

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Université Mouloud MAMMERI. Tizi-Ouzou
Faculté Génie de la construction
Département mécanique



Memoire de Fin d'Etudes

*En vue de l'obtention du diplôme en Master académique de génie
mécanique.*

Option : science des matériaux

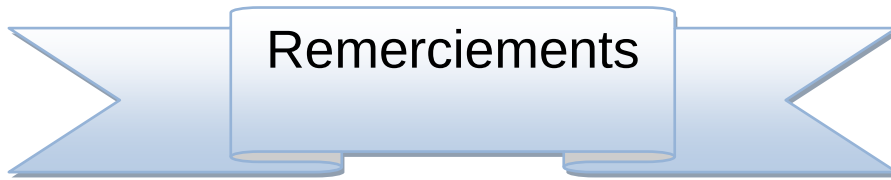
Thème

**Etude de corrosion de l'alliage
d'aluminium 5083**

Proposé et dirigé par : Mr Zaz i Nacer

Réalisé par : Hadji Nadia

Promotion : 2012/2013



Remerciements

*Je remercie vivement Monsieur **ZAZI NACER** mon promoteur pour sa disponibilité, et son encadrement de qualité et ses efforts afin que je puisse réaliser ce travail.*

Mes remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail. Aussi nous n'oublierons pas de remercier tout le personnel du laboratoire du département de Génie mécanique pour leurs aides précieuses surtout Saliha et miliada ainsi les membres de la bibliothèque.

LISTE DE FIGURE

GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Figure I.1 : Etapes de production de l'aluminium.....	5
Figure I.2 : Traitement de la bauxite	5
PROTECTION ET ENTRETIEN DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	
Figure II.1 : Corrosion par piqure à la surface d'aluminium.....	22
Figure II.2 : corrosion caverneuse.....	22
Figure II.3 : Principe des tourbillons turbulents conduisant à la formation de creux de	23
Figure II.4: Corrosion feuilletante.....	24
Figure II.5 : corrosion transcrystalline et intercrystalline.....	24
Figure II.6 : Corrosion a la ligne d'eau	25
Figure II.8 : Exemple de corrosion galvanique	26
Figure II.9 : Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer à 25°	27
Figure II.10 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue Des alliages d'aluminium	28
Figure II.11 Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition.	31

METHODE ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Figure III.1 : Forme des échantillons	37
Figure III.2 : polisseuse utilisée	38
Figure III.3 : Schéma de principe du microscope optique utilisé.	39
Figure III.4 : Microscope optique utilisé pour la caractérisation.	40
Figure III.5 : Schéma de principe du microscope à balayage (MEB).....	41
Figure III.6: Microscope électronique à balayage (MEB).....	41
Figure III.7: Appareil de microdureté	42
Figure III.8	45

RESULTATS ET DISCUSSION

Figure IV.1 Surface de l'échantillon dans la direction du laminage.....	48
Figure IV.2 : phénomène de la corrosion feuilletante.....	49
Figure IV.3 : a) effet loupe de la Figure IV.I.d, b) effet loupe de la Figure IV.(c) et la figure IV.1(d).....	49
Figure IV.4 : taille des précipités sur : le plan du laminage (L), le plan perpendiculaire au laminage (E).....	49
Figure IV.5 : Image au MEB : (a) plan du laminage, (b) plan perpendiculaire au laminage	51
Figure IV.6 : Surface du plan de laminage après 72 heures de corrosion.....	52
Figure IV.7 : Surface du plan de laminage après 72 heures de corrosion	53
Figure IV.8 : Image MEB de la surface du plan de laminage après 72 heures de corrosion dans une solution de 0.3% Na Cl.	53
Figure IV.9 : Potentiel de corrosion libre de l'alliage d'aluminium AA5083-H321 durant : (a) 72 heures, (b) 0.9 heure, (c) et 0.2 heure de corrosion.....	55
Figure IV.10 : Densité du courant de corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 durant : (a) 72 heures, (b) 0.4 heure, (c) 0.1 heure et (d) 0.02 de corrosion.....	56

Figure IV.11 : Potentiel de la corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 en présence d'un champ magnétique permanent de l'alliage AA5083-H321 durant : (a) 80 heures, (b) 12 heure, (c) 0.5 heure et (d) 0.1 de corrosion.....	58
Figure IV.12 : Potentiel de la corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 en présence d'un champ magnétique permanent comparaison entre l'échantillon dans la direction du laminage et l'échantillon dans la direction transversale au laminage.....	59
Figure IV.13 : Densité de courant de corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 en présence d'un champ magnétique permanent durant :(a) 72 heures, (b) 0.09 heure, (c) et 0.3 heure de corrosion.....	60
Figure IV.14 : Courant de la corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 durant : en présence d'un champ magnétique permanent comparaison entre l'échantillon prélevé dans la direction du laminage et l'échantillon prélevé dans la direction transversale, (a) 72heures de corrosion, (b) durant 0.1 heures de corrosion :.....	61

Liste de s tableaux

Tableau I.1 : Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium	6
Tableau I.2 : Désignation des états métallurgiques des alliages d'aluminium.....	7
Tableau I.3 : les désignations des alliages d'aluminium et leurs applications.....	11
Tableau I.4 : Correspondance entre désignation numérique et alphanumérique de l'aluminium et des alliages corrodés	13
Tableau I.5 : Désignation des alliages d'aluminium et leurs utilisations	14
Tableau I.6 : Les caractéristiques de la série 5000.....	16
Tableau II.1 : classification de la résistance des alliages d'aluminium et leurs particules intermétalliques	26
Tableau : II.2 Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques en milieu chloruré	27
Tableau III.1 : Composition chimique de l'alliage AA5083-H321	44
Tableau IV.1 : Dureté de l'alliage (AA5083-H 321) dans différent positions	62

TABLE DE MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

I.1- L'ALUMINIUM	3
I.2-PRODUCTION DE L'ALUMINIUM.....	4
I.2.1- LE MINERAL DE L'ALUMINIUM.....	4
I.2.2-TRAITEMENT DE LA BAUXITE.....	4
I-3 PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES.....	5
I.3.1-PROPRIETES MECANIQUES.....	5
I.3.2-PROPRIETES PHYSIQUES.....	8
I-4 –ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	8
I.4.1-CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	8
I.4.2- DESIGNATION DES ETATS DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	10
I.4.3- DESIGNATION NORMALISEE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM.....	11
I.5- INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES SUR LES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM.....	14
I.6-LES ALLIAGES DE LA SERIE 5000(ALLIAGE Al-Mg).....	15
I.6-1PRINCIPAUX ALLIAGES Al-Mg, LEURS CARACTERISTIQUE ET LEURS DOMAINE D'APPLICATION	17

CHAPITRE II : Protection et entretien des alliages d'aluminium

II.1 RESISTANCE A LA CORROSION.....	20
II.2 ROLE DU FILM D'OXYDE.....	20
II.3 CORROSION DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES.....	21
II.4 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA CORROSION DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES.....	28
II.5 TRAITEMENT DE LA SURFACE ET PREVENTION DE LA CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM	31
II.6 DETECTION DE LA CORROSION	34

CHAPITRE III : METHODE ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

III-1 PREPARATION DES ECHANTILLONS	37
III-1-1 PREPARATION DE LA SURFACE.....	38
III-1-2 ATTAQUE CHIMIQUE.....	38
III-2 ANALYSE DE STRUCTURE.....	38
a) MICROSCOPIE OPTIQUE.....	39
b) MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (M E B).....	40
III-3 ESSAI DE MICRODURETE.....	42
III-4 Montage electrochimique.....	43
III-5 METHODES D'ETUDE.....	44

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.I EXAMENS MICROSCOPIQUES	47
IV.I.1 EXAMEN AU MICROSCOPE OPTIQUE AVANT CORROSION DANS L'EAU DE MER	47
IV.1-2 EXAMEN AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE AVANT CORROSION DANS L'EAU DE MER	50
IV.I.3 EXAMEN AU MICROSCOPE OPTIQUE APRES 72 HEURES DE CORROSION DANS L'EAU DE MER	51
IV.I.4 EXAMEN AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE APRES HEURES DE CORROSION DANS L'EAU DE MER	53
IV.I.4.1 EXAMEN DE LA CINETIQUE DE CORROSION DANS L'EAU DE MER	53
a) ABSENCE DU CHAMP	54
b) PRESENCE DU CHAMP :.....	56
IV.I.5. DURETE DU MATERIAU :.....	62
CONCLUSION GENERALE.....	63

Introduction générale

Les alliages d'Al-Mg sont des alliages à durcissement par écrouissage, ils travaillent dans de fortes contraintes thermiques et mécaniques. Par conséquent, leurs propriétés changent au cours de leurs mises en forme et utilisations.

L'obtention d'alliages d'aluminium-magnésium dont les propriétés de résistance mécanique et résistance à la corrosion adéquates, nécessite la connaissance, des phénomènes intervenants lors de leurs, élaboration, traitements, mises en forme et utilisations.

L'objectif de notre travail est l'étude par la caractérisation chimique du comportement des alliages Al-4,5 %Mg, après le laminage et le recuit subi dans l'industrie de provenance et après le recuit et un laminage à froid subi au laboratoire.

Le comportement mécanique, l'endommagement et la dégradation de cet alliage dépendent, de sa constitution, de son état de contraintes internes. Ces alliages présentent, selon leur histoire thermomécanique, une présence de particules intermétalliques continue ou discontinue aux et en dehors des joints grains. Ces particules jouent un rôle essentiel dans les processus de la dégradation et corrosion localisée.

Les alliages aluminium-magnésium ont un potentiel moyen très négatif, il tend naturellement et rapidement à se passiver, donc à se protéger par une couche d'oxyde ou hydroxyde. La décomposition de la couche passive se fait par les ions halogénures qui dans la plus part des cas amorcent la corrosion localisée.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres et une conclusion:

La première traite des alliages d'aluminium en générale et les alliages d'aluminium-magnésium en particulier, le second chapitre étale la corrosion des alliages d'aluminium, troisième résume les différentes techniques expérimentales utilisées. Et enfin le dernier chapitre présente les résultats et discussion.

GENERALITES SUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM

I.1- L'ALUMINIUM :

L'aluminium est l'élément métallique le plus abondant et le troisième constituant de l'écorce terrestre (après l'oxygène et le silicium). Parmi les matériaux structuraux, il a été l'un des derniers à avoir été mis en œuvre. A l'état naturel, l'aluminium n'est jamais retrouvé sous forme de métal pur mais en combinaison avec l'oxygène et autres éléments, c'est un élément très réactif.

L'aluminium est un élément du III^{ème} groupe de la classification de Mendeleïev. Son nombre atomique est 13 et sa masse atomique 26,98 g.mol⁻¹. A l'état solide, l'aluminium se cristallise dans réseau cubique à faces centrées (CFC) à paramètre de maille 4,049596 Å à toute température (de 4 à 933 K). Il ne présente donc pas de variété allotropique comme la plupart des métaux usuels. Sa caractéristique la plus importante est sa faible densité (2,7 g.cm³) comparée à celle des éléments structuraux comme le fer (7,86 g.mol⁻¹) et le cuivre (8,9g/cm³). L'aluminium représente environ 7, 5% en masse dans l'écorce terrestre [1-2].

La température de fusion de l'aluminium est relativement basse comparée à celles des éléments structuraux, elle vaut 660°C. Tandis que le point d'ébullition est d'environ 2477 °C.

Actuellement, l'aluminium et ses alliages sont de plus en plus utilisés dans les différents domaines de l'industrie pour leurs propriétés que sont :

- Faible densité et appréciable résistance qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne résistance à la corrosion dans différents milieux, notamment l'atmosphère, formation d'une couche protectrice d'alumine (Al₂O₃), très compacte, adhérente et résistante même dans les milieux marins et industriels.
- Conductivité thermique et électrique élevées qui le rend très applicable dans les secteurs des produits électriques et thermomécaniques.
- Facilité de mise en forme grâce à son aptitude à la déformation et au soudage.
- Haute réflectivité qui rend l'aluminium un matériau décoratif idéal.
- Compatibilité alimentaire qui le rend utilisable pour les articles de cuisine et de stockage de certains produits [1-2].

I.2-PRODUCTION DE L'ALUMINIUM

La métallurgie a pour but l'extraction des métaux partir de leurs minerais puis leurs transformations par traitements thermiques afin d'obtenir les hautes et meilleurs propriétés souhaitées. L'aluminium n'existe pas à l'état pur. Il se trouve principalement dans son minerai, la bauxite, d'où il est extrait et réduit pour obtenir l'aluminium pur.

I.2.1- LE MINERAI DE L'ALUMINIUM

Le seul minerai utilisé dans la métallurgie de l'aluminium est la bauxite. Celle-ci se présente sous forme de poudre de granules de roche ou d'argile, et peut être de couleur crème, rouge, brune, jaune ou grise. Elle contient entre 45 et 60% d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) appelée alumine. Les différentes formes et couleurs de bauxite sont dues à la présence d'autres constituants, notamment : [1]

- Oxyde de fer (bauxite rouge) ;
- Oxyde de Silicium (bauxite blanche) ;
- Oxyde de Titane et l'eau (X).

Du minerai au produit fini, l'aluminium doit subir une série de traitements qui dépendent largement les uns des autres

La Figure I.1 illustre les principales étapes de production de l'aluminium.

I.2.2-Traitement de la bauxite

Pour extraire l'alumine de la bauxite, on utilise le procédé de Bayer basé sur 3 étapes principales à savoir la préparation du minerai, l'attaque par la soude et la décomposition de l'aluminium.

La figure I.2 illustre le schéma du procédé d'extraction de l'alumine.

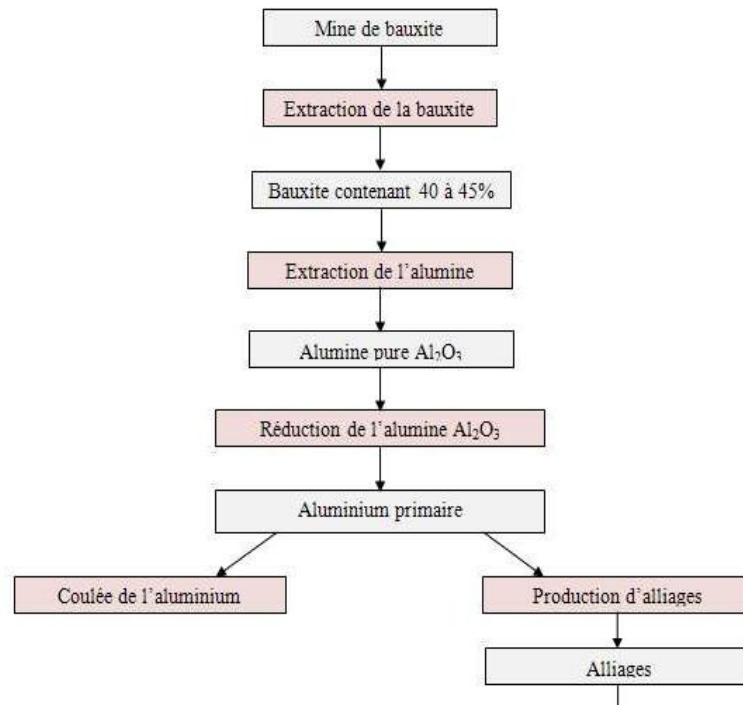


Figure I.1 : Etapes de production de l'aluminium [1].

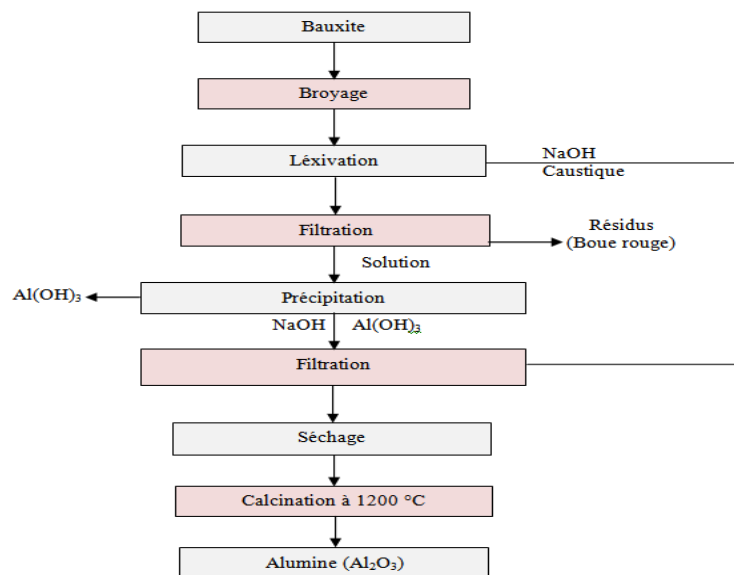


Figure I.2 : Traitement de la bauxite [1].

I -3 PROPRIETES DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

I.3.1-PROPRIETES MECANQUES

a) RESISTANCE A LA TRACTION

L'aluminium est beaucoup moins rigide que les aciers. Son module de Young est de l'ordre de 65 000 à 70 000 MPa (contre 210 000 MPa pour les aciers de construction). Les caractéristiques de traction dépendent de la nature de l'alliage et de l'état métallurgique.

Ainsi, à l'état recuit, il peut subir d'importantes déformations sans se rompre. L'aluminium non allié recuit possède des propriétés relativement limitées.

