

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER

FILIÈRE : GÉNIE MÉCANIQUE

SPÉCIALITÉ : FABRICATION MÉCANIQUE ET PRODUCTION

PAR :

BOURENANE HICHEM

HADDADEN BILLAL

Thème

Influence des traitements thermiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques d'un alliage d'aluminium de nuance AU4G.

25/06/2019 Devant le jury composé de:

Président : Pr M.A. Bradai

Rapporteur : Dr YOUNES R

Examineur : Dr DJ. AMARI

Examineur (Invité) : Mr A.Idir

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2018-2019

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont à Mr R. YOUNES, notre promoteur, pour son aide, ces critiques constructives, ses explications et suggestions pertinentes et pour la qualité de ses orientations tout au long de ce travail et pour avoir apporté tant de soins à la réalisation de ce mémoire.

Nous ne pouvons pas oublier de présenter notre gratitude à nos parents pour les efforts inlassables qu'ils ne cessent de déployer pour nous.

Nous remercions également les membres de jury qui nous font honneur en acceptant d'examiner et de juger notre travail. Pr. Bradai en tant que Président de jury, ainsi à Mr Amari et Mr Idir en tant que examinateurs.

Sans oublier l'équipe du hall de technologie de l'université de Bejaia, l'entreprise ESTA.

Que tous ceux qui ont contribué à notre formation trouvent ici l'expression de nos sincères gratitude.

Enfin, un merci particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien.

Dédicace

Je dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :

À mon père, la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement qu'on puisse leur offrir est notre réussite.

À ma très chère mère l'être le plus nobles qui a sacrifié les plus belles années de sa vie.

- *À mes meilleures amies.*
- *À tous les camarades de notre section.*
- *Enfin je dédie ce travail particulièrement à mon épouse Samia.*

Hichem

Je dédie ce mémoire aux personnes qui nous sont les plus chers :

À mon regretté père (athirehem rebbi), la plus belle marque de reconnaissance et d'encouragement que je puisse lui offrir est ma réussite.

À ma très chère mère l'être le plus nobles qui a sacrifié les plus belles années de sa vie pour me rendre heureux,

- *À mes meilleures amis, mes frères.*
- *À tous les membres de ma famille.*
- *À ma très chère tante.*
- *À nos camarades.*
- *À tous les camarades de notre section.*
- *Enfin je dédie ce travail à la très chère Mélissa qui m'a aidé et soutenue tout le long de mon travail.*

H. Bissal

LISTE

DES

TABLEAUX

Liste des tableaux

Tableau I.1 :	Comparaison entre les propriétés aluminium-Fer.....	3
Tableau I.2 :	Résistances des différentes nuances des alliages d'aluminium.....	5
Tableau I.3 :	Désignation des séries principales des alliages d'aluminium.....	6
Tableau I.4:	Séries de traitements thermiques standards.....	10
Tableau I.5 :	Traitements thermiques de la série T des alliages d'aluminium.....	12
Tableau I.6:	Durée minimale de mise en solution en fonction de l'épaisseur de la pièce.....	15
Tableau II.1 :	Composition chimique.....	31
Tableau III.1 :	Essai de Charpy (refroidissement Air).....	43
Tableau III.2 :	Essais de Charpy (refroidissement four).....	44
Tableau III.3 :	Essais de Charpy (refroidissement glace).....	45
Tableau III.4 :	Les essais de dureté brinell (refroidie a l'air).....	47
Tableau III.5 :	Les essais de dureté brinell (refroidissement four).....	48
Tableau III.6 :	Les essais de dureté brinell (refroidissement glace).....	49

LISTE

DES

FIGURES

Liste des figures

Figure I.1 :	La variation de la résistance à chaud en fonction de la température	5
Figure I.2 :	La courbe de WOHLER.....	6
Figure I.3 :	Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium 2xxx, 6xxx ou 7xxx.....	14
Figure I.4 :	Le diagramme d'équilibre Al-Mg ₂ S.....	18
Figure I.5 :	Les éléments d'un système tribologique.....	21
Figure I.6 :	Contact ponctuel.....	22
Figure I.7 :	Contact linéaire.....	22
Figure I.8 :	Contact cylindrique.....	23
Figure I.9 :	Contact conique.....	23
Figure I.10 :	Contact plane.....	24
Figure I.11 :	Contact hertzien.....	24
Figure I.12 :	Surface de contact.....	25
Figure I.13 :	Usure adhésive.....	27
Figure I.14 :	Usure abrasive.....	28
Figure I.15 :	Usure par fatigue.....	28
Figure I.16 :	Usure de corrosion.....	29
Figure I.17 :	Usure par érosion.....	29
Figure II.1 :	Éprouvette resiliance.....	31
Figure II.2 :	Répartition des échantillons.....	32
Figure II.3 :	Four électrique à chambre horizontale.....	32
Figure II.4 :	La polisseuse mécanique utilisée.....	33
Figure II.5 :	Machine d'essais de dureté.....	34
Figure II.6 :	Essai Brinell.....	34
Figure II.7 :	Pendule de Charpy + schéma de fonctionnement.....	35
Figure II.8 :	Microscope Optique utilisé (disponible au Hall de Technologie).....	36
Figure II.9 :	Représentation du dispositif d'usure utilisé.....	37
Figure II.10 :	Thermomètre Laser.....	38
Figure II.11 :	Balance analytique.....	38
Figure II.12 :	Procédures d'oxydation.....	39
Figure III.1 :	Microstructure de l'alliage au Vieillissement air : a -Refroidissement à l'air, b -refroidissement four, c -refroidissement glace.....	40

Liste des figures

Figure III.2 :	Microstructures de l'alliage a- refroidissement air, b- refroidissement four, c- refroidissement glace.....	41
Figure III.3 :	Microstructures de l'alliage d'aluminium a- refroidissement air, b- refroidissement four, c- refroidissement glace.....	42
Figure III.4 :	Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à l'air sous différents vieillissements.....	43
Figure III.5 :	Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à four(revenu) sous différents vieillissements.....	44
Figure III.6 :	Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à la glace sous différents vieillissements.....	45
Figure III.7 :	Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec les trois refroidissements sous différents vieillissements.....	46
Figure III.8 :	L'empreinte de la bille (brinell).....	47
Figure III.9 :	Dureté brinell sous (981 N) d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à air sous différents vieillissements.....	47
Figure III.10 :	Dureté brinell sous (981 N) d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement four(revenu) sous différents vieillissements.....	48
Figure III.11 :	Dureté brinell sous (981 N) d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement glace sous différents vieillissements.....	49
Figure III.12 :	Duretés brinell des échantillons.....	50
Figure III.13.a, b :	Échantillons à vieillissement à l'air vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	51
Figure III.14.a, b :	Échantillons à refroidissement à l'air vieillissement four vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	51
Figure III.15.a, b :	Échantillons à refroidissement à l'air vieillissement glace vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	52
Figure III.16.a, b :	Perte de masse d'un alliage 2017A avec R/air sous différents vieillissements.....	53
Figure III.17.a, b :	Perte de masse d'un alliage 2017A avec R/air sous différents vieillissements.....	54
Figure III.18.a, b :	Échantillons à refroidissement four vieillissement à l'air vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	55

Liste des figures

Liste des figures

Figure III.19.a, b	Échantillons à refroidissement four vieillissement four vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	56
Figure III.20.a, b	Échantillons à refroidissement four vieillissement glace vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	56
Figure III.21.a, b	Perte de masse d'un alliage 2017A avec R/four sous différents vieillissements.....	57
Figure III.22.a, b	Perte de masse d'un alliage 2017A avec R/four sous différents vieillissements.....	58
Figure III.23.a, b	Échantillons à refroidissement glace vieillissement à l'air vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	59
Figure III.24.a, b	Échantillons à refroidissement glace vieillissement four vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	60
Figure III.25.a, b	Échantillons à refroidissement glace vieillissement glace vitesse 90tr/min et 180tr/min.....	60
Figure III.26.a, b	Perte de masse d'un alliage 2017A avec R/glace sous différents vieillissements.....	61
Figure III.27.a, b	Perte de masse d'un alliage 2017A avec R/glace sous différents vieillissements.....	62
Figure III.28.a, b	Immersion après 7 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	63
Figure III.29.a, b	Immersion après 14 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	64
Figure III.30.a, b	Immersion après 21 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	64
Figure III.31.a, b	Immersion après 28 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	65
Figure III.32	Evolution de la masse des échantillons corrodée <i>R/air</i>	65
Figure III.33.a, b	Immersion après 7 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	66
Figure III.34.a, b	Immersion après 14 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	66
Figure III.35.a, b	Immersion après 21 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	67
Figure III.36.a, b	Immersion après 28 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/revenu</i>	67
Figure III.37	Évolution de la masse des échantillons corrodée <i>R/revenus</i>	68
Figure III.38.a, b	Immersion après 7 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/glace</i>	68
Figure III.39.a, b	Immersion après 14 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/glace</i>	69
Figure III.40.a, b	Immersion après 21 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/glace</i>	69
Figure III.41.a, b	Immersion après 28 jours <i>a-V/ température ambiante b-V/glace</i>	70

Liste des figures

Liste des figures

Figure III.42 :	Évolution de la masse des échantillons corrodée <i>R/glace</i>	70
Figure III.43 :	Évolution de la masse des six échantillons corrodée.....	71

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Eléments Bibliographiques	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Désignation numérique.....	2
I.3 Signification des désignations	2
I.4 L'aluminium.....	3
I.5 Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium.....	4
I.6 Propriétés générales des alliages d'aluminium.....	5
I.6.1 La résistance à chaud.....	5
I.6.2 La résistance à basses températures.....	5
I.6.3 La résistance à la fatigue.....	5
I.6.4 La résistance à la corrosion.....	6
I.6.5 La mise en forme.....	6
I.6.6 Soudage.....	6
I.6.7 Résistances comparées de différentes nuances.....	6
I.7 Alliages à base d'aluminium.....	7
I.8 Alliages du type A.GS (Aluminium magnésium silicium).....	8
I.9 Alliages du type A.SG (Aluminium Silicium magnésium).....	8
I.10 Les éléments d'addition et leur Influence.....	8
I.11 Utilisation des alliages d'Aluminium.....	9
I.12 Traitements thermiques des matériaux.....	10
I.13 Traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	10
I.14 Principaux traitements thermique.....	12
I.14.1 Traitements d'homogénéisation.....	12
I.14.2 Traitements d'adoucissement.....	13
I.14.3 Traitement de durcissement structural.....	13
I.14.3.1 La Mise en solution	14
I. 14.3.2 La Trempe.....	15
I.14.3.3 La maturation.....	16
I.14.3.4 Le revenu.....	16
I.14.4 Vieillessement thermique.....	16
I.14.4.1 Vieillessement naturel.....	17
I.14.4.2 Vieillessement artificiel.....	17

Sommaire

I.15	Traitements de trempe structurale.....	17
I.16	Traitement industriel de trempe structurale.....	18
I.17	Alliages sans durcissement structural.....	18
I.18	Alliages à durcissement structural.....	19
I.19	La tribologie.....	19
I.19.1	Introduction.....	19
I.19.2	Les échelles en tribologie.....	20
I.19.3	Structure d'un système tribologique.....	20
I.19.4	Les surfaces.....	20
I.19.5	La mécanique des contacts.....	21
I.19.6	Les types de contact.....	21
I.19.7	Le contact des surfaces solides.....	24
I.20	Le frottement.....	25
I.21	L'usure.....	26
I.21.1	Le phénomène d'usure.....	26
I.21.2	Les origines d'usure.....	26
I.21.3	Différents types d'usure.....	27
I.22	Les lubrifiants.....	29
I.22.1	Historique.....	29
I.22.2	Définition de lubrifiant.....	29
I.21.3	Le rôle de lubrification.....	30
Chapitre II : Matériaux et Techniques Expérimentale		
II.1	Introduction.....	31
II.2	Matériaux utilisés.....	31
II.2.1	Elaboration des échantillons.....	31
II.3	Traitements thermiques.....	31
II.4	Polissage.....	32
II.5	Essais de dureté par pénétration.....	33
II.5.1	Définition.....	33
II.5.2	Principe de l'essai.....	33
II.5.3	Machine d'essais.....	33
II.5.4	Essai de dureté (brinell).....	34
II.6	Essai de résilience (Charpy).....	35

Sommaire

II.6.1	But de l'essai.....	35
II.6.2	Mouton Charpy.....	35
II.6.3	Les éprouvettes.....	35
II.7	Le microscope optique.....	35
II.8	Caractérisation thermique (tests d'usure).....	36
II.8.1	Principe du teste d'usure.....	36
II.8.2	Représentation du dispositif d'usure.....	36
II.8.3	Optimisation et réalisation du test d'usure	37
II.9	Procédure d'oxydation	38
Chapitre III : Résultats et interprétations		
III.1	Introduction.....	40
III.2	Etude métallographique.....	40
III.2.1	Vieillissement à température ambiante.....	40
III.2.2	Vieillissement four (revenu).....	41
III.2.3	Vieillissement glace.....	42
III.3	Les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur l'aluminium.....	43
III.3.1	les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur les échantillons à refroidissement à l'air.....	43
III.3.2	les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur échantillons à refroidissement four.....	44
III.3.3	les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur échantillons à refroidissement.....	45
III.3.3	étude comparative.....	46
III.4	Caractérisation mécanique.....	46
III.4.1	dureté brinell.....	46
III.4.1.1	la dureté brinell des échantillons refroidissement à l'air.....	47
III.4.1.2	la dureté brinell des échantillons refroidissement four.....	48
III.4.1.3	la dureté brinell des échantillons refroidissement glace.....	49
III.4.2	étude comparative.....	50
III.4.3	résultats des tests d'usure sur les échantillons.....	51
III.4.3.1	résultats du test d'usure sur les échantillons vieillis à l'air.....	51
III.4.3.2	résultats du test d'usure sur les échantillons vieillis au four.....	55
III.4.3.3	résultats du test d'usure sur les échantillons vieillis à la glace.....	59

Sommaire

III.5	Analyse du comportement de l'aluminium à la corrosion.....	63
III.5.1	le refroidissement a l'air.....	63
III.5.2	le refroidissement au four.....	65
III.5.3	le refroidissement a la glace.....	68
III.5.4	Etude comparative.....	71
	Conclusion générale.....	72
	Référence bibliographie	
	Annexes	
	Résumé	

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

Introduction générale

Les principaux alliages d'aluminium ont été fabriqués depuis 1886 à partir des bauxites et de la cryolithe, Les alliages à base d'aluminium ont été l'objet de plusieurs travaux de recherches scientifiques, ces alliages sont les plus utilisés justes après les fontes et les aciers. Leurs excellentes propriétés mécaniques et électriques ont permis leur utilisation dans divers secteurs d'activités telle que l'industrie aéronautique, automobile ou le transport électrique.

Les propriétés mécaniques et électriques de ces alliages résultent par le traitement thermique. La température du revenu confère à ces alliages d'intéressantes propriétés mécaniques. Généralement des vieillissements artificiels sont appliqués pour provoquer la formation des phases durcissantes.

L'objectif de notre travail de recherche est l'étude de l'effet de traitement thermique sur l'évolution structural et les propriétés mécaniques de d'aluminium de type Al-Cu (2017A). Ces alliages sont utilisés dans diffèrent domaine.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres ;

- Le premier chapitre de ce mémoire concerne une étude bibliographique sur Les alliages d'aluminium, On se focalise sur la série 2000 utilisant le cuivre (Al-Cu) et leurs domaines d'applications.
- Le deuxième chapitre concerne le matériau et techniques de expérimentales au cours de nos recherches.
- Le troisième chapitre est concerné à l'illustration des résultats et les interprétations associées.

Enfin, une conclusion générale pour résumer la totalité de nos travaux.

CHAPITRE I

ELÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

I.1 Introduction

L'aluminium est un matériau qui a connu beaucoup d'évolutions ces dernières années. En effet, l'essor et le développement de la recherche a fait apparaître de nouveaux alliages d'aluminium adaptés à de très nombreuses applications spéciales. C'est la raison pour laquelle ce métal léger trouve son application dans des domaines où il semblait encore inadapté, il y a quelques années.

L'aluminium et ses alliages sont présents sous les formes les plus variées, pratiquement sur tous les marchés ou domaines d'application.

I.2 Désignation numérique

Conformément aux directives de l'aluminum association (Washington 20006, Usa), les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres [1]. Ces quatre chiffres identifiant la composition chimique de l'alliage. Ce groupe de quatre chiffres est parfois suivi d'une lettre indiquant une variante nationale. Il est à noter que la norme européenne EN 573-1 indique que cet ensemble de quatre chiffres doit être précédé pour les alliages destinées à être corroyés par le préfixe en, les lettre «A» (aluminium), «W» (pour les produits corroyés) et un tiret «-». La notation complète est rarement utilisée. Par soucis de simplification (tableau I.1).

I.3 Signification des désignations

- Le premier chiffre indique l'élément d'alliage principal.
- Le deuxième chiffre indique une variante de l'alliage initial. Souvent il s'agit d'une fourchette plus petite dans un ou plusieurs éléments de l'alliage.
- Les troisième et quatrième sont des numéros d'ordre et serve à identifier l'alliage.

La seule exception est la série 1000 ces deux chiffres indiquant le pourcentage d'aluminium.

Série	Désignation	Elément d'alliage principal	Phase principale présente dans l'alliage
Série 1000	1XXX	99% d'aluminium au minimum	-
Série 2000	2XXX	Cuivre (Cu)	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al ₆ Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al ₃ Mg ₂
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et	Mg ₂ Si

		Silicium (Si)	
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn ₂
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000		Non utilisé	-

Tableau I.1 : Désignation des séries principales des alliages d'aluminium [1].

I.4 L'aluminium

Sa production industrielle n'a commencé qu'au début du 20^{ème} siècle. Il est classé comme le métal le plus utilisé après le fer et les aciers [2]. L'aluminium est un élément du troisième groupe de classification de Mendeleïev, dont le nombre atomique est 13, la masse atomique 26.28 et la température de fusion 660°C. Il se cristallise dans le système cubique à faces centrées(cfc), avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa masse volumique est 2.7 kg/dm³, son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de 23.10^{-6} , son module de Young de 6600 bars (660MPa).

L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très réduites et insuffisants pour son utilisation dans un bon nombre d'applications structurales, il est léger, ductile et il résiste à la corrosion. Il présente aussi une très bonne conductivité thermique et électrique [3]. La seule source de ce métal c'est les bauxites qui sont des roches riches en aluminium (45 à 60%), La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium [4].

L'aluminium industriel contient généralement 0.5% d'impuretés (principalement Fe et Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique ($Al > 99.99\%$).

Ces impuretés ont différents effets sur les propriétés électriques et mécaniques. Les propriétés d'aluminium peuvent être améliorées en ajoutant des éléments d'additions tels que le Mg, Si, Mn et Cu.

A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde d'aluminium Al_2O_3 (alumine), fine et adhérente, qui protège le métal. Par contre, ce film d'alumine n'a qu'une résistance chimique limitée. Elle résiste cependant bien dans les solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique. Par contre, les bases attaquent violemment le métal.

Cette protection peut être améliorée par anodisation : il s'agit d'un traitement qui permet d'obtenir une couche épaisse d' Al_2O_3 mais poreuse, et qui est ensuite colmatée par un traitement à l'eau chaude. Cette anodisation a également un but décoratif, car une coloration est possible par des colorants spéciaux avant le colmatage [5].

I.5 Propriétés physiques et chimiques de l'Aluminium [6]

Les alliages d'aluminium ont pris, au cours des 60 dernières années, une place importante dans beaucoup de domaines et occupent la deuxième place parmi les métaux utilisés, après les matériaux en acier et en Ti. C'est dans le domaine de transport que se situe leur principale application, suivis de ceux du bâtiment et de la construction des machines. Depuis de nombreuses années également, l'aluminium est un matériau attrayant pour l'industrie de l'emballage.

L'essor économique et technique de l'aluminium est dû à une combinaison intéressante de propriétés, dont :

- La faible densité.
- La conductibilité thermique et électrique élevées.
- La grande ductilité même à basses températures.
- La stabilité chimique.
- La conformité avec les prescriptions d'hygiène.

On distingue entre l'aluminium de grande pureté, l'aluminium pur et les alliages d'aluminium à base de manganèse, de silicium, de cuivre ou de zinc, dont la principale fonction est d'augmenter la résistance mécanique.

L'augmentation de la résistance mécanique ne s'obtient pas seulement par solidification de cristaux mixtes, mais également par écrouissage ou par durcissement structural.

On note la densité nettement plus faible, le point de fusion très bas, mais également la chaleur de fusion élevée et le point de fusion très élevée de l'oxyde d'aluminium. L'aluminium ne présente pas de couleur incandescente au point de fusion.

Ces caractéristiques conjuguées avec un coefficient de dilatation élevé et une bonne conductibilité thermique font que le soudage de matériaux en aluminium est plus compliqué que celui du fer (tableau I.2).

A température ambiante, les cristaux d'aluminium sont à mailles cubiques à faces centrées et ne sont pas sujet à transformation, si bien que l'aluminium ne peut pas développer de structure de trempe comme la martensite. Une fragilisation à froid ne se produit pas sur l'aluminium.

Propriétés	Unité	Aluminium	Fer
Masse atomique	g/mol	29.98	55.84
Masse volumique	g/cm ³	2.70	7.87

Module d'élasticité	N/mm ³	71 10 ³	210 10 ³
Coefficient de dilatation	1/°K	24 10 ⁻⁶	12 10 ⁻⁶
Chaleur de fusion	KJ/Kg	296	270
Limite élastique	N/mm ²	Env.10	Env.100
Résistance a la traction	N/mm ²	Env.50	Env.200
Oxydes		Al ₂ O ₃	FeO ; Fe ₂ O ₃ ; Fe ₃ O ₄
Point de fusion des oxydes	°C	2046	1400, 1455,1600
Point de fusion du métal	°C	658	1536

Tableau I.2 : comparaison entre les propriétés aluminium-Fer.

I.6 Propriétés générales des alliages d'aluminium

Bien que, en tonnage, la production d'aluminium ne représente qu'un peu plus de celle des aciers, ce métal (et les alliages qui en dérivent) arrive en seconde position en ce qui concerne la production et l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette seconde place à un ensemble des propriétés qui, dans bien des circonstances, en font un matériau irremplaçable [7]. Parmi celles-ci, citons ce qui suit :

I.6.1 La résistance à chaud

La résistance à chaud est faible au-delà de 100°C.

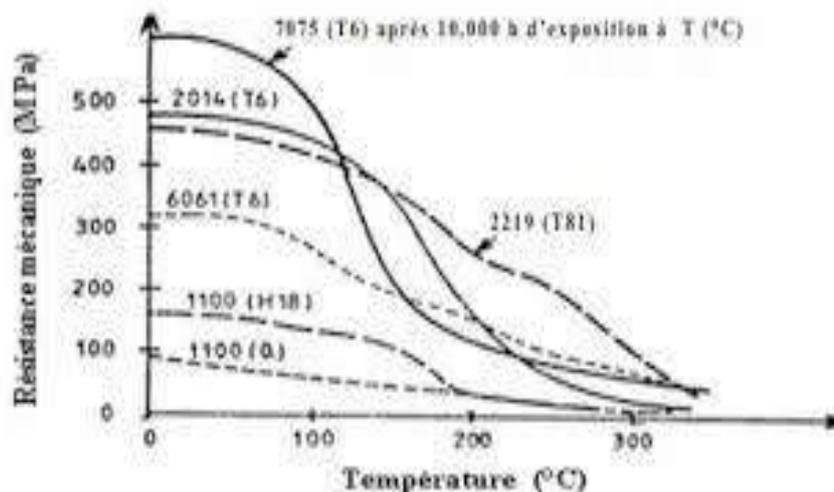


Figure I.1 : La variation de la résistance à chaud en fonction de la température

I.6.2 La résistance à basses températures

De part de leurs structures cubiques à faces centrées (CFC), ces alliages ne sont pas fragiles, d'où leur application en cryogénie.

I.6.3 La résistance à la fatigue

La courbe de WOHLER ne présente pas de coude marqué et l'asymptote horizontale n'est atteinte que vers 10 cycles. En général, le coefficient d'endurance a_D/R_m est de l'ordre de 0.5 pour les alliages non trempant, 0.25-0.3 pour les alliages trempant.

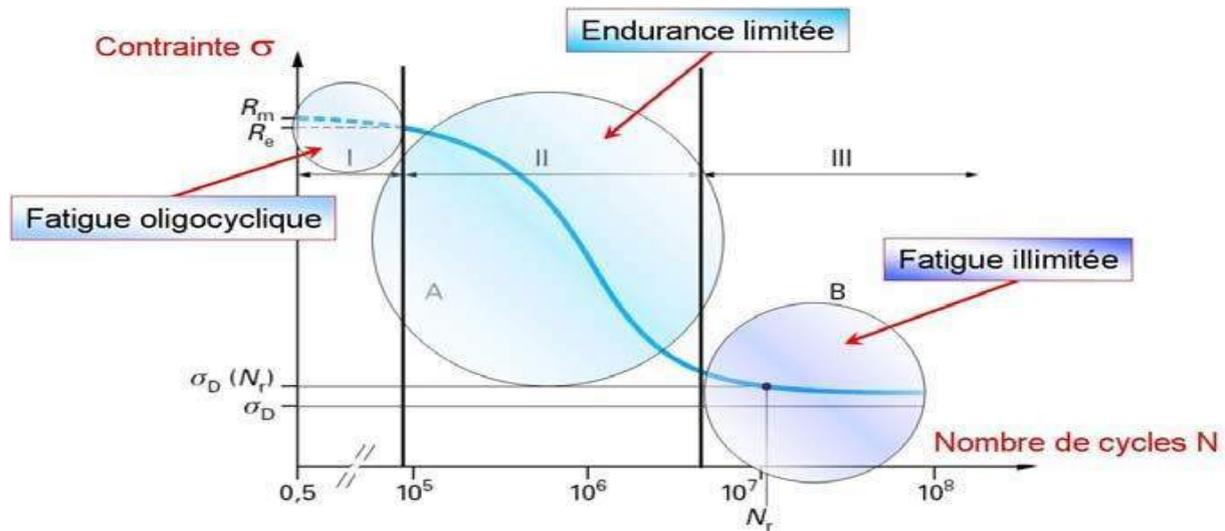


Figure I.2 la courbe de WOHLER.

I.6.4 La résistance à la corrosion

Comme pour l'aluminium non allié, elle est bonne grâce à la formation de la couche protectrice d'oxyde Al_2O_3 et elle peut être améliorée (plus épaisse) par anodisation. Les alliages d'aluminium présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres. Par contre, ils sont sensibles à la corrosion galvanique et des précautions sont à prendre en particulier avec le fer.

I.6.5 La mise en forme

L'aluminium a une température de fusion relativement basse ce qui résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier (coefficient d'écrouissage $n = 0.2$ à 0.3), facile à emboutir.

I.6.6 Soudage

Le soudage est facile si l'on tient compte de la présence de la couche protectrice d'alumine. Les procédés sont donc des procédés sous gaz protecteur (TIG, MIG) ou sous vide (faisceaux d'électrons). Mais s'il n'y a pas de difficulté pour les alliages non trempant, par contre des problèmes peuvent exister pour les alliages trempant ayant une vitesse de trempe élevée (série 2000 ou Al-Cu). Il peut également exister des dangers de corrosion feuilletant après soudage d'alliages de la série 7000 ou Al-Zn.

I.6.7 Résistances comparées de différentes nuances

Le tableau ci-dessous compare la résistance des principaux alliages d'aluminium corroyés à l'exception de ceux de la série 4000 (Al-Si) qui sont plus spécialement des alliages de fonderie.

	Système	Désignation	Phase principal	Domaine de résistance mécanique (MPa)																						
				0	100	200	300	400	500	600	700															
Sans durcissement structural	Al	1000	Al-Fe-Si																							
	Al-Mn	3000	Al ₆ Mn																							
	Al-Mg	5000	Al ₃ Mg ₂																							
Avec durcissement structurale	Al-Mg-si	6000	Mg ₂ Si																							
	Al-Cu	2000	Al ₂ cu Al ₂ CuMg																							
	Al-Zn-Mg	7000	Mg zn ₂	<table border="1"> <tr> <td>Sans Cu</td> <td colspan="7"></td> </tr> <tr> <td>Avec Cu</td> <td colspan="7"></td> </tr> </table>								Sans Cu								Avec Cu						
Sans Cu																										
Avec Cu																										

Tableau I.3 : Résistances des différentes nuances des alliages d'aluminium.

Ces alliages apparaissent suivant les deux catégories [8] :

- Alliages non trempant : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les phénomènes d'érouissage et d'adoucissement par recuit ou restauration série 1000, 3000 et 5000 ;
- Alliages trempant (à durcissement structural) : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les différents paramètres de la trempe structurale : série 2000, 6000 et 7000.

