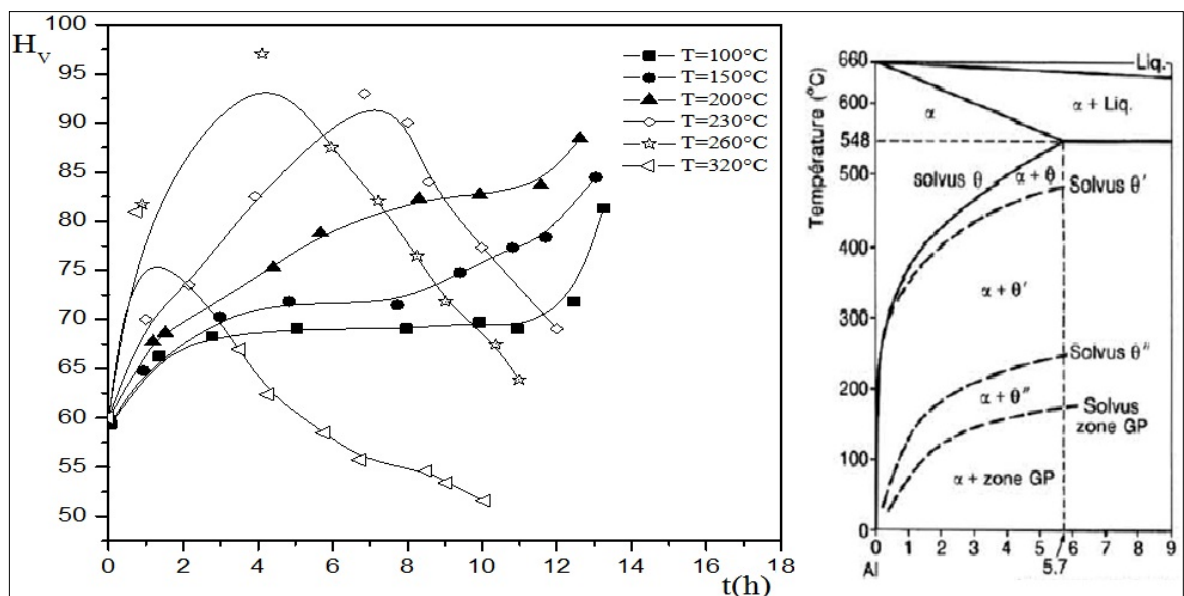


**Figure IV.1.** Microstructure dans les trois états (a) brut, (b) homogénéise et (c) durcissement structurale.

### IV.3. Résultats de l'essai de microdureté

L'aluminium est capable de former des solutions solides avec la plupart des métaux qui lui sont associés comme constituant d'alliage. La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation de la solubilité solide des éléments d'addition avec la température. Autrement dit, pour qu'un alliage soit traitable thermiquement, il y a lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium un diagramme d'équilibre binaire. Avec les alliages d'aluminium à durcissement structural, des caractéristiques mécaniques élevées peuvent être obtenues par mise en solution, trempe et maturation ou revenu; ces caractéristiques mécaniques élevées sont alors liées à la présence, dans la matrice d'aluminium, d'une précipitation très finement dispersée provenant de la décomposition partielle de la solution solide sursaturée.

Le principe du durcissement structural basé sur la précipitation comme le montre la figure IV.2, c'est-à-dire la diminution de la solubilité d'éléments d'alliage avec la température. L'élément d'alliage cuivre permet, lors des processus thermomécaniques, la précipitation des phases appelées phases durcissantes, à l'origine des bonnes propriétés mécaniques des alliages de cette série.



(a)

(b)

**Figure IV.2.**(a) Courbes isothermes de dureté, (b) Diagramme d'équilibre Al-Cu.

Si la température est inférieure à  $130^\circ\text{C}$ , on a la formation des zones de Guinier-Preston de forme cylindriques de 2 à 5 nm de diamètre [30], et on constate d'après la courbe (a) une augmentation rapide de la dureté à  $100^\circ\text{C}$

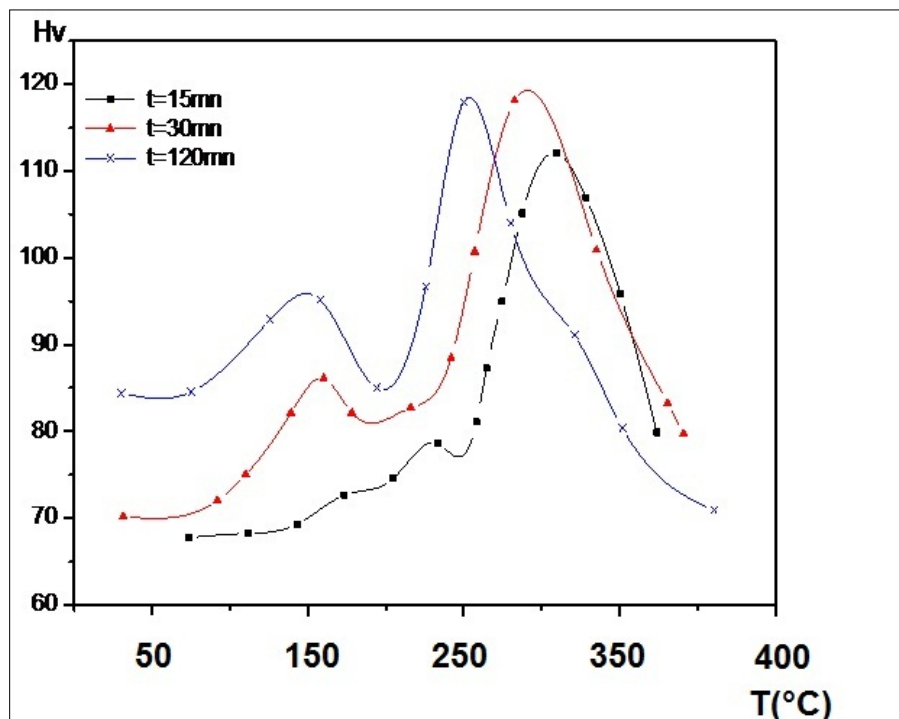
La formation des zones GPB atteint son maximum durant un temps approximatif de 8 heures.

Si la température atteint  $165^\circ\text{C}$  on observe encore la formation des zones de Guinier-Preston au début, mais au cours du revenu, on voit l'apparition tout d'abord de

la phase de transition  $S'-Al_2CuMg$  sous forme d'aiguilles cohérentes avec la matrice et parallèles aux directions [30]; c'est ce qu'on a remarqué dans nos courbes à  $T=150\text{ °C}$  et à  $T=200\text{ °C}$ .

Si la température de revenu s'élève (au-dessus de  $200\text{ à }220\text{ °C}$ ) ou si la durée est plus grande, la phase de transition  $S'-Al_2CuMg$  apparaît dès le début mais elle est remplacée peu à peu par une nouvelle phase, encore métastable appelée  $S'$ ; Enfin, lorsque les conditions de revenu sont plus poussées, les aiguilles de phase  $S'$  se transforment en lattes de phase d'équilibre  $S-Al_2CuMg$  qui présentent un réseau orthorhombique [30], c'est le cas des courbes à  $T=230\text{ °C}$ ;  $260\text{ °C}$  et  $320\text{ °C}$ .

La formation des zone  $S'-Al_2CuMg$  et  $S-Al_2CuMg$  est plus prédominante pour des températures  $230\text{ °C}$ ;  $260\text{ °C}$  et  $320\text{ °C}$  et on constate que le palier des zones GPB est totalement disparu.



**Figure IV.3.** Courbe isochrone de dureté

La figure IV.3 montre la variation de la dureté Vickers d'un échantillon non laminé sous une tension 100g en fonction de la température de revenu pour des temps de maintien 15, 30 et 120 mn.