Néanmoins, pour une grande partie des alliages d'aluminium, les éléments d'addition n'ont pas une grande influence sur le module de Young du fait que la plupart d'entre eux – sauf exception – entrent pour moins de 5 % dans leur composition. On peut citer deux exceptions notables : le lithium dont de faibles addition (moins de 2 %) augmentent de l'ordre de 10 % le module d'Young et le silicium à 7 % qui augmente le module jusqu'à 74 000 MPa. Ainsi, la valeur retenue pour le calcul des structures est de 70 000 MPa pour tous les alliages d'aluminium de corroyage quelque soient leur composition et leur état métallurgique [2].

b) COEFFICIENT DE POISSON

Le coefficient de Poisson permet d'estimer l'aptitude du métal ou de l'alliage à la compression. Il exprime le rapport entre les allongements relatifs transversaux et longitudinaux. Pour l'aluminium, la valeur de ce coefficient varie de 0,32 à 0,40, avec une valeur probable de 0,35.

L'aluminium et ses alliages manifestent une bonne ductilité à toutes températures. Ce qui est dû au fait qu'ils présentent une structure cristalline cubique à faces centrées à toutes températures. Les principales caractéristiques retenues sont regroupées dans le tableau I.1.

Propriété	Valeur
Module d'élasticité	70000 MPa
Module de cisaillement	27000 MPa
Coefficient de Poisson ν	0,35
Coefficient de dilatation linéique α	23. 10^{-6} K ⁻¹
Masse volumique ρ	2700 Kg.m

Tableau I.1 : Principales propriétés mécaniques des alliages d'aluminium [1].

c) ECROUISSAGE

Il correspond à une modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage provoquée par une déformation plastique. Cette déformation à température proche de l'ambiante peut fortement modifier les propriétés mécaniques, ce qui définit des courbes d'écrouissage des états conventionnellement gradués : 1/4 dur, 1/2 dur, 3/4 dur ou

complètement écroui. La figure I.3 montre l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la déformation plastique à l'ambiante [2].

Les différents états métallurgiques des alliages d'aluminium sont résumés dans le tableau I. 2

DESIGNATION	ETAT
F	Etat brut de fabrication
Q	Etat recuit et recristallisé
H	Etat écroui
H1X	Ecrouissage seulement, le dernier chiffre, X,
H2X	indique le degré d'écrouissage
H3X	Ecrouissage suivi d'un recuit de restauration
T	Ecrouissage suivi d'une stabilisation
T1	Etat durci par trempe et vieillissement (durcissement structural)
T3	Trempe après mise en forme à chaud et vieillissement naturel (T ambiante)
T4	Mise en solution, trempe, écrouissage et vieillissement naturel Comme T3 mais sans écrouissage
T5	Comme T1, mais vieillissement accéléré (T supérieure à l'ambiante).
T6	Comme T4, mais vieillissement accéléré
T7	Comme T6, mais surveillé
T8	Comme T3, mais vieillissement accéléré
T9	Comme T6 et suivi d'un écrouissage

Tableau I.2 : Désignation des états métallurgiques des alliages d'aluminium [2].

d) RECUIT DE RESTAURATION ET DE RECRISTALLISATION :

Les phénomènes de restauration et de recristallisation sont dus au chauffage après écrouissage. Ces processus se produisent à des températures basses qui peuvent être proches de l'ambiante pour les nuances pures. Ainsi, le phénomène de recristallisation est particulièrement important pour l'aluminium et ses alliages [2].

I.3.2-PROPRIETES PHYSIQUES

L'aluminium a une température de fusion relativement basse : environ 660°C. Il en résulte une facilité de fusion qui présente un avantage pour les opérations de fonderie. Sa conductivité thermique λ vaut 217,6 W.m⁻¹.K⁻¹ à 20°C. La capacité thermique massique $C=950$ J.Kg⁻¹.K⁻¹ à 20°C tandis que sa conductivité électrique est 65% de celle du cuivre à 20°C. La résistivité électrique est de 2,63μ.Ω.cm à 20° [1].

I-4 –ALLIAGES D'ALUMINIUM

L'aluminium non allié possède des propriétés mécaniques très réduites. Pour les améliorer, on ajoute des éléments entrant en solution solide et/ou en formant des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industriels de plus en plus complexes. Cependant on peut considérer que ces alliages comportent : [6].

- une addition principale déterminante pour les propriétés de résistance.
- des additions secondaires en quantité plus faible qui ont une action spécifique.

I.4.1-CLASSIFICATION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les alliages d'aluminium sont classés de plusieurs manières : [6].

- Alliage corroyés et alliage de fonderie ;
- Alliage à durcissement structural et alliage sans durcissement ;
- Classification suivant la nature de l'addition principale ;
- Classification suivant les domaines d'utilisation, ...etc.

a) LES ALLIAGES SANS DURCISSEMENT STRUCTURAL (ALLIAGES NON TREMPANT) :

Dans ces alliages le durcissement est obtenu par l'effet combiné des éléments d'addition (durcissement par solution solide) et de l'écrouissage. Si on combine l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitement de restauration ou de recuit on obtient pour chaque alliage une plage étendue de dureté allant de l'état recuit O à plasticité maximale et résistance mécanique minimale jusqu'à l'état extra dur H19 à résistance maximale mais plasticité minimale. Ils regroupent les familles suivantes:[6].

- -Série 1000 : Aluminium pur
- Série 3000 : Alliages aluminium –manganèse
- Série 5000 : Alliage aluminium- magnésium

b) LES ALLIAGES A DURCISSEMENT STRUCTURAL

Ce sont les alliages trempant qui sont des familles suivantes :

- Série 2000 : Alliage aluminium –cuivre ;
- Série 4000 : Alliage aluminium –silicium ;
- Série 6000 : Alliage aluminium –magnésium-silicium ;
- Série 7000 : Alliage : aluminium –zinc –magnésium (soit avec cuivre ou sans cuivre).

c) LES ALLIAGES CORROYES

Le corroyage est une déformation à chaud : après la coulée de ces alliages en plaques ou billettes, ils subissent une transformation à chaud par laminage, filage, forgeage, matriçage...etc.

Les principales propriétés de ces alliages sont une bonne résistance mécanique, une bonne ductilité, une résistance à la propagation des fissures, appréciable résistance à la fatigue (efforts alternés), résistance aux multiples formes de corrosion, conductibilité électrique

Le corroyage est défini par le rapport S/s avec :

- S : section avant déformation
- s : section après déformation.

Le corroyage diffère de l'écrouissage en ce sens que ce dernier est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée [6].

d) LES ALLIAGES DE FONDERIE

Les alliages de fonderie sont obtenus en fondant les lingots et en le coulant dans des moules ayant les formes désirées du produit final. Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont très différentes de celles d'un alliage corroyé. Ces alliages ne subissent pas les déformations plastiques, leurs propriétés découlent donc des opérations de fonderie. Les alliages d'aluminium de fonderie ont des teneurs plus élevées en éléments d'alliages. Ce qui permet, dans la mesure du possible, d'obtenir une proportion non négligeable d'eutectique, d'abaisser leur point de fusion et diminuer leur intervalle de solidification [1-6].

e) ALLIAGES OBTENUS PAR METALLURGIE DES POUDRES

La technique du frittage est très prometteuse pour l'obtention d'alliages d'aluminium à Performances élevées et à faible coût. Elle comprend comme étapes la préparation de mélanges, dégazage et compression à basse ou haute température suivi d'un frittage (consolidation) et mise en forme [9].

f) ALLIAGES DE MOULAGE

Ce sont des alliages coulés dans des moules et obtenus, généralement, à l'état fini ou semi-fini. Ils ne subissent donc pas de déformation importante mais présentent d'autres qualités : bonne coulabilité, faible retrait à la solidification, etc. Une grande part des alliages de moulage provient de métal recyclé refondu [9].

I.4.2- DESIGNATION DES ETATS DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

Les alliages subissent des traitements métallurgiques qui permettent d'obtenir de meilleures caractéristiques. Un système de notation approprié est utilisé pour toutes les formes d'alliage de corroyage et de fonderie, sauf pour les lingots prévus pour le moulage. Chaque série d'alliage est suivie des lettres F, O, H, W et T qui désignent l'état de l'alliage. Le tableau I.3 regroupe les désignations des alliages d'aluminium et leurs applications. Les états O et F n'ont pas de subdivision contrairement aux états H et T. Les subdivisions de l'état H sont décrites au moins par deux chiffres : le premier indique le traitement par écrouissage et le second l'état de dureté de l'alliage (par convention le chiffre (8) est attribué l'état le plus dur) [6].

Symbole	Etat de base	Applications
F	Brut de fabrication	Produits transformés sur lesquels aucun traitement chimique ou écrouissage n'est effectué.
O	Recuit	Alliages de corroyage recuits pour obtenir l'état le plus doux Alliages de fonderie pour améliorer leurs ductilités, leurs stabilités dimensionnelles
W	Mise en solution (trempé et non stabilisé)	Seulement aux alliages qui vieillissent à la T° de la pièce. Une des rares applications de cet état concerne les rivets utilisés dans l'industrie de l'aviation.
T	Traité thermiquement pour produire des états stables autres que F, O et W	Alliages traités thermiquement avec ou sans écrouissage supplémentaire pour produire des états stables.
H	Ecroui (alliage de corroyage seulement)	Produits à propriétés mécaniques augmentées par écrouissage avec ou sans traitement thermique visant à réduire leurs résistances mécaniques

LE TABLEAU I.3 : les désignations des alliages d'aluminium et leurs applications [6].

I.4.3- DESIGNATION NORMALISEE DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

La norme NF EN 573 définit deux systèmes européens de désignation des alliages d'aluminium qui tous deux font référence à la composition chimique : un système numérique et un système alphanumérique [6].

a) LE SYSTEME NUMERIQUE : il met en jeu un code à 04 chiffres et fait référence à la composition.

B) LE SYSTEME ALPHANUMERIQUE : il permet de distinguer l'aluminium non allié et les alliages d'aluminium.

- Aluminium non allié : sa désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi de la teneur minimale en % du métal exprimée avec une ou deux décimales.
- Alliages d'aluminium : leur désignation débute par le symbole chimique de l'aluminium Al suivi du ou des symboles chimiques ou des principaux éléments d'alliage suivi chacun par un nombre représentant la teneur moyenne (%) arrondie de l'élément indiqué.

Le tableau I.4 donne la correspondance entre les désignations suivant les systèmes numérique et alphanumérique.

Série	Désignation numérique (NF A 026104) *	Désignation alphanumérique (NF A 02-004)
1000 (Al □ 99,00)	1050 A	A5
	1070 A	A7
	1080 A	A8
	1090	A9
	1100	A45
	1199	A99
	1200	A4
	1370	A5/L
2000(Al-Cu)	2001	A-U6MGT
	2011	A6U5PbBi
	2014	A-U4SG
	2017 A	A-U4G
	2024	A-U4G1
	2030	A-U4Pb
	2117	A-U2G
	2218	A-U4N
3000(Al-Mn)	2618 A	A-U2GN
	3003	A-M1
	3004	A-M1G
	3005	A-MG0,5

4000(Al-Si)	4032	A-S12UN
	4043	A-S5
	4045	A-S10
	4343	A-S7
5000 (Al-Mg)	5005	A-G0,6
	5050	A-G1,5
	5056A	A-G5M
	5083	A-G4,5M
	5086	A-G4MC
	5150	A85-GT
	5251	A-G2M
	5454	A6G2,5M
	5754	A-G3M
6000(Al-Mg-Si)	6005A	A-SG0,5
	6060	A-GS
	6081	A-SGM0,3
	6082	A-SGM0,7
	6101	A-GS/L
	6181	A-SG
7000(Al-Zn-Mg)	7020	A-Z5G
	7049 A	A-Z8GU
	7051	A-Z3G2
	7075	A-Z5GU
. * : La lettre A indiqué que l'alliage présente une légère modification par rapport à la nuance normalisée par l'Aluminium Association.		

Tableau I.4 : Correspondance entre désignation numérique et alphanumérique de l'aluminium et des alliages corrodés [5].

I.5- INFLUENCE DES ELEMENTS D'ALLIAGES SUR LES PROPRIETES DE L'ALUMINIUM

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'aluminium non allié présente des propriétés réduites améliorées par éléments d'alliage. Le nombre d'éléments susceptibles d'addition avec l'aluminium est élevé. L'avantage de ces alliages est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique. Du point de vue comportement à l'oxydation, certains éléments d'addition ont un effet positif : [1]

Le chrome, le manganèse et le magnésium renforcent les propriétés protectrices du film d'oxyde tandis que d'autres, tel le cuivre, le nickel, l'étain et le plomb, affaiblissant cette propriété.

a) ADDITION DE MAGNESIUM (Mg)

Les alliages ainsi formés sont caractérisés par une résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés partout où le placage avec l'aluminium s'avère difficile. Ils sont faciles à polir et conservent longtemps leurs polissages. Le tableau I.5 donne quelques caractéristiques des alliages Al-Mg et leurs domaines d'application.

Al-1,5Mg	Résistance mécanique moyenne, haute résistance à la corrosion, bonne malléabilité.	Constructions soudées panneautage, chaudronnerie...
Al-3Mg	Soudage, pliage facile, haute résistance à la corrosion, bonne résistance mécanique à l'état recuit.	Constructions navales et aéronautiques, industries chimiques et alimentaires, matériels roulant, chaudronnerie et appareillage, constructions soudées fortement sollicitées.
Al-5Mg	Haute résistance mécanique et à la corrosion, déformation à froid et soudures plus difficiles.	

Tableau I.5 : Désignation des alliages d'aluminium et leurs utilisations [7].

b) ADDITION DE Mg+Mn : [7]

Ces additions augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Les alliages Al-Mg-Mn sont livrés en feuilles et se prêtent bien à l'emboutissage et au polissage.

c) ADDITION DE Zn+Mg : [7]

Ce sont des alliages à durcissement naturel après 30 jours. Ils présentent une bonne résistance mécanique, bel aspect après oxydation anodique.

d) ADDITION DE Cu+Si : [7]

Ce sont des alliages de fonderie qui présentent une bonne coulabilité et qui conviennent pour des pièces compliquées.

e) ADDITION DE Co+Ti+Zn: [7]

Ces éléments accroissent la résistance mécanique sans altérer la coulabilité. L'addition de cuivre et de zinc facilite l'usinage.

f) ADDITION DE Si+Cu+Zn : [7]

Ces alliages sont aptes aux traitements thermiques et servent pour la fabrication des pistons matricés à chaud.

g) ADDITION DE Mg+Zn+Cu [7]

Ces alliages sont aptes aux traitements mécaniques et présentent une résistance mécanique maximum, la présence du cuivre les rends durcissables à chaud.

I.6-LES ALLIAGES DE LA SERIE 5000 (Alliages Al-Mg)

Ces alliages sont des alliages à durcissement par écrouissage, ils ont des caractéristiques mécaniques moyennes qui augmentent avec le taux de magnésium et le taux d'écrouissage. Ils ont une bonne aptitude à la déformation, cette dernière diminuant si le taux de magnésium augmente.

Ils ont un excellent comportement à la soudure. Ils ont également un bon comportement aux basses températures d'où les applications en cryogénie, ils ont un bon comportement à la résistance à la corrosion qui justifie leur utilisation dans les applications marines. Cependant une exposition à une température supérieure 65 °C peut générer des problèmes de corrosion extrêmement importants, ce phénomène de corrosion augmente alors avec le taux de magnésium. Les alliages contiennent les éléments suivants le Magnésium le Silicium, le fer, le cuivre, le manganèse, le chrome, le nickel, le zinc, le titane, le zirconium et quelques autres. [6-7]

Dans les alliages 5000 de chrome, cet élément est présent dans un précipité microscopique, de composition $Al_{12}Mg_2Cr$, et le manganèse sous la forme $Al_6(Mn, Fe)$. La Figure suivante représente les différentes phases existantes dans le système binaire Al-Mg.

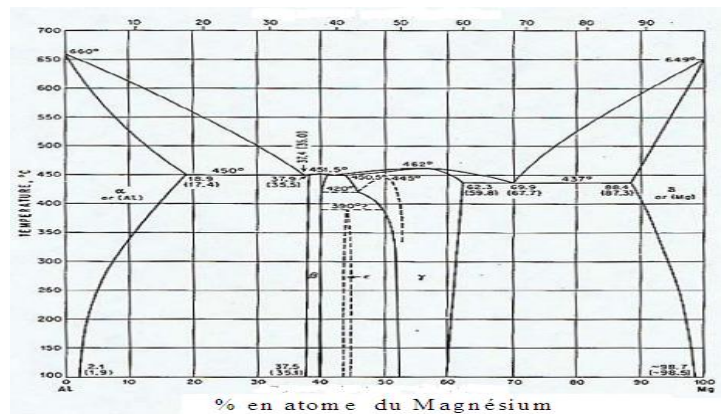


Figure I.3: Diagramme d'équilibre Aluminium-Magnésium [6]

Les caractéristiques de ces alliages dans le tableau suivant :

Caractéristiques	valeurs
Résistance mécanique	Moyenne. On peut l'améliorer par écrouissage, aux dépens toutefois de leur ductilité
Aptitude à la transformation	Grande aptitude aux transformations à chaud (filage, forgeage) et à froid, à l'état O (emboutissage, filage, cintrage, etc.)
Soudabilité	Excellente
Résistance à la corrosion	Très bonne. On peut encore l'améliorer par Anodisation
Etats de surface	Bonne après polissage et anodisation. Dans ce cas, il faut maintenir leurs teneurs en fer et en silicium à des valeurs minimales

Tableau I.6: Les caractéristiques de la série 5000[6].