I.7 Alliages à base d'aluminium

Les alliages qui ne subissent pas des traitements thermiques obtiennent une plus haute résistance par érouissage, donc par déformation à froid ou ceux qui ont subissent des traitements thermiques obtiennent leurs propriétés mécaniques à durcissement par précipitation (ou durcissement structurale). En conclusion, on a les groupes suivants : groupe (1XXX) l'aluminium pur, le groupe d'Al-Mn (3XXX), le groupe d'Al-Si (4XXX) et le groupe d'Al-Mg (5XXX). Ces alliages sont la plupart du temps employés pour les produits plats comme feuille mince, lame et clinquants.

Les alliages à durcissement structurale peuvent réaliser une plus haute résistance par traitement thermique et donc ils contiennent un ou plusieurs éléments choisis pour obtenir

cette plus haute résistance par précipitation pendant le vieillissement artificiel. Ceux qui concernent les alliages des séries (2XXX) l'Al-Cu-(Mg), (6XXX) Al-(Cu) -Mg-Si et (7XXX) Al-(Cu)-Mg-Zn.

La série 2XXX contient des alliages avec le cuivre comme un élément de durcissement perfection. Souvent le magnésium est ajouté pour augmenter le maximum de résistance. Ces alliages obtiennent leur très haute résistance par la précipitation des phases Al_2Cu et/ou $CuMgAl_2$. Les alliages de ce groupe sont caractérisés par de haute résistance à la corrosion et très faible extrudabilité et soudabilité. Ils sont largement utilisés dans l'industrie de l'aviation et l'espace, mais également comme pièces de machine, boulons et rivets.

La série 7XXX contient les matériaux de haute résistance semblables au l'Al-Cu-(Mg), mais avec le zinc au lieu du cuivre comme élément d'alliage principal. Cependant, le cuivre est ajouté en petite quantité. La haute résistance est due à la précipitation des précipités $MgZn_2$.

Les alliages sans cuivre ont une résistance à la traction légèrement plus forte de celle des alliages de la série 6XXX, mais leur expulsion est légèrement plus mauvaise. D'autre part, ils sont beaucoup moins sensibles à la trempe et il faut refroidir à l'air pour une épaisseur de paroi beaucoup plus grande. Les alliages contenant le cuivre atteignent la plus haute résistance de tous les alliages d'aluminium, excédant l'acier de construction normal.

L'extrusion est très pauvre et les alliages ne sont pas soudables au-dessous des conditions normales.

Les alliages Al-Mg-Zn sont la plupart du temps employés pour des applications structurales dans l'industrie automotrice où la haute résistance mécanique est nécessaire.

Les alliages Al-Cu-Mg-Zn, d'autre part, sont employés pour les composants soumis à une contrainte particulièrement élevés dans l'industrie d'aviation et d'espace [9].

I.8 Alliages du type A.GS (Aluminium magnésium silicium)

Ces alliages ont une teneur en magnésium (0.35-1%) supérieure à celle du silicium (0.25-0.8%). Il n'y a donc pratiquement pas d'excès de silicium par rapport à Mg_2Si .

Les alliages représentatifs sont l'alliage 6060 qui peut être filé à de très grandes vitesses (140 m.min^{-1}) et l'alliage 6061 qui a de meilleures propriétés mécaniques (additions de Cu et Cr) et la meilleure résistance à la corrosion des alliages trempant. Une série d'alliages de cette famille est utilisée pour le transport de l'énergie électrique. C'est principalement la nuance A-GS/L76, avec 0.55-0.80 Mg, 0.45-0.65 Si, Fe <0.3 et les autres impuretés limitées au maximum, qui est utilisée.

I.9 Alliages du type A.SG (Aluminium Silicium magnésium)

Dans ces alliages, il y a une teneur en silicium supérieure à celle en magnésium, et le niveau de résistance mécanique est atteint grâce à Mg_2Si et à Si. Des additions de chrome, de manganèse peuvent améliorer la résistance à la rupture fragile.

Les principaux alliages normalisés sont l'alliage 6005 A (A-SG 0.5), 6081 (A-SGM 0.3) ou 6082 (A-SGM 0.7) [10].

I.10 Les éléments d'addition et leur Influence

Les éléments d'addition et, en particulier, les éléments de transitions, jouent un rôle très important dans la métallurgie de l'aluminium [11].

La teneur des éléments d'addition est limitée par le facteur de solubilité. Les éléments d'addition les plus répandus dans les alliages d'aluminium sont le cuivre, le magnésium, le manganèse, le zinc, le fer et le silicium. Ces derniers ont plus ou moins une influence sur les caractéristiques de l'Al-Mg-Si. Ils peuvent en même temps améliorer ou détériorer les propriétés physiques, chimiques et technologiques de l'aluminium pur [12]. Un certain nombre d'éléments d'addition sont rajoutés dans certains alliages pour donner une propriété particulière [13].

➤ Magnésium

Le magnésium est la base du développement de la résistance et de la dureté lors des traitements thermiques des alliages Al-Si. Il est en général utilisé dans les alliages Al-Si plus complexes qui contiennent du cuivre, du nickel et d'autres éléments dont le but est également de durcir l'alliage. La phase de Mg_2Si qui durcit l'alliage montre une solubilité limite de 0,70 % de magnésium. Au-delà de cette limite, il n'y a pas davantage de durcissement et il peut même survenir un adoucissement de l'alliage. La composition de magnésium habituellement employée pour les alliages de la famille Al-Si varie de 0,070 à 0,40 %. D'un côté plus négatif, le magnésium contribue à accélérer l'oxydation de l'aluminium liquide et les précipités aux frontières des grains rendent l'alliage susceptible à la fissuration inter granulaire. Finalement, selon Morgan l'ajout de magnésium peut augmenter la micro-dureté de la matrice d'aluminium de 100 à 115 KHN (dureté Knoop).

➤ Silicium

L'effet le plus remarquable du silicium dans les alliages d'aluminium, c'est l'amélioration des caractéristiques de mise en forme (moulage). L'addition du silicium à l'aluminium pur augmente de beaucoup la fluidité, la résistance au craquage à chaud et les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide. La composition la plus utilisée dans les alliages d'aluminium de fonderie est d'ailleurs celle de la famille Al-Si. Les alliages commerciaux hypo eutectiques et

hyper eutectiques ont une proportion de silicium qui peut varier jusqu'à environ 25 % en poids.

➤ **Fer**

Le fer accroît la résistance au craquage à chaud et réduit la tendance de l'alliage à se coller ou à se souder aux parois du moule. Or, l'augmentation de la proportion de fer est normalement accompagnée d'une réduction de la ductilité.

➤ **Cuivre**

Cet élément forme avec l'aluminium le Cu-Al servant au durcissement des alliages. De plus, il contribue de plus à l'augmentation de la résistance mécanique, à la réduction du retrait lors de la coulée et à l'amélioration de l'usinabilité. Toutefois, il diminue généralement la résistance à la corrosion. Les alliages contenant de 4 à 6 % de cuivre sont ceux qui répondent le plus fortement aux traitements thermiques.

I.11 Utilisation des alliages d'Aluminium

Même si les aciers sont les matériaux les plus utilisés dans l'industrie automobile, les besoins récents de véhicules dont le degré de sécurité et de confort est très élevé pour une consommation en carburant réduite font des alliages d'aluminium des candidats naturels. En effet, ils peuvent posséder des caractéristiques mécaniques excellentes pour une masse plus faible. Le marché de l'automobile représente donc pour les fabricants d'aluminium un marché important, dont les potentialités sont plus grandes encore [14].

Il a été resurgi des recherches intéressantes sur les alliages d'aluminium dans les récentes années, peut-être dû aux grandes demandes de l'utilisation des matériaux légers dans l'industrie d'automobile. Les alliages d'aluminium ont une importance spéciale pour les panneaux externes d'automobile, où la haute résistance et la résistance de bosselure sont exigées et pour les amortisseurs, où la bonne résistance et le choc d'absorption sont nécessaires. Dans les deux cas, la bonne formabilité est une exigence importante. Les alliages Al-Mg-Si sont largement utilisés pour la résistance moyenne des applications structurales et dans les sections architecturales. Et ils sont la plupart du temps employés dans les produits expulsés d'Al en Europe de l'ouest, aussi bien que pour la construction des moteurs des véhicules. Les alliages Al-Mg-Si-(Cu), de durcissement par précipitation, ont été choisis pour la fabrication des panneaux de revêtements [15].

I.12 Traitements thermiques des matériaux

Les traitements thermiques ont pour but de modifier la nature et la répartition des constituants d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer

ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier. En général, les traitements thermiques en métallurgie sont : la trempe, le revenu, le recuit et le vieillissement [10].

I.13 Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Les traitements thermiques ont pour but principal de changer la nature et la distribution des caractéristiques d'un matériau. Selon le domaine d'application du matériau les traitements peuvent améliorer ou détériorer les propriétés mécaniques de ce dernier. Généralement les traitements thermiques en métallurgie sont : le recuit, la trempe, le revenu, et le vieillissement. Il existe une série des traitements thermiques standards développés par l'industrie dans le but de contrôler la microstructure et la méthode de fabrication et de fournir des alliages ayant des propriétés spécifiques. La désignation de ces traitements thermiques est présentée dans le (Tableau I.4).

Désignation	Traitement ou état
F	Etat brut
O	Recuit
H	Ecroui
W	Traitement thermique de dissolution
T	Autres traitements thermiques

Tableau I.4 : *Séries de traitements thermiques standards [16].*

Etat **F** - les produits sont fabriqués par déformation plastique, sans que soient maîtrisés les taux d'adoucissement ou de durcissement par déformation ou traitement thermique.

Etat **O** – les produits sont dans l'état le plus ductile, obtenu par traitement de recuit.

Etat **H** – les produits sont durcis par déformation, avec ou sans maintien ultérieur à une température suffisante pour provoquer un adoucissement partiel.

Etat **W** – les produits sont soumis à une mise en solution et une trempe ; ils continuent d'évoluer à la température ambiante. Cet état est un état métallurgique instable.

Etat **T** - les produits sont soumis à un traitement thermique partiel ou complet, avec application éventuelle de déformation plastique.

Les traitements thermiques de la série T, (Tableau I.5), donnent en général comme résultat un matériau très résistant. En effet, ce type de traitements thermiques modifie les propriétés générales d'un alliage, suite aux exigences de son application.

Désignation	Traitements thermiques
T1	Refroidi après transformation à chaud et mûri

	jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits non écrouis après la trempe
T2	Refroidi après transformation à chaud, écroui, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits écrouis après la trempe
T3	Traitement thermique de dissolution, trempé, écroui, et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits écrouis
T4	Traitement thermique de dissolution, trempé et mûri jusqu'à l'obtention d'une condition stable : s'applique aux produits non écrouis
T5	Refroidi après transformation à chaud et revenu : s'applique aux produits non écrouis suivant la trempe
T6	Traitement thermique de dissolution, trempé et revenu : s'applique aux produits non écrouis après la trempe
T7	Traitement thermique de dissolution, trempé et sur-revenu : matériau apporté au-delà du point de résistance maximale afin de contrôler une autre propriété du matériau trempé
T8	Traitement thermique de dissolution, trempé, écroui, et revenu : s'applique aux produits écrouis
T9	Traitement thermique de dissolution, revenu et écrouissage : s'applique aux produits écrouis
T10	Refroidi après transformation à chaud, écroui, et revenu : s'applique aux produits écrouis

Tableau I.5 : *Traitements thermiques de la série T des alliages d'aluminium* [16].

I.14 Principaux traitements thermiques [17]

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium sont généralement répartis en quatre différents types :

- Traitement d'homogénéisation
- Traitement d'adoucissement
- Traitement de durcissement structural

- Traitement de vieillissement

I.14.1 Traitements d'homogénéisation [18]

Ce sont des traitements comportant un chauffage à température relativement élevée appliqués à certains produits bruts de fonderie ou corroyés et destinés le plus souvent à en faciliter la transformation à chaud ou à froid (filage, étirage, laminage, forgeage). Ils consistent en général en des maintiens de 6 à 48 heures à des températures allant de 450°C à 610°C, qui ont pour but général de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

Le corroyage est une opération consistant à déformer un métal avec allongement, généralement, mais non obligatoirement dans un sens privilégié : il est effectué à chaud, à tiède, à température ordinaire et permet par déformation appropriée (forgeage, matriçage, laminage, filage...) d'obtenir des produits à la forme désirée. Il est défini par le rapport de corroyage S/s avec :

S : section avant déformation ;

s : section après déformation ;

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

L'écrouissage est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire (parfois tiède). Il est défini par la réduction de section $[(S-s)/S] \times 100$.

Cette expression doit remplacer celle du taux d'écrouissage qui correspond au rapport : $[(S-s)/S] \times 100$.

I.14.2 Traitements d'adoucissement [18]

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écrouissage ou par trempe structurale. Dans les cas de l'écrouissage, ce sont les traitements de restauration et les recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium.

Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

- Le traitement de restauration est effectué à 200-300°C pendant une à 8 heures ; la structure ne se modifie pas, pourtant les caractéristiques mécaniques évoluent d'autant plus que la température est plus élevée et le temps de maintien est plus long. Au niveau atomique il n'y a qu'une réorganisation des dislocations engendrées par l'écrouissage : certains s'annihilent, d'autre se réarrangent au joint et sous joints de grains d'où la malléabilité de l'alliage.
- Le traitement de recristallisation est effectué à 300-400°C pendant 0.5 à 3 heures ; les atomes se regroupent suivant des nouvelles directions pour former un petit cristal

d'orientation quelconque. Avec le temps de nouveaux atomes viennent s'agglutiner autour du petit cristal jusqu'à ce que les nouveaux grains se rejoignent pour donner la structure macrographique de recristallisation primaire. Si l'on augmente la température ou la durée de maintien, on obtient des structures de recristallisation secondaire à très gros grains. Au contraire, Si l'on stoppe ce traitement de recuit par un temps trop court, on obtient des états partiellement recristallisés.

Dans le cas de la trempe structurale, c'est un recuit de précipitation qui consiste en un chauffage assez prolongé à température comprise entre la température de revenu et la température de mise en solution d'un produit trempé et mûri ou revenu dans le but d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

I. 14.3 Traitement de durcissement structural

Le phénomène de « durcissement structural », a été découvert en 1906 par Wilm [19]. Qui mit en évidence une évolution de la dureté de certains alliages d'aluminium après maintien à la température ambiante suite à une mise en solution et une trempe fraîche. Merica *et al* ont proposé dès 1919 que l'augmentation de dureté était liée à la diminution de la solubilité du cuivre à la température ambiante [20]. Le durcissement structural est basé en effet sur la précipitation des éléments soluté due à la diminution de leur solubilité à la température ambiante.

Le traitement thermique comporte trois étapes principales : une mise en solution solide, un refroidissement rapide et un maintien soit à la température ambiante, appelé « maturation », soit à une température élevée, dit « revenu » (Figure I.3). Celles-ci sont précisées dans les paragraphes suivants.

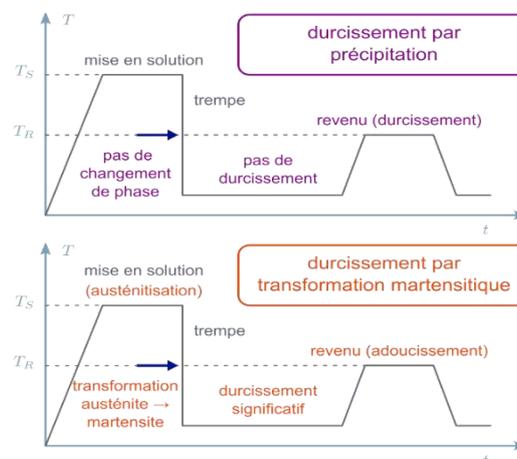


Figure I.3 : Schéma représentatif du traitement thermique de durcissement par précipitation pour les alliages d'aluminium 2xxx, 6xxx ou 7xxx [21].

I.14.3.1 La Mise en solution

Elle consiste au chauffage à une température supérieure à la température de solvus pendant une durée suffisante pour atteindre un équilibre thermique afin que tous les atomes de soluté se retrouvent en solution solide. La température de mise en solution est comprise, en général, entre 400 et 600 °C ; la température optimale dépend surtout de la composition chimique de l'alliage bien évidemment. La durée de mise en solution est également très importante ; elle doit être suffisante pour mettre en solution solide le plus grand nombre possible d'intermétalliques sans toutefois être trop longue [21]. Le Tableau I-6 présente le temps minimal de mise en solution en fonction de l'épaisseur de la tôle et du type de four utilisé, en accord avec les normes EN 515.

Epaisseur ou diamètre (mm)	Temps minimal de la mise en solution (mn)	
	Four à l'air	Four à bain de sel fondu
≤ 0,5	20	10
0,5 – 0,8	25	15
0,8 – 1,6	30	20
1,6 – 2,3	35	25
2,3 – 3,0	40	30
3,0 – 6,25	50	35
6,25 – 12,0	60	45
12,0 – 25,0	90	60
25,0 – 37,5	120	90
37,5 – 50	150	108
50 – 62,5	180	120
62,5 – 75	210	150
75 – 90	240	1665
90 – 100	270	180

Tableau I.6 : *Durée minimale de mise en solution en fonction de l'épaisseur de la pièce traitée et du type de four [22].*

Cette durée de maintien dépend de la nature de l'alliage, des taux de corroyage et d'érouissage, de l'épaisseur du matériau et du type de four.

Une température trop basse ne permettra pas une mise en solution complète des éléments chimiques en soluté qui conduira à de faibles propriétés mécaniques finales et par contre une température très élevée conduira à la détérioration du matériau due à des phénomènes de

brûlure induits par la fusion partielle des eutectiques complexes et des précipités aux joints de grains.

I. 14.3.2 La Trempe [23]

C'est l'opération de refroidissement suffisamment rapide après l'étape de mise en solution de manière à garder la solution solide sursaturée à la température ambiante. Le refroidissement doit, en effet, être effectué le plus rapidement possible pour éviter la décomposition de la solution solide dans toute la pièce. Après la trempe, à la température ambiante, une solution solide sursaturée en atomes de soluté en substitution et en lacunes est donc obtenue. La trempe influe sur les caractéristiques mécaniques et sur la sensibilité à la corrosion de l'alliage. Une vitesse de trempe inférieure à 200 °C/min sensibilise l'alliage à la corrosion inter granulaire et diminue sa résistance mécanique.

Le refroidissement par trempe peut prendre plusieurs formes : la trempe par immersion dans l'eau, par aspersion ou à l'air soufflé.

I.14.3.3 La maturation [23]

Elle intervient après l'étape de trempe, après l'étape de refroidissement la solution solide se trouve dans un état métastable ; elle a donc tendance à retrouver son état d'équilibre. De manière progressive et spontanée, la solution solide se décompose à température ambiante. Ce phénomène est fondamental pour le durcissement structural des alliages 2xxx et 7xxx : au cours de ce processus, une augmentation des propriétés mécaniques en fonction du temps de maturation est observée. Cette maturation est qualifiée de naturelle ; elle peut aussi être effectuée dans l'eau chaude favorisant la pré-précipitation, mais plus particulièrement le colmatage de l'alumine formée par anodisation.

I.14.3.4 Le revenu

Le Revenu peut, le plus souvent, être préféré à une maturation moins durcissante. Le retour de la solution solide sursaturée à l'état d'équilibre peut être accéléré par des maintiens à une température supérieure. Le revenu est donc l'étape de chauffage ultérieure à des températures inférieures aux températures de mise en solution ; elles sont de l'ordre de 100 à 200 °C. Le résultat de cette précipitation sous l'effet du revenu est une augmentation des propriétés mécaniques telle que la dureté. Les conditions de revenu telles que la température et la durée sont spécifiques à chaque type d'alliage. L'évolution de la résistance mécanique en fonction du temps de revenu est caractérisée par une courbe en forme de cloche, avec un maximum de la résistance mécanique pour une durée t correspondant à l'état dit de revenu au pic. Les états sous-revenus correspondent à une durée de traitement inférieure au temps. Dans cet état les alliages gardent une capacité de déformation plastique et donc une bonne aptitude à la mise en

forme, mais la résistance à la corrosion est faible. Les états sur-revenus correspondent à une durée de traitement supérieure au temps t . Cet état présente une résistance à la corrosion supérieure à celle de l'état sous-revenu [22].

I.14.4 Vieillissement thermique

Le terme vieillissement désigne l'évolution (généralement défavorable) des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique environnant, bien que la distinction soit parfois difficile, le terme de corrosion désigne plus spécifiquement une dégradation et/ ou une perte de matière par réaction chimique du matériau avec son environnement, réaction qui se produit en surface de la pièce considérée. L'usure est une perte de matière d'origine mécanique, consécutive au mouvement relatif de deux surfaces solides en contact.

L'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ 0.5 T fusion par restauration ou recristallisation constitue un exemple typique de vieillissement thermique [24].

I. 14.4.1 Vieillissement naturel

Les alliages traités thermiquement voient leurs propriétés changées une fois revenus à la température ambiante après leur traitement thermique. Ceci est appelé vieillissement naturel, Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années.

Certains alliages de la série 6000 qui sont durcissant et peuvent atteindre une dureté maximale après un mois à la température ambiante.

I. 14.4.2 Vieillissement artificiel

Il consiste en un chauffage à une température au-dessus de la température ambiante, et en maintient selon les objectifs désirés et la nature du matériau traité, la précipitation s'accélère et la dureté augmente encore par comparaison au vieillissement naturel. Ceci est appelé vieillissement artificiel et il est effectué à des températures allant jusqu'à 240°C (100 à 240°C dans le cas de la série 2000) Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné.

I.15 Traitements de trempes structurales

Le traitement de trempes structurales des alliages d'aluminium comprend une mise en solution solide suivie :

- D'un refroidissement suffisamment rapide pour maintenir à la température ambiante la solution solide existant à des températures plus élevées.

- D'un traitement de revenu ultérieur à l'ambiante (maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage [18].

I.16 Traitement industriel de trempe structurale

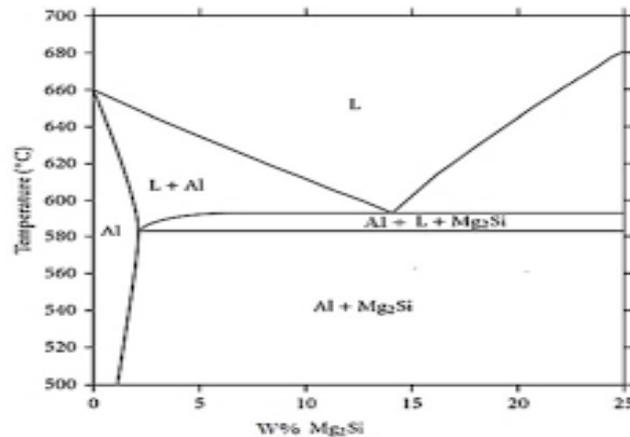


Figure I.4 : Le diagramme d'équilibre Al-Mg₂Si.

Ce traitement va être défini par :

- Un traitement de mise en solution : la température de ce traitement est très précise car dans le cas général, le domaine (440 °C et 500 °C) n'est pas important. Il faut en particulier éviter d'atteindre la température de brûlure pour laquelle l'alliage commence à fondre aux joints de grains. La régénération de l'alliage par traitement thermique ou mécanique est alors impossible. Pour éviter la brûlure due à la ségrégation mineure on évite de dépasser la température TE (eutectique).
- Une vitesse critique de trempe qui est la vitesse minimale permettant d'obtenir à température ambiante la solution solide sursaturée.
- Un traitement de maturation ou de revenu. Certains alliages sont favorablement influencés par un temps d'attente entre trempe et revenu. Un écrouissage entre trempe et revenu est conduit à des effets favorables dans certains cas [18].

I.17 Alliages sans durcissement structural

Différent mécanisme de durcissement intervient dans ces alliages pour moduler les propriétés mécaniques tels que :

- Le durcissement par écrouissage, tels que la déformation par laminage, l'étirage, le tréfilage, permet d'accroître la limite élastique au détriment de l'allongement.
- La restauration des propriétés initiales des alliages peut être obtenue suite aux traitements thermiques appropriés.
- Le durcissement par addition en solution : la présence dans le réseau cristallin de l'aluminium d'addition en substitution ou en insertion constitue un obstacle à la

déformation et confère à l'alliage des propriétés de résistance mécanique. On peut superposer à ce durcissement un écrouissage.

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

Les alliages Al-Mn (série 3000) et Al-Mg (série 5000) sont les principales familles d'alliages d'aluminium sans durcissement structural. Le manganèse augmente les caractéristiques mécaniques par la précipitation de phases dispersées. En effet, le manganèse augmente la résistance et la température de recristallisation de l'aluminium grâce à la précipitation de Mn sous forme de fins précipités de type Al_6Mn [16].

I.18 Alliages à durcissement structural

Le durcissement structural obtenu par un processus comportant :

- La mise en solution des éléments durcissant.
- La trempe, c'est à dire un refroidissement rapide interdisant toute diffusion afin d'amener cette solution solide dans un état sursaturé métastable.
- Vieillissement à une température inférieure à la température d'homogénéisation, afin de faciliter le retour partiel vers les conditions d'équilibre.

Les principales familles d'alliages à durcissement structural sont : Al-Cu (série 2000), Al Mg Si (série 6000), et Al-Zn-Mg (série 7000).

I.19 La tribologie

I.19.1 Introduction

La tribologie est la science qui étudie l'ensemble des phénomènes qui ont lieu lorsque des corps en contact sont mis en mouvement relatif. Elle présente trois aspects distincts : le frottement qui est la résistance à un déplacement impose, l'usure suite à la dégradation de surfaces qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact. C'est une science pluridisciplinaire faisant intervenir des notions de mécanique, de physicochimie et de la science des matériaux en général.

Au début du vingtième siècle, la tribologie s'appuyait sur l'étude des volumes, avec une domination des concepts de la mécanique permettant d'établir des lois de comportement.

Au milieu du vingtième siècle, la tribologie s'est tournée vers l'étude des surfaces grâce aux concepts de la physique des surfaces. Depuis une vingtaine d'années, la recherche en

tribologie porte sur l'étude de la dynamique des interfaces avec la prise de conscience du rôle fondamental des éléments inter faciaux dans un contact.

Les phénomènes de frottement ne sont pas décrits par des propriétés intrinsèques des matériaux, ce qui rend leur prédiction particulièrement délicate. En outre, le frottement et l'usure sont des phénomènes indépendants. Il est en effet possible de concevoir des systèmes à usure faible et frottement élevé (freins) ou à usure forte et frottement faible (usinage).

Enfin, l'introduction de la notion de contact à trois corps, qui s'articule autour des concepts de triplet tribologique, de circuit tribologique et de mécanisme d'accommodation de vitesse, a permis une meilleure compréhension des mécanismes de frottement et d'usure.

La tribologie est la science qui étudie les aspects positifs du frottement (les processus d'usinage et la fabrication...) aussi bien que les aspects négatifs (l'usure, les bruits engendrés et les vibrations...). Donc, elle peut contribuer aux améliorations suivantes :

- Améliorer la qualité du fonctionnement.
- Augmenter le rendement en minimisant les pertes énergétiques.
- Prolonger la durée de vie.
- Atteindre des vitesses plus élevées.
- Améliorer la lubrification [26].

I.19.2 Les échelles en tribologie [26]

Dans le système tribologique, il y'a des dimensions essentielles pour connaître les précautions de tous les constituants de ce système, on peut les résumer dans les points suivants :

- La mécanique des solides mesurée en macro mètre (taille des systèmes mécanique) ;
- La mécanique de surface mesurée en micromètre (taille d'interaction à l'échelle atomique) ;
- La physico-chimie de surface mesurée en nanomètre (taille de l'aire réelle de contact);

I.19.3 Structure d'un système tribologique

Les éléments d'un système tribologique sont illustrés dans la figure ci-dessous :

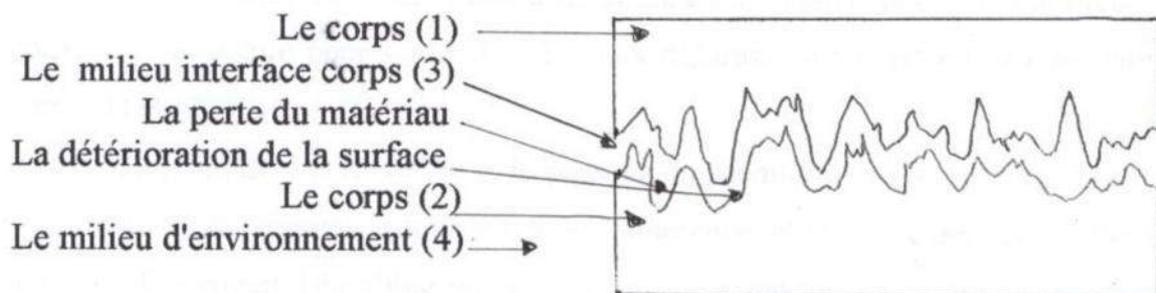


Figure I.5 : Les éléments d'un système tribologique [26].

