



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

OUAKAL Mohamed Islam & REDJEM Seddik

Thème

**ETUDE ET CARACTERISATION D'UN ALLIAGE D'ALUMINIUM DE
SERIE 6000**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
SALAMANI Mohammed	MCA	Président
BOUDILMI Aissa	MCA	Encadreur
MAAZOUZ Mourad	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre travail et qui nous ont aidés lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions, dans un premier temps, à remercier notre encadreur de mémoire M : A.BOUDILMI pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont alimenté notre réflexion.

Nous adressons, aussi, nos sincères remerciements à tous les professeurs intervenants qui, par leurs paroles, conseils et leurs critiques ont guidé notre réflexion durant notre recherche.

Dédicaces

Nous dédions ce travail :

A nos familles

Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières pour que nous
puissions atteindre notre objectif.

A tous les cousins, tous les voisins qui nous ont
chaleureusement encouragés le long de notre parcours.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Signification du premier chiffre de la désignation internationale.....	9
Tableau I.2 : Modification successives de l'alliage 2024*	10
Tableau II.1 : Composition des alliages 6060-6082-6101.....	15
Tableau II.2 : Caractéristiques physiques.....	16
Tableau 5 : Composition chimique en % de l'alliage 6060.....	41
Tableau 6 : Caractéristiques physiques de l'alliage 6060.....	42

Liste des figures

Figure II.1 : Principaux alliages d'aluminium.....	21
Figure II.2 : Partie du diagramme d'équilibre Aluminium-Mg ₂ Si.....	22
Figure II.3 : Diagramme de phases du système Al-Mg-Si.....	27
Figure II.4 : Alliage de la famille 6000 courbe d'iso-charge de rupture Rm...	28
Figure III.1 : Types d'usure.....	31
Figure III.2 : Processus d'usure.....	32
Figure III.3 : Usure par glissement.....	33
Figure III.4 : Usure par roulement.....	34
Figure III.5 : Usure par frottement à petits débattements.....	35
Figure III.6 : Mécanismes d'usure abrasive à deux corps, d'usure abrasive à trois corps et d'usure adhésive.....	35
Figure III.7 : Mécanisme d'usure par fatigue.....	37
Figure IV.1 : Vue générale du dispositif de fretting.....	43
Figure IV.2 : Vue du module mobile du dispositif.....	44
Figure IV.3 : Position des capteurs de force et de déplacement.....	45
Figure IV.4 : Interface graphique du logiciel de commande du dispositif de fretting.....	45
Figure IV.5 : Forme des échantillons et des pions.....	46
Figure IV.6 : Cycle de fretting.....	48

Sommaire

Introduction générale.....	1
I Alliages d'aluminium de corroyage	
Introduction.....	2
I.1 L'aluminium.....	2
I.2 Principales caractéristiques de l'aluminium.....	3
I.3 Aluminium et alliages corroyés.....	4
I.4 Les différentes séries et leurs propriétés.....	4
I.5 La désignation des alliages de corroyage.....	7
I.5.1 Le système de désignation internationale à 4 chiffres.....	8
I.6 Traitements thermiques des alliages d'aluminium.....	10
I.6.1 Traitements d'homogénéisation.....	10
I.6.2 Traitements d'adoucissement.....	11
I.6.3 Traitement de trempe structurale.....	12
I.7 Utilisation des alliages d'aluminium.....	13
II Etude d'alliage d'aluminium série 6000	
II.1 Introduction.....	14
II.2 Caractéristiques des alliages d'aluminium série 6000.....	14
II.3 Les différents types de familles d'alliages 6000 et leurs applications..	17
II.4 Influence des éléments d'addition.....	17
II.4.1 Magnésium.....	19
II.4.2 Silicium.....	19

II.4.3 Cuivre.....	20
II.4.4 Fer.....	20
II.5 Les alliages Al-Mg-Si.....	21
II.5.1 Les alliages du type A-GS.....	23
II.5.2 Les alliages du type A-SG.....	23
II.6 Diagramme de phases AL-Mg-Si.....	23
II.7 Propriétés générales.....	27
II.8 Conclusion.....	28
 III Etude de l'usure des matériaux solides	
III.1 Généralités sur l'usure.....	29
III.2 Les principaux types d'usure.....	31
III.3 Usure due aux frottements entre corps solides.....	32
III.3.1 L'usure par glissement.....	33
III.3.2 L'usure par roulement.....	34
III.3.3 L'usure par frottement en petits débattement.....	34
III.4 Mécanismes d'usure.....	35
III.5 Lois d'usure.....	38
III.6 Grippage.....	40
III.7 Conclusion.....	40
 IV Techniques expérimentales de l'essai d'usure par frottement	
IV.1 Introduction.....	41
IV.2 Matériau utilisé.....	41

IV.2.1 Composition chimique.....	41
IV.2.2 Caractéristiques physiques.....	42
IV.3 Description et principe de fonctionnement du dispositif de fretting..	42
IV.3.1 Partie mécanique.....	42
IV.3.2 Partie électrique (commande et données d'acquisition).....	44
IV.4 Géométrie des échantillons et des pions.....	46
IV.5 Paramètres de fretting.....	47

Introduction générale

L'aluminium et ses alliages sont parmi les matériaux importants dans plusieurs secteurs, ils jouent un rôle primordial dans le développement industriel et les progrès technologiques, ils occupent le premier rang des matériaux non ferreux en matière de production et de consommation.

En raison de ses propriétés mécaniques et physicochimiques, l'aluminium peut être utilisé à l'état pur ou en état d'alliage (dont l'ajout contrôlé d'éléments comme le cuivre, le silicium, le titane, le chrome, le magnésium, le manganèse, le zinc etc...). Ses alliages sont nés pour modifier les caractéristiques et les domaines d'utilisation de l'aluminium.

Nous intéressons dans ce mémoire aux alliages d'aluminium de base Al-Mg-Si (série 6000) à cause de leurs caractéristiques importantes tels que , la bonne résistance à la corrosion, la faible densité et la bonne conductivité thermique et électrique etc....Ainsi de leur utilisation dans les différents domaines industriels et technologiques.

L'objectif de ce travail est l'étude des alliages d'aluminium de série 6000, et pour cela nous avons divisé le travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre est un rappel bibliographique de données numériques et techniques de l'aluminium et de ses alliages de corroyage.

Aussi, dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'étude théorique des alliages d'aluminium de série 6000 et leurs principales propriétés mécaniques et physicochimiques.

Le troisième chapitre concerne l'étude du phénomène d'usure par frottement des matériaux solides.

Le quatrième chapitre est consacré aux techniques expérimentales de l'essai d'usure par frottement et leur utilité pour la détermination des paramètres d'usure (coefficient de frottement, taux d'usure, état tribologique des matériaux solides).

Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion et des références.

Introduction :

Un alliage d'aluminium est une composition chimique où d'autres éléments sont ajoutés à l'aluminium pur afin d'améliorer ses propriétés. La principale raison est d'augmenter sa résistance mécanique. Ces éléments comprennent le fer, le silicium, le cuivre, le magnésium, le manganèse et le zinc à des concentrations combinées pouvant représenter jusqu'à 15% de l'alliage en poids. Les alliages sont identifiés par un numéro à quatre chiffres dans lequel le premier chiffre identifie une série caractérisée par ses principaux éléments d'alliage.

I.1 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.

L'aluminium est un élément du troisième groupe de la classification de Mendéléiev 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 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.

L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très réduites et insuffisantes pour son utilisation dans un nombre d'applications structurales, il est léger, ductile et il résiste à la corrosion. Il présente une très bonne conductivité thermique et électrique.

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 et à la production d'aluminium par électrolyse d'alumine dans la cryolithe (Na_3AlF_6) fondue, à environ 1000°C dans une cuve comportant un garnissage intérieur en carbone. L'aluminium industriel contient généralement 0.5% d'impuretés (principalement Fe+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, Cu.

A la température ambiante, l'aluminium forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 (alumine), épaisse 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.

I.2 Principales caractéristiques de l'aluminium :

L'aluminium a un bas point de fusion ($658^\circ C$), une ductilité élevée ($A\% \approx 40\%$), est assez léger (densité 2,7), a de bonnes propriétés électriques (conductivité égale à 60% de celle du cuivre), une bonne conductibilité thermique (5 fois celle des aciers), un coefficient de dilatation thermique 1,5 fois celui des aciers et des propriétés réfléchissantes

Sa structure cristalline est cubique à faces centrées (CFC) ($a = 0,404 \text{ nm}$ à T ambiante).

Le module d'élasticité de l'aluminium est $E =$ environ 70 GPa.

La limite élastique relative $Re / r = 25$ à 600 pour l'aluminium et 200 à 1600 pour les aciers.

Le module d'élasticité relatif $E/r = 26$ pour l'aluminium et l'acier.

Non toxique : Utilisé comme emballage alimentaire.

Il présente un bon rapport résistance/poids, ce qui explique les nombreuses applications dans le domaine des transports.

La résistivité électrique (environ $3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}$) câble d'Al (renforcé ou non par de l'acier) a détrôné le Cu pour le transport d'énergie

Les alliages ont une bonne résistance mécanique pouvant être modifiée par écrouissage ou par recuit (adoucissement).

Inconvénients : faibles résistances à l'usure et à la fatigue

Normes NF EN 485, 515, 573..

I.3 Aluminium et alliages corroyés :

Cette famille, la plus utilisée, comprend tous les produits laminés d'usage courant : barres, profilés, tôles, plaques, bandes ; les produits filés et étirés ; les fils ; les produits forgés ou destinés à la forge, etc. Sont exclus : les produits moulés, les lingots de refusions, les composites utilisant l'aluminium et ceux issus de la métallurgie des poudres. Les séries 1***, 3***, 5*** et la plupart des 4*** ne peuvent pas être traitées, sont dites non trempantes ou sans durcissement structural. Cependant, leurs caractéristiques peuvent être modifiées par écrouissage ("durcissement mécanique") ou par modification de la grosseur du grain. De plus, comme la solubilité des éléments d'alliage est faible dans l'aluminium à température ambiante, leur capacité de durcissement par mise en solution ou maturation est très limitée. Les séries 2***, 6*** et 7*** peuvent être traitées et sont dites températures ou avec durcissement structural. Bien qu'il soit possible d'avoir un bon rapport résistance/poids avec ces alliages, leur capacité à précipiter ou à se transformer reste modérée. De plus, en utilisation au-dessus de 175°C les traitements disparaissent.