A partir de la courbe de la dureté de 15 mn, on remarque l'existence de trois étapes de durcissement tel que la formation des zones GPB jusqu'à  $220\text{ °C}$ , en suite formation des précipités de la phase  $S'-Al_2CuMg$  jusqu'à  $320\text{ °C}$  et les précipités d'équilibre  $S-Al_2CuMg$  au-delà de  $320\text{ °C}$ . On peut déduire que l'augmentation de la dureté à basse température jusqu'à  $220\text{ °C}$  dans l'alliage indique la formation et la croissance des zones GPB. Au-delà de  $220\text{ °C}$  nous observons une faible diminution de la dureté, cette diminution est due à la dissolution des zones GPB.

A partir de 230°C, nous remarquons une croissance des précipités de la phase S'-Al<sub>2</sub>CuMg, cette croissance durcit l'alliage qui atteint son maximum en 320°C. Au-delà de 320°C on observe un adoucissement due à la précipitation de la phase d'équilibre.

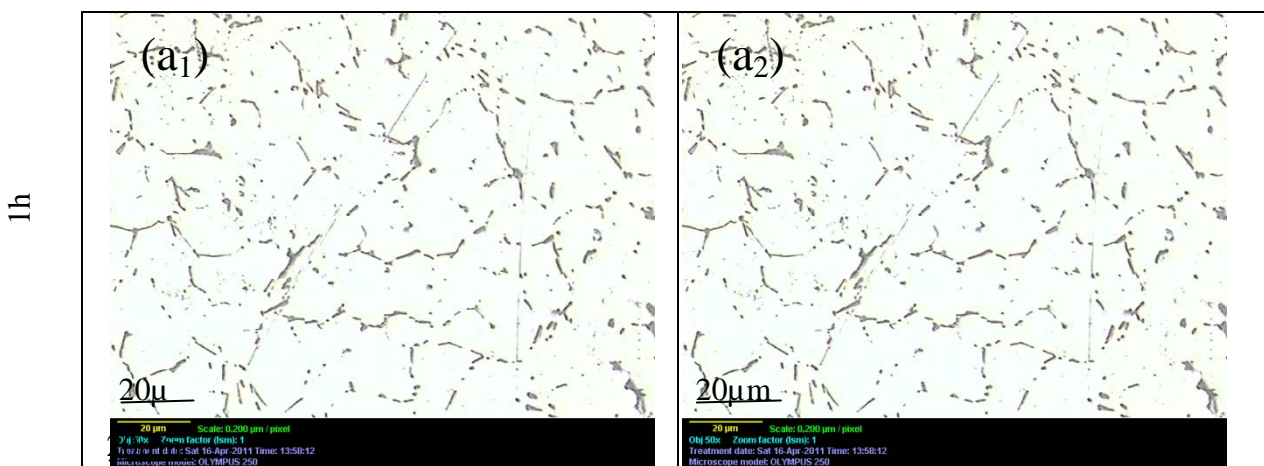
Par contre dans la courbe de la dureté de 30 et 120 mn ;de temps de revenu nous remarquons un déplacement des deux courbes vers la gauche, ce qui veut dire que la formation des zones GPB se produit à une température proche de l'ambiante et disparaissent à une température approximativement proche à 150°C qui initie la formation des précipités de la phase S'-Al<sub>2</sub>CuMg. Ces précipités se transforment à une phase d'équilibre S-Al<sub>2</sub>CuMg à une température approximative de 300°C dans le cas d'un revenu à 30 mn, et à une température de 260°C pour un revenu à 120 mn.

#### IV.4. Résultats des tests d'immersion

L'alliage d'aluminium 2024 T3 présente donc une microstructure avec des hétérogénéités présentes à différentes échelles du matériau : les précipités durcissants et les particules dispersoïdes à l'échelle du nanomètre que l'on retrouve aux joints de grains et dans la matrice, et les particules intermétalliques grossières enrichies en Cu, Mg, Mn et Fe à l'échelle du micromètre. Si les précipités durcissants et les particules dispersoïdes peuvent avoir une influence vis-à-vis de la tenue à la corrosion, il est évident que les particules intermétalliques grossières auront un rôle primordial dans le comportement à la corrosion de l'alliage.

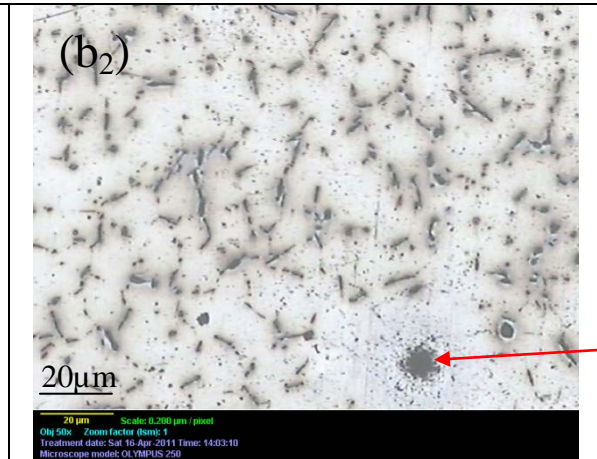
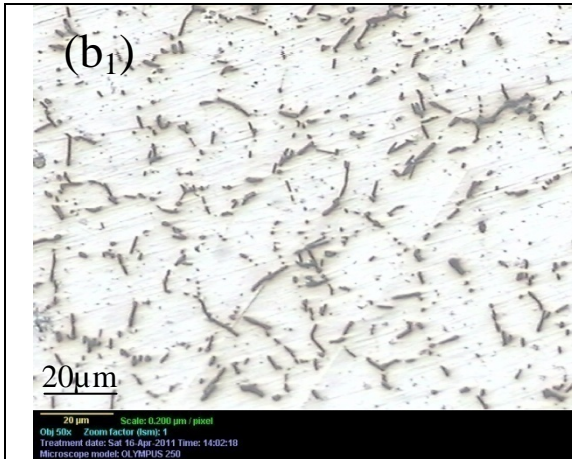
Dans cette partie, nous allons présenter les résultats des tests d'immersion des échantillons dans deux milieu basique NaCl, l'un a une concentration de 0.5 M et l'autre 3M. Nous avons utilisé trois types d'échantillons qui sont différents par leur état brut, homogénéisé et durcissement structural.

##### IV.4.1. Structures bruts



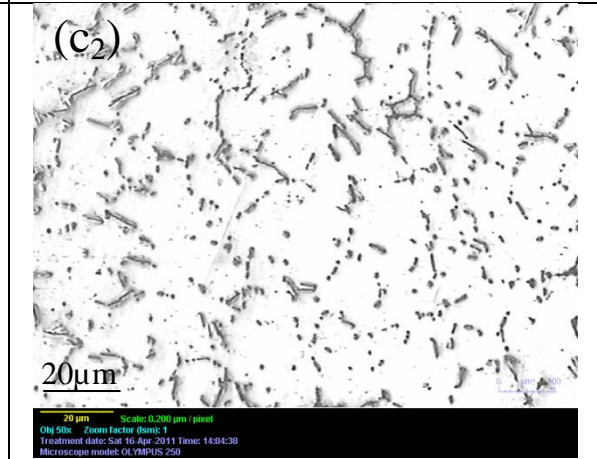
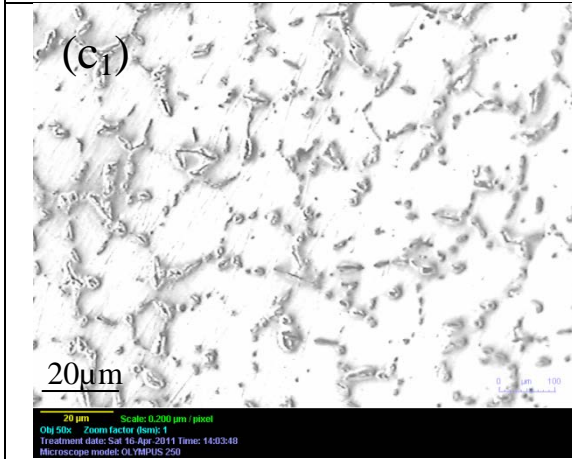