I.19.4 Les surfaces [27]

La surface est définie comme la partie extérieure d'un corps. En fait, comme tout solide se trouve dans un environnement donné, la surface correspond plutôt à une interface. Elle constitue une discontinuité dans l'arrangement périodique des atomes. Le nombre de plus proches voisins d'un atome en volume sera différent de celui en surface d'où une grande réactivité pour cette catégorie d'atomes.

La notion d'état de surface comprend :

- L'état physico-chimique (nature, structure, texture des couches superficielles) ;
- L'état géométrique (ensemble des écarts géométriques de la surface réelle par rapport à la surface géométrique idéale) ;

Les surfaces présentent des défauts géométriques de différents ordres : ordres macroscopiques liés à des écarts de grandes amplitudes dus généralement aux défauts géométriques de la machine génératrice.

- Ordres microscopiques liés à des écarts de faibles amplitudes dus à l'outil de coupe, aux grains abrasifs, aux particules de sablage ou grenailage, aux vibrations de la machine, ou encore aux piqûres de corrosion.

I.19.5 La mécanique des contacts [28]

Les sollicitations imposées aux corps (1) par le mécanisme conduisent à des champs de contraintes, des déformations et des températures à la surface du corps (2). Pour que le problème de l'antinomie entre le haut niveau de résistance mécanique exigé par le volume des corps (1) et (2) et leur faible résistance au cisaillement dans la zone du contact, soit résolu la présence d'un troisième corps, est nécessaire pour servir le siège aux déformations imposées par les vitesses relatives des corps (1) et (2).

Du point de vue mécanique, le passage du premier corps au troisième corps sera caractérisé par la continuité des déformations dans le cas de l'adhérence, et par celle des contraintes tangentielles dans le cas du frottement, l'équilibre mécanique impose à son tour la continuité des contraintes normales qui donne une dissipation d'Énergie dans le troisième corps, celle-ci induit des augmentations de température dans les trois corps en contact.

La répartition de la température varie d'un corps à un autre suivant les propriétés thermiques et la vitesse des surfaces de contact. Concernant les pressions exercées sur les surfaces, elles se situent dans une large fourchette allant de quelques centaines de KPa à quelques GPa, et sont suffisantes pour conduire au démarrage et à la diffusion de fissures dans les corps (1) et (2), qui aboutissent à des détachements des particules alimentant le troisième corps dans certains cas de frottement sec.

I.19.6 Les types de contact [29]

On peut distinguer les types suivants :

➤ **Le contact ponctuel**

On trouve ce contact entre une sphère et une sphère ou entre une sphère et un plan.

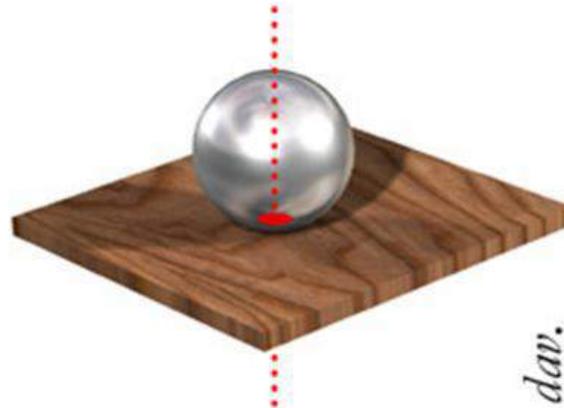


Figure I.6 : *contact ponctuel* [29].

➤ **Le contact linéaire**

On trouve ce contact entre un cylindre et un plan ou un cylindre et un autre cylindre, à titre d'exemple entre les dents d'engrenages.

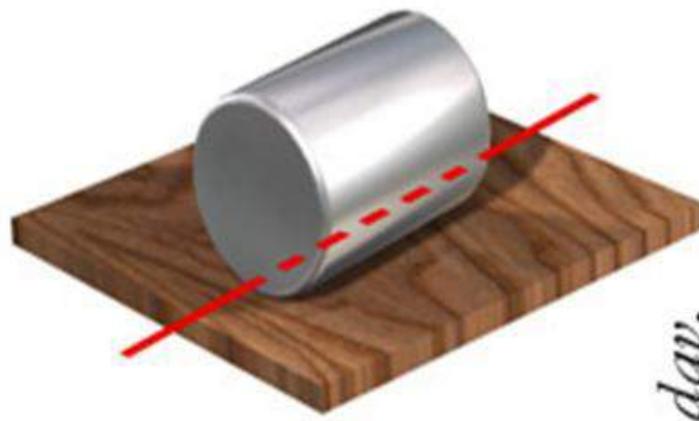


Figure I.7 : *contact linéaire* [29].

➤ **Le contact cylindrique**

C'est le cas d'un arbre/alésage ou le contact est une surface complètement cylindrique

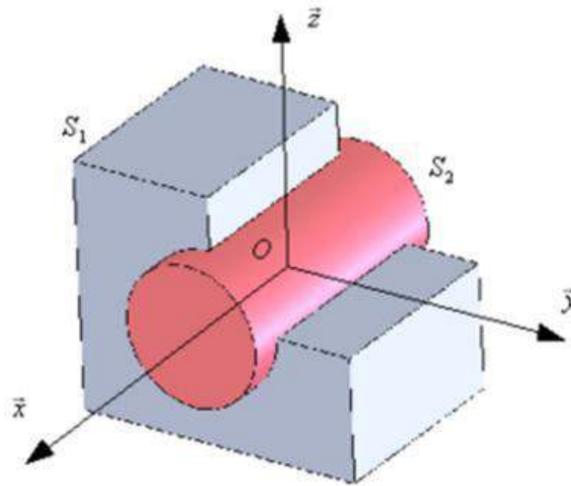


Figure I.8 : *contact cylindrique* [29].

➤ **Le contact conique**

On utilise les cônes à faibles conicités, pour avoir une bonne précision longitudinale

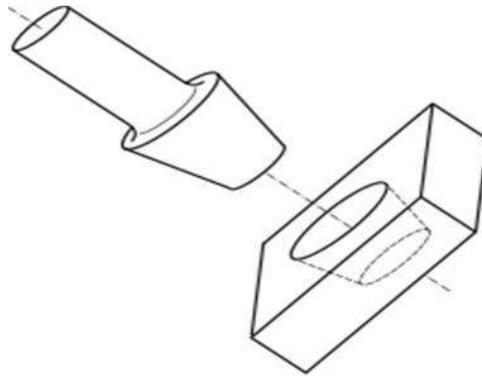


Figure I.9 : *contact conique* [29].

➤ **Le contact plane**

On trouve ce contact entre un plan et un autre plan, par exemple au cas du freinage on obtient un contact disque/plaquettes.

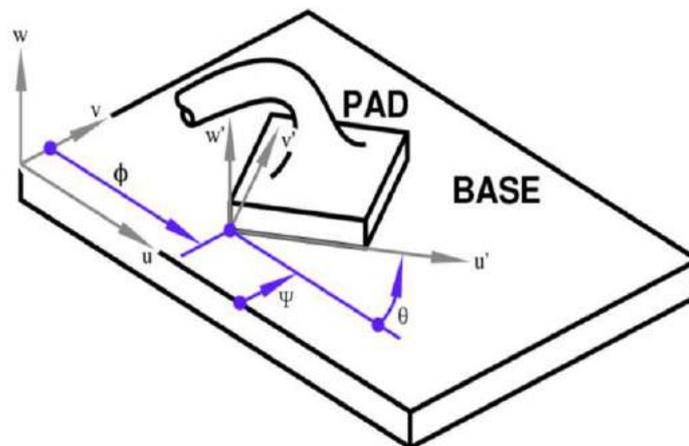


Figure I.10 : *contact plane* [29].

➤ **Contact hertzien**

C'est un contact de deux sphères de rayons respectivement r_1 et r_2 .

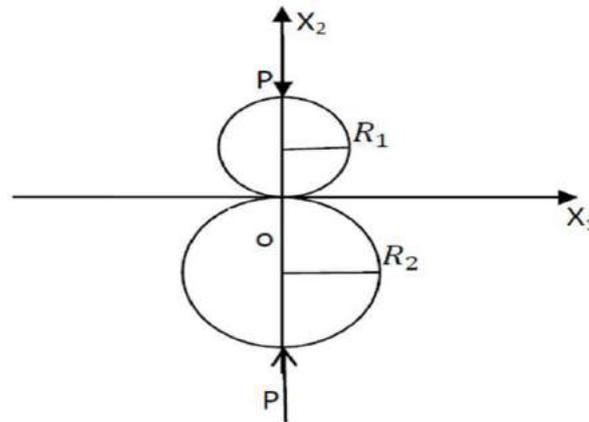


Figure I.11 : *contact hertzien*

I.19.7 Le contact des surfaces solides

La question qui se pose est : comment le contact se fait ? Pour répondre à cette question, il faut étudier la surface de contact.

➤ **Surfaces de contact [26]**

La surface d'un corps solide n'est pas parfaite, elle contient des rugosités, et par conséquent, quand deux pièces sont en contact sur un étendu de surface S , et en présence d'une charge normale p , le contact en réalité ne se fait pas sur toute la surface S , mais seulement sur les petites zones d'air, qu'on appelle : jonctions.

La somme de toutes zones va donner la surface réelle de contact S_r

Le rapport S_r/S n'atteindra que quelques pourcents.

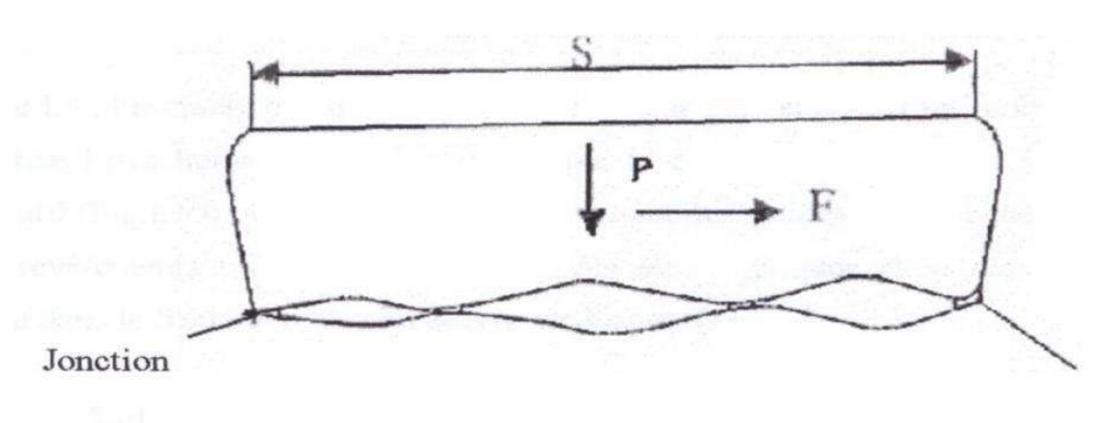


Figure I.12 : *Surface de contact [26].*

Dans le cas du contact cylindrique, les jonctions sont soumises à des contraintes normales et tangentielles très élevées.

I.20 Le frottement

A) Phénomène mécanique

Le frottement est engendré par le déplacement relatif tangential de deux surfaces en contact.

La résistance au frottement est caractérisée par la force \mathbf{T} qui s'oppose au mouvement.

On appelle coefficient de frottement, μ , le rapport entre la résistance de frottement \mathbf{F}_t (force tangentielle) et la force normale \mathbf{F}_N appliquée entre les deux surfaces en contact :

$$\mu = \frac{f_t}{f_n} \dots \dots \dots (1)$$

La résistance au frottement a deux origines principales [27]

- La présence des aspérités sur les surfaces de contact ;
- L'adhérence entre les surfaces ;

La résistance au frottement correspond donc à une dissipation d'énergie. La puissance dissipée correspond au travail de la force de traction \mathbf{T} et s'exprime par la relation suivante

$$\Phi = \mu \cdot p \cdot v / s \dots \dots \dots (2)$$

Φ : La densité de flux dissipée ($\text{N}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$) ;

μ : Coefficient de frottement ;

P : La pression moyenne dans le contact (Pa) ;

V : Vitesse (m/s) ;

S : La section (m^2) ;

B) Aspect tribologique [26]

La tribologie regroupe la lubrification, le frottement et l'usure. C'est une science pluridisciplinaire qui fait appel à la Mécanique et à la Physique des volumes et des surfaces.

B.1) La mécanique en tribologie

Le rôle de la mécanique en tribologie varie selon le domaine étudié. On peut isoler :

- La lubrification hydrodynamique ;
- La mécanique du frottement ou frottement sec et de l'usure ;

La lubrification hydrodynamique, ou lubrification en film continu, est un domaine privilégié de la mécanique des fluides.

Contrairement à la lubrification hydrodynamique, la mécanique du frottement et de l'usure ne dispose pas d'un formalisme complet. Elle s'appuie sur la mécanique des contacts ou théorie des contraintes dans les massifs en contact.

B.2) Développement de la lubrification hydrodynamique, de la mécanique du frottement et de l'usure [30]

La lubrification hydrodynamique et la mécanique des contacts présentent des degrés d'avancement ou des capacités à décrire la réalité très différente.

La lubrification apporte une solution complète aux problèmes mécaniques qui relèvent de sa compétence en donnant pour une condition de fonctionnement donnée et en tout point du contact :

- Le profil de vitesse au travers du film visqueux qui sépare les pièces en contact.
- La distribution des contraintes normales et tangentielles.

D'où l'on tire la portance, et le frottement visqueux.

Par contre, la mécanique des contacts donne pour une charge normale, une géométrie et des matériaux donnés, la distribution des contraintes normales et les déplacements correspondants des corps en contact.

La mécanique des contacts est donc performante pour l'analyse des contacts statiques mais, contrairement à la théorie hydrodynamique, elle est quasi- inefficace en dynamique

I.21 L'usure

I.21.1 Le phénomène d'usure

La détérioration d'une matière produit des déchets. Qu'on appelle l'usure, c'est la conséquence du frottement et se produit au niveau de la zone de contact.

Les paramètres qui influent sur le taux d'usure sont [30] :

- La force de contact ;
- Les conditions opératoires : la charge, la température, la vitesse, la pression ;
- L'aire de contact ;
- L'état physico-chimique des surfaces flottantes (la rugosité, les couche d'oxydes) ;

Les propriétés mécaniques des matériaux (dureté) :

- L'absence ou la présence d'un lubrifiant ;

I.21.2 Les origines d'usure [26] :

- Les déformations plastiques ;
- La fissuration ;
- Les transformations physico-chimiques des surfaces ;
- Adhésion : transfert à l'échelle atomique, grippage, micro grippage ;

I.21.3 Différents types d'usure [30]

GODFREY a établi l'existence de plusieurs types de phénomène d'usure. BARWELL a également mis au point une classification des types de phénomène d'usure de base on va citer les phénomènes importants dans la mécanique tel que :

➤ L'usure adhésive

L'usure adhésive fait appel à des notions de physico-chimie. Il y a formation de liaisons (intermoléculaires, interatomiques) à l'interface. On parle d'usure douce lorsqu'on a cisaillement de ces liaisons. L'usure sévère (aussi appelée « grippage ») apparaît lorsqu'il y a arrachement de matière de l'une des surfaces. D'où la formation d'un « film de transfert », collée à la surface antagoniste.



Figure I.13 : usure adhésive [30]

➤ L'usure abrasive

L'usure abrasive est un phénomène mécanique qui représente l'endommagement des surfaces par des aspérités (abrasion à deux corps) ou des particules « dures » (abrasion à trois corps). On différenciera le labourage (déplacement de matière et formation de bourrelets), prédominant pour les matériaux ductiles, de la coupe (enlèvement de matière), particulièrement repérée pour des matériaux fragiles.



Figure I.14 : *usure abrasive* [29].

➤ **L'usure par fatigue**

Il y a formation de fissures dans les matériaux en présence, sous l'effet de gradients de contraintes cycliques. Les fissures se propagent vers la surface et il y a détachement de « grosses » particules dont la taille peut atteindre le millimètre.

On parlera particulièrement d'égrènement lorsqu'il y a formation de trous correspondant à la microstructure initiale des matériaux. Il y a « déchaussement » au niveau des joints de grains d'un métal par exemple. On parle de délamination lorsque les déformations plastiques répétées des premiers corps conduisent à des fissures en sous-surface, parallèles à la surface. Il y a propagation des fissures le long du plan de cisaillement maximum.



Figure I.15 : *usure par fatigue* [29].

➤ **L'usure de corrosion**

L'endommagement est ici dominé par des réactions chimiques, et les produits de corrosion sont enlevés par action mécanique. Il y a formation de films inter faciaux compactés.



Figure I.16 : *usure de corrosion* [29].

➤ **Usure par érosion**

L'érosion est une usure abrasive particulière, causée par des impacts de particules solides contenues dans un fluide en mouvement ou par des particules liquides en milieu gazeux.



Figure I.17 : *usure par érosion* [29].

I.21 Les lubrifiants [26]

I.21.1 Historique

Au début, les lubrifiants utilisés étaient des huiles et des corps gras d'origine animale ou végétale, puis les huiles d'origines pétrolières se sont imposées vers la fin du 19^{ème} siècle.

Dans les années 60, une véritable croissance de recherche sur les lubrifiants a eu lieu, elle était exceptionnellement animée par la course vers l'espace.

I.21.2 Définition de lubrifiant

Le mot lubrifiant est tiré du mot latin « lubricus » signifiant glissant c'est le produit interposé entre les surfaces frottantes d'un mécanisme pour réduire le frottement, l'échauffement et l'usure des organes en mouvement.

I.21.3 Le rôle de lubrification [26] :

- Empêcher l'usure ;
- Réduire les pertes par frottement ;
- Protéger contre la rouille et la corrosion des surfaces frottantes ;
- Le refroidissement
- Faciliter le glissement.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

II.1 Introduction

L'objectif de notre travail est d'étudier l'influence de traitement thermique sur des échantillons d'aluminium AU4G. Le procédé utilisé est un traitement thermique suivis un vieillissement naturel et artificiel (glace et revenu).

Dans une deuxième étape, on présentera les différentes techniques de caractérisation :

L'analyse microstructurale, le test de duretés ; le test d'usures et le teste de résilience et le procède d'oxydation.

II.2 Matériaux utilisés

Le matériau utilise est un alliage d'Aluminium type (2017A) dont la composition chimique est donne dans le tableau suivant :

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.2 à 0.8	Max 0.7	3.5 à 4.5	0.4 à 1.0	0.40 à 1.0	0.1	0.25	-	Solde

Tableau II.1 : composition chimique.

II.2.1 Elaboration des échantillons

Les échantillons utilisés pour le traitement thermique, ont été usinés au niveau du hall de technologie où on a effectué à l'aide d'une scie à métaux :

- Des échantillons sous forme de cube.
- Des éprouvettes normalisés, pour l'essai de résilience.

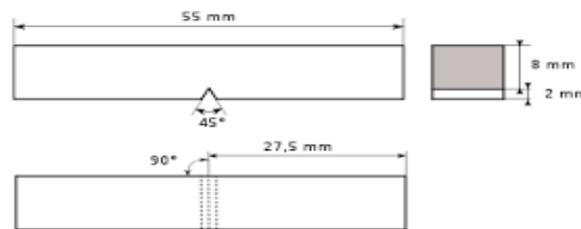


Figure II.1 : éprouvette de résilience.

II.3 Traitement thermique

Le traitement thermique a été effectué avec un four électrique à moufle qui permet d'atteindre la température maximale de 1200°C. La régulation de la température et de la vitesse de chauffage est assurée par un régulateur électronique (figure.II.3). Les échantillons ont subi lors du traitement thermique un chauffage qui a atteint une température de (550 C°) pendant 6 heures. Le choix de cette température nous a permis de ne pas dépasser le point eutectique, afin d'avoir que la phase alpha dans l'alliage. Après avoir effectué le traitement, nous avons répartis les échantillons en trois refroidissements et chaque refroidissement en trois vieillissements.

1 : Refroidissement à l'air, vieillissement à l'air, au four et à la glace.

2 : refroidissement four(revenu) vieillissement à l'air, au four et à la glace.

3 : Refroidissement glace vieillissement à l'air, au four et à la glace.

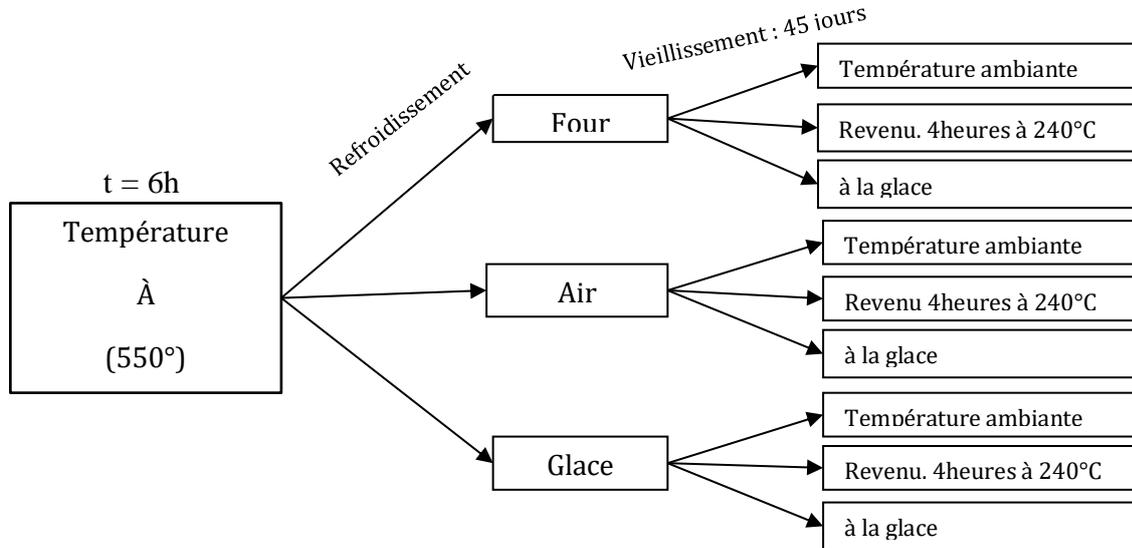


Figure II.2 : répartition des échantillons.



Figure II.3 : Four électrique à chambre horizontale.

II.4 Polissage

Les échantillons destinés à la métallographie et à l'essai de dureté brinell, essai de corrosion sont polis sur du papier abrasif aux carbures de silicium de différentes granulométries. On a utilisé les papiers de grade (320) jusqu'au grade (2000). Pour le polissage de finition un papiers feutre, imprégné d'une pate diamantée (0,32 μm) soluble dans l'eau, a été utilisé. Les échantillons sont nettoyés à l'eau distillée.



Figure II.4 : *La polisseuse mécanique utilisée.*

II.5 Essais de dureté par pénétration

II.5.1 Définition

La dureté, de symbole général H (de l'anglais-Hardness), est une propriété mécanique qui exprime la résistance d'un matériau soumis à une déformation plastique localisée (petites indentation ou rayure).

Beaucoup de méthodes servent à l'évaluation de la dureté ; les plus courantes consistent à mesurer la résistance à la pénétration.

II.5.2 Principe de l'essai

Un pénétrateur, de formes différentes suffisamment dur pour ne pas être déformé par le matériau à essayer entre de force dans la surface de la pièce, les conditions de charge et de vitesse d'application étant contrôlées. La profondeur ou dimension de l'empreinte (indentation) résultante est mesurée et rapportée à un nombre de dureté. Plus le matériau est mou, plus l'empreinte est grande et profonde et plus le nombre d'indexation de la dureté est petit.

Les essais de dureté sont relativement économiques pour les raisons suivantes :

L'appareillage de l'essai est relativement peu cher ; il n'est pas nécessaire d'utiliser une éprouvette spéciale ; l'essai est non destructif- la déformation de l'éprouvette n'est qu'une simple indentation.

II.5.3 Machine d'essais

La machine d'essais de dureté présente au laboratoire, permettant de faire les trois types d'essais, est Hackert Leipzig (figure II.5).



Figure II.5 : Machine d'essais de dureté.

II.5.4 Essai de dureté (brinell)

Le pénétrateur est une bille polie en acier trempé (HBS) de diamètre $D=2.5$ mm pour une charge F de (981 N) (figure II.6). La charge F est maintenue pendant 15 à 30 s, selon le solide. Après le retrait de la charge elle laisse une empreinte circulaire permanente dont le diamètre d est d'autant plus grand que le métal est moins dur et que la bille s'enfonce plus profondément dans le métal.

La mesure du diamètre d de l'empreinte peut se faire à 0,05 mm près au moyen d'une règle dite règle de Chatelier.

L'essai peut renseigner sur la résistance à l'usure, l'homogénéité du matériau, traitement thermique.

La dureté s'exprime par le rapport de la charge F à la surface S de la calotte sphérique imprimée dans le métal.

$$HB = \frac{f}{s} = \frac{2 \cdot 0.102 f}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

F(N) : la charge en Newton ;

D(mm) : diamètre de la bille ;

d (mm) : diamètre de l'empreinte ;

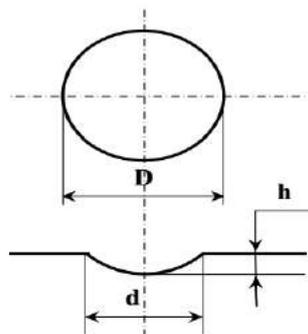


Fig.II.6 : Essai Brinell.

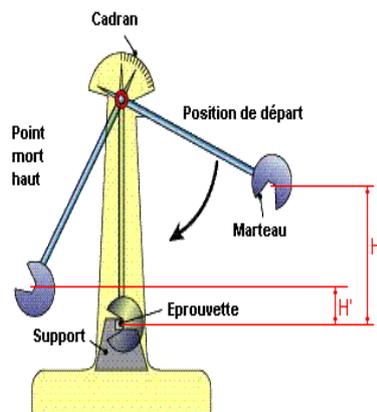
II.6 Essai de résilience (Charpy)

II.6.1 But de l'essai

Les essais de résilience permettent de caractériser la fragilisation d'un matériau. Ils consistent à rompre une éprouvette entaillée (l'entaille a pour but de fragiliser le matériau) éprouvette Charpy - sous l'impact d'un "mouton-pendule". On mesure l'énergie absorbée par la rupture, ce qui permet de remonter à la résilience du matériau (énergie absorbée ramenée à la surface (joule/cm²)).

II.6.2 Mouton Charpy

Le mouton Charpy est constitué d'un couteau fixé sur un marteau qui oscille dans un plan vertical autour d'un axe (fig.II.7). Pour un essai, le couteau est amené à une hauteur H qui correspond à l'énergie de départ $W_h = mg h$. Dans sa chute, le couteau va provoquer la rupture de l'éprouvette qui sera accompagnée d'une absorption d'énergie KV , et le marteau remontera à une hauteur H' à laquelle est associée une énergie potentielle $W_{h'} = mg h'$. Il vient alors simplement $KV = W_h - W_{h'}$. Plus H' , la hauteur de remontée est faible, plus le matériau est résilient.



Pendule de Charpy

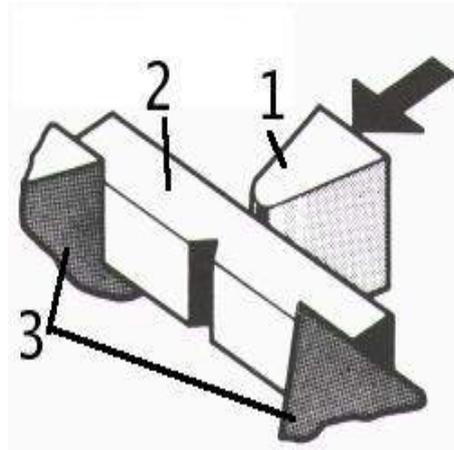


schéma de fonctionnement

1 : couteau ; 2 : éprouvette ; 3 : appuis

Figure II.7 : Pendule de Charpy + schéma de fonctionnement.

II.6.3 Les éprouvettes

Une éprouvette Charpy est un barreau de section (10 × 10 mm) entaillée en son milieu et dont la longueur est de (55 mm). L'entaille a une forme de cavité.

II.7 Le microscope optique

L'observation de l'AU4G a été réalisée à l'aide d'un microscope optique de marque « JIOMO » type METAM-P1, avec des grossissements allant de 50 à 1000. Au moyen d'une caméra, le microscope est relié à un ordinateur équipé d'un logiciel de traitement d'image (Matrox

Inspector), et transmis instantanément l'image qui s'affiche sur l'écran et qu'on peut stocker dans des fichiers réservés pour chaque type d'échantillons. Ces fichiers seront par la suite repris pour une éventuelle analyse d'image. Avant d'être vu au repris au microscope optique, l'échantillon a subi un polissage.

