

Extrait :

Précis Métallurgie, Elaboration, Structures-Propriétés, Normalisation, J.Barralis, G.Maeder,
Editions Nathan, 2002

p.127 : L'aluminium et ses alliages

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

NF EN 485-2/573-3/754-2/755-2/1301-1/1301-2, NF EN ISO 18273, NF ISO 11881/6361-2/6362-2, NF A 02-011/05-301

1. ALUMINIUM NON ALLIÉ

1.1 Propriétés physiques

Numéro atomique $Z = 13$, masse atomique $M = 26,97$.

Point de fusion : $660\text{ }^\circ\text{C}$.

Structure cristalline : CFC ($a = 0,404\text{ nm}$ à $20\text{ }^\circ\text{C}$).

Masse volumique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $\rho = 2700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Coefficient de dilatation :

$\alpha = 23,8 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (de $20\text{ }^\circ\text{C}$ à $100\text{ }^\circ\text{C}$);

$\alpha = 25,4 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (de $20\text{ }^\circ\text{C}$ à $300\text{ }^\circ\text{C}$);

$\alpha = 28,7 \cdot 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (de $20\text{ }^\circ\text{C}$ à $600\text{ }^\circ\text{C}$).

Capacité thermique massique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $c = 950\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Conductivité thermique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $\lambda = 217,6\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Résistivité électrique à $20\text{ }^\circ\text{C}$: $\rho = 2,63\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

La conductivité électrique de l'aluminium est égale à 65 % de celle du cuivre.

1.2 Aluminium industriel (Al $\geq 99,00\%$)

1.2.1 Influence des impuretés

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 la conductivité électrique : elle diminue avec toutes les additions ou impuretés (fig. 1). Ce point est important pour l'utilisation de l'aluminium dans les conducteurs électriques;

– sur d'autres paramètres :

Ti (0,05 à 0,10 %) et B (0,005 à 0,01 %) affinent le grain lors de la solidification,

Zr ($< 0,2\%$) inhibe le grossissement du grain,

Si (0,5 % à 0,8 %) abaisse la tenue à la fissuration à chaud, mais augmente la tenue au fluage,

Ni et Fe augmentent la tenue mécanique à chaud,

(Cu + Ni + Sn + Pb) doit être inférieur à 0,1 % pour augmenter la résistance à la corrosion,

Cr et Mn sont favorables à la résistance à la corrosion.

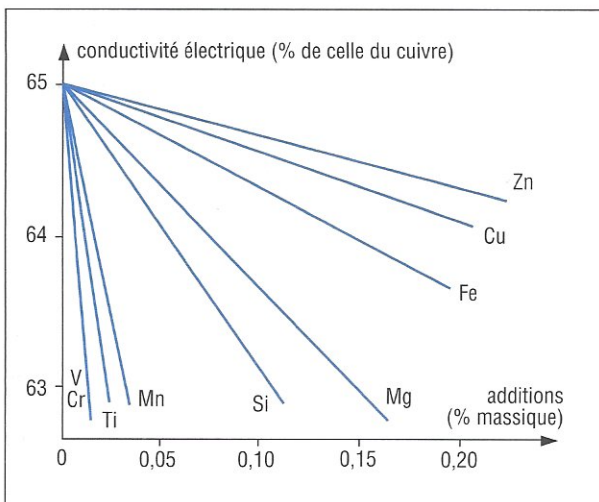


Fig. 1. Variations de conductivité électrique

1.2.2 Résistance à la corrosion

L'aluminium est fortement oxydable :

$$\varepsilon_{\text{Al}/\text{Al}^{3+}}^0 = -1,66\text{ V/ENH},$$

mais il se recouvre d'une pellicule d'oxyde (Al_2O_3) épaisse, adhérente, qui protège le métal.

Cette alumine n'a qu'une résistance chimique limitée; elle résiste cependant bien dans des solutions d'acide chlorhydrique, sulfurique et nitrique.

En revanche, les bases attaquent violemment le métal.

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

1.2.3 Propriétés mécaniques

Les propriétés de l'aluminium non allié recuit sont très limitées. Ainsi pour l'aluminium à 99,5 % :

$$R_{p0,2} = 10\text{-}20\text{ MPa}; R_m = 70\text{-}80\text{ MPa}; A \% = 50\text{-}60;$$

$$E = 65\text{ }000\text{-}70\text{ }000\text{ MPa};$$

$$\nu = 0,36.$$

La limite élastique de l'aluminium très pur (99,996 %) est quasi nulle.

Influence de l'écroutissage

Les propriétés mécaniques sont fortement modifiées par la déformation plastique à température proche de l'ambiante (fig. 2).