I.6-1 Principaux alliages Al-Mg, leurs caractéristiques et leurs domaines**d'applications [6] :**

- L'alliage **5005**, le moins chargé en magnésium (0,8 %), remplace l'aluminium nonallié lorsqu'une légère augmentation des caractéristiques est nécessaire : domaine de l'emboutissage, du chaudronnage, de l'architecture (bardages), du mobilier métallique...etc.
- L'alliage **5050** (Mg = 1,45 %), utilisé dans les domaines les plus variés : bâtiment (chéneaux, tuyaux...), ménager (machines à laver...), Transports (remorques automobiles, bateaux...).
- L'alliage **5251** (Mg : 2,05 % ; Mn : 0,3 %) est plus spécialement utilisé sous forme (barres, fils, tubes) ou de tubes soudés pour l'irrigation.
- L'alliage **5052** (Mg : 2,5 % ; Cr : 0,25 %) est situé, du point de vue résistance mécanique, sensiblement au milieu de la gamme des alliages Al-Mg. Il a l'avantage de combiner une bonne aptitude à la mise en forme, une bonne résistance à la fatigue et une très bonne résistance à la corrosion. Ses domaines d'application sont les plus divers, en particulier en chaudronnerie, tuyauteries pour l'industrie chimique, pétrolière, les transports maritimes et aéronautiques.
- Les alliages **5454** (Mg : 2,7 % ; Mn : 0,75 % ; Cr : 0,12 %), **5754** (Mg : 3,1 % ; Mn + Cr : 0,35 %), **5154** (Mg : 3,5 % ; Cr : 0,25 %) relativement voisins, à caractéristiques légèrement supérieures à celles des précédents, restent des alliages très sûrs, en particulier du point de vue résistance à la corrosion.
- Les alliages **5086** (Mg : 4 % ; Mn : 0,45 % ; Cr : 0,15 %) et **5083** (Mg : 4,45 % ; Mn : 0,7 % ; Cr : 0,15 %), donc plus chargés en magnésium que les précédents, sont utilisés toutes les fois que l'on recherche, en plus des caractéristiques générales des alliages Al-Mg, une résistance mécanique élevée.
- Les alliages **5056** (Mg : 5,05 % ; Cr : 0,12 % ; Mn : 0,12 %), **5056 A** (Mg : 5,05 % ; Mn : 0,35 %) et **5456** (Mg : 5,1 % ; Cr : 0,12 % ; Mn : 0,75 %), plus chargés en magnésium, sont les plus performants. Leurs applications sont toutefois limitées en raison des risques de corrosion intergranulaire et de corrosion sous tension.
- Ce sont généralement les alliages **5083** et **5086** qui sont les plus utilisés parce qu'ils offrent non seulement une excellente résistance à la corrosion et une très bonne résistance mécanique après soudage.

- Ce sont généralement les alliages **5083** et **5086** qui sont les plus utilisés parce qu'ils offrent non seulement une excellente résistance à la corrosion et une très bonne résistance mécanique après soudage.
- L'alliage **5052**, quant à lui, est principalement utilisé pour les superstructures (timonerie, accommodations) en raison de son bas coût. En comparant les propriétés mécaniques dans les zones soudées, il a été observé que l'alliage **5052** possède des propriétés mécaniques plus basses dans les zones soudées.

II.1 RESISTANCE A LA CORROSION

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium explique le développement de ses nombreuses applications dans le bâtiment, les transports, l'équipement du territoire, la construction navale... milieux dans lesquels les conditions d'emploi peuvent être sévères.

La tenue à la corrosion dépend des paramètres suivants :

- le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface
- les caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé : humidité, température, présence d'agents agressifs...etc.
- les conditions de services prévues
- le mode d'assemblage éventuel des structures, les dispositions constructives
- la durée de vie espérée, la fréquence d'entretien

Il n'y a pas de métal ou d'alliage universel du point de vue tenu à la corrosion.

Pour un même matériau, toutes les nuances n'ont pas la même résistance aux différentes formes de corrosion [3].

II.2 ROLE DU FILM D'OXYDE

La très bonne tenue à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la présence permanente sur le métal d'un film continu d'oxyde d'aluminium, appelé «alumine» qui le rend passif à l'environnement. Ce film se forme dès que le métal est mis au contact d'un milieu oxydant : l'oxygène, l'air, l'eau. Il se reforme instantanément au contact de l'air lors des opérations de mise en forme : pliage, découpage, perçage et même lors du soudage lors de la solidification du cordon de soudure.

Son épaisseur est comprise entre 5 et 10 nanomètres. Sa stabilité physico-chimique dépend en particulier des caractéristiques du milieu.

La vitesse de dissolution du film d'oxyde dépend du pH du milieu corrosif. Elle est très forte en milieu acide et alcalin, elle est faible dans les milieux proches de la neutralité de pH 5 à 9 (eaux naturelles pH 7, eau de mer pH 8) Le film est donc particulièrement résistant dans ces milieux.

Le pH n'est pas le seul critère à prendre en compte pour prévoir la tenue à la corrosion des alliages d'aluminium, il faut aussi tenir compte de la nature de l'acide de base et des sels dissous.

Les acides chlorhydriques et sulfuriques attaquent fortement l'aluminium et ses alliages. La vitesse d'attaque augmente avec la concentration. L'acide nitrique concentré n'a pas d'actions sur les alliages d'aluminium, d'ailleurs par sa fonction oxydante, il contribue à

renforcer légèrement la couche d'oxyde naturel. Il est utilisé en concentration supérieure à 50% pour le décapage des dérivés de l'aluminium [6].

Soude caustique et la potasse même à faible concentration attaquent l'aluminium. Il faut noter qu'à pH identique, les solutions d'ammoniac n'ont qu'une action modérée.

De tout cela, il résulte que le choix et la formulation des produits de nettoyage et d'entretien doivent être spécifiques aux alliages d'aluminium.

II.3 CORROSION DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

L'aluminium ne se corrode pas d'une manière spécifique, mais sous diverses formes suivant des facteurs inhérents au métal (éléments d'alliages) et au milieu corrosif.

II.3.1 CORROSION UNIFORME

Cette corrosion se développe dans les milieux de pH acides ou très alcalins. Elle se traduit par une diminution régulière et uniforme de l'épaisseur sur toute la surface du métal. La vitesse de dissolution peut varier de quelques microns par an, dans un milieu non agressif, à plusieurs microns par heure selon la nature de l'acide ou de l'hydroxyde en solution.

Exemple : alliage 1050 H24 immergé dans l'eau de mer, corrosion de 1 micron par an [8].

II.3.2 CORROSION PAR PIQURE

L'aluminium est sensible à la corrosion par piqûres, elle se développe sur des sites où le film d'oxyde naturel présente des défauts qui peuvent être dues aux procédés de mise en forme ou aux éléments d'addition.

C'est dans les milieux aqueux, dont le pH est voisin de la neutralité (eaux de distribution, eau de mer). Le mécanisme de la propagation des piqûres est de nature électrochimique [8].

Elle se traduit par la formation de cavités dans le métal, généralement recouvertes de pustules blanches d'alumine hydratée gélatineuse très volumineuses.

Il est important de connaître la vitesse d'approfondissement des piqûres, dès qu'elles sont initiées. L'alumine hydratée est insoluble, une fois formée, elle reste accrochée sur le métal. La vitesse de corrosion par piqûres décroît rapidement dans la plupart des milieux.

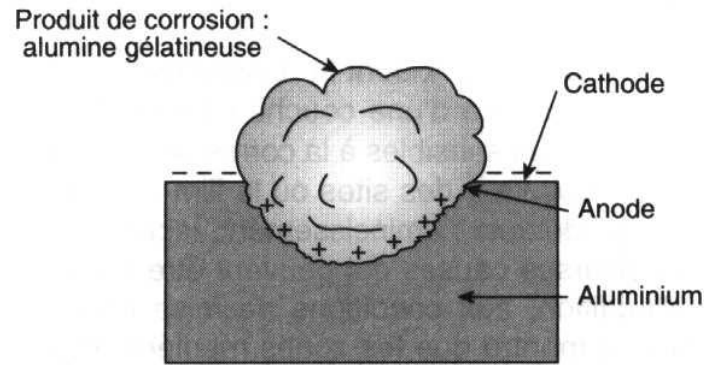


Figure II.1 : Corrosion par piqûre à la surface d'aluminium [6]

II.3.3 CORROSION CAVERNEUSE OU CORROSION SOUS DEPOT :

Elle se développe dans les recoins, sous les dépôts, là où l'eau ou l'humidité, pénètre et ne se renouvelle pas. Elle progresse généralement peu. Il est toutefois conseillé ne pas laisser dans les assemblages des niches à corrosion telles que les soudures discontinues [6].

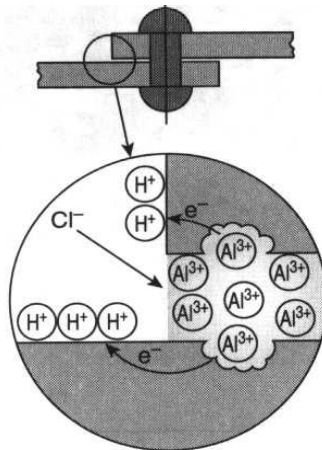


Figure II.2 : corrosion caverneuse [6]

II.3.4 CORROSION EROSION

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 [8].

Ce type de corrosion étroitement lié à l'hydrodynamique du fluide peut être rencontré dans le cas des circuits de chauffage. Le meilleur moyen de lutté contre ce type d'attaque est de faciliter l'écoulement du flux en jouant sur le profil des tubes. La Figure (II.3) illustre le mécanisme de formation des creux par érosion : [8]

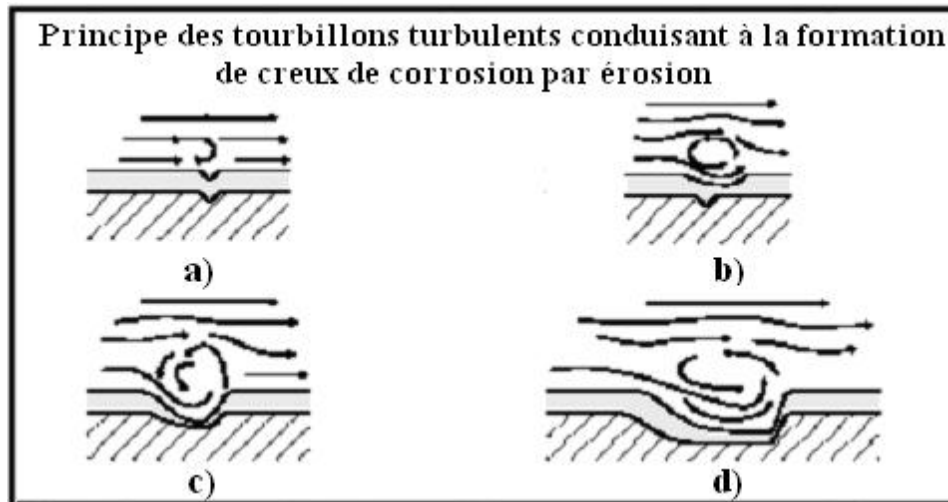


Figure II.3 : Principe des tourbillons turbulents conduisant à la formation de creux de [8]

II.3.5 CORROSION SOUS CONTRAINTE

L'expérience montre qu'une structure peut se rompre brutalement sous l'effet conjugué d'une contrainte (flexion, traction et contrainte interne résiduelle due à la trempe) et d'un milieu corrosif (ambiance humide plus ou moins chargée de chlorures). Les alliages à hautes caractéristiques mécaniques (2000, 7000) peuvent être sensibles à la corrosion sous contrainte [6].

L'influence des traitements thermiques est importante, la vitesse de trempe doit être aussi élevée que possible, les états de sous-revenu sont plus sensibles que les états contraires.

II.3.6 CORROSION FEUILLETANTE

La corrosion feuilletante (ou exfoliante) comme la corrosion inter granulaire est une conséquence du « passé » thermomécanique des pièces. Seuls les alliages à haute caractéristiques mécaniques sont concernés : ces phénomènes sont liés à la structure métallurgique particulière des alliages laminés. Cette forme de corrosion qui affecte seulement quelques alliages (ceux des séries 2000, 5000 et 7000) se développe si les conditions de traitements thermiques ou de soudage sont mal adaptées [8].

La corrosion feuilletante est caractérisée par une déformation locale de feuillets métalliques et fait apparaître des cloques à la surface du matériau. Il s'agit d'une attaque qui se propage généralement de façon intergranulaire selon des plans parallèles à la surface, séparée par de fins feuillets métalliques. Le déchaussement des grains est dû aux produits de corrosion formés, qui sont plus volumineux que les espèces initialement non corrodées. Le

mécanisme de propagation est généralement assimilé à une corrosion inter granulaire, dirigé préférentiellement par les contraintes exercées par les produits de corrosion. Dans certains cas, la propagation est de type transgranulaire [8].

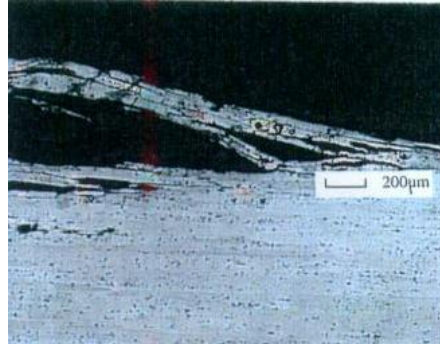


Figure II.4: Corrosion feuilletante [11]

II.3.7 CORROSION TRANS OU INTERCRISTALLINE

Elle peut se propager de deux manières :

- Progresser dans toutes les directions : corrosion transcristalline ;
- Emprunter un chemin préférentiel le long des joints de grains : corrosion intercristalline. Ce type de corrosion ne peut se détecter que par un examen micrographique, elle peut provoquer une détérioration très conséquente des caractéristiques mécaniques et provoquer la ruine de la structure si la propagation est profonde. Elle concerne presque exclusivement les alliages des familles 2000 et 7000. On peut aussi en trouver sur les alliages 5000 chargés en magnésium à plus de 4% [11].



Corrosion transcristalline



Corrosion intercristalline

Figure II.5 : corrosion transcristalline et intercristalline [6].

II.3.8 LA CORROSION A LA LIGNE D'EAU

Cette forme de corrosion concerne les structures métalliques, en particulier en acier, semi-immergées : la zone immergée, très proche de la limite air/eau, peut subir une corrosion préférentielle, parfois sévère. Sur l'aluminium, cette corrosion est due à la différence de concentration en chlorures qui est créée du fait de l'évaporation dans la partie la plus mince du film d'eau qui mouille le métal (figure II.6). Il en résulte une différence de potentiel de dissolution qui peut être importante entre le bas et le haut du ménisque qui est anodique, donc corrodé.

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

Cet effet est très atténué dans l'eau en mouvement qui renouvelle constamment le ménisque [3].

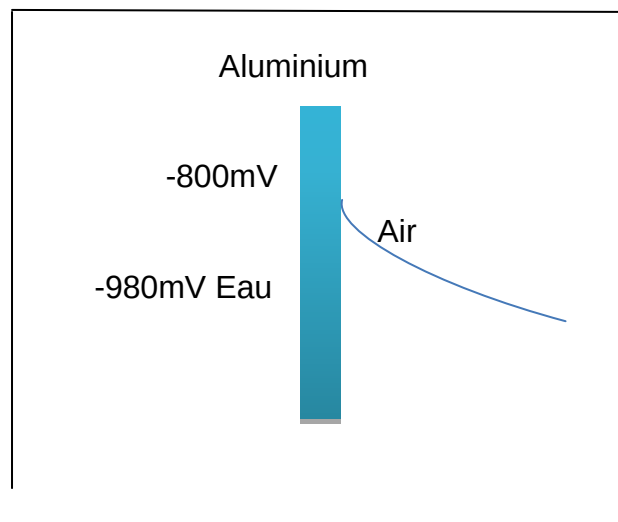


Figure II.6 : Corrosion a la ligne d'eau [3]

II.3.9 CORROSION GALVANIQUE

L'aluminium et ses alliages sont plus électronégatifs que la plupart des métaux usuels. Ce fait a freiné pendant longtemps les applications d'assemblages hétérogènes aluminium et autre métal car se posait la question de leur tenue en présence d'autres métaux ou alliages [9].

PRINCIPE DE BASE

Dès que deux métaux ou alliages de nature différente sont en contact direct ou reliés électriquement par des boulons, dans un milieu humide et conducteur, par exemple, l'eau de mer ou une solution saline, l'un des métaux peut se consommer tandis que l'autre conservera son intégrité [3].

La cathode est le siège d'une réaction de réduction, le plus souvent celle des ions H^+ présents dans l'eau.