I.4 Les différentes séries et leurs propriétés :

1) Série 1000(aluminium pur) :

Cette série ne peut pas être traitée thermiquement. La résistance à la traction varie de 69 à 186 N/mm². Elle a une excellente résistance à la traction dans un large domaine de température.

Comme ces alliages ont des propriétés mécaniques relativement faibles, ils sont rarement utilisés dans les constructions. Ils sont cependant utilisés en raison de leur résistance élevée à la corrosion et leur bonne conductibilité électrique.

Ces alliages sont soudés avec un métal d'apport en aluminium pur ou de la série 4000 (alliage de silicium)

2) Série de 2000 (alliage de Cu) :

Ces alliages peuvent être traités thermiquement. La résistance à la traction varie de 186 à 427 N/mm². Ce sont des alliages d'aluminium-cuivre (0.7-6.8%) à résistance élevée, souvent utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale. Certains de ces alliages sont considérés comme non soudable (fissurations à chaud et sensibilité à la corrosion sous tension). D'autres peuvent être soudés avec des procédés de soudage à l'arc quand on suit une procédure de soudage correcte. Comme métal d'apport, on utilise la série 2000 (si on exige la même résistance) ou la série 4000 (avec du silicium ou aluminium et cuivre) en fonction de l'application.

Certains alliages "non soudable" sont soudés avec succès avec le procédé friction stir.

3) Série 3000 (alliage de Mn) :

Ce sont des alliages aluminium-manganèse (0.05-1.8% Mn) la résistance maximale à la traction est de 110 à 283 N/mm².

Ce sont des alliages ayant une bonne résistance à la corrosion et une bonne capacité de mise en œuvre et peuvent être utilisés à haute température (casserolles,.....).

Ces alliages peuvent être soudés avec un métal d'apport de la série 1000 (déconseillés), la série 4000 et la série 5000, en fonction de la composition et de l'application

4) Série 4000 (alliage de Si) :

C'est la seule série qui contient des alliages susceptibles de durcissement par traitement thermique et non susceptibles de durcissement.

Ce sont des alliages aluminium-silicium (0.6-21.5 % Si) quand on allie du silicium à l'aluminium, on a un point de fusion plus faible et une meilleure fluidité à l'état fondu.

Ces propriétés souhaitables tant pour le soudage que pour le brasage .Quand on ajoute peu de silicium, l'alliage n'est pas susceptible de durcissement par traitement thermique.

Ces alliages avec des magnésiums ou du cuivre, en plus de silicium, peuvent être trempés après mise en solution.

Ces métaux d'apport ne peuvent être appliqués que quand la construction soudée est ensuite traitée thermiquement.

5) Série 5000 (alliage de Mg) :

Ce sont des alliages d'aluminium magnésium (0.2-6.2% Mn) ayant une résistance à la traction de 125 à 352 N/mm².ils ne sont pas susceptibles de durcissement par traitement thermique et ont la résistance la plus élevée ce groupe.

Ces alliages sont très soudables et peuvent donc être utilisés pour diverses applications. Ces alliages sont souvent soudés avec des métaux d'apport choisis sur base de la composition du métal de base et de l'application.

Les alliages de cette série ayant plus de 3% Mg ne peuvent être utilisés au-dessus de 65 °C car ils peuvent alors devenir sensibles à la corrosion sous tension. Les alliages ayant moins 2.5 Mg peuvent être soudés avec des métaux d'apport des séries 5000 et 4000 .avec plus de 2.5 Mg ,seule la série 5000 peut être utilisés comme métal d'apport avec une composition appropriée ou métal de base .

6) Série 6000(alliage de Mg-Si) :

Les alliages de cette série sont susceptibles de durcissement par traitement thermique.

La résistance à la traction varie de 125 à 400N/mm² .ce sont des alliages d'aluminium-magnésium-silicium qui sont utilisés dans des applications soudées .la plupart sont de produits extrudés .ces alliages sont sensibles a la fissuration à chaud doivent donc être soudés avec suffisamment de métal d'apport des séries 4000 ou 5000 peut être utilisés.

7) Série 7000 (alliage de Zn) :

Ce sont des alliages d'aluminium-zinc (0.8-12% Zn) susceptibles de durcissement par traitement thermique avec une résistance variant de 220 à 605 N/mm². Ils appartiennent aux alliages d'aluminium ayant la résistance la plus élevée comme pour la série 2000, certains sont considérés comme non soudables avec des procédés de soudage à l'arc, les autres bien. Les alliages soudables, comme par exemple les alliages 7000, peuvent être soudés avec des métaux d'apport de la série 5000.

I.5 La désignation des alliages de corroyage :

L'aluminium qui sort des salles de cuves est pur à plus de 99,5 %. Possédant peu d'applications pratiques, il présente déjà des propriétés recherchées comme la légèreté, la conductivité thermique et électrique en plus d'une excellente tenue à la corrosion. Cependant, il n'offre pas encore les propriétés mécaniques performantes tant prisées aujourd'hui.

C'est par l'ajout d'éléments d'alliage qu'on donne à l'aluminium les propriétés nécessaires à sa mise en œuvre, par exemple des alliages qui se soudent bien ou qui s'usinent bien. C'est aussi par l'ajout d'éléments d'alliage qu'on donne à l'aluminium ses qualités structurales qui permettent de construire un fuselage d'avion, une structure de TGV ou un immeuble qui résisteront au temps et à l'usage.

Les alliages d'aluminium sont divisés en deux grandes catégories : les alliages de fonderie, qui sont élaborés en tenant compte de leurs propriétés à l'état liquide afin de produire des pièces de fonderie saines, et les alliages de corroyage élaborés en tenant compte plus particulièrement de leur capacité à être mis en forme à l'état solide. Pour différencier un alliage d'un autre, il est important d'avoir un système normalisé.

Dans la première moitié du XXe siècle, la désignation des alliages se faisait surtout par compagnie productrice d'aluminium, parfois avec un système alphanumérique, d'autres fois avec des noms commerciaux. Au Canada, Alcan avait sa propre désignation à 5 chiffres, mais utilisait également la désignation alphanumérique du type « ##S ». Le célèbre avion Avro Arrow avait des pièces fabriquées en 75S et 79S, des alliages aéronautiques développés par l'Aluminium Company of America dans les années 40.

La désignation des alliages de corroyage tel qu'on la connaît aujourd'hui a été adoptée aux États-Unis en 1954, pour devenir la norme nationale américaine en 1957. Ce n'est qu'en 1970 que la désignation à 4 chiffres.

res de l'organisme américain Aluminium Association (AA) a officiellement été adoptée par les organisations signataires de la Déclaration d'accord sur un système de désignation internationale pour l'aluminium corroyé et ses alliages. Les organisations signataires de cet accord représentent une trentaine de pays. incluant la majorité des pays d'Europe, les États-Unis, le Canada, le Mexique, le Royaume-Uni, l'Afrique du Sud, le Brésil, l'Argentine, l'Australie, la Chine et le Japon. L'accord dicte la nomenclature des alliages et de leurs variantes, des compositions chimiques nominales pour chacun des alliages et l'enregistrement de nouveaux alliages commerciaux.

I.5.1 Le système de désignation Internationale à 4 chiffres :

2024, 6061, 7075,... Que signifient les 4 chiffres de ces alliages tant utilisés ?

Le 1er chiffre

Le 1er des 4 chiffres représente le groupe auquel l'alliage appartient. Ainsi, le premier « 7 » de 7075 indiquent que cet alliage fait partie de la famille dont le principal élément est le Zinc. Si plusieurs éléments d'un même alliage occupent la première position en pourcentage, l'appartenance à une famille d'alliage est établie selon l'ordre suivant : cuivre, manganèse, silicium, magnésium, la combinaison magnésium-silicium, zinc et autres. Le Tableau 1 présente les familles d'alliages par rapport à l'élément d'addition le plus important :

Chiffre	Signification
1	Désigne les aluminiums dont le pourcentage en aluminium est égal ou supérieur à 99,00 %
2	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le CUIVRE
3	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le MANGANÈSE
4	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le SILICIUM
5	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le MAGNÉSIUM
6	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le MAGNÉSIUM et SILICIUM*
7	Désigne les alliages dont le principal élément d'addition est le ZINC
8	Désigne les autres alliages d'aluminium

Tableau I.1 : signification du premier chiffre de la désignation internationale

Le magnésium et le silicium forment le composé intermétallique Mg_2Si qui est traité comme un élément d'alliage simple.

Le 2^{ème} chiffre :

Dans la famille « 1 », le 2^e chiffre identifie les nuances dans lesquelles certaines impuretés ont des teneurs contrôlées. En effet, à travers le processus de production de l'aluminium, certains éléments se retrouvent « naturellement » en petites quantités dans l'aluminium, ce sont ces éléments que l'on appelle « impuretés ». À cette position, le « 0 », comme dans l'alliage 1050, indique justement que les quantités d'impuretés sont dans les limites jugées « naturelles » à la sortie des cuves. Les chiffres de 1 à 9, à cette position, comme pour les alliages 1100 ou 1350, indiquent que la teneur d'une impureté ou d'un élément d'alliage a fait l'objet d'un contrôle spécial.

Dans les familles 2 à 8, le 2^e chiffre de la nomenclature est réservé aux modifications successives de la composition chimique de l'alliage pour en améliorer les propriétés. Par exemple, la composition de l'alliage 2024 a été enregistrée en 1954, l'alliage modifié 2124 en 1970, l'alliage 2224 en 1978 et ainsi de suite, chaque altération restant dans les limites permises par la norme.

NO	Date	Silicium (Si)	Fer (Fe)	Cuivre (Cu)	Manganèse (Mn)	Magnésium (Mg)	Chrome (Cr)	Nickel (Ni)	Zinc (Zn)	Titane (Ti)	Autres		Aluminium minimum
											Chaque	Total	
2024	1954	0,50	0,50	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2124	1970	0,20	0,30	3,8-4,9	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2224	1978	0,12	0,15	3,8-4,4	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2324	1978	0,10	0,12	3,8-4,4	0,30-0,9	1,2-1,8	0,10		0,25	0,15	0,05	0,15	reste
2424	1994	0,10	0,12	3,8-4,4	0,30-0,6	1,2-1,6			0,20	0,10	0,05	0,15	reste
2524	1995	0,06	0,12	4,0-4,5	0,45-0,7	1,2-1,6	0,05		0,15	0,10	0,05	0,15	reste

Tableau I.2 : Modifications successives de l'alliage 2024*

Les 3e et 4e chiffres

Dans la famille « 1 », les 2 derniers chiffres indiquent le pourcentage en aluminium au-delà de 99 %. Ainsi, l'alliage 1050 est un alliage qui contient au moins 99,50 % d'aluminium dans sa composition. Dans les familles 2 à 8, les 2 derniers chiffres n'ont aucune signification particulière et servent seulement à identifier les différents alliages dans leur groupe.

