

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

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Mémoire de fin d'étude
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
Métallurgie

Thème

**COMPORTEMENT A LA CORROSION DE
L'ALLIAGE D'ALUMINIUM 2024 DANS UN MILIEU
ACIDE APRES ECROUISSAGE ET TRAITEMENTS
THERMIQUES**

Proposé et encadré par :

Dr. Yousfi Hamid

Réalisé par :

TOUATI Adel

Promotion: Juin 2011

Remerciment

Qu'il me soit permis de remercier et d'exprimer ma profonde gratitude en premier lieu à Dieu le Tout Puissant de m'avoir créé et donné toute la force nécessaire pour accomplir ce modeste travail ainsi qu'à mes Parents qui me sont les plus chers au monde.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur M. H. YOUSFI pour ses conseils, qui m'ont été précieux, ainsi que pour toutes les suggestions et remarques qu'ils ont formulées tout au long de ce travail

Que Mr le président de jury, trouve ici mes remerciements pour m'avoir fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie par anticipation, monsieur le président de jury M. LARRIBI ainsi que tous les membres du jury à savoir, M. SALHI, et M. KASSER d'avoir bien voulu siéger dans mon juré.

Je souhaiterai également remercier tous mes enseignants du département de métallurgie de l'ENP, pour avoir participé à ma formation.

Mes remerciements s'adressent également à mes amis en particulier:

Ilyes ZEKRAOUIO.

Cette liste de remerciements n'est pas exhaustive, que tous ceux avec lesquels j'ai interagi lors de ce travail, sans toutefois les citer ci-dessus, sachent que leur contribution à la réalisation de ce mémoire a été grandement appréciée.

Adel

ملخص:

با الرغم من نقاط قوته كالخفة ومقاومة التآكسد بعد الألمنيوم وخالنطه من المواد المستعملة بكثرة في عدة مجالات كاطيران يمثل عدة عوائق مثل ضعف الميزات الميكانيكية.

هذه الدراسة المقامة في اطار مشروع اختتام دراسة مهندس تثمئل في تعريف شامل للالمنيوم و خلائطه و في دراسة مجهرية وحساب الصلابة المجهرية بهدف زيادة خصائصه الميكانيكية بطريقة التقوية النسيجية و كذا تحليل نوعين من الاكسدة

الكلمات المف تادية :

الألمنيوم وخالنطه، ملاحظات مجهرية ، قياس الصلابة، التصلب النسيجي بالترسب، الصدأ المحلي.

Résumé:

Malgré leurs atouts comme la légèreté et la tenue à la corrosion l'aluminium et ses alliages largement utilisés dans divers domaines notamment l'aéronautique présentent des inconvénients telle que les propriétés mécaniques faibles.

Ce mémoire de PFE consistera à une présentation générale de l'aluminium et ses alliages, puis une étude microscopique ainsi que la mesure de microdureté. à fin de comprendre l'augmentation de leurs propriétés mécaniques par durcissement structural, ainsi que mettre en évidence deux types de corrosion localisées : la corrosion par pique et la corrosion intergranulaire .

Mots clés:

Aluminium et ses alliages, observation micrographique, mesure de micodureté, durcissement structural par précipitation, corrosion localisée.

Abstract:

Although its strenghts such as lightness and resistance to corosion, the aluminium and its alloy massively used in various area, aeronautique for instanct, present a lot of weakness such as feeble mechanical proprieties.

This study witch is an acadimic one is a général presentation of aluminium and its alloy and also a microscopique study with a mesure of micro-hardness in order to raise its mechanical proprieties by structural hardness,and also to exhibit two type of corrosion: sting corrosion and intergranular corrosion.

Key words:

Aluminium and it's alloys, microscopic observation, microhardeness muserement, structural hardening with precipitation, localized corrosion.

Sommaire

Introduction générale	1
I.1.L'aluminium et ses alliages	3
I.1.1. L'aluminium pur	3
I.1.2. Les atouts de l'aluminium	3
I.1.2.1. La légèreté.....	4
I.1.2.2. La tenue a la corrosion	4
I.1.2.3. Aptitude aux traitements de surface	5
I.1.2.4. Diversité des alliages d'aluminium	5
I.1.2.5. Une bonne conductivité électrique et thermique :	5
I.1.2.6. Recyclage.....	5
I.1.3. Propriétés physique et mécanique de l'aluminium :	6
I.2. Les alliages d'aluminium	7
I.2.1. Catégories d'alliages d'aluminium	7
I.2.2. Influence des éléments d'addition sur les propriétés de l'aluminium	9
I.2.3 Désignation des alliages d'aluminium.....	9
I.2.4.Propriétés des alliages d'aluminium.....	12
I.3. Traitements thermiques des alliages d'aluminium	13
I.3 .1.Principaux types de traitements thermiques	13
I.3 .1.1.Traitements thermiques d'homogénéisation	14
I.3.1.2.Traitements d'adoucissement par recuit ou restauration.....	14
I.3 .1.3.Traitements de recuit de recristallisation	14
I.3 .1.4.Traitements de recuit de coalescence (ou recuit de précipitation)	15
I.3 .1.5.Traitement de durcissement structural	15
II.1. Alliage d'aluminium de la famille 2000 :	16
II.2. Durcissement structural par précipitation	17
II.2.1. Découverte et évolution de la technique	17
II. 2.2. Définition.....	18
II.2. 3. Le principe du durcissement structural	19
II. 2.3.1. La mise en solution	19
II. 2.3.2. La trempe.....	20
II.2.3.3. La maturation.....	20
II.2. 3.4. Le revenu	21
II.3. Mécanismes de durcissement.....	23

II.3.1. Contournement des précipités	23
II .3. 2. Cisaillement des précipités.....	24
III.1. Définition de la corrosion	25
III.2. Facteurs de la corrosion.....	25
III.2.1. Facteurs liés au milieu	25
III.2. 2. Facteurs métallurgiques.....	26
III.2.3. Facteurs liés aux conditions d'emploi.....	29
III.3. Notion électrochimiques de la corrosion de l'aluminium et ses alliages.....	29
III.3.1. Circonstances théorique de corrosion	29
III.3.2. L'aluminium métal passif.....	31
III.4. Les formes de corrosion de l'aluminium et de ses alliages	31
III.4.1. Corrosion uniforme (généralisée)	32
III.4.2. corrosion localisée	32
III.4.2.1. La corrosion galvanique	32
III.4.2.2. La corrosion par piqûres	33
III.4.2.3. La corrosion intergranulaire.....	33
III.4.2.4. La corrosion exfoliante (feuilletante).....	34
III.4.2.5. La corrosion sous contrainte	34
III.5. Protections contre la corrosion	34
III.5.1. Les traitement de conversion chimique	35
III.5.2. Les traitement d'anodisation.....	36
III.5.3. La peinture et les revêtements organiques	37
III.5.4. Placage	37
III.5.4. La protection cathodique	37
IV.1. But de travail.....	39
IV.2. Matériau de l'étude	39
IV.4. Equipements et caractérisation	40
IV.4.1. Four à résistance.....	40
IV.4.2. Polisseuse.....	40
IV.4.3. Microdurometre.....	41
IV.4.4. Microscope optique	42
IV.5. Manipulation	45
IV.5.1. Traitements thermiques	45
IV.5. Observation micrographique	46
IV.6. Mesures de la microdureté	48

IV .7. Observation de la corrosio.....	48
V.1. Homogénéisation.....	49
V.2. Effet du traitement mécanique (déformation plastique).....	49
V .3. Traitement de recristallisation	51
V.4. Traitments thermiques de revenu.....	53
V.4. 1. Effet de laminage.....	53
V.4. 2. Courbes isothermes.....	55
V.5. Courbes isochrones.....	58
V.6. Micrographie des precipetés d'équilibres	59
V.4. Corrosion.....	61
V.4.1. Corrosion par pique.....	62
V.4.1.1 Mécanisme de la piquation.....	62
V.4.1.2. Résultats :.....	64
V.4.1.3. Remèdes :.....	65
V.4.2. Corrosion intergranulaire.....	65
V.4.2.1. mécanisme.....	65
V.4.2.2.Remèdes.....	65
Conclusion générale	70

Liste des figures

Partie bibliographique

Figure 1 : La forme cristalline de l'Aluminium [2].	3
Figure 2 : Production mondial de l'aluminium [4].	4
Figure 3 : diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu montrant la limite de solubilité et les domaines de précipitation des zones GP et les phases Θ'' , Θ' et Θ ($=\text{Al}_2\text{Cu}$) [10].	19
Figure 4: Schéma représentatif du diagramme Al-Cu [9].	19
Figure 5 : Solution solide de substitution α [9].	20
Figure 6 : Zone de Guinier-Preston [9].	21
Figure 7 : Zones de G.P. parallèles au plan (100) [9].	21
Figure 8 : précipité cohérent avec la matrice [9].	22
Figure 9 : précipité semi-cohérent avec la matrice [9].	22
Figure 10 : précipité incohérent avec la matrice [9].	23
Figure 11 : Interaction d'une dislocation avec des particules dures (contournement). [12]	24
Figure 12 : Interaction d'une dislocation avec des précipités cohérents et cisailable. [12]	24
Figure 13 : Evolution de la dureté en fonction du temps de revenu à 130 et 190 °C pour l'alliage Al-Cu [12].	25
Figure 14 : Corrosion d'un supporte moteur en alliage d'aluminium [5].	25
Figure 15 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium [5].	27
Figure 16 : Susceptibilité à la corrosion intercrystalline d'un 2024 en fonction des conditions de revenu [6].	28
Figure 17 : Diagramme de Pourbaix du système Al-H ₂ O dans les cas d'une passivation par l'hydrargilite (Al ₂ O ₃ , H ₂ O) [14].	30
Figure 18 : Couche d'oxyde naturel sur l'aluminium [6].	31
Figure 19 : Corrosion générale d'une pièce en alliage d'aluminium [5].	32
Figure 20 : Corrosion galvanique de l'Aluminium [5].	33
Figure 21 : Protection cathodique [20].	38

Partie pratique

Figure 22 : Photo réelle d'un Four à résistance.	40
Figure 23: Photo réelle d'une polisseuse de type FOCIPOLE.	40
Figure 24 . a) : Microdurometre b) : Schéma illustratif de la mesure de la dureté	41
Figure 25 : microscope optique « Olympus ».	42
Figure 26 : Schéma du principe de la structure du microscope sur l'aspect optique.	43

Figure 27 : photo réelle d'un laminoir	43
Figure 28 : Photo réelle d'une enrobeuse à chaud	44
Figure 29 : Photo réelle d'une découpeuse.	44
Figure 30 : Schéma de l'opération de laminage.....	45
Figure 31 : Bain ultrasonique.	47
Figure32 : Bain de HCl.....	48

Liste des tableaux

Partie bibliographique

Tableau I : Propriétés de l'aluminium non allié [3].	7
Tableau II: Elément susceptible à former une solution solide avec l'aluminium [6].	8
Tableau III: Désignation des alliages de corroyage [3].	10
Tableau IV. : Composition des alliages de la série 2000. [3]	16
Tableau V: Conditions des traitements thermiques de durcissement structural [3].	17
Tableau IV. : Composition des alliages de la série 2000. [3].	16
Tableau V: Conditions des traitements thermiques de durcissement structural [3].	17

Partie pratique

Tableau VI : Perte de poids en mg dm^{-2} [3].	28
Tableau VII : Pourcentage massique des éléments d'alliages de l'alliage 2024.	39
Tableau VV: Diminution d'épaisseur en millimètre par an dans les solutions d'acide chlorhydrique [20].	61
Figure 49 : corrosion intergranulaire de l'alliage Al-Cu-Mg après 20 minute d'immersion.	67



INTRODUCTION



Introduction générale

L'aluminium est présent en grande quantité dans la croûte terrestre, avec une masse de minerai représentant 8% de la masse de cette dernière. Cependant, il a fallu attendre la généralisation de l'électricité pour voir la production d'aluminium se développer réellement. En effet, les procédés d'électrolyse de l'alumine, issue de la bauxite, sont relativement coûteux en énergie c'est pourquoi on a recouru à l'aluminium de recyclage. A l'heure actuelle, l'aluminium est utilisé dans de nombreux secteurs comme les transports, l'emballage, la construction ou encore les biens de consommation. Sa généralisation vient non seulement de la variété de ses alliages mais aussi des propriétés remarquables de ce métal. Quelques-unes de ses propriétés sont sa légèreté, il possède une bonne conductivité électrique (60% de celle du cuivre), aptitude aux traitements de surface, recyclage ... Enfin, une autre propriété remarquable dans son état pur ou faiblement allié, qui lui vaut certainement son renom avec sa légèreté, qui est due à la formation d'une couche d'alumine ; est sa tenue à la corrosion.

La corrosion est un phénomène de dégradation des matériaux (métalliques en général) par l'environnement. Il s'agit donc d'un phénomène qui concerne la plupart des secteurs industriels notamment l'industrie aéronautique, le secteur nucléaire, l'automobile et les industries chimique et pétrochimique. Les enjeux économiques sont donc considérables. La NACE rapporte qu'aux États-Unis, les coûts directs et indirects de la corrosion ont été estimés à 300 milliards de dollars environ [1]. Dans le contexte de l'allègement des structures pour les secteurs du transport, aérien notamment, les alliages d'aluminium restent une valeur sûre malgré le fait que, ces dernières années, le nombre de travaux de recherche autour des matériaux composites ait fortement progressé. A la différence du dernier Boeing (B787) composé à 50 % de matériaux composites et ne contenant quasiment plus d'alliages d'aluminium, l'Airbus A380 est encore composé à 60 % de ces alliages. Pour l'industrie aéronautique, les contraintes en termes de résistance mécanique sont prépondérantes. Les alliages d'aluminium utilisés pour ces applications sont majoritairement des alliages de la série 2000 (avec le cuivre comme élément d'alliage principal). L'alliage d'aluminium 2024 est traditionnellement utilisé pour le fuselage des avions civils entre autres applications. Cependant, la microstructure de cet alliage le rend particulièrement sensible à certains phénomènes de corrosion localisée comme la corrosion par piqûres ou la corrosion intergranulaire. Pour ces raisons, cet alliage n'est jamais employé nu mais traité (anodisé, colmaté puis revêtu). Les principales raisons de cette sensibilité à la corrosion localisée de l'alliage 2024 sont liées à la présence de particules intermétalliques de composition et donc de propriétés électrochimiques très différentes de celles de la matrice d'aluminium. Ces différentes phases induisent des phénomènes de microcouplage, bien souvent à l'origine de la corrosion localisée. Les particules intermétalliques de phase S-Al₂CuMg sont reconnues comme jouant un rôle particulier dans la sensibilité à la corrosion de l'alliage 2024. Compréhension et maîtrise de la réactivité de ces particules intermétalliques constitueraient un réel atout en permettant d'anticiper sur les mécanismes d'endommagement et donc de déterminer plus précisément la durabilité des structures.

Ce travail de PFE propose ainsi deux démarches différentes pour étudier la dissolution des particules Al_2CuMg et les phénomènes de corrosion localisée. La première est basée sur les mesures de microdureté. La deuxième sur les observations microscopiques.

En plus d'une introduction générale toute au début et une conclusion générale à la fin.

Ce manuscrit de PFE s'articule autour de deux parties ; une synthèse bibliographique qui comporte quatre chapitres puis une autre intitulée procédure expérimentale qui se compose elle-même de deux chapitres.

Le premier chapitre consiste en une présentation de l'aluminium et ses alliages, de corroyage en particulier ainsi que leurs propriétés générales. Une revue des connaissances concernant les traitements thermiques.

Le second chapitre introduit les principales notions sur la précipitation et les durcissements structuraux des alliages de la série 2000Al-Cu-Mg.

Le troisième volet de cette partie traitera des généralités sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages et présenter les facteurs influençant la corrosion, les phénomènes électrochimiques, les types de corrosion ainsi que la protection contre la corrosion.

Dans un quatrième chapitre, on passe à la procédure expérimentale la ou on va étudier les phénomènes de durcissement structural par précipitation à l'aide des traitements thermiques de trempe et revenu et des mesures de la microdureté en suite une étude sur les types de corrosion.

Le cinquième et dernier chapitre il est consacré pour les résultats et interprétations.

Le mémoire s'achève enfin, par une conclusion générale relatant les différents résultats obtenus.

Première partie

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première partie présente l'aluminium et ses alliages leurs propriétés ainsi que des notions sur leur durcissement structural et corrosion.

Chapitre I

Généralités

sur l'aluminium

et ses alliages

I.1.L'aluminium et ses alliages

I.1.1. L'aluminium pur

L'aluminium est un élément chimique, de symbole Al et de numéro atomique 13. C'est un métal malléable, de couleur argentée. Il est remarquable pour sa résistance à l'oxydation et sa faible densité. C'est le métal le plus abondant de l'écorce terrestre, et le troisième élément le plus abondant après l'oxygène et le silicium. L'aluminium est trop réactif pour exister à l'état natif dans le milieu naturel : on le trouve au contraire sous forme combinée dans plus de 270 minéraux différents, son minerai principal étant la bauxite, où il est présent sous forme d'oxyde hydraté dont on extrait l'alumine. Il peut aussi être extrait de la néphéline, de la leucite, de la sillimanite, de l'andalousite et de la muscovite.

L'aluminium est un métal dont la structure cristalline est cubique à face centrée (CFC), a une arête a égale à 0,4049596 nm à 298 K. Sa coordinence est égale à 12 [2].

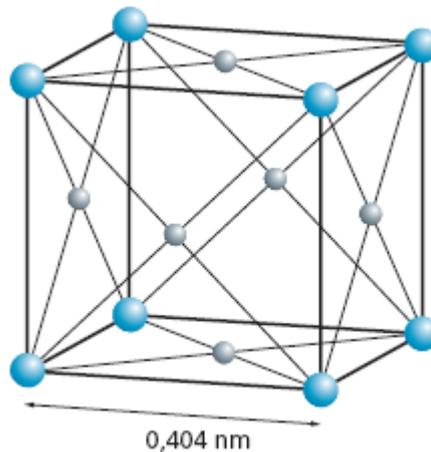


Figure 1 : La forme cristalline de l'Aluminium [2].

I.1.2. Les atouts de l'aluminium

Avec 25 millions de tonne de production annuelle mondiale l'aluminium occupe la première place de la métallurgie des métaux non ferreux. La production de l'aluminium primaire connaît une croissance régulière depuis 1950.

Le développement des applications de l'aluminium et de ses alliages, la croissance régulière et soutenue de la consommation s'expliquent par plusieurs propriétés qui sont autant d'atout décisif dans le choix des utilisateurs, en particulier dans les transports, le bâtiment, l'industrie électrique et l'emballage.

Ce sont : la légèreté, la conductivité thermique et électrique, l'aptitude au traitement de surface, la tenue à la corrosion, la diversité des alliages d'aluminium et des demi-produits, la fonctionnalité des demi-produits filés et moulés, la facilité de mise en oeuvre, le recyclage [3].

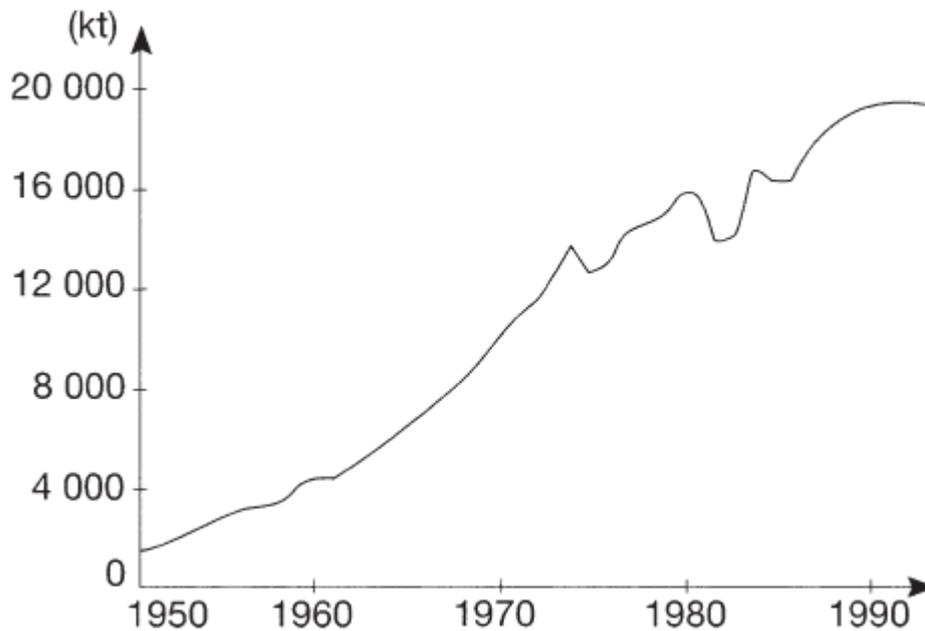


Figure 2 : Production mondiale de l'aluminium [4].

Dans ce qui va suivre on va détailler plus les atouts les plus importants de l'aluminium :

I.1.2.1. La légèreté

L'aluminium est plus léger qu'aucun des métaux usuels et la sensation qu'on éprouve en maniant un lingot de ce métal cause toujours un vif étonnement même quand on est prévenu de cette particularité. Sa masse volumique est de 2700 Kg.m^{-3} soit presque trois fois moindre que celle des aciers et la masse volumique des alliages d'aluminium est comprise entre 2600 et 2800 Kg.m^{-3} [5].

Plusieurs domaines d'application tirent profit de la légèreté :

- Le transport : depuis 1930, tous les avions sont en alliage d'aluminium, les véhicules industriels, transport ferroviaire (métro, tramway, TGV), les navires à grande vitesse.
- Les applications mécaniques : l'aluminium est très employé pour la réalisation des pièces en mouvement par exemple sur les robots à fin de réduire leurs poids.
- Le transport d'énergie électrique : Compte tenu des résistivités de l'aluminium et du cuivre pour une même résistance électrique du conducteur le câble en Al est deux fois moins lourd que celui en cuivre.

I.1.2.2. La tenue à la corrosion

L'aluminium et ses alliages ont en général une bonne tenue à la corrosion atmosphérique, en milieu marin, urbain, industriel. L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics (Grande Arche de la Défense, Pyramide du Louvre..) que pour les habitations individuelles. Tout en offrant

de nombreuses possibilités de formes et de traitements de la surface, les structures de bâtiment en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien dans le temps. Cette bonne tenue à la corrosion alliée à sa faible densité lui a permis un développement des applications de l'aluminium dans le bâtiment. Les utilisateurs disposent ainsi:

- d'une durée de vie des équipements accrue. Il n'est pas rare en effet de trouver intacts des toitures, des bardages, des équipements de ports de plaisance, des bateaux..., vieux de plusieurs décennies.
- d'un entretien facilité, même sans protection ad hoc (ni peint, ni anodisé)
- d'une esthétique pérenne. Les produits de corrosion de l'aluminium sont blancs et propices à l'enduction d'une peinture [5].

Il faut en fin noter que les produits dus à la corrosion de l'aluminium sont blanc. Ils ne maculent pas les surfaces du métal contrairement à la rouille de l'acier. Et aussi noter qu'une anodisation de quelque millimètre permet de conserver les propriétés optiques, la réflectance, ou les propriétés décoratives [3].

I.1.2.3. Aptitude aux traitements de surface

Les traitements de surface sur l'aluminium ont plusieurs objectifs parmi lesquels:

- la protection de certains alliages, quand leur résistance à la corrosion « naturelle » est jugée insuffisante.
- la pérennité de l'aspect en évitant la corrosion par piqûres ou le noircissement.
- La modification des propriétés de surface comme la dureté superficielle.
- La décoration du métal par anodisation puis colmatage pigmentaire [5].

I.1.2.4. Diversité des alliages d'aluminium

Les progrès permanents de la métallurgie de l'aluminium ont abouti à proposer une gamme étendue de nuances, bien adaptée aux utilisations envisagées.

Tellement nombreux, les alliages d'aluminium sont regroupés conformément à une nomenclature rigoureuse et complexe. Ainsi le métal pur non allié constitue la série 1000 et les autres séries dépendent de la nature de l'élément d'alliage principal (2000 pour le Cu, 3000 pour le Mn, 4000 pour le Si, 5000 pour le Mg, 6000 pour le Mg et le Si, 7000 pour le Zn). D'une famille à une autre les propriétés caractéristiques sont très variables : les alliages de la famille 5000 sont soudables résistants à la corrosion tandis que ceux de la famille 2000 ont des caractéristiques mécaniques plus élevées, mais sans possibilité de soudage par les procédés classiques, et avec une sensibilité marquée à la corrosion atmosphérique [5].