4 h

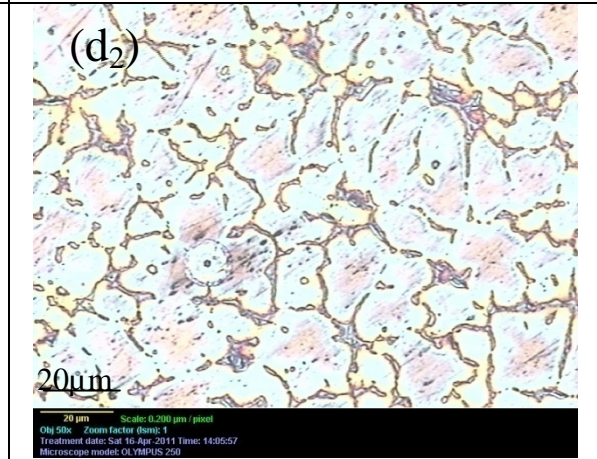
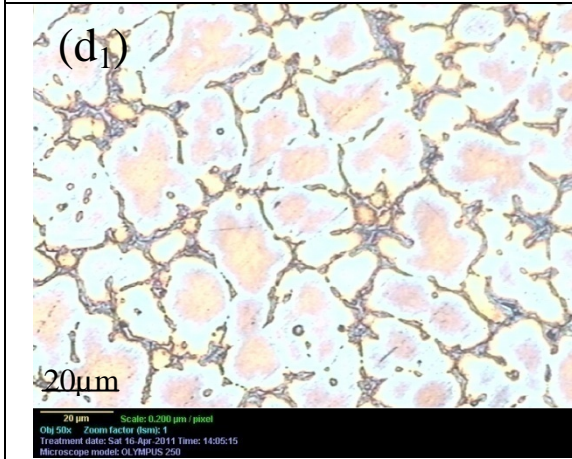


1

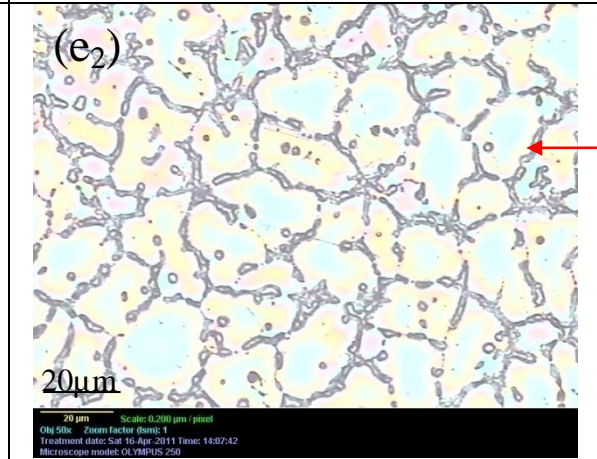
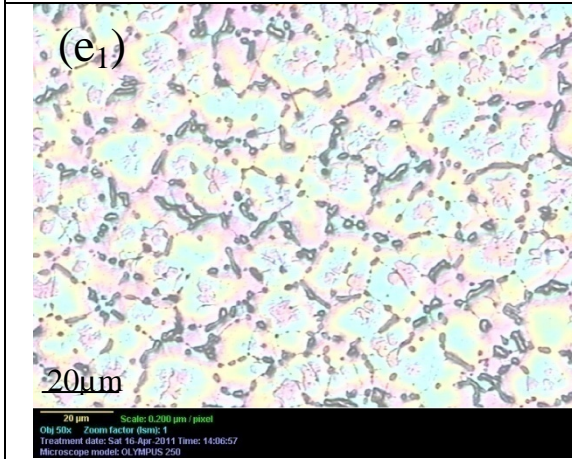
7 h