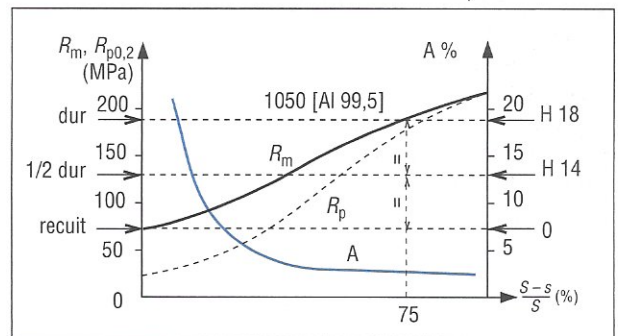


Fig. 2. Évolution des propriétés mécaniques en fonction de l'écroutissage

Influence du recuit de restauration et de recristallisation

Après écroutissage, le chauffage entraîne des phénomènes de restauration et de recristallisation analogues à ceux décrits dans le cas des aciers (p. 69 et 70). Mais, dans le cas de l'aluminium, ces processus se produisent à des températures basses qui peuvent être proches de l'ambiante pour les nuances les plus pures.

Le phénomène de recristallisation est donc particulièrement important pour l'aluminium. Les figures 3 et 4 montrent, en fonction de la température de recuit, l'évolution de la taille du grain (fonction du taux d'écroutissage) et l'évolution des propriétés mécaniques pour Al = 99,5 %.

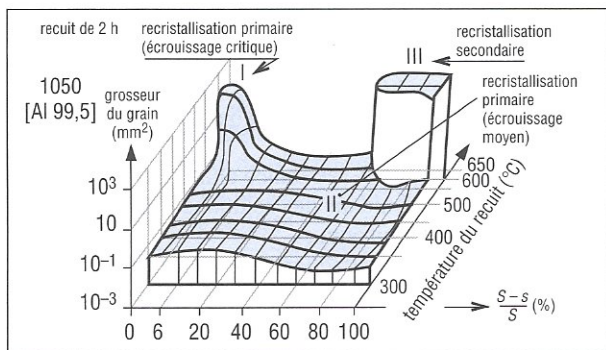


Fig. 3. Les trois domaines de recristallisation selon la taille des grains

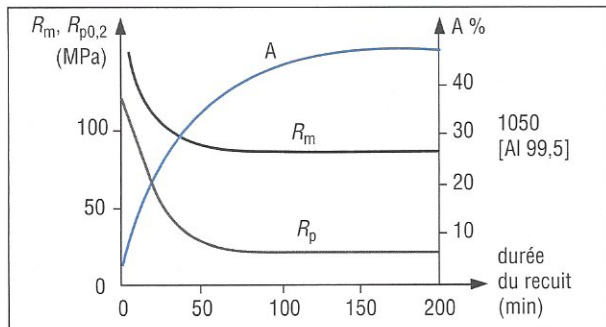


Fig. 4. Évolution des propriétés mécaniques en fonction du temps de recuit

1.3 Nuances d'aluminium

Ces nuances se différencient par leur composition qui peut aller de 99,00 % (1100 ou [Al 99,45], 1200 ou [Al 99,4]) à 99,80 % (1080 ou [Al 99,8]) pour les plus courantes.

Lorsque le titre en aluminium décroît, on observe :

- une augmentation de la résistance mécanique ;
- une diminution relative de la plasticité ;
- un comportement à l'anodisation moins favorable.

La nuance la plus courante est la nuance à 99,50 % d'aluminium (1050A ou [Al 99,5]) dont les applications recouvrent les industries du bâtiment, de la chimie, de la cryogénie, les industries mécaniques et des biens de consommation (matériel électroménager, emballage) (tableau 1).

Nuance	Si (%)	Fe (%)	État	R _m (MPa)	R _{p0,2} (MPa)	A (%)
1100 [Al 99,45]	Si + Fe ≤ 1,0		O	80-110	-	30
			H14	110-150	90	5
1050 A [Al 99,5]	0,25	0,40	O	70-100	-	35
			H12	90-120	65	9
			H22	90-120	65	13
			H14	100-140	75	6
			H24	100-140	65	10
			H16	120-160	100	5
			H26	120-160	90	7
H18	140-	125	4			
1080 A [Al 99,8]	0,15	0,15	O	60-90	-	38
			H14	100-140	70	7

Tableau 1. Propriétés de différentes nuances d'aluminium non allié

Une application importante est l'emploi de l'aluminium pour les conducteurs électriques. Il se substitue de plus en plus au cuivre. L'aluminium présente les intérêts suivants :

- conductivité électrique élevée (≈ 65 % de celle de Cu) ;
- faible masse volumique : à conduction égale, la masse du conducteur en aluminium est moitié de celle du conducteur en cuivre ;
- échauffement inférieur (82 %) à celui du cuivre pour une même densité de courant ;
- très bonne résistance à la corrosion.