Pour qu'il y ait corrosion galvanique il faut :

- la présence d'un électrolyte : la zone doit être mouillée, réaction plus forte dans un milieu salin.
- continuité électrique entre les deux métaux : donc l'un des moyens simple pour éviter cette corrosion est d'interposer un isolant : [9]

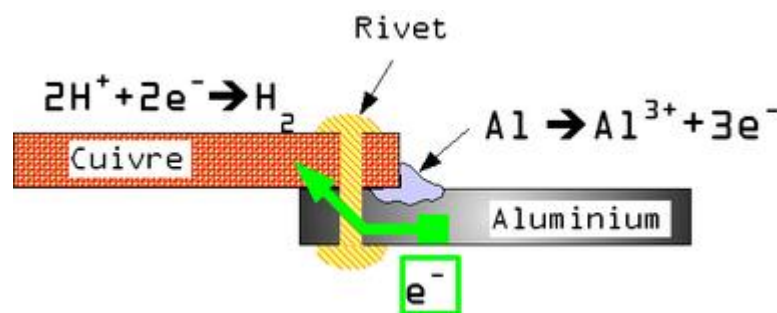


Figure II.8 : Exemple de corrosion galvanique [9]

Métaux de nature différente : il dépend des potentiels de dissolution. Pour chaque solution, il est possible d'établir une « série galvanique » (classement des différents métaux et alliages en fonction de leur potentiel de corrosion mesuré). La (Figure II.7-8) présente une classification des métaux et de quelques alliages en fonction de leur potentiel de dissolution dans l'eau de mer (les métaux sont classés ici par ordre croissant d'activité).

Il permet de prévoir lequel des deux métaux, en cas de contact, dans un milieu aqueux sera attaqué :

- celui qui est le plus électronégatif, si tous deux ont un potentiel électronégatif
- celui qui est électronégatif, si l'autre est électropositif

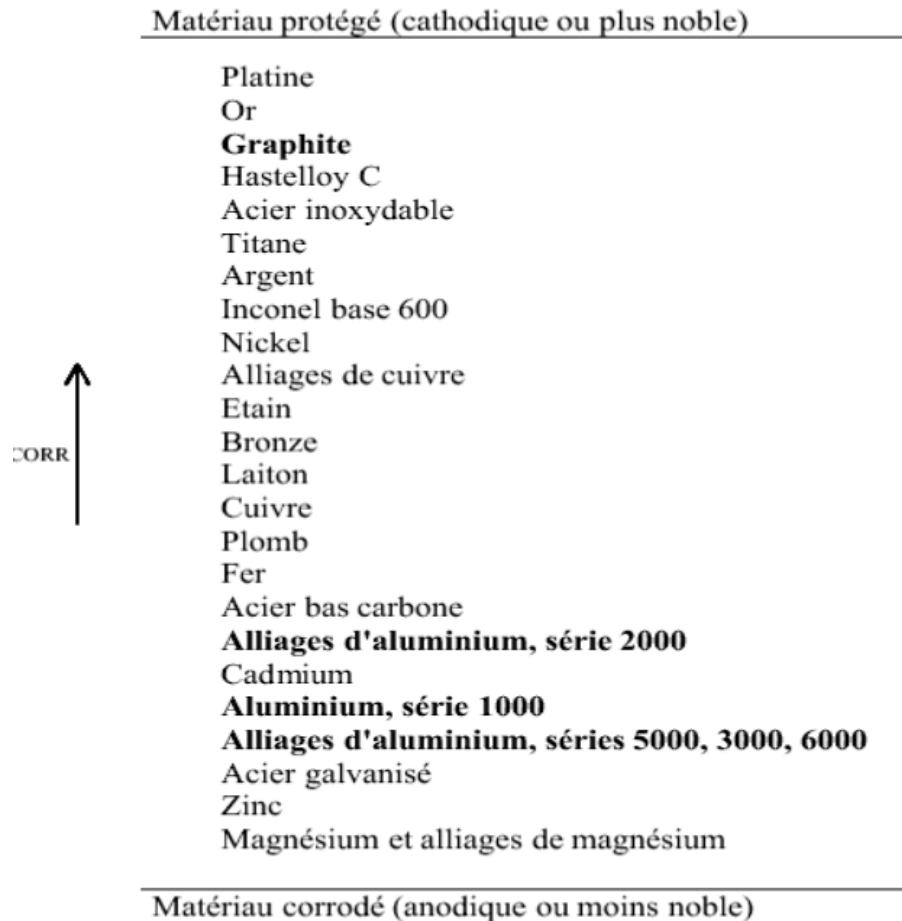


Figure II.9 : Série galvanique, obtenue dans l'eau de mer à 25°C [8]

II.4 INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA CORROSION DE L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

Il est souvent attribué à l'aluminium le comportement électrochimique de l'alliage (caractère passivable, sensibilité à la corrosion localisée ...). Cependant pour certains éléments la résistance à la corrosion peut être influencée. Ainsi la figure .présente schématiquement la baisse de la résistance à la corrosion d'échantillons d'aluminium en milieu chloruré en fonction de la série. Il est toutefois à noter que cet effet défavorable s'accompagne de propriétés mécaniques accrues.

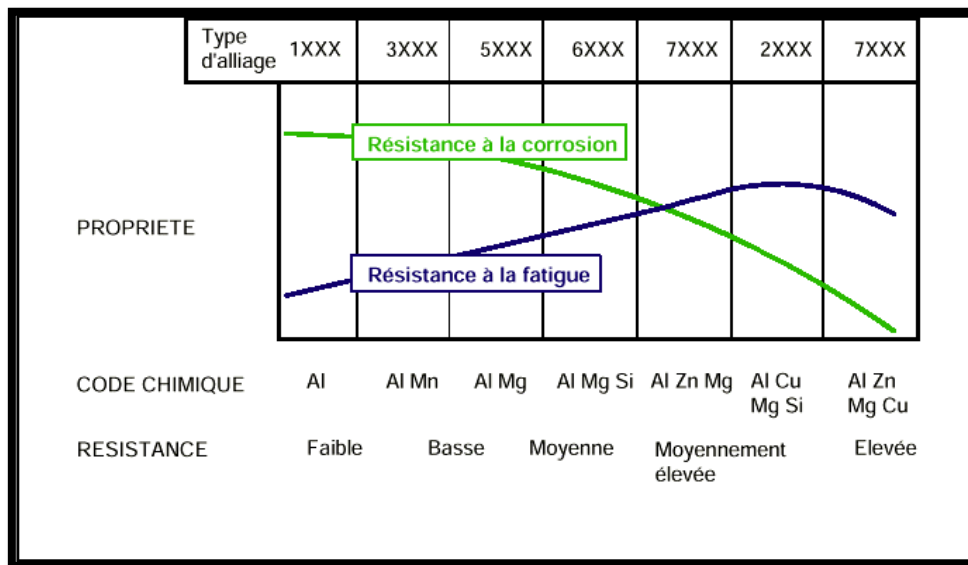


Figure II.10 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion et à la fatigue des alliages d'aluminium [8]

Depuis le début du XXe siècle, de nombreuses études ont porté sur l'influence de la plupart des éléments chimiques sur les propriétés de l'aluminium.

Elles ont permis d'établir un classement qualitatif de la résistance à la corrosion en fonction de la nature chimique de l'alliage. (Tableau II.1).



↑ Résistance à la corrosion

Série	Eléments d'alliage	Particules Intermétalliques ou secondes phases	Formes de corrosion généralement observées
5000	Mg	Al_3Mg_2 , Al_8Mg_5	Piqûres, généralisée, sous contrainte (pour les forts taux en magnésium)
1000	Aucun	Al_3Fe , Al_6Fe $\text{Al}_{12}\text{Fe}_3\text{Si}_2$	Piqûres, généralisée dépend de la quantité de secondes phases
6000	Si, Mg	FeSiAl_5 , Fe_2SiAl_8 $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$, Mg_2Si	Piqûres, généralisée
3000	Mn	Al_6Mn , Al_6MnFe	Piqûres, généralisée
4000	Si	Si	
7000	Zn, Mg Ajout de Cu	MgZn_2	Piqûres, généralisée, sous contrainte, feuillettante, intergranulaire (avec Cu)
2000	Cu	CuFeMnAl_6 , Al_2Cu Al_2CuMg	Piqûres, généralisée, sous contrainte (sans traitement thermique), intergranulaire, feuillettante

Tableau II.1 : classification de la résistance des alliages d'aluminium et leurs particules intermétalliques [8].

Du point de vue des propriétés électrochimiques bénéfiques, il peut être retenu d'une manière générale que les éléments : Cr, Mg, Mn apportent un effet bénéfique, tandis que les éléments: Cu, Fe, Ni, Sn, Pb, Co sont néfastes. Si, Ti, Zn, Sb, Cd, Zr sont sans effet.

Les éléments d'alliages existent sous deux formes dans l'aluminium :

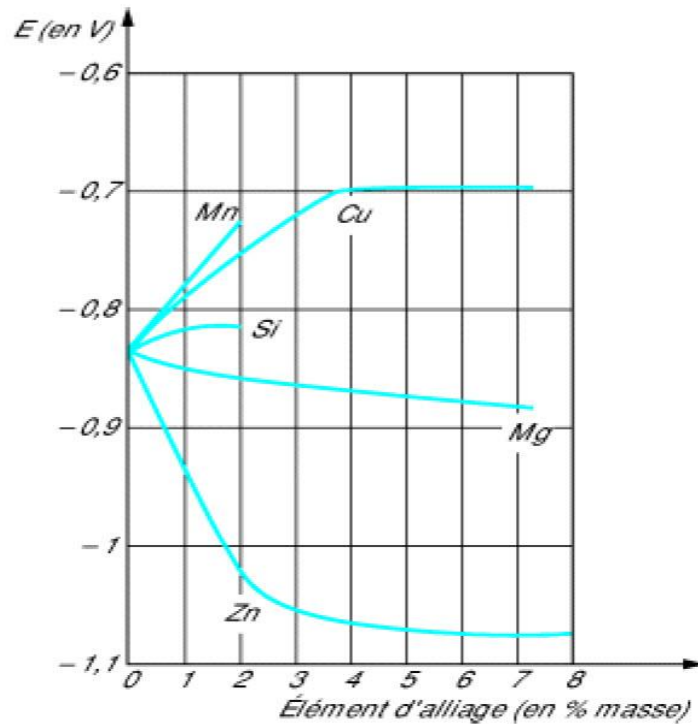
- en solution solide,
- sous forme de précipités intermétalliques.

Dans ce dernier cas les particules intermétalliques ont un comportement plus ou moins nobles par rapport à l'aluminium, et peuvent conduire à la formation de micro piles par bimétallisme et donc au développement d'attaques localisées [8].

Particule intermétallique / Seconde phase		E_{CORR} (mV _{ECS})
particules cathodiques {	Si	-170
	Al ₃ Ni	-430
	Al ₂ Cu	-440
	Al ₃ Fe	-470
	Al ₆ Mn	-760
	Al	-840
particules anodiques {	Al ₂ CuMg	-910
	MgZn ₂	-960
	Al ₃ Mg ₂	-1150
	Mg ₂ Si	-1190
	Al ₈ Mg ₅	-1240

Tableau : II.2 Potentiel de corrosion de quelques particules intermétalliques en milieu chloruré [8].

L'addition d'éléments d'alliage modifie ainsi fortement le potentiel de corrosion dans le sens anodique ou cathodique. Pour chacun, les principales variations sont fonction de la teneur de l'élément dans l'alliage (Figure II.11)



Enrichissement en éléments d'addition%

Figure II.11 Evolution du potentiel de corrosion de l'aluminium en fonction de l'enrichissement en éléments d'addition. Les pourcentages atomiques indiquent les limites de solubilité de l'élément [8].

II.5 TRAITEMENT DE LA SURFACE ET PREVENTION DE LA CORROSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

La corrosion des alliages d'aluminium ne présente pas en générale de réels problèmes en atmosphère, eau douce, eau de mer et pour la plupart des sols. Une «bonne résistance à la corrosion» sous-entend que l'aluminium peut être utilisé de façon durable sans protection de surface. En fonction de l'agressivité de l'environnement et des conditions d'utilisation, des mesures doivent néanmoins parfois être prises afin de limiter ou d'empêcher la dégradation. Il existe divers moyens de prévention focalisée sur le matériau ou le milieu [5].

II.5.1 PROTECTION DE L'ALUMINIUM PAR REVÊTEMENT ORGANIQUE : [5]

Les **peintures ou vernis** remplissent la double fonction suivante :

- protection contre la corrosion rencontrée dans toutes les applications (bâtiment, emballage, industrie...).
- décoration : couleur et aspect de surface.

NATURE DES REVETEMENTS :

Une peinture est constituée par:

- **liants**: polymères divers
- **pigments**: minéraux ou organiques
- **-solvants volatils**

Les peintures donnant les meilleurs résultats sont celles qui nécessitent une cuisson (Thermo-réticulation).

➤ **Choix d'un système de protection**

On utilise un revêtement multicouche dans lequel chaque couche remplit un rôle particulier.

- le primaire: assure l'adhérence métal/polymère
- deuxième couche: fonction coloration et barrière aux agents suivants:
- rayonnement
- humidité, acidité, etc...
- chocs, rayures, etc...
- troisième couche: propriétés particulières: brillant ou mat, glissance, effets spéciaux...etc.

II.5 .2 EMPLOI D'INHIBITEURS DE CORROSION [10]

Un inhibiteur est une substance chimique que l'on ajoute en petite quantité au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion du matériau métallique à protéger. Leur domaine d'utilisation recouvre les milieux acides, la vapeur, et les eaux de refroidissement.

En général, les inhibiteurs sont classés en fonction de leur mode d'action.

On distinguera ainsi :

- **Les inhibiteurs anodiques** : Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y a

formation d'un film passif protecteur. La concentration en inhibiteur doit être suffisante pour atteindre l'intensité critique de passivation.

- **Les inhibiteurs cathodiques :** Au contraire des précédents, l'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles.
- **Les inhibiteurs organiques :** Ils constituent un groupe important car ils modifient à la fois les réactions anodique et cathodique en affectant l'ensemble de la surface.

II.5 .3 TRAITEMENT DE LA SURFACE [10]

➤ **Préparation de surfaces**

- **Elimination des souillures superficielles**

Les procédés de fabrication laissent des souillures sur la surface du métal qui sont éliminées par les procédés de dégraissage et de désoxydation.

- **Modification d'aspect**

L'aspect de surfaces des alliages d'aluminium peut être modifié par les méthodes suivantes:

- traitements mécaniques : usinage, polissage, ponçage, projection de particules, microbillage, tribo-finition.
- traitements chimiques et électrolytiques: selon les réactifs, il est possible de modifier l'aspect pour obtenir des surfaces plus :
 - réfléchissantes: brillantage chimique
 - plus mates: satinage en milieu basique

➤ **Les revêtements métalliques**

On les emploie couramment pour protéger l'acier, notamment contre la corrosion atmosphérique. On peut aussi les appliquer sur d'autres substrats comme le cuivre ou le laiton, comme c'est le cas par exemple pour les revêtements de chrome sur les robinets. D'une manière générale, on distinguera deux types de revêtements métalliques :

- **Les revêtements anodiques:**

Le métal protecteur est moins noble que le métal à protéger. C'est le cas du procédé de galvanisation (revêtement de zinc). En cas de défaut du revêtement, il y a formation d'une pile locale et ce dernier se corrode en protégeant cathodiquement le métal de base. La protection reste donc assurée tant qu'une quantité suffisante de revêtement est présente. Plus que l'absence de défaut, c'est donc l'épaisseur qui est un élément important de ce type de revêtement. En général, elle est comprise entre 100 et 200 μm .

- **Les revêtements cathodiques:**

Le métal protecteur est plus noble que le métal à protéger. C'est le cas par exemple d'un revêtement de nickel ou de cuivre sur de l'acier. En cas de défaut du revêtement, la pile de corrosion qui se forme peut conduire à une perforation rapide du métal de base, aggravée par le rapport "petite surface anodique" sur "grande surface cathodique". Dans ce cas, la continuité du revêtement est donc le facteur primordial.

II.5.4 PROTECTION ELECTROCHIMIQUE [6]

Parmi les moyens employés pour lutter contre la corrosion, la protection électrochimique doit son originalité au fait qu'elle consiste à agir de manière contrôlée sur les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent lors du phénomène de corrosion. En effet, cette méthode consiste à imposer au métal à protéger une valeur de potentiel pour laquelle la vitesse d'attaque devient très faible, voire nulle. On distingue :

La protection **cathodique** qui consiste à abaisser le potentiel d'électrode du métal.

La protection **anodique**, d'origine plus récente, Elle repose sur la propriété qu'ont certains matériaux à se passiver dans des milieux corrosifs lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte.

II.6 DETECTION DE LA CORROSION [11]

Pour étudier le mécanisme de dégradation et identifier les causes qui sont parfois difficilement observable en surface des matériaux, il est utile de développer un outil de détection et des techniques de suivi de la corrosion applicable directement sur la structure à étudier. Parmi ces techniques on distingue :

II.6.1 LA TECHNIQUE DU BRUIT ELECTROCHIMIQUE [11]:

- **Définition :**

Il n'existe actuellement pas de définition « normalisée » du bruit électrochimique. Cependant, il est généralement admis que le bruit électrochimique est constitué de l'ensemble des fluctuations de courant ou de potentiel générées par l'interface métal/électrolyte. Le terme de bruit électrochimique doit son nom de « bruit » à l'allure souvent aléatoire du signal, et au fait qu'il a été longtemps impossible de distinguer dans ce signal les composantes dues aux phénomènes électrochimiques d'une part et dues au bruit instrumental d'autre part.

- **Intérêt de la technique :**

Le bruit électrochimique est une technique novatrice dans la façon d'étudier les phénomènes physico-chimiques. Il permet en effet, selon le type de montage choisi, de conduire soit une étude en gardant le niveau énergétique de l'interface constant, soit une étude des phénomènes à l'interface sans jamais perturber le système.