I.1.2.5. Une bonne conductivité électrique et thermique :

L'aluminium offre une excellente conductivité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. C'est pour cela qu'on le retrouve de plus en plus pour les lignes à haute tension. A l'instar du cuivre, l'aluminium, en plus d'une bonne conductivité électrique procure également un fort pouvoir caloporteur ce qui explique par exemple sa présence dans les dispositifs de refroidissements [5].

I.1.2.6. Recyclage

L'aluminium est un des métaux dont le recyclage est le plus attractif tant sur le plan énergétique que sur le plan économique. La refusions de l'aluminium ne représente que 5% de l'énergie nécessaire à l'élaboration du métal à partir du minerai.

L'expérience de plusieurs dizaines d'années de récupération des « vieux métaux » montre que les déchets d'aluminium ont toujours une valeur marchande supérieure à celle des ferrailles [5].

I.1.3. Propriétés physique et mécanique de l'aluminium :

Dans ce paragraphe on va voir quelque propriétés physique et mécanique de l'aluminium en bref détaillé et les autres citées sous forme d'un tableau.

➤ **Point de fusion :**

Comme pour tous les métaux, le point de fusion dépend de la pureté de l'aluminium. Il varie suivant les mesures de 657 à 660 °C :

- ✓ 657 °C pour un aluminium « commercial ».
- ✓ 659 °C et 660 °C pour le métal dont le titre est de 99,99 %.

La valeur maintenant admise de **l'enthalpie de fusion** de l'aluminium ou encore couramment appelée chaleur latente de fusion est de : **10,716 0,209 kJ mol⁻¹** (2,56 ± 0,05 kcal.mol⁻¹) soit **397 J g⁻¹** [2].

➤ **Point d'ébullition**

L'aluminium est peu volatil. Le point d'ébullition n'est pas connu avec précision. Il se situe entre 2 700 et 2 800 K, 2 750 K (2 477 °C) [2].

➤ **Masse volumique**

Parmi les métaux usuels, c'est l'aluminium qui est le plus léger et sa aussi sa masse volumique qui dépend de plusieurs paramètre tel que :

- ✓ La pureté du métal.
- ✓ La température.
- ✓ la nature de l'alliage.

➤ **Propriétés optiques**

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium est élevé, de l'ordre de 80 % dans le spectre visible. Il dépend de l'état de la surface du métal ainsi que l'illustre [2].

Tableau I : Propriétés de l'aluminium non allié [3].

Propriétés	Unité	Valeur	Remarque
Numéro atomique	-	13	-
Masse molaire (atomique)	g.mol ⁻¹	27	-
Masse volumique	Kg.m ⁻³	26981	
Point de fusion	°C	660,45	Sous 1013. 10 ⁻³ bar
Point d'ébullition	°C	2056	Sous 1013 . 10 ⁻³ bar
Pression de vapeur	Pa	3,7 10⁻³	à 927 °C
Système cristallin	-	CFC	Cubique à phase centré
Coefficient de dilatation	K ⁻¹	24.10⁻⁶.	-
Coefficient de poisson ν	-	0 ,33	-
Module d'élasticité	MPa	69000	-
Résistivité électrique	ohm.m	2,7.10⁻⁸	-
Conductivité thermique λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	237	à 27 °C
Energie interne massique u	J.Kg ⁻¹	3,98 10⁵	-
Capacité thermique massique C _p	J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹	897	à 25 °C

➤ Propriétés mécanique

L'aluminium est trois fois moins léger que l'acier, vue de sa structure CFC l'aluminium pur est très malléable et déformable à chaud et à froid donc très ductile, cette plasticité élevée rend très aisé le corroyage, par contre, son usinage est très difficile.

Le soudage ne pose aucun problème particulier est se prête bien a toutes les modalités de soudage sous gaz inerte tel que l'argon ou l'hélium (gaz protecteur) pour l'aluminium la faible dureté et la faible limite élastique de l'aluminium sont très défavorable pour son emploi en mécanique. Les propriétés mécaniques de l'aluminium dépendent de :

- ✓ Traitement mécanique (forgeage, laminage, ect...).
- ✓ Traitements thermiques (trempe, recuit, ect...).
- ✓ Élément d'addiction (Fe, Cu, MN, Zn Mg, Si...) [2].

I.2. Les alliages d'aluminium

I.2.1. Catégories d'alliages d'aluminium

L'art des métallurgistes est de crée des alliages a partir d'un métal de base, aluminium par exemple en lui ajoutant d'autre métaux (ou métalloïde) en quantité mesuré pour amélioré ou pour modifier certains propriétés : caractéristiques mécaniques, aptitude à la mise en forme, soudabilité, ect.

Bien que la plus part des métaux et certains métalloïde soient capable de former avec l'aluminium des solutions solide les alliages d'aluminium sont en faite basé sur quelque système seulement :

Tableau II: Elément susceptible à former une solution solide avec l'aluminium [6].

Elément	Température eutectique [°C]	Solubilité %	
		Liquide	Solide
Cu	548	33,15	5,67
Mg	450	35,0	14,9
Mn	660	1,95	1,82
Si	577	12,6	1,65
Zn	382	95,0	82,8
Li	600	9,9	4,0

Suivant le mode de transformation des alliages, on distingue trois catégories :

- ❖ **Les alliages de moulage** : qui sont utilisés en fonderie pour la fabrication des pièces obtenues par la coulée du métal liquide dans les moles en sable, c'est la coulée en sable ou des moules en acier ou en fonte, c'est la coulée en coquille. Par ce procédé on élabore des pièces aux formes plus ou moins complexe : poignées des portes blocs moteurs ect [6].
- ❖ **Les alliages de corroyage** : qui sont coulé en fonderie sous forme de plaque ou biellette en suite transformé en demi-produit : tôles, profilés par laminage ou par filage, les demi-produits ainsi obtenu sont ensuite utilisés dans la construction mécanique ou ils sont assemblé par soudage rivetage, vissage,dans le bâtiment dans l'électricité ect [6].

Pour les alliages de corroyage on distingue suivant le processus par lequel les niveaux de caractéristiques mécanique sont obtenus :

- Les alliages à durcissement structural ou « trempant » dans les quels le durcissement est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant : la mise en solution, une trempe suivi d'un revenu ou d'une maturation à l'ambiante.
 - Les alliages non susceptible de durcissement structurale (ou non trempant) dont le niveau de caractéristique mécanique est obtenu par l'effet d'écrouissage du aux déformations (laminage, filage...) ou par des recuits [6].
- ❖ **Alliages frittés** : On trouve aussi les alliages élaboré par frittage suivant la méthode de la métallurgie des poudres [6].

I.2.2. Influence des éléments d'addition sur les propriétés de l'aluminium

Bien que l'aluminium pur est très ductile, mou et un excellent conducteur d'électricité mais ses propriétés mécanique restent trop indésirable pour l'industrie, a fin d'améliorer ses propriétés on est conduit à le faire allier avec d'autre élément d'addition lors de son élaboration par fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co, ect. Ces éléments entrent en solution solide en formant des précipités qui entraînent un durcissement de l'alliage.

❖ Addition de Mg

En ajoutant le Mg on obtient des alliages de résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés dans le domaine de placage, ils sont facile à polir et conserve longtemps leur plissage a cause de la haute résistance chimique [7].

❖ Addition de (Mg+Mn)

Ces deux éléments augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Ils se prêtent bien à l'emboutissage et au polissage [7].

❖ Addition de (Cu+Si)

Ce sont des alliages de fonderie, présentant une bonne coulabilité et conviennent surtout pour les pièces compliquées [7].

I.2.3 Désignation des alliages d'aluminium

On va se limiter dans ce paragraphe de décrire la désignation des alliages de corroyage avec et sans durcissement structural, ces alliages sont désignés sous forme numérique suivant la forme AFNOR NF 02-104 : depuis 1976, les alliages d'aluminium de corroyage sont désigné sous forme numérique par un nombre de 4 chiffre [6] :

Le système de désignation internationale à 4 chiffres :

- ❖ **Le premier chiffre :** Il identifie la nature de l'élément principal d'alliage et indique le groupe au quel appartient l'aluminium ou l'alliage [6].

Tableau III: Désignation des alliages de corroyage [3].

	Durcissement par écrouissage				Durcissement structural			
Famille	1000	3000	5000	8000	2000	4000	6000	7000
Élément d'alliage	Aucun	Mn	Mg	Autre (Si+Fe)	Cu	Si	Mg+Si	Zn+Mg
Etendue de la teneur (%mass.)	∅	0,5-1,5	0,5- 5	Si :0,3-1 Fe :0, 6-2	2-6	0,8-1,7	Mg : 0,5-1,5 Si : 0,5-1,5	Zn : 5-7 Mg : 1-2
Élément d'addition	Cu	Mg, Cu	Mn, Cu	divers	Si, Mg		Cu, Cr	Cu
Résistance mécanique R_m (MPa)	50-160	100-240	100-340	130-190	300-480	150-400	200-320	310-600

❖ **Le second chiffre :**

- ✓ Dans le groupe 1 : il identifie les nuances dans lesquelles certaines impuretés ont des teneurs contrôlées [6].
- ✓ Dans les groupes 2 à 8 : il est réservé aux modifications successives de l'alliage [6].

❖ **les deux derniers chiffres**

- ✓ Dans le groupe 1 : les 2 derniers chiffres indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99 % [6].
- ✓ Dans les familles 2 à 8 : les 2 derniers chiffres n'ont aucune signification particulière et servent seulement à identifier les différents alliages dans leur groupe [6].

❖ **Les lettres**

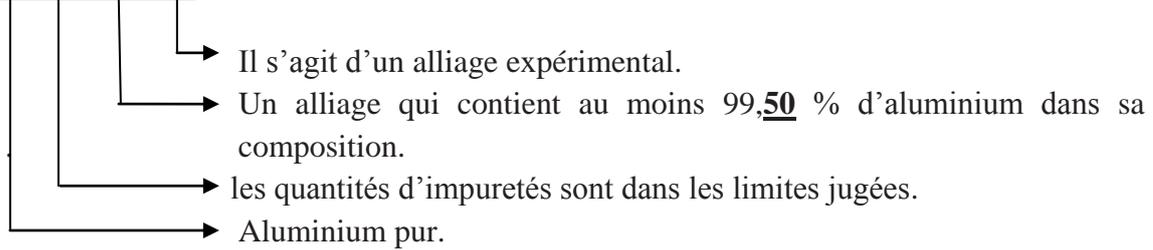
Il arrive que la désignation à 4 chiffres soit accompagnée d'une lettre, par exemple l'alliage 6005A. Ces suffixes alphabétiques débutant à A, en omettant les lettres I, O et Q, indiquent une variation nationale d'un alliage. La composition est similaire avec quelques variations, par exemple la substitution d'un élément d'alliage par un autre qui sert le même objectif ou encore des limites de compositions différentes pour les éléments d'affinage de grain [6].

❖ Désignations pour les états métallurgiques des alliages d'Al [6].

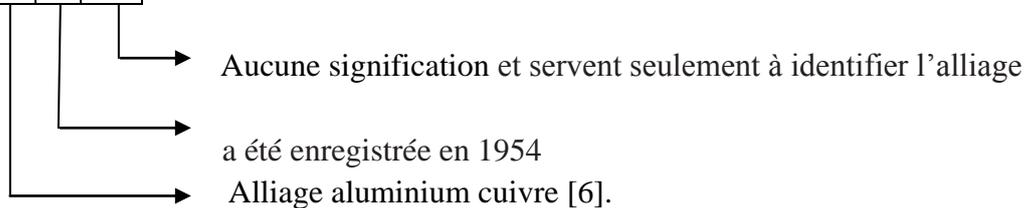
Etats de base	Chiffres complémentaires pour l'état H	Chiffres complémentaires pour l'état T
<p>F : Tel que fabriqué à chaud</p> <p>O : Recuit ou recristallisé</p> <p>H : Ecroui par déformation à froid</p> <p>T : Traité thermiquement</p> <p>Les états F et O n'ont pas de subdivision. Les états H et T sont définis de façon plus précise par des chiffres complémentaires</p>	<p>Le premier chiffre derrière le symbole H indique le mode d'obtention de la dureté: H1 par écrouissage H2 par écrouissage suivi d'un recuit de restauration H3 par écrouissage suivi d'une stabilisation.</p> <p>Degré d'écrouissage Le degré final d'écrouissage du produit (Ou degré de dureté) est indiqué par un deuxième chiffre derrière le symbole ci-dessus. La subdivision correspondant au degré de dureté obtenu par écrouissage se définit en nuances 1 1/8dur H11 2 1/4 dur H12 H22 H32 4 1/2 dur H14 H24 H32 6 3/4dur H16 H26 H36 8 4/4dur H18 H28 H38 9 extra dur H19 Un troisième chiffre indique une variante du degré de dureté correspondant. Cette variante peut résider dans le mode de fabrication ou préciser la garantie de caractéristiques mécaniques.</p>	<p>Le premier chiffre derrière le symbole T précise le type de traitement thermique appliqué: T3 Mise en solution, trempe, écrouissage, maturation T4 Mise en solution, trempe, maturation T5 Trempe à partir de la température de transformation à chaud, revenu T6 Mise en solution, trempe revenu</p> <p>Parfois, on rencontre derrière ces symboles des chiffres de complément supplémentaires. Ils précisent des variantes ou des combinaisons des traitements avec une opération à froid (p. ex. T41, T61, T651).</p>

Exemple 1 :

1	0	50	X
---	---	----	---

**Exemple 2 :**

2	0	14
---	---	----

**I.2.4. Propriétés des alliages d'aluminium**

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

❖ Résistance à chaud :

D'une manière générale, on peut dire que la résistance à chaud est assez faible au delà de 150°C, sauf pour les alliages Al-Cu où l'on peut atteindre 300°C [6].

❖ Résistance à la basse température :

Vue leur réseau cristallin CFC, les alliages d'aluminium ne sont pas fragiles d'où leurs application en cryogénie [6].

❖ Résistance à la fatigue :

le coefficient d'endurance R_m (charge à la rupture) est de l'ordre de 0,5 pour les alliages sans durcissement structural et de (0,25 à 0,30) pour les alliages avec durcissement structural [6].

❖ Mise en forme :

Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier et emboutir. En particulier les alliages Al-Mg sont très appropriés au filage à chaud [6].

❖ Tenue au feu de l'aluminium

Les métaux et alliages usuels tels que les alliages d'aluminium et les aciers sont classés (nota 13) « MO ». Cela veut dire que dans les conditions d'un incendie, ces matériaux ne peuvent pas donner lieu à combustion sous l'action d'un feu, le comportement de l'aluminium et de ses alliages est le suivant :

- déformation du métal .
- fusion du métal à partir de 650 °C.

Il a été montré que l'aluminium liquide ne s'enflamme pas, même à très haute température, et sous pression d'oxygène. Il ne participe donc pas à la « charge de l'incendie » [2].

I.3. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Une telle gamme de caractéristiques mécaniques est obtenue non seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante, en effectuant des traitements thermiques qui permettent d'ailleurs d'agir dans deux sens, à savoir :

- ❖ soit dans le sens d'une diminution de la résistance mécanique, diminution accompagnée généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont les traitements d'adoucissement) ;
- ❖ soit au contraire dans le sens d'une augmentation de la résistance mécanique (ce sont les traitements de durcissement).

Toutefois, les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que l'aptitude à la transformation à chaud ou à froid, la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductivité électrique, la stabilité dimensionnelle, etc. [8].

I.3 .1.Principaux types de traitements thermiques

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois types principaux :

1. les traitements dits d'homogénéisation généralement pratiqués sur les produits coulés avant leur transformation ou également sur les produits déjà corroyés ;
2. les traitements d'adoucissement par recuit ou restauration, généralement appliqués en cours ou en fin de transformation ;
3. Traitement de recuit de recristallisation
4. Traitements de recuit de coalescence(ou recuit de précipitation).
5. les traitements de trempe structurale comprenant :
 - une mise en solution.
 - une trempe.

- une maturation ou /et un revenu produisant le durcissement.

I.3 .1.1.Traitements thermiques d'homogénéisation

Les traitements dits d'homogénéisation consistent à maintenir à une température assez élevée (alliages 2024 et 2011 : 475 à 495 °C) et pendant des temps prolongés (en général durant 6 à 48 h selon la section du produit). d'une façon générale les types d'évolution observés au cours de l'homogénéisation sont :

- la dissolution de phases intermétalliques en excès ;
- le nivellement des concentrations dans la solution solide ;
- la coalescence de phases intermétalliques déjà présentes ;
- la précipitation de nouvelles phases intermétalliques [8].

I.3.1.2.Traitements d'adoucissement par recuit ou restauration

❖ Phénomène de durcissement par écrouissage

L'écrouissage d'un métal ou alliage a pour effet d'augmenter sa dureté et sa résistance mécanique (résistance à la rupture et limite d'élasticité) mais, en contrepartie, de diminuer sa plasticité, c'est-à-dire son allongement à la rupture et son aptitude à la déformation.

❖ Phénomènes d'adoucissement

Lorsque l'on fait subir à un alliage écroui des chauffages à différentes températures pendant des temps variables, on obtient après refroidissement un alliage plus ou moins adouci.

❖ Traitements de restauration

Les traitements de restauration correspondent à un perfectionnement du réseau du métal écroui. Ce perfectionnement est d'autant plus important qu'il est effectué à une température inférieure à celle du seuil de recristallisation. Il est essentiellement fonction de la température et de la durée du traitement [8].

I.3 .1.3.Traitements de recuit de recristallisation

Les traitements de recuit de recristallisation augmentent de façon considérable la plasticité mais diminuent, en contrepartie, la limite d'élasticité, la charge de rupture et la dureté [8].

I.3 .1.4.Traitements de recuit de coalescence (ou recuit de précipitation)

Ces traitements s'appliquent aux alliages à durcissement structural ayant subi au préalable une mise en solution. Ils visent à obtenir la plasticité maximale. Ils sont effectués aussi bien sur l'état écroui que sur l'état mûri ou revenu [8].

I.3 .1.5.Traitement de durcissement structural

L'aluminium est capable de former des solutions solides avec la plupart des métaux qui lui sont associés comme constituants d'alliage. La possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition. Autrement dit, pour qu'un alliage soit traitable thermiquement, il y a lieu que l'un au moins des constituants donne avec l'aluminium un diagramme d'équilibre binaire.

Le traitement thermique dit de durcissement structural comporte trois grands stades

❖ **Traitement mise en solution solide** : chauffage à température élevée (400 à 600 °C suivant les alliages considérés).

❖ **Traitements de trempe**

Après la mise en solution, l'alliage doit être refroidi assez énergiquement pour que la solution reste sursaturée à la température ambiante.

❖ **Traitements de revenu ou de maturation**

Au cours de la maturation qui s'effectue à la température ambiante, on observe une évolution des propriétés mécanique en fonction du temps. Elle a pour conséquence de diminuer la capacité de déformation des produits.

Au cours de revenu il y a précipitation abondante d'élément durcissant [8].

Précipitation et
durcissement
structural de
l'alliage Al-Cu-Mg

Après la présentation de l'aluminium et ses alliages dans le premier volet, ce chapitre constitue la deuxième étape de la démarche suivie pour étudier ce métal en vue de son comportement envers la corrosion. On va voir dans ce chapitre la précipitation et le durcissement structural des alliages d'aluminium.

II.1. Alliage d'aluminium de la famille 2000 :

Les alliages de la série 2000 sont des alliages à durcissement structural dont l'élément d'alliage principal est le cuivre, par opposition aux alliages à durcissement par écrouissage ; le cuivre donne, de manière générale, une bonne résistance mécanique, caractéristique de cette série d'alliage. Le tableau suivant illustre les différents alliages de cette série ainsi que les éléments d'addition. L'élément en surbrillance est celui qui va être étudié dans la partie pratique par la suite :

Tableau IV : Composition des alliages de la série 2000. [3]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti
2618A	0.15-0.25	0.9-1.4	1.8-2.7	0.25	1.2-1.8	-	0.8-1.4	0.15	-	0.2
2017A	0.2-0.8	0.7	3.5-4.5	0.4-1.0	0.4-1.0	0.1	-	0.25	-	-
2024	0.5	0.5	3.8-4.9	1.2-1.8	1.2-1.8	0.1	-	0.25	-	0.15
2124	0.2	0.3	3.8-4.9	1.2-1.8	1.2-1.8	0.1	-	0.25	-	0.15
2014	0.5-1.2	0.7	3.9-5.0	0.2-0.8	0.2-0.8	0.1	-	0.25	-	0.15
2214	0.5-1.2	0.3	3.9-5.0	0.2-0.8	0.2-0.8	0.1	-	0.25	-	0.15
2219	0.2	0.3	5.8-6.8	0.02	0.02	-	-	0.1	0.05-0.15	0.02-0.1
2030	0.8	0.7	3.3-4.5	0.5-1.3	0.5-1.3	0.1	-	0.5	-	0.2
2011	0.4	0.7	5.0-6.0	-	-	-	-	0.3	-	-

Signalons que pour les alliages de la série 2000 :

- Le durcissement structural qui est dû à la précipitation des composés d'équilibre CuAl_2 et CuMgAl_2 , leur confère d'excellentes propriétés mécaniques.
- L'addition de silicium et de manganèse à des teneurs inférieures à 0.8 % favorise la formation des composés quaternaires qui, par dispersion, améliore les propriétés de la matrice.

- La présence du fer est souvent nuisible, car à cause de la formation de Cu_2FeAl_7 , le fer diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural.
- Si en plus du fer on ajoute du nickel il y a formation du composé Al_9FeNi , qui confère à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C .
- Les alliages de la série 2000 font preuve d'une résistance médiocre à la corrosion, à l'état trempé et vieilli, à cause de la présence de précipités cathodique par rapport à la matrice. Par ailleurs ses alliages sont difficilement soudables [7].

II.2. Durcissement structural par précipitation

II.2.1. Découverte et évolution de la technique

Lorsqu'ils sont maintenus à des températures inférieures à 250°C , après passage à haute température (450°C ou plus), certains alliages d'aluminium voient croître leur résistance mécanique.

Du point de vue théorique, sur la base de travaux menés indépendamment par diffraction des rayons X, en 1938, Guinier et Preston ont présenté le premier modèle structural expliquant les premiers stades de la **décomposition de la solution solide**, dans des alliages Al-Cu et Al-Ag trempés, par la formation d'amas planaires d'atomes de même nature, désormais appelés **zones de Guinier-Preston** ou **zones GP** [9].

Tableau V: Conditions des traitements thermiques de durcissement structural [3].

Alliage	Etat	Mise en solution Température (°C)	Milieu de Trempé	Attente entre trempé et revenu	Revenu		Maturatio n
					Température (°C)	Durée (h)	Durée mini (j)
2618 A	T8	530 ± 5	Eau $\leq 80^\circ\text{C}$	24 h max ou 10 j. min	190 ± 3	19 à 21	
2024	T 3	495 ± 5	Eau $\leq 40^\circ\text{C}$	–	120 et 170	–	4
6005A	T4	530 ± 5	Eau $\leq 40^\circ\text{C}$ (3)		175 ± 5 (2) ou 185 ± 5	8	
	T6		Eau $\leq 40^\circ\text{C}$			6	
6082	T4	535 ± 5	Eau $\leq 40^\circ\text{C}$	2h maxi ou 5 j. mini	165 ± 5 (2) ou 175 ± 5	16	
	T6					8	

7020	T4	535 ± 5	Eau ou air soufflé (3)	4 jours mini	100 ± 5 et	4 à 6	4
	T6				140 ± 5	24 à 26	
7049A	T6	465 ± 5	Eau ≤ 40 °C		135 ± 5	12	
	T73				120 ± 5	et 12 à 24	
					165 ± 5		

- ✓ (2) Ce traitement confère les caractéristiques mécanique optimales associé aux valeurs de A% les plus élevées.
- ✓ (3) Du fait que ces alliages ont une faible vitesse critique de trempe, les demi-produits de faible épaisseur peuvent être trempés à l'air soufflé.

II. 2.2. Définition

Depuis les années 1950, des travaux cherchant à décrire les phénomènes complexes de précipitation durcissante dans les alliages Al-Cu-Mg sont toujours en cours et montrent que la précipitation est très dépendante de la composition des alliages et des traitements thermomécaniques qu'ils subissent. Le principe du durcissement structural est basé sur la précipitation, c'est-à-dire la diminution de la solubilité d'éléments d'alliage avec la température. Le cuivre et le magnésium ont pour principal objectif d'augmenter les propriétés mécaniques de l'alliage par précipitation de phases durcissantes. Une séquence de précipitation en quatre étapes a été proposée :

Solution solide sursaturée → zone GPB → S''/GPB2 → S' → S-Al₂CuMg (figure 3) [9].