I.6 Traitements thermiques des alliages d'aluminium:

Les alliages d'aluminium susceptible de durcissement structural, alors que le dernier traitement est très important et très spécifique.

I.6.1 Traitements d'homogénéisation:

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 (par fois à tiède). Il est défini par la réduction de section $[(S-s)/S] \cdot 100$. Cette expression doit remplacer celle du taux d'écrouissage qui correspond au rapport : $[(S-s)/S] \cdot 100$.

I.6.2 Traitements d'adoucissement:

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 joints 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.6.3 Traitements de trempe structurale:

Principe :

Le traitement de trempe structurale 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.

Traitement industriel de trempe structurale :

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 $T_s - T_l$ n'est pas important. Il faut en particulier éviter d'atteindre la température de brûlure pour laquelle l'alliage commence à fondre aux joints de grains. La régénération de l'alliage par traitement thermique ou mécanique est alors impossible. Pour éviter la brûlure due à la ségrégation mineur on évite de dépasser la température T_E (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.

I.7 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.

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.

Les alliages AA6111, développée par Alcan en 1983, ont été choisis pour les applications des panneaux de revêtements dans les usines de l'Amérique du nord parce qu'ils ont une combinaison de bonne formabilité et du potentiel élevé de renforcement.

Récemment, les alliages de la série 6XXX sont aussi utilisés pour les applications aérospatiales.

II.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous avons parlés de façon générale sur la série 6000 utilisant le magnésium et le silicium (Al-Mg-Si) avec et sans cuivre (Cu). Ces s alliages peuvent être obtenus par corroyage, ils renferment des éléments d'ajout en faibles quantités susceptibles aux traitements thermiques, d'où leur appellation alliages à durcissement structural. Leurs propriétés sont largement déterminées par la prédominance de la phase Mg₂Si.

II.2 Caractéristiques des alliages d'aluminium série 6XXX :

Les éléments d'addition les plus importants de la série 6000 sont le magnésium et le silicium. Ils sont d'une grande importance industrielle. Leur durcissement est dû à la précipitation des formes transitoire de composé Mg₂Si. Ils ont une très bonne aptitude à la mise en forme à froid et à la déformation. Ils présentent un bon comportement aux basses températures mais une résistance à chaud limité, aussi un bon niveau de caractéristiques mécaniques. Ils résistent bien à la corrosion atmosphérique et ils ont de beaux aspects de surface après avoir subi le brillantage

Les alliages de la série 6000 sont classés en deux catégories :

La première c'est là où les compositions sont plus chargée en magnésium et silicium (6061, 6082 par exemple). Ils ont des applications diverses tels que les structures (charpente, pylône...), en aéronautique, en électricité et en électronique.

la deuxième, catégorie moins chargée en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. Par exemple, l'alliage 6060, sous le procédé de filage aura des caractéristiques mécaniques plus faibles. Utilisé en décoration, ameublement et menuiserie métallique. Il faut également noter l'existence du 6101 anciennement appelé Almelec (tableau II.8). A cause de sa bonne conductivité électrique, il est utilisé pour pour la fabrication de lignes moyenne et haute tension en France.

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr + Ti	Autres chaque	Autres total	Al
6060	Min.	0,03	0,10	/	/	0,35	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0,60	0,30	0,10	0,10	0,60	0,05	/	0,15	0,10	/	0,05	0,15	
6082	Min.	0,70	/	/	0,40	0,60	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	1,30	0,50	0,10	1,00	1,20	0,25	/	0,20	0,10	/	0,05	0,15	
6101	Min.	0,30	/	/	/	0,35	/	/	/	/	/	/	/	le reste
	Max.	0,70	0,50	0,10	0,03	0,80	0,30	/	0,10	/	/	0,05	0,15	

Tableau II.1 : composition des alliages 6060-6082-6101

Les concentrations sont en pourcentage massique.

/	6060	6082
Masse volumique (g/cm ³)	2,70	2,71
Intervalle de fusion	615-655	570-645
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23,4	23,5
Module d'élasticité (MPa) (1)	69 500	69 500
Coefficient de Poisson	0,33	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	État T5 : 200	État T6 : 174
Résistivité à 20 °C (μΩ cm)	État T5 : 3,3	État T6 : 4,2
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	945	935
Limité d'élasticité R _{P0.2} (MPa)	110 (2)	240 (3)
Limité à la rupture R _m (MPa)	150 (2)	300 (2)
Allongement (%)	14 (2)	8 (3)

Tableau II.2 : Caractéristiques physiques

- (1) Moyenne des modules de traction et de compression
- (2) Barre étirée état T5 diamètre inférieur à 100 mm
- (3) Barre étirée état T6 diamètre compris entre 60 et 150 mm.

II.3 Les différents types de famille d'alliage série 6000 et leurs application :

Les courantes nuances sont 6005, 6105, 6060, 6061 et 6082.

L'alliage **6005A** est utilisé en menuiserie aluminium. Comme l'alliage **6105 T5**, il doit posséder une petite dose de chrome et de manganèse. Ces petites portions permettent de doubler la ténacité.

L'alliage **6060** (A-GS) est un bon alliage de filage . Il est utilisé comme tubes filés, de profilés dans la menuiserie métallique. Il peut être filé à grande vitesse et il est apte aux traitements de surface telle que l'anodisation. Ces caractéristiques mécaniques sont moyennes et inférieures à celles des séries 2000 et 7000 et suffisantes pour les applications prévues. Les alliages de la série 6000 sont soudables.

L'alliage **6061 T4, T6 ou T651** (T651=durci par traitement thermique : mise en solution, revenu et tractionné) est un alliage de structure de force moyenne (310 MPa à l'état T6), utilisé notamment dans l'aéronautique avec un large éventail de caractéristiques mécaniques, une bonne tenue à des températures basses (-196°), une bonne soudabilité et une bonne résistance à la corrosion.

L'alliage **6082 T6** est un alliage fort de structures pour applications dans le transport (automobile, ferroviaire), le bâtiment (charpentes, les échafaudages...), les biens d'équipements (mobilier urbain, pylônes...). Cet alliage est apprécié pour son aptitude à être anodisé, sa soudabilité, sa stabilité dimensionnelle et sa tenue à l'eau de mer. Les alliages de structures sont concurrents aux aciers à cause des caractéristiques mécaniques élevées de 320 à 340 MPa à l'état T6.

II.4 Influence des éléments d'addition .:

La résistance mécanique de l'aluminium pur est relativement faible et interdit son emploi pour certaines applications. Cette résistance mécanique peut être notablement augmentée par l'addition d'autres métaux, formant ainsi des alliages. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- Les alliages sans durcissement structural (alliages non trempant),
- Les alliages à durcissement structural (alliages trempant).

Cette différence entre alliages est due à l'élément d'addition principal, quelle que soit sa teneur. Il n'y a rarement qu'un seul élément ajouté (élément principal). Des additions d'autres éléments secondaires vont aussi influencer sur les caractéristiques de l'alliage. Il y a enfin des éléments présents dans l'alliage sans qu'ils aient été ajoutés volontairement ; ce sont les impuretés dont les plus importantes sont le fer et le silicium, et dont il faut contrôler précisément la teneur pour certaines utilisations car leur influence peut être défavorable [34].

Tous les éléments jouent, par leur nature et leur teneur, sur plusieurs propriétés de l'alliage comme :

- les caractéristiques mécaniques (charge de rupture R_m , limite élastique $R_{p0.2}$, l'allongement à la rupture $A\%$, la dureté HB),
- la masse volumique,
- les conductivités électrique et thermique,
- la résistance à la corrosion,
- l'aptitude au soudage,
- l'usinabilité,
- l'aptitude à la déformation,
- l'aptitude à l'anodisation [34].

Les nouveaux alliages ainsi formés sont soit plus résistants, plus ductiles, plus durs, etc. selon le choix. Toutefois, pour obtenir précisément ce que l'on veut, il faut savoir quel élément fait quel effet.

II.4.1 Magnésium:

Le magnésium constitue la base 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 %.

Les alliages binaires Al-Mg sont largement utilisés dans des applications qui requièrent un bon fini de surface, une bonne résistance à la corrosion et une combinaison intéressante de résistance, de ductilité et d'usinabilité. La composition en magnésium de ces alliages varie de 4 à 10 % et les compositions contenant plus de 7 % en magnésium peuvent subir un traitement thermique. L'instabilité et les 18 caractéristiques de vieillissement de ces alliages à la température de la pièce nous obligent à leur faire subir un traitement thermique.

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 intergranulaire. Finalement, selon Morgan¹⁷ l'ajout de magnésium peut augmenter la micro dureté de la matrice d'aluminium de 100 à 115 KHN (dureté Knoop).

II.4.2 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.

En général, la proportion optimale de silicium est déterminée par la procédure de mise en forme. Pour une procédure nécessitant un taux de refroidissement lent (moule de sable ou de plâtre - réfractaire), une proportion de 5 à 7 % est recommandée; 7 à 9 % pour un moulage permanent et 8 à 12 % pour un moulage sous pression. Ces recommandations sont fondées sur la relation reliant le taux de refroidissement, la fluidité et les effets du pourcentage de la phase de silicium eutectique sur le front de l'écoulement du métal liquide. L'addition de silicium réduit également la densité de l'alliage ainsi que le coefficient d'expansion thermique. Sa présence avec le magnésium forme le Mg_2Si rendant l'alliage convenable aux traitements thermiques.

II.4.3 Cuivre:

Cet élément forme avec l'aluminium le $CuAl_2$ 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.

II.4.4 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.