Deux nuances sont utilisées : l'aluminium non allié [Al 99,5] et l'alliage AlMgSi (ou Almelec) décrit plus loin (§ 6.2.1).

Dans le cas de l'aluminium non allié, les teneurs en éléments nocifs pour la conductivité électrique (Ti, V) sont particulièrement contrôlées. Les deux nuances d'aluminium non allié pour conducteurs électriques sont les nuances 1350 (Ti + V ≤ 0,005) et 1370 (Ti + V ≤ 0,003), avec pour application le transport d'énergie électrique (tableau 2). Pour des fils souples (automobile, électroménager, câbles téléphoniques, etc.), on utilise la nuance 1310 qui a subi des additions de magnésium (0,08 à 0,25 %) et a une teneur en fer plus élevée (0,5 à 0,8 %).

Nuance	Si (%)	Fe (%)	Désignation	R _m (MPa)	IACS (%)
1370	≤ 0,09	0,12-0,22	Recuit R6	70	63,50
			Standard 1 R10	100	62,35
			Dur R12	120	62,02
1350	≤ 0,10	0,22-0,32	Recuit A5/LPR	80	63,04

Tableau 2. Exemple de deux alliages pour conducteurs électriques

Les compositions des différentes nuances d'aluminium apparaissent dans la norme NF EN 573-3, et leurs propriétés dans les normes NF EN 754-2 (barres et tubes étirés), NF EN 755-2 (barres, tubes et profilés filés), NF EN 485-2 et ISO 6361-2 (tubes, bandes et tôles épaisses), NF ISO 6362-2 (barres, tubes, profilés corroyés), NF EN 1301-1/-2 (fils étirés).

2. ALLIAGES D'ALUMINIUM

L'aluminium non allié ayant des propriétés mécaniques très réduites, on est conduit pour les améliorer à ajouter des éléments entrant en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des compositions d'alliages industriels de plus en plus complexes. Cependant, on peut considérer que ces alliages comportent :

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

Plusieurs classifications peuvent être effectuées :

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

Nous avons choisi de traiter principalement des alliages corroyés et de distinguer, dans ces alliages, les alliages à durcissement structural et les alliages sans durcissement.

Mais auparavant, nous précisons la nature des traitements thermiques spécifiques des alliages d'aluminium, et nous donnerons leurs propriétés générales.

3. TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

On peut diviser les traitements thermiques des alliages en trois types (NF A 02-011) :

- les traitements d'homogénéisation;
- les traitements d'adoucissement;
- les traitements de trempe structurale.

Nous développerons surtout ce dernier traitement qui est très important et spécifique des alliages d'aluminium susceptibles de durcissement structural.

3.1 Traitements d'homogénéisation

Ce sont des traitements comportant un chauffage à des températures relativement élevées 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 principal but de dissoudre les phases métalliques en excès et de réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

Le corroyage (NF A 02-011) 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, matricage, laminage, filage) d'obtenir des produits à la forme désirée. Il est défini par le rapport de corroyage S/s (S = section avant déformation; s = section après déformation).

Il ne faut pas confondre le corroyage avec l'écroutissage, qui est la modification de l'état structural d'un métal ou d'un alliage résultant d'un corroyage ou d'une déformation plastique localisée à température ordinaire (parfois à tiède). Il est défini par la réduction de section $[(S-s)/S] \times 100$. Cette expression doit remplacer celle du taux d'écroutissage qui correspond au rapport :

$$[(S - s)/s] \times 100.$$

3.2 Traitements d'adoucissement

Ils ont pour but d'adoucir un métal ou un alliage durci par écroutissage ou par trempe structurale.

Dans le cas de l'écroutissage, ce sont des traitements de restauration et des recuits de recristallisation. Ces traitements ont des effets semblables à ceux décrits pour l'aluminium (cf. § 1.2.3). Seules les températures de traitement sont plus élevées pour les alliages :

- le traitement de restauration est effectué à 200-300 °C pendant 1 à 8 heures;
- le traitement de recristallisation est effectué à 300-400 °C pendant 0,5 à 3 heures.

Dans le cas de la trempe structurale (cf. § 3.3), le traitement est un recuit de précipitation. Il consiste en un chauffage assez prolongé, à une température comprise entre la température de revenu et celle de mise en solution, d'un produit trempé et mûri ou revenu. Le but est d'obtenir un adoucissement relativement important par évolution des précipités provenant des constituants de l'alliage.