Une attaque chimique qui s'effectue par immersion de l'échantillon fraîchement poli et sec dans une solution de Mittal 4% (4% col. HNO₃ et 96% vol. Éthanol). L'attaque est arrêtée après quelques secondes (10-20 secondes). L'échantillon est rincé par la suite avec l'eau. Le but de l'attaque métallographique est de créer un contraste révélant la microstructure de l'alliage étudié.



Figure II.8 : *Microscope Optique utilisé (disponible au Hall de Technologie).*

II.8 Caractérisation thermique (tests d'usure)

II.8.1 Principe du teste d'usure

Afin de suivre le comportement à l'usure des différents échantillons, on a fait subir aux échantillons des essais de masse par abrasion en fonction de temps. Ces derniers sont réalisés en jouant sur trois paramètres qui influent sur l'usure à savoir : la charge, le temps et la vitesse.

II.8.2 Représentation du dispositif d'usure

Afin d'assurer les tests d'usure, on a élaboré un dispositif qui comporte une tige articulée à son extrémité, et au milieu un poids qui permet de mettre l'échantillon en contact plane sous charge maîtrisée avec le cylindre tournant à une vitesse qu'on peut manipuler (de 90tr /min jusqu'à 180tr/min), tout le dispositif est monté sur un tour voir (figure II.9).

Le dispositif d'usure utilisé a été réalisé au niveau du Hall de technologie de l'université de Bejaia.

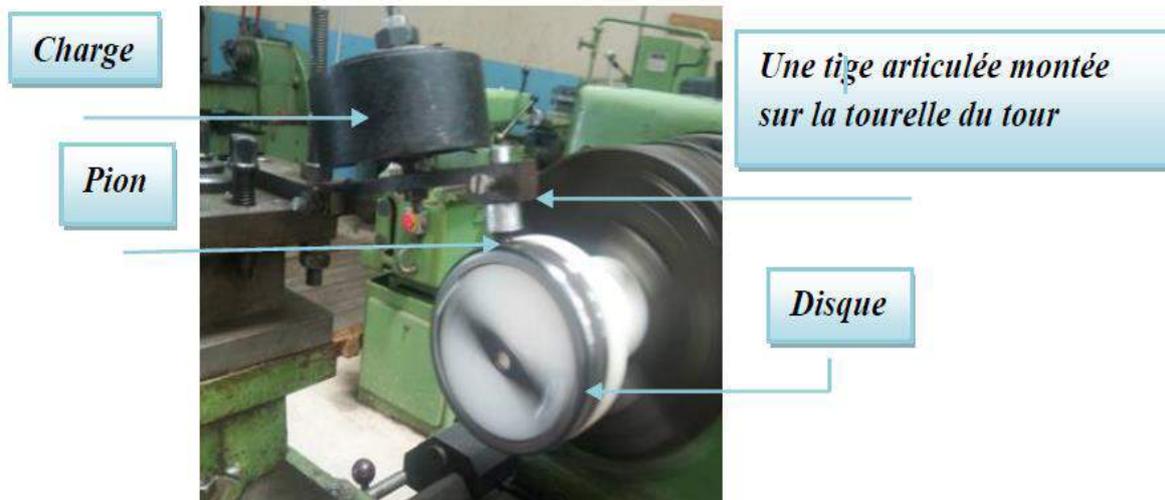


Figure II.9: Représentation du dispositif d'usure utilisé.

II.8.3 Optimisation et réalisation du test d'usure

Afin de réunir toutes les conditions nécessaires pour la réalisation de tests d'usure significatifs soutenue par l'obtention des résultats fiables permettant une comparaison du comportement en matière de perte des masses des échantillons. Nous avons essayé de gérer les paramètres influents sur l'usure comme suit :

Avant de commencer les tests, on doit nettoyer notre échantillon des éléments additifs.

- Prendre la masse initiale (M_0) de l'échantillon à l'aide d'une balance analytique de précision 0,1 mg (figure II.11) ;
- Nettoyer le cylindre monté sur le mandrin ;
- Introduire l'échantillon dans le dispositif, et actionner le tour ;
- Après la fin du temps de chaque essai, on mesure la température à l'aide d'un thermomètre (figure II.10), et nettoie l'échantillon des additifs tout en prenant la nouvelle valeur de sa masse (M_1).
- Observation des phénomènes d'usure à l'aide d'un microscope optique



Figure II.10 : *Thermomètre Laser.*

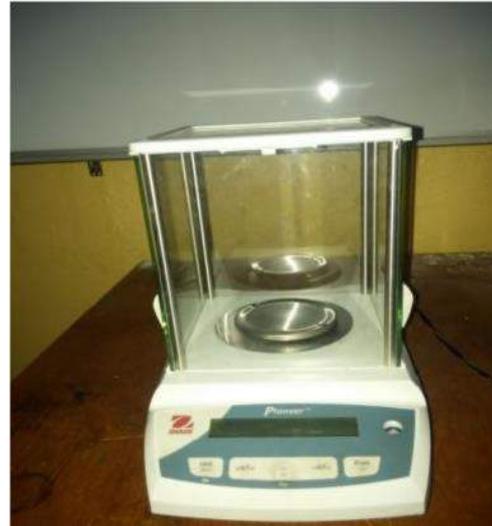


Figure II.11 : *balance analytique.*

A) Les charges appliquées

On a appliqué des charges lors des tests d'usure pour les différents échantillons : les charges appliquées (5 N, 30 N).

B) La vitesse

Le travail s'est effectué à deux vitesses pour chacune des charges appliquées à savoir :

- À 90 tr/min ;
- À 180tr/min.

C) La lubrification

Les tests d'usure ont été réalisés sans lubrification.

II.9 Procédure d'oxydation

Les échantillons ont été pesés sur une balance de marque pionner type OHAUS ayant une précision de (0.1 mg), avant l'immersion dans la solution aqueuse de NaCl à 3.5% qui correspond à la concentration en ions chlorures dans l'eau de mer. Après une nouvelle pesée, elle nous permet de noter une variation de masse due au phénomène d'oxydation.

Cette opération répétée plusieurs fois nous a permis d'enregistrer la variation relative de masse au cours du temps.

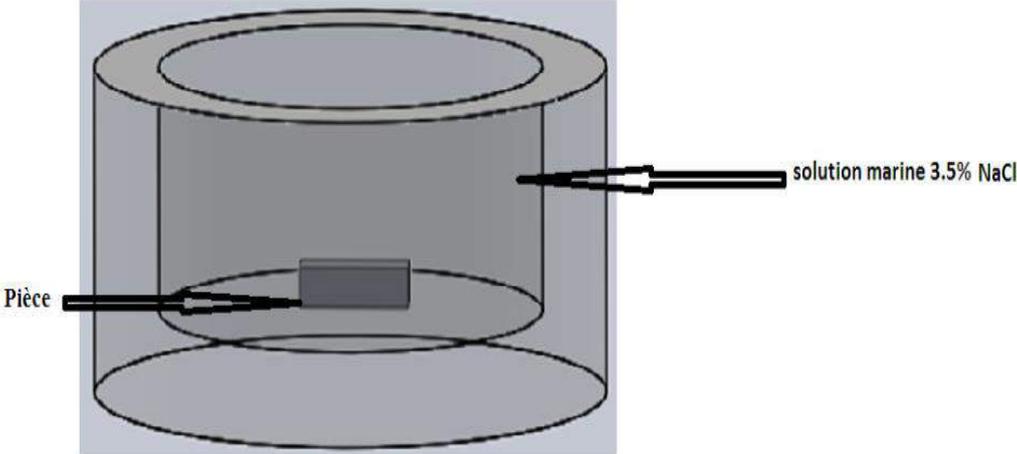


Figure II.12 : procédures d'oxydation.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Au cours de ce chapitre, on présentera en premier lieu l'observation micrographique des pièces par le biais d'un microscope optique. Ensuite, nous allons exposer les résultats de la résilience sous forme des tableaux et des histogrammes. En seconde lieu, nous présentons les mesures de duretés des différents échantillons réalisés. Après, nous allons décrire les résultats expérimentaux sous forme de courbes de perte de masse en fonction de la charge pour deux vitesses de glissement différente de 0,5m/s et 1m/s pendant une heure et neuf minutes de service. En dernier lieu, nous allons interpréter les résultats du comportement de l'aluminium à l'usure et à la corrosion par le biais des images et des courbes. Les tests ont été fait sur des échantillons ayant subi un traitement thermique et un vieillissement de 45 jours.

III.2 Etude métallographique

Les micrographies représentées ci-dessous ont été observés sur les surfaces polies des échantillons à l'aide d'un microscope optique.

III.2.1 Vieillissement à température ambiante

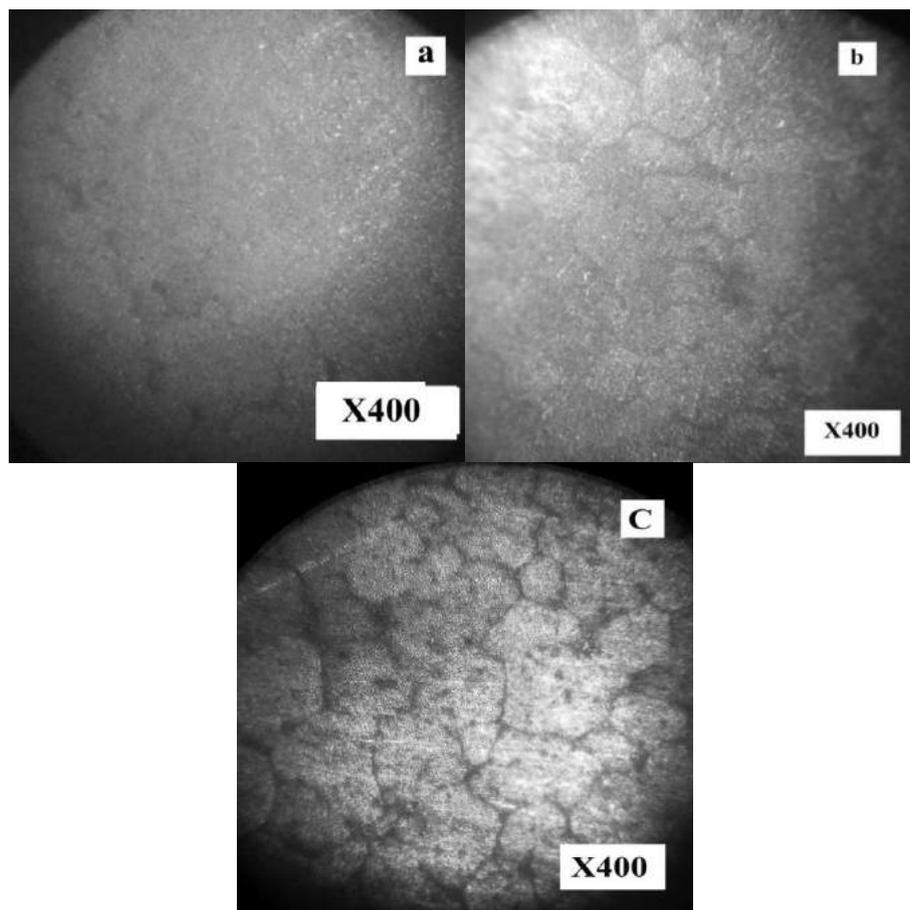


Figure III.1 : *microstructure de l'alliage au Vieillissement air : a-Refroidissement à l'air, b-refroidissement four, c-refroidissement glace.*

❖ Discussion des résultats :

- D'après la figure (III.1), le grossissement des grains est observé dans les échantillons à refroidissement air(a) ensuite au refroidissement four (revenu) et en dernier lieu refroidissement glace(c).
- On remarque aussi que le refroidissement glace montre des traces de porosités dans la structure de l'alliage. Par contre pour les autres refroidissements (four, air), il y'a aucune trace de porosités.
- On observe des microfissures pour le refroidissement à l'air.

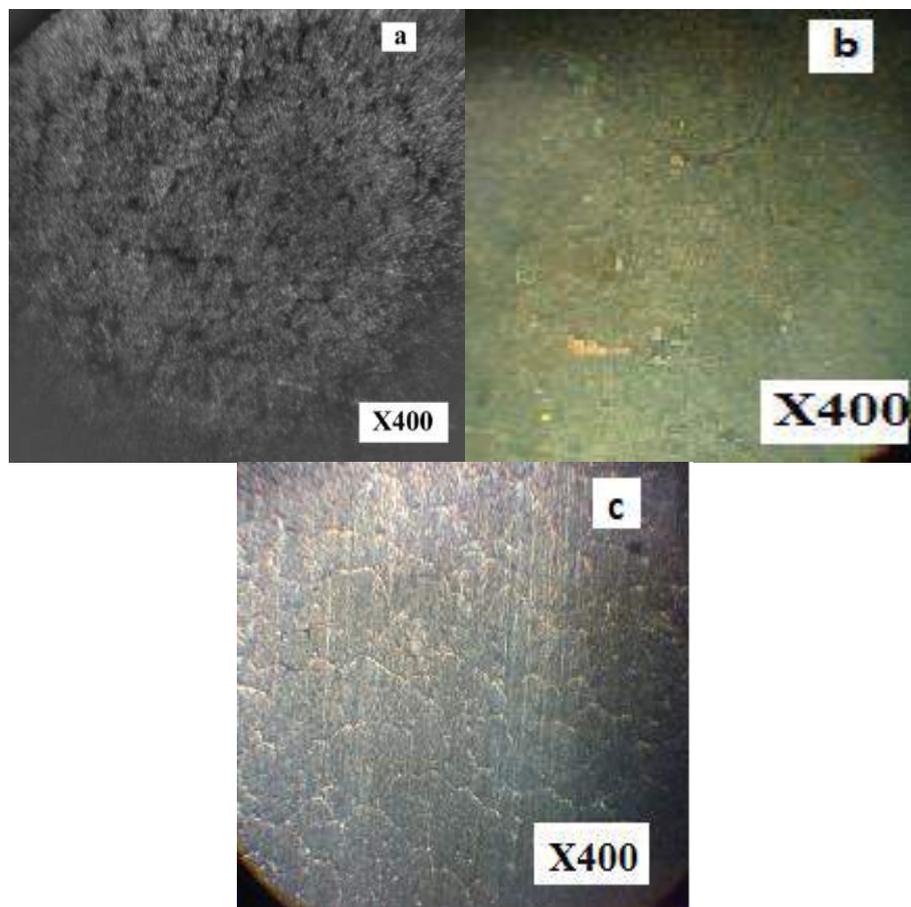
III.2.2 Vieillissement four (revenu)

Figure III.2 : microstructures de l'alliage **a-** refroidissement air, **b-** refroidissement four, **c-** refroidissement glace.

❖ Discussion des résultats

- D'après la figure (III.2), le grossissement des grains est observé dans les échantillons à refroidissement air(a) ensuite au refroidissement four (revenu)(b) et en dernier lieu refroidissement glace (c).

- On remarque aussi que le refroidissement four (revenu) et à l'air montrent des traces de porosités dans la structure de l'alliage. Par contre pour le refroidissement glace, il y'a aucune trace de porosités.
- On observe des microfissures pour tous les refroidissements.

III.2.3 Vieillissement glace

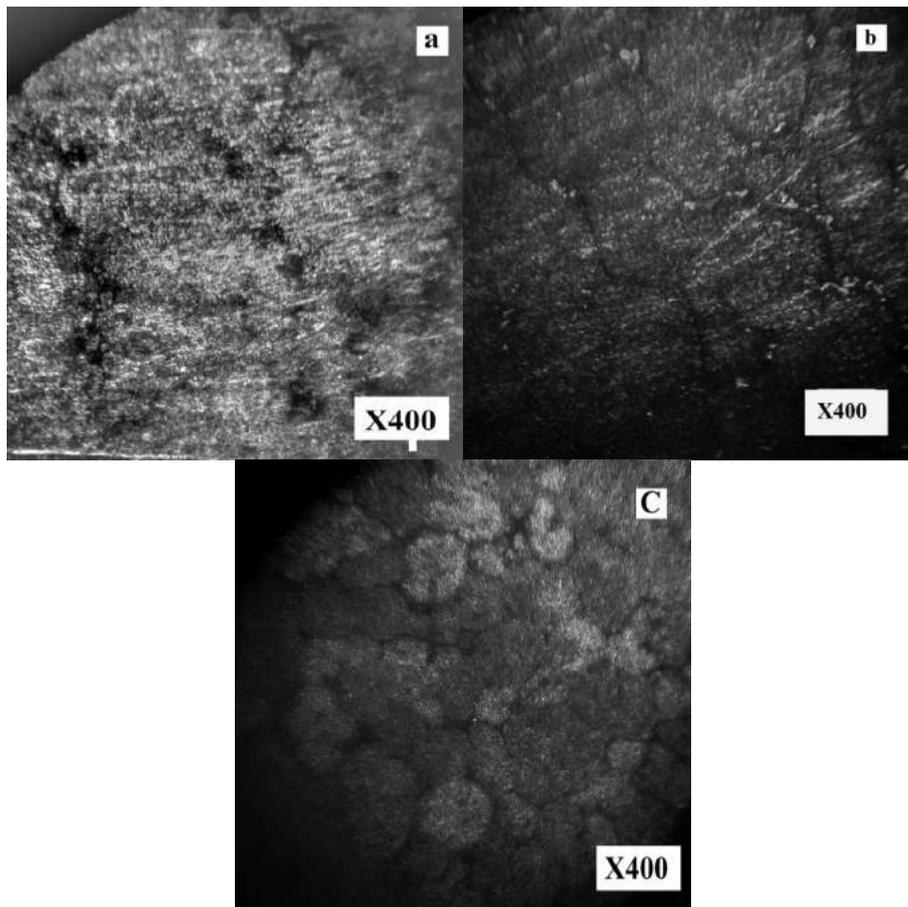


Figure III.3 : microstructures de l'alliage d'aluminium *a*-refroidissement air, *b*-refroidissement four, *c*-refroidissement glace.

❖ Discussion des résultats

- D'après la figure (III.3), le grossissement des grains est observé dans les échantillons à refroidissement four (revenu) (b) ensuite au refroidissement à l'air (a) et en dernier lieu refroidissement glace (c).
- On remarque aussi que le refroidissement four (revenu) et à l'air montrent des traces de porosités dans la structure de l'alliage. Par contre pour le refroidissement glace, il y'a aucune trace de porosités.
- On observe des microfissures pour tous les refroidissements.

III.3 Les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur l'aluminium(2017A)

Les essais de Charpy ont été effectués sur tous les échantillons (four, glace et air). Les valeurs de la résilience sont obtenues au moyen d'une équation mathématique qui est :

$$K_c = \Delta E / s \dots\dots\dots \text{équation 01}$$

$$S = (e \cdot l) - \frac{d \cdot \pi e}{2} \dots\dots\dots \text{équation 02}$$

e : épaisseur et la largeur de la pièce.

L : longueur de la pièce

III.3.1 les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur les échantillons à refroidissement à l'air

Dans la figure (III.4) et le tableau (III.1), nous présenteront les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur les échantillons à refroidissement à l'air.

Traitement thermique	Refroidissement	Vieillessement	Force de coupe (N.M)	Energie de rupture (J/Cm ²)
550°C	Air	Tm-ambiante	4.5	4,076
550°C	Air	Revenue	3	4,374
550°C	Air	Glace	7	3,579
550°C	Air	Témoin	5	3,976

Tableau III.1 : essai de Charpy (refroidissement Air).

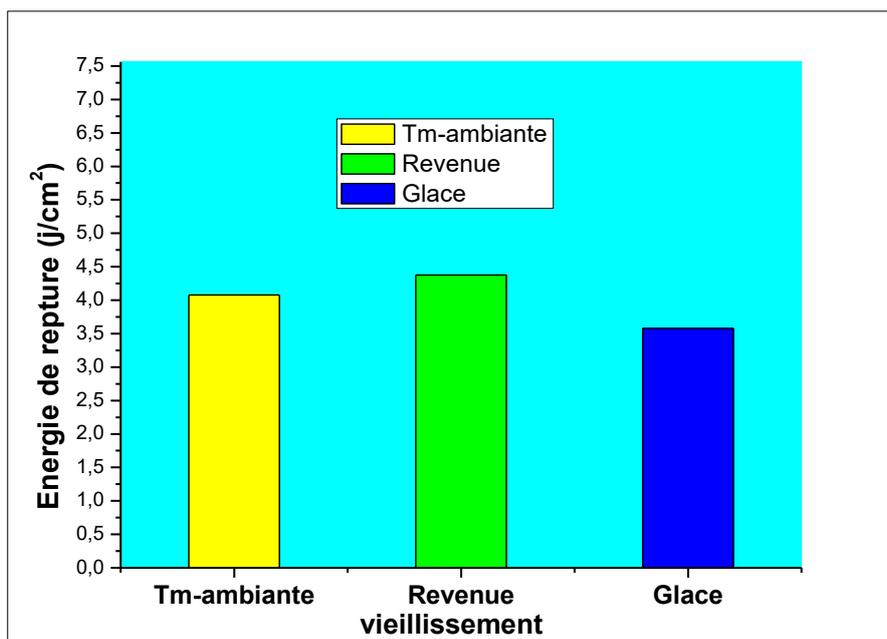


Figure III.4 : *Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à l'air sous différents vieillissements.*

- ❖ Discussion des résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur les échantillons à refroidissement à l'air

D'après la figure (III.4), on remarque que le plus petit travail absorbés par la rupture est celle du vieillissement glace (3.58 j/cm^2), puit celle du vieillissement à l'air (4.077 j/cm^2), et enfin celle du vieillissement four(revenu) (4.375 j/cm^2).

III.3.2 les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur les échantillons à refroidissement four

Traitement thermique	Refroidissement	Vieillissement	Force de coupe (N.M)	Energie de rupture(J/Cm ²)
550°C	Four	Tm-ambiante	4	4,175
550°C	Four	Revenue	4	4,175
550°C	Four	Glace	5	3,976
550°C	Four	Témoin	3	4,374

Tableau III.2 : *essais de Charpy (refroidissement four).*

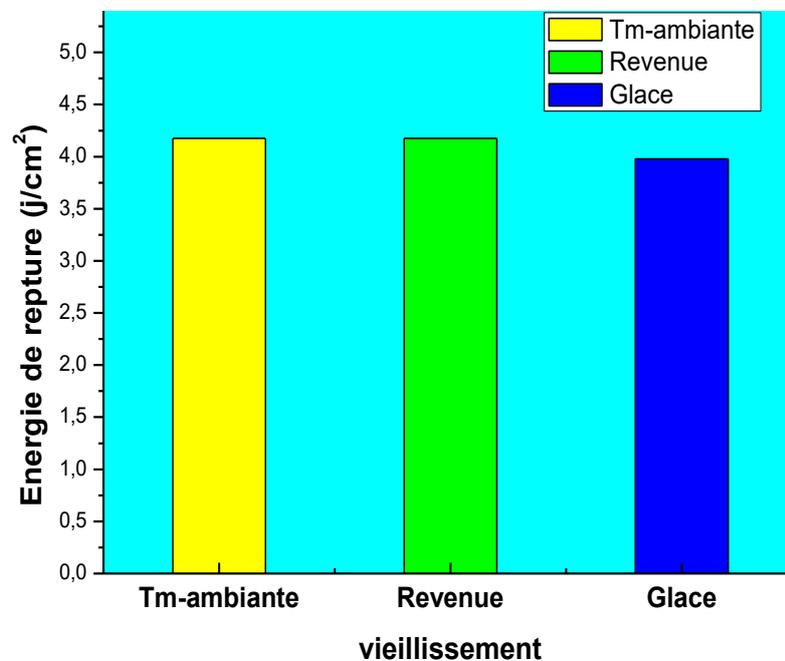


Figure III.5 : *Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à four(revenu) sous différents vieillissements.*

Selon la figure (III.5), on constate que pour les vieillissements à l'air et au four (revenu) qu'ils ont la même valeur de la résilience (4.175 j/cm^2). Par contre pour le vieillissement glace a une valeur inférieure à ceux de vieillissement à l'air et four (3.980 j/cm^2).

III.3.3 les résultats de l'essai de Charpy (résilience) sur les échantillons à refroidissement glace

Traitement thermique	Refroidissement	Vieillessement	Force de coupe (N.M)	Energie de rupture(J/Cm ²)
550°C	Glace	Air	3.5	4,275
550°C	Glace	Revenue	5	3,976
550°C	Glace	Glace	4	4,175

Tableau III.3 : essais de Charpy (refroidissement glace).

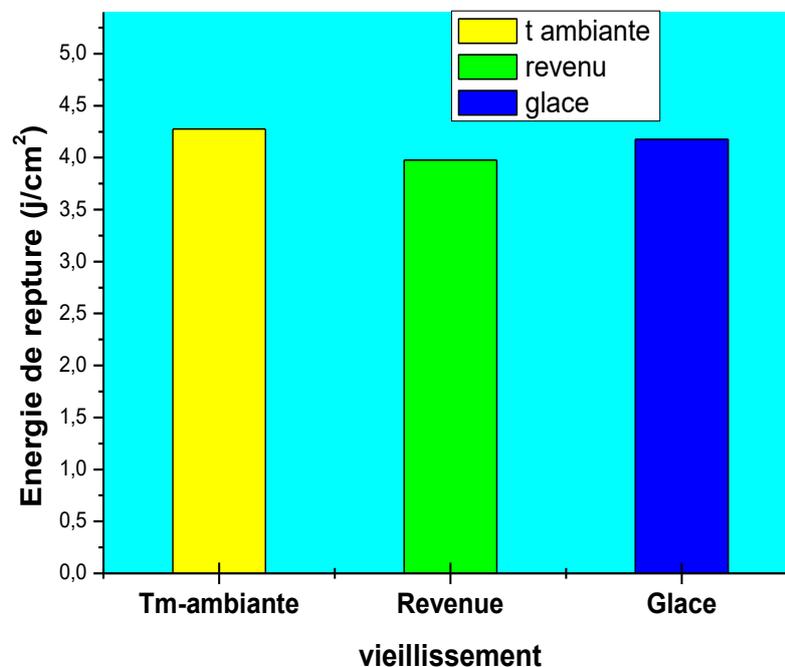


Figure III.6 : Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à la glace sous différents vieillissements.

On observe dans la figure (III.6), que le plus grand travail absorbé par la rupture est celle du vieillissement à l'air (4.276 j/cm^2), suivit du vieillissement glace (4.176 j/cm^2) puis celle du vieillissement four (3.3977 j/cm^2).

III.3.4 étude comparative

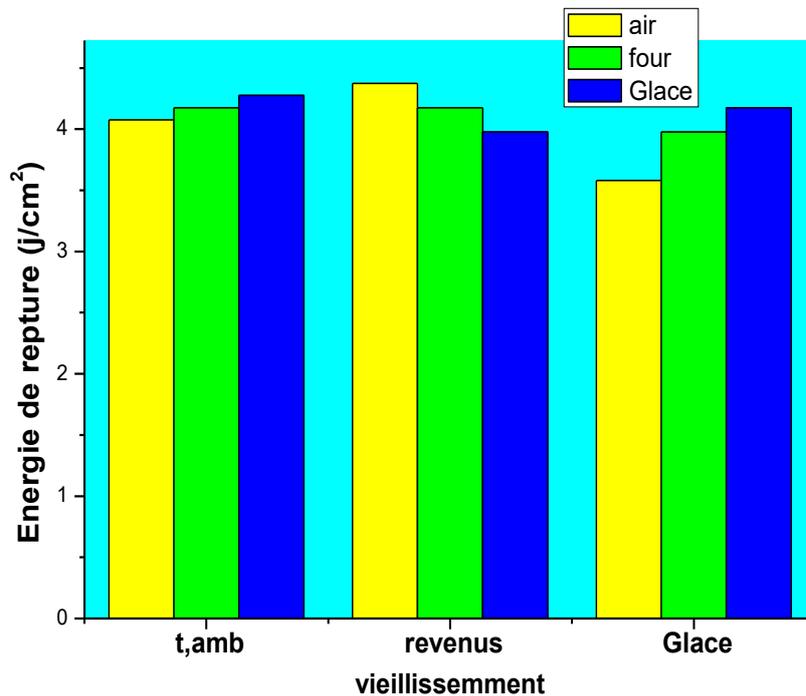


Figure III.7 : *Energie de rupture d'aluminium 2017A traité à 550°C avec les trois refroidissements sous différents vieillissements.*

D'après la figure (III.7), on remarque que le plus grand travail absorbé par la rupture est ceux aux vieillissements glace suivit de vieillissements four suivit de vieillissements à l'air.