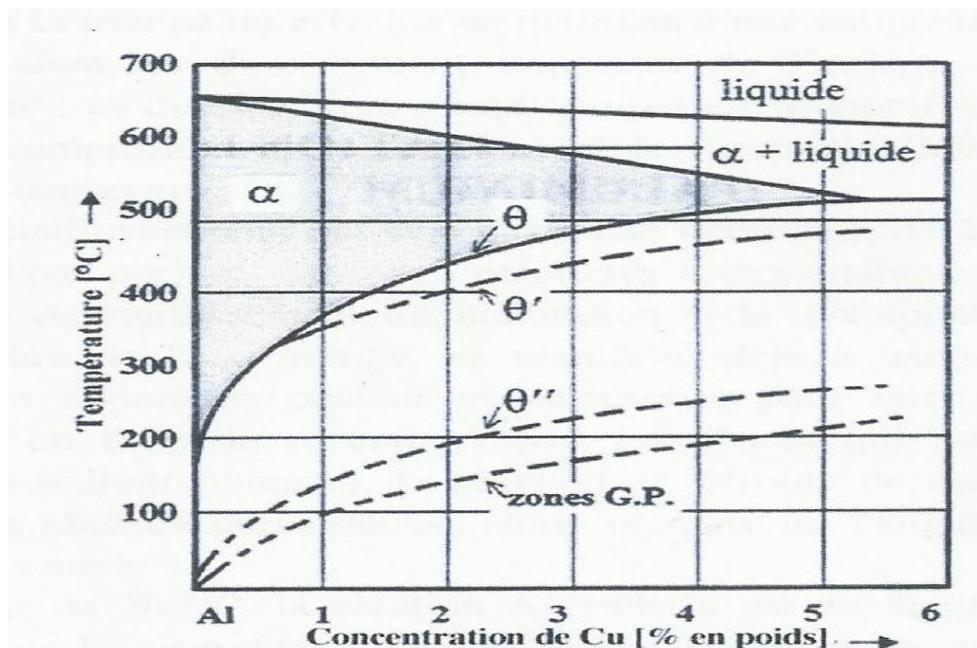


Figure 3 : diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu montrant la limite de solubilité et les domaines de précipitation des zones GP et les phases θ'' , θ' et $\theta (=Al_2Cu)$ [10].

II.2.3. Le principe du durcissement structural

Les caractéristiques mécaniques maximales de ces alliages sont obtenues par un traitement comprenant trois étapes :

II. 2.3.1. La mise en solution

Consiste à porter l'alliage à une température supérieure à la température de solvus de manière à ce que tous les atomes de soluté (éléments d'alliages et d'addition) se retrouvent en solution. La température de mise en solution est généralement comprise entre 400 et 550°C (figure 4) [10].

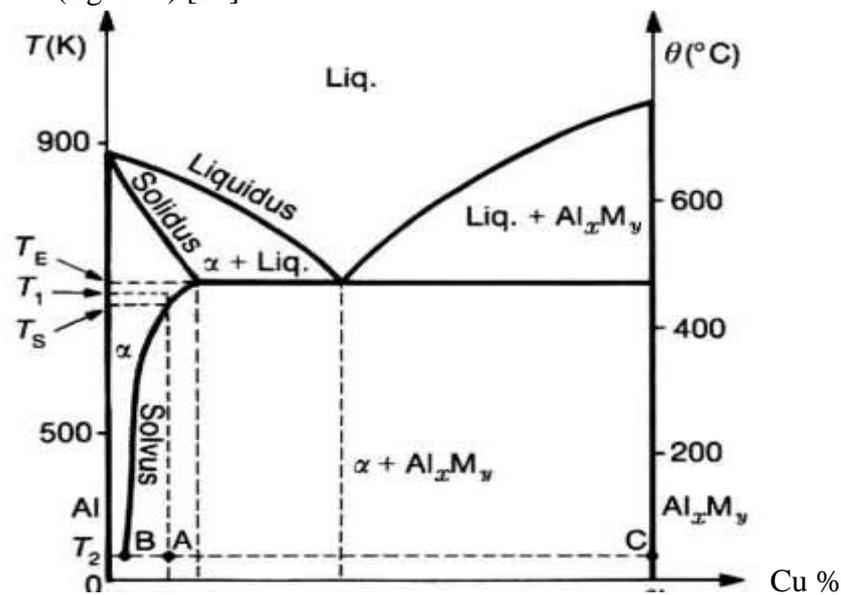


Figure 4: Schéma représentatif du diagramme Al-Cu [9].

II. 2.3.2. La trempe

L'opération de **trempe** consiste à **refroidir l'alliage suffisamment rapidement** après mise en solution pour empêcher la décomposition de la solution solide avec formation de ces précipités d'équilibre grossiers. La trempe permet en outre de piéger les très nombreuses lacunes stables à haute température. Immédiatement après la trempe jusqu'à la température ambiante T_2 (figure 4). (Tableau V) on obtient une **solution solide sursaturée en soluté Cu et en lacunes** où les atomes de soluté sont positionnés de manière aléatoire aux nœuds du réseau cubique à faces centrées de l'aluminium (figure 5) le durcissement par précipitation résulte alors de la **décomposition de cette solution solide** sursaturée en éléments d'addition principaux. Et forment une **solution solide de substitution** [9].

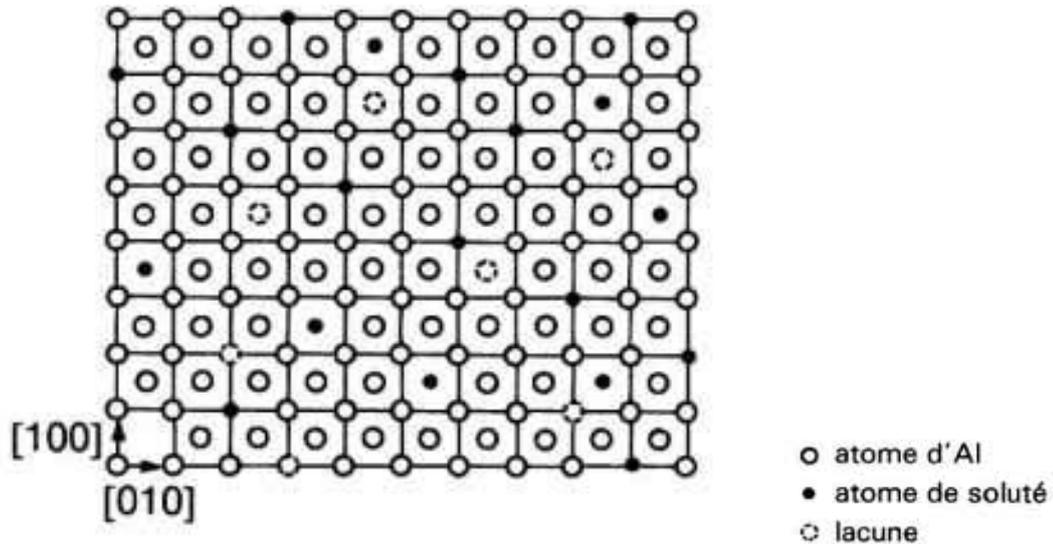


Figure 5 : Solution solide de substitution α [9].

II.2.3.3. La maturation

Au cours du maintien de l'alliage à température ambiante ou à basse température après la trempe (figure 4, 8), la solution solide sursaturée est donc métastable. Au cours de cette phase, appelée maturation ou encore vieillissement naturel, l'alliage durcit progressivement et spontanément et la solution solide se décompose pour donner naissance à la formation de petits amas d'atomes de soluté (les zones de Guinier-Preston ou zone GP) en très grande densité (de l'ordre de 10^{17} à $10^{18}/\text{cm}^3$) : c'est la précipitation [9].

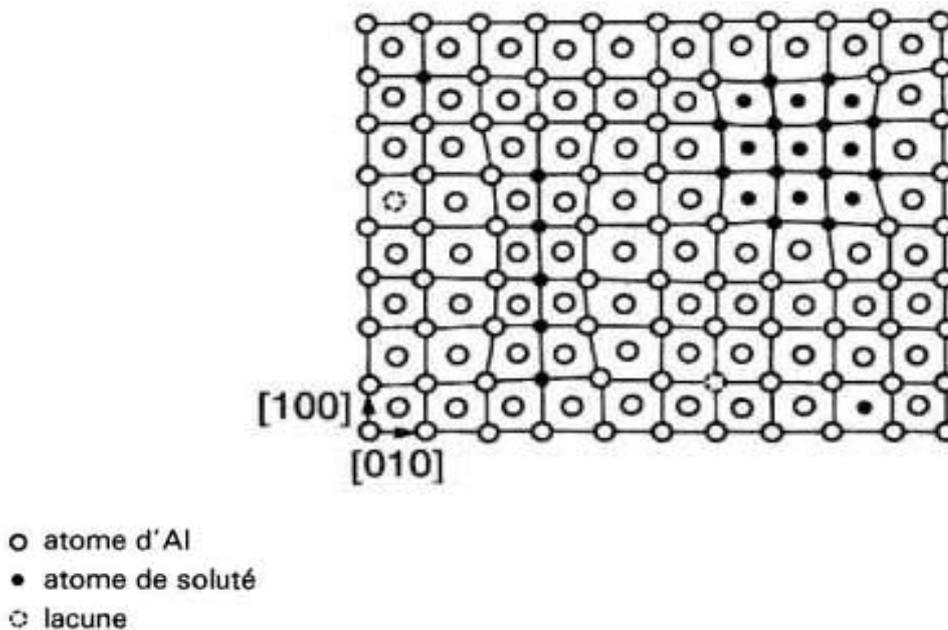


Figure 6 : Zone de Guinier-Preston [9].

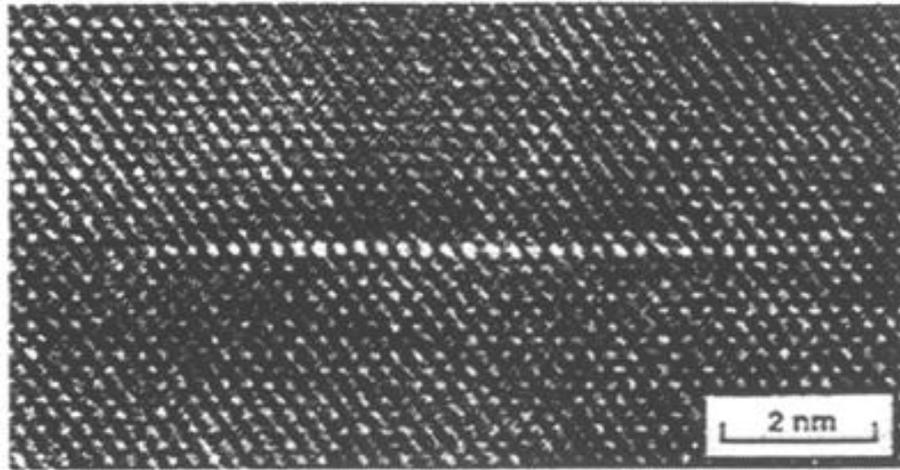


Figure 7 : Zones de G.P. parallèles au plan (100) [9].

II.2. 3.4. Le revenu

Est un chauffage ultérieur à des températures inférieures aux températures de mise en solution, typiquement de l'ordre de 100 à 200°C (figure 10), (tableau V). Cette étape permet d'accélérer les phénomènes de décomposition de la solution solide sursaturée et donc la précipitation, responsable du durcissement de l'alliage.

Les traitements thermomécaniques aboutissent à une microstructure complexe composée de nombreux intermétalliques. Il est possible de les classer en trois catégories [11] :

- ❖ **Les précipités durcissants** ont une taille allant du nanomètre jusqu'à plusieurs centaines de nanomètres. Ils sont formés lors de la trempe ou de manière contrôlée lors de la maturation ou du revenu. Il s'agit des amas d'atomes décrits précédemment ou de phases métastables issues de leur précipitation. Les mécanismes de durcissement structural sont complexes mais il est possible de retenir que ces précipités jouent le rôle de frein dans le mouvement des dislocations, en partie responsables de la déformation plastique. Ces phases doivent donc être cohérentes ou semi-cohérentes avec la matrice figure (a,b).

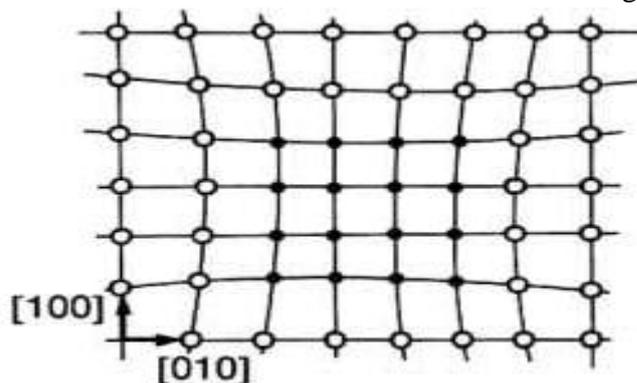


Figure 8 : précipité cohérent avec la matrice [9].

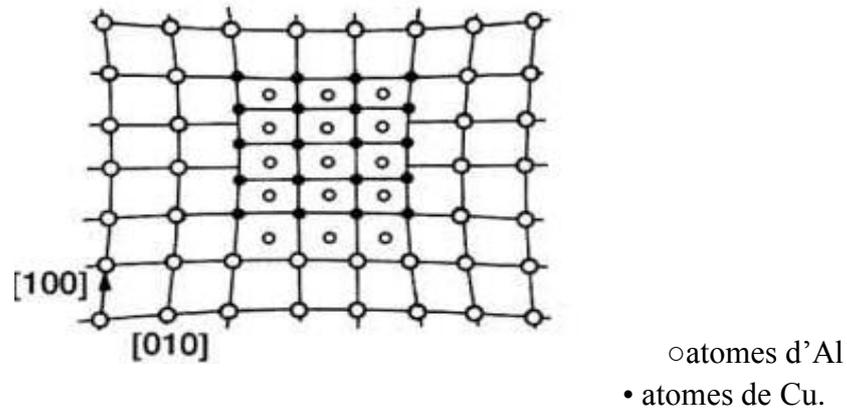


Figure 9 : précipité semi-cohérent avec la matrice [9].

- ❖ **Les dispersoïdes** sont de taille variant de vingt à quelques centaines de nanomètres, et se forment par précipitation à l'état solide. Ils ne peuvent pas être complètement dissous après leur formation. Ils ne sont pas cohérents avec la matrice et ne participent donc pas directement au durcissement structural.

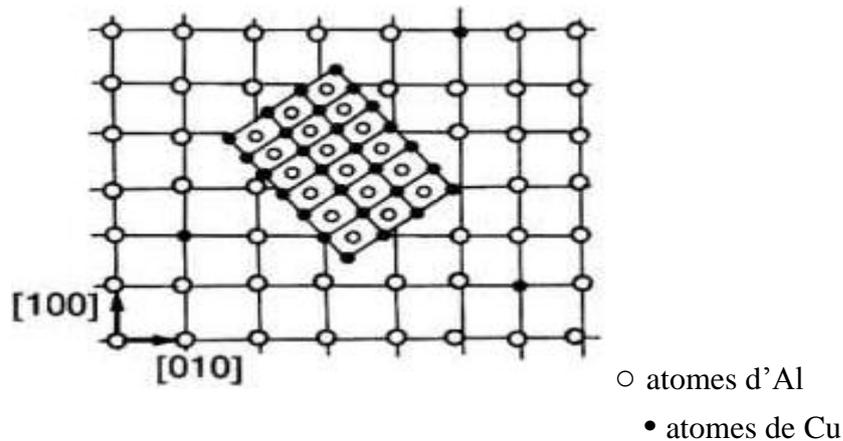


Figure 10 : précipité incohérent avec la matrice [9].

- ❖ **Les particules intermétalliques** sont dites « grossières » lorsque leur taille dépasse des dimensions de l'ordre du micromètre. Elles peuvent atteindre des tailles de l'ordre de la vingtaine de micromètres et ne participent donc pas au durcissement de l'alliage. Elles jouent en revanche un rôle important dans la sensibilité à la corrosion localisée. Il s'agit soit de phases ordonnées (composés définis, Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_2CuLi pour les alliages de la série 2000 ou MgZn_2 pour ceux de la série 7000) soit de particules issues d'une décomposition eutectoïde ($\text{Al}(\text{Cu},\text{Mn},\text{Fe})$ ou bien d'autres) et donc de composition en générale non homogène [9].

II.3. Mécanismes de durcissement

Le durcissement par la solution solide que provoque la solution figée, immédiatement après la trempe, augmente avec la concentration de l'élément en solution. Néanmoins, avec les 4% de Cu dans l'Al, cet effet reste faible, et dans la suite ne sert pratiquement à rien car il disparaît avec la précipitation du Cu. Mais les petites particules qui se forment provoquent un autre mécanisme de durcissement [9].

II.3.1. Contournement des précipités

Lorsque les particules sont plus dures que la matrice (solution solide résiduelle ou Al presque pur), les dislocations ne peuvent pas pénétrer les précipités. Elles sont obligées de les contourner (**Figure 11**). La contrainte de cisaillement critique dans le plan de glissement de la dislocation τ_c se calcule, de la manière suivante :

$$\tau_c = Gb/d \quad \text{Ici}$$

- ✓ G est le module de cisaillement,
- ✓ b le vecteur de Burgers,
- ✓ d la distance moyenne entre les particules.

On en déduit que la limite d'écoulement plastique est d'autant plus élevée que la distance entre les particules est petite. C'est pour cette raison que l'on cherche à avoir une dispersion des précipités très fine. Mais comme nous ne disposons pour la formation des précipités que d'une quantité de Cu limitée, leur taille devient très vite très petite. En dessous d'une taille critique, ils ne résistent plus à la contrainte de cisaillement τ_c et cèdent avant le contournement de la dislocation. La nouvelle contrainte de cisaillement critique τ_p , prise par rapport à l'ensemble, matrice et particules, dépend de la section des particules et de leurs propriétés mécaniques.

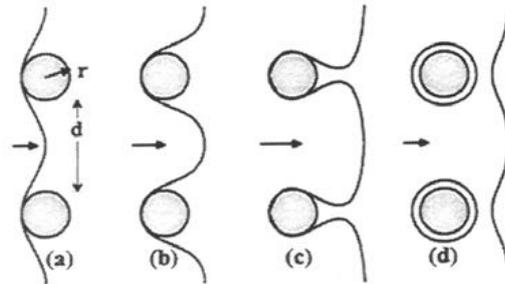


Figure 11 : Interaction d'une dislocation avec des particules dures (contournement). [12]

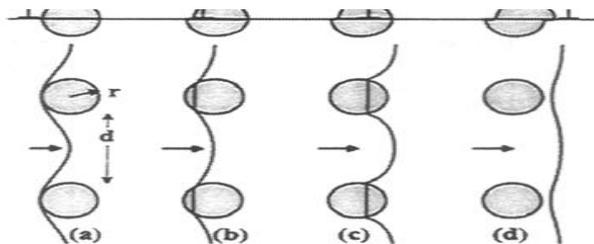


Figure 12 : Interaction d'une dislocation avec des précipités cohérents et cisillable. [12]

II.3.2. Cisaillement des précipités

Les zones GP naissant au début de la précipitation sont encore très petites et leur cohérence avec le réseau de la matrice permet un glissement sans déviation, sur un seul plan cristallographique. Elles cèdent au cisaillement (figure 12) mais, leur résistance augmente avec leur taille et la progression de la transformation en particules tetragonales (θ'') et semicohérentes (θ'). Le durcissement s'accroît jusqu'à ce que le contournement devienne compétitif et $\tau_c = \tau_p$. C'est dans cet état que le durcissement est optimal. En effet, le revenu prolongé provoque une coalescence des zones GP et θ' , et l'apparition d'autres phases avec des grains plus grossiers. Bien que cela fasse augmenter leur résistance, l'agrandissement de la séparation d facilite le contournement et adoucit le métal (survieillissement). Les courbes de revenu qui montrent la dureté en fonction du, temps de revenu montrent bien ce maximum (figure 13) [12].

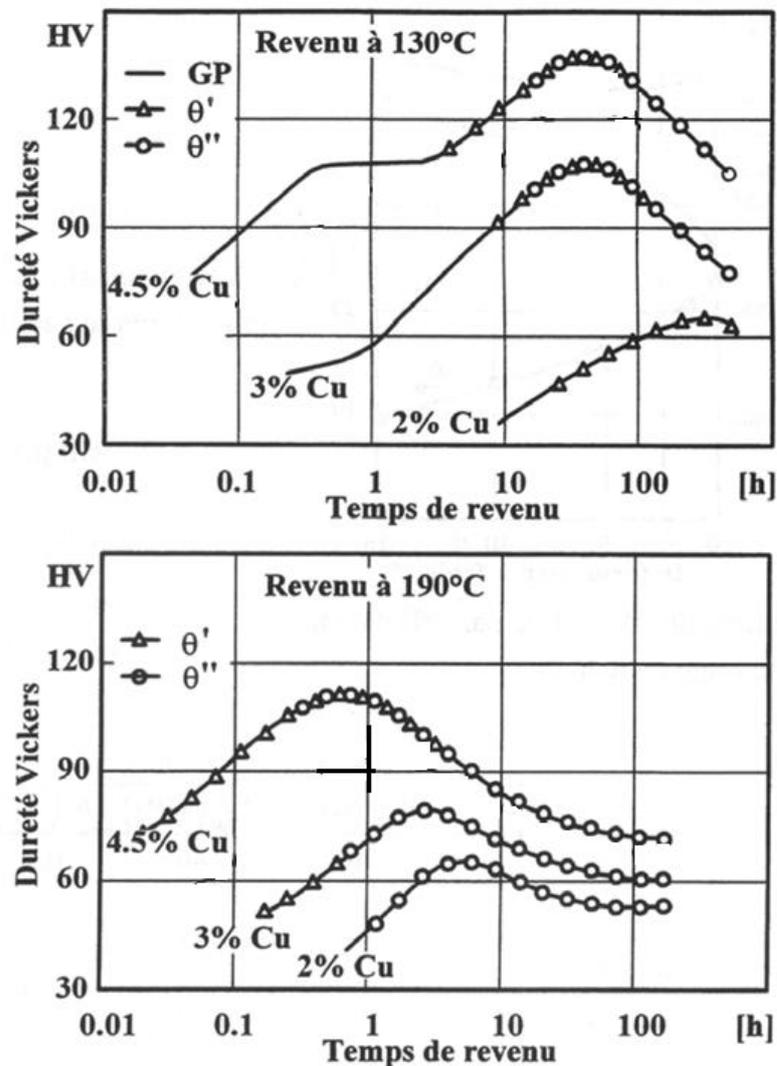


Figure 13 : Evolution de la dureté en fonction du temps de revenu à 130 et 190 °C pour l'alliage Al-Cu [12].

Chapitre III

Généralités sur la corrosion de l'aluminium et ses alliages

III.1. Définition de la corrosion

La définition de la corrosion n'est pas facile et de nombreux auteurs et comités internationaux essayent encore de donner au mot «corrosion» une acception aussi complète et aussi universel que possible. Dans ce qui suit, nous entendons par corrosion la détérioration lente, progressive ou rapide des propriétés de l'aluminium et de ses alliages : aspect, état de surface, caractéristiques mécaniques... du fait de l'environnement dans lequel ils sont placés : atmosphère, eau, eau de mer, solutions divers, milieux organique, milieux acide, etc. [6].



Figure 14 : Corrosion d'un supporte moteur en alliage d'aluminium [5].

III.2. Facteurs de la corrosion

La corrosion d'un métal ou d'un alliage dépend de très nombreux facteurs inhérents au milieu, au métal (facteur métallurgiques), aux conditions d'utilisation, dans ce qui suit quelques facteurs influençant la corrosion [6].

III.2.1. Facteurs liés au milieu

- ❖ **La nature du milieu :** Il n'est pas facile de dresser une typologie rigoureuse par rapport au phénomène de corrosion des métaux ainsi la corrosion n'est pas la même dans l'eau déionisée et dans le tétrachlorure de carbone. On peut distinguer les milieux suivants [3] :
 - ✓ **Milieux aqueux ionisés :** Les réactions électrochimiques de corrosion peuvent avoir lieu.
 - ✓ **Milieux organique non aqueux :** non ionisables, pas de réactions d'oxydoréduction.
 - ✓ **Milieux gazeux :** peu réactif à l'ambiante sauf en présence d'humidité.
 - ✓ **Milieux liquide :** contacte facile donc les réactions seront très probables.
 - ✓ **Milieux solide :** peu réactifs sauf en présence d'humidité.

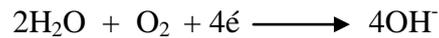
❖ **La concentration**

En règle générale la vitesse de corrosion augmente avec la concentration des agents réactifs de la corrosion mais la relation entre leur concentration dans l'air, dans l'eau, ect., et la vitesse de corrosion n'est pas forcément proportionnelle.