3.3 Traitements de trempe structurale

Ils ont des effets et des buts totalement différents des traitements de durcissement par trempe des aciers.

3.3.1 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 effectué à température ambiante (maturation) ou à une température supérieure qui conduit à un durcissement de l'alliage.

3.3.2 Exemple : alliage Al-Cu à 4 % de cuivre

Le diagramme d'équilibre des alliages Al-Cu (fig. 5) possède un domaine de solution solide α dont l'étendue croît avec la température. L'alliage à 4 % de cuivre est constitué d'une solution solide homogène pour les températures comprises entre T_S et T_L . Les atomes de cuivre sont répartis au hasard dans le réseau (solution solide désordonnée). Si, après mise en solution entre les températures T_S et T_L , on refroidit lentement l'alliage, celui-ci est constitué en dessous de T_S (donc à l'ambiante) de deux phases : la phase α et la phase θ (composé intermétallique Al_2Cu). Si en revanche, après la mise en solution, on refroidit la solution α rapidement, cette solution peut être maintenue à la température ambiante dans un état de sursaturation. C'est le phénomène de trempe, et la vitesse minimale pour maintenir la solution solide à l'ambiante est la vitesse critique de trempe. Tout de suite après la trempe, on dit que l'alliage est dans un état de trempe fraîche.

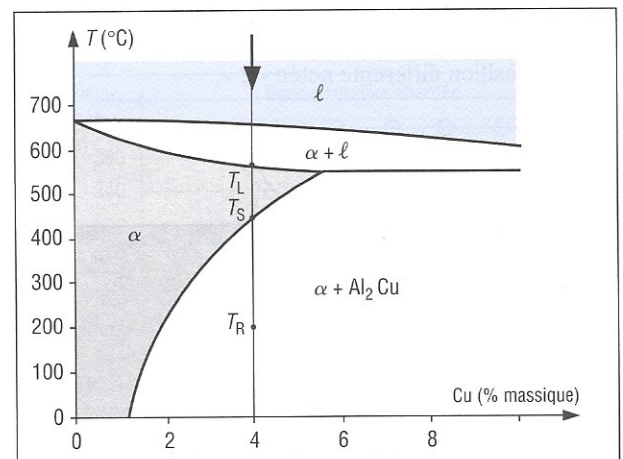


Fig. 5. Diagramme d'équilibre Al-Cu

Si, après la trempe, on effectue un maintien à une température T_R , on observe un durcissement important de l'alliage. C'est le revenu.

Le durcissement obtenu est fonction du temps et de la température de maintien (fig. 6). Ce durcissement s'explique par un phénomène de précipitation résultant de la décomposition de la solution solide sursaturée (hors d'équilibre) au cours du maintien isotherme.

Par revenu, à des températures élevées, on peut obtenir directement la phase θ .

Mais aux plus basses températures, pour lesquelles on observe le plus fort durcissement, la solution solide se décompose en plusieurs étapes. Par exemple, pour une température légèrement inférieure à 200 °C, le schéma de décomposition en fonction du temps est le suivant :

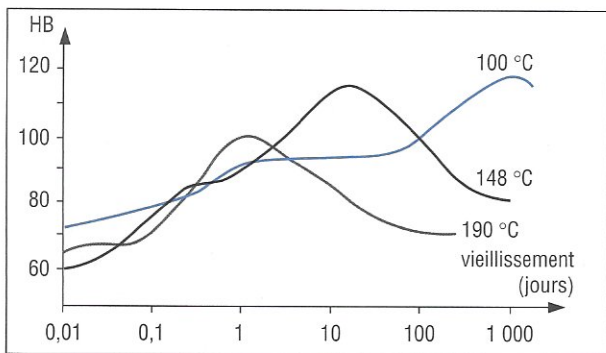
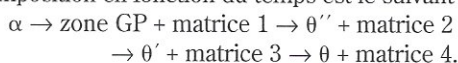


Fig. 6. Durcissement par revenu

Les zones GP (Guinier-Preston) sont constituées par des rassemblements d'atomes de cuivre parallèlement aux plans {100} de la matrice, dont la composition est alors appelée « 1 » (fig. 7). Cette précipitation est cohérente.

La phase θ'' (fig. 8) correspond à la formation de plaquettes de 2,5 nm d'épaisseur et de 15 nm de diamètre. Dans ces plaquettes qui sont encore cohérentes et parallèles aux plans {100} de la matrice comme les zones GP, les atomes d'aluminium et de cuivre sont ordonnés. Leur composition est différente de celle des zones GP et la matrice a une composition différente notée « 2 ».