24 h

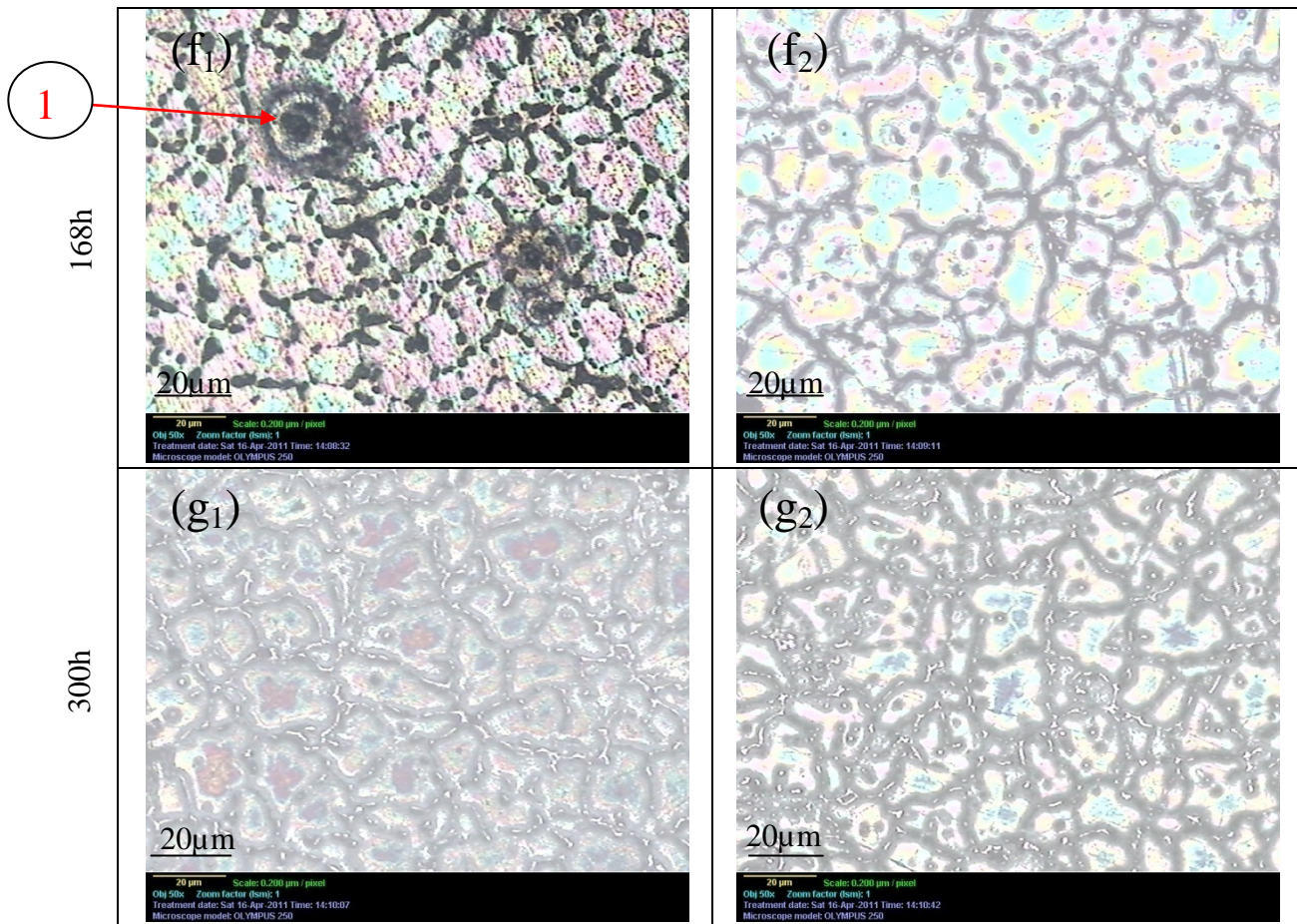


68 h



2

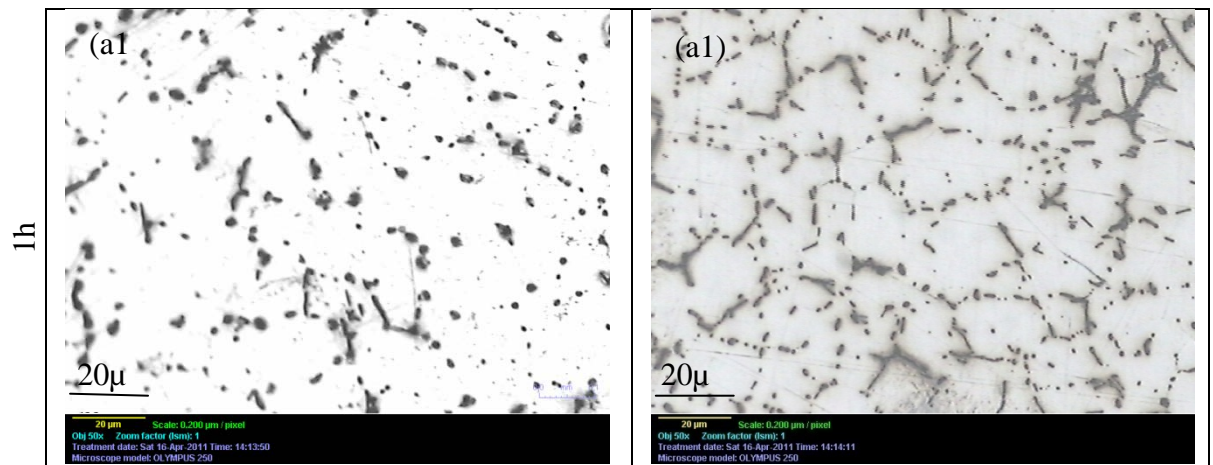




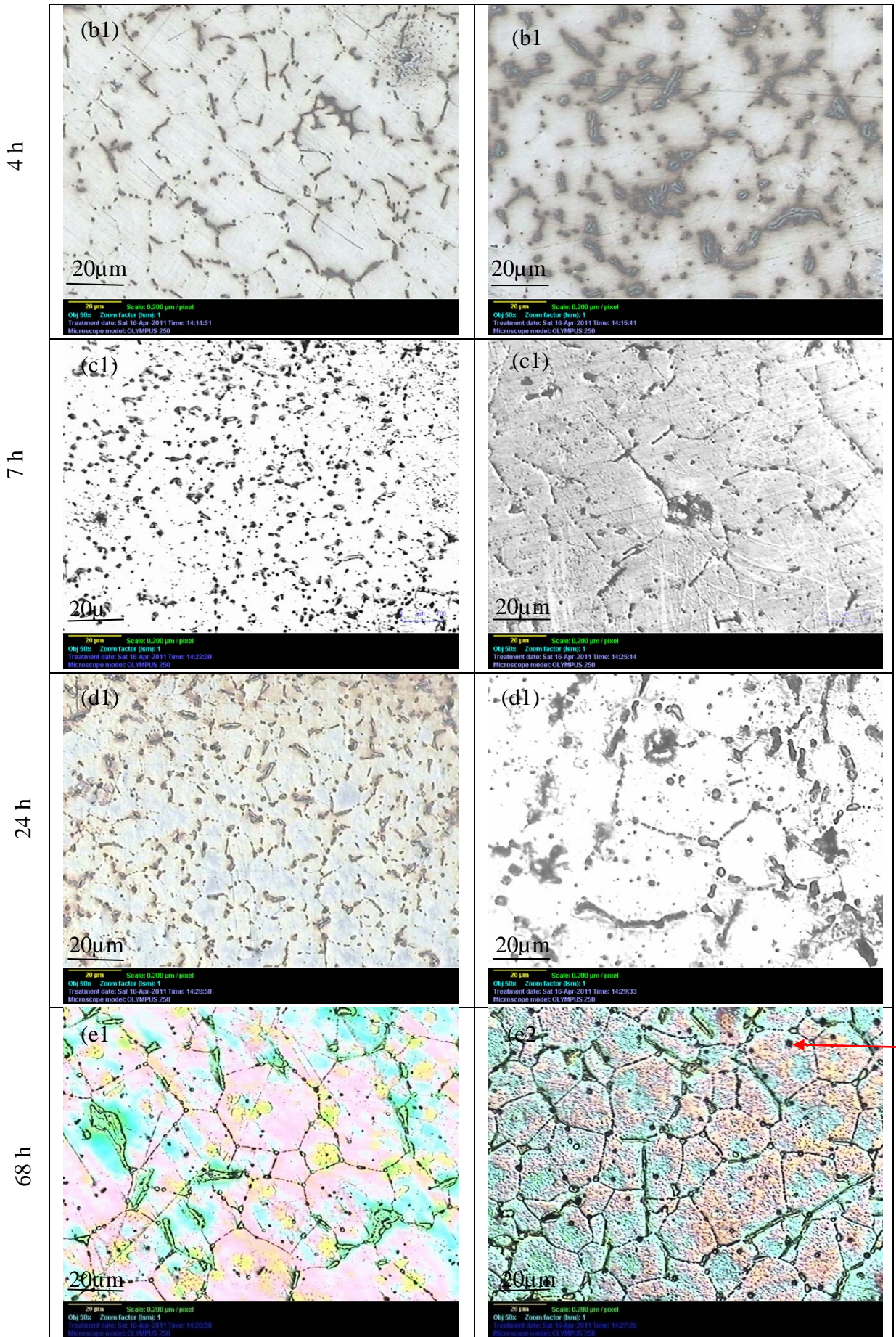
**Figure IV.4.** Etat des surfaces des échantillons brut après les tests d'immersion dans un milieu basique NaCl deux concentration 0.5M( $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$ ) et 3M( $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2, g_2$ ) à des intervalles de temps différents.

① Corrosion par piqûres, ② Corrosion intergranulaire.

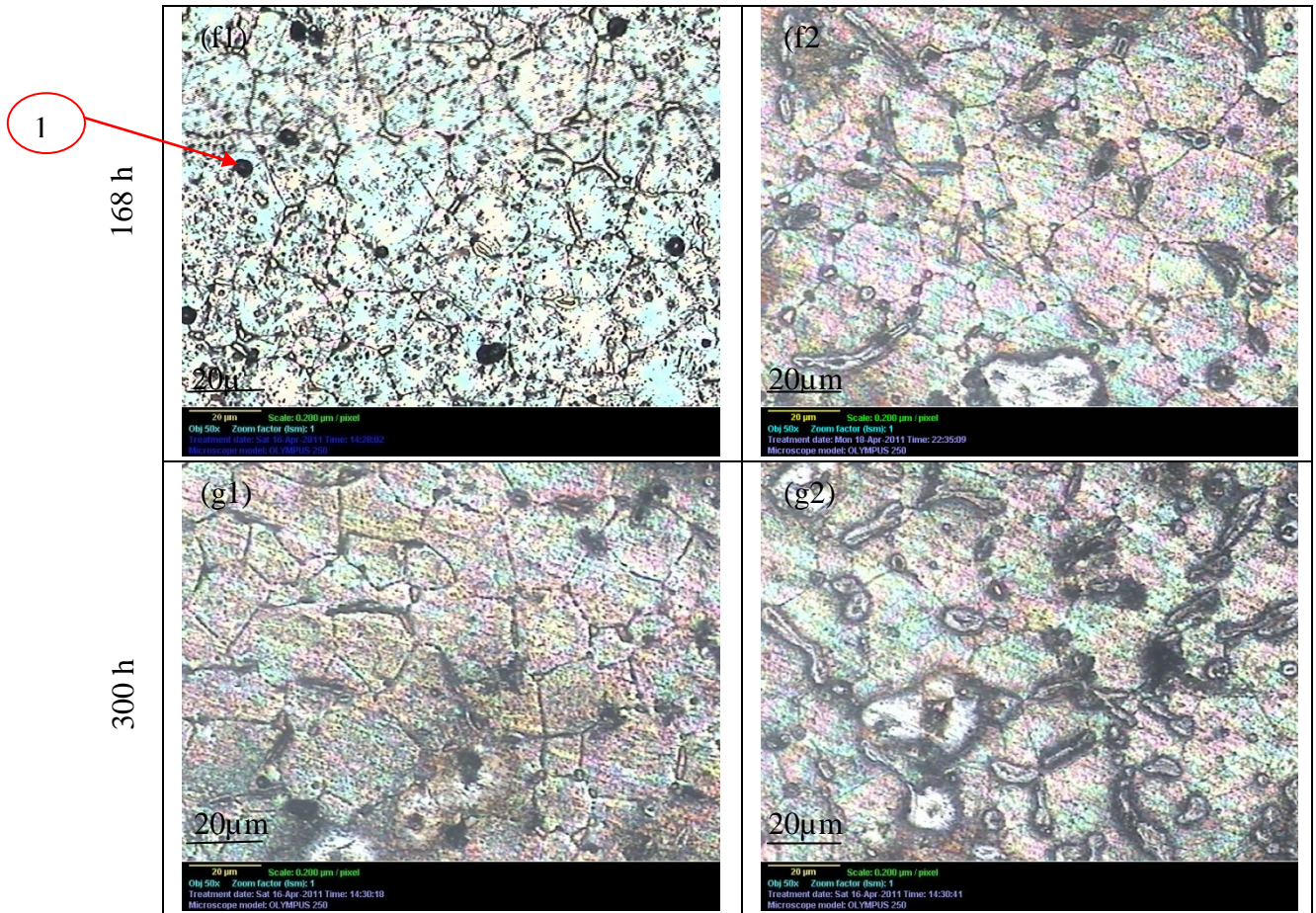
**IV.4.2. Structures d'homogénéisations**