La tenue à la corrosion dans un milieu atmosphérique urbain est généralement liée au degré de pollution du site dans lequel est placé le matériel, cette pollution est liée à la présence et surtout à la concentration dans l'air de certains gaz tel que l'anhydride sulfureux SO₂, le gaz carbonique, etc. [6].

❖ **L'oxygène :**

L'oxygène est un oxydant et un facteur de corrosion en ce sens qu'il dépassive les cathodes en entretenant la réaction cathodique :



Ce qui a comme conséquence de favoriser la réaction d'oxydation à l'anode, c'est-à-dire la corrosion.

Avec l'aluminium ce n'est pas aussi simple parce que la corrosion est régie par le filme d'oxyde naturel, lequel a besoin d'oxygène pour se reconstituer par conséquent son rôle n'est pas déterminant preuve de l'exemple de dessalement de l'eau de mer qui a montré que la tenue à la corrosion est la même dans l'eau de mer airé ou désaérée [3].

❖ **Le pH** Le pH est un facteur très important du tenu à la corrosion des métaux et de leurs alliages dans les solutions aqueuses. Il est bien connu que l'acier résiste mal dans les milieux acides et que l'aluminium et ses alliages ne doivent pas être utilisé dans un milieu très alcalin. Il est donc indispensable de connaître le pH du milieu dans lequel on envisage l'utilisation d'un métal (courbe de Pourbaix).

D'autres facteurs sont également à considérer tels que l'addition éventuelle d'inhibiteurs qui peuvent atténuer plus ou moins l'influence de certains éléments présents dans l'eau ou du pH. C'est ainsi que le silicate de soude est un bon inhibiteur de l'attaque de l'aluminium dans les milieux très alcalins, tels que les produit de nettoyage : lessives... [6]

Il existe aussi d'autre facteurs liés au milieu citons entre autre : La température et la pression qui n'a pas d'influence sur la corrosion de l'aluminium [3].

III.2. 2. Facteurs métallurgiques

❖ **La composition des alliages** L'influence des éléments d'addition et des impuretés contenus dans les alliages sur leurs résistances à la corrosion a fait l'objet de nombreuses études depuis plus de cinquante ans. Les éléments d'addition qui entrent dans la composition d'un alliage peuvent très bien

améliorer certaines propriétés : caractéristiques mécanique, fragilité ... sans pour autant améliorer la tenue à la corrosion. La réciproque est également vraie. Des éléments d'addition peuvent avoir un effet plus ou moins néfaste sur la tenue à la corrosion d'un alliage comme par exemple certaines impuretés. Prenant à titre d'exemple les alliages de la série 2000 (Al-Cu) qui ne sont pas très apte à être utilisés dans un milieu mairain a cause de leur faible résistance à la corrosion contrairement aux alliages de la série 5000 (Al-Mg) [13].

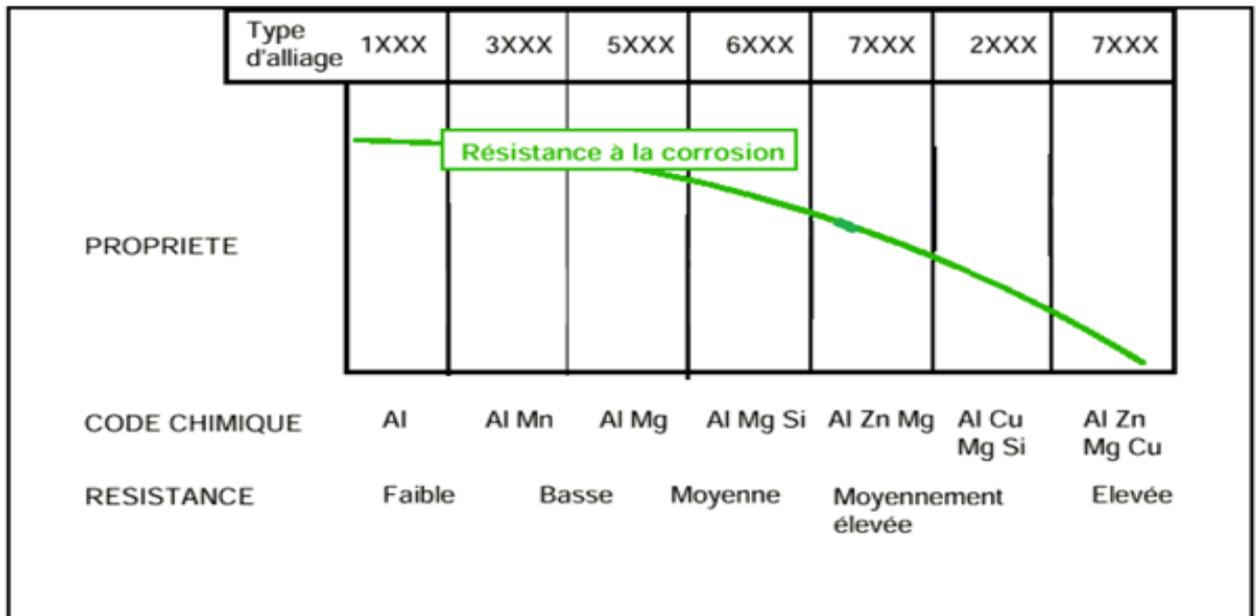


Figure 15 : Effet des éléments d'addition sur la résistance à la corrosion des alliages d'aluminium [5].

- ❖ **Le mode d'élaboration** Le mode d'élaboration d'un métal ou d'un alliage peut avoir une certaine influence sur la tenue à la corrosion. L'expérience montre que les alliages d'aluminium de fonderie ont, en générale une meilleure tenue à la corrosion atmosphérique que leurs homologues transformés par laminage ou par filage [6].
- ❖ **Les traitements thermiques** Les traitements thermiques : mis en solution, trempe et revenu qui concerne plus particulièrement les alliages à durcissement structural provoquent des changements dans la nature et dans la répartition des constituants métallurgique en présence dans le métal, ils ont une incidence très importante sur la sensibilité de ces alliages à certaines formes de corrosion, en particulier la corrosion intercrystalline et la corrosion sous contrainte [3].

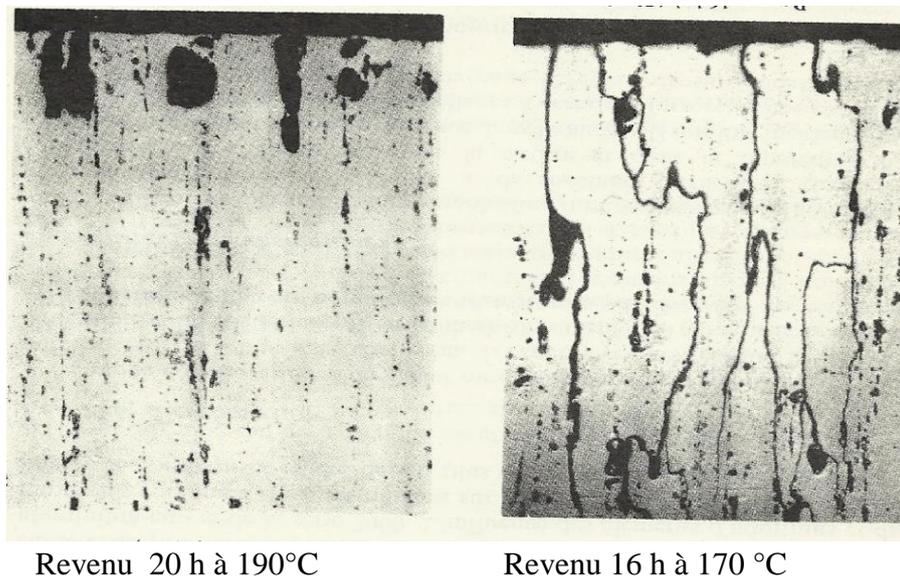
Exemples :

1. Les deux exemples qui suivent expliquent les conséquences des opérations de traitements sur la tenue à la corrosion.

Tableau VI : Perte de poids en mg dm^{-2} [3].

Durée d'attaque dans le réactif NaCl 3% HCl 1%	Température de l'eau de trempe			
	20 °C	35°C	50°C	70°C
4 heures	15	15	16	21
8 heures	20	22	27	37
12 heures	31	59	69	128

- D'après l'expérience la sensibilité à la corrosion intercrystalline augmente avec température du bain de trempe c'est-à-dire elle varie inversement proportionnel avec la vitesse de trempe.
- 2. Les figures ci-après montrent que la température et la durée de revenu ont une très grande influence sur la susceptibilité à la corrosion. (attaque dans le NaCl).

**Figure 16 :** Susceptibilité à la corrosion intercrystalline d'un 2024 en fonction des conditions de revenu [6].

- Un écart seulement de 20°C est suffisant pour sensibiliser l'alliage 2024 à la corrosion.
- ❖ **L'état de surface :** A une influence sur la tenue à la corrosion de l'aluminium. L'expérience montre que les surface rayées, grattées ou meulées sont des sites où se développent préférentiellement les corrosions [21]. Il est très fréquent de constater que les décapages, acide ou alcalins, affaiblissent la résistance à la corrosion par piqure de l'aluminium. En dissolvant la couche

d'oxyde initiale, plus épaisse qui recouvre bien les intermétallique cathodique de type Al_3Fe , ils favorisent ainsi le développement de la corrosion par piqures [22].

- ❖ **L'écrouissage** : L'écrouissage a un effet mineur sur la résistance à la corrosion de la plupart des alliages d'aluminium et de l'aluminium non allié. Il modifier tout au plus l'aspect des piqures quand la corrosion se manifeste sous cette forme [6].

III.2.3. Facteurs liés aux conditions d'emploi

- ❖ **La température d'utilisation** Elle favorise et augmente la tenue à la corrosion dans le cas d'un milieu aqueux et elle défavorise provoque la décomposition du métal dans le cas de certains milieu organique [6].
- ❖ **Les contraintes mécaniques** Elles peuvent dans certains cas entraîner la corrosion sous contrainte [6].
- ❖ **L'état de surface** Elle joue un rôle très important car les détériorations superficiels du métal par meulage, grattage, rayage sont toujours des sites où se développe préférentiellement la corrosion, donc il faut éviter au maximum les rayures, griffure... [6]
- ❖ **Le mode d'assemblage** : comme le rivetage, boulonnage, soudage, peuvent entraîner la corrosion s'ils ont mal faits.
- ❖ **Le contact avec d'autres métaux** : compte tenu de la situation de l'aluminium dans l'échelle des potentiels de dissolution des métaux usuels, c'est un point très important [6].

III.3. Notion électrochimiques de la corrosion de l'aluminium et ses alliages

III.3.1. Circonstances théorique de corrosion

Le potentiel standard de l'aluminium est très électronégatif, il vaut -1.66 V/ENH (Volt par rapport à l'électrode normale à hydrogène). Il s'agit donc d'un des métaux les plus faciles à oxyder. En contact avec un environnement oxydant tel que l'air ou l'eau, l'oxyde d'aluminium se forme de manière quasi instantanée. Cet oxyde étant très stable (compact et peu conducteur), il fait de l'aluminium un métal très peu sensible à la corrosion généralisée. Le diagramme de Pourbaix ou diagramme d'équilibre potentiel-pH (*Figure 17*), donne une information sur l'état d'équilibre de l'aluminium dans l'eau chimiquement pure à $25^\circ C$ en fonction du pH et de son potentiel.

D'après la figure il apparaît quatre domaines définissant trois états possibles de l'aluminium dans l'eau à $25^\circ C$:

- La corrosion ou dissolution de l'aluminium, correspondant à un degré d'oxydation +III. Ce domaine est défini pour des valeurs de pH inférieures à 4 et supérieures La corrosion ou dissolution de l'aluminium, correspondant à un degré

d'oxydation +III. Ce domaine est défini pour des valeurs de pH inférieures à 4 et supérieures à 9. L'importante concentration en H^+ ou en OH^- permet respectivement les réactions électrochimiques **(III-1)** et **(III-2)** :

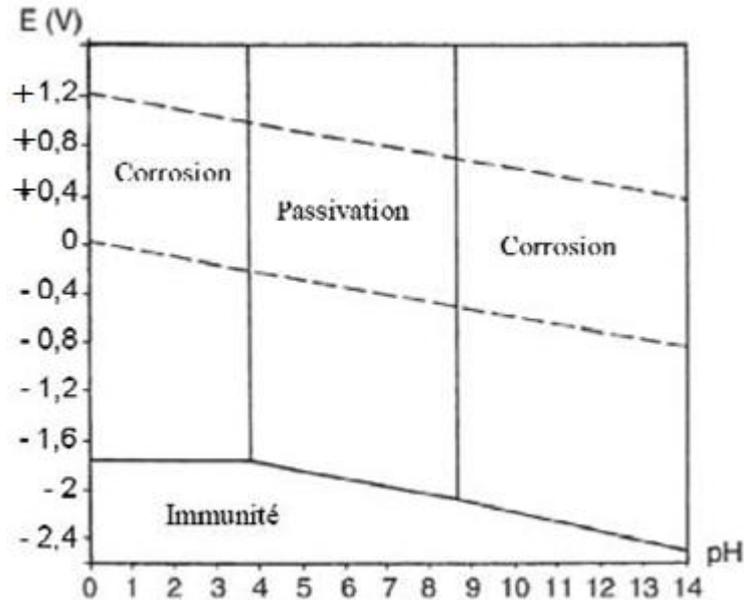
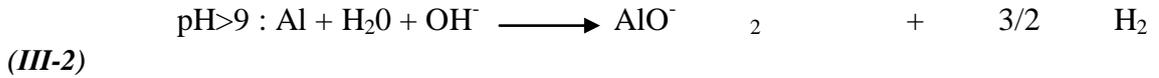
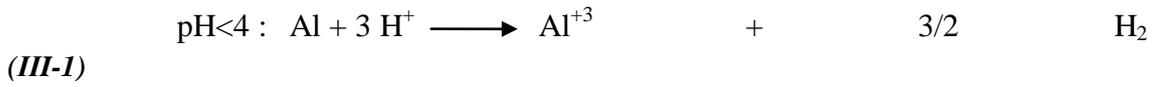


Figure 17 : Diagramme de Pourbaix du système Al-H₂O dans les cas d'une passivation par l'hydrargilite (Al₂O₃, H₂O) [14].

- La concentration en espèces dissoutes est par définition supérieure à 10⁻⁶ M.
- Le domaine de passivation est compris entre les pH 4 et 9, et est déterminé par la stabilité de l'oxyde ou hydroxyde d'aluminium au degré d'oxydation +III. Les faibles concentrations en H^+ et OH^- ne permettant pas les réactions **(III-1)** et **(III-2)**, la formation du film d'oxyde est la réaction prédominante :



- L'immunité est le domaine de stabilité de l'aluminium au degré d'oxydation ? zéro. Il correspond à des potentiels très négatifs, qu'il n'est pas possible d'atteindre en solution aqueuse [11].

III.3.2. L'aluminium métal passif

Dès que l'aluminium entre en contact avec un oxydant : oxygène, eau, il se recouvre en quelques millisecondes d'un film contenu l'alumine qui rend le métal passif. La formation du film d'alumine sur l'aluminium se fait par la migration des ions Al^{+3} du métal vers le film pour réagir avec l'oxygène de l'air ou du milieu environnant. L'épaisseur du film d'alumine varie entre 40 et 100 Å. Il se compose de deux couches (Figure 18) [11].

- La couche «barrière» : en contact directe avec le métal, très compacte, d'épaisseur entre 20 et 25 Å
- La couche la plus extérieure qui se forme par réaction de la précédente avec l'humidité de l'air, elle est constituée de boehmite ou de bayérite sa structure et ses propriétés dépendent de : temps de contact, nature, température du milieu.

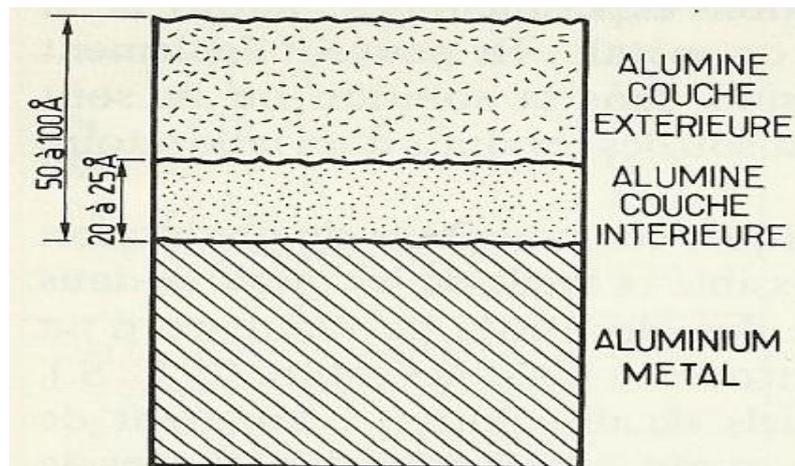


Figure 18 : Couche d'oxyde naturel sur l'aluminium [6].

III.4. Les formes de corrosion de l'aluminium et de ses alliages

La corrosion de l'aluminium peut se manifester sous deux formes plus ou moins décelables à l'œil nu : corrosion uniforme (généralisée) et corrosion localisée.

III.4.1. Corrosion uniforme (généralisée)

Elle se traduit par une diminution uniforme et régulière de toute la surface du métal. Elle se rencontre dans les milieux très acides ou très alcalins. La vitesse de corrosion est variée entre de quelques microns par an à quelques microns par heure selon la nature des acides ou des bases et l'utilisation des inhibiteurs.



Figure 19 : Corrosion générale d'une pièce en alliage d'aluminium [5].

III.4.2.corrosion localisée

La corrosion est dite localisée lorsque les zones cathodiques et anodiques sont physiquement séparées, ce qui n'est pas le cas pour la corrosion généralisée. Elle peut être induite par des hétérogénéités de microstructure du matériau, par certaines espèces agressives présentes dans le milieu électrolytique ou encore par des phénomènes de dépôts ou de confinement de l'électrolyte à la surface du matériau. Sont exposées ici les principales formes de corrosion localisée, à l'origine de la majorité des cas [11].

III.4.2.1. La corrosion galvanique

Est une forme de corrosion localisée dans la zone de contact entre deux matériaux de potentiels électrochimiques différents. Ce phénomène, pour survenir, nécessite outre un contact électrique entre les deux matériaux (courant électronique), un contact électrolytique (courant ionique). Ceci peut être observé par mise en contact de l'aluminium avec un métal plus noble comme l'acier par exemple, au sein d'un électrolyte ou atmosphère humide. C'est aussi le cas en général des alliages, contenant des phases intermétalliques de potentiel électrochimique différent de celui de la matrice. On parle alors de phénomènes de microcou »plage galvanique. La corrosion galvanique provoque la dissolution accélérée de l'élément le moins noble du couple, par polarisation anodique de ce dernier.

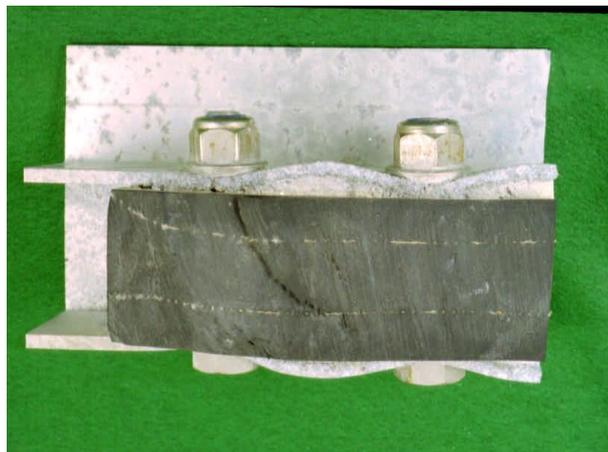


Figure 20 : Corrosion galvanique de l'Aluminium [5].

III.4.2.2. La corrosion par piqûres

La piqûration est une forme de corrosion localisée qui se traduit par la formation, sur la surface du métal, de cavités aux formes irrégulières dont le diamètre et la profondeur varient suivant plusieurs paramètres propres au métal, au milieu et aux conditions de service. La corrosion par piqûre est considérée comme l'un des principaux mécanismes de dégradation des alliages d'aluminium et en particulier du 2024-T351. La résistance à la corrosion de l'aluminium et de ses alliages est due à la formation, à sa surface, d'une couche d'oxyde naturelle (Al_2O_3) continue, uniforme et très peu conductrice qui bloque les réactions d'oxydo-réduction. La tenue à la piqûration dépend de la stabilité électrochimique du film et de la capacité de la surface à se repasser. Ces deux propriétés sont fortement influencées par le pH et les espèces chimiques présentes dans le milieu. Pour des pH proches de la neutralité, cette couche est stable (peu soluble) mais la présence d'ions halogénures associés à des espèces oxydantes telles que les protons ou l'oxygène dissous de la solution cette corrosion de ce métal passivable est déclenchée [11].

III.4.2.3. La corrosion intergranulaire

C'est, au même titre que la corrosion exfoliante et sous contrainte, une forme de corrosion structurale. Ce sont les hétérogénéités de microstructure qui en sont le moteur. En ce qui concerne les alliages de la série 2000, la sensibilité à la corrosion intergranulaire peut être induite par la précipitation aux joints de grains de particules riches en cuivre. Cette précipitation, se faisant à partir des atomes de cuivre de la solution solide, va induire une diminution de la concentration en cuivre de la zone adjacente aux joints de grains. Cette zone est dépourvue en cuivre et a donc un potentiel plus cathodique que les particules riches en cuivre des joints de grains mais aussi plus cathodique que la matrice d'aluminium elle-même. Un couplage galvanique peut donc avoir lieu, et aura donc comme conséquence la dissolution préférentielle et accélérée de cette zone adjacente aux joints de grains. Cette zone est par ailleurs appelée PFZ (Precipitate Free Zone) ou « dilute free zone ». En effet lors des étapes de précipitation structurale suivant la trempe, cette zone est dépourvue en soluté cuivre et ne sera donc pas le siège de la précipitation durcissante caractéristique de ces alliages [11].

III.4.2.4. La corrosion exfoliante (feuilletante)

Ou encore appelée feuilletante peut, dans le cas des alliages d'aluminium de la série 2000, venir dans la continuité de la corrosion intergranulaire. En effet, pour les produits transformés (laminés ou filés) la structure granulaire forme des plans parallèles à la direction de transformation. Ces plans peuvent être écartés par l'expansion volumique dû aux produits de corrosion, comme des feuillets se délaminant [11].

III.4.2.5. La corrosion sous contrainte

Est un mode d'endommagement de matériaux exposés à un environnement corrosif et soumis à une contrainte mécanique. Ce mode de corrosion est caractérisé par la propagation de fissures perpendiculairement à la contrainte mécanique et en général le

long des joints de grains dans le cas des alliages d'aluminium. La propagation de ces fissures de corrosion sous contrainte peut être décrite selon deux mécanismes [15] :

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

Le premier mécanisme est relativement intuitif, la contrainte jouant le rôle d'accélérateur de la corrosion intergranulaire détaillée précédemment. La dissolution anodique des joints de grains où zones adjacentes est accentuée par la contrainte mécanique qui empêcherait notamment une repassivation en pointe de fissure par concentration des contraintes [17] et déformation plastique.

- ❖ Un second mécanisme mettrait en jeu la fragilisation par l'hydrogène [18]. Les réactions de dissolution de l'aluminium (**III-1**) et (**III-2**) et de tout métal dans l'eau, produisent de l'hydrogène (produit de la réaction cathodique de réduction de l'eau). En pointe de fissure, l'hydrogène peut s'insérer dans le métal sous forme atomique, diffuser et s'accumuler dans les zones de déformation plastique où il est plus soluble. L'hydrogène va ensuite accentuer la décohésion intergranulaire et favoriser la propagation des fissures de corrosion sous contrainte.

III.5. Protections contre la corrosion

Il existe plusieurs types de protections de l'aluminium et de ses alliages :

- Modifier ses propriétés de surface c'est le cas du boehmitage, des conversions chimiques, de l'anodisation, du placage.
- L'isoler du milieu extérieur par un revêtement continu : peinture, vernis.
- Modifier les propriétés du milieu par des inhibiteurs [3].

III.5.1. Les traitement de conversion chimique

Ces traitements tendent à renforcer très légèrement la couche naturelle soit par augmentation de son épaisseur, soit par formation d'oxydes complexes dans des bains de phosphatation ou de chromatisations.

- ❖ **Boehmitage :**

Le boehmitage consiste à faire croître une couche d'oxyde naturel par réaction avec l'eau à partir de 75 °C pour former la boemite γ AlOOH suivant la réaction :



La formation de la boehmite commence sur les joints de grains et progresse ensuite à leur surface et est réalisé par contacte prolongé de quelque heures avec de la vapeur d'eau déionisée.