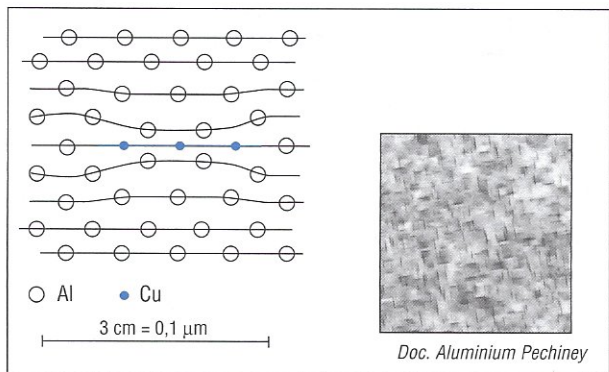


Fig. 7. Zone GP dans un alliage [AlCu4] maintenu 24 h à 100 °C

La phase θ' (fig. 9) est un composé tétragonal qui est visible au microscope optique sous forme de plaquettes. Ce composé est semi-cohérent avec la matrice, dont la composition devient « 3 ».

La phase θ (fig. 10) est le composé d'équilibre Al_2Cu , qui est totalement incohérent avec la matrice. L'alliage tend vers l'état d'équilibre.

Suivant la température de revenu, la décomposition de la solution solide est plus ou moins complexe :

- en dessous de 200 °C, la décomposition s'arrête à θ'' ou à θ' (fig. 11) ;
- au-dessus de 200 °C, les zones GP ne sont pas observées et on peut obtenir directement θ' ;

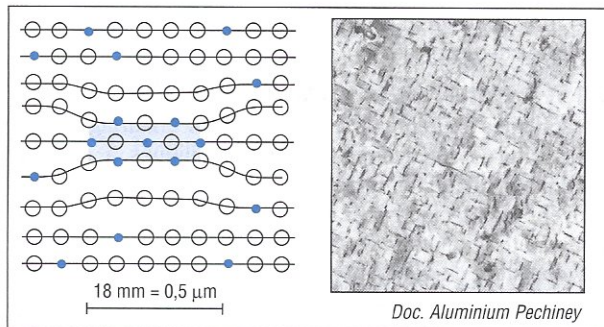


Fig. 8. Phase θ'' dans un alliage [AlCu4] revenu 24 h à 180 °C

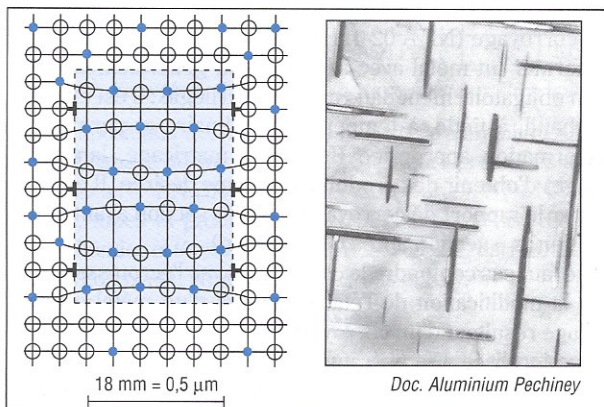


Fig. 9. Phase θ' dans un alliage [AlCu4] revenu 24 h à 250 °C

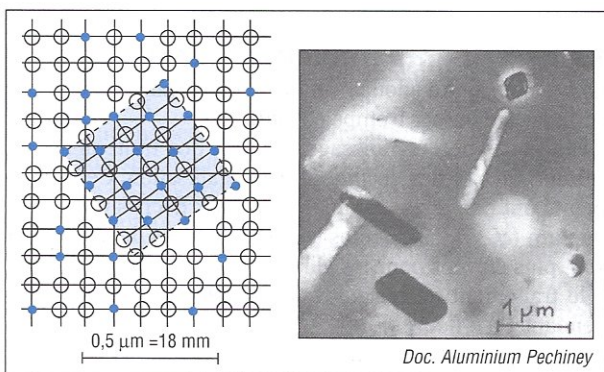


Fig. 10. Phase θ dans un alliage [AlCu4] sur-revenu

– à température ambiante, le traitement, qui s'appelle alors maturation, ne conduit qu'aux zones GP (fig. 12). On remarquera sur la figure 11 et sur la figure 6 que le durcissement passe par un maximum. Ce maximum correspond à une taille et à une répartition optimale des précipités. Au-delà du maximum, les précipités de phase θ'' grossissent, ou bien il y a formation de la phase θ , incohérente avec la matrice. Le revenu dont la durée est supérieure à celle qui procure le maximum de durcissement à la température de maintien effective s'appelle le « sur-revenu ». Dans le cas opposé, on parle de « sous-revenu ».