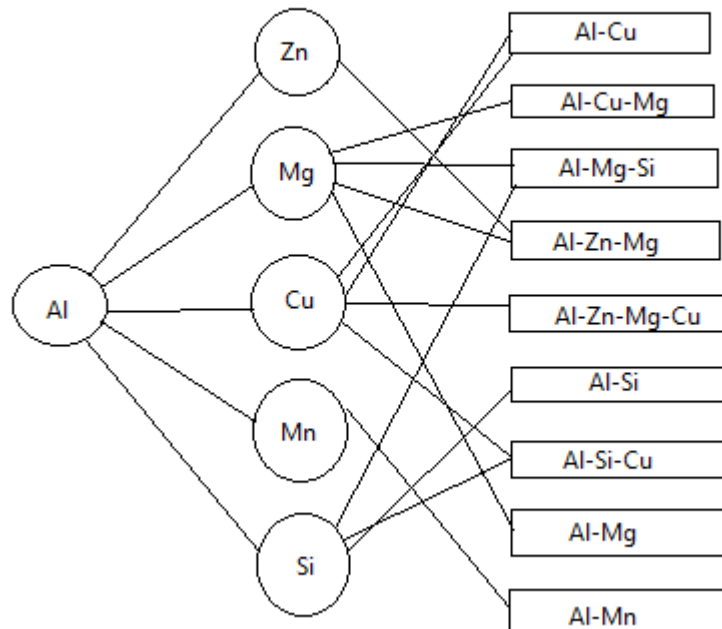


Figure II.1 : Principaux alliages d'aluminium

II.5 Les alliages Al–Mg–Si:

Les alliages Al–Mg–Si sont des alliages à solution solide type $\text{Al-Mg}_2\text{Si}$, série 6000, appartiennent à la catégorie des alliages corroyés à durcissement structural. Les éléments d'alliage de cette série sont le magnésium (Mg) et le silicium (Si), cette famille d'alliage à une grande importance industrielle. Leur livraison se fait après homogénéisation, trempe et vieillissement naturel. La famille des alliages Al-MgSi-Cu est formée lorsque le cuivre est ajouté à la série 6000, ou réciproquement, quand le silicium est ajouté aux alliages Al-Cu-Mg de la série 2000. Les alliages Al-Mg-Si sont largement utilisés comme des alliages structuraux de moyenne résistance qui allient les avantages suivants : une bonne formabilité, une bonne soudabilité et une résistance remarquable à la corrosion.

Leurs caractéristiques mécaniques sont moyennes et peuvent être améliorées par addition de silicium qui formera avec le Mg, le précipité durcissant Mg_2Si . Ils présentent une bonne résistance à la corrosion notamment atmosphérique. Ils se soudent très bien (souder à l'arc ou brasure) par rapport à d'autres alliages (ex : série 7000). On peut les classer en deux groupes :

Un groupe dont les compositions sont plus riches en magnésium et silicium tel que les alliages 6061 et 6082, qui sont utilisés pour des applications de structure (charpente, pylône...).

Une deuxième catégorie renferme une faible teneur en silicium qui par conséquent aura des caractéristiques mécaniques plus faibles tel que le cas du 6060 qui permettra de grandes vitesses de filage mais qui aura des caractéristiques mécaniques plus faibles.

Le diagramme de phase obtenu à l'équilibre peut être relativement simplifié si on le considère comme étant binaire c'est à dire : aluminium et Mg_2Si .

La température de cet eutectique appelé pseudo binaire est de 595 °C. La composition du liquide eutectique est de 8,15 % poids Mg et de 4,75 % poids Si en équilibre, avec une solution solide d'aluminium contenant 1,13 % poids Mg et 0,67 % poids Si (pour un total d'environ 1,85 % poids Mg_2Si).

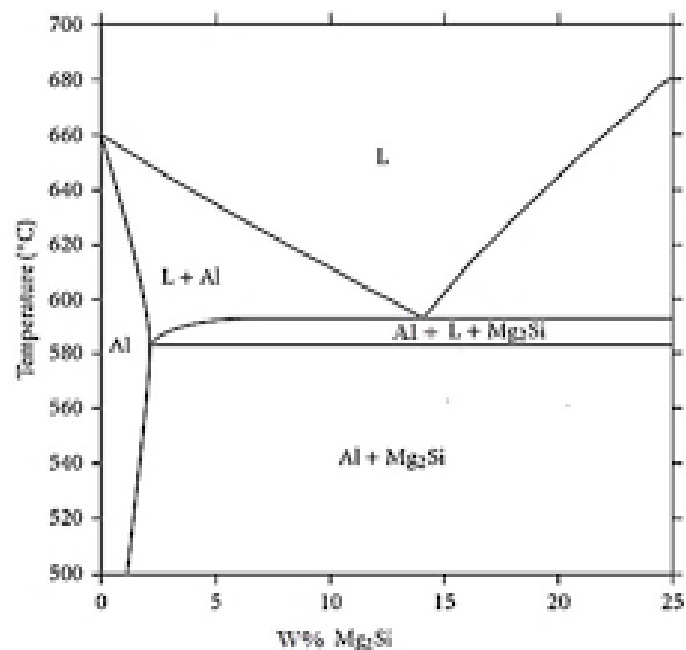


Figure II.2: Partie du diagramme d'équilibre Aluminium-Mg₂Si

Les alliages de la série 6000 ont une très bonne aptitude à la transformation à chaud, à froid, un bon comportement aux basses températures et une très bonne résistance à la corrosion. Mais leur résistance à chaud est limitée.

II.5.1 Alliages du type A-GS:

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 \leq 0.3 et les autres impuretés limitées au maximum, qui est utilisée.

II.5.2 Alliages du type A-SG:

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.

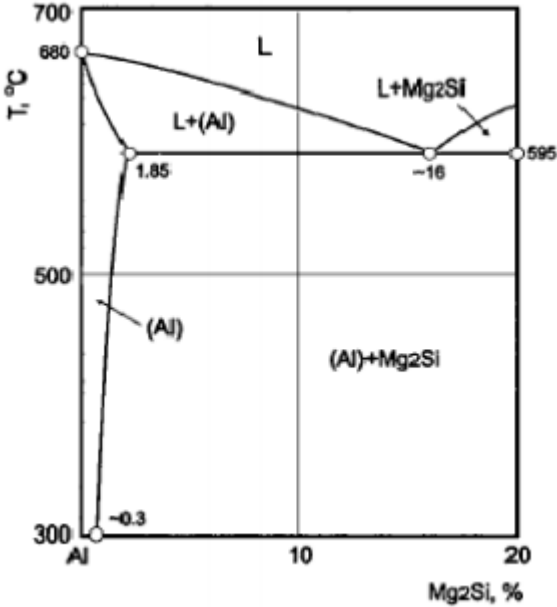
Les principaux alliages normalisés sont l'alliage 6005 A (A-SG 0.5), 6081 (A-SGM 0.3) ou 6082 (A-SGM 0.7).

II.6 Diagramme de phases Al-Mg-Si :

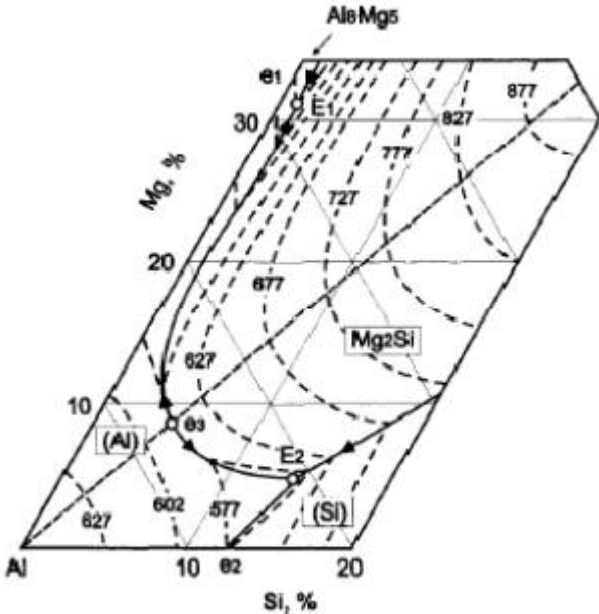
Le diagramme de phase Al-Mg-Si peut être utilisé pour analyser de nombreux alliages corroyés de la série 6000 et quelques alliages de fonderie [4]. La connaissance de ce diagramme de phases est aussi fondamentale pour l'analyse de la majorité des systèmes d'alliages contenant les éléments Mg et Si, en particulier les systèmes Al-Cu-MgSi et Al-Fe-Mg-Si. Dans la partie coin du système (figure I.1. a, b), les phases $Al_8Mg(Si)$ et Mg_2Si sont en équilibre avec la solution solide d'Aluminium [5]. La pseudo section entre Al et Mg_2Si présentée sur la figure I.1 d correspond au rapport de concentration Si Mg : 1.7 % en poids.

Cette section divise le diagramme en deux simples systèmes d'eutectiques types Al-Mg-Mg₂Si et Al-Si-Mg₂Si. Les réactions eutectiques invariantes qui se produisent dans les alliages ternaires sont données au tableau I.1 Dans la plupart des alliages commerciaux appartenant à ce système, l'aluminium est principalement solidifié (figure I.1a) et puis un des eutectiques binaires est formé dans l'intervalle de température donnée au tableau I.3. Les eutectiques binaires et ternaires, supposant la phase Al₈Mg₅, peuvent se solidifier en alliages commerciaux donnés dans le tableau I.1, uniquement dans les conditions hors équilibre. Les alliages 356.0 et 512.0 en état de coulée et état traité sont toujours hétéro phases (figure I.1.b); la phase excessive étant le silicium dans le premier alliage et la phase Mg₂Si dans le deuxième alliage. Comme il en découle des frontières de surface de solidus, la plupart des alliages (figure.I.1 c) de la série 6000 (tableau I.2) contenant un faible teneur en fer peuvent se transformer complètement en état monophasé pendant l'homogénéisation. Malgré, la basse solubilité comparativement du magnésium et du silicium dans la solution solide d'aluminium, elle permet un effet significatif de durcissement par précipitation suite à la formation des phases intermédiaires (β'' et β') et de la phase d'équilibre Mg₂Si pendant le vieillissement. Les précipités contenant l'aluminium en plus du magnésium et du silicium, et la phase cohérente β'' contiennent un excès de silicium dont la composition stœchiométrique possible est Mg₅Si₆ [6]. La solubilité solide mutuelle du magnésium et du silicium en (Al) dépend fortement de la température, qui exige un contrôle strict du cycle de traitement thermique. Des nombreux récents travaux ont montré que la composition des précipités métastables diffère de celle de la phase d'équilibre. Dans les alliages de la série 6000, les deux éléments peuvent être présents en excès selon le rapport Si Mg, même dans l'intervalle de composition d'un seul alliage.