❖ Chromatation et phosphatation

Ce procédé consiste à traiter l'aluminium dans un bain de carbonate de potassium pendant 2 heures à 90 °C pour produire un film gris foncé. Ce procédé s'est modifié pour être connu sous le nom de «**M.B.V**» (Procédé Baner-Vogel modifié) qui consiste à immerger pendant 5 à 10 minutes dans un bain à 90-95°C contenant :

- ✓ Carbonate de sodium Na_2CO_3 50 g.l⁻¹,
- ✓ Bichromate de sodium $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (ou de potassium) $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ g.l⁻¹.

Mais ces traitements sont rarement utilisés en raison du grand choix de procédés récents qui sont plus rapide et aussi plus efficace [3].

On distingue aussi :

- Les conversions à base de phosphate de chrome trivalent pour lesquelles la couche est de coloration vert émeraude foncé.
- Les conversions à base de chromate de chrome, pour les quelles la coloration de la couche dépend de son épaisseur elle peut être plus ou moins jaune.

❖ Les conversions non chromiques

La toxicité du chrome hexavalent et le cout de son élimination des bains de traitement de surface font que la tendance actuelle est de remplacer la conversion chromique pour trouver des solutions de remplacement aux chromates [19] :

- ✓ Les sels de cérium.
- ✓ Le permanganate.
- ✓ Les oxydes de titane, de zirconium.
- ✓ Les sels de lithium.
- ✓ Les molybdate.

III.5.2. Les traitement d'anodisation

Ils permettent de former des couches d'oxyde d'épaisseur comprise entre 5 et 25 microns et dont les propriétés sont différentes de celle de l'oxyde naturel.

L'anodisation peut avoir des objectifs très différents, notamment :

- ✓ La décoration.
- ✓ La protection contre la corrosion atmosphérique.
- ✓ La résistance à l'abrasion et l'accroissement de la dureté superficielle.
- ✓ L'adhérence de revêtement organique (colles, vernis, peintures).
- ✓ La modification des propriétés électrique (isolation)
- ✓ La modification des propriétés optique (pouvoir réflecteur) [3].

Il existe plusieurs type d'anodisation possible on cite :

❖ L'anodisation sulfurique :

Parmi les procédés d'anodisation, le plus connu et le plus employé pour ses qualités de protection et ses possibilités de décoration et de coloration est l'anodisation sulfurique dont les conditions sont [7] :

- Bain à $200 \pm 20 \text{ g.l}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$,
- Agitation du bain pour avoir une température maximale de $20 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Absence d'impuretés dans le bain, en particulier, d'ions Cl^- .
- Densité du courant continu : $1,5 \pm 0,2 \text{ A.dm}^{-2}$.
- Teneur en aluminium dissous dans le bain : 15 g.l^{-1} maximum.

Selon les applications on définit les épaisseurs d'anodisations suivantes :

- ✓ 5 et 15 microns pour les applications décoratives et intérieures
- ✓ 15 et 20 micros pour les applications extérieures (bâtiment)

Il existe d'autres types d'anodisation nous citons principalement :

❖ Anodisation à l'acide chromique

Utilisé pour les alliages aéronautiques des familles 2000 et 7000.

- ✓ Tension 40 V,
- ✓ Température $40 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ Temps 40 min
- ✓ CrO_3 à 40 g.l^{-1}

Malgré leurs faible épaisseur les couches obtenues ont une très bonne tenue en corrosion, elles sont moins dures plus souples et flexibles.

❖ Anodisations spéciales

- **Anodisations dures** : on peut obtenir des films de grande épaisseur de 100 à 200 microns dont la dureté atteint 500 à 600 Vickers
- **Anodisation autocolorées** : grâce à des électrolytes organiques qui permettent de former des couches d'oxyde naturellement colorées. Ces procédés sont utilisés sous diverses dénominations commerciales :
 - ✓ Kalcolor de Kaiser,
 - ✓ Duranodic d'Alcan
 - ✓ Eurocolor 100 de Pêchiney, etc

III.5.3. La peinture et les revêtements organiques

La préparation de surface est le facteur le plus important pour l'obtention d'une bonne adhérence et bonne protection par peinture. Les traitements de conversions chimiques décrites précédemment et quelque fois les traitements d'anodisation constituent les meilleures bases d'accrochage pour les vernis et peinture sur l'aluminium.

Les installations de préplaquage comportent les opérations de successives de dégraissage, conversion chimique, avec rinçage et séchage application de peinture par rouleau et four de cuisson par passage [6].

III.5.4. Placage

C'est une protection cathodique. Il est possible d'assurer la protection de certains alliages d'aluminium par un placage qui constitue l'anode consommable. On réalise ainsi par calaminage des complexes comprenant :

- ✓ L'alliage de base encore appelé « âme ».
- ✓ Le placage sur l'une ou les deux faces de l'âme, d'épaisseur comprise entre 5 et 10 % de l'épaisseur totale de complexe [6].

III.5.4. La protection cathodique

La protection cathodique consiste à placer le métal à protéger en situation de cathode pour cela il faut lui associer un métal dont le potentiel de dissolution dans le milieu sera plus électro-négatif, la différence de potentiel entre les deux métaux étant d'au moins 100 mV. Elle est peu répandue et est utilisée pour la protection des coques de certains bateaux de plaisance et les réservoirs à grandes dimensions, ... Elle peut se faire :

- **Par anodes consommable** : Cette méthode est la plus employée pour :
 - ✓ Alliages d'aluminium spéciaux au mercure (0,03 à 0,05 %), à l'indium (0,015 à 0,025 %) ou à l'étain (0,1 à 0,2 %).
 - ✓ Magnésium.
 - ✓ Zinc.
- **Par anodes non consommables** : Ou aussi reconnu par protection cathodique sous courant imposé. On impose un débit de courant continu entre l'anode (non consommable) et la cathode (le métal à protéger) de sorte que le potentiel de la cathode soit suffisamment abaissé. Quand la conductivité du milieu est faible. [2]

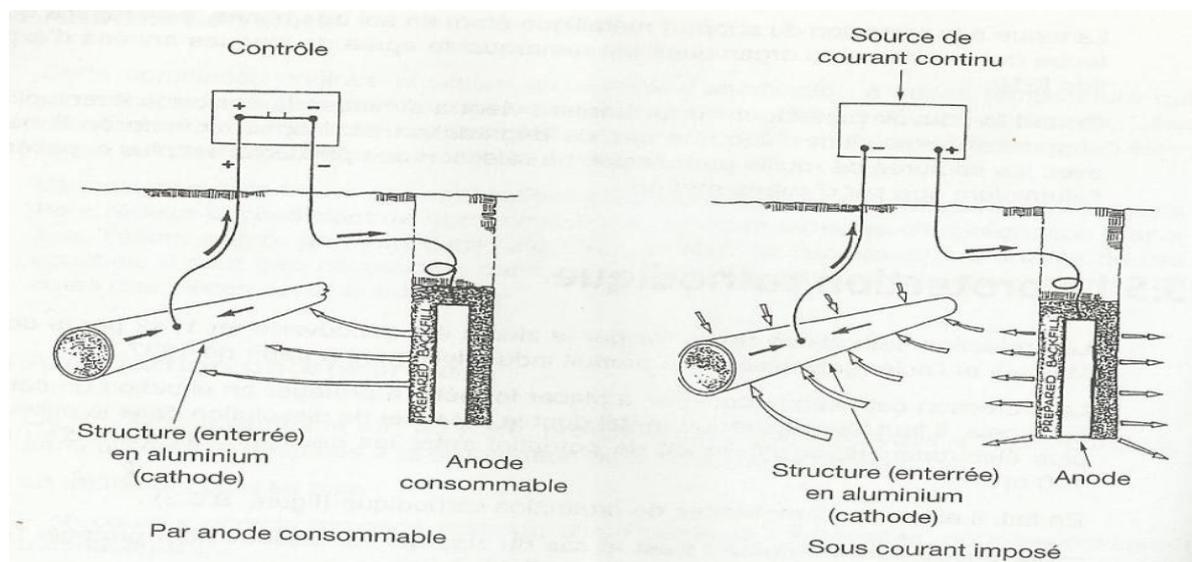


Figure 21 : Protection cathodique [20].

Un inhibiteur de corrosion est une substance qui ajoutée en faible concentration à un milieu, permet d'annuler ou de réduire son agressivité vis-à-vis d'un métal. Ils agissent en créant une barrière entre le métal et le milieu.

Les mécanismes d'action des inhibiteurs ne sont pas tous connus, ce sont :

- Des produits qui fixent le pH du milieu à une valeur comprise entre 5 et 8 qui est une zone des pH où l'aluminium et ses alliages sont le plus stables. Ce sont en générale des solutions «tampons» d'acides faibles et de leurs sels (acide acétique + acétate de soude ...)
- Des produits formant un composé insoluble et adhérent à la surface de l'aluminium. Ce sont des composés minéraux ou organiques qui vont se fixer préférentiellement sur les sites anodiques ou cathodiques, c'est pourquoi on classe parfois les inhibiteurs en inhibiteurs :
 - ✓ Cathodique : magnésium, calcium
 - ✓ Anodique : phosphate, molybdate, chromate, silicate, tungstate, permanganate, nitrite ... [6]

Deuxième partie

PROCEDURE EXPERIMENTALE

Dans cette partie on présente les techniques et les outils expérimentaux de mesure et d'observation, pour mettre en exergue quelques notions théorique de la partie théorique précédente ...

Chapitre IV

Présentation du
matériel et
manipulation

Le cycle théorie expérience est un circuit fermé par qu'il faut des notions théorique pour entamer l'expérience puis l'expérience affirme la théorie et aboutit a de nouveaux résultats qui vont être utilisé de nouveau comme notions théoriques. Dans le cadre d'étude de cette partie nous allons illustrer les différentes étapes de préparation des échantillons, les traitements thermique, l'étude micrographique, l'étude de l'évolution de la dureté en fonction de la température et en fonction du temps, l'étude de l'évolution de la corrosion en fonction de l'état structural de l'échantillon.

IV.1. But de travail

Ce travail a pour but de :

- Etudier et observer la microstructure des échantillons de l'aluminium «2024 » pour ses différents états :
 - ✓ Brute.
 - ✓ Après homogénéisation et trempe.
 - ✓ Et après revenu.
- Etudier et dessiner les courbes de l'évolution de la dureté d'un échantillon en alliage d'aluminium «2024 » en fonction du temps de maintien dans un four à résistance « revenu » à température constante.
- Puis étudier et dessiner les courbe de l'évolution de la dureté en fonction de la température pour un temps de maintien fixe.
- Etudier et observer la microstructure des échantillons en question après avoir subit des traitements de durcissement structural et une corrosion en les immergeant dans une solution acide «HCl».
- Interpréter et déduire des résultats de ses études.

IV.2. Matériau de l'étude

Afin d'étudier le comportement en corrosion de l'aluminium dans un milieu acide après traitement de durcissement structural on a reçu des échantillons d'un alliage à base d'aluminium et de cuivre comme élément d'alliage, de la famille 2000, plus exactement le 2024, Sous forme de pastilles de diamètre 20 mm et d'épaisseur de 3 mm et de nom commercial Duralumin fourni par Air Algérie.

❖ Composition chimique

Le matériau à étudier a pour composition chimique la suivante.

Tableau VII : Pourcentage massique des éléments d'alliages de l'alliage 2024.

Éléments chimique d'addition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	V	Ti
Pourcentage massique	0.5	0.5	3.8-4.9	1.2-1.8	1.2-1.8	0.1	-	0.25	-	0.15

IV.4. Equipements et caractérisation

IV.4.1. Four à résistance

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



Figure 22 : Photo réelle d'un Four à résistance.

IV.4.2. Polisseuse.

Pour le polissage on a recourt à une polisseuse équipée d'un touret (assure un flux d'eau continue, une régulation digital de la vitesse de rotation du porte abrasif, avec deux sens de rotation) et des disques d'abrasifs de granulométrie de (P120 - P 180 - P 400 - P 600 - P800- P1000 – P1200).



Figure 23: Photo réelle d'une polisseuse de type FOCIPOLE.

IV.4.3. Microdurometre.

❖ Essais de dureté

Les essais de dureté consistent à enfoncer un pénétrateur dans le métal. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte qui est d'autant plus grande que le métal est mou. La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte.

$$H = \frac{F}{S}$$

Les essais les plus classiques sont les essais BRINEL, VICKERS et ROCKWELL.

❖ Essais de dureté Vickers :

L'essai consiste à imprimer dans la pièce à essayer un pénétrateur en forme de pyramide droite à base carrée d'angle de sommet 136° sous une charge F et à mesurer la diagonale d de l'empreinte laissée sur la surface après l'enlèvement de la charge.

On mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de l'empreinte considérée comme une pyramide droite et on lit cette information à la charge appliquée par la formule qui relie la charge et le diamètre moyen de la diagonale de l'empreinte, d'après la norme (NF A 03-154)

$$HV = \frac{2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \Rightarrow HV = 1854.4 \frac{P}{d^2}$$

Avec :

P : Charge appliqué.

d : Valeur moyenne de la diagonale de l'empreinte

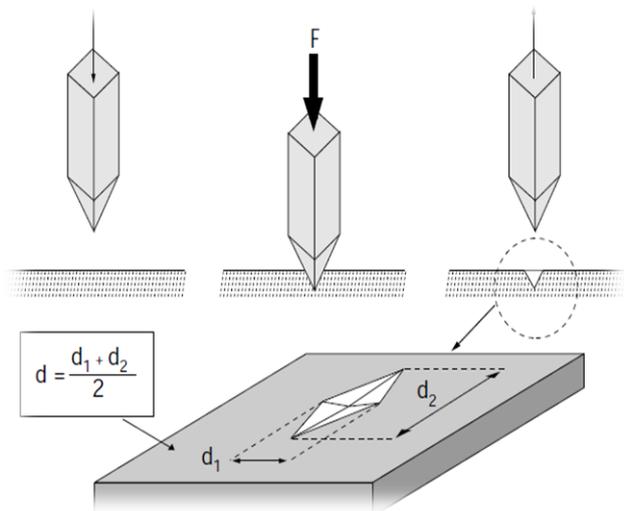


Figure 24 .a) : Microdurometre

b) : Schéma illustratif de la mesure de la dureté

IV.4.4. Microscope optique

Les différentes analyses ont été effectuées grâce à l'utilisation d'un microscope optique « Olympus 250 » muni d'un logiciel « **Archimed** » qui permet de lire et sauvegarder les images sur le micro-ordinateur (figure 25).

L'avantage de ce microscope optique, outre sa grande facilité d'utilisation, est de permettre l'observation de grandes surfaces et de collecter ainsi une information globale sur l'aspect de la surface observée. Il est relié à un micro-ordinateur et permet l'observation des échantillons avec un agrandissement qui varie de 50 à 1000 fois (Figure 25).

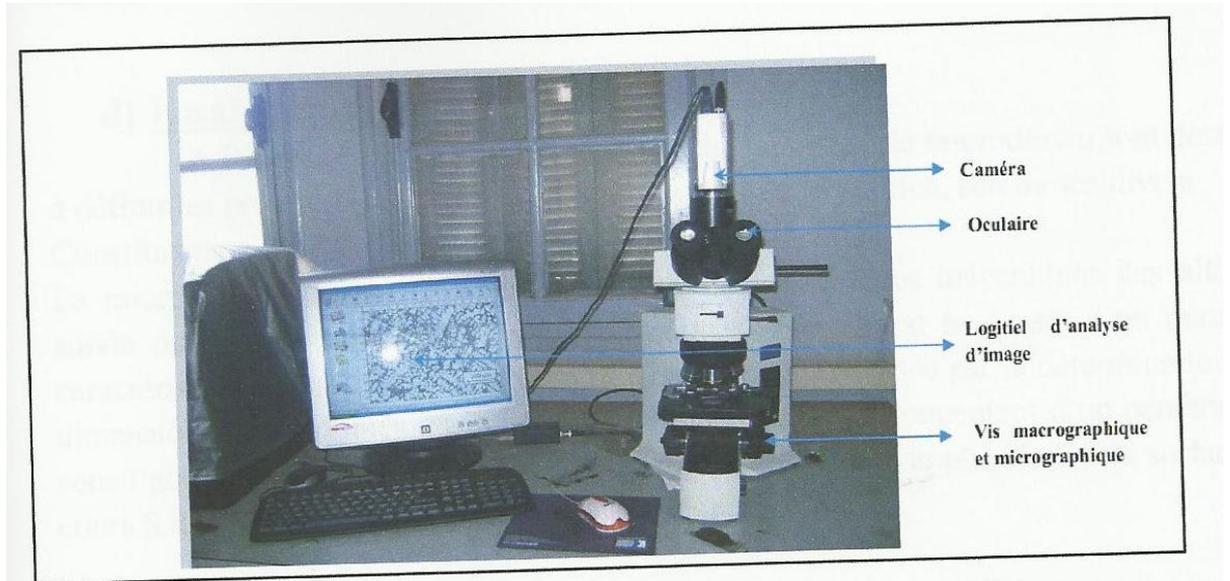


Figure 25 : microscope optique « Olympus ».

❖ Principe de fonctionnement

Le microscope est constitué (figure 26) de :

- D'un objectif et d'un oculaire qui sont en réalité des systèmes épais composés de plusieurs lentilles
- De deux diaphragme DO et DC, respectivement diaphragme d'ouverture et diaphragme de champ de l'oculaire.

L'objectif donne à l'image AB une image (intermédiaire) réelle et agrandie A'B', on place ensuite l'oculaire de sorte que l'image intermédiaire se trouve exactement à la position de son foyer objet FO_2 . Dans cette configuration l'image reprise par l'oculaire donne une image virtuelle à l'infini, observable par l'œil nu. Le grossissement globale du microscope est donc le produit du grossissement de l'oculaire et le grossissement de l'objectif.

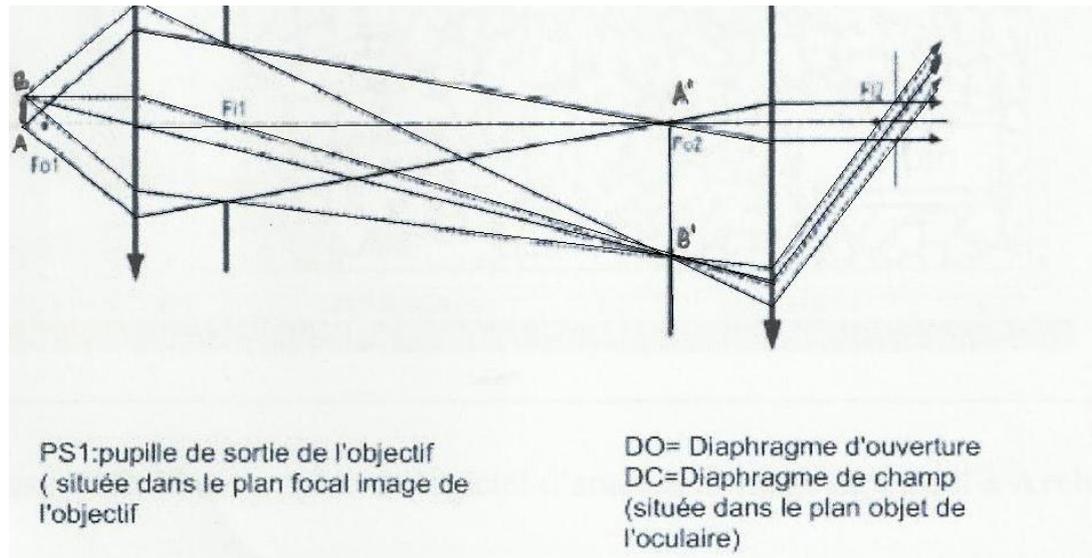


Figure 26 : Schéma du principe de la structure du microscope sur l'aspect optique.

- ❖ **Laminoir** : c'est un dispositif de déformation à froid semi-automatique de deux cotés un laminoir et une tréfileuse.

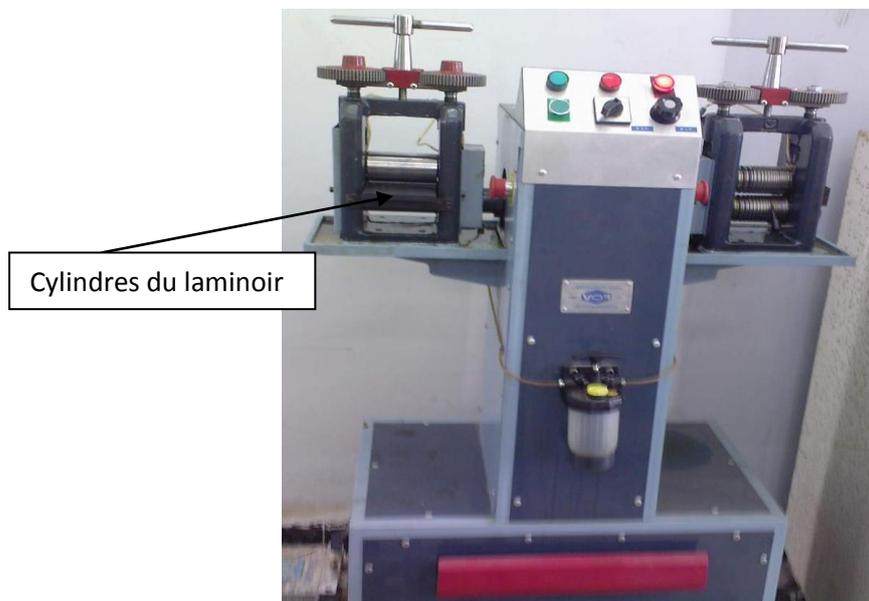


Figure 27 : photo réelle d'un laminoir.

- ❖ **Enrobeuse** : C'est un dispositif qui permet l'enrobage à chaud des échantillons a fin de pouvoir effectuer le polissage en sécurité et d'une manière facile (Figure 28)



Figure 28 : Photo réelle d'une enrobeuse à chaud

❖ **Bain des essais de corrosion**

Le bain est une solution de HCl de 3,5 % de pureté.

- ❖ **Découpeuse :** est un dispositif qui sert à découper les échantillons en assurant un flux d'eau continu pour éviter tout changement structural due à l'augmentation de la température



Figure 29 : Photo réelle d'une découpeuse.

IV.5. Manipulation

- ❖ **Découpage** : Tout au début à l'aide de la découpeuse on découpe les pastis d'aluminium en quatre petits échantillons.

IV.5.1. Traitements thermiques

- ❖ **Traitement d'homogénéisation** : Dans le four à résistance on met les échantillons d'aluminium à une température de 500 °C a fin de les homogénéiser.

- ❖ **Traitements mécaniques**

Nous avons réalisé des traitements de laminage à froid. Ces traitements sont effectués en plusieurs petites passes dans un laminoir constitué de deux rouleaux tournant en sens inverses (Figure 19) .Le taux de laminage τ est un coefficient caractéristique de la variation relative de section d'un produit au cours d'un laminage.

$$\tau = \frac{e_0 - e_f}{e_0} \times 100$$

Où e_0 et e_f sont respectivement les épaisseurs initiale et finale de l'échantillon

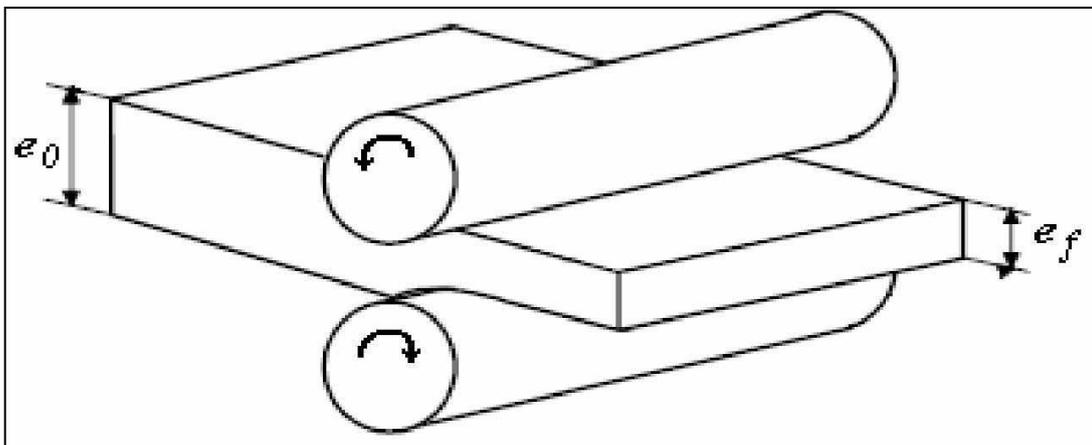


Figure 30 : Schéma de l'opération de laminage.