III.4 Caractérisation mécanique

III.4.1 dureté brinell

Les essais de dureté brinell ont été effectués sur tous les échantillons (refroidie au four, glace et à air). Les valeurs de dureté sont obtenues en moyenne de trois essais sur les surfaces polies, les résultats sont représentés dans des tableaux et des diagrammes à colonnes.

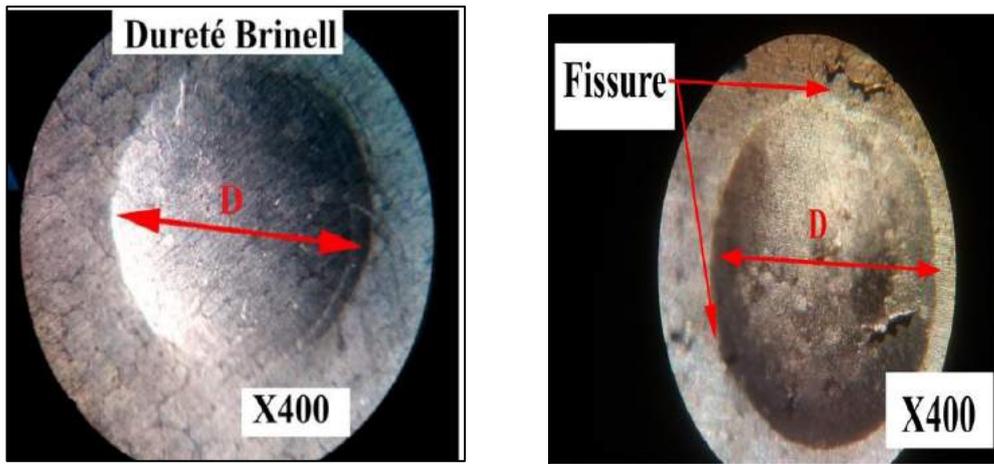


Figure III.8 : l’empreinte de la bille (brinell).

III.4.1.1 la dureté brinell des échantillons à refroidissement à l’air

Traitement thermique	Refroidissement	Vieillessement	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
550°C	Air	Tm-ambiante	46	35	37	39.34
550°C	Air	Revenu	40	39	37	38.67
550°C	Air	Glace	41	47	45	44.34
550°C	Air	Témoin	32	32	40	34.67

Tableau III.4 : les essais de dureté brinell (refroidie a l’air).

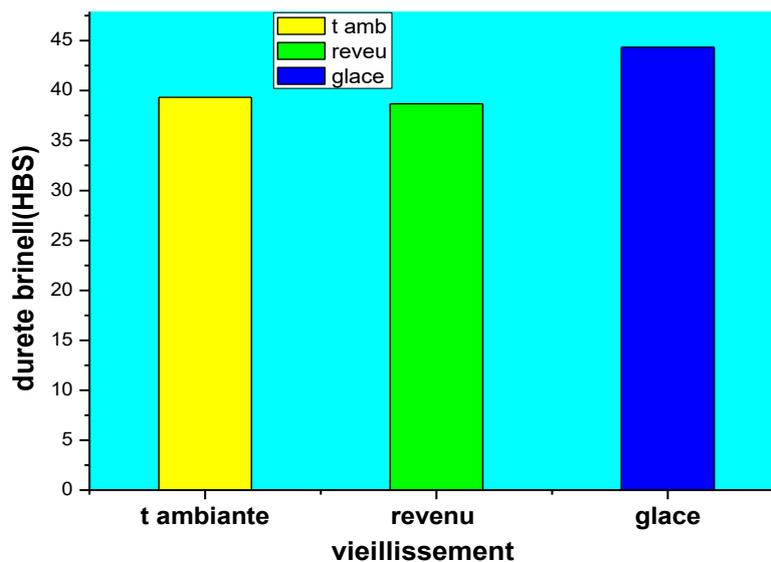


Figure III.9 : dureté brinell sous (981 N) d’aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement à air sous différents vieillissements.

- ❖ Discussion des résultats de la dureté brinell des échantillons à refroidissement à l'air :

En analysant les résultats du tableau (III.3) et figure (III.9) obtenue par les essais de dureté pour les échantillons à refroidissement à l'air, nous constatons que :

La dureté des échantillons à vieillissement glace sont plus élevée (44.34 HB) suivit de du vieillissement à l'air (39.34 HB) suivit du vieillissement four (38.67 HB).

III.4.1.2 la dureté brinell des échantillons à refroidissement four

Traitement thermique	Refroidissement	Vieillessement	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
550°C	Four	Tm-ambiante	55	42	54	50.34
550°C	Four	Revenue	56	42	44	47.34
550°C	Four	Glace	44	39	40	41
550°C	Four	Témoin	46	40	43	43

Tableau III.5 : les essais de dureté brinell (refroidissement four).

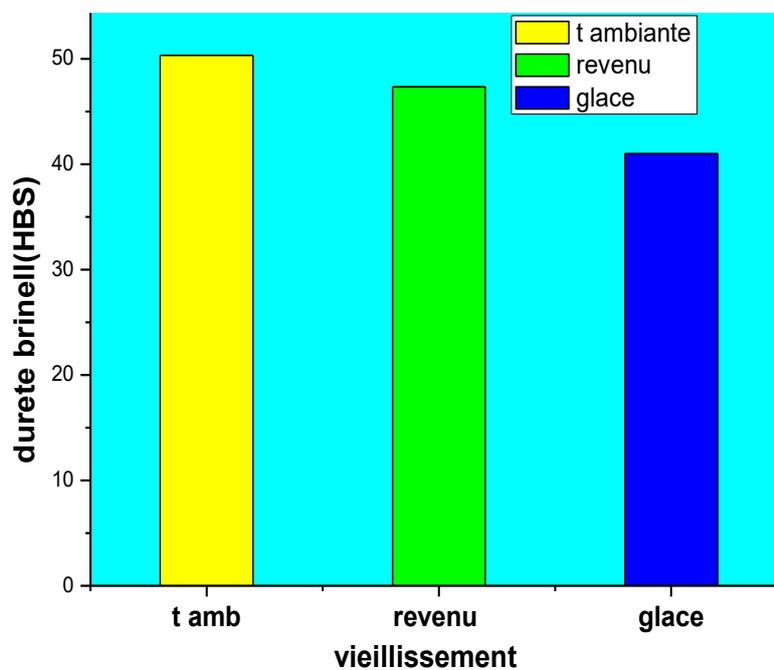


Figure III.10 : dureté brinell sous (981 N) d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement four (revenu) sous différents vieillissements.

- ❖ Discussion des résultats de la dureté brinell des échantillons refroidissement four :

En analysant les résultats du tableau (III.4) et figure (III.10) obtenue par les essais de dureté pour les échantillons à refroidissement four, nous constatons que :

La dureté des échantillons à vieillissement à l'air est plus élevée (50.34 HB) suivit de du vieillissement four (47.34 HB) suivit du vieillissement glace (41 HB).

III.4.1.3 la dureté brinell des échantillons à refroidissement glace

Traitement thermique	Refroidissement	Vieillessement	Essai n°1	Essai n°2	Essai n°3	Moyenne
550°C	Glace	Tm-ambiante	61	49	46	52
550°C	Glace	Revenu	53	56	46	51.67
550°C	Glace	Glace	65	66	56	62.34

Tableau III.6 : les essais de dureté brinell (refroidissement glace).

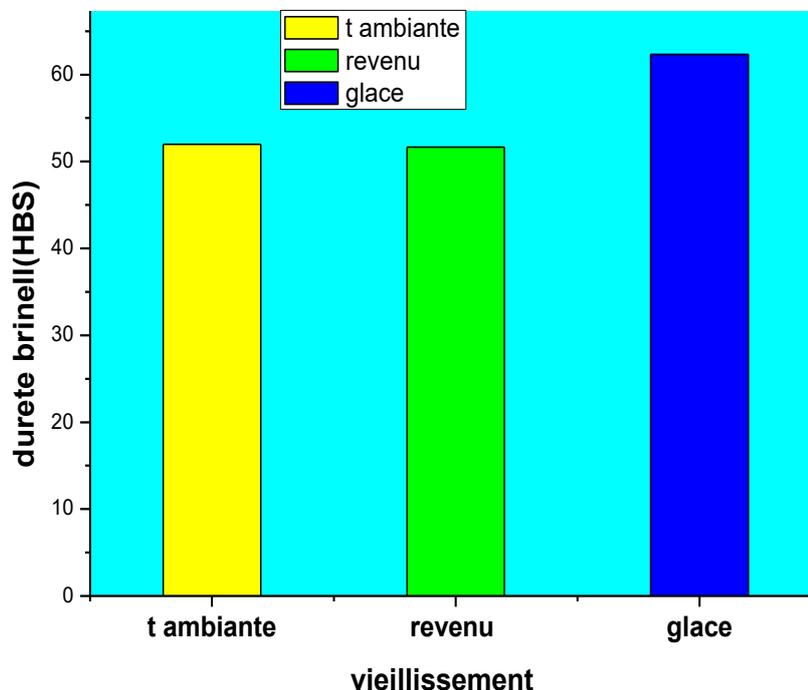


Figure III.11 : dureté brinell sous (981 N) d'aluminium 2017A traité à 550°C avec refroidissement glace sous différents vieillissements.

- ❖ Discussion des résultats de la dureté brinell des échantillons à refroidissement glace :

En analysant les résultats du tableau (III.5) et figure (III.11) obtenue par les essais de dureté pour les échantillons à refroidissement four, nous constatons que :

La dureté des échantillons à vieillissement glace sont plus élevée (62.34 HB) suivit de du vieillissement à l'air (52 HB) suivit du vieillissement four (51.67 HB).

III.4.2 étude comparative

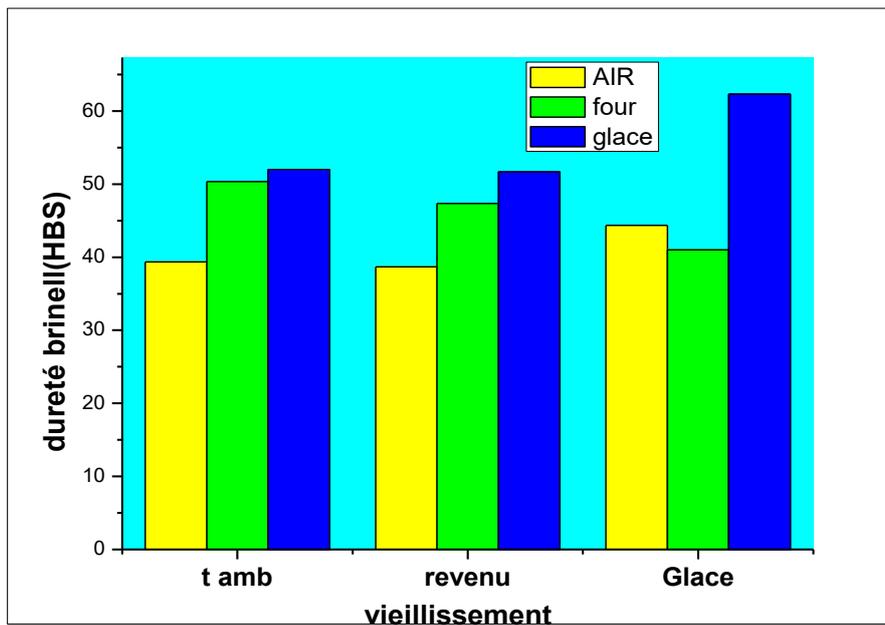


Figure III.12 : duretés brinell des échantillons.

- ❖ Discussion des résultats de l'étude comparative.
 - D'après la (figure III.12), On constate que les échantillons refroidis à la glace sont plus durs que ceux des deux autres refroidissements.
 - Parmi les échantillons refroidis à la glace on remarque que la valeur de dureté la plus élevée est celle du vieillissement glace (62.34HB), or que pour les deux autres vieillissements, leurs valeurs sont presque équivalentes, elle ne dépasse pas les (52HB).
 - Nous déduisant que le traitement le plus approprié pour obtenir une bonne dureté pour ce matériau est celui du refroidissement glace vieillissement glace.

III.4.3 résultats des tests d'usure sur les échantillons

Les résultats des tests d'usure en fonction de la charge des différents échantillons obtenus, sont représentés sous formes d'images et d'histogramme. Pour une meilleure compréhension des phénomènes qui les régissent, nous avons effectué une étude comparative entre les différents vieillissements en termes de perte de masse.

III.4.3.1 résultats du test d'usure sur les échantillons à refroidissement à l'air

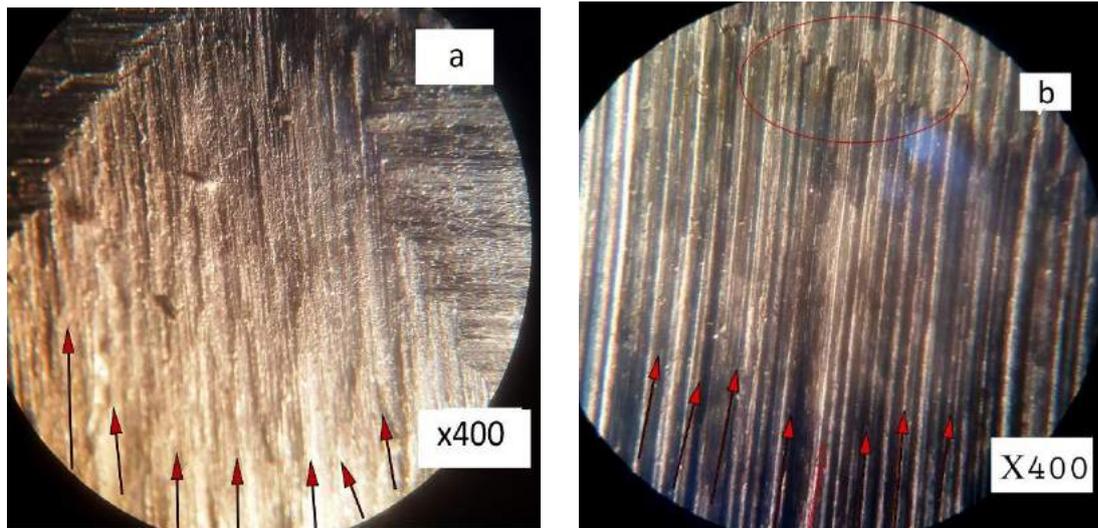


Figure III.13.a, b : Échantillons R/air vieillissement à l'air vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

D'après le (figure III.13.a, b), on remarque la formation des stries large et profonde et des mini creusements sur la surface usée avec une vitesse de 180tr/min sous une charge de 30N (fig III.13.a), par contre pour une vitesse de 90tr/min sous la même charge on remarque juste la formation des tries large est profonde (figure III.13.b).

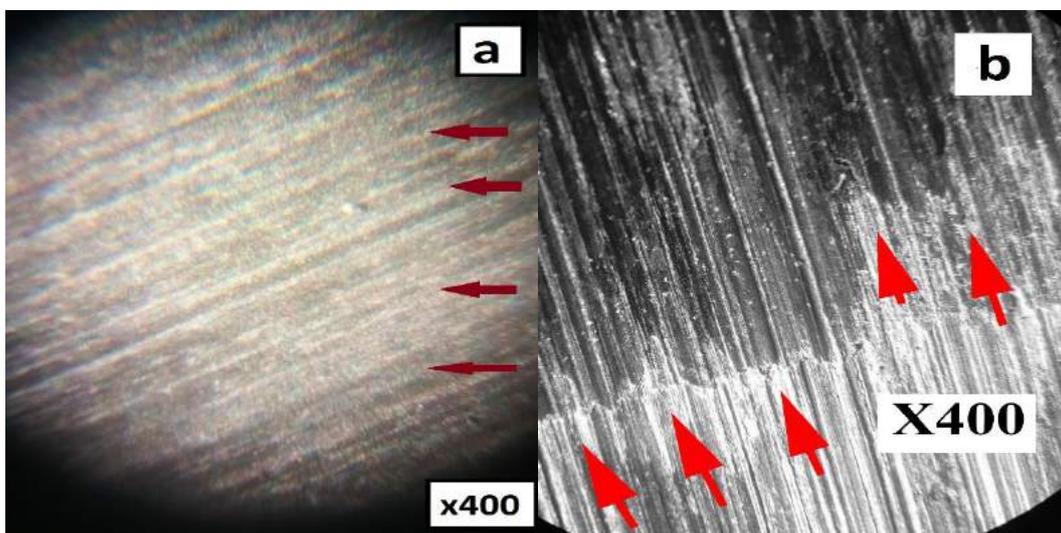


Figure III.14.a, b : Échantillons à refroidissement à l'air vieillissement four vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

On remarque de la figure (III.14.a, b), pour la vitesse de 90 tr/min (figure III.18.a) sous une charge de 30N, l'apparition des stries douces sur la surface frottée, par contre sous la vitesse de 180tr/min (figure III.14.b), on enregistre la formation des stries large et profonde sur la surface frottée.

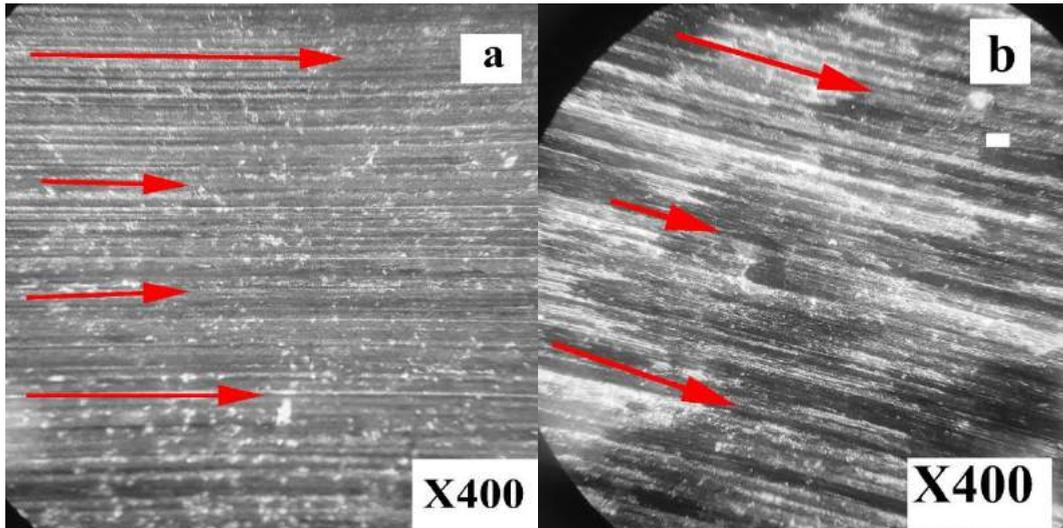


Figure III.15.a, b : Échantillons à refroidissement à l'air vieillissement glace vitesse 90tr/min et 180 tr/min.

❖ Discussion des résultats :

Pour une vitesse de glissement de 0.5 m/s et sous une charge de 30N (figure III.15.a), l'apparition des stries douces sur la surface frottée, mais pour une vitesse de glissement de 1 m/s (figure III.15.b), la formation de stries est plus large et plus profonde sur la surface frottée.

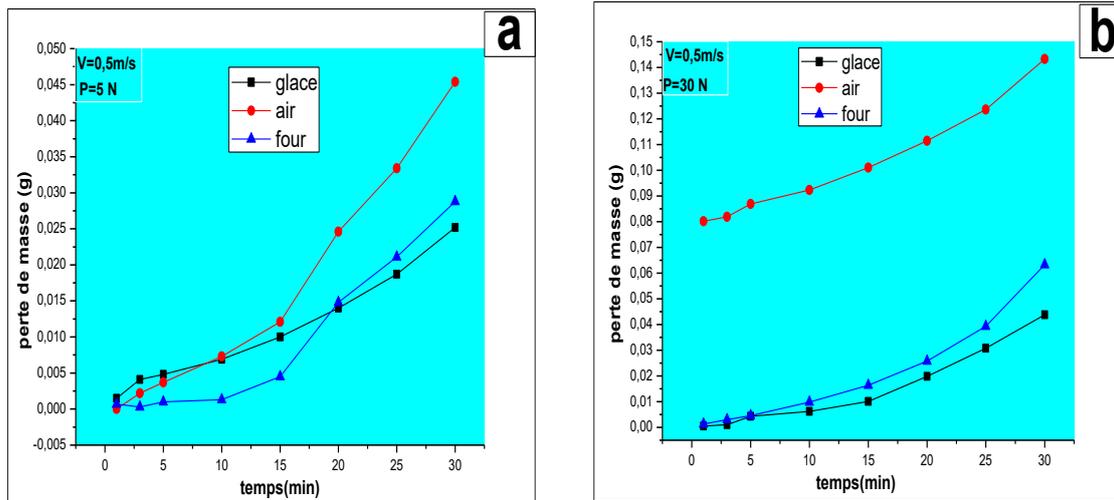


Figure III.16.a, b : perte de masse d'un alliage 2017A avec R/air sous différents vieillissements.

- Discussion des résultats :
- D'après la figure (III.16.a), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement à l'air est plus importante (0.0454g) que celle du four (revenu) (0.0346g) et de la glace (0.0252g). En d'autres termes le vieillissement glace présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- D'après la figure (III.16.b), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement air est plus importante (0.1433g) que celle du vieillissement four (revenu) (0.1337g) et celle de glace (0.0438g). En d'autres termes le vieillissement glace présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Il ressort de l'étude comparative entre les deux figure (III.16.a et III.16.b), qu'en terme de perte de masse pour une charge de (30N) que les 3 cas de vieillissement sont beaucoup plus importants que ceux de (5N). Nous constatons que le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements (four et glace).

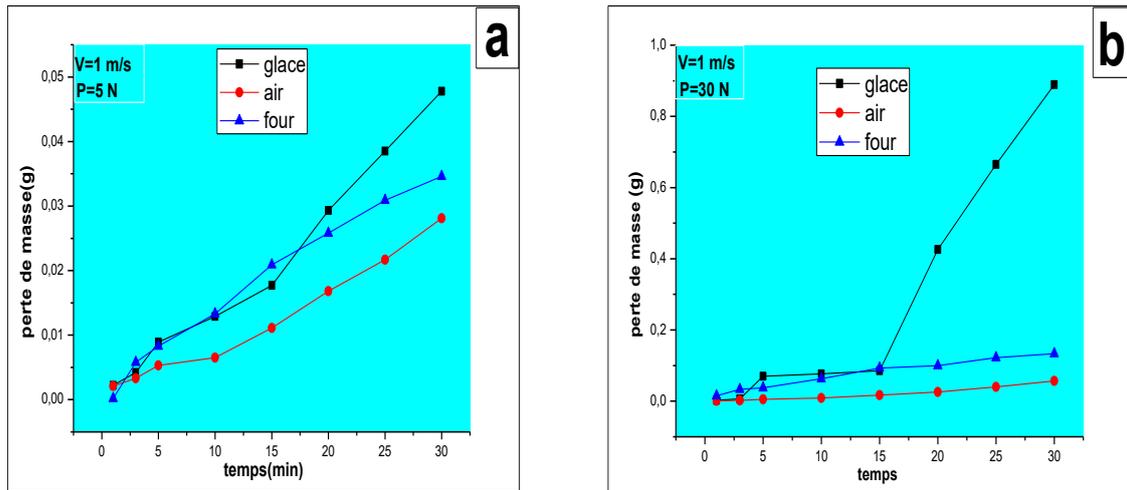


Figure III.17.a, b : perte de masse d'un alliage 2017A avec R/air sous différents vieillissements.

- Discussion des résultats
- D'après la figure (III.17.a), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement glace est plus importante (0.0478g) que celle du vieillissement four(revenu) (0.0346g) et celle de l'air (0.0281g). En d'autres termes le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Pour la figure (III.17.b), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement glace est plus importante (0.8895g) que celle du vieillissement four(revenu) (0.1337g) et celle de l'air (0.0569g). En d'autres termes le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Il résulte de l'étude comparative entre les deux figure (III.17.a et III.17.b), qu'en terme de perte de masse pour une charge de (30N) que les 3 cas de vieillissement sont beaucoup plus importants que ceux de (5N). En d'autres termes le vieillissement l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Selon les figures (III.16.a et III.17.a), on constate que le vieillissement four(revenu) est plus stable que les deux autres vieillissements pour les vitesses de 90 et 180(tr/min).
- En termes de perte de masse, on remarque que le vieillissement à l'air pour une charge (5N) à une vitesse de 90(tr/min), est plus grande que celle de (5N) a une vitesse de 180(tr/min), 0.0454g contre 0.0281g. On observe aussi pour le vieillissement glace a une charge de (5N) à une vitesse de 180(tr/min) est plus élevé que celle de (5N) a une vitesse de 90(tr/min), 0.0478g contre 0.0252g.

- Selon les figures (III.16.b et III.17.b), on constate que le vieillissement four (revenu) est plus stable que les deux autres vieillissements pour les vitesses de 90 et 180 (tr/min). En d'autres termes le vieillissement four présente une bonne tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- En termes de perte de masse, pour une charge de (30N) on remarque que le vieillissement à l'air à une vitesse de 180(tr/min), est plus grande que celle de vitesse de 90(tr/min), 0.0478g contre 0.0252g. On observe aussi pour le vieillissement glace à une vitesse de 180(tr/min) est plus élevé que celle de vitesse de 90(tr/min), 0.0478g contre 0.0252g.

III.4.3.2 résultats du test d'usure sur les échantillons refroidissement four

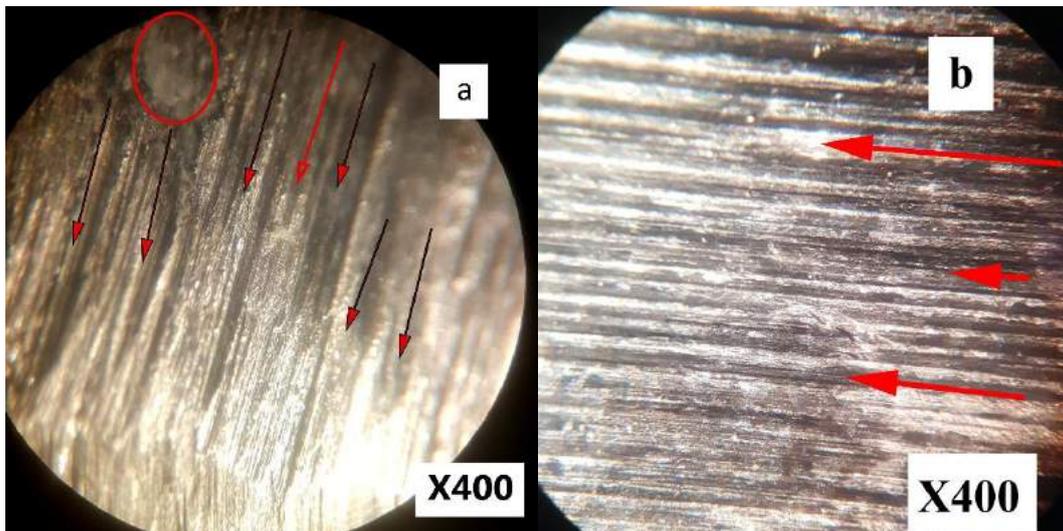


Figure III.18.a, b : Échantillons à refroidissement four vieillissement à l'air vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

On remarque de figure (III.18.a, b), pour une vitesse de 90tr/min sous une charge de 30N (figure III.18.b) la formation de des stries large et profonde et des mini creusements sur la surface frotté, par contre par contre pour une vitesse de 180tr/min (figure III.14.a) sous la même charge on remarque juste la formation des tries large et plus profonde.

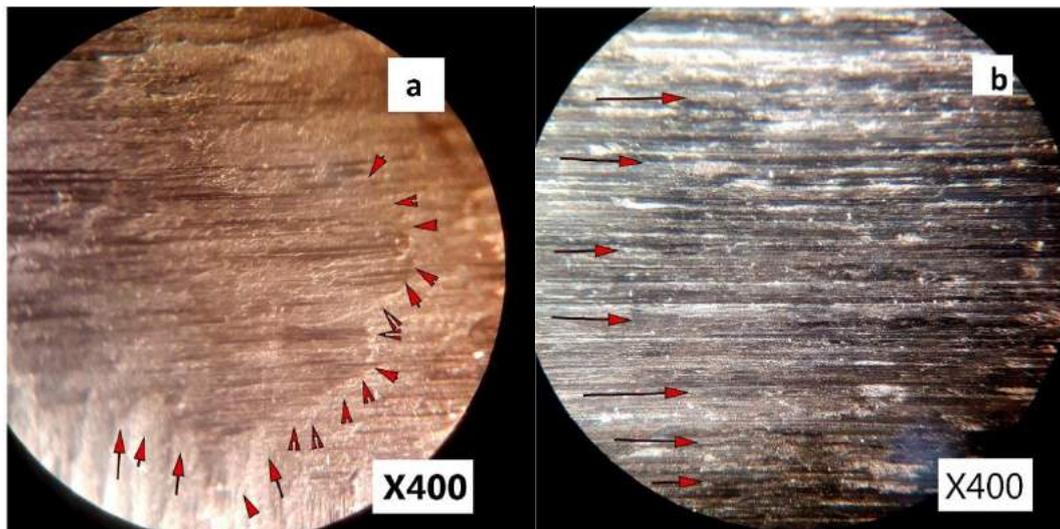


Figure III.19.a, b : Échantillons à refroidissement four vieillissement four vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

Pour les deux vitesses de glissement de 0.5m/s et 1m/s, on constate l'apparition des stries douces pour les deux échantillons.