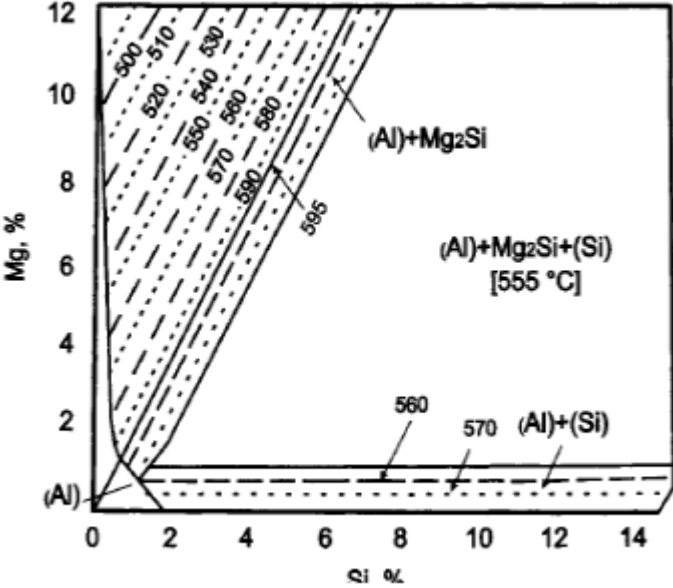
(a)



(b)



(c)



Bonne aptitude au soudage.

Bon comportement aux basses ou très basses températures mais résistance à chaud limitée à partir de 150 à 200 °C suivant la durée du maintien à chaud (par exemple, 150 °C pour une durée supérieure à 10 000 h, 175 °C pour une durée d'une centaine d'heures, 200 °C pour une durée de quelques heures)

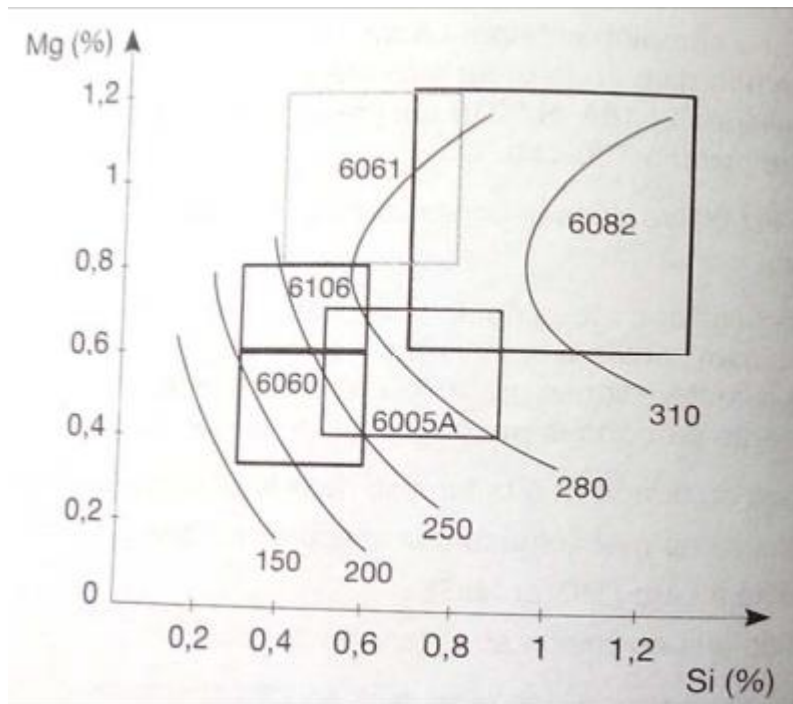


Figure II.4. Alliage de la famille 6000. courbe d'iso charge de rupture Rm

II.8 Conclusion :

L'Aluminium présente donc une grande variété d'alliages répondant ainsi à une multitude d'applications. Ces applications sont dominées par les impératifs suivants : résistance à la corrosion, légèreté, résistances mécaniques correctes. La légèreté notamment lui offre des débouchés dans l'automobile et les transports en général. Cependant, la concurrence des matières plastiques sur les composants non sollicités en température est active. Un des inconvénients de l'Aluminium est ses relativement faibles propriétés mécaniques. Il existe des techniques de durcissement pour les renforcer. Nous allons étudier ces techniques en nous limitant à celles par traitements thermiques et/ou mécaniques. Sont donc exclues de cet exposé, les techniques par mise en solution solide d'autres éléments, l'affinage du grain et les composites.

III.1 Généralités sur l'usure:

L'usure est un phénomène résultant de l'endommagement des surfaces en contact, associé à un frottement souvent élevé. Le frottement est le phénomène qui s'oppose au mouvement d'une surface par rapport à une autre.

Le frottement se présente sous plusieurs aspects :

- **Mécanique** : l'effort tangentiel en sens inverse du déplacement ;
- **Géométrique** : pertes des côtes.
- **Énergétique** : perte de puissance qui se traduit par une diminution du rendement.

Vers 1500 Léonard de Vinci s'est intéressé à l'étude de la mécanique, pratiquement abandonnée depuis l'époque des grecs antiques. Ses recherches sur les mouvements l'ont amené à pressentir les notions d'inertie, de moment, de rendement, de frottement, de centre de gravité.

Les lois fondamentales de Léonard de Vinci, qui furent redécouvertes deux siècles plus tard par Amontons, s'énoncent ainsi :

· la force de frottement est proportionnelle au poids du corps déplacé sur le plan horizontal et, plus généralement, à la charge normale appliquée à la surface ; le facteur de proportionnalité étant appelé coefficient de frottement μ

- elles sont indépendantes de l'aire apparente de contact des surfaces en présence,
- elles dépendent des matériaux et de l'état de leurs surfaces.

Les lois de Léonard de Vinci et de Guillaume Amontons ont été complétées par Coulomb qui, remarquant la différence réelle mais souvent légère des efforts de frottement statique et dynamique, a admis qu'en outre :

- les forces de frottement sont pratiquement indépendantes de la vitesse de glissement des surfaces.

La surface d'un matériau est le siège des interactions entre le matériau et L'environnement

Pour comprendre les phénomènes d'usure nous devons savoir ce qui se passe à la surface du matériau.

En tribologie, la surface ne se limite pas uniquement à la notion d'aire d'appui des corps, mais concerne plus généralement les éléments de contact qui jouent un rôle sur le frottement, c'est à dire sur les contraintes mécaniques, les températures, le comportement du troisième corps (lubrifiant, débris d'usure...). Ces éléments sont les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des matériaux en présence, les caractéristiques géométriques incluant, par extension, la forme des pièces.

La surface d'un système tribologique (deux corps qui sont en contact) a les caractéristiques suivantes :

- le matériau lui - même n'est ni homogène, ni isotrope à l'échelle microscopique : les matériaux métalliques usuels sont poly cristallins et parfois bi - ou polyphasés. Les impuretés, les joints de grains, les defaults cristallins, parfois des fissures ou microfissures sont présentes à surface comme au cœur du matériau. Toutes ces caractéristiques ont une incidence majeure aussi bien sur les propriétés mécaniques que sur les propriétés chimiques des surfaces.
- à la surface d'un matériau, il faut considérer qu'il existe, avant l'application du frottement, sur une épaisseur variable de quelques micromètres ou dizaines de micromètres, une couche écrouie résultant de la mise en forme ou des sollicitations mécaniques subies en service dans le cas des composants d'une structure ou d'un système mécanique. La structure métallurgique et les propriétés mécaniques de la couche écrouie peuvent être très différentes des celles du matériau sous-jacent
- de plus, la surface d'un matériau n'est jamais complètement inerte par rapport au milieu au contact où elle se trouve. Des réactions chimiques peuvent avoir lieu, par exemple pour les métaux, une oxydation conduisant à la formation d'une couche de composition chimique et des propriétés mécaniques très différentes des celles de la couche sous-jacente et dont l'épaisseur peut être très faible (couche de passivation des métaux : 5 - 50 nm) ou devenir très importante (couche de rouille sur les surfaces) suivant la nature du couple métal et de la température.

III.2 Les principaux types d'usure:

Les principaux types d'usure sont classés d'après les phases de contact, les interactions mécaniques et l'importance relative des effets mécaniques et chimiques.

On distingue deux catégories principales d'usure :

- L'usure due aux frottements entre corps solides.
- L'usure due aux impacts et aux fluides (érosion)

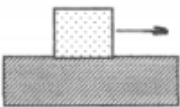
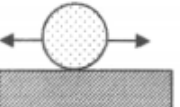
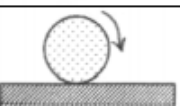
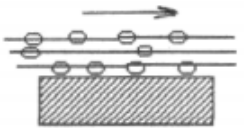
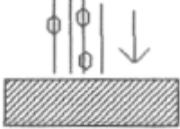
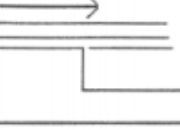
Type d'usure	Type de contact	Mécanismes Prédominants	Nom
Usure due au frottement entre solides.		Mécanique Chimique	Usure par glissement Usure par corrosion
		Mécanique Chimique	Usure par frottement Usure-Frottement
		Mécanique Chimique	Usure par roulement Usure par corrosion
Usure due aux impacts et aux fluides		Mécanique Chimique	Usure par érosion Corrosion - Erosion
		Mécanique Chimique	Usure par impact Corrosion impact
		Mécanique Chimique	Usure par cavitation Corrosion - Cavitation

Figure III1: types d'usure

III.3 Usure due aux frottements entre corps solides:

Le frottement entre corps solides, dissipe de l'énergie et use les surfaces en contact. L'étude de ces phénomènes appartient au domaine de la tribologie qui étudie les aspects scientifiques et technologiques liés au frottement, à la lubrification et à l'usure des matériaux. Actuellement il n'existe aucune relation claire entre le coefficient de frottement déterminé expérimentalement et la tenue à l'usure. Le processus d'usure peut, en effet, être introduit si seulement les cinq éléments de base, désignés ci-dessous, agissent l'un avec l'autre (figure 2).