L'utilisation de théories récentes de traitement du signal permet, par le biais du bruit électrochimique, d'étudier des phénomènes très discrets et instables.

II.6.2 TECHNIQUE DE L'EMISSION ACOUSTIQUE [11]

- **Définition**

L'émission acoustique (EA) est définie par la norme ASTM comme étant « l'ensemble des phénomènes dans lesquels des ondes élastiques transitoires sont générées par dissipation de l'énergie provenant de sources localisées à l'intérieur d'un matériau, ou les ondes élastiques ainsi générées ». Par extension, l'émission acoustique désigne également la discipline scientifique qui étudie et utilise ces phénomènes. Les ondes concernées par cette technique s'étendent dans le domaine fréquentiel ultrasonore compris entre quelques kHz et quelques MHz.

- **Intérêt de la technique et domaines d'application.**

L'émission acoustique consiste en l'étude des ondes mécaniques élastiques dues à l'évolution d'un défaut. Lorsque ces ondes sont enregistrées à l'aide d'une chaîne d'acquisition appropriée, il est possible de détecter, de localiser et d'évaluer la gravité d'un défaut en phase de propagation. L'intérêt d'une telle technique dans le domaine industriel est donc évident. Cette technique est grandement utilisée dans des industries diverses et variées pour le suivi des processus de fabrication et le contrôle non destructif des installations.

METHODE ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

Ce chapitre, commence par une présentation de l'alliage d'aluminium-magnésium (AA5083) utilisé dans cette étude. Nous exposerons les différentes techniques de caractérisation utilisées dans ce travail. Nous aborderons le principe de fonctionnement et le mode opératoire de chaque appareillage, ainsi que les paramètres d'expérience utilisée pour étudié l'évolution au cours du temps des propriétés chimique par la méthode du bruit électrochimique.

III-1 PREPARATION DES ECHANTILLONS :

Pour cette expérience, l'objectif est de préparer des échantillons pour l'étude du bruit électrochimique dans le sens de l'laminage (longitudinal) et d'autre dans le sens transversal. Pour cela une tôle de l'alliage AA5083-H321 (de composition donnée par le tableau III.1) ayant subi un traitement thermomécanique de laminage à chaud, laminage à froid et traitement de stabilisation dans l'industrie, et un recuit d'homogénéisation suivi d'un laminage de 92% dans le laboratoire, est découpée en plusieurs échantillons dans le sens du laminage et transversale au laminage.

Eléments	Cu	Mg	Fe	Mn	Cr	Si	Zn	Ti	Autres
Concentration	0.1	4-4,9	0.4	0.3-1	0.25-0,5	0.4	0.25	0.15	0.15

Tableau III.1 : Composition chimique de l'alliage AA5083-H321

Ces échantillons ont une forme rectangle de dimension $20 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ ont été découpés à l'aide d'une scie à métaux.

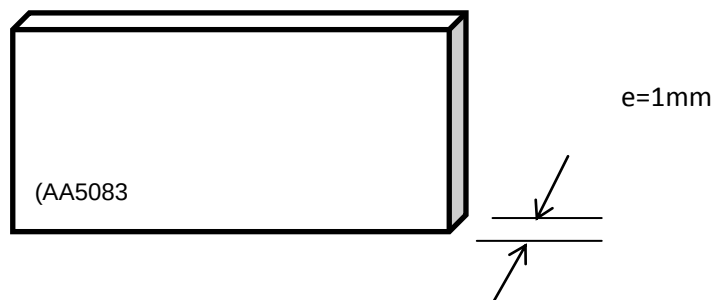


Figure III.1 : Forme des échantillons

Après cette opération, les échantillons sont enrobes à froid pour faciliter le polissage.

III-1-1 PREPARATION DE LA SURFACE

Tous es échantillons ont subi un polissage réalisé sur une polisseuse de type STUERS PEDMAX 2 tournant à 150 et 300 tours/min. Le polissage est réalisé sous lubrification continue (sous une forme jet d'eau) pour éviter l'échauffement local des échantillons suite au frottement avec le papier abrasif, on utilisé des papiers abrasifs de granulométries : 800, 1000, 1200, 2400 et 4000. Ces derniers ont été utilisé successivement dans l'ordre croissant de granulométrie en prenant le soin de tourner l'échantillon de 90° afin d'éliminer les rayures laissées par le polissage précédent.



Figure III.2 : polisseuse utilisée

III-1-2 ATTAQUE CHIMIQUE

Après le polissage l'échantillon est rincé à l'eau puis séché a l'air chaud d'un sèche cheveux. Afin de rendre les phases constituant l'alliage à partir d'une surface polie, il est nécessaire pour certains alliages formant des couches d'oxydes protectrices en surface tels que l'aluminium et ses alliages,...etc., de recourir à une attaque électrochimique en utilisant le réactif de 1% NaOH.

III-2 ANALYSE DE STRUCTURE

III-2-1 EXAMEN METALLOGRAPHIQUE

La connaissance de la structure métallurgique des matériaux étudiés est un point essentiel pour la compréhension des phénomènes intervenant en corrosion. Les techniques d'observation utilisées pour cette étude sont la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage (MEB).

a) MICROSCOPIE OPTIQUE

La microscopie optique (MO) est utilisée afin, d'une part, déterminer la composition en phase de la structure et la texture du matériau étudié, la dimension des grains et les différentes phases présentes, et d'autre part, de caractériser la morphologie de dégradation des échantillons après corrosion.

Le principe du microscope métallographique repose sur la réflexion de la lumière par les échantillons métalliques et l'agrandissement des images effectué par un jeu de lentilles disposées dans les objectifs et les oculaires. Une source lumineuse émet une lumière focalisée grâce à un condenseur et éclaire l'échantillon pour donner une image agrandie grâce à la lentille objectif. Un miroir permet de transformer l'image sur l'oculaire et sur la caméra. L'étalonnage de mesure des dimensions réelles après agrandissement est effectué au moyen d'une règle, fournie avec le microscope, de 1 mm de taille, divisée en 100 subdivisions. La figure montre le schéma de Principe du microscope utilisé.

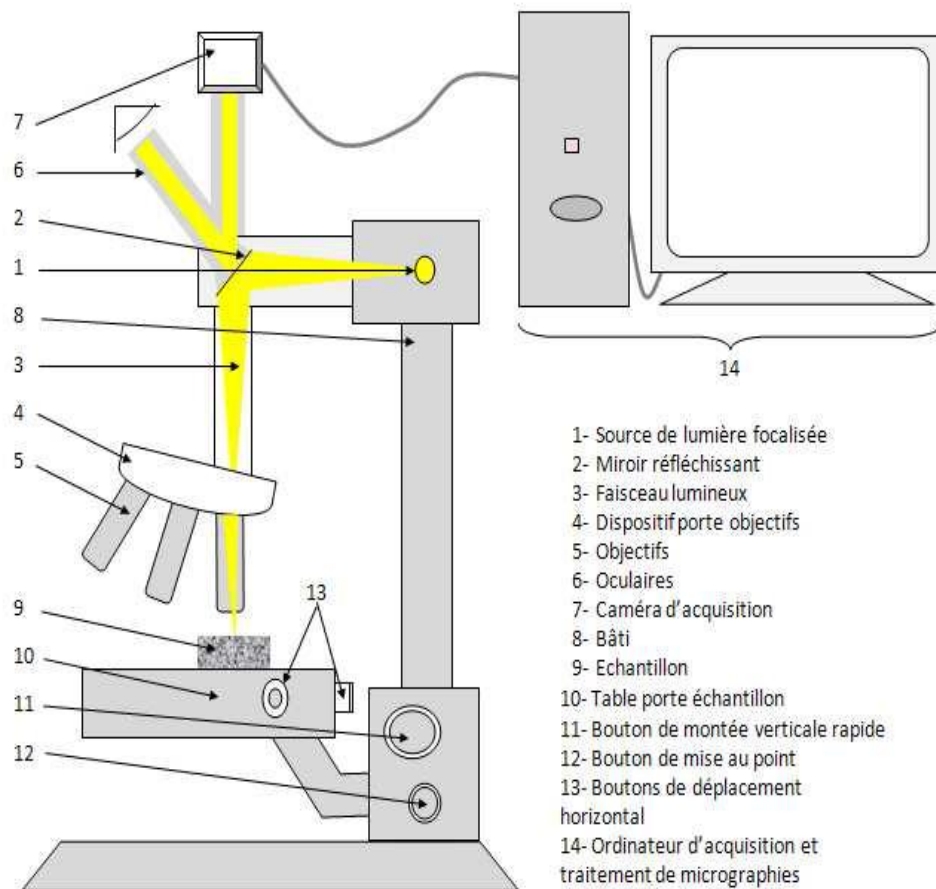


Figure III.3 : Schéma de principe du microscope optique utilisé.



Figure III.4 : Microscope optique utilisé pour la caractérisation.

a-1) OBSERVATION AU MICROSCOPE OPTIQUE

L'observation micrographique a été réalisée sur un microscope optique de type HUND équipé de 4 objectifs de grossissements 40, 100, 200 et 400 fois. L'acquisition des micrographies a été effectuée au moyen d'une caméra vidéo solidaire au microscope et liée à un ordinateur équipé du logiciel d'acquisition (EYE'S CORA) et de traitement des résultats (PICEDCORA).

b) MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (M E B)

La microscopie électronique à balayage permet d'explorer la surface de l'échantillon avec une haute résolution. Il utilise un faisceau d'électrons émis par un filament en tungstène soumis à une haute tension. Elle nous fournit des informations sur la composition chimique de l'échantillon ainsi que sa morphologie. Dans notre étude, le MEB utilisé est de marque Philips ESEM XL30 à filament de tungstène ceci est couplé à un système complet de microanalyse par dispersion d'énergie (EDS X). La figure suivante montre la morphologie de cet appareil (Figure .VI.6). Lorsque le filament est mis sous haute tension et que le vide nécessaire dans la colonne est atteint, un faisceau d'électrons est produit (électrons primaires) et accéléré par la haute tension vers l'échantillon. Des lentilles électromagnétiques assurent l'orientation du faisceau d'électrons et le balayage de l'échantillon. Le balayage de l'échantillon par les électrons primaires produit alors une rétrodiffusion des électrons primaires (électrons

rétrodiffusés), des électrons secondaires éjectés de l'échantillon par les électrons primaires ainsi que des rayonnements X caractéristiques des transitions électroniques. Trois types de détecteurs sont alors disposés dans la colonne du microscope : le détecteur des électrons rétrodiffusés, le détecteur des électrons secondaires et celui des rayons X. Les images obtenues en électrons rétrodiffusés se caractérisent par un contraste de couleur qui traduit la différence de masse atomique des éléments constituant les phases en présence : les zones claires indiquant les phases lourdes. Les images en électrons secondaires donnent une topographie de la surface examinée tandis que l'analyse des rayonnements X caractéristiques fournit une analyse chimique.

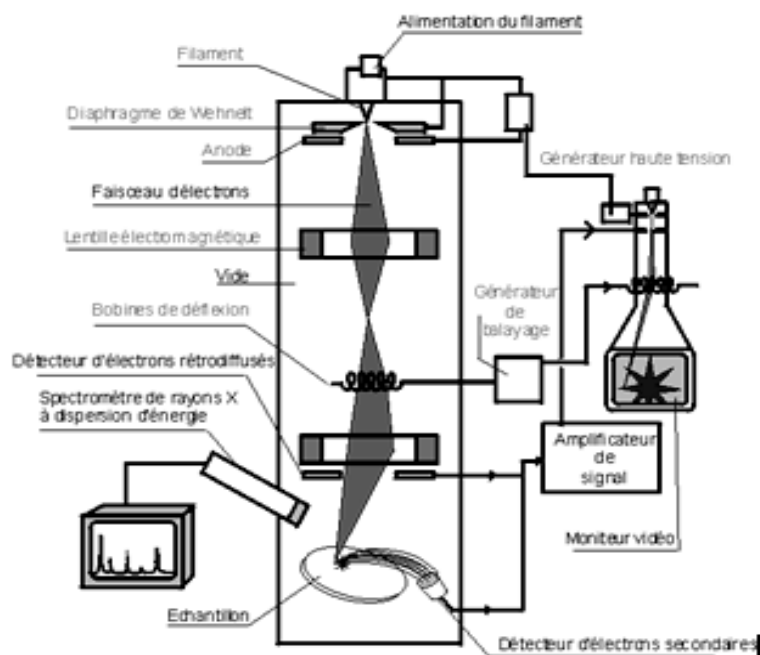


Figure III.5 : Schéma de principe du microscope à balayage (MEB).



Figure III.6 : Microscope électronique à balayage (MEB).

III-3 ESSAI DE MICRODURETE

L'essai de microdureté Vickers (HV) a été effectué sur l'alliage d'aluminium dont les surfaces ont été préalablement polies. Cet essai nous permet de mesurer la dureté de l'échantillon à l'échelle microstructurale. Le microduromètre utilisé est semi automatique de type ZWICK/Roell (Fig)



Figure III.7: Appareil de microdureté

III-3-1 PRINCIPE DE LA MICRODURETE :

Le principe du microduromètre consiste à enfoncer un pénétrateur de petite taille (taille de pointe inférieure au micromètre) dans une phase donnée. La charge appliquée est souvent très faible. La mesure de la dimension de l'empreinte se fait à l'aide d'un système de microscopie optique équipé d'une règle micrométrique.

Après avoir préparé la surface à indenter de la manière décrite précédemment (microscopie optique) en veillant à ce qu'elle soit parfaitement parallèle à la surface de contact, celle-ci est examinée au moyen du système de microscopie, solidaire à l'appareil, pour mettre en évidence les phases en présence. Ensuite, on fixe les paramètres d'expérience à savoir le type de microdureté (Vickers) et la charge à appliquer de sorte que le logiciel utilise ces données pour le calcul de la microdureté après mesure des diagonales de l'empreinte.

Ensuite, on choisit la phase à tester et on la ramène sur le point de la réglette. Lorsque l'indentation est lancée, l'objectif du microscope est tiré automatiquement et le pénétrateur vient s'enfoncer dans la phase ciblée. Enfin, le système remet le microscope et permet de visionner l'empreinte et de mesurer ses diagonales. Après validation des mesures.

L'appareil calcule automatiquement la dureté correspondante en utilisant la formule adéquate.

Dans notre cas, les mesures ont été réalisées en appliquant une charge de 100g pendant 20 secondes au moyen d'un pénétrateur Vickers en diamant : pointe pyramidale à base carrée d'angle au sommet de 136° . L'étalonnage de l'appareil est fait en testant une plaque d'acier trempé de dureté connue 611,7HV1.

La dureté Vickers HV est donnée par le rapport de la force sur le diamètre moyen de l'empreinte.

$$HV = 1,8544 F/d^2$$

Avec :

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

F : charge d'essai en Newton et d le diamètre moyen de l'empreinte en mm.

III-4 MONTAGE ELECTROCHIMIQUE

III-4-1 CELLULE ELECTROCHIMIQUE :

Les caractérisations électrochimiques de l'alliage Al-Mg AA5083-H321 sont effectuées dans une cellule électrochimique classique à trois électrodes, présentée sur la figure (Figure III.8). La cellule étant en contact direct avec l'air ambiant, les mesures ont été effectuées en milieu aéré et à température ambiante. Dans le cadre de notre étude, les mesures du potentiel et du courant se font en présence et en absence du champ magnétique, pour cela un aimant de forme circulaire est posé au fond de la cellule.

a) LES ELECTRODES

- **L'électrode de référence :** L'électrode de référence est une électrode en Argent dont le potentiel est $E^\circ = 197\text{mV}$ par rapport à l'électrode standard normale à hydrogène.
- **La contre électrode :** La contre-électrode est un petit cylindre en graphite permet de faire circuler un courant au travers de l'échantillon.

- **L'électrode de travail** : L'électrode de travail se compose d'un contact électrique en cuivre de diamètre 1,5 mm et de longueur 25cm et la surface de l'échantillon en contact avec le bain est de 2 cm^2 le fil électrique et le pt de contacte sont isolé par un adhésif.

b) BAIN DE CORROSION

L'ensemble des électrodes de l'essai sont immergées dans une solution de l'eau de mer qui provienne de la mer méditerranée dont la salinité est au voisinage de 41 g l^{-1} .

c) Dispositif de mesure

Le dispositif utilisé pour notre étude du comportement à la corrosion de l'alliage Al-Mg celui-ci est constitué de la cellule d'essai décrite sur la (Figure III.8). Les mesures électrochimiques sont réalisées avec un montage classique à trois électrodes. L'ampèremètre placé entre l'électrode du travail et la contre électrode permet de mesurer l'évolution du courant traversant l'échantillon Al Mg. Un potentiomètre entre l'électrode du travail et celle de référence permet de mesurer les variations de potentiel du système pendant la durée de l'essai.

III-5 METHODES D'ETUDE

Deux types d'électrode de travail sont utilisés pour les études de l'évolution du courant et du potentiel de l'alliage Al Mg.

Le premier type, l'échantillon de travail est coupé dans le sens longitudinal de laminage et l'autre suivant le sens transversal .La durée d'immersion est de 72 heures pour chaque essai.