- ❖ **Traitement de revenu « isotherme ».**

D'abor il est important de réduire le temps de passage entre le four et le bac au minimum nécessaire au transfert.

Toujours dans le four à résistance on met nos échantillons à des températures **fixes** 100 °C, 150°C et 200°C et on fait varier le temps 30 minutes, 1heurs, 2 heurs ... ect. Puis on mesure la microdureté pour chaque couple (température, temps) comme indiqué dans les tableaux suivants :

❖ **Traitement thermique de revenu « isochrone ».**

Cette fois ci on refait la même expérience précédente et on fait varier la température en fixant le temps à, 30 minutes

IV.5. Observation micrographique

La connaissance de la structure métallurgique des matériaux étudiés est un point essentiel pour la compréhension des phénomènes intervenant en corrosion. La technique d'observation utilisée dans cette étude est la microscopie optique elle a pour but la mise en évidence de la microstructure de l'échantillon observé. L'obtention de la surface d'examen nécessite une série d'opérations allant du découpage des échantillons à l'attaque chimique. Les observations micrographiques sont effectuées par le microscope optique dont on a parlé précédemment.

❖ **Préparation des échantillons**

Après avoir effectué le découpage des échantillons et les différents traitements thermiques on fait :

- **Enrobage à chaud :** Consiste à mettre l'échantillon dans l'enrobeuse avec une poudre en polymère thermodurcissable, après mis en marche l'échantillon va être enrobé par pression .Cette étape permet d'avoir une surface plane et une meilleure manipulation des échantillons pendant le polissage.
- **Polissage :** Le polissage mécanique réalisé manuellement vise à rendre les surfaces uniformes. Il consiste à abraser la surface, sous une charge constante, à l'aide de papiers abrasifs de grade progressif, montés sur des tourets de polissage dont la vitesse est de 400 tr/min. La diminution de la taille des grains abrasifs d'un papier à l'autre permet d'affiner progressivement l'état de polissage et de diminuer la rugosité moyenne de la surface à observer. Compte tenu de la différence de dureté existant entre le carbure abrasif et la matrice métallique, la surface à polir se couvre de rayures de plus en plus fines, caractéristiques des sillons laissés par les grains du papier. Le polissage à la main des échantillons permet d'obtenir une surface plane, non rugueuse et d'éliminer la couche d'oxyde superficielle. Le polissage a été effectué à l'aide de la polisseuse (figure 23) en deux étapes :
 - ✓ Polissage grossier (abrasion) : on a fait passer les échantillons enrobés sur des papiers abrasifs de granulométrie décroissante de, 120, 180, 400, 600, 800,1000, 1200.
 - ✓ Polissage de finition : il a été réalisé sur du papier feutre à l'aide d'une suspension d'alumine (oxyde d'aluminium) de 0,3 et 0,05 μm .
 - Chaque séquence dure environ 2 minutes avec un refroidissement continu à l'eau de robinet.

- Après chaque changement de granulométrie (papier abrasif) un rinçage des l'échantillon et des papiers est nécessaire pour éviter la contamination des échantillons.



Figure 31 : Bain ultrasonique.

- Après polissage les échantillons sont mis dans un bain ultrasonique (figure) pour 5 minutes puis rincés à l'eau distillée ensuite séchés à l'air chaud.
- ❖ **Attaque chimique** : Après avoir transformé la surface à observer en un miroir, une attaque chimique de cette surface est nécessaire à fin de donner des différences de relief ou coloration, entre les différents constituants ou entre les cristaux différemment orientés d'un en même phase. Après polissage mécanique et de finition, nous avons procédé à une- attaque chimique de la surface par une solution dite de KILLER (tableau VIII).

Tableau VIII : Composition chimique de la solution KELLER.

Désignation	Composition chimique	Condition d'utilisation	Emploi
KELLER	2,5 ml acide nitrique HNO_3 1,5 ml acide chloridrique HCl 1 ml acide fluoridrique HF 95 ml eau H_2O	Séchage de l'échantillon	L'attaque se fait de 7 à 12 secondes

- ❖ Après la préparation des échantillons par polissage puis l'attaque chimique on met les échantillons sous les oculaires du microscope à fin de prendre des photos pour les différents grossissements qui existent pour aller les interpréter dans le chapitre qui suit.

IV.6. Mesures de la microdureté Après avoir fait les traitements thermiques puis le polissage, les mesures de microdureté sont prises à l'aide du microduromètre (Figure) et notées dans des tableaux.

IV .7. Observation de la corrosion

Après avoir pris la mesure de la microdureté on refait le polissage a fin d'éliminer la couche due au précédente attaque par le KELLER, puis on immerge les échantillons dans une solution acide de « HCl » 3.5 % de pH ... un milieu agressif pendant 10 minutes puis on fait une autre observation micrographique pour déterminer le type de corrosion (par piqure ou bien intergranulaire) qui s'est déroulé pendant l'immersion dans la solution acide puis on note les observations.



Figure 32 : Bain de HCl

Chapitre V

Résultats

et

interprétation

Dans ce chapitre on va essayer de mettre en évidence l'effet des traitements mécanique et thermique sur la microstructure et la dureté de notre alliage et aussi tracer et discuter chaque portion des courbes isotherme et isochrone de la dureté en fonction respectivement de la température et du temps puis on va interpréter les résultats obtenus par les essais de corrosion c'est-à-dire type et mécanisme de corrosion.

V.1. Homogénéisation

Afin d'homogénéiser la solution solide, les échantillons ont été portés entre 475 et 495°C pendant 5 h.

Les particules intermétalliques grossières formées pendant la solidification sont insolubles à cette température, mais les hétérogénéités macroscopiques de composition sont éliminées.

V.2. Effet du traitement mécanique (déformation plastique)

Les échantillons homogénéisés peuvent ensuite être laminés à froid pour atteindre l'épaisseur désirée (70% de l'épaisseur de l'échantillon). Cette opération fragmente les grains redistribués dans la direction de laminage. Après cette étape, l'alliage présente une structure fibrée fortement anisotrope, constituée de gros grains aplatis et étirés dans la direction de laminage (Figure 33).

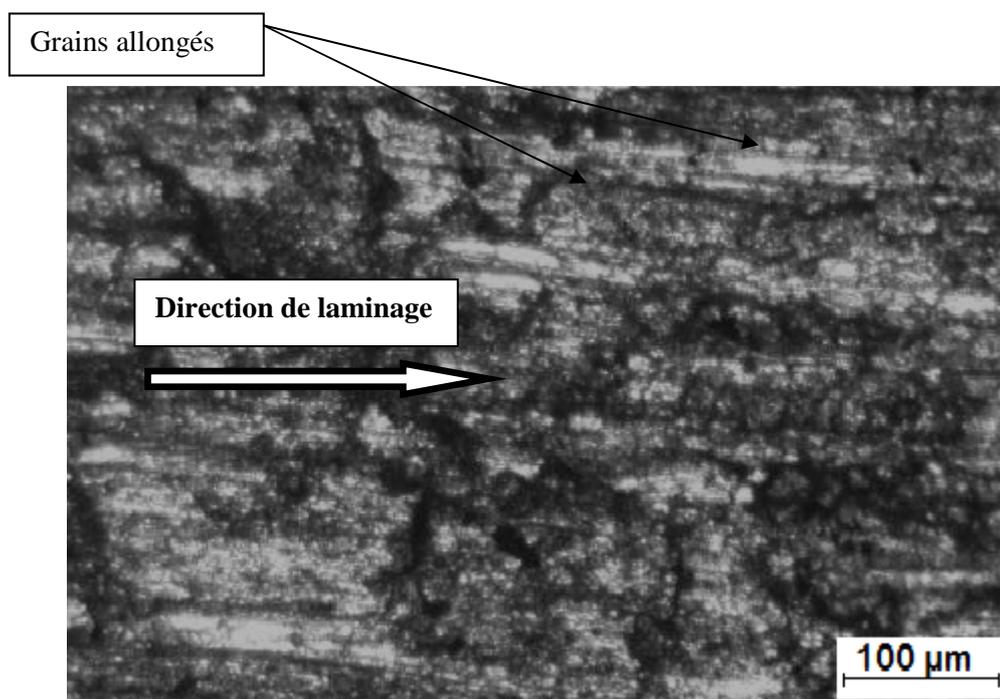


Figure 33 : Photomicrographie optique de l'échantillon après laminage.

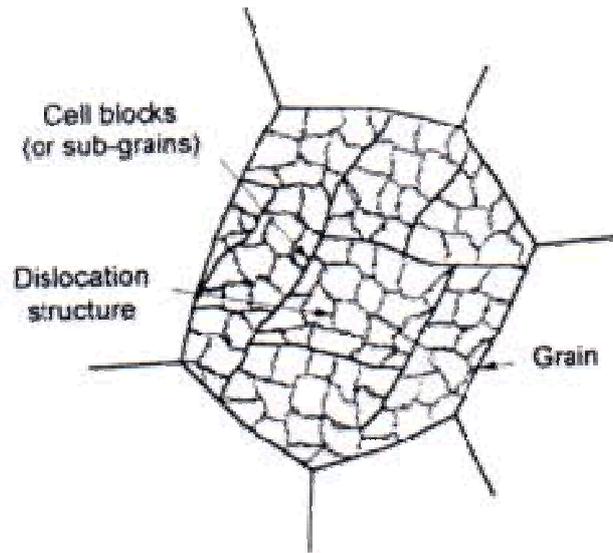


Figure 34 : diagramme schématisé de la sous-division d'un grain pendant la déformation [23].

Quand le matériau subit la déformation, des dislocations sont introduites et leur nombre augmente proportionnellement à la quantité de déformation. Les dislocations interagissent entre elles. Ceci gêne le mouvement des dislocations et par ce moyen rend le matériau plus dur.

Le travail à froid augmente non seulement la résistance du matériau, mais aussi, la dureté et la conductibilité électrique. Il réduit la ductilité en même temps.

V.3. Traitement de recristallisation

A la température de recristallisation on a effectué un recuit de recristallisation et on a obtenu les photomicrographie suivantes :

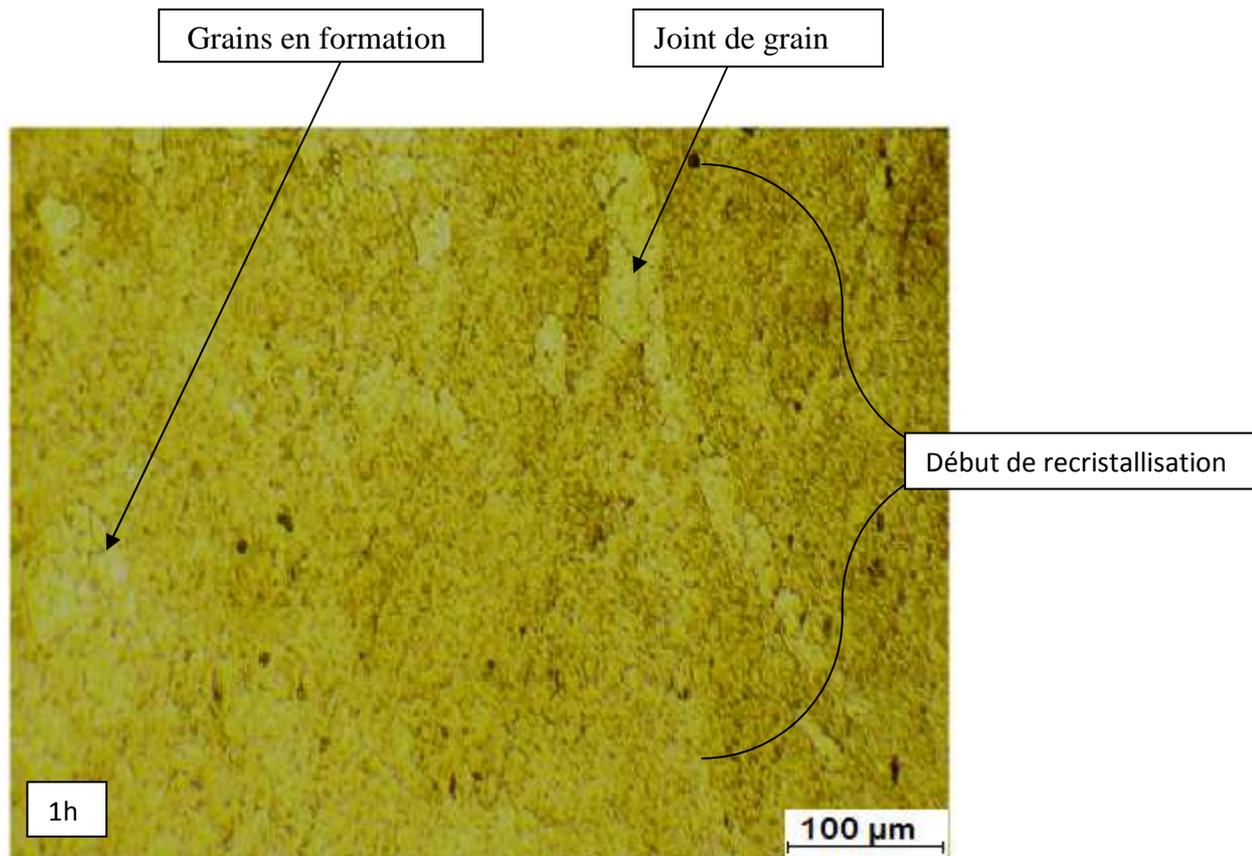


Figure 35 : microstructure de l'alliage après recuit à T_{rec} pendant 1h.

On voit clairement un début de recristallisation sur la droite de la (figure 35) et une formation de nouveaux grains sur la gauche . cette recristallisation est fonction du temps, les grains vont continuer de se former avec le temps (figure 36) jusqu'à envahir tout le volume de l'échantillon .

Le schéma de la (figure 37) illustre la variation de la dureté ainsi que la micrographie en fonction du temps de recuit.

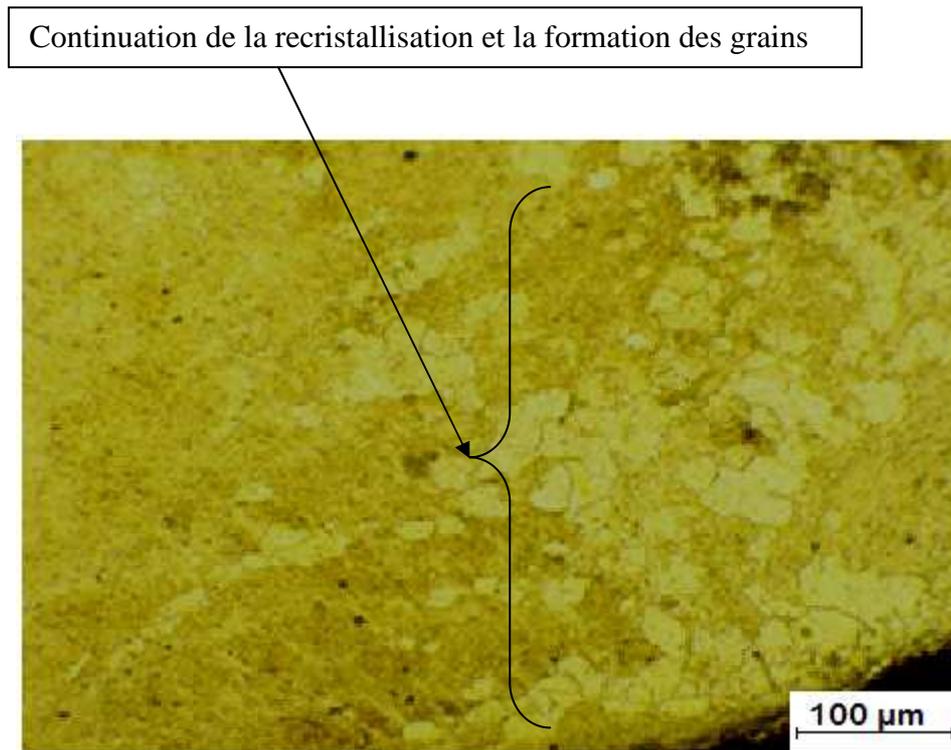


Figure 36 : microstructure de l'alliage après recuit à T_{rec} pendant 2h.

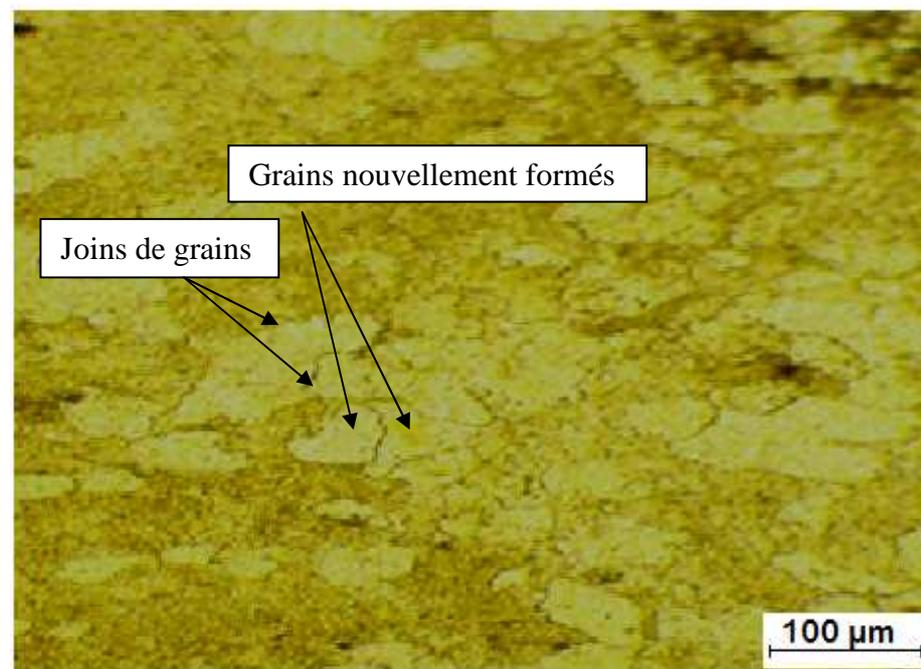


Figure 37 : microstructure de l'alliage après recuit à T_{rec} pendant 4h .

Dans cette figure la recristallisation de l'alliage est presque complète .

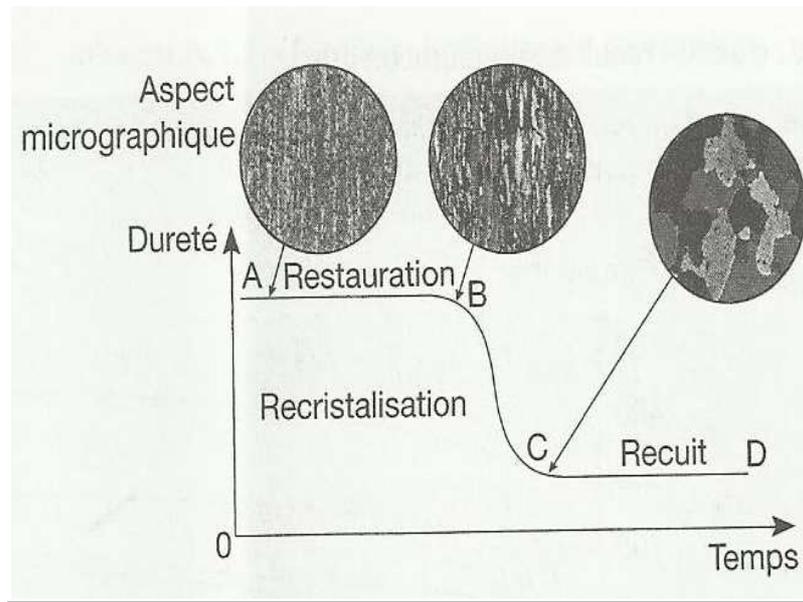


Figure 38: représentation schématique de la dureté et la micrographie en fonction du temps [2].

Les traitements de recuit de recristallisation augmentent de façon considérable la plasticité mais diminuent, en contrepartie, la limite d'élasticité, la charge de rupture et la dureté

V.4. Traitements thermiques de revenu

V.4. 1. Effet de laminage

Les résultats obtenus pour des traitements de revenu à température constante pour des temps qui variaient pour un échantillon laminé et autre non laminé sont présentés dans la (figure 39) ci après :

La déformation plastique introduit un durcissement par écrouissage. La déformation plastique accélère l'établissement de l'état d'équilibre, réduit sa durée et accélère la précipitation de la phase S en raison de la forte densité de dislocations, favorisant la diffusion, introduites par déformation plastique.

La précipitation de la phase d'équilibre S aux joints de grains est plus importante dans l'échantillon déformé que dans l'échantillon non déformé.

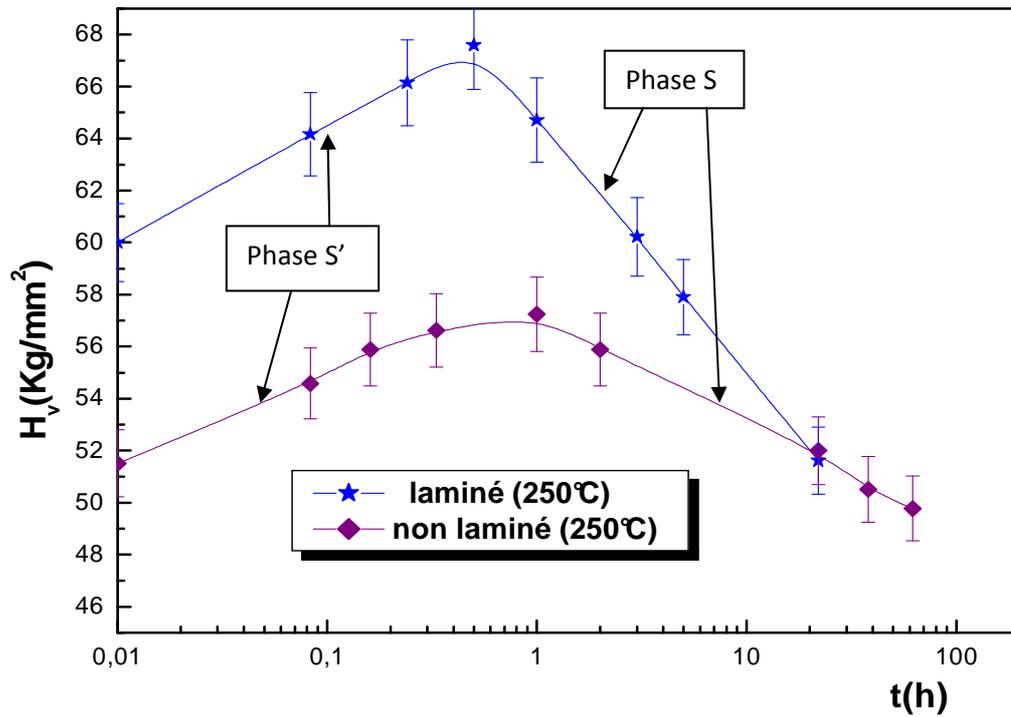


Figure 39: Isothermes de dureté, à 250°C de l'alliage Al-Cu-Mg déformé et non déformé.

La germination des zones GPB est moins rapide dans l'alliage déformé que dans l'alliage non déformé en raison de la densité de dislocations, favorisant l'élimination d'une partie des lacunes en excès obtenues à la trempe et réduisant le nombre de lacunes pouvant former des complexes lacune-soluté.

La croissance des zones GPB est plus rapide dans l'alliage déformé que celle dans l'alliage non déformé en raison de la densité de dislocations plus importante dans l'alliage déformé. Par leurs champs de contraintes ces dislocations favorisent la formation de germes et la diffusion d'atomes de soluté.

