

I.1 Introduction :

Ce chapitre se propose de rappeler quelques notions générales sur les alliages d'aluminium, les propriétés mécaniques, et l'utilisation de ces alliages dans le domaine de l'industrie. 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, avec un paramètre de maille 0.404 nm. Sa Masse volumique est 2.7 kg/dm^3 , son coefficient de dilatation thermique linéaire est de l'ordre de 23.10^{-6} , son module de Young de 6600 bar. L'aluminium pur possède des propriétés mécaniques très réduites et insuffisantes 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 [1]. L'aluminium industriel contient généralement 0.5% d'impuretés (principalement Fe+Si), mais il peut être obtenu presque pur par raffinage électrolytique ($\text{Al} > 99.99\%$). 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,..... [1]

I .2 Principales caractéristiques d'aluminium :

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers. Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières. [1]

I .2.1 Résistance à la corrosion :

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

- le métal lui-même : sa composition, son état métallurgique, l'état de surface
- les caractéristiques du milieu dans lequel il est exposé humidité, température et La présence d'agents agressifs...

Il n'y a pas de métal ou d'alliage universel du point de vue tenu à la corrosion. Pour un même matériau, toutes les nuances n'ont pas la même résistance aux différentes formes de corrosion.

I .2.2 La conductivité thermique :

La conductibilité thermique de l'aluminium est remarquable (de l'ordre de 60 % de celle du cuivre), ce qui justifie son utilisation pour les ustensiles de cuisine, les capteurs solaires, les éléments frigorifique, les disques de frein, les échangeurs pour l'automobiles, etc. L'utilisation de l'aluminium est aussi très importante dans l'électronique, dans le dessalement de l'eau de mer, dans les échangeurs de climatisation, domaines où il est question d'échanger thermique, à condition bien sûr que le milieu s'y prête dans les échanges liquide du liquide/gaz.

I.2.3 Conductibilité électrique :

La conductivité électrique de l'aluminium est de l'ordre $\frac{2}{3}$ de celle du cuivre. L'aluminium non allié et certains alliages sont très utilisés comme conducteurs sous forme de barres et sous forme de tubes , dans de nombreuses applications électrique, telle que les postes de connexion, les barres distribution .a conductivité égale, la section d'un conducteur en aluminium est 1,6 fois plus grande qu'un conducteur en cuivre, l'économie réalisée sur le poids s'élève. A 50 % environ. L'aluminium et ses alliages sont notamment utilisés pour le blindage des câbles téléphoniques grâce à leur bonne conductivité électrique.

I.2.4 Propriétés mécaniques :

L'aluminium commercialement pur possède, à l'état recuit, des propriétés mécaniques faibles. On peut toutefois améliorer considérablement ces propriétés par écrouissage, addition d'éléments d'alliage ou traitements thermiques, selon les cas. L'aluminium et ses alliages ont une structure cristalline cubique à faces centrées. Ils font donc preuve, à l'état recuit, d'une excellente ductilité à toute température.

I.2.5 Propriétés optiques :

Le pouvoir réflecteur de l'aluminium poli est excellent et varie avec la longueur d'onde. Dans le spectre du visible, il est de l'ordre de 85% à 90%, seul l'argent peut faire mieux. Cette propriété peut être améliorée par des traitements de surface comme le polissage et le brillantage. Le pouvoir émissif de l'aluminium revêtu de sa couche naturelle d'oxyde est très faible, de l'ordre de 5% du corps noir à l'état poli. Cette propriété est utilisée en isolation.

I .3 Les alliages d'aluminium :

Seuls neuf éléments sont capables de s'allier à l'aluminium parce qu'ils ont une solubilité dans l'aluminium à l'état solide supérieure à 0,5 %. Ce sont : l'argent, le cuivre, le gallium, le germanium, le lithium, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Pour diverses raisons de coût (l'argent), de disponibilité (le gallium, le germanium) et de difficultés de mise en œuvre (le lithium), la métallurgie de l'aluminium est fondée, depuis son début, sur cinq éléments d'alliage qui sont le cuivre, le manganèse, le magnésium, le silicium et le zinc. Ces cinq éléments sont à la base des huit familles d'alliages d'aluminium. L'action d'un élément sur les propriétés de l'aluminium dépend bien évidemment de sa nature et de la quantité ajoutée. Mais, pour certains d'entre eux, leur influence sur les propriétés de l'alliage et aussi dépendre de la présence d'un, ou plusieurs autres éléments, parce qu'ils peuvent [2]

I.3.1 Les familles d'alliages d'aluminium :

Les huit familles d'alliages d'aluminium se divisent en deux groupes bien distincts en relation avec leur mode de durcissement (Tableau. I .1).