Echantillon	A	B
Sens	LONGITUDINAL (L)	TRANSVERSAL (T)

Tableau III.2 : Types d'échantillons utilisés

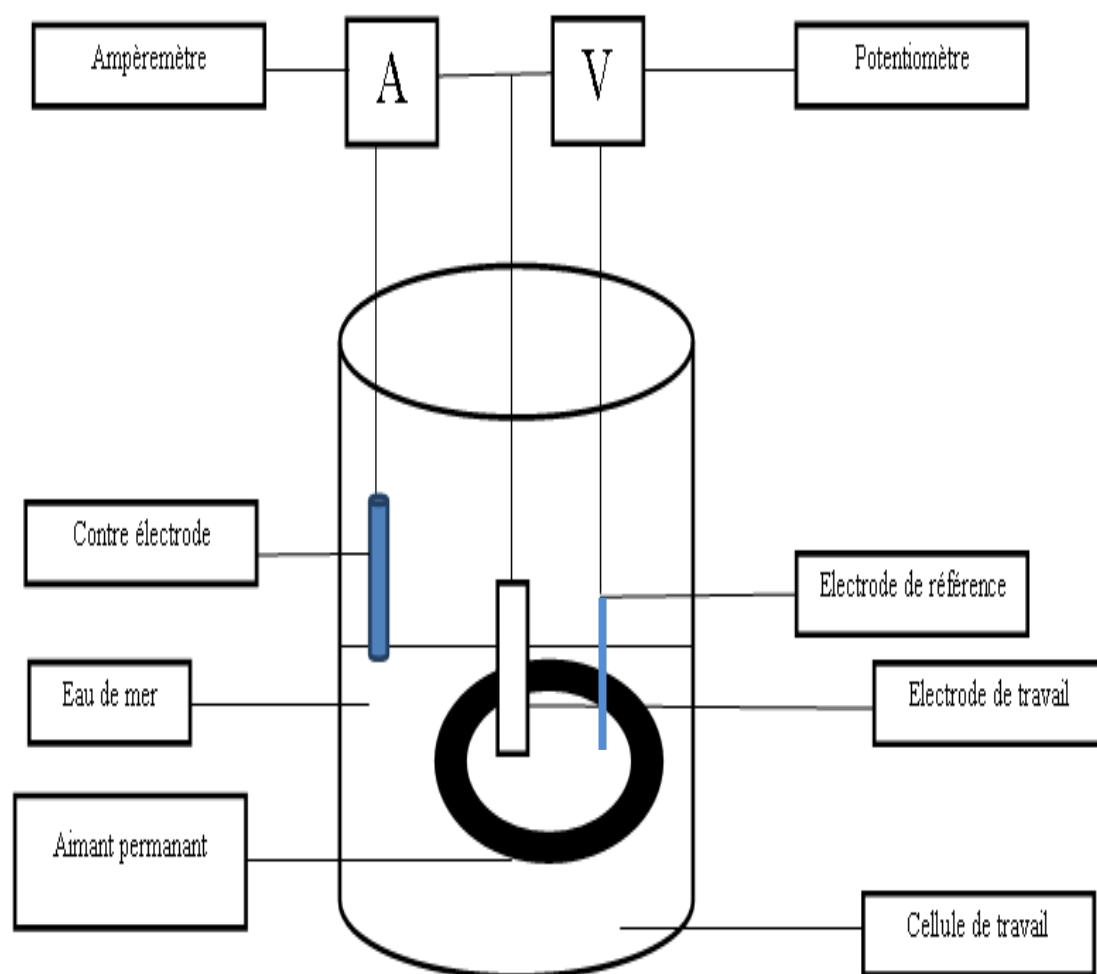


Figure III.8 : Dispositif de mesures électrochimique

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

La plus part des métaux s'oxydent en présence de l'oxygène de l'air avec des cinétiques relativement lentes en présence d'air sec. La corrosion électrochimique est accélérée en présence d'humidité et des chlorures, en particulier dans les zones d'hétérogénéités.

Pour cette raison dans cette étude nous avons effleuré un phénomène du bruit électrochimique, du courant et du potentiel, au début de la corrosion libre en présence et en absence du champ magnétique permanent, ce phénomène est peu étudié en électrochimie et nous avons aussi étudié la morphologie et la cinétique de corrosion libre en présence et en absence d'un champ magnétique permanent de l'alliage AA5083-H321 en milieu de chlorure.

IV.I EXAMENS MICROSCOPIQUES :

IV.I.1 EXAMEN AU MICROSCOPE OPTIQUE AVANT CORROSION DANS L'EAU DE MER :

Les échantillons ont été enrobés à froid dans une résine sous forme de pate (pate ABRO) et subis un polissage mécanique pour l'observation au microscope optique.

La Figure IV.1 représente la microstructure sans attaque, prise par microscopie optique, de la surface du laminage et la surface perpendiculaire au laminage, de l'alliage AA5083-H321 ayant subi en plus du des traitements thermomécaniques, traitement de stabilisation dans l'industrie et un recuit d'homogénéisation dans le laboratoire, un traitement mécanique par le laminage à froid d'un taux de réduction de 92%.

1. La figure (IV 1.a.) représente la vue de profile de la surface du laminage, cette figure montre la couche externe de la surface du laminage. Sur cette figure nous observons un détachement d'une couche du métal ou bien formation de cloques ou de feuillets, ce phénomène représente la corrosion feuilletante. Celle-ci est une forme de corrosion qui concerne certains alliages d'aluminium corroyés et présentant une texture fibrée. Les alliages ayant subi un laminage ou un filage par exemple présentent une structure granulaire orientée et sont sensibles à ce type de corrosion. La corrosion feuilletante, ou exfoliante, se rencontre principalement dans les alliages des séries 2000, 5000 et 7000. Cette forme de corrosion se propage dans une multitude de plans parallèles à la surface et à la direction de laminage. Ces plans corrodés sont séparés par des feuillets de métal non attaqués qui sont repoussés par précipitation des produits de corrosion. En effet, les produits de corrosion occupant un volume supérieur au volume du métal consommé, ils

engendrent une pression sur les feuillets de métal intact causant ainsi la formation de cloques ou de feuillets (Figure IV.2).

Les sous Figures (IV.b-c) représentent la microstructure du plan perpendiculaire au plan du laminage de l'échantillon non attaqué, nous observons sur cette figure une présence de fins précipités sombres et de fins précipités clairs distribués d'une façon homogènes sur la surface de l'échantillon (Figure IV.3 b-c), (Figure IV.4 E).

La figure (d) représente la microstructure de l'échantillon sur le plan du laminage. Sur cette figure nous observons des précipités sombres et clairs distribués d'une façon hétérogène, de dimension variable et allongée dans une direction, cette distribution induit une d'anisotropie des propriétés mécanique et chimique (Figure IV.3 a), (Figure IV.4.L).

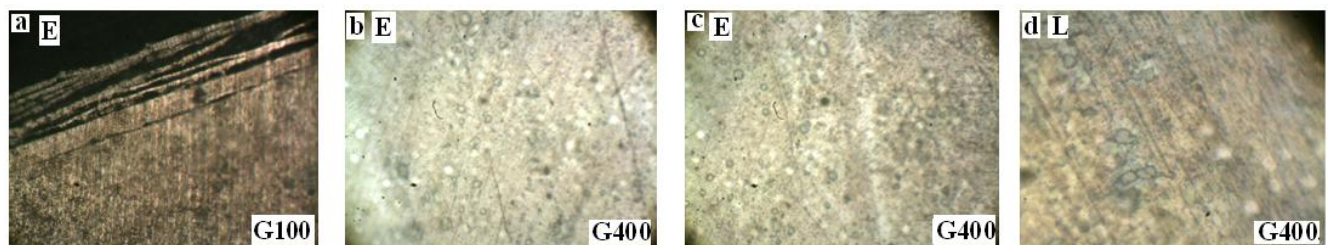
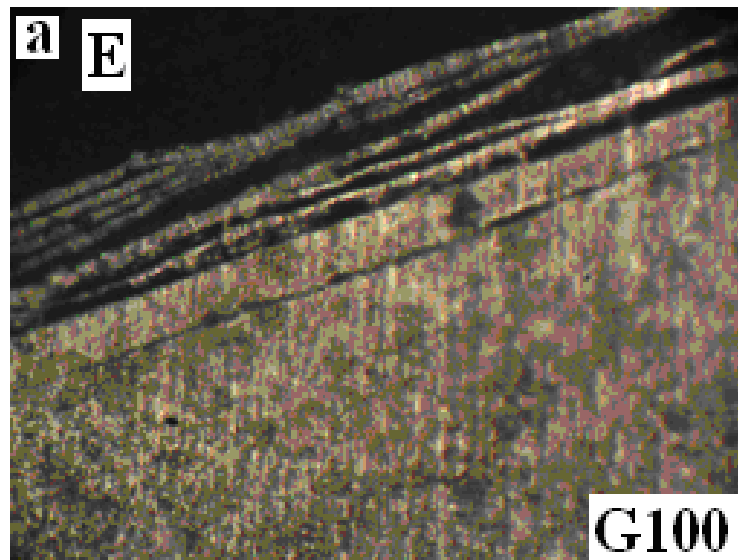


Figure IV.1 Surface de l'échantillon dans la direction du laminage



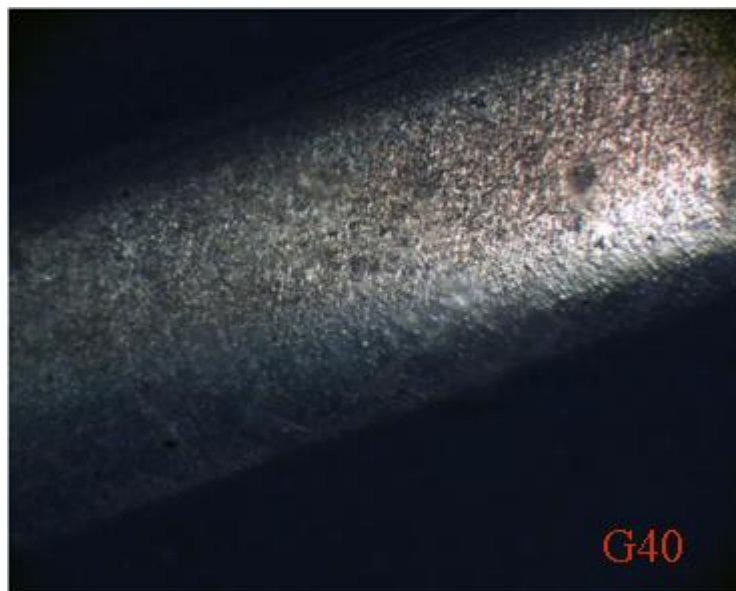


Figure IV.2 : phénomène de la corrosion feuilletante

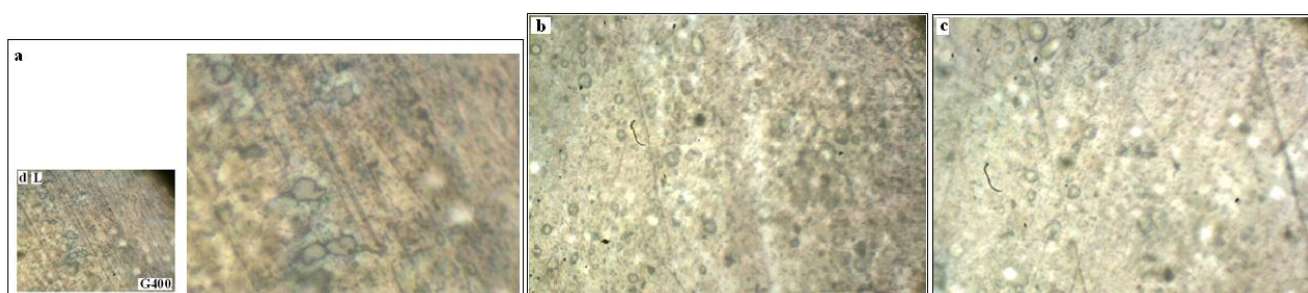


Figure IV.3 : a) effet loupe de la Figure IV.I.d, b) effet loupe de la Figure IV.(c) et la figure IV.1(d)

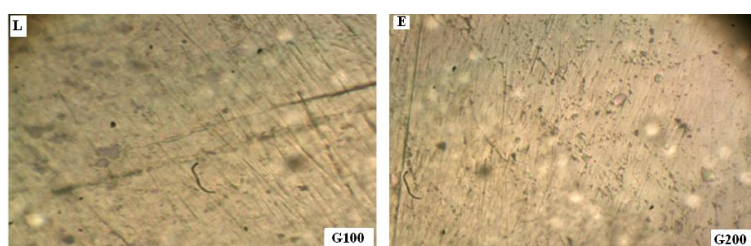


Figure IV.4 : taille des précipités sur : le plan du laminage (L), le plan perpendiculaire au laminage (E)

IV.1-2 EXAMEN AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE AVANT CORROSION DANS L'EAU DE MER :

Nous avons utilisé le microscope électronique à balayage comme outil de caractérisation de la microstructure notamment pour l'observation des intermétalliques avant et après corrosion.

L'observation des intermétalliques ont été réalisées en utilisant le contraste de phases, obtenu en électrons rétrodiffusés.

Des observations au MEB en électrons rétrodiffusés en contraste chimique, font apparaître deux familles d'intermétalliques présentes dans l'alliage.

Plusieurs auteurs ayant travaillé sur cet alliage ont analysés par EDX les deux types de particules, ils ont déterminés que les parties blanches sur la figure correspondent à la phase Al-Fe-Cr, et les particules en gris foncé correspondent à la phase Mg_2Si . La (Figure IV.5). L'observation au microscope électronique à balayage confirme ce qui à été déjà observé au microscope optique, c'est-à-dire que sur le plan perpendiculaire au laminage les particules intermétalliques sont fines et distribués d'une façon homogène, par contre sur le plan du laminage nous avons observé une distribution hétérogènes des particules intermétalliques à la surface, en plus elles ont des dimensions variables en fonction de la position.

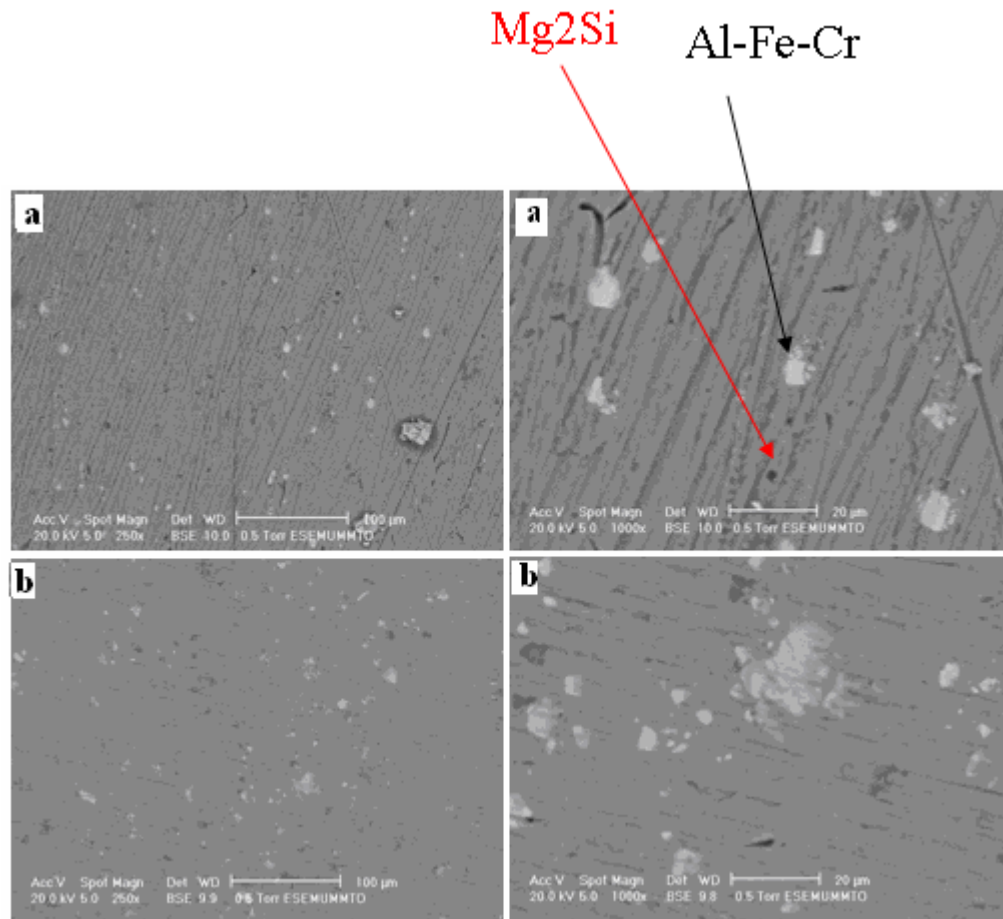


Figure IV.5 : Image au MEB : (a) plan du laminage, (b) plan perpendiculaire au laminage

IV.I.3 EXAMEN AU MICROSCOPE OPTIQUE APRES 72 HEURES DE CORROSION DANS L'EAU DE MER :

Rappelons d'abord que la corrosion de nos échantillons s'est déroulée dans la solution de NaCl. De ce fait, les Figures IV.(7-8) montrent l'effet crucial de l'attaque du chlore sur la surface de l'échantillon. La destruction de la couche protectrice et la mise à nu ouvre le chemin pour l'oxydation par l'oxygène. Il est probable aussi que la présence de l'ion du chlore ou son adsorption affecte les propriétés électroniques et ioniques du film passif. Il est bien connu que les ions du chlore brisent localement la couche passive. Nous avons remarqué sur la (figure IV.8), que la corrosion localisée prend naissance aux défauts de la couche d'oxyde (tel que le contour des particules intermétalliques). Nous pensons que la propagation électrochimique de la corrosion en profondeur est due à la solution acide du chlorure d'aluminium qui se forme au début de la corrosion et qui empêche la repassivation et fait propager la corrosion d'une façon autocatalytique.