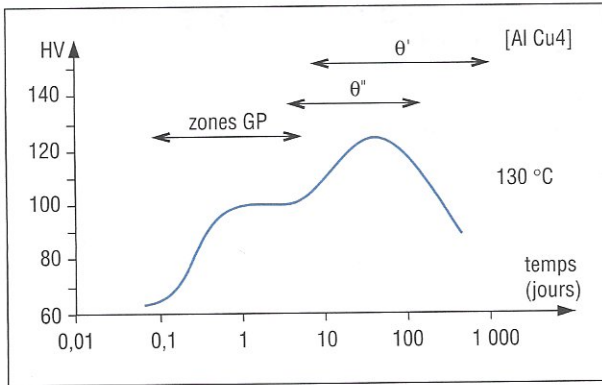


Fig. 11. Revenu à basse température suivi par mesure de la dureté

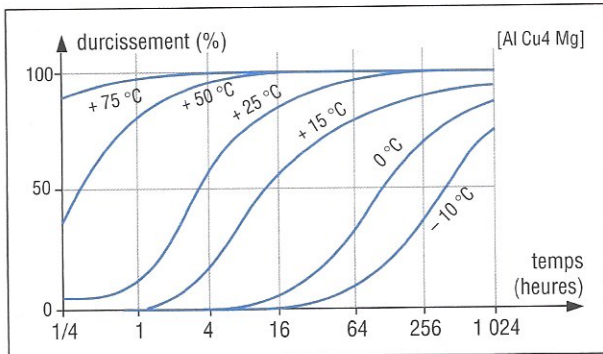


Fig. 12. Durcissement à températures proches de l'ambiante (maturation)

3.3.3 Résumé : 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, l'intervalle $T_S - T_L$ n'est pas important. Il faut en particulier éviter d'atteindre la « température de brûlure » à laquelle l'alliage commence à fondre aux joints de grains. La régénération de l'alliage par traitement thermique ou mécanique est alors impossible. Pour éviter la brûlure due à la ségrégation mineure (cf. p 44), 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 [AlZn5Mg] sont favorablement influencés par un temps d'attente entre trempe et revenu. Un écrouissage entre trempe et revenu peut également conduire à des effets favorables dans certains cas.

Nota : certaines nuances d'acier (aciers à durcissement structural) subissent un traitement thermique analogue à celui des alliages d'aluminium.

4. PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

4.1 Résistance à chaud

La résistance à chaud est faible au-delà de 100 °C, sauf pour la série 2XXX (Al-Cu) pour lesquels on peut atteindre 300 °C (fig. 13).

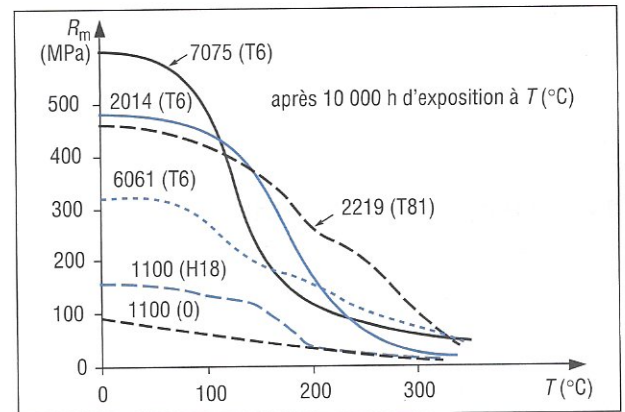


Fig. 13. Résistance à chaud de différentes familles d'alliages d'aluminium (d'après Aluminium Pechiney)

4.2 Résistance aux basses températures

De par leur structure CFC, ces alliages ne sont pas fragiles, d'où leur application en cryogénie.

4.3 Résistance à la fatigue

La courbe de Wöhler (cf. p 203) ne présente pas de coude marqué et l'asymptote horizontale n'est atteinte que vers 10^8 cycles (fig. 14).

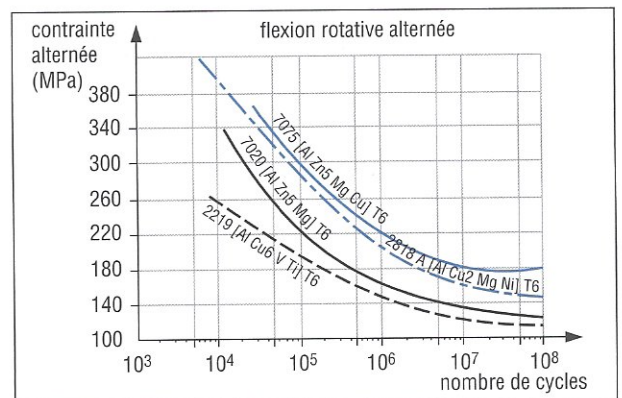


Fig. 14. Courbes de Wöhler pour différents alliages d'aluminium

En général, le coefficient d'endurance σ_D/R_m est égal :
 - à 0,5 pour les alliages non trempants ;
 - à 0,25-0,3 pour les alliages trempants.