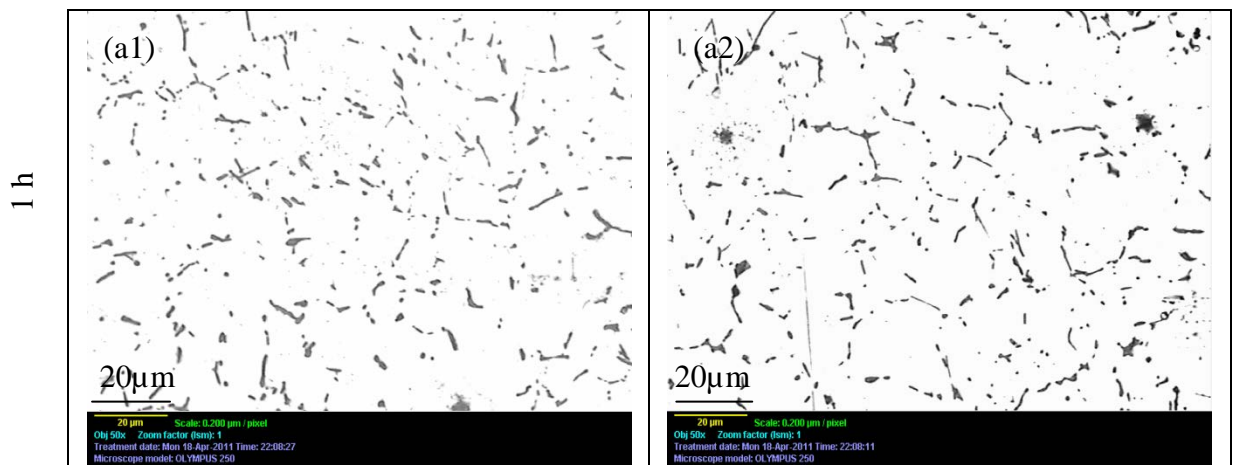




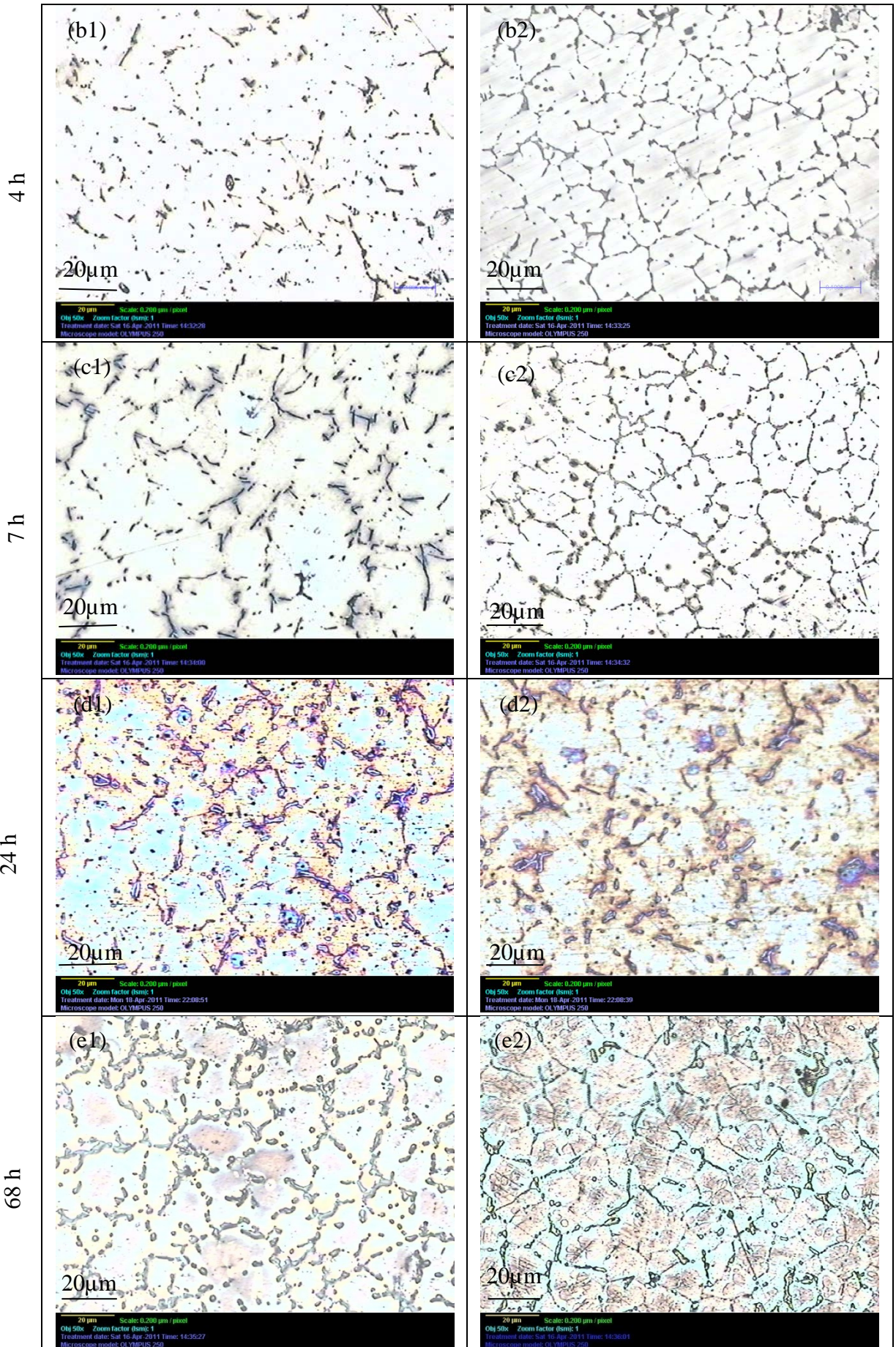


**Figure IV.5.** Etat des surfaces des échantillons homogénéisés après les tests d'immersion dans un milieu basique NaCl à deux concentrations ( $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$ ) 0.5M, ( $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2, g_2$ ) 3M à des intervalle de temps différents.