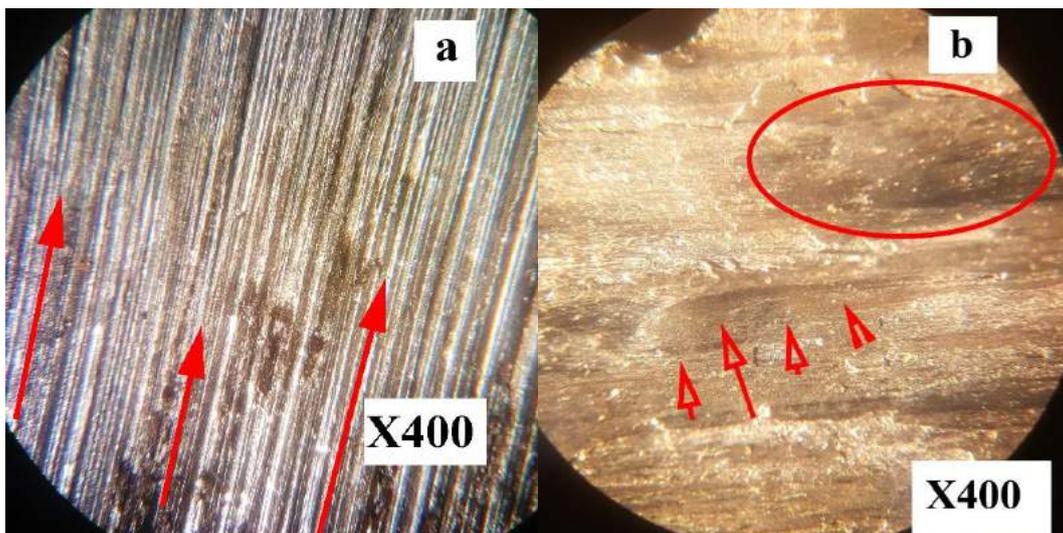


Figure III.20.a, b : Échantillons à refroidissement four vieillissement glace vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

Pour une vitesse de glissement de 0.5 m/s et sous une charge de 30N, l'apparition des stries large et profonde sur la surface frottée (figure III.20.a), or que pour une vitesse de glissement de 1 m/s la formation de stries est large et profonde sur la surface frottée (figure III.20.b).

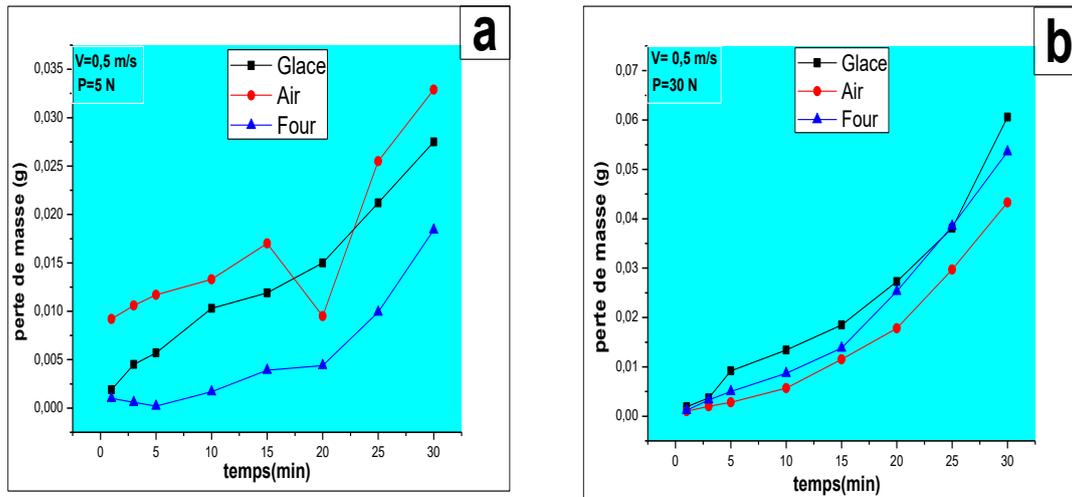


Figure III.21.a, b : *perte de masse d'un alliage 2017A avec R/four sous différents vieillissements.*

- Discussion des résultats
- D'après la figure (III.21.a), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement à l'air est plus importante (0.0329g) que celle du vieillissement glace (0.0275g) et celle du four(revenu) (0.0184g). En d'autres termes le vieillissement four(revenu) présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- D'après la figure (III.21.b), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement glace est plus importante (0.0606g) que celle du vieillissement four (revenu) (0.0536g) et celle de l'air (0.0433g). En d'autres termes le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- D'après l'étude comparative entre les deux figure (III.21.a et III.21.b), qu'en termes de perte de masse pour une charge de (30N) que les 3 cas de vieillissement sont beaucoup plus importants que ceux de (5N). Nous constatons aussi que le vieillissement four(revenu) présente une meilleure tenue à l'usure pour une charge de (5N) par contre pour la charge de (30N) c'est le vieillissement à l'air qui présente une meilleure tenue a l'usure par rapport aux autres vieillissements.

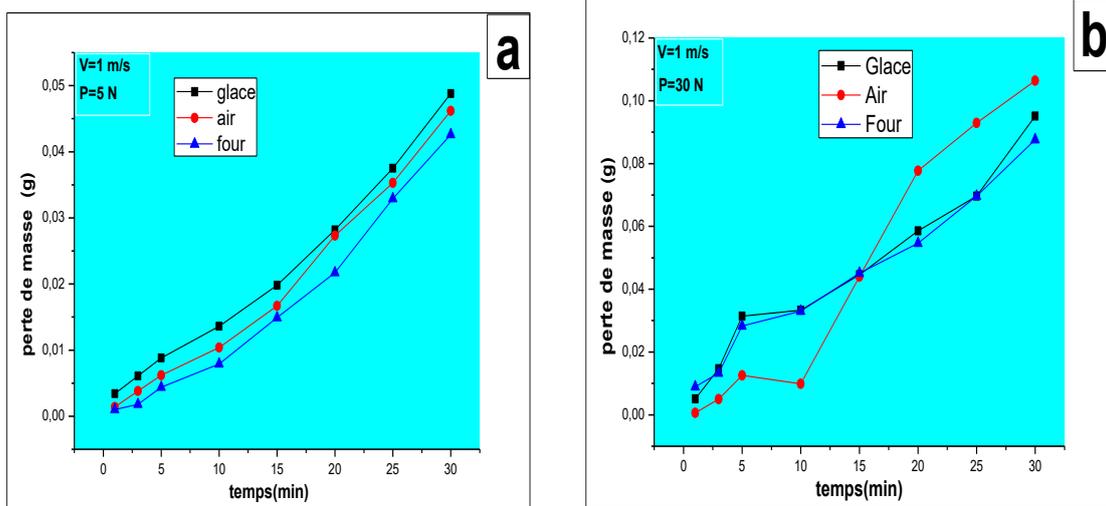


Figure III.22.a, b : perte de masse d'un alliage 2017A avec R/four sous différents vieillissements.

❖ Discussion des résultats :

- D'après la figure (III.22.a), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement glace est plus importante (0.0488g) que celle du vieillissement à l'air (0.0462g) et celle du four(revenu) (0.0426g). En d'autres termes le vieillissement four(revenu) présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- D'après la figure (III.22.b), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement a l'air est plus importante (0.1064g) que celle du vieillissement glace (0.0951g) et celle du four(revenu) (0.0876g). En d'autres termes le vieillissement four (revenu) présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Selon de l'étude comparative entre les deux figure (III.22.a et III.22.b), qu'en termes de perte de masse pour une charge de (30N) que les 3 cas de vieillissement sont beaucoup plus importants que ceux de (5N). Nous constatons aussi que le vieillissement four(revenu) présente une meilleure tenue à l'usure pour les deux charge (5N) et (30N) que ceux des deux autres vieillissements.
- Selon les figures (III.21.a et III.22.a), on constate que le vieillissement four(revenu) est plus stable que les 2 autre vieillissement pour les vitesses de 90 et 180(tr/min). En d'autres termes le vieillissement four présente une bonne tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.

- En termes de perte de masse, pour une charge de (5N) on remarque que le vieillissement à l'air à une vitesse de 180(tr/min), est plus grande que celle de vitesse de 90(tr/min), 0.0462g contre 0.0329g. On observe aussi pour le vieillissement glace a une vitesse de 180(tr/min) est plus élevé que celle de vitesse de 90(tr/min),0.0488g contre 0.0275g.
- Selon les figures (III.21.b et III.22.b), on constate que la perte de masse du vieillissement au four à la vitesse de 180(tr/min) est plus grande que celle de la vitesse de 90(tr/min).
- En termes de perte de masse, pour une charge de (30N) on remarque que le vieillissement a l'air à une vitesse de 180(tr/min), est plus grande que celle de vitesse de 90(tr/min), 0.1064g contre 0.0433g. On observe aussi pour le vieillissement glace a une vitesse de 180(tr/min) est plus élevé que celle de vitesse de 90(tr/min),0.0951g contre 0.0606g. pour le vieillissement four(revenu) pour la vitesse de 180(tr/min) est plus élevé que celle de la vitesse de 90(tr/min),0.0876g contre 0.0536g.

III.4.3.3 résultats du test d'usure sur les échantillons à refroidissement glace

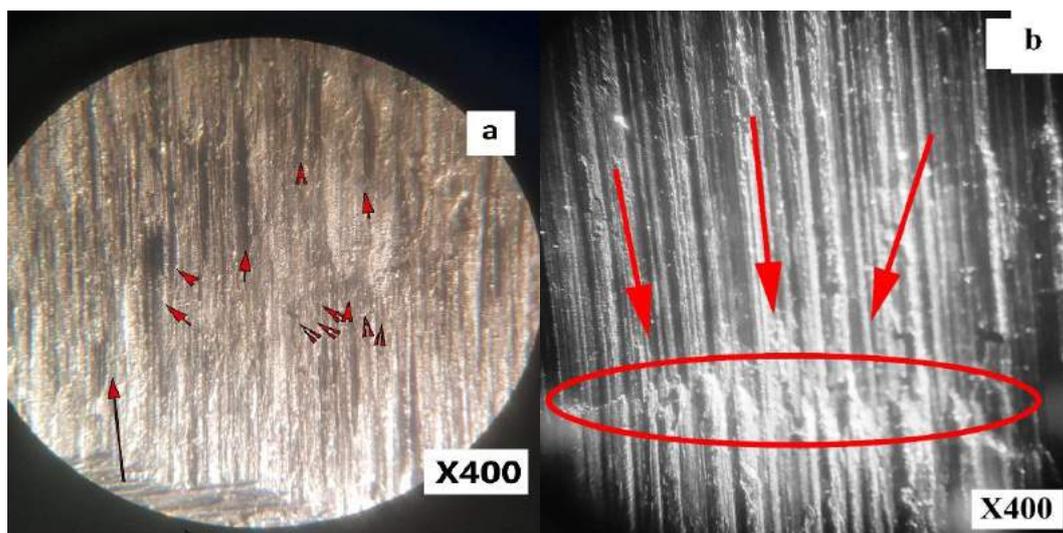


Figure III.23.a, b : Échantillons à refroidissement glace vieillissent à l'air vitesse 90tr/min et 180 tr/min.

❖ Discussion des résultats :

Selon la figure (III.23.a, b), pour une vitesse de 90tr/min (figure III.23.a) sous une charge de 30N on remarque la formation des tries large et plus profonde, par contre par contre pour une vitesse de 180tr/min (figure III.15.b), on souligne la formation de mini creusements sur la surface frotté avec la formation des tries large et plus profonde.

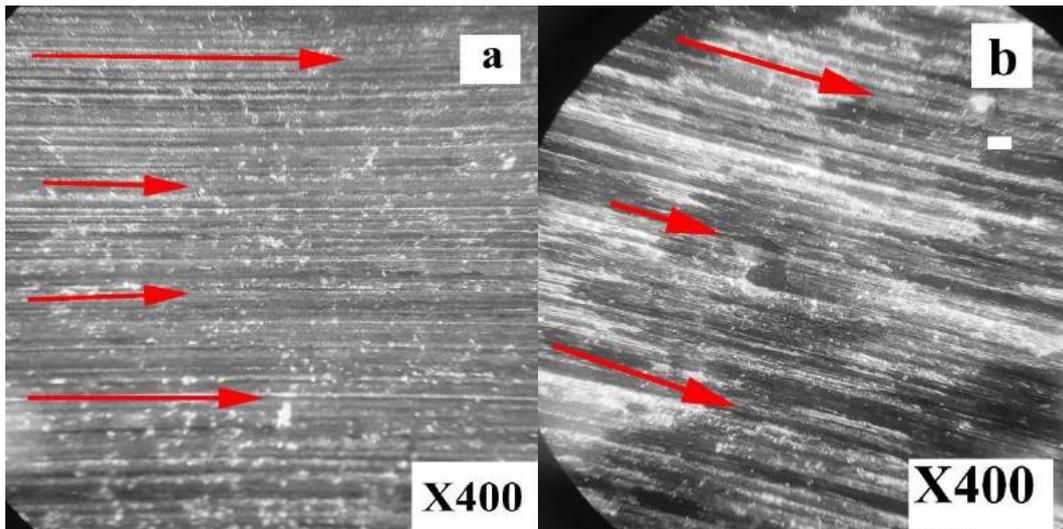


Figure III.24.a, b : Échantillons à refroidissement glace vieillissement four vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

Pour une vitesse de 90tr/min (figure III.24.a) sous une charge de 30N, l'apparition des stries douces sur la surface frottée, mais pour une vitesse de 180tr/min (figure III.24.b), la formation de stries est plus large et plus profonde sur la surface frottée.

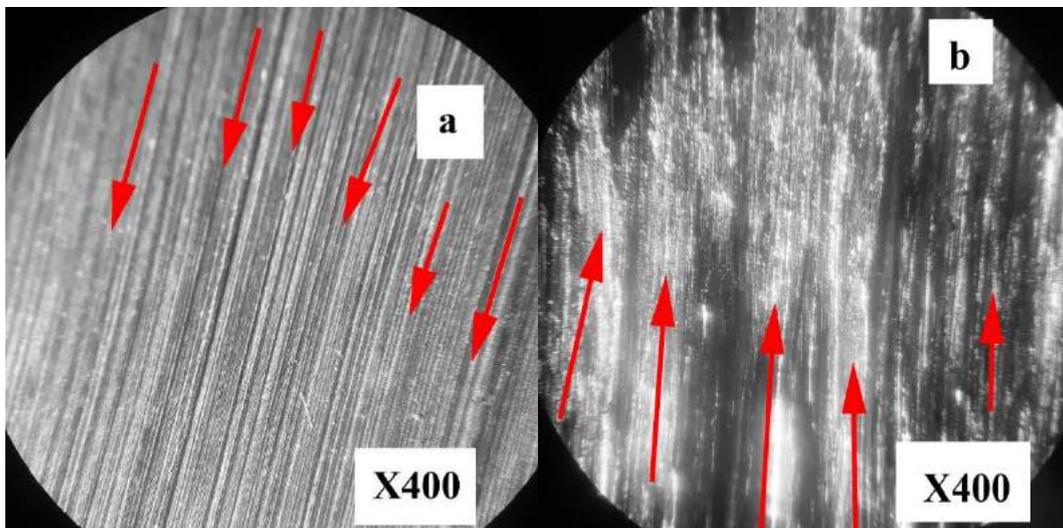


Figure III.25.a, b : Échantillons à refroidissement glace vieillissement glace vitesse 90tr/min et 180tr/min.

❖ Discussion des résultats :

Pour une vitesse de glissement de 0.5 m/s et sous une charge de 30N (figure III.25.a), l'apparition des stries douce sur la surface frottée, or que pour une vitesse de glissement de 1 m/s la formation de stries est large et profonde sur la surface frottée (figure III.25.b).

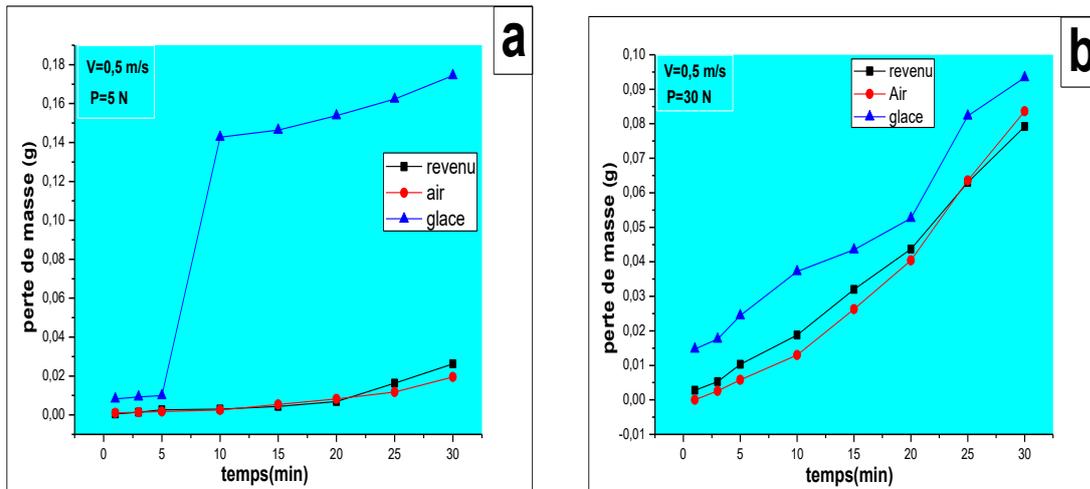


Figure III.26.a, b : perte de masse d'un alliage 2017A avec R/glacé sous différents vieillissements.

D'après la figure (III.26.a), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement glace est plus importante (0,1744g) que celle du vieillissement au four(revenu) (0,0262g) et celle de l'air (0,0194g). En d'autres termes le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.

- D'après la figure (III.26.b), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement a la glace est plus importante (0,0934g) que celle du vieillissement à l'air (0,0836g) et celle du four (revenu) (0,0792g). En d'autres termes le vieillissement au four (revenu) présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Après l'étude comparative entre les deux figure (III.26.a et III.26.b), on remarque qu'en termes de perte de masse pour les vieillissements à température ambiante et revenus sous une charge de (30N) sont plus importante que les pertes sous une charge de (5N). Sauf pour le cas du vieillissement glace où la perte de masse sous la charge de (5N) est bien supérieure à celle sous la charge de (30N).

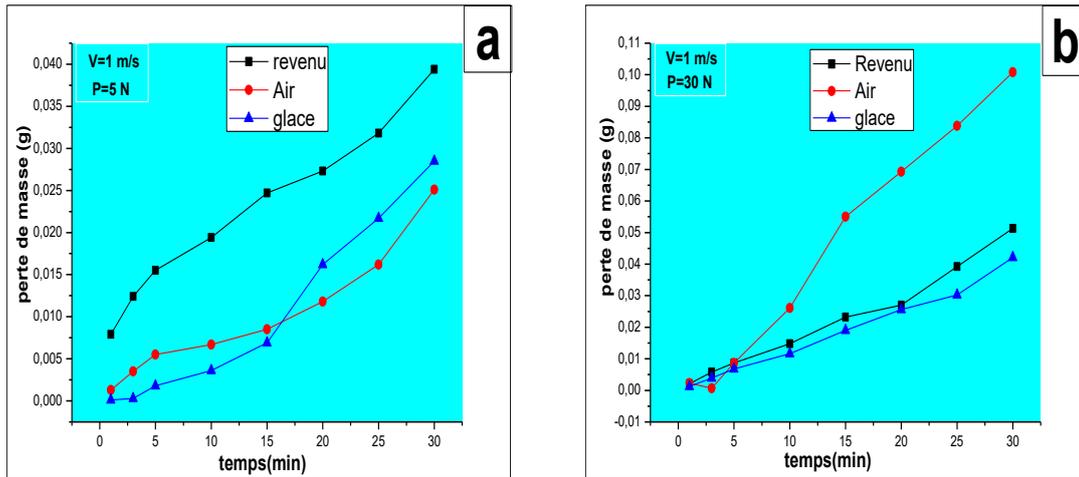


Figure III.27.a, b : perte de masse d'un alliage 2017A avec R/glacé sous différents vieillissements.

❖ Discussion des résultats :

- D'après la figure (III.27.a), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement au four (revenus) est plus importante (0,0394g) que celle du vieillissement glace (0,0285g) et celle de l'air (0,0251g). En d'autres termes le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- D'après la figure (III.27.b), on remarque que la perte de masse de l'échantillon du vieillissement à l'air est plus importante (0,1008g) que celle du vieillissement au four (revenus) (0,0513g) et celle de de la glace (0,0421g). En d'autres termes le vieillissement glace présente une meilleure tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.
- Selon l'étude comparative entre les deux figures (III.27.a et III.27.b), qu'en termes de perte de masse pour une charge de (30N) que les trois cas de vieillissement sont beaucoup plus importants que ceux de (5N). Nous constatons aussi que le vieillissement à l'air présente une meilleure tenue à l'usure pour une charge de (5N) par contre pour la charge de (30N) c'est le vieillissement glace qui présente une meilleure tenue à l'usure par rapport aux autres vieillissements.
- Selon les figures (III.23.a et III.24.a), on constate que le vieillissement à l'air est plus stable que les deux autres vieillissements pour les vitesses de 90 et 180(tr/min). En d'autres termes le vieillissement à l'air présente une bonne tenue à l'usure que les deux autres vieillissements.

- En termes de perte de masse, pour une charge de (5N) on remarque que le vieillissement au four à une vitesse de 180(tr/min), est plus grand que celle de la vitesse de 90(tr/min), 0.0394g contre 0.0262g. On observe aussi pour le vieillissement glace a une vitesse de 90(tr/min) est plus élevé que celle de vitesse 180(tr/min) de 0.1744g contre 0.0285g.
- Selon les figures (III.26.b et III.27.b), on constate que la perte de masse du vieillissement à l'air à la vitesse de 180(tr/min) est plus grande que celle de la vitesse de 90(tr/min). Par contre le vieillissement au four (revenus) a une vitesse de 90(tr/min) est plus grande que celle de vitesse de 180(tr/min), 0.0779g contre 0.0513g. On observe aussi pour le vieillissement glace à une vitesse de 90(tr/min) est plus élevé que celle de vitesse de 180(tr/min), 0.0934g contre 0.0421g

III.5 Analyse du comportement de l'aluminium à la corrosion

Nous avons testé six échantillons (air, four et glace) à la corrosion en les trempant dans une solution d'eau de mer (3.5% de sel), et nous avons suivi son évolution en une période de 28 jours, dans ce qui suit, nous avons illustré cette évolution avec des microscopies, et nous avons suivie les différent changement de masse représenté sous forme de graphes.

III.5.1 le refroidissement à l'air

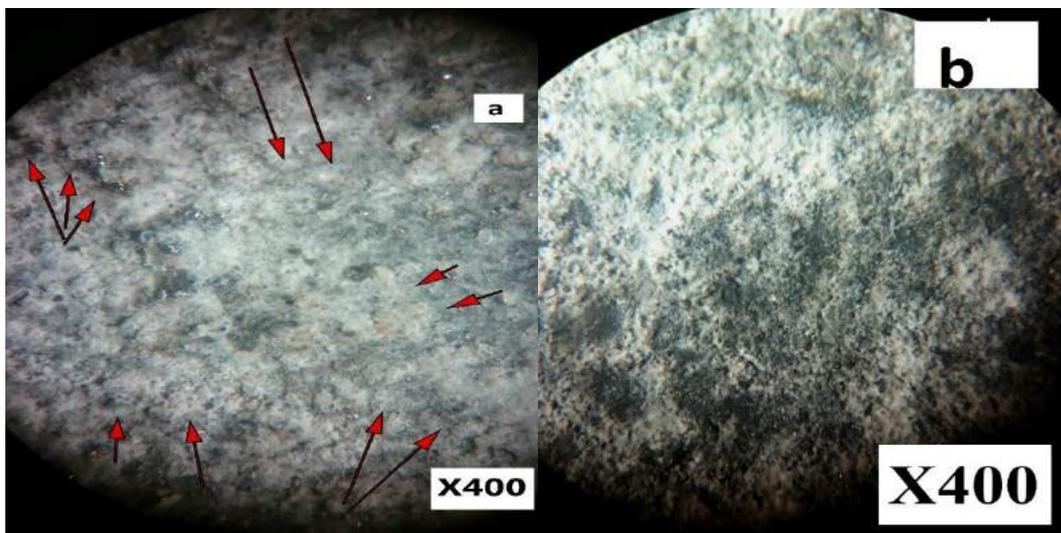


Figure III.28.a, b : immersions après 7 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /revenu.

D'après les figures (III.28.a, b), On constate l'absence totale de la corrosion sur les échantillons.

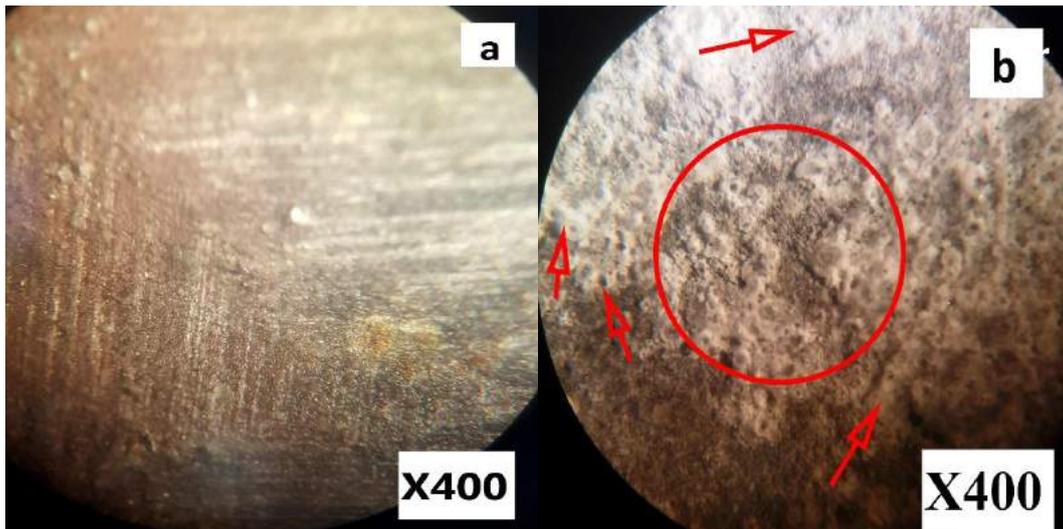


Figure III.29.a, b : immersions après 14 jours *a*-vieillessement *a*-V/ température ambiante *b*-V/revenu.

D'après les figures (III.29.a, b), On constate le début de la corrosion sur les échantillons après 14 jours d'immersions, nous remarquons que l'échantillon (b) est fissuré.

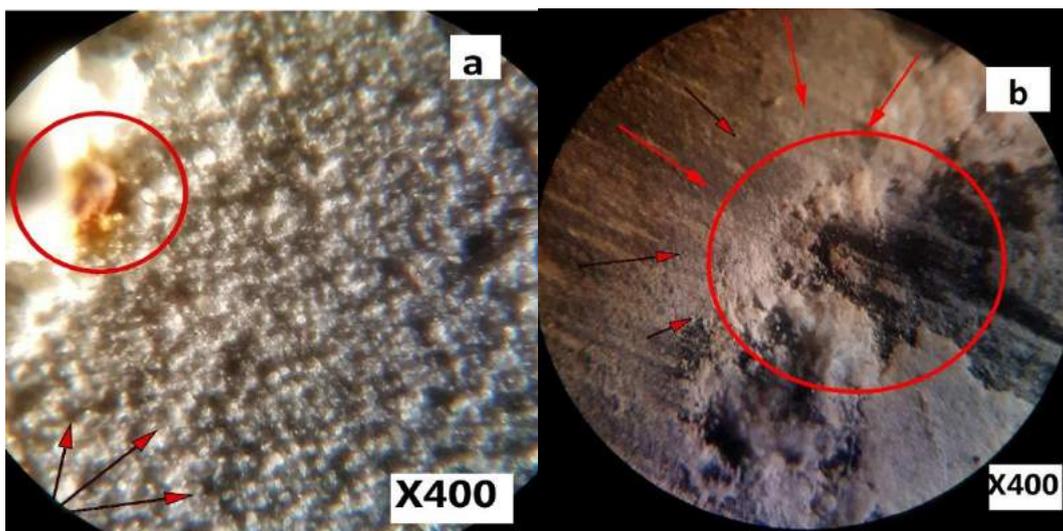


Figure III.30.a, b : immersions après 21 jours *a*-vieillessement *a*-V/ température ambiante *b*-V/revenu.