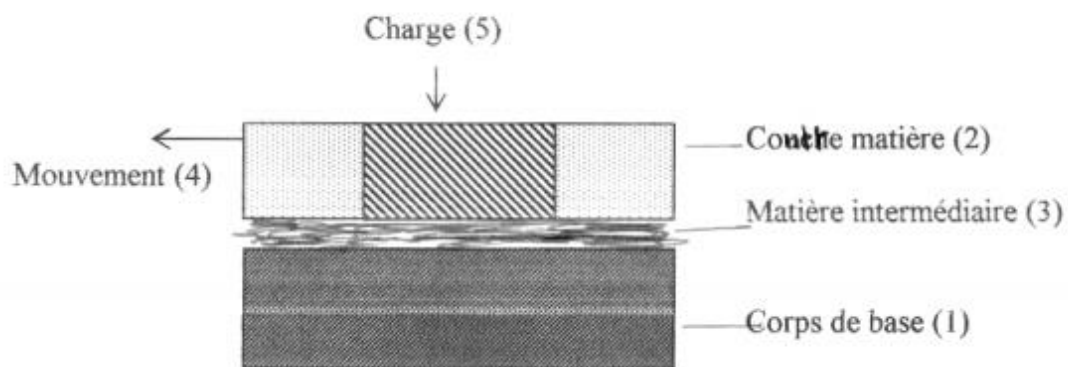


Figure III .2 : Processus d'usure

1. Le corps de base : c'est un corps solide (corps de frottement) caractérisé par son type, la teneur en éléments alliés, la rugosité, la dureté de la surface, la profondeur de dureté, la résistance, la structure et la température.

2. La contre-matière : c'est un corps de frottement pouvant se présenter à l'état solide, liquide et gazeux. La contre matière solide est caractérisée par les mêmes caractéristiques que le corps de base, tandis que liquide et gazeux, sont caractérisés par le type, la pression, la température et les impuretés.

3. Matière intermédiaire : peut-être solide (corps d'usure), liquide (lubrifiant) et gazeux (air). Dans le cas de l'usure de corps de base métalliques sous l'action de matières minérales, il est important de différencier, si ces minéraux agissent comme contre-matière, comme c'est le cas de broyeur à mâchoire (concasseur) ou si ces minéraux agissent comme matière intermédiaire comme, par exemple dans le cas des points encrassés de paliers.

4. La charge : c'est un facteur important dont dépend le processus d'usure. La charge peut être constante, oscillante ou par chocs. Elle peut être uniforme ou non uniforme.

5. Le mouvement : on différencie généralement trois types de mouvement relatifs entre les forces en contact.

- Le glissement.
- Le roulement.
- Le frottement en petits débattements.

Comme la charge et le mouvement sont liés, l'un avec l'autre, on peut citer l'exemple suivant. Dans les chaînes des autochenilles ou excavateurs, l'on se pose la question, si on doit choisir des boulons avec un grand ou petit diamètre afin d'éviter une grande usure entre les boulons et les maillons de la chaîne. Si on considère la charge appliquée, on doit choisir un grand diamètre, afin de maintenir la pression de la surface petite, mais des essais pratiques ont démontrés qu'avec l'utilisation d'un grand diamètre l'usure est très grande à cause de la distance de glissement qui est grande. Dans ce cas l'influence du mouvement prédomine sur l'influence de la charge.

III.3.1 L'usure par glissement

Elle se produit lorsque les surfaces de deux solides glissent l'une sur l'autre (fig. 72), qu'il y ait ou non de particules abrasives ou un lubrifiant entre elles. Ce type d'usure a fréquemment lieu dans les machines et les appareils dont certaines parties sont en mouvement. Dans un moteur à explosion, par exemple, quand les segments du piston glissent sur la paroi du cylindre il se forme une usure. Lorsque les effets chimiques prédominent, on parle d'usure-corrosion. :

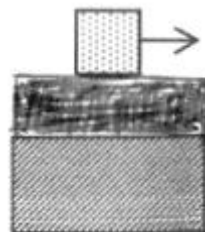


Figure III.3 : Usure par glissement

III.3.2 L'usure par roulement

Elle correspond au roulement d'une bille ou cylindre sur une surface solide (fig. 73), ce phénomène est responsable de la dégradation des paliers et roulements à billes de toutes sortes. Comme dans le cas précédent, on parle d'usure-corrosion, si les effets chimiques prédominent.

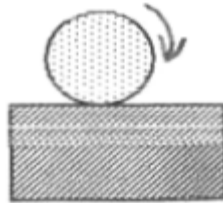


Figure III.4 : Usure par roulement

:

III.3.3 L'usure par frottement en petits débattements :

Elle désigne une altération due à des mouvements alternatifs de hautes fréquences et de faibles amplitudes, (fig.5). De tels mouvements proviennent notamment des vibrations émises par une machine ou une installation. Il n'existe pas de limites bien définies entre l'usure par frottement en petits débattements et l'usure par glissement. Dans les deux cas, les surfaces glissent l'une sur l'autre. Cependant, lors du frottement en petits débattements, les débris d'usure ne sont pas évacués du contact. Ils peuvent donc agir comme abrasif. En plus la chaleur ne se dissipe que difficilement, et la déformation plastique des aspérités de surface subit une inversion à chaque demi-cycle, ce qui peut provoquer une dégradation par fatigue. Toutes ces différences peuvent influencer la vitesse d'usure, justifiant ainsi la distinction entre l'usure par glissement et l'usure par frottement en petits débattements. Si les effets chimiques sont importants, on parle de corrosion-frottement.

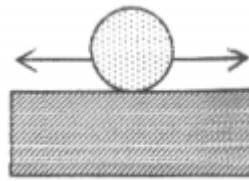


Figure III.5 : Usure par frottement en petits débattements

La grande importance technique se trouve dans l'usure de glissement et de roulement.

III.4 Mécanismes d'usure:

On distingue généralement quatre mécanismes d'usure.

- Adhésion, formation de jonctions adhésives puis arrachement de métal.
- Abrasion ou labourage par des aspérités ou des particules abrasives.
- Délaminage, croissance de fissures sous la surface suivie d'une rupture par fatigue.
- Oxydation ou enlèvement de matière oxydée

1. Usure abrasive:

L'usure abrasive est définie comme étant l'usure par déplacement de matière, produite par des particules dures ou des protubérances dures. Les particules dures peuvent se trouver encastrées dans l'une des surfaces (voir Figure 6) ou être entre les deux surfaces en mouvement relatif (voir Figure 6).

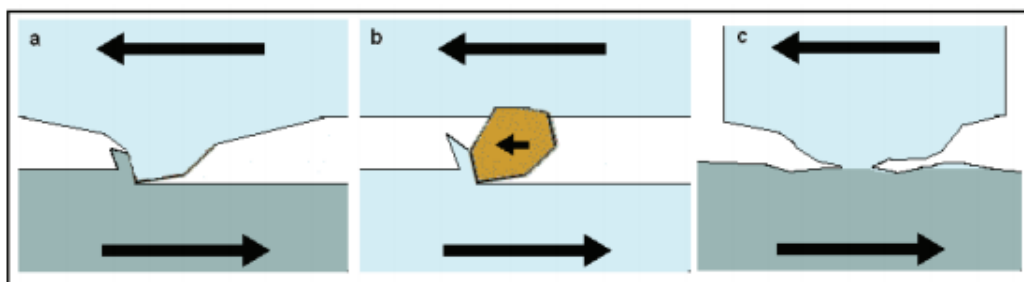


Figure III.6: Mécanisme d'usure abrasive à deux corps, d'usure abrasive à trois corps et d'usure adhésive

Les surfaces endommagées par abrasion présentent des sillons de profondeur variable, parallèles au déplacement. L'usure est assez constante au cours du temps, le volume des débris croît linéairement avec la charge appliquée et la distance parcourue.

La perte de matière dépend à la fois du matériau usé et de l'antagoniste, et l'aspect des sillons fournit de précieuses indications :

- s'ils sont brillants et très peu profonds, les aspérités de la pièce antagoniste ont raclé les couches d'oxydes,
- s'ils sont isolés, et brusquement interrompus, des particules dures introduites entre les surfaces sont plus ou moins incrustées,
- s'ils sont interrompus et rayent la pièce dure, des particules abrasives sont enchâssées dans la pièce tendre,
- s'ils sont interrompus et marquent la pièce tendre, la pièce antagoniste plus dure est trop rugueuse.

La dureté et la ductilité d'un matériau jouent un rôle important sur sa résistance à l'usure abrasive. Pour créer un sillon ou une rainure, il suffit que la dureté de l'antagoniste soit seulement de 20 % supérieure à celle de la surface rayée. Quant à la ductilité, elle caractérise l'aptitude du matériau à se déformer sans décohésion c'est à dire sans émission des débris.

Mais bien d'autres paramètres jouent un rôle et l'abrasion est un processus dans lequel interviennent la géométrie des pièces en contact, la topographie de leurs surfaces (hauteur et forme des rugosités), les caractéristiques mécaniques et métallurgiques des matériaux (fragilité, élasticité, plasticité..), les caractéristiques physico chimiques résultant de l'environnement.

2. Usure par adhésion :

Le mécanisme d'adhésion (voir Figure 6) est une usure par transfert de matière d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase solide.

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement, par soudage en phase solide. Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

- Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.
- Si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme de particules qui, écaillées et oxydées, peuvent contribuer à l'adhésion.

On sait calculer ou mesurer la force d'attraction entre deux matériaux mais pas la force de décohesion une fois le contact établi. La séparation par décohesion ne se fait pas d'un coup mais se propage comme une fissure ; le frottement vient de la force requise pour cisailier les jonctions.

3. Usure par fatigue :

L'endommagement des surfaces par fatigue de contact se manifeste lorsque les couches superficielles sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage des fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique. Les dégradations apparaissent sous forme des piquûres, fissures, écaillage et s'accompagnent des modifications structurales. Les avaries par fatigue ou petits débattements se rattachent à ce type de mécanisme.