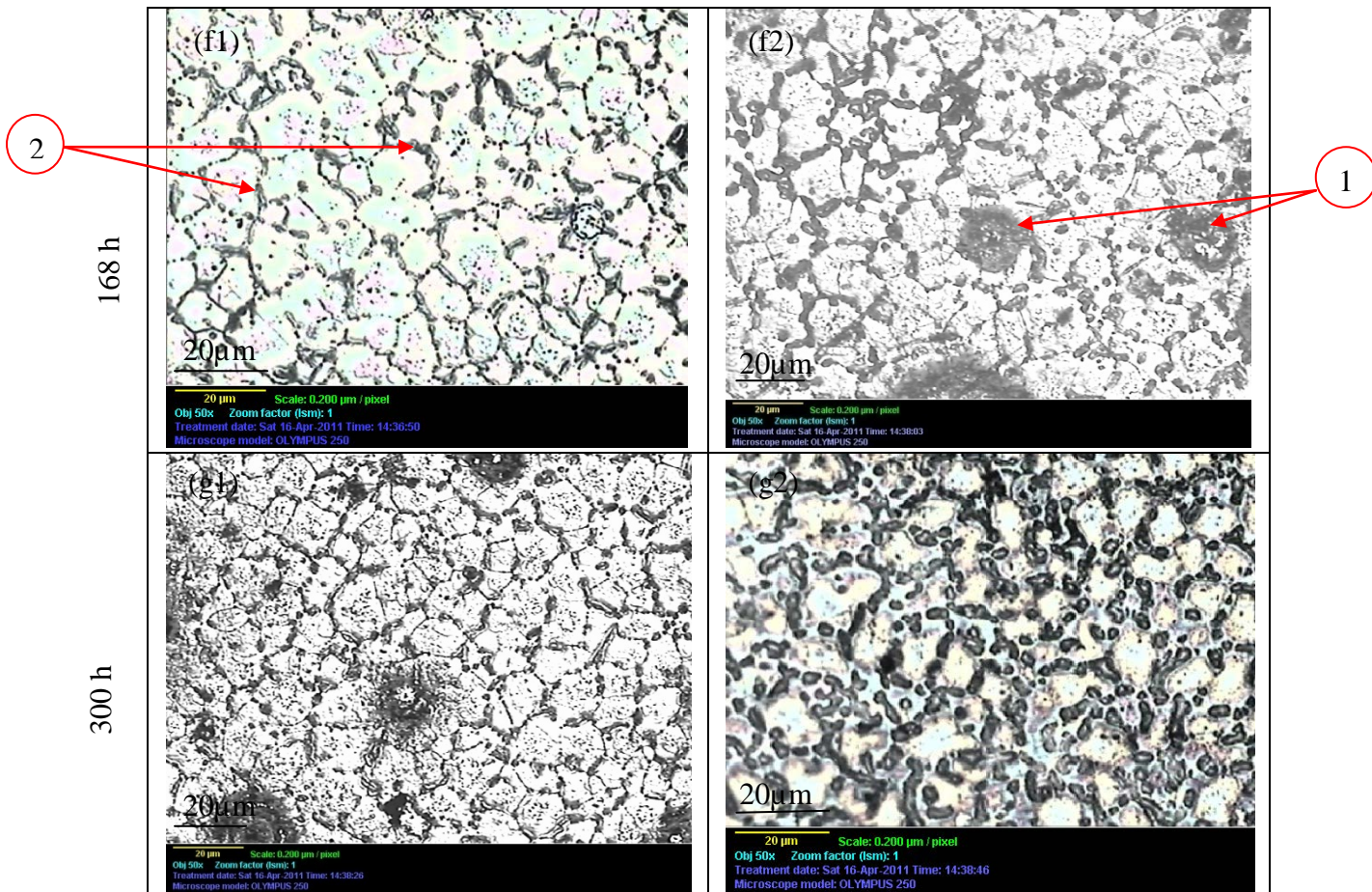
**IV.4.3. Structures de durcissement structural**











**Figure IV.6.** Etat des surfaces des échantillons durcis structurellement après les tests d'immersion dans un milieu basique NaCl à deux concentrations ( $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1, g_1$ ) 0.5M, ( $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2, g_2$ ) 3M à des temps d'immersion différents.

On constate d'après ces micrographies que :

- ✓ Le matériau est sensible à corrosion localisée précisément la corrosion intergranulaire et la corrosion par piqûre.
- ✓ La surface des échantillons homogénéisés révèle une corrosion au niveau des précipités.

#### ➤ Corrosion par piqûre

L'aluminium pur lutte naturellement contre la corrosion en se recouvrant d'une couche protectrice. Mais dans les alliages, les métaux ajoutés créent des microzones où la couche est moins protectrice. Ainsi des piqûres peuvent se former et atteindre dangereusement l'intérieur de l'alliage.

Les piles électriques dans l'alliage, les composés métalliques et l'aluminium sont reliés électriquement. Dans un milieu humide, ils peuvent former une pile, dans laquelle l'aluminium ou le composé métallique se détériore. Cette détérioration peut également favoriser l'initiation d'une piqûre.

➤ **Corrosion intergranulaire**

Les défauts de corrosion intergranulaire présentés sur les Figures (IV.4,5,6) ne correspondent pas à l'évolution d'un même défaut pour différentes durées d'immersion mais à différents défauts observés sur différents échantillons. Ces images ont été retenues car elles sont représentatives de l'ensemble des observations réalisées. On observe clairement que la taille des défauts augmente avec la durée d'immersion. La propagation de la corrosion intergranulaire correspond à une augmentation de la longueur mais également de la largeur des défauts de corrosion.

De nombreux ouvrages abordent les mécanismes de corrosion localisée et notamment de la corrosion intergranulaire sur l'alliage 2024. De manière générale, il est admis que la corrosion intergranulaire de l'alliage 2024 T3 est en partie due à la précipitation intergranulaire riche en cuivre et à la présence d'une zone appauvrie en cuivre adjacente à ces joints de grains. Cette zone appauvrie en cuivre est anodique vis-à-vis de la matrice mais également des précipités intergranulaires Al-Cu-Mg. Cette différence de potentiel va entraîner la dissolution de la matrice adjacente aux joints de grains ; il s'en suit une dissolution préférentielle en Al et Mg des précipités intergranulaires. Les précipités se trouvent donc enrichis en cuivre et sont alors cathodiques vis-à-vis de la matrice entraînant la dissolution de la matrice adjacente aux joints de grains. La corrosion intergranulaire se propage ensuite grâce à la présence d'un chemin anodique préférentiel.

Pour cela nous avons calculé le taux de corrosion à différents temps d'immersion de l'alliage brut, homogénéisé et durcis structurellement comme les indiquent les tableaux suivants.

**Tableau IV.2.** *L'évolution du taux de corrosion de métal brut après différents temps d'immersion*

temps	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
Taux corrosion dans (0.5M)	5.26	10.21	14.60	16.92	18.69	38.65	64.01
Taux corrosion dans (3M)	7.01	12.74	15.21	17.15	21.25	40.63	70.18

**Tableau IV.3.** *L'évolution de la corrosion de métal subie un traitement d'homogénéisation après différents temps d'immersion*