D'après les figures (III.30.a, b), on remarque sur l'échantillon (a) l'apparition de traces de corrosion, et pour l'échantillon (b), nous constatons qu'un début de corrosion sur la partie usée de la pièce due au film protecteur (Al_2O_3) abimé.

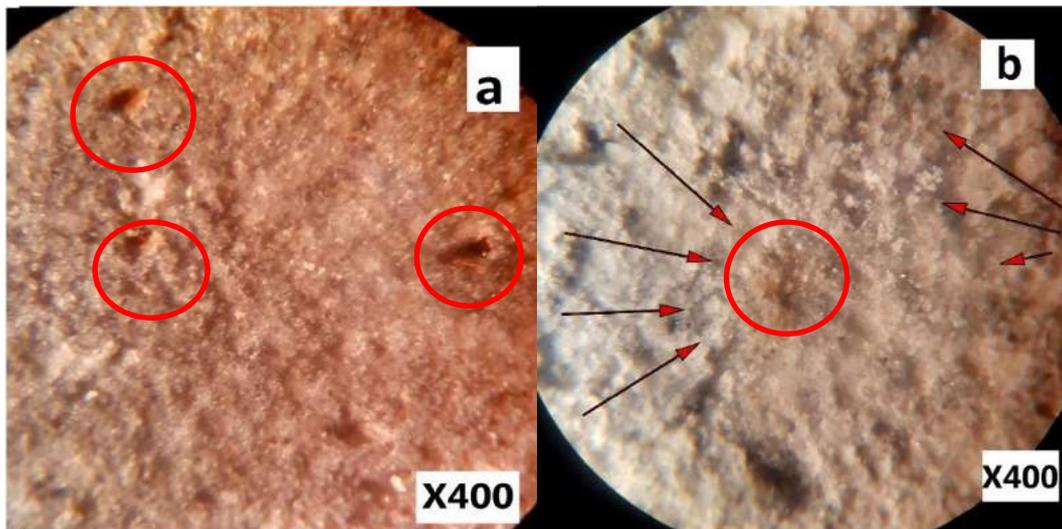


Figure III.31.a, b : immersions après 28 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V/ revenu.

D'après les figures (III.31.a, b), On constate que les traces de corrosion apparaissent dans différents endroits des deux échantillons.

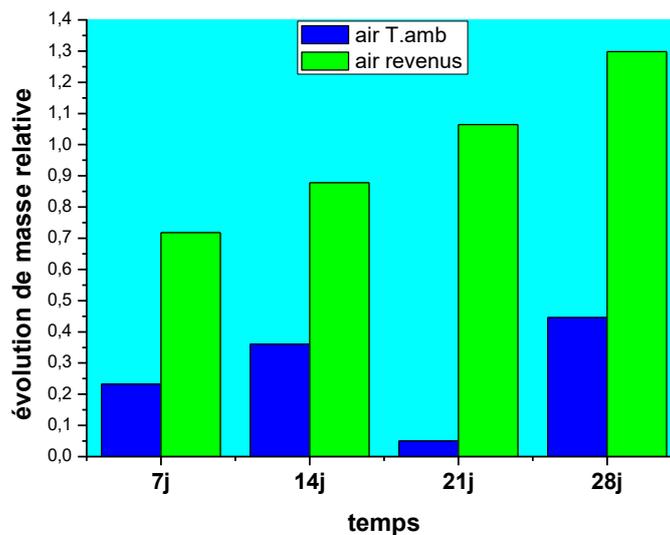


Figure III.32 : évolution de la masse des échantillons corrodée R/air.

- Dans le cas du refroidissement à l'air on distingue une grande différence entre les deux vieillissements en termes d'évolution de masse, l'échantillon vieilli au four gagne une masse qui atteint jusqu'à 1,3% de sa masse initiale, alors que l'échantillon vieilli à température ambiante n'a qu'à 0,4%. Ce qui implique que dans le refroidissement à l'air, le vieillissement à température ambiante résiste mieux à la corrosion.

III.5.2 le refroidissement au four

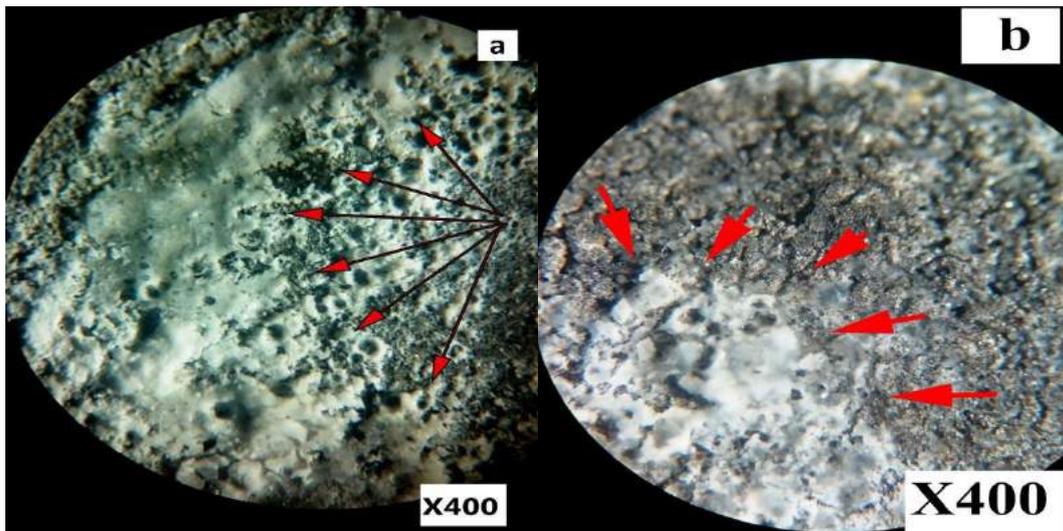


Figure III.33.a, b : immersions après 7 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /revenu.

D'après les figures (III.33.a, b), On constate après sept jours l'absence totale de la corrosion sur les échantillons.

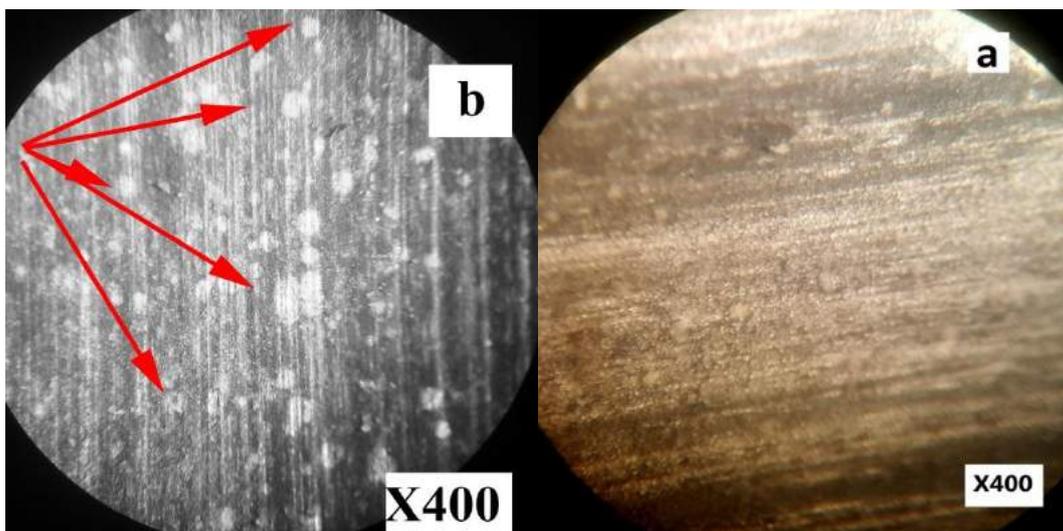


Figure III.34.a, b : immersions après 14 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /revenu.

D'après les figures (III.34.a, b), On constate après 14 jours l'absence totale de la corrosion sur les échantillons.

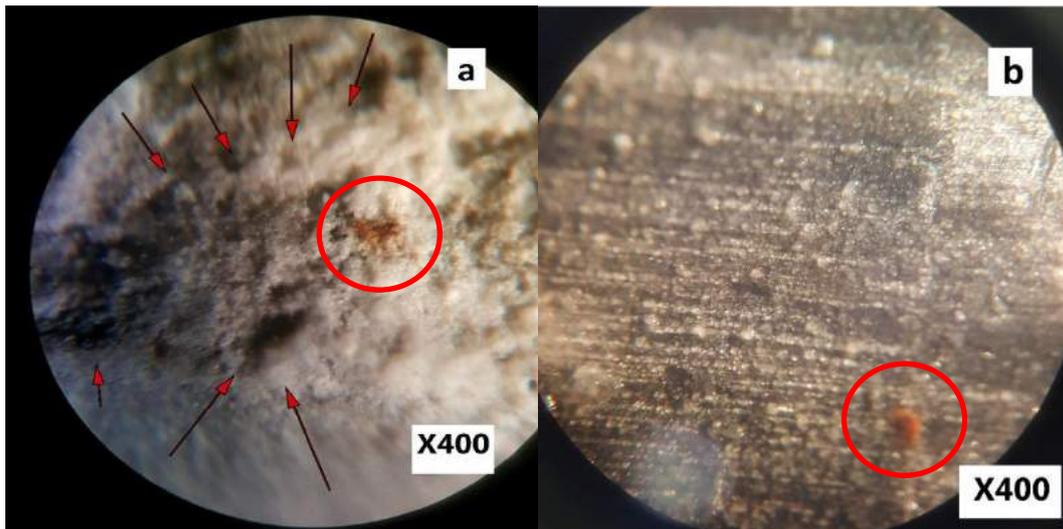


Figure III.35.a, b : immersions après 21 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /revenu.

D'après les figures (III.35.a, b), on remarque le début d'apparition de corrosion sur les deux échantillons après 21 jours d'immersions.

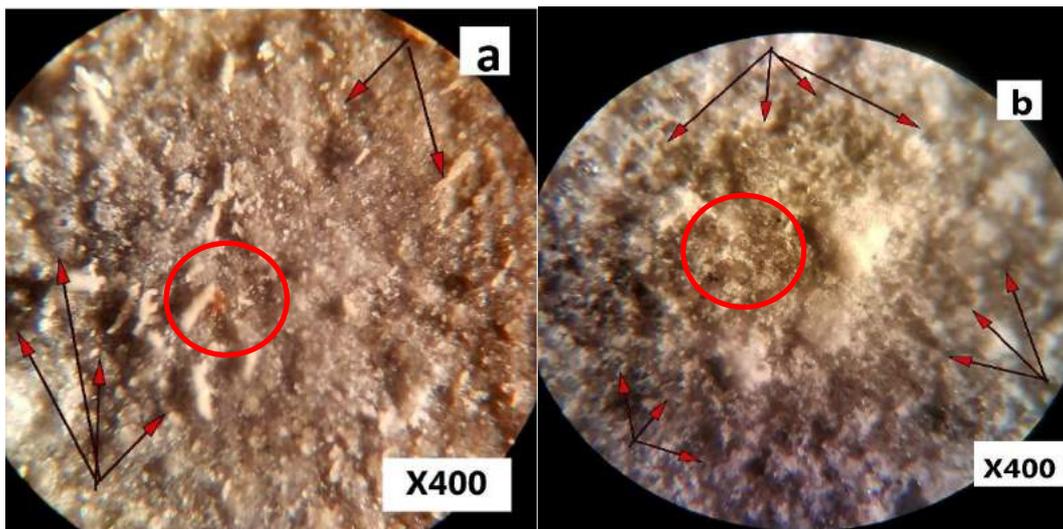


Figure III.36.a, b : immersions après 28 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /revenu.

D'après les figures (III.36.a, b), On constate le début de la corrosion localisée sur les échantillons après 28 jours d'immersions.

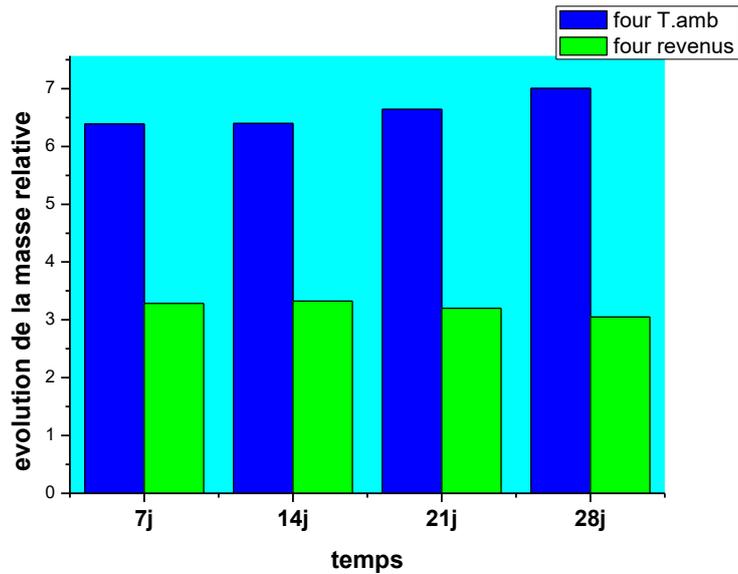


Figure III.37: évolution de la masse des échantillons corrodée R/revenu.

- Dans le cas du refroidissement au four (revenus), on s'aperçoit que l'échantillon vieilli au four (gain de masse atteint 3.3% de sa masse initiale) résiste mieux à la corrosion que ce lui vieilli à température ambiante (gain de masse atteint 7% de sa masse initiale).

III.5.3 le refroidissement a la glace

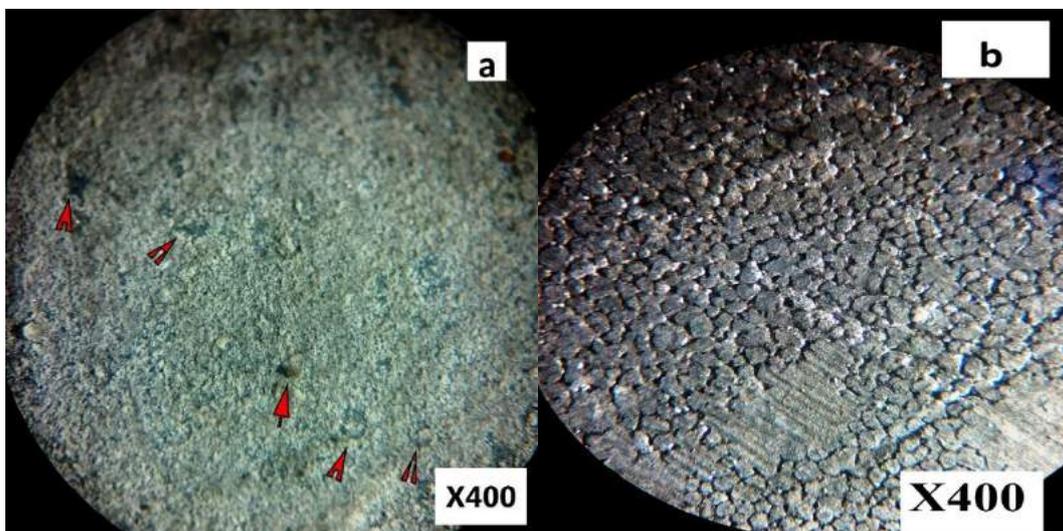


Figure III.38.a, b : immersions après 7 jours **a-V/ température ambiante b-V/ glace.**

D'après les figures (III.38.a, b), On constate l'absence totale de la corrosion sur la surface des échantillons, et nous remarquons aussi la présence de porosité sur les deux échantillons.

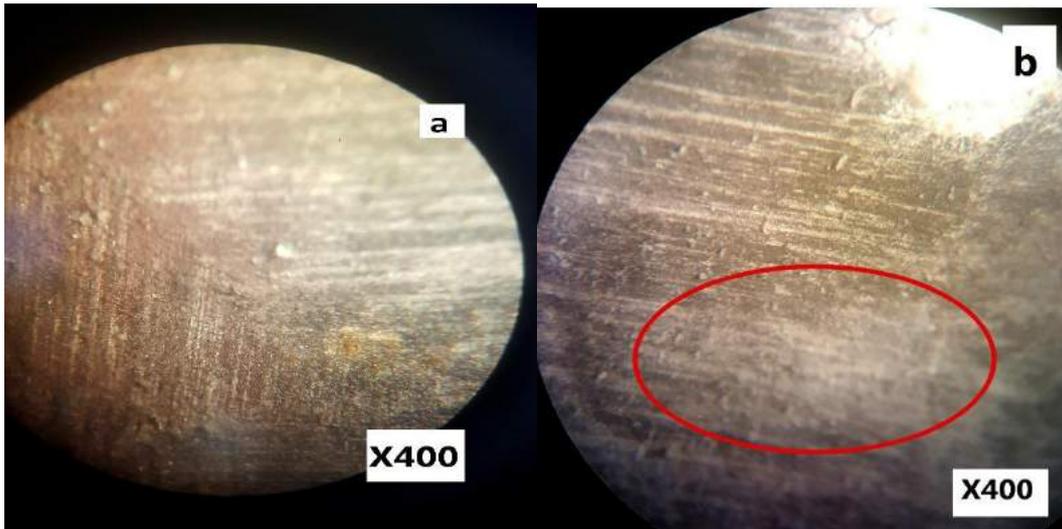


Figure III.39.a, b : immersions après 14 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /glace.

D'après les figures (III.39.a, b), On constate l'absence totale de la corrosion sur la surface des échantillons.

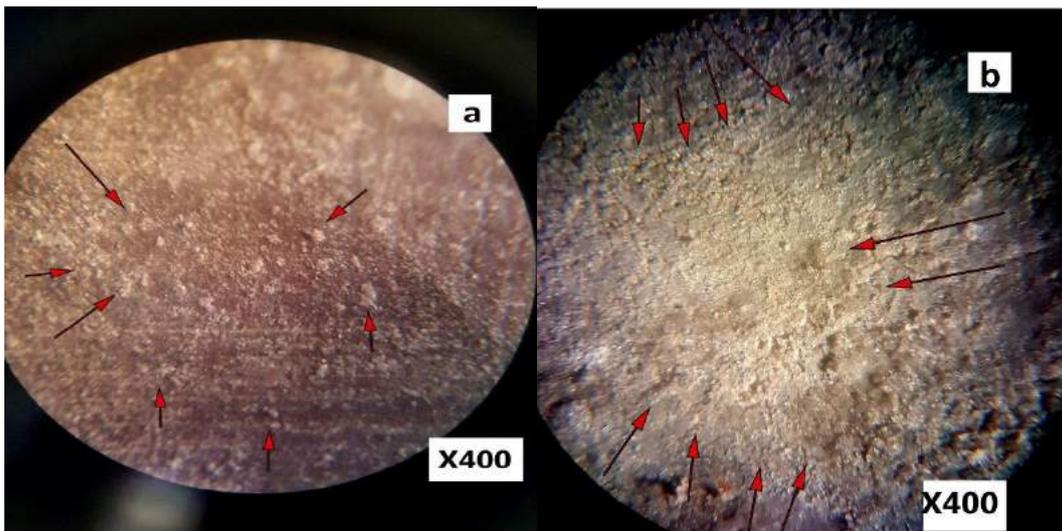


Figure III.40.a, b : immersions après 21 jours *a*-V/ température ambiante *b*-V /glace.

D'après les figures (III.40.a, b), On constate l'absence totale de la corrosion la surface des échantillons.

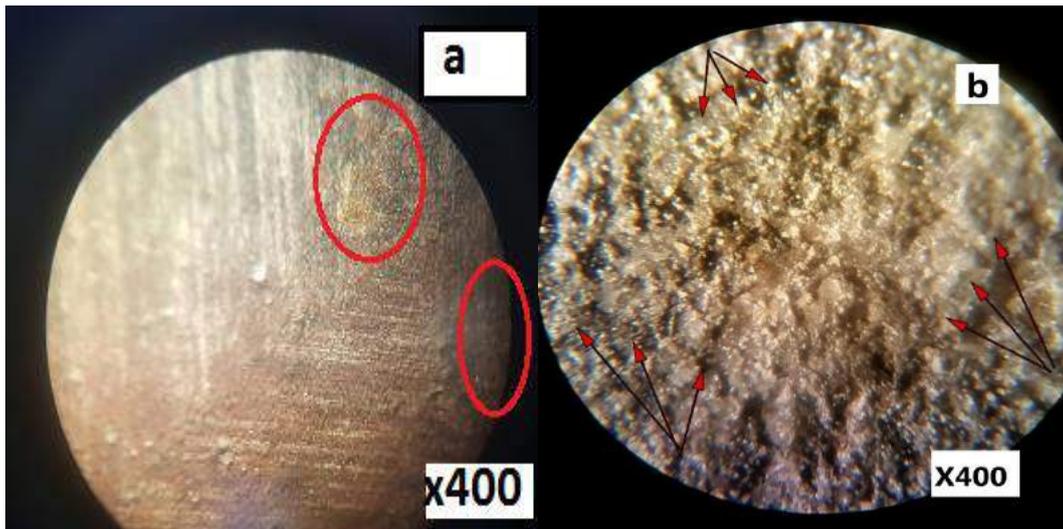


Figure III.41.a, b : immersions après 28 jours *a-V/ température ambiante b-V/ glace.*

D'après les figures (III.41.a, b), On constate l'absence totale de la corrosion sur la surface des échantillons (b) et quelque trace de surface corrodé sur l'échantillon (a) après 28 jours.

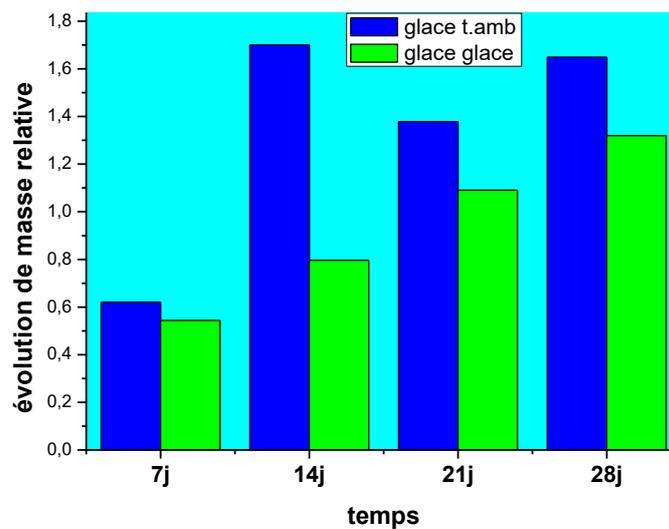


Figure III.42 : évolution de la masse des échantillons corrodée R/glace.

- Dans le cas du refroidissement à la glace, on remarque que l'échantillon vieilli à la glace (gain de masse atteint 1.3%) résiste mieux à la corrosion que ce lui vieilli à température ambiante (gain de masse atteint 1.7%).

III.5.4 Etude comparative

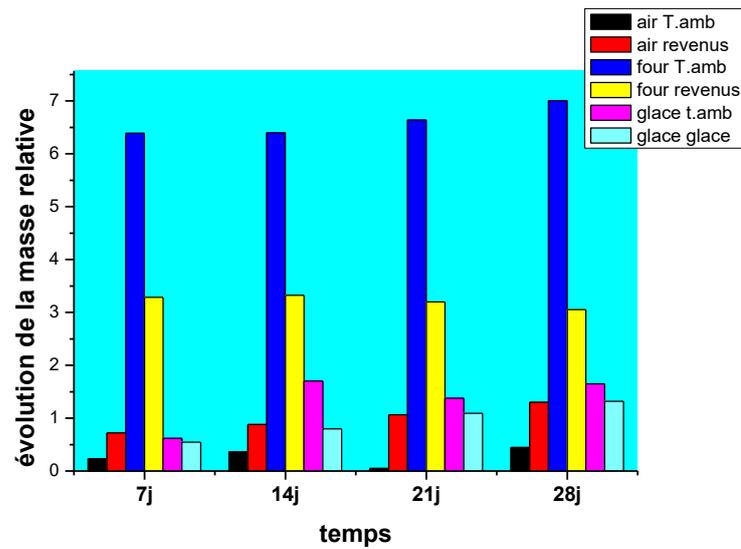


Figure III.43 : évolution de la masse des six échantillons corrodés.

- En comparant tous les échantillons on peut déduire que parmi tous les traitements appliqués au matériau, le mieux approprié pour résister à la corrosion est celui du refroidissement à l'air vieillissement à température ambiante.

***CONCLUSION
GÉNÉRALE***

Conclusion générale

Notre travail avait pour objectif de mettre en évidence l'influence du traitement thermique à (550°C) sur l'aluminium (2017A) sous différents vieillissements dans le but d'améliorer et de déterminer les propriétés mécaniques de l'alliage. La détermination des propriétés mécaniques est faite par l'essai de dureté, résilience, corrosion et le comportement de l'alliage à l'usure.

A travers ce travail, les traitements thermiques font maintenant partie de la panoplie des techniques de traitement de surface préconisées par les bureaux d'études. On a pu montrer que le traitement thermique a une importance primordiale dans la réalisation et la modification des propriétés mécaniques des pièces.

Les différentes analyses microstructurales sont basées sur l'observation métallographique, en moyennant : le microscope optique, Nous montrons que :

- La microstructure de l'alliage (2017A), présente quelques porosités et fissures notamment dans le refroidissement glace, et nous remarquons que la taille des grains est bien plus petite dans ce vieillissement que dans les autres.
- Les essais mécaniques de résilience ont montré que l'énergie de rupture la plus importante est obtenue pour les échantillons ayant le refroidissement glace vieillissement glace.
- Les essais mécaniques de dureté Brinell ont montré que la dureté la plus élevée est obtenue par le vieillissement glace.
- D'après le comportement à l'usure des différents échantillons de l'aluminium (2017A), nous concluons que le vieillissement glace est le traitement le plus approprié pour avoir la meilleure tenue à l'usure.

Perspectives et recommandations

Malgré que ce travail ait contribué à évaluer le vieillissement le plus adéquat, nous sommes convaincus qu'on n'a pas cerné tout le phénomène. De ce fait, les perspectives de cette étude peuvent être complétées par ce qui suit :

- Etude des mécanismes d'usure.
- Détermination de la composition des phases formées par microanalyse (EDAX).
- Mettre en évidence l'influence de la lubrification à l'usure.
- La détermination de la nature des phases par la diffraction X.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographique

- [1] **S. Mecheri**, Etude des réactions des Transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles, Mémoire de magister, Université de Constantine, **2007**.
- [2] **L.F. Mondolfo**, Aluminum Alloys, structures and proprieties, Butterworth, 1st edition, London, **1976**.
- [3] **H. Leiris**, Métaux et alliages autres que les aciers et les fonts, Tome II, Masson et cieéditeurs. pp.71-92, **1971**.
- [4] **H.Filali**, Effet de vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques de deux tôles Al-Mg-Si, Mémoire de Magister, Option Métallurgie, Université de Beskra, **2014**.
- [5] **J. Barralis, G. Maeder**, Précis de métallurgie, Communications actives 5eme édition Paris, **1975**, pp. 11-14.
- [6] **K.Boulemzaoud**, Analyse thermique des alliages d'aluminium Al-Mg-Si(Cu), Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine , **2012**.
- [7] **J.P. Bailon et J. M. Dorlot**, Des Matériaux, par presses internationales Polytechniques, pp.227-242 et 512-520, réimpression, automne, Canada, **2004**.
- [8] **J. Barralis, G. Maeder**, Précis de métallurgie, Communications actives 5eme édition, Paris, pp. 11-14, **1975**.
- [9] **M-J.Haas**, Grain boundary phenomena and failure of aluminium alloys, Université de Groningen, **2001**.
- [10] **Y.Aouabdia , A. Boubertakh, S. Hamamda**, Materials Letters, 64, **2010**.
- [11] **F.Serradj**, Etude calorimétrique et microstructurale des alliages Al-Mg-Si, mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie ,**2005**.
- [12] **C.Varel**, Le comportement de l'aluminium et de ses alliages, Ed. Dunod technique, Paris 25,**2004**.
- [13]. **J. Lanthony**, l'aluminium et les alliages légers. Ed. Presses Universitaires de France, Paris, 55, **1984**.
- [14] **J. R.Davis**, , Aluminum and Aluminum Alloys, Material Parks, Ohio, 1993, 784 p.
- [15] **S. Esmaili, X. Wang, D.J. Lloyd, W.J. Poole**, Met. Mater. Trans., **34(A)**, 2003, pp. 751-762.
- [16] **A.Asserin-lebert**, Etude expérimentale et prévision des mécanismes de rupture des tôles et des joins soudés bout à bout en alliage d'aluminium 6056, Thèse doctorat, Ecole national supérieur des mines de paris, **2005**.
- [17] **I. Lakhtine**. Métallographie et traitements thermiques des métaux, 2eme édition revue. Edition Mir. Moscou., 1986, pp. 367 - 386.