4.4 Résistance à la corrosion

Comme pour l'aluminium non allié, elle est bonne grâce à la formation de la couche d'oxyde Al_2O_3 et peut être améliorée par anodisation.

Les alliages d'aluminium présentent une bonne résistance à la corrosion par piqûres, mais ils sont sensibles à la corrosion galvanique et des précautions sont donc à prendre en particulier avec le fer.

Les risques de corrosion intergranulaire et de corrosion sous tension (NF A 05-301) existent dans les alliages des séries 2XXX et 7XXX, ainsi que des risques de corrosion feuilletante en milieu marin pour la série 5XXX (NF ISO 11881).

4.5 Mise en forme

Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier (coefficient d'écroutissage $n = 0,2$ à $0,3$), et faciles à emboutir. Le chaudronnage et le repoussage sont aisés.

Un point particulier est le filage à chaud, qui est très approprié : pour la série 5XXX (Al-Mg), plusieurs dizaines de mètres par seconde peuvent être atteints en sortie de filière.

4.6 Soudage (NF EN ISO 18273)

Le soudage est facile si l'on tient compte de la présence de la couche protectrice d'alumine. On peut donc utiliser des procédés sous gaz protecteur (TIG, MIG) ou sous vide (faisceaux d'électrons).

Mais s'il n'y a pas de difficulté pour les alliages non trempants, des problèmes peuvent en revanche exister pour les alliages trempants ayant une vitesse critique de trempe élevée (série 2XXX ou Al-Cu). Il peut également exister des dangers de corrosion feuilletante après soudage d'alliages de la série 7XXX (ou Al-Zn).

4.7 Résistances comparées de différentes nuances

Le tableau 3 compare la résistance des principaux alliages d'aluminium corroyés, à l'exception de ceux de la série 4XXX (Al-Si) qui sont plus spécialement des alliages de fonderie [AlSi13].

	Système	Désignation	Phases principales	Domaine de résistance mécanique des alliages correspondants (MPa)						
				0	100	200	300	400	500	600
Sans durcissement structural	Al	1XXX	Al-Fe-Si	[Bar chart showing R _{p0.2} and R _m for Al-Fe-Si]						
	Al-Mn	3XXX	Al ₆ Mn	[Bar chart showing R _{p0.2} and R _m for Al-Mn]						
	Al-Mg	5XXX	Al ₃ Mg ₂	[Bar chart showing R _{p0.2} and R _m for Al-Mg]						
Avec durcissement structural	Al-Mg-Si	6XXX	Mg ₂ Si	[Bar chart showing R _{p0.2} and R _m for Al-Mg-Si]						
	Al-Cu	2XXX	Al ₂ Cu Al ₂ CuMg	[Bar chart showing R _{p0.2} and R _m for Al-Cu]						
	Al-Zn-Mg	7XXX	MgZn ₂	[Bar chart showing R _{p0.2} and R _m for Al-Zn-Mg, split into 'Sans Cu' and 'Avec Cu']						

Tableau 3. Principales familles d'alliages corroyés (doc. Aluminium Pechiney)

Ces alliages sont classés suivant les deux catégories que nous avons déjà définies :

- alliages non trempants : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les phénomènes d'écroutissage et d'adoucissement par recuit ou restauration (séries 1XXX (cf. 1), 3XXX, 5XXX) ;
- alliages trempants (à durcissement structural) : les différents niveaux de résistance sont atteints en agissant sur les différents paramètres de la trempe structurale (séries 2XXX, 6XXX, 7XXX).

5. ALLIAGES SANS DURCISSEMENT STRUCTURAL

5.1 Alliages aluminium-manganèse (3XXX ou AMx)

Le manganèse augmente les caractéristiques mécaniques par effet de phase dispersée : en effet, le manganèse se trouve principalement dans l'alliage sous forme de fins précipités de type Al_6Mn (fig. 15).

L'addition de 1 à 1,5 % de Mn augmente la résistance de 50 à 60 MPa. Le manganèse augmente également la température de recristallisation.

Une nuance classique est la nuance 3003 ou [AlMn1] (Mn = 1 à 1,5 %).