L'observation au microscope optique de la morphologie de corrosion, après immersion dans l'eau de mer de la surface du laminage, a montré que l'échantillon a subi une corrosion localisée. Cette corrosion est plus importante dans certaines régions (Figure IV.6, 7), ceci est la conséquence de ce que nous avons observé au microscope optique et à balayage avant corrosion concernant la variation de la taille des particules intermétalliques en fonction de la position.

L'observation au microscope électronique à balayage a montré que la corrosion opère surtout au tour des particules intermétallique (Figure IV.8).

La connaissance incomplète de la composition des entités microstructurales particules intermétalliques reste un frein à la compréhension et l'explication des mécanismes de la corrosion localisée de cet alliage.

Les effets des électrolytes peuvent être expliqués en termes d'influences d'éléments d'alliages et de l'agressivité de la solution sur le film passif et le potentiel de piqûres.

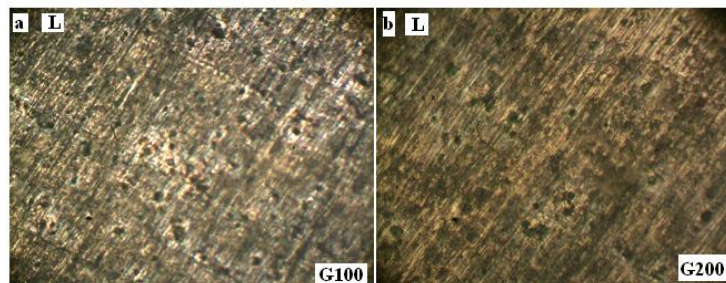


Figure IV.6 : Surface du plan de laminage après 72 heures de corrosion

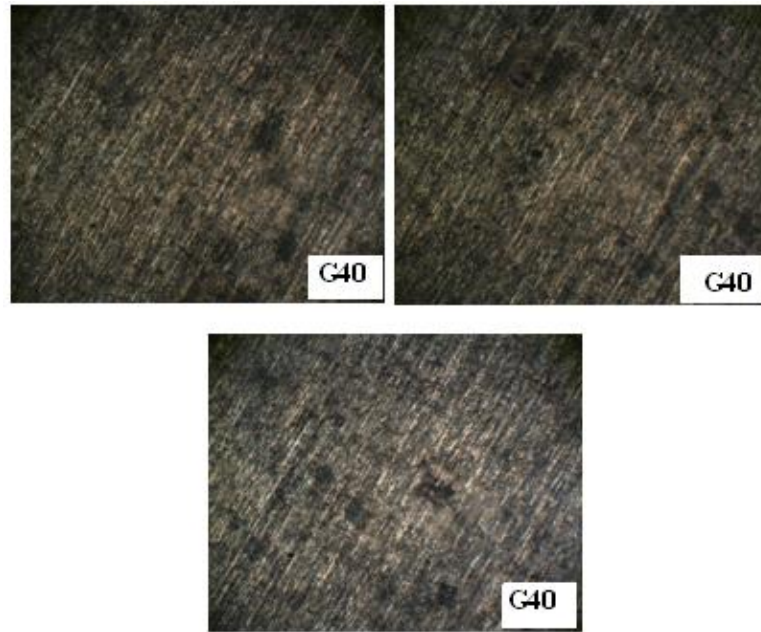


Figure IV.7 : Surface du plan de laminage après 72 heures de corrosion

V.I.4 EXAMEN AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE APRES 72 HEURES DE CORROSION DANS L'EAU DE MER :

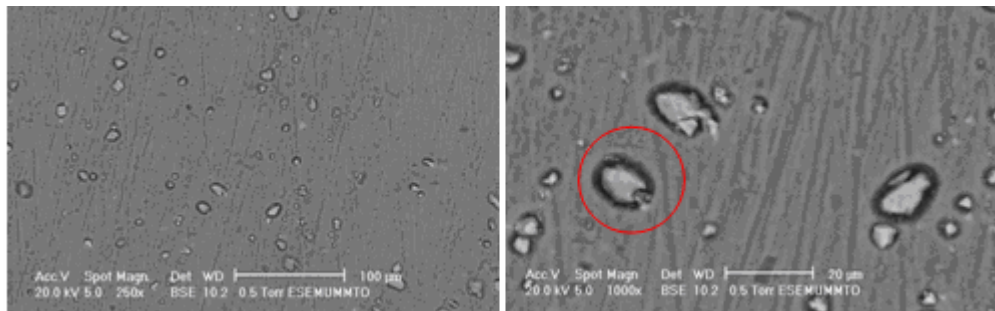


Figure IV.8 : Image MEB de la surface du plan de laminage après 72 heures de corrosion dans une solution de 0.3% Na Cl.

IV.I.4.1 EXAMEN DE LA CINETIQUE DE CORROSION DANS L'EAU DE MER :

- **BRUIT ELECTROCHIMIQUE :**

Il est généralement admis que le bruit électrochimique est constitué de l'ensemble des fluctuations de courant ou de potentiel générées par l'interface métal/électrolyte. Le terme de bruit électrochimique doit son nom de « bruit » à l'allure souvent aléatoire du signal, et au fait qu'il a été longtemps impossible de distinguer dans ce signal les composantes dues aux phénomènes électrochimiques d'une part et dues au bruit instrumental d'autre part. Mais ce qui est sûr c'est que le

bruit dû à l'instrumentation ne dépasse pas 5 mV. Le bruit électrochimique est une technique novatrice dans la façon d'étudier les phénomènes physico-chimiques. Il permet en effet, de conduire soit une étude en gardant le niveau énergétique de l'interface constant, soit une étude des phénomènes à l'interface sans jamais perturber le système. L'utilisation de théories récentes de traitement du signal permet, par le biais du bruit électrochimique, d'étudier des phénomènes très discrets et instables, tels que l'amorçage de la corrosion, les phénomènes de corrosion métastables et les transitions entre piqûre métastable et perforante.

a) ABSENCE DU CHAMP :

Dans notre travail nous avons analysé le bruit électrochimique uniquement au début de la corrosion pour voir ce que ça nous renseigne sur l'amorçement de la corrosion.

La figure IV.9 représente le potentiel de corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 dans l'eau de mer en absence du champ magnétique. Au début de la corrosion, à la première minute, nous avons enregistré des mesures chaque 10 secondes, ceci nous a permis d'examiner le bruit électrochimique au début de la corrosion, par la suite nous avons enregistré une mesure chaque heure, pour voir l'évolution du potentiel de corrosion au cours du temps.

Les résultats obtenus montrent qu'au début à la première minute de la corrosion les valeurs du potentiel de corrosion varient d'une façon remarquable chaque 10 secondes. Cette variation représente un bruit électrochimique puisque l'amplitude de la variation, du potentiel de la corrosion libre est de l'ordre de **50mV** (figure IV.9 (a, b, c)). Ceci indique qu'une corrosion localisée s'est amorcée à la surface de l'échantillon.

Les premières secondes d'immersion le potentiel de la corrosion prend une valeur élevée de -550mV, après quelques minutes la valeur de celui-ci chute jusqu'à -780mV, par la suite elle augmente graduellement et lentement jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de -600 mV après 72 d'immersion. L'allure de la courbe montre que l'alliage se dirige vers un état passif (Figure IV.9a). Une courbe similaire a été enregistrée sur un autre échantillon prélevé d'une autre position de la tôle, dans la même direction que le premier, donne une même réponse. Ceci dit le potentiel de la corrosion libre en absence d'un champ magnétique est un paramètre constant. Ceci peut être expliqué comme suit, un échantillon d'une surface de 1 Cm² est un échantillon homogène à l'échelle macroscopique mais hétérogène à l'échelle microscopique.

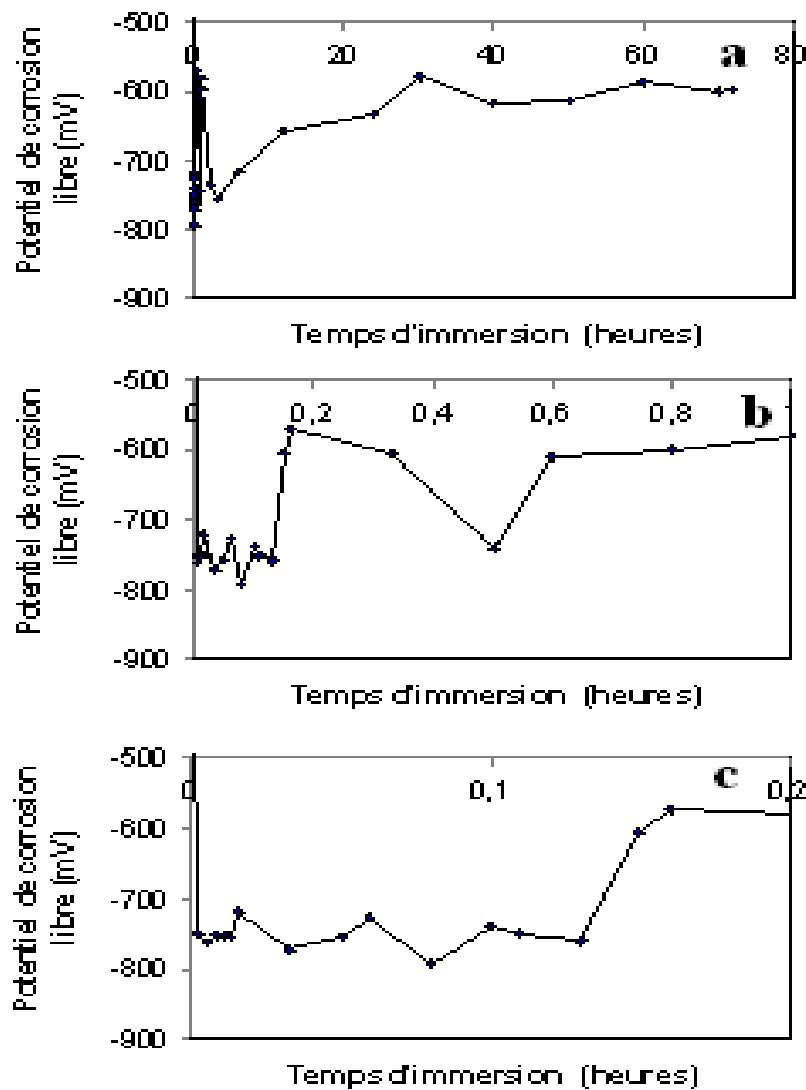


Figure IV.9 : Potentiel de corrosion libre de l'alliage d'aluminium AA5083-H321 durant :(a) 72 heures, (b) 0.9 heure, (c) et 0.2 heure de corrosion.

(La figure IV.10) montre la densité du courant de la corrosion libre. Sur cette figure nous nous n'observons pas un bruit électrochimique et début de la corrosion. Ceci peut être dû à la valeur élevée du pas (10 secondes).

Au début de la corrosion le courant de corrosion à une valeur de $165 \mu\text{A}$ et puis il diminué rapidement à la valeur de $50 \mu\text{A}$ après cela la densité de courant de corrosion libre augmente légèrement jusqu'à $70 \mu\text{A}$ après 72 heures de corrosion et converge vers le régime passive (La Figure IV.10 (a, b, c, d).

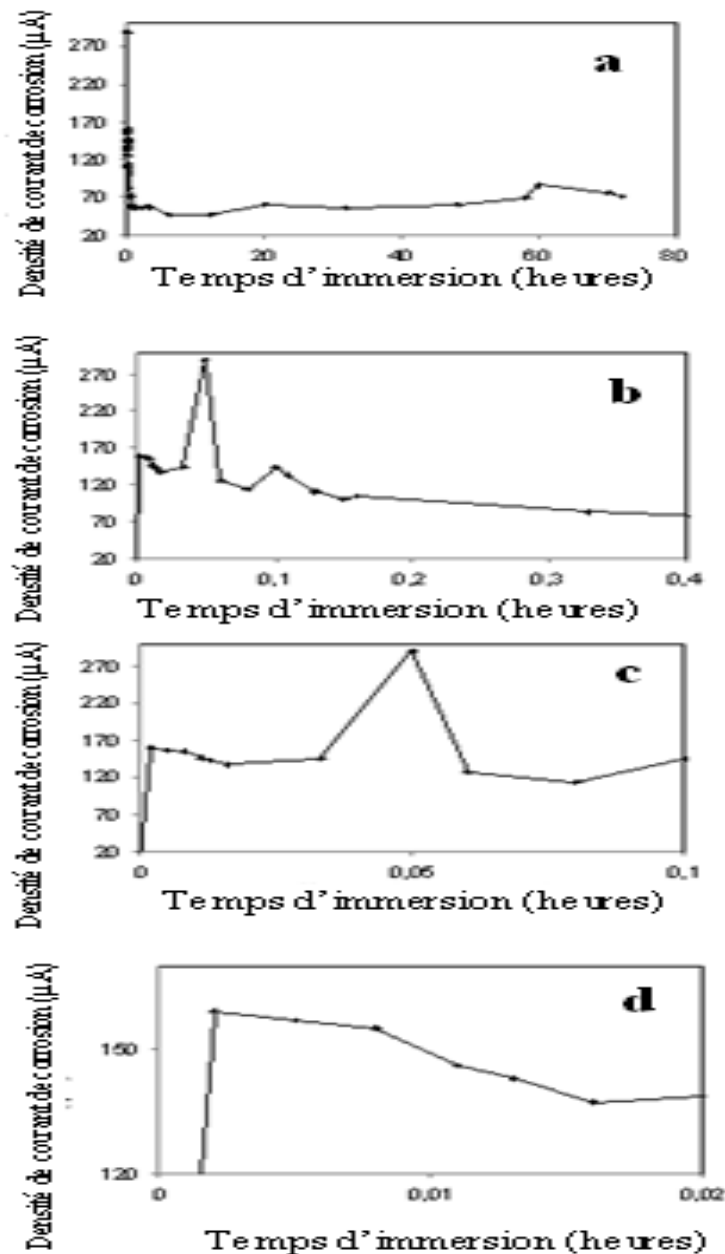
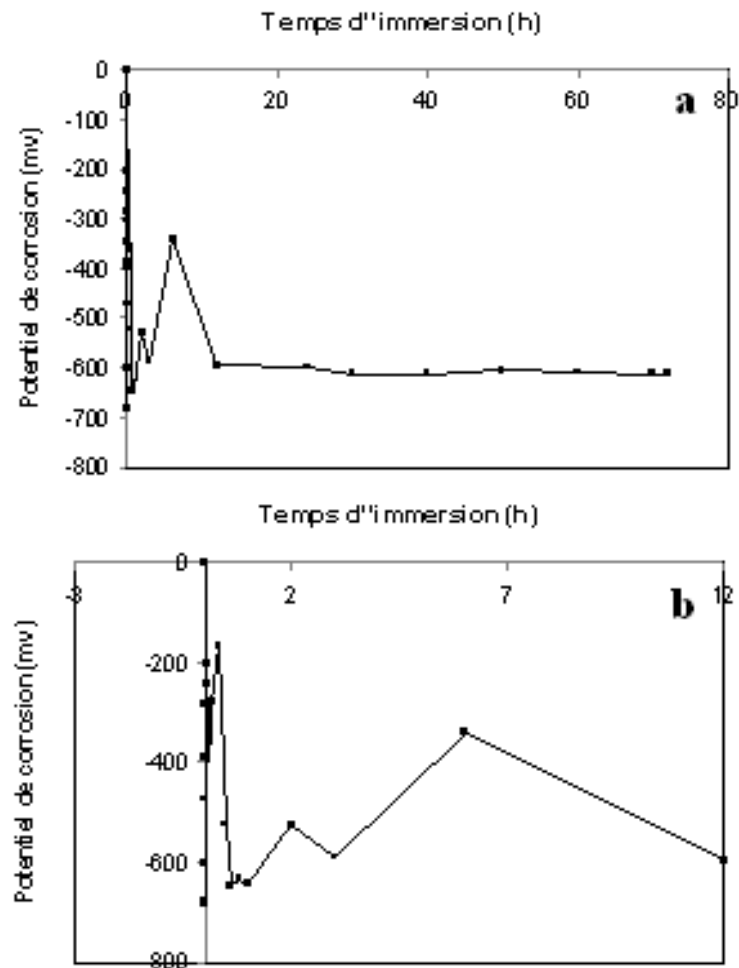


Figure IV.10 : Densité du courant de corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 durant : (a) 72 heures, (b) 0.4 heure, (c) 0.1 heure et (d) 0.02 de corrosion.

b) PRESENCE DU CHAMP :

La même expérience a été refaite dans les mêmes conditions sauf qu'un champ magnétique permanent de (42mT) a été imposé. La courbe donnée par la Figure IV.11, montre que la présence du champ magnétique modifié les valeurs et l'allure de la courbe du potentiel de corrosion libre. La valeur du potentiel de la corrosion libre est plus élevée au début (-200mV). La valeur du potentiel de la corrosion libre chute de jusqu'à -680 dès les premières minutes de corrosion, puis augmente jusqu'à -320 mV et enfin diminue jusqu'à -600mV (Figure IV.10).

L'amplitude du bruit électrochimique du potentiel de corrosion libre au début de la corrosion en présence du champ magnétique est égale à celui en l'absence du champ magnétique (Figure IV.11). Ceci indique que la présence du champ magnétique n'influence pas le bruit électrochimique au début de la corrosion, c'est-à-dire il ne modifie pas le potentiel au début de la corrosion localisée.