Tableau. I.1 : codification d'alliages

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_2Cu - Al_2CuMg
Série 3000	3XXX	Manganèse (Mn)	Al_6Mn
Série 4000	4XXX	Silicium (Si)	-
Série 5000	5XXX	Magnésium (Mg)	Al_3Mg_2
Série 6000	6XXX	Magnésium (Mg) et Silicium (Si)	Mg_2Si
Série 7000	7XXX	Zinc (Zn)	MgZn_2
Série 8000	8XXX	Autres éléments	-
Série 9000	/	Non utilisé	-

I.3.2 Désignation numérique :

Conformément aux directives de l'aluminium, les alliages d'aluminium sont désignés à l'aide d'un système numérique de quatre chiffres . 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 ceci de simplification (Tableau I.1).

I.4 Classification des alliages d'aluminium :

Nous désignerons les alliages d'aluminium corroyés les normes de l'aluminium association des Etats-Unis. Ces normes affectent à chaque type d'alliage un nombre de quatre chiffres qui permet de les classer en séries. Nous traiterons des alliages non trempant des séries 1000,3000 et 5000. Ensuite, les alliages à durcissement structural

des séries 2000 ,6000 et 7000. Les alliages de la série 4000 sont peu utilisés, nous les négligerons. [3]

I.4.1 Alliages corroyés :

En métallurgie, les familles d'alliages d'aluminium de corroyage se divisent en deux groupes très distincts tant par la gamme de fabrication que par certaines propriétés comme : les alliages à durcissement structural, et les alliages sans durcissement structural.

I.4.1.1 Alliages sans durcissement structural ou durcissement par écrouissage :

Tous les métaux et alliages durcissent par écrouissage, mais en métallurgie de l'aluminium, cette désignation est réservée aux alliages des familles qui ne sont pas susceptibles au durcissement structural. Il appartient aux familles 1000, 3000, 5000. Leur gamme de fabrication est faite d'une suite de mise en forme à chaud et en suit à froid, associée à des recuits intermédiaires ou finaux .Il correspond à une modification de structure provoquée par une déformation plastiques comme le laminage, l'étirage...etc. L'écrouissage se traduit par une augmentation de la résistance mécanique de la dureté et par perte de ductilité.

➤ Série 1000 :

Les alliages de cette série sont essentiellement des alliages d'aluminium dont la pureté commerciale est d'au moins 99% al. A l'état recuit, leurs propriétés mécaniques sont faibles, mais on peut les améliorer par écrouissage. Ils se prêtent facilement à la mise en forme par déformation plastique à froid, notamment l'emboutissage et la chaudronnerie. Ils font preuve d'une excellente tenue en atmosphère humide et marine. Cette qualité est utilisée, par exemple, après placage par laminage, pour protéger des alliages d'aluminium sensibles à la corrosion. Grace à la grande conductibilité électrique de certains alliages de cette série. On peut utiliser ceux-ci comme conducteurs électriques ces alliages sont également recherchés pour leur conductibilité thermique élevée cette propriété est utilisée pour les tubes d'évaporateurs et de radiateurs. Ils ont aussi une excellente tenue à des très basses températures cette propriété est utilisée dans l'industrie cryogénique.

➤ **Série 2000 :**

Les teneurs en cuivre des alliages de cette série sont comprises entre 2,6 et 6.3%. les teneurs en magnésium varient de 0,5 à 1,5 % le durcissement structural de ces alliages est dû à la précipitation de composés transitoires d' Al_2Cu et CuMgAl_2 . Ces phases leur confèrent d'excellentes propriétés mécaniques. L'addition de silicium et de magnés, favorise la formation de composés quaternaires. Par dispersion, ces derniers améliorent les propriétés de la matrice par contre, la présence de fer est souvent nuisible, la formation de Cu_2FeAl_2 , contenant de fer, diminue la quantité de cuivre nécessaire au durcissement structural. Cependant, si, en plus du fer, on ajoute du nickel, il y a formation du composé Al_2FeNi , qui confère à l'alliage une bonne tenue mécanique jusqu'à 230°C .