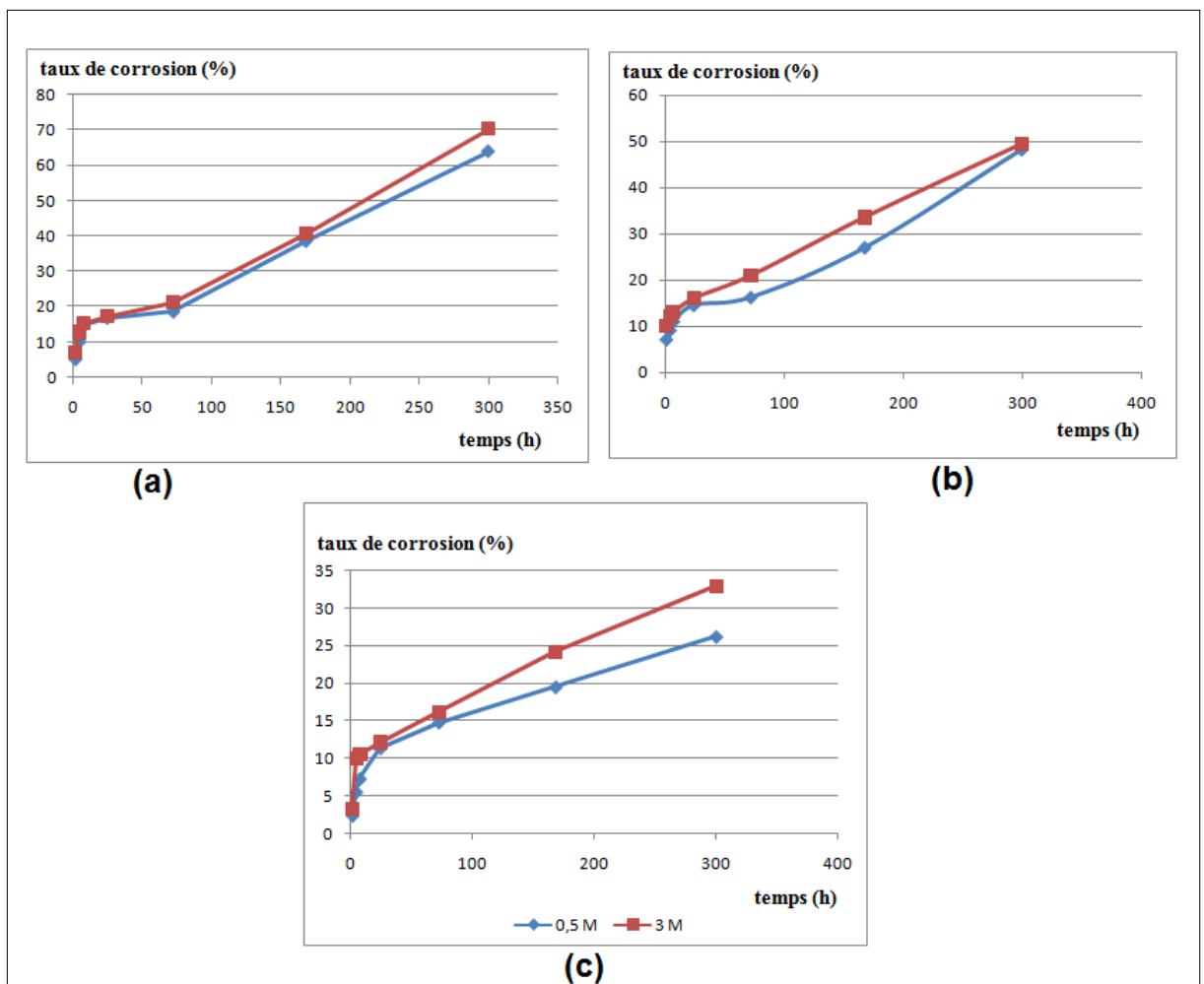
Le temps	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
Taux corrosion dans (0.5M)	7.13	9.17	11.07	14.58	16.28	27.08	48.33
Taux corrosion dans (3M)	10.22	12.26	13.17	16.15	21.05	33.67	49.51

**Tableau IV.4.** L'évolution de la corrosion du métal ayant subi un traitement de durcissement structural différents temps d'immersion

Le temps	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
Taux corrosion dans (0.5M)	2.34	5.49	7.25	11.36	14.79	19.51	26.23
Taux corrosion dans (3M)	3.25	9.99	10.44	12.09	16.16	24.12	32.87

Les différents taux de corrosion sur les tableaux (IV.2, 3, 4) désignent le pourcentage calculé par le logiciel visilog. Ces résultats sont ceux de la surface noire (%) par rapport à la surface blanche.

**IV.5. Effet du milieu**



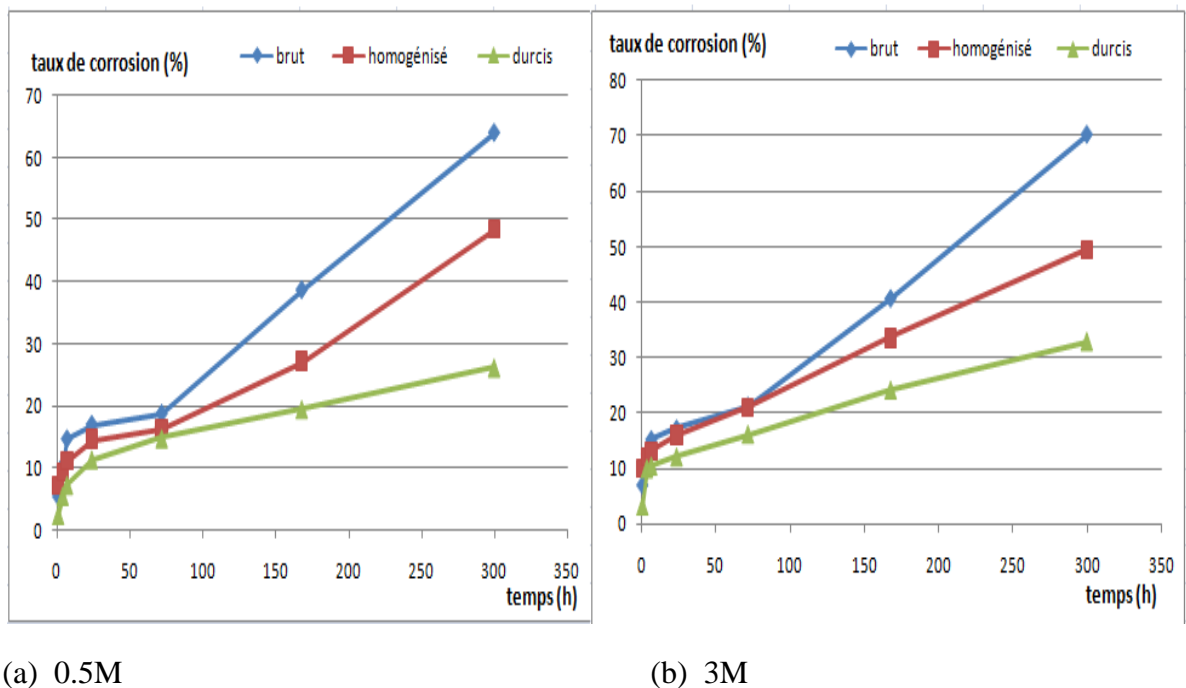
**Figure IV.7.** Evolution du taux de corrosion dans les trois états en fonction du temps d'immersion ; a) état brut ; b) état homogénéisé ; c) état durcisé.



D'après les figures (IV.7) ci-dessus, on voit que le taux de corrosion dans la solution 3M est plus important que celui dans la solution 0.5 M à tout temps, on remarque aussi que les deux courbes ont pratiquement la même pente, ce qui veut dire que l'augmentation du taux de corrosion est la même dans les deux solutions.

La nature chimique du milieu agressif est l'un des paramètres qui déterminent la sensibilité à la corrosion intergranulaire et par piqûres de l'alliage 2024 T3. Autrement dit, les milieux agressifs qui sont utilisés contiennent tous des ions chlorures. Il a été établi depuis longtemps que l'ion chlorure possède un fort pouvoir de pénétration dans le film d'oxyde compte tenu de sa petite taille et de sa mobilité [14].

#### IV.6. Effet de traitement



(a) 0.5M

(b) 3M

**Figure IV.8.** Évolution du taux de corrosion dans les trois états en fonction du temps d'immersion.

On constate d'après la figure IV.8 que le taux de corrosion pour une concentration de 3M est plus important que celui d'une concentration 0.5M, mais toujours avec un écart entre les trois états, alors :

- ✓ L'état brut : le taux de corrosion est très important que les autres états à cause de plusieurs facteurs tels que les défauts de fonderie que ce soit de l'hétérogénéité de la concentration en éléments d'alliage (ségrégation microscopique) ou porosités
- ✓ L'état homogénéisé: Au cours du traitement d'homogénéisation les alliages d'aluminium ont subi les processus suivants :
  - Élimination des hétérogénéités de la concentration en éléments d'alliage.