V.4. 2. Courbes isothermes

- En se basant sur les tableaux des mesure de dureté suivante on a établi les isothermes de dureté $H_v(t)$ suivantes :

- **A température $T= 100^{\circ}\text{C}$**

Temps	0h	1h	3h30mn	5h20	6h50	10h	12h
Dureté H_v [Kg/mm ²]	59	61	64	66	67	68	68

- **A température $T= 130^{\circ}\text{C}$**

Temps	0h	1h	2h	3h	5h	8h	10h30	13	16
Dureté H_v [Kg/mm ²]	59	68.75	73.75	75	77.20	73.75	72.70	72.79	72.72

- **A température $T= 180^{\circ}\text{C}$**

Temps	0 mn	30mn	1h30	2h20	7h30	10h10	12h	12h40
Dureté H_v [Kg/mm ²]	59	68.75	68.75	73.75	83	87	87.5	87.5

- **A température $T= 220^{\circ}\text{C}$**

Temps	0h	1h	4h	5h40	7h20	9h	10h	14h30
Dureté H_v [Kg/mm ²]	59	70	80	85.5	84.5	82.5	81	75.5

- **A température $T=250^{\circ}\text{C}$**

Temps	35mn	2h	3h	4h	7h	9h30	11h	12h	13h
Dureté H_v [Kg/mm ²]	67.5	89.26	92.5	93.38	87.79	80	76.76	73.38	70.88

- **A température $T= 340^{\circ}\text{C}$**

Temps	0 h	1h20	3h30	4h	6h40	8h	9h	10h	11h30
Dureté H_v [Kg/mm ²]	59	73.75	78.75	75	62.5	68.75	55.5	53	50

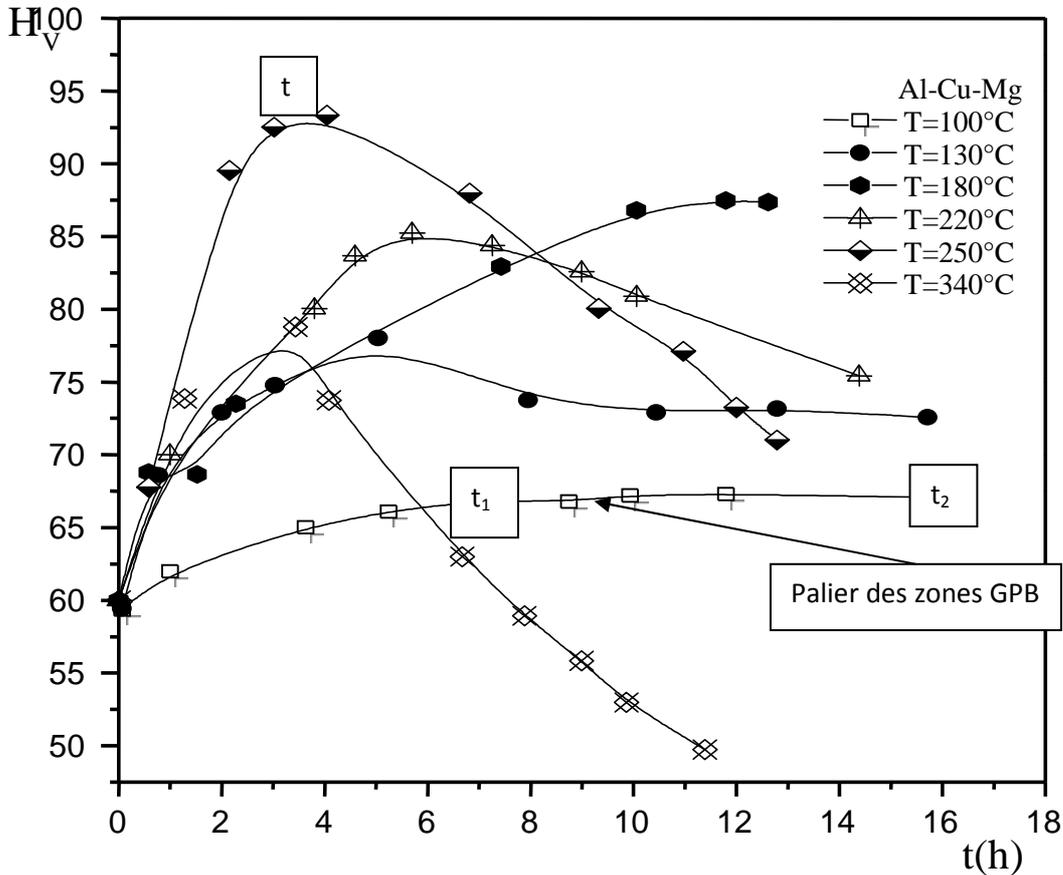


Figure 39 : Courbes isothermes de dureté.

Ces isothermes sont caractérisées par 4 périodes dont l'allure générale est la suivante : Pour les températures 100°C, 130°C, 180°C .

- ❖ La première période correspond à une augmentation rapide de la dureté et sa durée dans le temps « τ » dépend de la température de revenu.
On estime que quand cette dernière (température de revenu) augmente la durée de cette période ou bien la pente de l'augmentation de la dureté H_v diminue : $\tau_{100} > \tau_{130} > \tau_{180}$
- Cette augmentation rapide de H_v est due à la formation des premières zones GPB, par diffusion lacunaire des atomes de soluté. La formation maximale des zones GPB est atteinte à l'instant t_1 et dure jusqu'à l'instant t_2 (courbes isothermes à 100 °C, 130°C, 180°C) qui indique le début de la formation de S'' .

- ❖ La deuxième période se présente sous forme de plateau ($H_v(t)$ constante). La durée dans le temps de ce plateau est variable aussi avec la température T comme suite $\tau_{100} > \tau_{130} > \tau_{180}$
 - Cette période correspond à la formation maximale des zones GPB et nous permet de définir la durée de vie τ de ces zones, comme étant l'intervalle de temps durant lequel la dureté est constante : le plateau de l'isotherme $H_v(t)$ correspond à l'existence d'un nombre maximal de zones GPB.
- ❖ La troisième période est observée plus clairement à des faibles durées aux températures élevées $T = 220^\circ\text{C}$, 250°C , 340°C se traduit par une nouvelle augmentation de la dureté en atteignant un maximum pour un temps t (Figure 39). Elle correspond à la formation de la phase métastable S'' . Sa durée τ dans le temps est fonction de la température : $\tau_{220} > \tau_{250} > \tau_{340}$.
- ❖ La quatrième période commence à partir du maximum de dureté, où le nombre de particules S'' cohérente, avec la matrice décroît, au profit de particules de taille plus grande : c'est la coalescence qui conduit à la formation de la phase S' semi-cohérente avec la matrice.
 - L'augmentation du temps de maintien, au-delà du pic de dureté accélère la transformation de S' en phase S d'équilibre incohérente avec la matrice.
 - Au cours de cette période, la dureté H_v diminue car le mécanisme de durcissement est différent de celui intervenant pour les phases cohérentes avec la matrice.
 - A 220°C , 250°C , 340°C la méthode de mesure utilisée ne serait pas assez fine pour détecter l'état d'équilibre métastable des zones GPB. Il serait possible que la phase S' précipite dès le début du revenu. L'adoucissement est attribué à la coalescence de la phase S' et à la précipitation de la phase S .
 - Les isothermes, établies à 220°C , 250°C et 340°C , montrent un durcissement dû à la précipitation de la phase métastable S' (Al_2CuMg) semi cohérente avec la matrice.
 - L'adoucissement résulte de la coalescence des particules précipitées de la phase S' et de la précipitation de la phase d'équilibre S (Al_2CuMg) incohérente avec la matrice.
 - L'élévation de la température accélère l'établissement de l'équilibre métastable de la précipitation de la phase S' , correspondant au maximum de durcissement de l'alliage, en raison de l'agitation thermique.

V.5. Courbes isochrones

➤ Pour un temps $t = 30$ minutes

Température °C	25	65	85	120	155	170	200	225	250	265	300	325
Hv[Kg/mm ²]	75	76	78	80	90	85	88	108	118	100	90	70

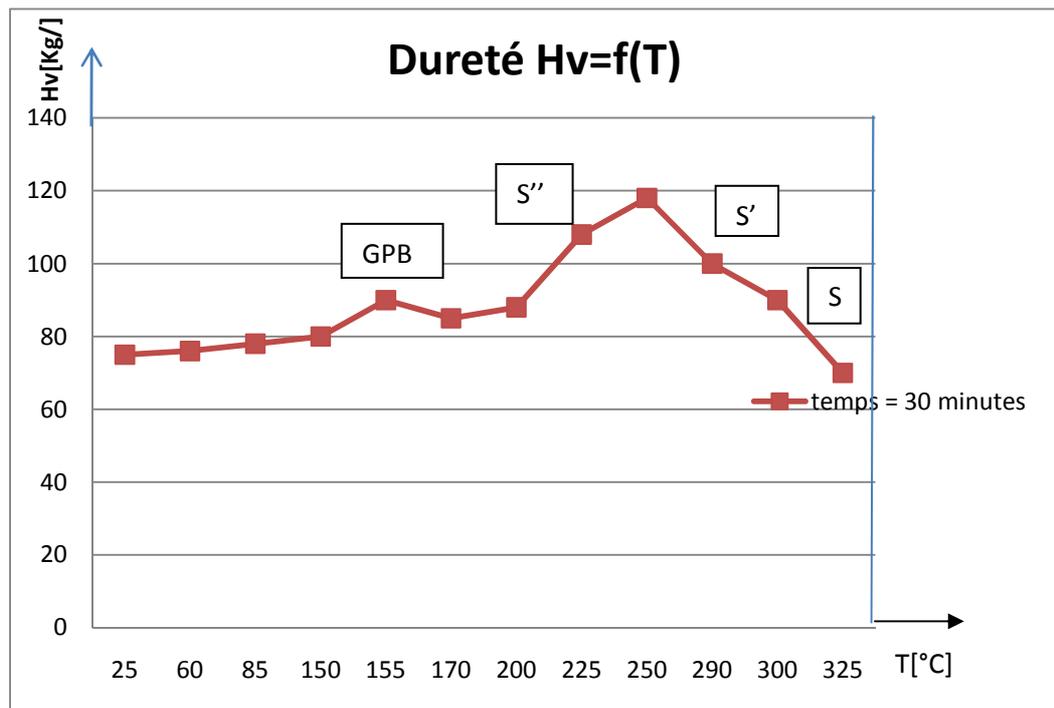


Figure 40 : Isochrone de dureté $H_v(T)$ de AlCuMg.

Cette isochrone montre qu'il y a un durcissement en deux étapes :

- **1^{ère} étape :** un durcissement dit " à froid " aux basses températures (25°C → 200°C)
- **2^{ème} étape :** un durcissement dit " à chaud " dans le domaine des hautes températures (20°C → 400°C)
 - ✓ Dans le domaine de température 50°C → 230°C, le durcissement qui se produit correspond à la formation des zones Guinier-Preston –Bagaryatsky (GPB).
 - ✓ A la température $T = 250^\circ\text{C}$, une partie des zones est dissoute (réversion partielle) et les zones GPB qui subsistent servent de sites de germination aux particules de la phase métastable S'' .
 - ✓ Pour $T > 250^\circ\text{C}$, la 2^{ème} étape de durcissement correspond à la formation de S'' qui se traduit par une augmentation de la dureté H_v jusqu'à un maximum atteint pour $T = 350^\circ\text{C}$.
 - ✓ Pour $T > 350^\circ\text{C}$, se forment successivement les phases S' et S qui correspondent à un adoucissement de l'alliage.

L'évolution de la dureté H_v en fonction de la température correspond à la séquence de précipitation suivante :



où $(SSS)_{AlCuMg}$: est la solution solide sursaturée AlCuMg, les Zones GPB, sont les zones Guinier-Preston-Bagaryatsky cohérentes avec le réseau de la matrice, S'' la phase métastable de transition, parfois notée GPB₂, cohérente avec la matrice et, S' la phase métastable de transition, semi-cohérente avec la matrice. S est le précipité d'équilibre incohérent avec la matrice.

V.6. Micrographie des précipités d'équilibres

La texture morphologique est particulièrement importante pour la cinétique de propagation de la corrosion localisée, en particulier de la corrosion intergranulaire.

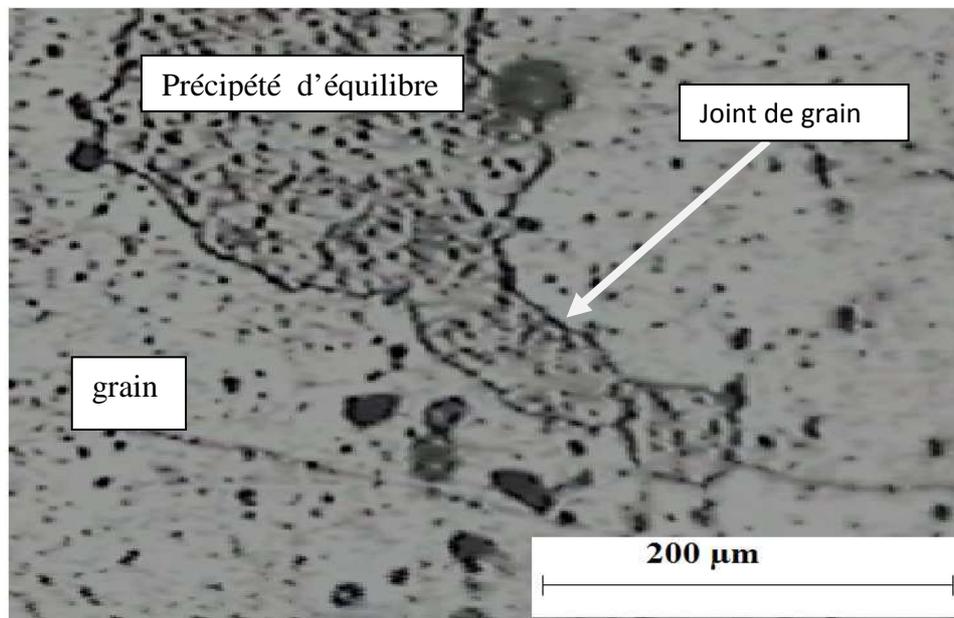


Figure 41 : L'évolution des précipités d'équilibre S de l'alliage Al-Cu-Mg à 250°C.

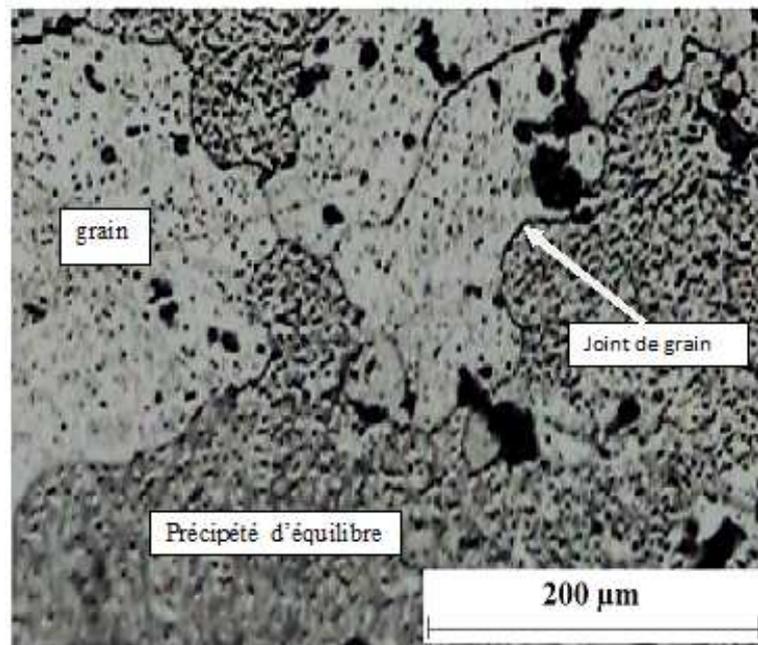


Figure 42 : L'évolution des précipités d'équilibre S de l'alliage Al-Cu-Mg à 280°C.

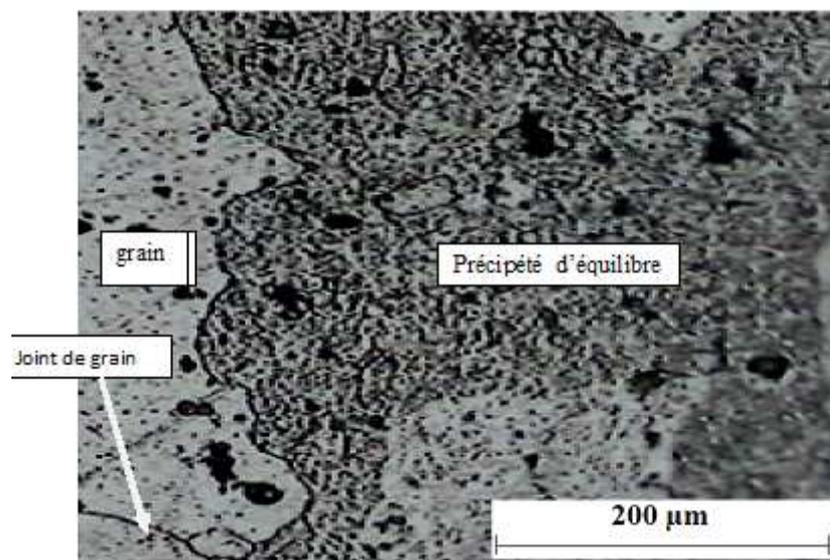


Figure 43 : L'évolution des précipités d'équilibre S de l'alliage Al-Cu-Mg à 300°C.

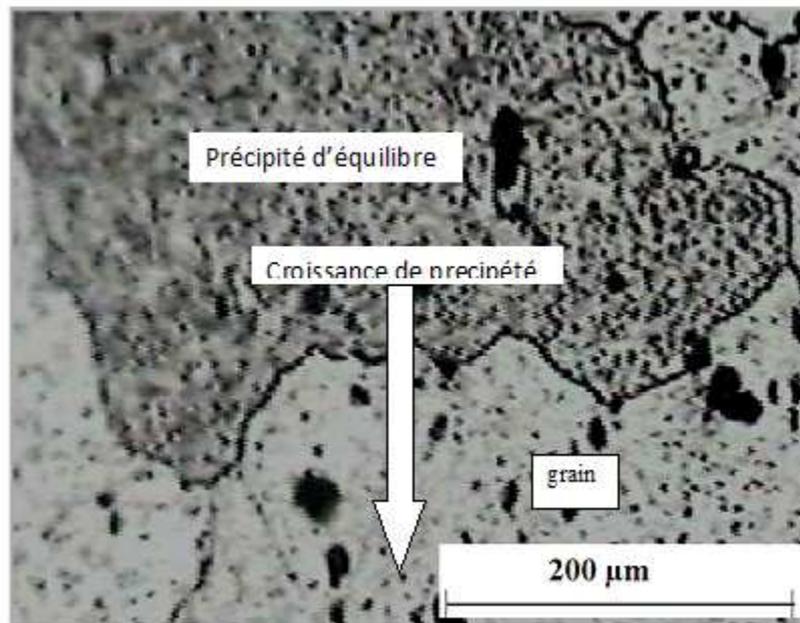


Figure 44 : L'évolution des précipités d'équilibre S de l'alliage Al-Cu-Mg à 300°C.

V.4. Corrosion

Les essais de corrosion se sont faites par l'acide chlorhydrique HCl :

❖ **Acide chlorhydrique HCl**

L'acide chlorhydrique est un gaz très soluble dans l'eau. C'est un acide fort et un des produits le plus agressif vis-à-vis de l'aluminium et de n'importe lequel de ses alliages. Seule la vitesse de dissolution change un peu avec la pureté de l'aluminium ou la nature de l'alliage.

L'augmentation de la température accroît très fortement la vitesse de l'attaque :

Tableau VV: Diminution d'épaisseur en millimètre par an dans les solutions d'acide chlorhydrique [20].

Alliage	Température °C	Concentration de l'acide				
		1% pH 0,8	5% pH 0,05	10% pH<0,01	15 % pH <0,01	20% pH <0,01
1099	20	0,1	0,4	2,6	7,0	27
	50	1,3	3,9	5,2	> 50	> 50
	98	18,5	> 50	> 50	> 50	> 50
1100	20	0,2	7,2	> 50	> 50	> 50
	50	5,2	16,0	> 50	> 50	> 50
	98	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50

V.4.1. Corrosion par piqure

C'est le type ennemi des pièces en alliages de la série 2000.

V.4.1.1 Mécanisme de la piquuration

La corrosion par piqure (figure 45) a été décrite comme un mécanisme en dix étapes [16] regroupés dans deux grandes étapes [24]. La **Figure 46** est une représentation schématique de la corrosion par piqûres influencée par une particule intermétallique, siège de la réduction de l'oxygène :

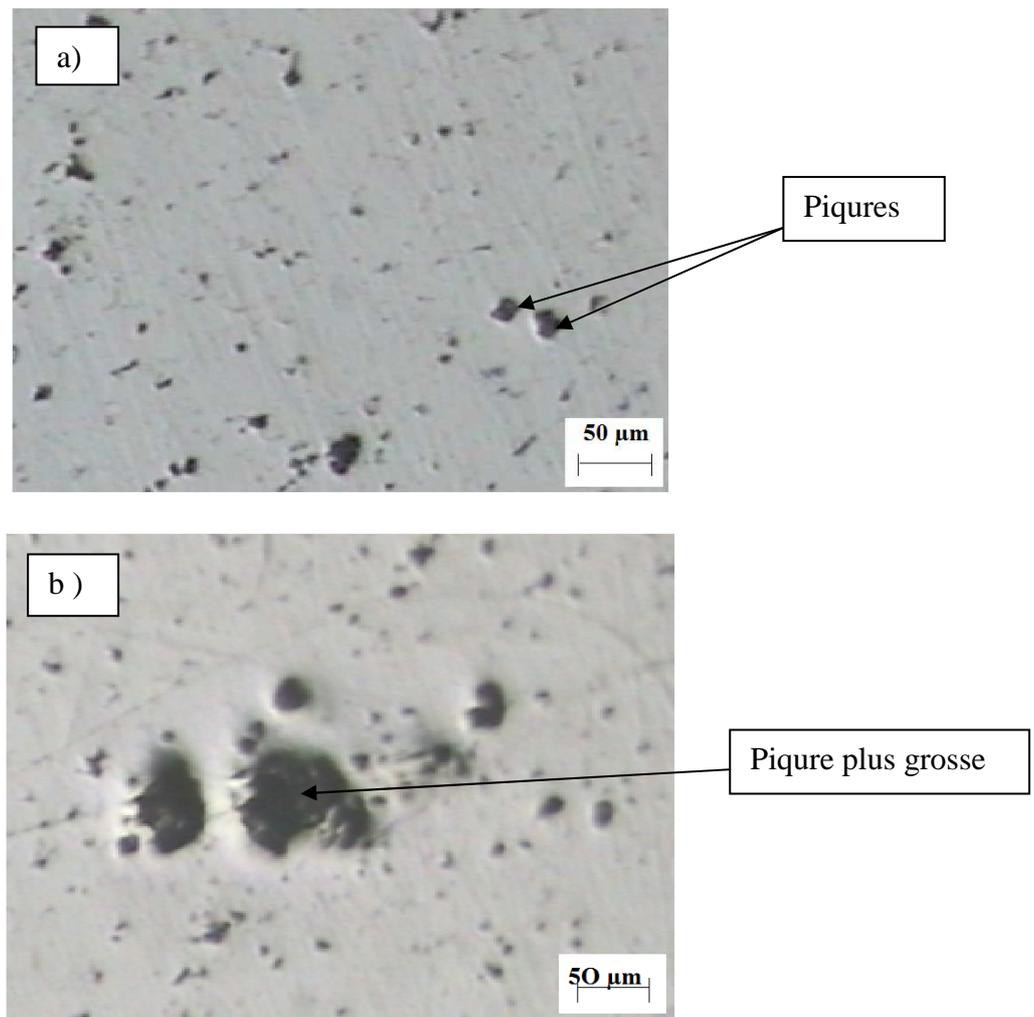


Figure 45 : corrosion par piqure de l'alliage Al-Cu-Mg après :

- a) 10 minutes d'immersion.
- b) 30 minutes d'immersion.

❖ Amorçage des piqûres

La corrosion par piqûres de l'aluminium se produit principalement dans des milieux contenant des chlorures, mais un agent oxydant est également nécessaire (c'est souvent l'oxygène dissous). La corrosion par piqûres ne se produit pas sur un échantillon isolé dans une solution de chlorure désaérée. Les principales étapes sont :

- **Etape 1** : L'absorption de Cl^- dans les défauts de la couche d'oxyde ;
- **Etape 2** : La réduction lente de l'oxygène dissous aux sites cathodiques (la capacité de double couche se charge jusqu'à la rupture de passivité) ;
- **Etape 3** : La rupture de la couche passive aux points faibles ;
- **Etape 4** : l'oxydation rapide de l'aluminium mis à nu aux points de rupture et formation de complexes chlorurés (AlCl_4^-) et hydroxychlorurés ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$).

Ces étapes d'amorçage forment un grand nombre ($\approx 10^6/\text{cm}^2$) de micropiqûres (0,1 à 1 μm).