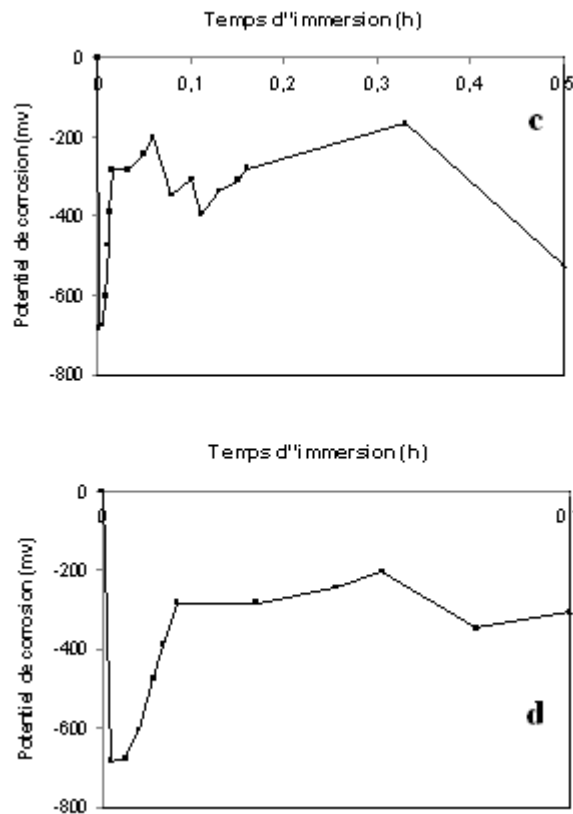


Figure IV.11 : Potentiel de la corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 en présence d'un champ magnétique permanent de l'alliage AA5083-H321 durant : (a) 80 heures, (b) 12 heure, (c) 0.5 heure et (d) 0.1 de corrosion.

(La figure IV.12) montre que le potentiel de la corrosion libre en présence d'un champ magnétique permanent de l'échantillon découpé dans la direction du laminage et différent du potentiel de la corrosion libre de l'échantillon découpé dans la direction transversale au laminage. Ceci prouve que les propriétés chimiques du matériau sont variables en fonction de la direction de prélèvement. Les grains de la phase mère sont allongés dans la direction du laminage, les particules intermétalliques sont fragmentés et ont une concentration élevée dans la direction du laminage. Ceci induit un écrouissage dans la direction du laminage. et le matériau devient anisotrope.

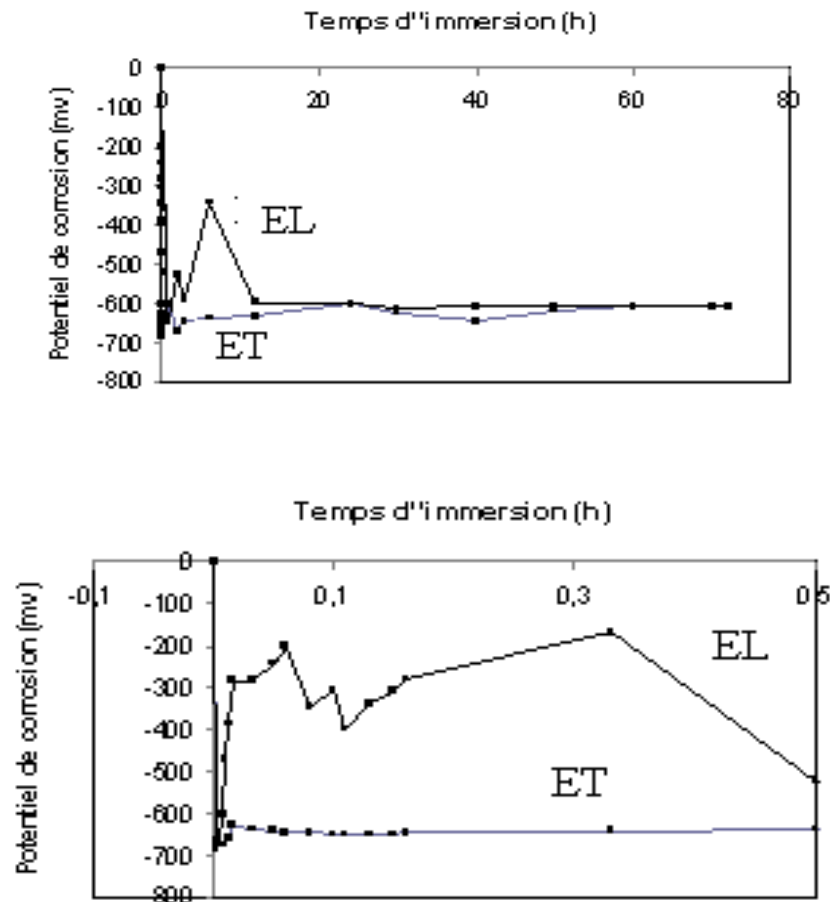


Figure IV.12: Potentiel de la corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 en présence d'un champ magnétique permanent comparaison entre l'échantillon dans la direction du laminage et l'échantillon dans la direction transversale au laminage.

Le courant de corrosion libre en présence d'un champ magnétique permanent imposé diminue brusquement à partir de $250\mu\text{A}$ au début de la corrosion et puis se stabilise à $700\mu\text{A}$. il est différent du courant de la corrosion libre en absence du champ magnétique permanent (Figure IV.13).

Ceci dit l'introduction du champ magnétique modifie l'allure et les valeurs du potentiel et du courant de corrosion libre. Ce changement peut être attribué à la présence de certains éléments magnétiques dans la composition de l'alliage, tels que le fer.

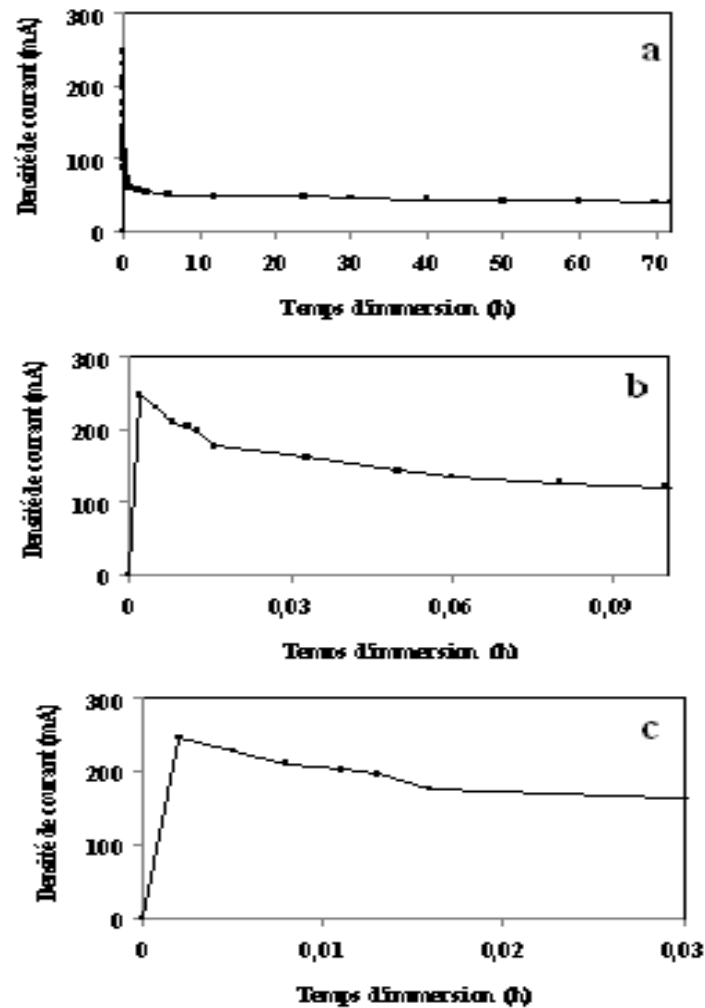


Figure IV.13 : Densité de courant de corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 en présence d'un champ magnétique permanent durant :(a) 72 heures, (b) 0.09 heure, (c) et 0.3 heure de corrosion.

(La Figure IV.14) montre que le courant de la corrosion libre en présence d'un champ magnétique permanent de l'échantillon découpé dans la direction du laminage et différent courant de corrosion libre de l'échantillon découpé dans la direction transversale au laminage. Ceci dit le laminage induit une anisotropie des propriétés mécaniques. Celle –ci induit à son tour une anisotropie des propriétés chimiques.

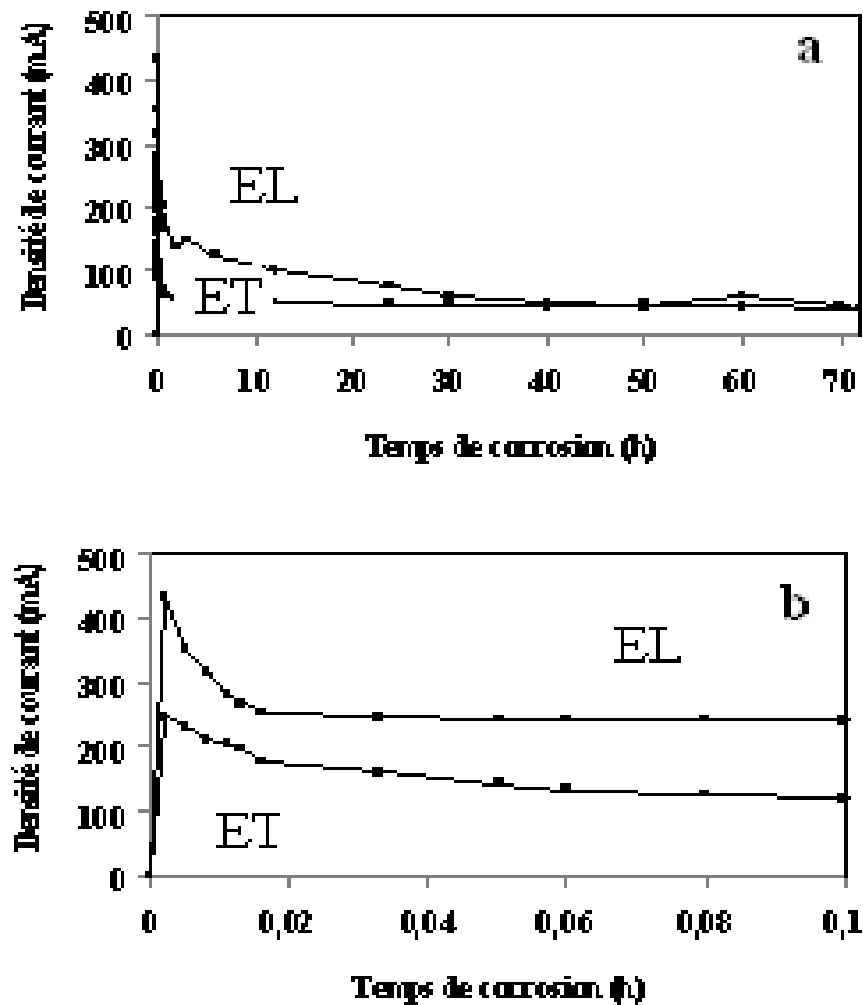
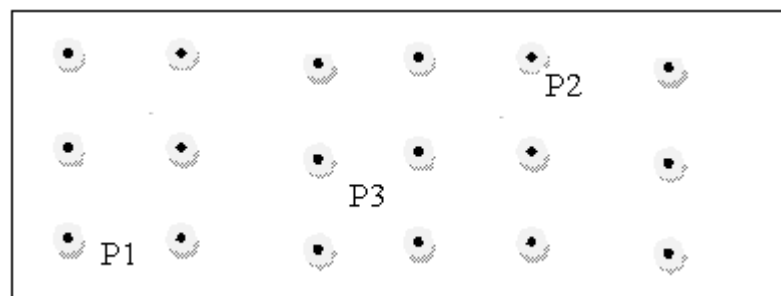


Figure IV.14 : Courant de la corrosion libre de l'alliage AA5083-H321 durant : en présence d'un champ magnétique permanent comparaison entre l'échantillon prélevé dans la direction du laminage et l'échantillon prélevé dans la direction transversale, (a) 72heures de corrosion, (b) durant 0.1 heures de corrosion :

IV.I.5. DURETE DU MATERIAU :

La dureté est le premier indice qui nous renseigne sur de l'état et l'anisotropie de contraintes résiduelles à la surface, le tableau (Tableau IV.1) montre que la Microdureté Vickers de l'alliage AA5083-H321 varie d'une position à une autre de ce fait l'état de contraintes résiduelles varie en fonction de la position, donc la composition en phase de l'alliage varie d'une position à une autre et l'alliage est considéré étant hétérogène. L'hétérogénéité de la composition en phases induit une hétérogénéité de la morphologie de la corrosion.



Dureté Position	Position 1	Position 2	Position 3
Microdureté Vickers 0,1	150	152	154

Tableau IV.1 : Dureté de l'alliage (AA5083-H 321) dans différent positions

CONCLUSION

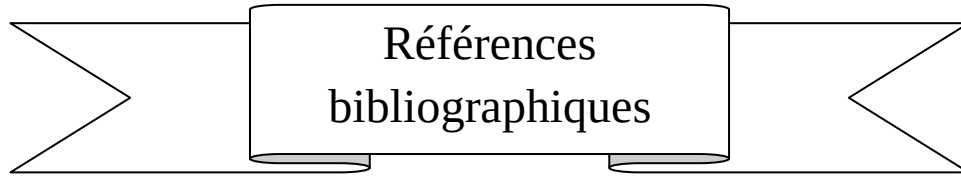
L'objectif principal de cette thèse concernait une étude comparative du comportement de la corrosion de l'alliage d'aluminium 5083 en présence et en absence du champ magnétique à l'aide de mesures électrochimiques (courbes de variation de potentiel et du de courant) et cela au cours d'immersion dans l'eau de mer.

La revue bibliographique confirme aussi l'intérêt de faire appel aux analyses microscopique (microscope optique et microscope électronique à balayage) pour l'étude de la corrosion du matériau avant et après l'immersion dans une solution de Na Cl, ainsi à la technique expérimentales récente, le bruit électrochimique.

Si l'on reprend le cheminement suivi au cours de ces travaux de thèse, les principales conclusions sont les suivantes :

1. Nous avons observé sur l'alliage étudié la formation de cloques ou de feuillets, ce phénomène est dû à la corrosion feuilletante induite par le laminage à froid à froid d'un fort taux de réduction.
2. l'alliage est constitué de fins précipitées sombres de la phase Mg_2Si et de fins précipités clairs de la phase Al-Fe-Cr distribués d'une façon homogènes sur la surface perpendiculaire au laminage et d'une façon hétérogène sur la surface du laminage.
3. Après immersion dans l'eau de mer la surface du laminage de l'échantillon, celui-ci a subi une corrosion localisée de variable intensité en fonction de la zone d'observation.

4. Au début à la première minute de la corrosion libre en absence du champ magnétique, les valeurs du potentiel de corrosion varient d'une façon remarquable chaque 10 secondes. Cette variation représente un bruit électrochimique.
5. Au début à la première minute de la corrosion libre en présence du champ magnétique, les valeurs du potentiel de corrosion varient d'une façon remarquable chaque 10 secondes. Cette variation représente un bruit électrochimique.
6. Sur les courbes de courant de corrosion nous n'observons pas un bruit électrochimique et début de la corrosion. Ceci peut être dû à la valeur élevée du pas (10 secondes).
7. la présence du champ magnétique modifié les valeurs et l'allure de la courbe du potentiel et du courant de la corrosion libre.
8. une journée de corrosion libre en présence et en absence du champ semble ramener l'alliage vers la passivation.



Références bibliographiques

- [1] : D. Beaulieu : Les caractéristiques de l'aluminium structural. Les presses de l'université, Laval 2002.
- [2] : J. Baralis & G. Maeder : Précis métallurgie, Nathan, Paris, 1997.
- [3] : La corrosion des structures métalliques en mer: types et zones de dégradations (Brahim Benaïssa)
- [4] : C.Vargel : Le comportement de l'aluminium et ses alliages.
- [5] : Etude par spectroscopies d'impédance électrochimique globale et locale d'une monocouche hybride organique –inorganique respectueuse de l'environnement pour la protection contre la corrosion de l'alliage d'aluminium 2024 [Sylvain AMAND]
- [6] : J.-P. Baillon & J. M. Dorlor : Des Matériaux.
- [7] : R. Develay : Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur, Traité Matériaux métalliques, M1290-1, 2001.
- [8] : Comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisés dans l'industrie automobile pour la fabrication de radiateur de chauffage [Elena Luminița DIN – ȘTIRBU]
- [9]: Etude comparative du comportement électrochimique des alliages d'aluminium 2024 T351 et 7075 T7351 en milieu neutre de sulfate de sodium [Wolfgang José PRIETO YESPICA].
- [10] : DEVELOPPEMENT DE METHODES STATISTIQUES ET PROBABILISTES EN CORROSION PAR PIQUES POUR L'ESTIMATION DE LA PROFONDEUR MAXIMALE : APPLICATION A L'ALUMINIUM A5 Adil JARRAH (le 8 décembre 2009)
- [11] : Etude et contrôle de la corrosion feuilletante des alliages d'aluminium 2024 et 7449 par bruit électrochimique émission acoustique .Analyse microstructurale et caractérisation de l'endommagement. [FABIEN BELLEGER].