- Diminution des nombres des défauts est donc amélioration des propriétés mécaniques du matériau d'où diminution du taux de corrosion.
  - L'alliage a des précipités grossiers.
- ✓ Cas de durcissement structural : dans ce cas le matériau est traité thermiquement afin d'améliorer ses propriétés mécaniques par rapport au matériau à l'état brut et à l'état homogénéisé. Le taux de corrosion est un peu important par rapport au matériau homogénéisé à cause des précipités fine du matériau durci.

# Conclusion générale

---

- le mécanisme de corrosion commence par des petites piqûres locales pour des temps d'immersion faibles. il apparaît que la microstructure de l'alliage 2024 T3 influence notablement leur comportement à la corrosion.
- les particules intermétalliques présentes dans ces alliages sont à l'origine d'attaques de corrosion localisée dues à des couplages galvaniques entre la matrice, les particules et la zone adjacente à ces particules.
- L'amorçage du phénomène de corrosion localisée dépend fortement de la nature des films passifs présents sur ces alliages, ces films d'oxydes pouvant présenter des hétérogénéités à l'image de la microstructure de ces matériaux.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]. **COLOMBIÉ. M et col.** Matériaux Industriels–Matériaux Métalliques. Collection Industrie Et Technologie, DUNOD (2000).
- [2]. **J. HOUZE.** Production d'aluminium. École des mines d'ALBI CARMAUX. France. (2007).
- [3]. **Roger Develay.** Données numériques sur l'Aluminium non allié. Techniques de l'ingénieur. PE1004, (2008).
- [4]. Institut international de soudure. Recommandation concernant les structures soudées en aluminium et alliage Al-Mg, 2eme édition, (1980).
- [5]. **Christian Vargel.** Propriétés générales de l'aluminium et de ses alliages. Techniques de l'ingénieur M.4661. Année (2008).
- [6]. InternationalAluminiumInstitute(IAI) :[http :www.worldaluminium.org/iai/stats/index.asp](http://www.worldaluminium.org/iai/stats/index.asp).
- [7]. **C. VARGEL.** « Comportement aluminium et ses alliages ». DUNOD, (1999).
- [8]. **S. ACHOUR, S. MIMOUNI** « Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie chimique : caractérisation métallographique et vis-à-vis de la corrosion des revêtements métalliques élaborés par projection thermique », EMP, (2007).
- [9]. **DIETER LANDOLT.** Corrosion et chimie de surfaces des métaux .Ed Presse. Polytechniques et universitaires, (1997).
- [10]. **S.OUALLAM.** Etude du soudage TIG et laser Nd-YAG de l'alliage d'aluminium 2024 T3. Thèse de magistère .ENP, (2009).
- [11]. **CHRISTAN VARGEL.** Corrosion de l'aluminium. DUNOD, Paris (1999).
- [12] **L. MALIKA.** Etude de l'oxydation anodique dure d'alliage d'aluminium type AG3 en milieu sulfurique-acétique. EMP, (2000).
- [13]. **P. DUBOST, B. ET SAINFORT.** Durcissement par précipitation des alliages d'aluminium. Techniques de l'Ingénieur, M240, (1991).
- [14]. **C.AUGUSTIN.** Prévion des cinétiques de propagation des défauts de corrosion affectant les structures en alliage d'aluminium 2024. Thèse doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, (2008).
- [15]. **Raymond Loewy,** L'Aluminium. Série de technologie, (2009).
- [16]. **P. BARRAND.** L'Aluminium Tome 1. Éditions EYROLLES. Paris, France. (1964).
- [17]. **MF. Ashby DRH. Jones,** Matériaux 2. Microstructure et mise en œuvre, DUNOD, (1991).

[18]. <http://v.castelhano.free.fr/probatoire/probatoire1.htm>.

[19]. **J. IDRAC**. Comportement électrochimique d'alliage modèle binaire aluminium-cuivre. Thèse doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse, (2005).

[20]. **M.F. Ashby, D.R.H. Jones**, An introduction to microstructures, processing and design, Engineering Materials , 2 Second Edition (1998) .

[21]. **DIETER LANDOLT**. (TRAITE DES MATERIAUX : corrosion et chimie de surfaces des métaux), presses polytechniques et universitaires romandes.

[22]. **Paul BOURDET**. Développement d'une méthode de simulation du comportement en fatigue de pièces minces en alliage d'aluminium soumises à de la corrosion par piqûres. L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,(2007).

[23]. **K.SORAY**. Elaboration et étude de la corrosion des alliages Al-Zn et Al-Zn-Sn dans une solution à 3% en poids de NaCl. Thèse Magistère. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, (2004).

[24]. **Loïc LACROIX**. Mécanismes de corrosion localisée de l'alliage d'aluminium 2024 apport de la microscopie à force atomique (afm) couplée au mode kelvin (kfm) et des alliages modèles. Thèse doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, (2008).

[25]. **M. Reboul et R. Develay**. Corrosion des alliages d'aluminium. Techniques de l'Ingénieur. COR325, (2005).

[26]. **E.L.DIN-STIRBU**. Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage. Thèse doctorat. Université de Pitesti de Institut National des Sciences Appliquées, Lyon – France, (2005).

[27]. **S.E.SEDRIKS, A.WILEY**. The Corrosion Monograph Series: Corrosion of Stainless Stells , Interscience Publication , (1979).

[28]. **M. R. BAYOUMI**. The mechanics and mechanisms of fracture in stress corrosion cracking of aluminum alloys. Engineering Fracture Mechanics, (1996)

[29]. **K .CHOUCHANE**. Elaboration et caractérisation des dépôts chimiques d'alliages nickel Cobalt-Phosphore», EMP, 2004.chimiques d'alliages nickel-Cobalt-Phosphore», EMP, (2004).

[30]. **Roger DEVELAY**. Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'Ingénieur, M 1290, (2000).



# **Annexe**

**Tableau I.1.** *Tableau récapitulatif des pertes de masses après une immersion avec différent temps dans un milieu NaCl 0.5M, (2 essais) à l'état brut.*

	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
$\Delta m_1$ (g)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004
$\Delta m_2$ (g)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.004
$\Delta m$ moyenne (g)	0.000	0.000	0.000	0.0005	0.0005	0.0015	0.004

**Tableau I.2.** *Tableau récapitulatif des pertes de masses après une immersion avec différent temps dans un milieu NaCl 3M, (2 essais) à l'état brut.*

	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
$\Delta m_1$ (g)	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004
$\Delta m_2$ (g)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.003	0.007
$\Delta m$ moyenne (g)	0.000	0.0005	0.0005	0.001	0.0015	0.0025	0.0055

**Tableau I.3.** *Tableau récapitulatif des pertes de masses après une immersion avec différent temps dans un milieu NaCl 0.5M, (2 essais) état homogénéisé.*

	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
$\Delta m_1$ (g)	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	0.002
$\Delta m_2$ (g)	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001
$\Delta m$ moyenne (g)	0.000	0.0005	0.001	0.002	0.0005	0.0015	0.0015

**Tableau I.4.** *Tableau récapitulatif des pertes de masses après une immersion avec différent temps dans un milieu NaCl 3M, (2 essais) état homogénéisé.*

	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
$\Delta m_1$ (g)	0.000	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003
$\Delta m_2$ (g)	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
$\Delta m$ moyenne (g)	0.000	0.0005	0.0015	0.0015	0.001	0.0015	0.0025

**Tableau I.5.** Tableau récapitulatif des pertes de masses après une immersion avec différent temps dans un milieu NaCl 0.5M, (2 essais) état durci .

Le temps	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
$\Delta m_1$ (g)	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
$\Delta m_2$ (g)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002
$\Delta m$ moyenne (g)	0.000	0.000	0.0005	0.0005	0.0015	0.002	0.002

**Tableau I.6.** Tableau récapitulatif des pertes de masses après une immersion avec différent temps dans un milieu NaCl 3M, (2 essais) état durci .

Le temps	1h	4h	7h	24h	72h	168h	300h
$\Delta m_1$ (g)	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.005
$\Delta m_2$ (g)	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004
$\Delta m$ moyenne (g)	0.00	0.0005	0.001	0.001	0.002	0.003	0.0045