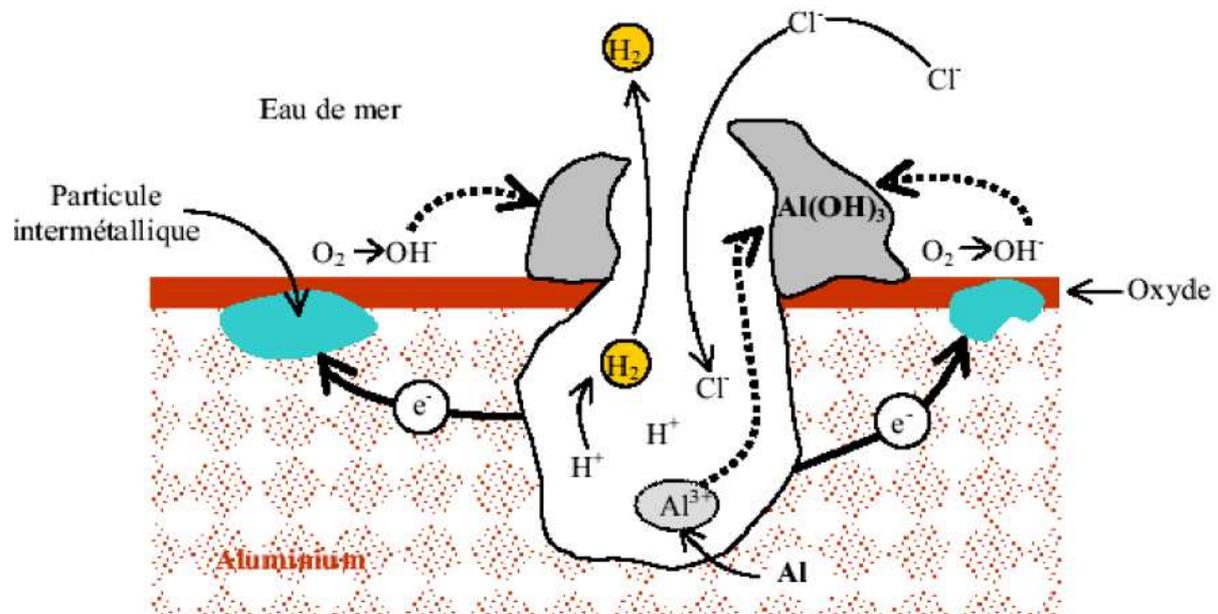
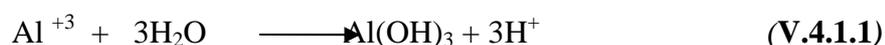


Figure 46 : Proposition du mécanisme de la corrosion par piqûre de l'aluminium [24].

❖ Propagation des piqûres

- **Etape 5** : Dissolution des complexes chlorurés et repassivation de la piqûre.
- **Etape 6** : Enrichissement en chlorure en fond de piqûre et formation d'une couche stable de chlorures, oxychlorures.
- **Etape 7** : Hydrolyse des chlorures d'aluminium et acidification du fond de la piqûre jusqu'à des valeurs de pH inférieures à 3. La réaction peut être simplifiée ainsi :



- **Etape 8** : Diffusion des ions Al^{3+} depuis le fond de la piqûre vers l'ouverture et précipitation en $Al(OH)_3$ au contact du milieu plus alcalin (sur les parois latérales sièges de la réaction cathodique et donc d'une certaine alcalinisation).
- **Etape 9** : Entretien de la piqûre par dissolution de l'aluminium dans la solution acide de chlorure d'aluminium et production d'hydrogène limitant l'accumulation des chlorures et repoussant les produits de corrosion vers l'ouverture de la piqûre.
- **Etape 10** : Repassivation de la piqûre par obstruction ou perte de stabilité de la couche de chlorure (retour à l'étape 5).

V.4.1.2. Résultats :

- ✓ Pour les alliages d'aluminium, la réaction cathodique limite et contrôle (le phénomène de corrosion par piqûres (amorçage et propagation). Un plus grand nombre de piqûres vont se former dans les alliages contenant du cuivre et/ou des composés intermétalliques cathodiques. Moins il y a d'éléments cathodiques (éléments d'alliages et/ou impuretés), meilleure est la résistance à la corrosion par piqûres. En l'absence de polarisation, seulement quelques piqûres vont se propager sur des échantillons isolés [24].
- ✓ Pendant la propagation, la teneur en chlorures Cl^- des piqûres en cours de propagation augmente (parce que le transport du courant dans l'électrolyte est principalement assuré par le déplacement des ions les plus mobiles Cl^-) (figure 46) [24].
- ✓ Dans cette solution concentrée en Cl^- , une couche de complexe chlorurée se forme au fond des piqûres à la place de la couche passive. Cette couche de complexe soluble est une condition nécessaire à la poursuite de la propagation [24].
- ✓ Les ions Al^{3+} générés aux sites anodiques actifs vont s'hydrolyser dans le milieu neutre, ce qui consomme des ions OH^- et acidifie la solution à l'intérieur de la piqûre, puis précipitent dans le milieu neutre extérieur en formant un volumineux chapeau d'alumine au dessus de la piqûre (figure 46) [24].
- ✓ Les deux phénomènes, formant une solution agressive (acide et riche en chlorures) à l'intérieur des piqûres actives, contribuent à entretenir l'activité des piqûres, pour cette raison on dit que le phénomène de corrosion par piqûres sur l'aluminium est un phénomène autocatalytique. Par contre, les bulles d'hydrogène, formées par l'autocorrosion de l'aluminium dans la piqûre au contact de la solution agressive, contribuent, avec la diffusion, à limiter la formation d'une solution agressive concentrée à l'intérieur des piqûres actives [24].
- ✓ La propagation des piqûres s'arrête quand le courant de corrosion décroît et ne peut plus renouveler assez vite la couche de complexe chlorurée en fond de piqûres. Le

complexe est alors dissous et remplacé par la couche passive ; la solution agressive à l'intérieur de la piqûre va se diluer, c'est la fin de la propagation, la mort de la piqûre [24].

V.4.1.3. Remèdes :

Pour la protection contre ce type de corrosion fortement lié au pH du milieu on a recouru aux méthodes de protection déjà vues en partie théorique telle que : Protection par peinture, Protection par placage et les traitements de surface (anodisation ...).

V.4.2. Corrosion intergranulaire

V.4.2.1. mécanisme

La corrosion intergranulaire (figures 48.49.50.51.52.53) résulte de la présence aux joints des grains d'une zone appauvrie en cuivre (figure 47).

Les alliages au cuivre à durcissement structural de la série 2xxx (Al-Cu 4 à 6 %) notamment notre alliage 2024 sont intéressants pour leurs caractéristiques mécaniques. Le durcissement structural est obtenu par un traitement thermique en trois étapes [7] :

- ✓ mise en solution à haute température (≈ 500 °C) ;
- ✓ refroidissement rapide par trempe ;
- ✓ vieillissement naturel ou artificiel basse température pour obtenir la précipitation durcissante.

Si le refroidissement n'est pas assez rapide, du cuivre va précipiter au cours du refroidissement. Cette précipitation va se produire d'abord aux joints de grains, parce que les précipités germent plus facilement aux défauts de structure et aux lacunes abondantes aux joints de grains. Cette précipitation va diminuer la teneur en cuivre de la solution solide voisine des précipités.

Dans l'étape suivante de précipitation structurale formant la fine précipitation cohérente avec la matrice produisant le durcissement structural de l'alliage, cette précipitation ne se produira pas au voisinage des joints de grains faute de cuivre en solution.

Nous obtenons en définitive trois phases différentes (figure 47) : des gros précipités Al_2Cu aux joints des grains, l'intérieur des grains avec la fine précipitation cohérente et la zone dénudée en précipités aux joints des grains. La corrosion intergranulaire résulte, dans ce cas, de la dissolution préférentielle de la zone dénudée qui est la phase la plus anodique, donnant la corrosion intergranulaire de la (figure 47).

V.4.2.2. Remèdes

Pour éviter la corrosion intergranulaire dans le cas des 2xxx notamment notre alliage, il faut réaliser une trempe rapide. Toutefois, on est limité par l'épaisseur des produits. Pour les produits épais (au-dessus de 6 mm pour les tôles), il est nécessaire d'utiliser un revenu T6 pour désensibiliser le métal à la corrosion intergranulaire à coeur.

Le traitement thermique de revenu T6 précipite le cuivre aux joints de grains et dans les grains. Cela augmente la taille des précipités et diminue la teneur en cuivre de la solution solide, ce qui élimine la différence de potentiel entre zone dénudée en précipités et intérieur des grains, supprimant ainsi l'origine de la corrosion intergranulaire [24].

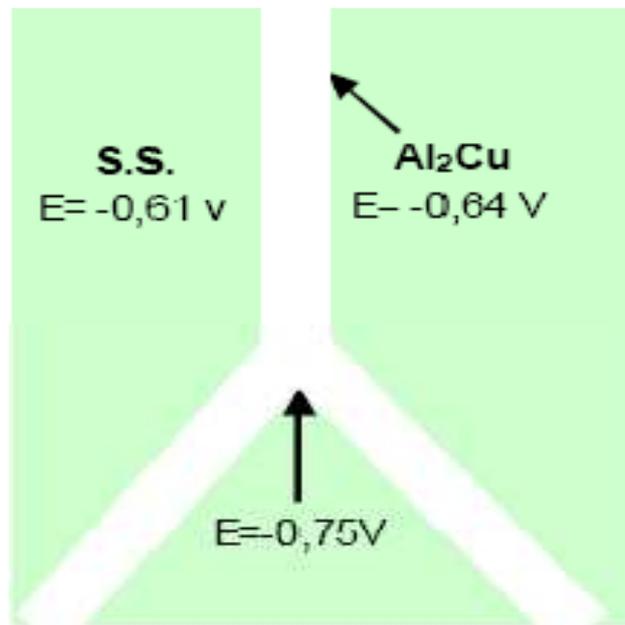


Figure 47: représentation schématique de l'état électronique d'un alliage Al-Cu [24].

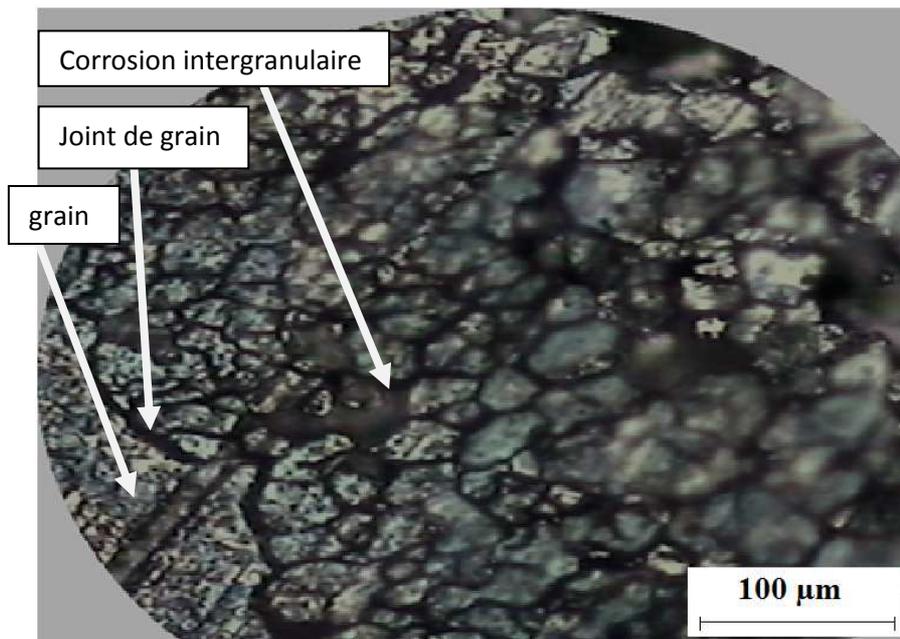


Figure 48 : corrosion intergranulaire de l'alliage Al-Cu-Mg après 10 minute d'immersion.

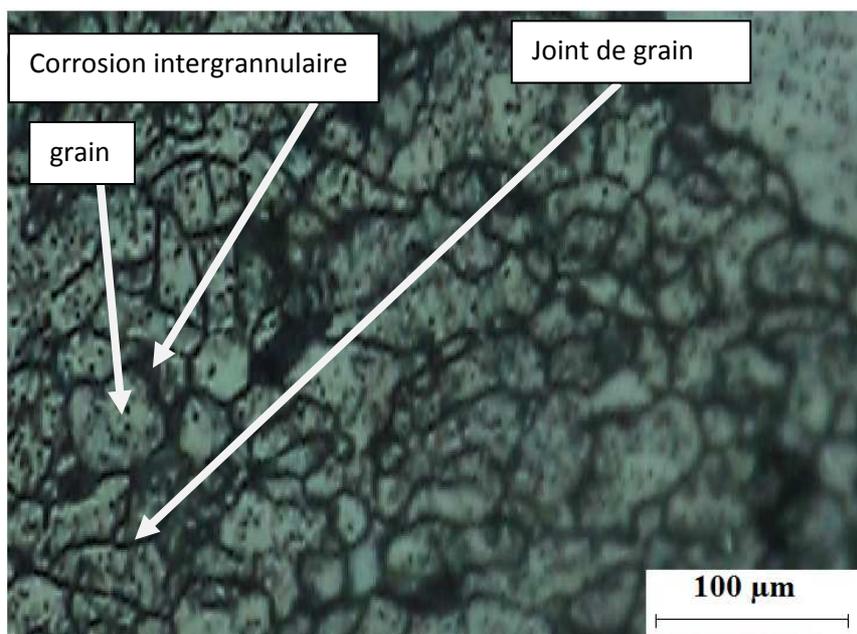


Figure 49 : corrosion intergranulaire de l'alliage Al-Cu-Mg après 20 minute d'immersion.

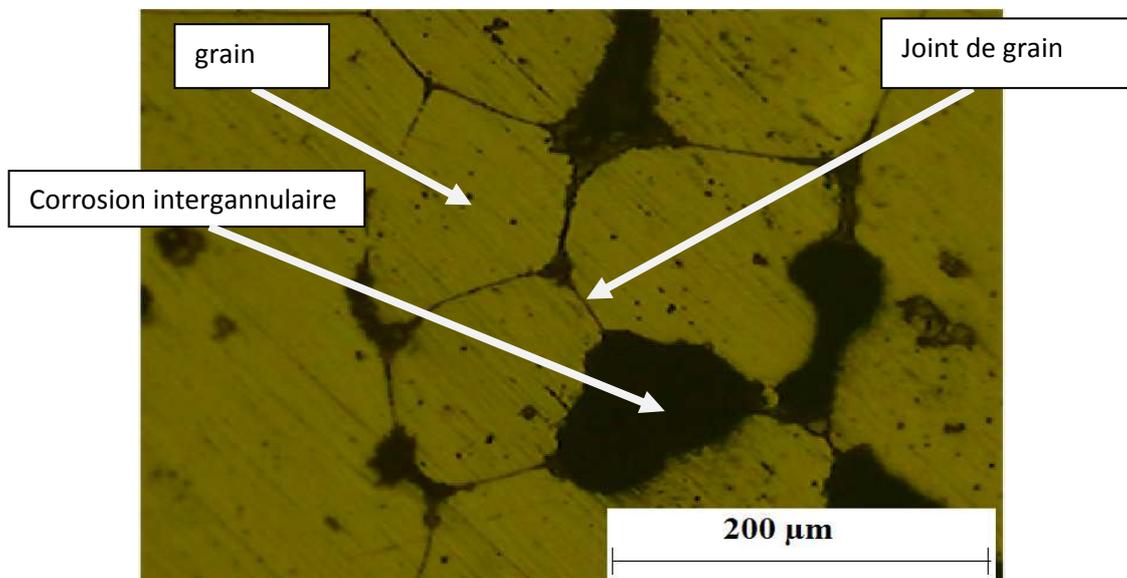


Figure 50 : corrosion intergranulaire de l'alliage Al-Cu-Mg après 30 minute d'immersion.

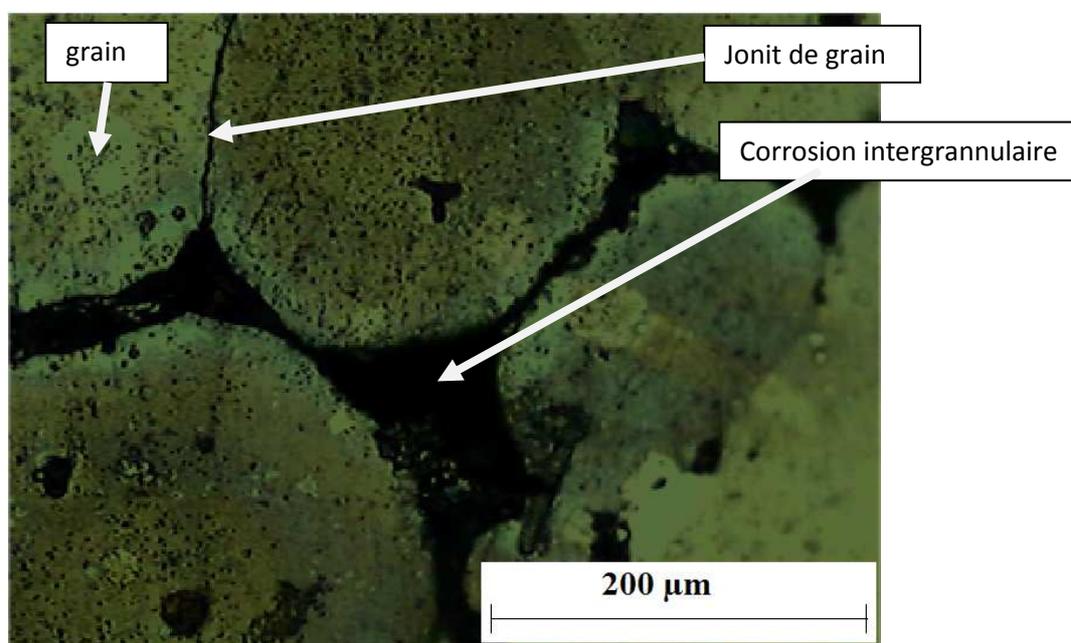


Figure 51 : corrosion intergranulaire de l'alliage Al-Cu-Mg après 40 minute d'immersion.

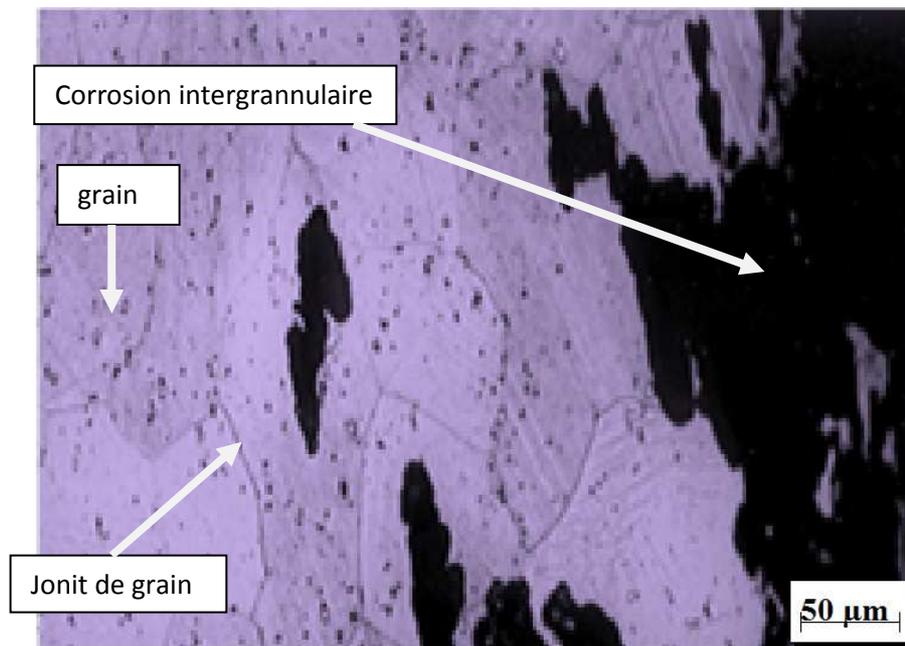


Figure 52 : corrosion intergranulaire de l'alliage Al-Cu-Mg après 60 minute d'immersion.

Conclusion générale

Le principal but du présent travail, était d'étudier les phénomènes de durcissement structural par précipitation et de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages.

Dans ce mémoire de PFE on voit l'effet des traitements mécanique de laminage sur les alliages d'aluminium 2024 et comment ca augmente leurs propriétés mécaniques en diminuant la taille des grains et augmentant la quantité de dislocation.

Puis on voit aussi les mécanismes de précipitation pour les traitements thermiques isothermes, c'est-à-dire en fixant la température et en faisant varier le temps de maintien dans le four, puis les isochrones qui consiste à faire varier la température et fixer le temps. Ses mécanismes consiste à une accélération de la précipitation des zones Guinier-Preston-Bagaryatsky (GPB) et de la phase métastable semi-cohérente S'' lorsque la température ou la durée de maintien dans le four augmente.

En fin, ce travail met en évidence deux mécanismes de corrosion localisé pour le meme alliage toujours (2024) ; par pique et intergranulaire :

- La corrosion par piqûres qui se produit principalement dans des milieux contenant des chlorures et un agent oxydant (l'oxygène) et qui commence par une adsorption des ions de chlore Cl^- et se termine par repassivation de la piqûre par obstruction ou perte de stabilité de la couche de chlorure.
- Pour la protection contre ce type de corrosion fortement lié au pH du milieu on a recourt aux méthodes de protection usuelles telle que : Protection par peinture, Protection par placage et les traitements de surface (anodisation ...).
- La corrosion intergranulaire qui résulte de la présence aux joints des grains d'une zone appauvrie en cuivre.
- Pour éviter la corrosion intergranulaire il est nécessaire d'utiliser un revenu T6.

Références bibliographiques :

- [1] These de Doctora Loic LACROIX.
- [2] Technique de l'ingénieur M 4661 par Christian Vargel.
- [3] Corrosion de l'aluminium C.Vargel Dunod Paris 1999.
- [4] Christian Vargel, corrosion of aluminium, page 5, 2004, Elsevier.
- [5] Elena luminita DIN-STIRBU , comportement à la corrosion des alliages d'aluminium utilisé dans l'industrie automobile pour la fabrication de radateur de chauffage, these de doctorat, année 2005.
- [6] Comportement des alliages d'aluminium, C. Vargel, Dunod technique.
- [7] Bouchamaa Yasmine, Mémoire, Spécialité Métallurgie, promotion 2010.
- [8] Technique de l'ingénieur M 1290 par Roger DEVELAY.
- [9] Technique de l'ingénieur M 240 par Bruno Dubost et Pierre Sainfort.
- [10] Aluminium, Propriétés and physical metallurgy, Ed, J,E. Hatch, American Society for Metals Ohio 1984.
- [11] J.Friedel Ada crystalographica « les dislocations » Volume 10, Part 7 (July 1957).
- [12] Aluminium and aluminium alloys, Ed. By J.R Dis, Print.3 ASM international 1994.
- [13] A review of information of the effect of impurities on the corrosion resistance of aluminium, M. Whitaker.
- [14] E. DELTOMBE ET M. POURBAIX. Comportement électrochimique de l'aluminium, diagrammes d'équilibre tension pH du système Al-H₂O à 25°C. Rapport technique 42, Cebelcor, 1956.
- [15] M. REBOUL. Corrosion des alliages d'aluminium. Rapport technique, Techniques de l'ingénieur, COR 325, 2005.
- [16] M. REBOUL ET M. H. B. B. WARNER, T.J. A ten-step mechanism for pitting corrosion of aluminum. Materials Science Forum, 1553, 1996.
- [17] M. R. BAYOUMI. The mechanics and mechanisms of fracture in stress corrosion cracking of aluminum alloys. Engineering Fracture Mechanics, 54(6), 879, 1996.
- [18] G. SCAMANS, R. ALANI ET P. SWANN. Pre-exposure embrittlement and stress corrosion failure in Al—Zn—Mg Alloys. Corros. Sci., 16(7), 443, 1976.
- [19] Hinton B.R Corrosion prevention and chromate, the end of an Era, Metal finishing, 1991, vol 89, n° 9, p 55-61, n 10, p. 15-20.

[20] Ellis W. J., Fundamentals of cathodic protection, 4th Western State Corrosion Seminar, NACE Houston 1970, p. 6/1.

[21] Principes à observer en vue d'améliorer les conditions de résistance à la corrosion de l'aluminium, Revu de l'aluminium, n° 77, 1936, p. 36-37.

[22] Lunder O., Nisancioglu K., The effect of alkaline-etch pretreatment on the pitting corrosion of wrought aluminium, Corrosion, vol 44, 1988, p. 414-422.

[23] SB. DAVENPORT RL. HIGGINSON, Strain path effects under hot working: an introduction, Elsevier Science (2000).

[24] Technique de l'ingénieur, corrosion des alliages d'aluminium par Max REBOUL, cor 325

[25] Combrade P., "La corrosion cavernueuse des alliages passivables" dans "*Corrosion localisée*", ed. F. Dabosi, G. Beranger et B. Baroux, Les éditions de Physiques, (1994), p241.