D'autre part, les alliages de la série 2000 font preuve d'une résistance médiocre à la corrosion. A l'état trempé et vieilli, la présence de précipités cathodiques crée une pile par rapport à la matrice par ailleurs, ces alliages sont difficilement soudable, en effet, puisque les zones adjacentes aux cordons de soudure subissent un recuit lors du cycle thermique imposé par le soudage, leur propriétés mécanique s'en trouvent considérablement affaiblies.

➤ **Série 3000 :**

La solubilité maximale du manganèse dans l'aluminium diminue rapidement avec la température. Elle est de 1,8% à 659°C . Le manganèse se combine à l'aluminium pour former un composé intermétallique. Le précipité de Al_2Mn est dispersé dans la matrice. les teneurs en Mn sont maintenues inférieures à 1,5%. On constate également une augmentation de la température de recristallisation de l'alliage d'aluminium quand l'addition de magnésium à des teneurs inférieures à 1,2% entraîne un durcissement secondaire par solution solide les.

Les alliages Al-Mn se prêtent aisément à la mise en forme. on produit des tôles, barres, fils, profilés, tubes, etc.. Par ailleurs, ils résistent bien à la corrosion atmosphérique et sont facilement soudables ils remplacent l'aluminium non allié de la série 1000 chaque fois qu'on recherche une amélioration des propriétés mécaniques.

➤ **Série 5000 :**

Les alliages Al/Mg corroyés contiennent moins de 4% de Mg. dans ces conditions, on retrouve le magnésium en solution solide, et le reste sous forme de composé Mg_2Al_3 . Les alliages de cette série ne subissent pas vraiment un durcissement structural. Pour les alliages écrouis, un séjour prolongé à la température ambiante ou plus élevée, provoque une précipitation. Mg_3Al_2 se forme aux joints de grains. Ceci peut entraîner des conséquences néfastes sur la résistance à la corrosion.

Il y a, en effet, une possibilité de corrosion inter granulaire ou de corrosion sous tension. Pour pallier cette tendance, on soumet ces alliages, après écrouissage, à un recuit stabilisation les utilisations des alliages de la série 5000 découlent de leurs principales caractéristiques.

Tableau I.2 : les caractéristiques de la série 5000

Caractéristique	Valeur
Résistance mécanique	on peut l'améliorer par écrouissage aux dépens de leur ductilité
Aptitude à la transformation	Grande aptitude aux transformations à chaud (filage, forgeage) et à froid à l'état 0 (emboutissage, cintrage, filage)
Soudabilité	Excellente
Résistance à la corrosion	Très bonne. On peut encore l'améliorer par anodisation.
Etat de surface	Bonne après polissage et anodisation. dans ce cas, il faut maintenir leurs teneurs en fer et si à des valeurs minimales

I.4.1.2 Alliages à durcissement structural :

Il y a d'autre type des métaux et des alliages notamment les alliages d'aluminium qui ne durcissent pas par l'effet d'écrouissage, mais leurs structures qui ont effet sur la

durcissement observé. Deux familles ou deux séries de ces matériaux regroupent un nombre important des alliages d'aluminium.

➤ **Séries 6000 :**

Le durcissement structural des alliages d'aluminium de série 6000 est dû à la formation de la formation du composé Mg_2Si . Quand le magnésium et le silicium se combinent en Mg_2Si le rapport massique Mg/Si est égal à 1,73 pour la plupart de ces alliages, ce rapport est respecté. On rencontre parfois un excès de silicium qui améliore les propriétés mécanique. Ceci se fait au détriment de la résistance à la corrosion. Certains alliages comportent en outre de l'addition de manganèse (0,8%) et de chrome (0,3%). Ces éléments ont pour effet d'augmenter leur résistance mécanique et leur ténacité, et d'affiner la taille des grains. L'addition de cuivre améliore également les propriétés mécaniques de ces alliages, mais on limite sa teneur à 0,5%. Il diminue leurs résistances à la corrosion.