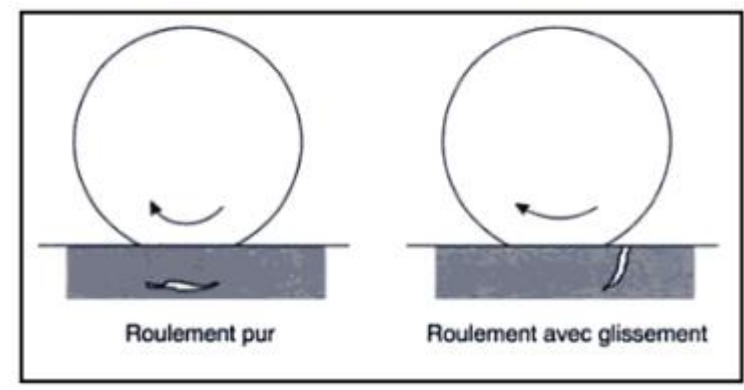


Figure III.7 : Mécanisme d'usure par fatigue

Sous l'effet d'un roulement pur, en raison de la localisation du point d'Hertz, on observe des fissures parralles à la surface (contraintes de cisaillement maximales) ; en présence d'un glissement, on observe des fissures superficielles perpendiculaires à la surface (contraintes de traction maximale, voir Figure 7)

4. Usure – corrosion :

Ce type d'usure intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif. L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. Ce phénomène sera détaillé par la suite. Il n'est pas évident de trouver une bonne illustration des faciès caractéristiques de ce phénomène, mais d'une manière générale, il faut chercher sur les faciès l'indice d'une activité de la corrosion. En 1976, Eyre a estimé les pourcentages pour les différents types d'usure dans l'industrie : l'usure par abrasion (+ usure par érosion) 58%, l'usure adhésive (+ usure par petits débattements) 23%, l'usure par fatigue de surface 14%, l'usure-corrosion 4%. Il semble que les usures d'origine adhésive ou abrasive soient les plus fréquentes. En pratique, il convient toutefois de noter ici que les faciès d'usure observés expérimentalement présentent souvent des caractéristiques mixtes et qu'il n'est pas toujours évident de définir quelle forme d'usure prédomine.

III.5 Lois d'usure :

Si l'usure est un phénomène bien identifié, elle n'a en revanche pas d'unité légale puisque ce n'est pas une grandeur physique, mais un phénomène. Elle représente la dégradation d'un contact, entraînant, dans un certain nombre de cas, une perte de fonction. Une étude, datant du XX^e siècle, sur l'usure des pièces de monnaies écossaises établit une équivalence directe entre perte de masse et perte de fonction.

Mais à partir de cette date, très peu de réflexions globales ont été menées sur l'usure, jusqu'au milieu du XX^e siècle, date à laquelle Archard proposa une loi d'usure (portant son nom).

Plusieurs formes de la loi d'Archard peuvent être évoquées. La première (originale, issue de l'expérimentation), indique que le volume usé V_u (c'est à dire le volume perdu par un matériau qui glisse sur un autre) est proportionnel au produit de la distance parcourue L et de la force normale F_n appliquée au contact :

$$V_u = a \cdot F_n \cdot L$$

Une seconde forme fait intervenir la nature du matériau le plus mou par l'intermédiaire de sa contrainte d'écoulement σ_y et la surface S du contact :

$$V_u = b. \frac{F_n.S}{\sigma_y}$$

Une forme dérivée de la première loi fait intervenir l'énergie dissipée dans le contact par le biais du produit PV (pression x vitesse de glissement), proportionnel à la vitesse d'usure dh/dt (h étant la profondeur de la piste d'usure).

$$\frac{dh}{dt} = c.P.V$$

Où a , b et c sont des coefficients de calage.

Mais cette loi plus générale, essentiellement théorique, s'applique difficilement à la réalité des contacts dans leur diversité. La loi d'Archard sera par la suite adaptée de diverses façons par différents expérimentateurs pour coller aux expériences particulières qui les concernent. Meng et Ludema citent plus d'une centaine de lois d'usure dont une grande partie est adaptées de la loi d'Archard. On peut être frappé par la grande variété de ces lois, mais aussi par le nombre de variables en présence : on en recense près de 600, dont une centaine apparaît comme des paramètres réellement indépendants. Certains même, comme le module d'Young d'un matériau, apparaissent d'une loi à l'autre tantôt au numérateur tantôt au dénominateur.

Après un test d'usure, il est toujours possible de trouver une fonction qui corrèle plusieurs paramètres. Mais les paramètres utilisés sont fonction des moyens d'investigations disponibles et de la culture des chercheurs :

- la définition d'une surface de contact n'a pas de sens tant que l'on ne différencie pas une surface apparente (au sens de Hertz) et une surface réelle (puisque ce sont souvent les débris d'usure qui supportent effectivement la charge),
- l'évaluation du « volume usé » pour caractériser l'usure est entièrement dépendante de la façon dont on nettoie la piste de frottement après un essai, etc.

Ce qui peut expliquer que la tribométrie ait donné lieu à des corrélations entre paramètres qui ne sont « ni généralisables ni prédictives ».

Pour Meng et Ludema, ces lois apparaissent « si confuses que peu de concepteurs peuvent utiliser l'une ou l'autre [...] avec confiance ». Parmi celles-ci, on distinguera les lois théoriques (dérivées directement de la mécanique des contacts et de la loi d'Archard) et les lois empiriques (comme celle de Barwell) qui sont bien plus précises que les équations théoriques pour un type de test donné, mais qui sont valables seulement pour ce type de test.

III.6 Grippage:

Les conditions d'usure et de frottement déjà envisagées, sont des conditions normales. Cependant, il existe des conditions d'usure catastrophiques qui provoquent une destruction rapide du contact. La transition se manifeste normalement par une augmentation brusque du coefficient de frottement. Ce phénomène est appelé grippage.

Dans la plupart des cas, le grippage apparaît après une certaine durée de service seulement car l'usure dégrade peu à peu le contact augmentant progressivement le frottement. Dès que la dégradation du contact atteint une valeur critique, il y a grippage, c'est-à-dire formation d'une jonction soudées de section importante entre les matériaux de contact.

L'échauffement local du contact favorise en général l'établissement des conditions de grippage. Dans certains cas extrêmes, il peut même provoquer la fusion de l'une ou des deux surfaces.

III.7 Conclusion:

Les acquis scientifiques paraissent donc bien légers... et les besoins industriels sont très grands : on estime généralement que 2,5 % du PNB sont perdus par frottement et usure, et il faut ajouter les problèmes de sécurité liés à la perte de fonction d'un mécanisme. Par conséquent, notre démarche devra s'atteler, plutôt qu'à des plans d'expériences sur un tribomètre donné ou à des extrapolations de courbes, à une réelle compréhension du phénomène d'usure, dans sa globalité.

IV.1 Introduction :

Lorsque les surfaces de contact de deux organes mécaniques sont en mouvement vibratoire faibles amplitudes, il y aura apparition du phénomène de fretting.

Le fretting peut causer aux organes mécaniques qui y sont soumis les avaries suivantes :

- Les débris résultant du frottement des surfaces de contact des organes mécaniques vont occuper le jeu fonctionnement en provoquant le blocage du mécanisme (grippage).
- La fissuration de la surface de contact de l'un des organes, et dans le cas le plus défavorable il y aura arrêt total du mécanisme suite à la propagation de la fissure.
- Usure par perte de cote de fonctionnements des organes mécaniques.

Dans ce chapitre on va décrire les techniques expérimentales utilisées pour l'essai d'usure par frottement.

IV.2 Matériau utilisé :

Le matériau utilisé est l'alliage d'aluminium 6060

IV.2.1 Composition chimique :

En général, l'intervalle du pourcentage des compositions chimiques d'alliage 6060 est résumé dans le tableau ci-dessous (Tableau IV.1).

Alliage	-	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Zr+Ti	Autre Chaque	Autre Totale	Al
6060	Min	0,03	0,10	/	/	0,35	/	/	/	/	/	/	/	Le reste
	Max	0,60	0,30	0,10	0,10	0,60	0,05	/	0,15	0,10	/	0,05	0,15	

Tableau IV.1 ; Composition chimique en % de l'alliage 6060

IV.2.2 Caractéristiques physiques :

Les valeurs des propriétés physiques de l'alliage 6060 sont citées dans le tableau ci-dessous :

propriétés /	Valeurs
Masse volumique (g/cm ³)	2,70
Intervalle de fusion	615-655
Coefficient de dilatation linéique (0 à 100 °C) (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23,4
Module d'élasticité (MPa)	69 500
Coefficient de Poisson	0,33
Conductivité thermique (0 à 100 °C) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	État T5 : 200
Résistivité à 20 °C (μΩ cm)	État T5 : 3,3
Capacité thermique massique (0 à 100 °C) (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	945
Limité d'élasticité RP0.2 (MPa)	110
Limité à la rupture Rm (MPa)	150
Allongement (%)	14

Tableau IV.2 : caractéristiques physiques de l'alliage 6060

IV.3 Description et principe de fonctionnement du dispositif de fretting :

Le dispositif est constitué de deux parties principales :

- Partie mécanique
- Partie électrique (commande et acquisition de données).

IV.3.1 Partie mécanique :

La partie mécanique du dispositif de fretting est constituée d'un bâti rigide, de dimensions 150cmx40cmx80cm et supportant un plateau fixe, sur lequel quatre modules sont fixés :

- Module actionneur.
- Module mobile.
- Module de positionnement.
- Module de charge.

Le module actionneur : est un générateur de vibrations (pot vibrant), générant des mouvements de translation alternatifs.

Le module mobile est constitué de :

- Nacelle jouant le rôle de porte-échantillon.
- Quatre tampons élastiques disposés aux quatre coins de la nacelle, permettant l'isolation du système par absorption des mouvements parasites et en assurant le mouvement imposé par le pot vibrant.
- Tige de relais : assure la transmission du mouvement du pot vibrant vers la nacelle.
- Bloc support : jouant le rôle de butée de sécurité pour les capteurs de forces et déplacements.
- Module de positionnement : permettant la mise en place du pion.
- Module de charge : permettant l'application de l'effort normale P à l'aide de masses marquées

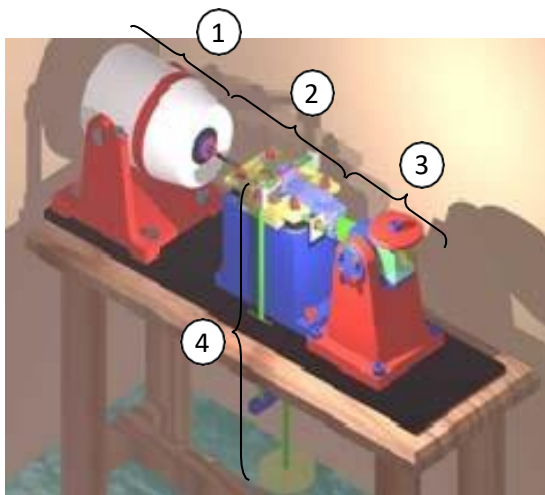


Figure IV.1: Vue générale du dispositif de fretting.