Référence bibliographique

- [18] **S.Mecheri**, Etude des réactions des Transformations de phase dans les alliages d'aluminium sous forme des tôles, Mémoire de magister, Université mentouri, constantine **2007**.
- [19] **C. Wolverton**, Crystal structure and stability of complex precipitate phases in Al-Cu-Mg-(Si) and Al-Zn-Mg alloys, Acta Materialia, 49, 3129-3142, 2001.
- [20] **Merica, Waltrenberg**, Scott, Trans. A.I.M.E., 64, 41, **1919**.
- [21] **R. Develay**, Traitements thermiques des alliages d'aluminium, Techniques de l'ingénieur M 1290 (1986).
- [22] **C. Vargel**, Corrosion de l'aluminium, paris, Dunod, **2004**.
- [23] **N.Radutoiu**, effect of the over-ageing treatment on the mechanical properties of AA2024 aluminum alloy, thèse doctorat, Université de Toulouse, **2013**.
- [24] **M. Dupeux**, Aide-mémoire science des matériaux, Dunod, Paris, 2004, p.105-148.
- [25] **L.L. Shreir** , ed, Corrosion, 2ème edition, Newnes-Butterworth, Section 1:49 ,1976,
- [26] **A.Benfoughal**, Analyse tribologique et thermique d'un matériau composite carbone-carbone dans un contact électrique, Mémoire de magister, option mécanique appliquée en engineering, Université Mentouri , Constantine, **2010**.
- [27] **R. Younes, A. Hanni**, Influence des post-traitements sur la tenue à l'usure d'un dépôt à base du fer réalisé par projection thermique. Mémoire Master en génie mécanique, option maintenance industrielle, Université de Béjaia, **2012**.
- [28] **R.Courtel**, vue passées et présentes sur les mécanismes du frottement, page : 23 RMF, N°66, **1978**.
- [29] **K.Hamimi S.Azzoug**, Comportement tribologique de trois types de dépôts en acier inoxydable déposé par la technique de projection à arc électrique, Mémoire Master en génie mécanique, Option Ingénierie Mécanique Assistée par Ordinateur, Université de Béjaia, **2012**.
- [30] **G. Bellanger**, le frottement et l'usure à sec en relation avec les propriétés physique et chimiques des couches superficielles sous-jacentes, Revue de l'institut Français du pétrole chapitre I, **1978**.

ANNEXE

Annexe

Annexe 1 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement à l'air vieillissement revenu.

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,3756	6,3763	30,4	0,0007	0,01097936	90
3	6,3756	6,3753	30,6	0,0003	0,00470544	90
5	6,3756	6,3746	30,5	0,001	0,0156848	90
10	6,3756	6,3743	30	0,0013	0,02039024	90
15	6,3756	6,3711	29,8	0,0045	0,07058159	90
20	6,3756	6,3608	28,4	0,0148	0,23213501	90
25	6,3756	6,3545	28,8	0,0211	0,33094924	90
30	6,3756	6,3468	29	0,0288	0,45172219	90

Annexe 2 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement à l'air vieillissement revenu.

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,3468	6,3455	34,3	0,0013	0,02048276	90
3	6,3468	6,3438	35,2	0,003	0,04726791	90
5	6,3468	6,3422	38	0,0046	0,07247747	90
10	6,3468	6,337	38,8	0,0098	0,15440852	90
15	6,3468	6,3304	37,8	0,0164	0,25839793	90
20	6,3468	6,321	43	0,0258	0,40650407	90
25	6,3468	6,3075	46,8	0,0393	0,61920968	90
30	6,3468	6,2835	44,8	0,0633	0,997353	90

Annexe

Annexe 3 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement à l'air vieillissement revenu.

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,4885	6,4883	23,8	0,0002	0,00308238	180
3	6,4885	6,4827	30,3	0,0058	0,08938892	180
5	6,4885	6,4802	32	0,0083	0,12791863	180
10	6,4885	6,4752	33,1	0,0133	0,20497804	180
15	6,4885	6,4676	33,9	0,0209	0,32210835	180
20	6,4885	6,4627	35,1	0,0258	0,39762657	180
25	6,4885	6,4576	34	0,0309	0,47622717	180
30	6,4885	6,4539	34,2	0,0346	0,53325114	180

Annexe 4 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,4539	6,4386	81,9	0,0153	0,23706596	180
3	6,4539	6,4207	81,1	0,0332	0,51441764	180
5	6,4539	6,4163	61,4	0,0376	0,58259347	180
10	6,4539	6,3906	61,8	0,0633	0,98080231	180
15	6,4539	6,361	47,8	0,0929	1,43943972	180
20	6,4539	6,354	50,5	0,0999	1,54790127	180
25	6,4539	6,3317	66,4	0,1222	1,89342878	180
30	6,4539	6,3202	57,8	0,1337	2,07161561	180

Annexe

Annexe 5 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	ΔM/M0(%)	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,3512	6,3512	29,3	0	0	90
3	6,3512	6,349	29,6	0,0022	0,03463912	90
5	6,3512	6,3475	30,8	0,0037	0,05825671	90
10	6,3512	6,3439	30,4	0,0073	0,11493891	90
15	6,3512	6,3391	31,6	0,0121	0,19051518	90
20	6,3512	6,3266	25,8	0,0246	0,38732838	90
25	6,3512	6,3178	26,8	0,0334	0,52588487	90
30	6,3512	6,3058	26,7	0,0454	0,71482554	90

Annexe 6 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	ΔM/M0(%)	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,3858	6,3056	42,5	0,0802	1,25591155	90
3	6,3858	6,3039	41,6	0,0819	1,28253312	90
5	6,3858	6,2989	44,5	0,0869	1,36083185	90
10	6,3858	6,2935	46,2	0,0923	1,44539447	90
15	6,3858	6,2848	46,5	0,101	1,58163425	90
20	6,3858	6,2743	45,5	0,1115	1,74606157	90
25	6,3858	6,2622	48,7	0,1236	1,93554449	90
30	6,3858	6,2425	46,8	0,1433	2,24404147	90

Annexe

Annexe 7 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,519	6,5169	35	0,0021	0,03221353	180
3	6,519	6,5157	40	0,0033	0,05062126	180
5	6,519	6,5137	37,9	0,0053	0,08130081	180
10	6,519	6,5125	41,7	0,0065	0,09970854	180
15	6,519	6,5079	40,7	0,0111	0,17027151	180
20	6,519	6,5022	39,1	0,0168	0,25770824	180
25	6,519	6,4973	39,9	0,0217	0,33287314	180
30	6,519	6,4909	37,8	0,0281	0,43104771	180

Annexe 8 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement température ambiante.

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,4909	6,4898	35,6	0,0011	0,0169468	180
3	6,4909	6,4889	37,1	0,002	0,03081237	180
5	6,4909	6,4854	51,3	0,0055	0,08473401	180
10	6,4909	6,4819	53,6	0,009	0,13865566	180
15	6,4909	6,4737	61,1	0,0172	0,26498637	180
20	6,4909	6,4654	61,1	0,0255	0,39285769	180
25	6,4909	6,4511	64,2	0,0398	0,61316612	180
30	6,4909	6,434	59,2	0,0569	0,87661187	180

Annexe

Annexe 9 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	7,5982	7,5967	27,7	0,0015	0,01974152	90
3	7,5982	7,5941	28,2	0,0041	0,05396015	90
5	7,5982	7,5934	28,8	0,0048	0,06317286	90
10	7,5982	7,5913	29,2	0,0069	0,09081098	90
15	7,5982	7,5882	28,8	0,01	0,13161012	90
20	7,5982	7,5842	29,8	0,014	0,18425417	90
25	7,5982	7,5795	29,5	0,0187	0,24611092	90
30	7,5982	7,573	29,6	0,0252	0,3316575	90

Annexe 10 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	7,573	7,5735	38,5	0,0005	0,0066024	90
3	7,573	7,572	45,1	0,001	0,01320481	90
5	7,573	7,5687	45,5	0,0043	0,05678067	90
10	7,573	7,5668	42,2	0,0062	0,0818698	90
15	7,573	7,5629	42,8	0,0101	0,13336855	90
20	7,573	7,5532	41,6	0,0198	0,26145517	90
25	7,573	7,5422	46,3	0,0308	0,40670804	90
30	7,573	7,5292	48,9	0,0438	0,57837053	90

Annexe

Annexe 11 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	5,4553	5,4531	40,8	0,0022	0,04032775	180
3	5,4553	5,4511	51,3	0,0042	0,07698935	180
5	5,4553	5,4464	55,9	0,0089	0,1631441	180
10	5,4553	5,4424	43,3	0,0129	0,23646729	180
15	5,4553	5,4376	42,9	0,0177	0,32445512	180
20	5,4553	5,426	43,2	0,0293	0,53709237	180
25	5,4553	5,4168	42	0,0385	0,70573571	180
30	5,4553	5,4075	39,9	0,0478	0,87621212	180

Annexe 12 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	4,9465	4,9439	63	0,0026	0,05256242	180
3	4,9465	4,9402	69,4	0,0063	0,04447589	180
5	4,9465	4,8768	80	0,0697	0,08490852	180
10	4,9465	4,87	70	0,0765	0,1799252	180
15	4,9465	4,8612	77,6	0,0853	0,26079046	180
20	4,9465	4,5204	96,8	0,4261	0,35782877	180
25	4,9465	4,2812	110,6	0,6653	0,59233802	180
30	4,9465	4,057	87,3	0,8895	0,77832811	180

Annexe

Annexe 13 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,2499	6,2407	29,9	0,0092	0,14720236	90
3	6,2499	6,2393	30,6	0,0106	0,16960271	90
5	6,2499	6,2382	33,1	0,0117	0,187203	90
10	6,2499	6,2366	35,5	0,0133	0,2128034	90
15	6,2499	6,2329	34,6	0,017	0,27200435	90
20	6,2499	6,2404	33,8	0,0095	0,15200243	90
25	6,2499	6,2244	34,4	0,0255	0,40800653	90
30	6,2499	6,217	34,3	0,0329	0,52640842	90

Annexe 14 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,217	6,215	44,7	0,002	0,03216986	90
3	6,217	6,2142	42,5	0,0028	0,0450378	90
5	6,217	6,2113	46,2	0,0057	0,09168409	90
10	6,217	6,2055	50	0,0115	0,18497668	90
15	6,217	6,1992	51,5	0,0178	0,28631173	90
20	6,217	6,1873	52,2	0,0297	0,47772237	90
25	6,217	6,1737	56,4	0,0433	0,6964774	90
30	6,217	6,215	44,7	0,002	0,03216986	90

Annexe

Annexe 15 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,7722	6,7708	31,9	0,0014	0,02067275	180
3	6,7722	6,7684	31,8	0,0038	0,05611175	180
5	6,7722	6,766	31	0,0062	0,09155075	180
10	6,7722	6,7618	32,1	0,0104	0,153569	180
15	6,7722	6,7555	31,4	0,0167	0,24659638	180
20	6,7722	6,7449	30	0,0273	0,40311863	180
25	6,7722	6,7369	32	0,0353	0,52124863	180
30	6,7722	6,726	29,6	0,0462	0,68220076	180

Annexe 16 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,726	6,7254	51,2	0,0006	0,00892061	180
3	6,726	6,721	53	0,005	0,07433839	180
5	6,726	6,7134	68,1	0,0126	0,18733274	180
10	6,726	6,7161	65,3	0,0099	0,14719001	180
15	6,726	6,682	97,6	0,044	0,65417782	180
20	6,726	6,6483	83,1	0,0777	1,15521855	180
25	6,726	6,6331	74,2	0,0929	1,38120726	180
30	6,726	6,6196	77,8	0,1064	1,5819209	180

Annexe

Annexe 17 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,5774	6,5784	28	0,001	0,01520358	90
3	6,5774	6,578	28,7	0,0006	0,00912215	90
5	6,5774	6,5772	29	0,0002	0,00304072	90
10	6,5774	6,5757	31,2	0,0017	0,02584608	90
15	6,5774	6,5735	31,8	0,0039	0,05929395	90
20	6,5774	6,573	30,8	0,0044	0,06689573	90
25	6,5774	6,5675	32,2	0,0099	0,1505154	90
30	6,5774	6,559	31,5	0,0184	0,2797458	90

Annexe 18 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,559	6,5578	54	0,0012	0,01829547	90
3	6,559	6,5557	55,4	0,0033	0,05031255	90
5	6,559	6,554	53,4	0,005	0,07623113	90
10	6,559	6,5503	61,3	0,0087	0,13264217	90
15	6,559	6,5452	58,4	0,0138	0,21039793	90
20	6,559	6,5337	57,6	0,0253	0,38572953	90
25	6,559	6,5205	49,2	0,0385	0,58697972	90
30	6,559	6,5054	51,6	0,0536	0,81719774	90

Annexe

Annexe 19 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,3657	6,3647	27	0,001	0,01570919	180
3	6,3657	6,3639	28,6	0,0018	0,02827654	180
5	6,3657	6,3613	30,6	0,0044	0,06912044	180
10	6,3657	6,3578	31	0,0079	0,12410261	180
15	6,3657	6,3508	30,6	0,0149	0,23406695	180
20	6,3657	6,344	31,1	0,0217	0,34088945	180
25	6,3657	6,3328	29,7	0,0329	0,5168324	180
30	6,3657	6,3231	31,7	0,0426	0,66921156	180

Annexe 20 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,3231	6,3142	67,1	0,0089	0,14075374	180
3	6,3231	6,3098	74,2	0,0133	0,21033986	180
5	6,3231	6,2948	80,1	0,0283	0,44756528	180
10	6,3231	6,2901	79	0,033	0,52189591	180
15	6,3231	6,278	85,2	0,0451	0,71325774	180
20	6,3231	6,2685	81,6	0,0546	0,8635005	180
25	6,3231	6,2535	102,1	0,0696	1,10072591	180
30	6,3231	6,2355	100,1	0,0876	1,3853964	180

Annexe

Annexe 21 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,4229	6,421	26	0,0019	0,02958165	90
3	6,4229	6,4184	27,8	0,0045	0,07006181	90
5	6,4229	6,4172	31	0,0057	0,08874496	90
10	6,4229	6,4126	28	0,0103	0,1603637	90
15	6,4229	6,411	31,8	0,0119	0,18527456	90
20	6,4229	6,4079	34	0,015	0,23353937	90
25	6,4229	6,4017	32,4	0,0212	0,33006897	90
30	6,4229	6,3954	33,8	0,0275	0,42815551	90

Annexe 22 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,3954	6,3935	47,7	0,0019	0,02970885	90
3	6,3954	6,3917	51,3	0,0037	0,05785408	90
5	6,3954	6,3862	52,4	0,0092	0,14385339	90
10	6,3954	6,382	43,1	0,0134	0,2095256	90
15	6,3954	6,3769	50,3	0,0185	0,28927041	90
20	6,3954	6,3681	51,5	0,0273	0,42686931	90
25	6,3954	6,3573	51,1	0,0381	0,59574069	90
30	6,3954	6,3348	41,6	0,0606	0,94755606	90

Annexe

Annexe 23 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,741	6,7376	53,3	0,0034	0,05043762	180
3	6,741	6,7349	46,4	0,0061	0,09049103	180
5	6,741	6,7322	42,7	0,0088	0,13054443	180
10	6,741	6,7274	44,8	0,0136	0,20175048	180
15	6,741	6,7212	48	0,0198	0,29372497	180
20	6,741	6,7128	46,5	0,0282	0,41833556	180
25	6,741	6,7035	44,3	0,0375	0,55629729	180
30	6,741	6,6922	42,1	0,0488	0,7239282	180

Annexe 24 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,6922	6,6871	70,5	0,0051	0,07620812	180
3	6,6922	6,6775	92,6	0,0147	0,21965871	180
5	6,6922	6,6608	79,8	0,0314	0,46920295	180
10	6,6922	6,6589	87,5	0,0333	0,49759421	180
15	6,6922	6,6476	88,2	0,0446	0,66644751	180
20	6,6922	6,6336	101,1	0,0586	0,87564627	180
25	6,6922	6,6226	98,9	0,0696	1,04001674	180
30	6,6922	6,5971	93,1	0,0951	1,42105735	180

Annexe

Annexe 25 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,2481	6,2471	25,2	0,001	0,01600487	90
3	6,2481	6,2467	25,8	0,0014	0,02240681	90
5	6,2481	6,2464	28,1	0,0017	0,02720827	90
10	6,2481	6,2456	27,8	0,0025	0,04001216	90
15	6,2481	6,2427	30,1	0,0054	0,08642627	90
20	6,2481	6,2399	30,3	0,0082	0,1312399	90
25	6,2481	6,2363	28,3	0,0118	0,18885741	90
30	6,2481	6,2286	30,1	0,0195	0,31209488	90

Annexe 26 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,2286	6,2286	41	0	0	90
3	6,2286	6,226	44,2	0,0026	0,04174293	90
5	6,2286	6,2228	43,2	0,0058	0,09311884	90
10	6,2286	6,2156	39,2	0,013	0,20871464	90
15	6,2286	6,2023	42	0,0263	0,42224577	90
20	6,2286	6,1882	33,4	0,0404	0,64862088	90
25	6,2286	6,165	42,2	0,0636	1,02109623	90
30	6,2286	6,145	31,1	0,0836	1,34219568	90

Annexe

Annexe 27 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,4681	6,4668	27,2	0,0013	0,02009864	180
3	6,4681	6,4646	29,5	0,0035	0,05411172	180
5	6,4681	6,4626	29,6	0,0055	0,0850327	180
10	6,4681	6,4614	27,3	0,0067	0,10358529	180
15	6,4681	6,4596	33,8	0,0085	0,13141417	180
20	6,4681	6,4563	28,5	0,0118	0,18243379	180
25	6,4681	6,4519	29,9	0,0162	0,25045995	180
30	6,4681	6,443	30,9	0,0251	0,38805832	180

Annexe 28 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement température ambiante

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,443	6,4407	57,5	0,0023	0,03569766	180
3	6,443	6,4423	58,6	0,0007	0,0108645	180
5	6,443	6,4343	62,8	0,0087	0,13503027	180
10	6,443	6,4169	64	0,0261	0,4050908	180
15	6,443	6,388	69,9	0,055	0,85363961	180
20	6,443	6,3737	62,7	0,0693	1,07558591	180
25	6,443	6,3592	54,3	0,0838	1,30063635	180
30	6,443	6,3422	51,9	0,1008	1,56448859	180

Annexe

Annexe 29 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,3135	6,313	29,8	0,0005	0,00791954	90
3	6,3135	6,3121	33,1	0,0014	0,0221747	90
5	6,3135	6,3109	33	0,0026	0,04118159	90
10	6,3135	6,3105	34,2	0,003	0,04751722	90
15	6,3135	6,3091	34,6	0,0044	0,06969193	90
20	6,3135	6,3067	34,6	0,0068	0,10770571	90
25	6,3135	6,2972	32,4	0,0163	0,25817692	90
30	6,3135	6,2873	32,6	0,0262	0,41498376	90

Annexe 30 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,2873	6,2845	37,4	0,0028	0,04453422	90
3	6,2873	6,282	42,4	0,0053	0,08429692	90
5	6,2873	6,277	45,7	0,0103	0,16382231	90
10	6,2873	6,2685	48,8	0,0188	0,29901548	90
15	6,2873	6,2553	55,7	0,032	0,50896251	90
20	6,2873	6,2436	53	0,0437	0,69505193	90
25	6,2873	6,2243	53,3	0,063	1,00201994	90
30	6,2873	6,2081	52,3	0,0792	1,25968222	90

Annexe

Annexe 31 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement revenu

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,4185	6,4106	26,7	0,0079	0,12308172	180
3	6,4185	6,4061	27,8	0,0124	0,19319156	180
5	6,4185	6,403	26,5	0,0155	0,24148944	180
10	6,4185	6,3991	40,5	0,0194	0,3022513	180
15	6,4185	6,3938	40,6	0,0247	0,38482511	180
20	6,4185	6,3912	42,3	0,0273	0,42533302	180
25	6,4185	6,3867	43,6	0,0318	0,49544286	180
30	6,4185	6,3791	40,1	0,0394	0,61385059	180

Annexe 32 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement revenu.

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,3791	6,377	84	0,0021	0,03292	180
3	6,3791	6,3733	93,6	0,0058	0,09092192	180
5	6,3791	6,3704	110,2	0,0087	0,13638288	180
10	6,3791	6,3643	113,6	0,0148	0,23200765	180
15	6,3791	6,3559	116,7	0,0232	0,36368767	180
20	6,3791	6,3521	91,8	0,027	0,4232572	180
25	6,3791	6,3399	91,5	0,0392	0,61450675	180
30	6,3791	6,3278	89,6	0,0513	0,80418868	180

Annexe

Annexe 33 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						90
Temps (min)						90
1	6,4755	6,4673	26,4	0,0082	0,12663115	90
3	6,4755	6,4663	27,7	0,0092	0,14207397	90
5	6,4755	6,4656	26,2	0,0099	0,15288395	90
10	6,4755	6,3328	26,5	0,1427	2,20369083	90
15	6,4755	6,3291	27,2	0,1464	2,26082928	90
20	6,4755	6,3217	28,8	0,1538	2,37510617	90
25	6,4755	6,3132	28,7	0,1623	2,50637016	90
30	6,4755	6,3011	31,5	0,1744	2,69322832	90

Annexe 34 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 90 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						90
Temps (min)						90
1	6,3011	6,2864	84,1	0,0147	0,2332926	90
3	6,3011	6,2835	81,4	0,0176	0,27931631	90
5	6,3011	6,2767	81,4	0,0244	0,38723398	90
10	6,3011	6,2639	83,6	0,0372	0,59037311	90
15	6,3011	6,2576	71,8	0,0435	0,69035565	90
20	6,3011	6,2485	74,5	0,0526	0,83477488	90
25	6,3011	6,2188	82,6	0,0823	1,30612115	90
30	6,3011	6,2077	79,9	0,0934	1,48228087	90

Annexe

Annexe 35 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 5 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
5						180
Temps (min)						180
1	6,4356	6,4355	21,9	1E-04	0,00155386	180
3	6,4356	6,4353	25,3	0,0003	0,00466157	180
5	6,4356	6,4338	27,8	0,0018	0,02796942	180
10	6,4356	6,432	27,9	0,0036	0,05593884	180
15	6,4356	6,4287	29,5	0,0069	0,10721611	180
20	6,4356	6,4194	31,2	0,0162	0,25172478	180
25	6,4356	6,4139	30,7	0,0217	0,3371869	180
30	6,4356	6,4071	31,9	0,0285	0,44284915	180

Annexe 36 : Evaluation de la perte de masse en fonction du temps sous une charge de 30 N avec une vitesse de rotation 180 tr/min pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement glace

La charge (N)	Masse Initiale M0(g)	Masse Finale M1(g)	T (°C)	ΔM	$\Delta M/M0(\%)$	Vitesse de Rotation (tr/min)
30						180
Temps (min)						180
1	6,4071	6,4059	46,5	0,0012	0,01872922	180
3	6,4071	6,4032	52	0,0039	0,06086997	180
5	6,4071	6,4003	48,9	0,0068	0,10613226	180
10	6,4071	6,3955	50,6	0,0116	0,18104915	180
15	6,4071	6,3881	53,5	0,019	0,29654602	180
20	6,4071	6,3815	52,7	0,0256	0,39955674	180
25	6,4071	6,3769	47,3	0,0302	0,47135209	180
30	6,4071	6,365	56	0,0421	0,65708355	180

Annexe

Annexe 37 : Prise de masse de l'aluminium lors du test de corrosion pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement à température ambiante

temps	m_0	m_j	dm	dm/m0	dm/m0 (%)
jour 7	6,2425	6,228	0,0145	0,00232279	0,23227873
jour 14	6,2425	6,22	0,0225	0,00360433	0,36043252
jour 21	6,2425	6,2456	0,0031	0,0004966	0,04965959
jour 28	6,2425	6,2703	0,0278	0,00445334	0,4453344

Annexe 38 : Prise de masse pour l'aluminium lors du test corrosion pour l'échantillon du refroidissement air vieillissement revenus

temps	m_0	m_j	dm	dm/m0	dm/m0 (%)
jour 7	6,2835	6,3286	0,0451	0,00717753	0,71775284
jour 14	6,2835	6,3387	0,0552	0,00878491	0,87849129
jour 21	6,2835	6,3504	0,0669	0,01064693	1,06469324
jour 28	6,2835	6,3651	0,0816	0,01298639	1,29863929

Annexe 39 : Prise de masse pour l'aluminium lors du test corrosion pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement température ambiante

temps	m_0	m_j	dm	dm/m0	dm/m0 (%)
jour 7	6,1737	6,568	0,3943	0,0638677	6,38676968
jour 14	6,1737	6,5686	0,3949	0,06396488	6,39648833
jour 21	6,1737	6,5836	0,4099	0,06639454	6,63945446
jour 28	6,1737	6,6062	0,4325	0,07005523	7,00552343

Annexe 40 : Prise de masse pour l'aluminium lors du test corrosion pour l'échantillon du refroidissement four vieillissement revenus

temps	m_0	m_j	dm	dm/m0	dm/m0 (%)
jour 7	6,5054	6,2917	0,2137	0,03284963	3,28496326
jour 14	6,5054	6,2891	0,2163	0,0332493	3,32493006
jour 21	6,5054	6,2972	0,2082	0,03200418	3,20041811
jour 28	6,5054	6,3069	0,1985	0,03051311	3,05131122

Annexe

Annexe 41 : Prise de masse pour l'aluminium lors du test corrosion pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement température ambiante

temps	m₀	m_j	dm	dm/m₀	dm/m₀ (%)
jour 7	6,145	6,1831	0,0381	0,00620016	0,62001627
jour 14	6,145	6,2495	0,1045	0,0170057	1,70056957
jour 21	6,145	6,2297	0,0847	0,01378356	1,37835639
jour 28	6,145	6,2463	0,1013	0,01648495	1,64849471

Annexe 42 : Prise de masse pour l'aluminium lors du test corrosion pour l'échantillon du refroidissement glace vieillissement glace

temps	m₀	m_j	dm	dm/m₀	dm/m₀ (%)
Jour 7	6,365	6,3996	0,0346	0,00543598	0,5435978
Jour 14	6,365	6,4157	0,0507	0,00796544	0,7965436
Jour 21	6,365	6,4344	0,0694	0,01090338	1,09033778
Jour 28	6,365	6,449	0,084	0,01319717	1,3197172

Résumé :

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié l'effet du traitement thermique et les différents types de vieillissement de l'alliage d'aluminium du type 2017 A, cet alliage est grandement privilégié dans différentes industries telle que celle d'automobile et aéronautique. Etc.

L'objectif principal de notre travail c'est d'effectuer un vieillissement de notre aluminium 2017A. L'étude a été effectuée sur la base de différentes caractérisations mécaniques et microstructural de cet alliage, après avoir refroidi de trois manières différentes : à l'air, au four et à la glace, puis subi un vieillissement à température ambiante, revenu et à la glace. Nos résultats nous ont montré que dans la métallographie le grain le plus petit dans les vieillissements glace. Le vieillissement glace est le traitement qui procure à l'alliage 2017 A la dureté la plus élevée.

La résistance à l'usure nous a permis de savoir qu'à la vitesse de 180tr/min sous une charge de 30N, que la meilleure tenue à l'usure correspond à celui ayant un vieillissement glace.

Mots clé : 2017A, métallographie, résilience, dureté, usure.

Abstract :

The aim in this work is to study the effect of the heat treatment and different types of over-aging of the aluminum alloy type 2017 A, this alloy is greatly used in various industries such as automotive and aeronautics, domestics. etc.

The main objective of our work is to make the efficient over-aging of our aluminum 2017A. The study was carried out on the basis of different mechanical and microstructural characterization of this alloy, after cooling in three different environments: air, oven and ice, then over-aging for 45 days at room temperature, yield and ice. Our results showed us that in metallography the grain size is less noticeable in ice aging. Ice aging is the treatment that gives the 2017 alloy the highest hardness. The wear resistance allowed us to know that at a speed of 180 tr/min under a force of 30N, the best behavior corresponds to that having ice aging.

Key-Word : 2017A, Metallography, Charpy Test, Hardness, Wear.