Ces alliages possèdent des propriétés mécaniques moyennes par rapport aux autres alliages d'aluminium à durcissement structural. Par contre, ils ont une excellente aptitude à la mise en forme à chaud. Les techniques de production. Par ailleurs, leur comportement aux basses températures est acceptable, mais leur résistance à chaud est limitée à $150^{\circ}C$. Ils font preuve d'une excellente résistance à la corrosion atmosphérique, tout en étant insensibles à la corrosion sous tension.

Les alliages de la série 6000 (Al-Mg-Si) font parties comme les alliages de la série 2000 (Al-Cu) et la série 7000 (Al-Zn-Mg) des alliages a durcissement structural ou trempant. Leur durcissement est obtenu par une suite de traitements thermiques : remise en solution solide, trempe puis revenue.

Traitement thermiques des alliages de la série 6000 :

Un traitement thermique usuel subi par les alliages d'aluminium de la série 6000, est un traitement de durcissement structural. Ce traitement est réalisé après les traitements de réchauffage et de mise en forme (figure I.1). [4]

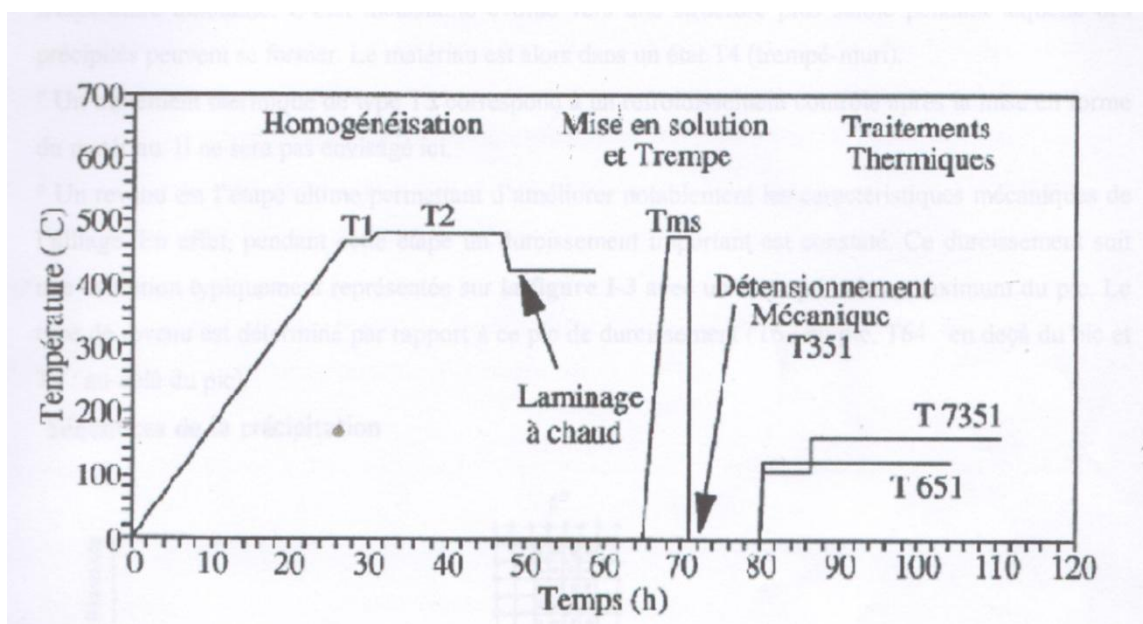


Figure I.1 : Gamme d'élaboration des alliages étudiés

Les étapes d'homogénéisation, de mise en solution et de trempe sont les suivantes : Le traitement d'homogénéisation précède le traitement thermique et correspond aux états T1 et T2 d'aluminium. T1 permet de dissoudre les phases métalliques en excès et d'homogénéiser la composition de la solution solide. La mise en solution solide est réalisée à température élevée, supérieure à 500°C, pendant 50 minutes et permet d'obtenir une solution solide sursaturée après la trempe. Cette étape consiste en un refroidissement brutal et permet de maintenir à une température ambiante, la solution solide sursaturée obtenue précédemment. Le métal est alors dans un état métastable.