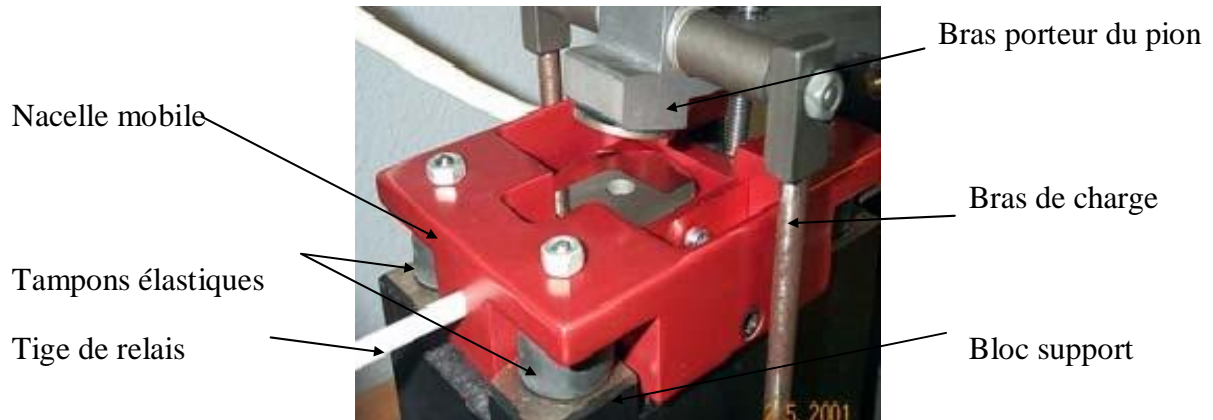


Figure IV.2: Vue du module mobile du dispositif.

IV3.2 : Partie électrique (commande et données d'acquisition) :

Le dispositif de fretting est équipé de :

- Un capteur de force : situé sur le bras porte-pion.
- Un capteur de déplacement : situé sur le bras porte-pion et sans contact avec la nacelle avant le capteur de force.
- La fonction affichage : elle permet le dialogue entre l'utilisateur et la machine et elle présente toutes les caractéristiques requises de fonctionnement.

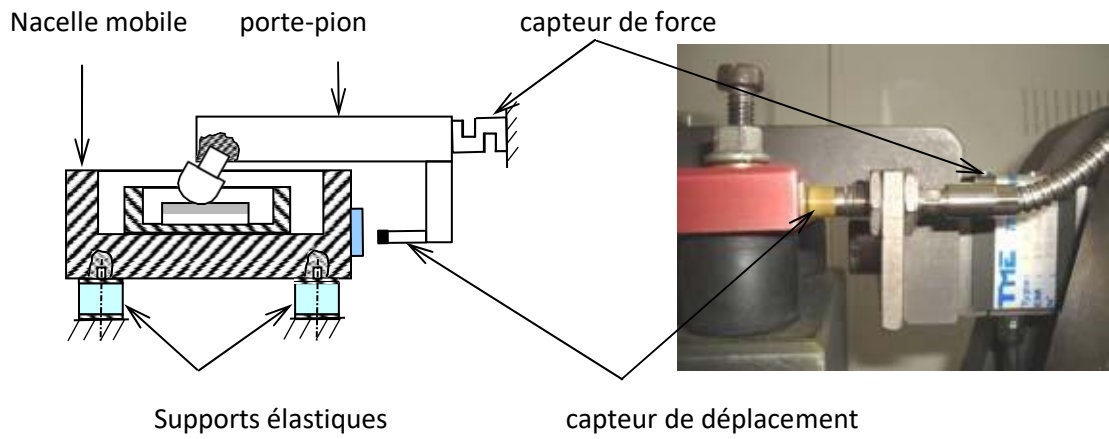


Figure IV.3 : position des capteurs de force et de déplacement : (a) représentation schématique et (b) vue réelle

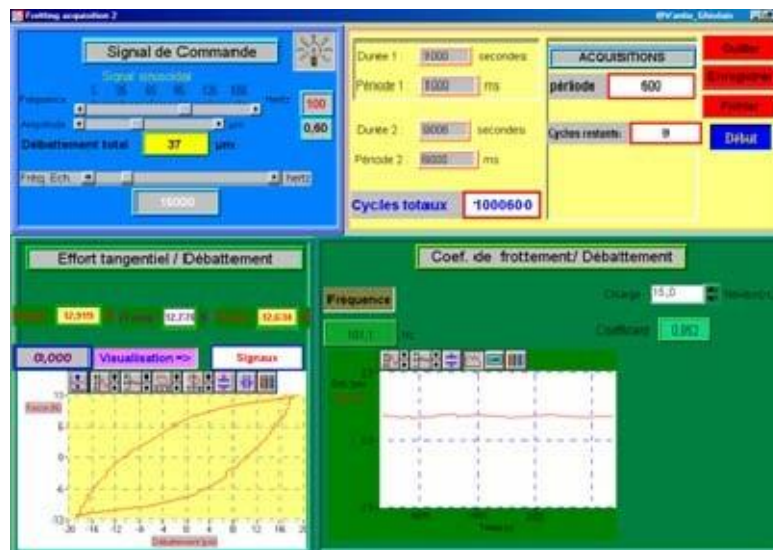


Figure IV.4 : interface graphique du logiciel de commande du dispositif de fretting

IV.4 Géométrie des échantillons et des pions :

Les échantillons de matériau à tester (alliage 6060) ont la forme géométrique d'un disque circulaire, par contre le pion est de forme de demi-sphère.

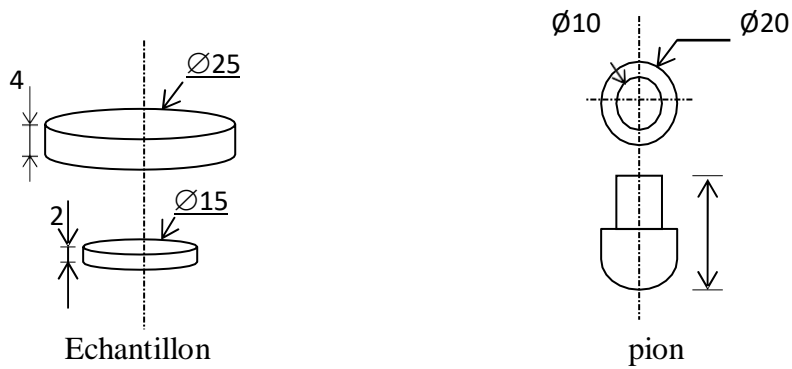


Figure IV.5 : Forme des échantillons et des pions

IV.5 Paramètres de fretting :**IV.5.1 Paramètres imposés :**

δ_i : l'amplitude de débattement initial (en μm).

P : la charge normale appliquée (en N).

ν : la fréquence (en Hz).

N : le nombre de cycles.

t : la durée d'essai en s, $t = N / \nu$

.IV.5.2 Paramètres mesures (en continu) :

δ : l'amplitude réel de débattement(en μm). .

Q : l'effort tangentiel mesuré (en N).

IV.5.3 Paramètres calculés :

D_0 : la distance réelle totale parcourue de glissement.

G : le seuil de grippage en (N), correspond à la charge minimale conduisant à un débattement nul.

μ : le coefficient de frottement est le rapport de l'effort tangentiel sur la charge normale Q/P en condition de glissement total.

E_i : l'énergie dissipée dans le contact, correspondant à l'aire du cycle i (en J).

E_t : l'énergie totale représente l'aire du rectangle contenant le cycle de fretting (en J) ; c'est-à-dire à $(4Q)$.

E_{dt} : l'énergie totale dissipée dans le contact pendant la durée de l'essai (en J).

Les paramètres de sortie du dispositif sont déterminés à partir d'un cycle de fretting (force de frottement en fonction de l'amplitude de débattement). L'évolution des cycles au cours d'un essai renseigne sur les conditions de fonctionnement du système et les endommagements potentiels des corps en contact.

IV.6 Cycle de fretting :

D'une manière general ,le cycle de fretting suivre la lure suivante

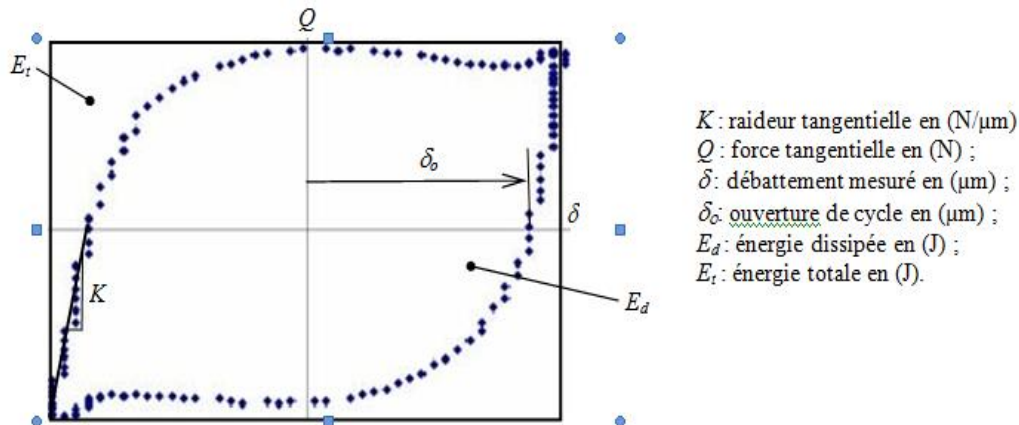


Figure IV.6 : Cycle de fretting

La raideur tangentielle du contact K , exprimée en $\text{N}/\mu\text{m}$ est la pente $dQ/d\delta$

L'ouverture du cycle δ_o , exprimée en micromètres (μm), est définie comme la valeur du débattement pour un effort tangentiel nul.

L'énergie dissipée dans le contact, E_d exprimée en joules (J), correspond à l'aire du cycle de fretting.

L'énergie totale E_t exprimée en joules (J) représente l'aire du rectangle contenant le cycle de fretting (c'est-à-dire à $4\delta_o Q$).