Précipitation et comportement mécanique des séries 6000 :

La faible précipitation dans les alliages d'aluminium de la série 6000 n'a pas d'influence sur le comportement linéaire élastique du matériau. Cependant, la valeur de la limite d'élasticité dépend de la présence de ces précipités durcissant puisqu'ils constituent des obstacles au mouvement des dislocations. Dans les alliages de la série 6000, la microstructure et la précipitation influencent directement la contrainte d'écoulement et ensuite la capacité d'écrouissage. Par exemple, deux mécanismes de

durcissement structural peuvent intervenir dans le cas des précipités. Le durcissement structural permet d'obtenir une limite d'élasticité élevée ; le sur vieillissement donne à l'alliage une capacité d'écrouissage satisfaisante pour obtenir un bon niveau de ténacité. Toutefois, la présence de ces précipités, en plus la présence du manganèse en dispersion, introduit des sites potentiels de germinations de cavités en rupture ductile, qui seront retrouvés lors des examens fractographiques des ces alliages.

➤ **Series7000 :**

De tous les alliages d'aluminium, ceux de la série 7000 présentent, après traitement thermique, les propriétés mécaniques les meilleures. Leur teneur en zinc varie de 4 à 8 % et celle en magnésium de 1 à 3 %. Leur durcissement structural est dû principalement à la précipitation de formes transitoires (zones GP) du composé au $MgZn_2$. L'addition de cuivre, jusqu'à des teneurs de 2 %. Durcit ces alliages par solution solide et par précipitation. Par ailleurs, la présence de cuivre dans les zones GP augmente leur stabilité à chaud. le cuivre diminue toutefois la trempabilité, la soudabilité et la ténacité des alliages Al/Zn/Mg. le chrome ($< 0,3$ %) améliore leur résistance à la corrosion sous tension. outre leurs propriétés mécanique remarquables ,les alliages de série 7000 se prêtent facilement aux traitements thermique .cette qualité est due à leur grand intervalle de température de mise en solution , leur bonne trempabilité . leurs température de vieillissement sont relativement basses : de la température ambiante à $160^{\circ}C$. grâce à cet ensemble de propriétés , les caractéristique des joints soudés peuvent rester voisines de celles du métal de base . la soudabilité de ces alliages , favorisée par la présence de zirconium , reste moyenne . le principale inconvénient des alliages de cette série est leur faible résistance à chaud , dès que la température de service dépasse $120^{\circ}C$.

I.4.2 Alliages de fonderie :

On distingue les alliages de première fusion, élaborés à partir de l'aluminium primaire issu de l'électrolyse et de seconde fusion (appelé aussi alliages d'affinage). Ils sont élaborés par refusions des déchets récupérés. Ils sont surtout utilisés pour la fabrication des pièces d'automobiles. Les qualités qu'on recherche pour un alliage de fonderie sont différentes de celles d'un alliage corroyé. Les zones à usiner exceptées, les pièces de fonderie ont leur forme définitive après démoulage. Les propriétés de ces alliages découlent des opérations de fonderie (Tableau I. 4).

Tableau I.3 : Qualité des alliages de fonderie

<i>Qualités</i>	<i>Observations</i>
Coulabilité	Aptitude du métal liquide à bien remplir l'empreinte
Absence de formation de criques	Fissuration à chaud causée par le retrait du métal
Bonne répartition de la porosité	Due au retrait qui accompagne la solidification
Températures de fusion relativement basses	Permettent d'employer des moules métalliques réutilisables (des coquilles) dans lesquels on coule le métal soit par gravité, soit sous pression

Dans de nombreux cas, on peut également effectuer la coulée dans des moules en sable ou en matériau réfractaire. On comprend que les microstructures dépendent de la vitesse de solidification. Ces microstructures influent sur les propriétés mécaniques. Le temps de solidification est fonction du type de moule utilisé. Dans les moules métalliques, la solidification se produit beaucoup plus rapidement que dans les moules en sable.

Il en résulte une structure plus fine (distance inter dendritique, taille des composés intermétalliques) qui entraîne une amélioration des propriétés. Les alliages d'aluminium de fonderie ont en général des teneurs plus fortes en éléments d'alliages. Ceci permet d'obtenir une proportion non négligeable d'eutectique. D'autres buts de ces teneurs fortes sont d'abaisser le point de fusion et diminuer l'intervalle de solidification.