On ajoute en général du magnésium (< 1,5 %) qui durcit la solution solide et confère à l'alliage des propriétés mécaniques supérieures. Mais sa capacité de déformation est réduite.

Les nuances classiques sont les nuances 3004 ou [AlMn1Mg] (Mg = 0,8 à 1,3 %) et 3005 ou [AlMnMg0,5] (Mg = 0,2 à 0,6 %).

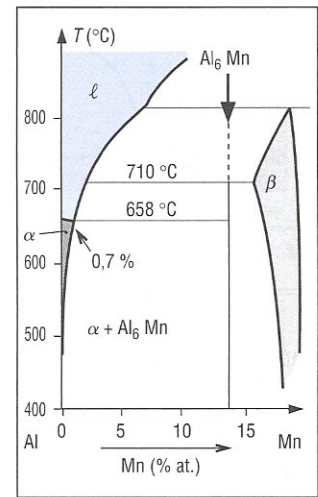


Fig. 15. Diagramme d'équilibre Al-Mn

Ces alliages sont utilisés à la place des aluminiums non alliés chaque fois que de légères améliorations de propriétés mécaniques sont demandées (tableau 4).

Nuance	Composition	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (Mpa)	A (%)
3003 [AlMn1]	Mn = 1 à 1,5 % Cu = 0,05 à 0,20 %	O	100-130	-	25
		H14	140-180	120	4
		H18	190	170	3
3004 [AlMn1Mg]	Mn = 1 à 1,5 % Cu ≤ 0,25 %	O	120-160	-	22
		H14	170-210	140	4
		H18	230	200	3

Tableau 4. Exemples de propriétés d'alliages de la série 3000

5.2 Alliages aluminium-magnésium (5XXX ou AGx)

Le diagramme d'équilibre (fig. 16) montre que la solubilité du magnésium dans la phase α est d'environ 15 % à 450 °C, mais qu'elle tombe à 2 % à la température ambiante.

Cependant on constate, après homogénéisation et trempe, que ce n'est qu'au-dessus de 5 % de magnésium que la solution solide devient instable à des températures basses, conduisant à la précipitation de la phase β . Cette précipitation ne donne pas de durcissement structural appréciable, elle peut être intergranulaire et diminue la résistance à la corrosion. Comme c'est également au-dessus de 5 % de magnésium que les difficultés de mise en œuvre et de transformation augmentent, les alliages aluminium-magnésium sont en général limités à des teneurs de 5 % en magnésium.

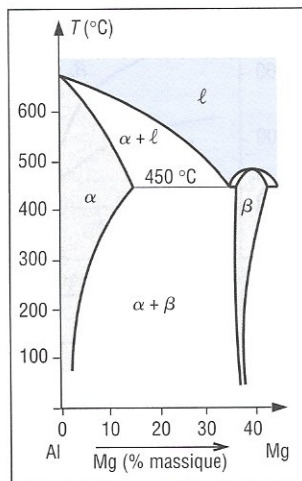


Fig. 16. Diagramme d'équilibre Al-Mg

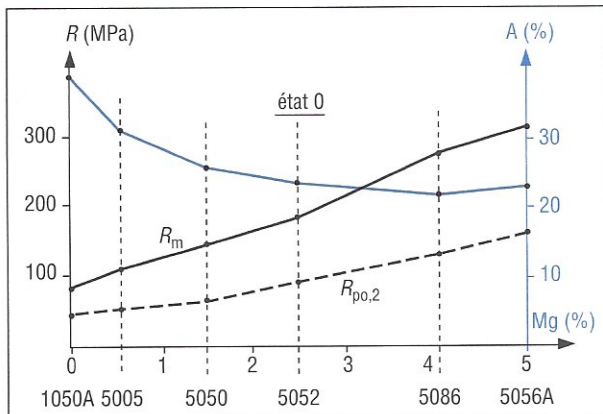


Fig. 17. Évolution des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en magnésium

Le durcissement est donc un durcissement par mise en solution solide, qui est d'autant plus important que le pourcentage en magnésium est grand (fig. 17).

Cependant, ces alliages renferment en général des additions durcissantes par phases dispersées de manganèse, chrome, titane (total < 1 %), destinées à augmenter les propriétés mécaniques ou bien des propriétés spécifiques comme la résistance à la corrosion ou la soudabilité.

Les propriétés principales de ces alliages sont une bonne aptitude à la déformation à chaud, un bon comportement aux basses températures (fig. 18). Ils sont faciles à souder, résistent bien à la corrosion et présentent de beaux états de surface par oxydation anodique. Le tableau 5 donne des exemples de propriétés pour quelques alliages.

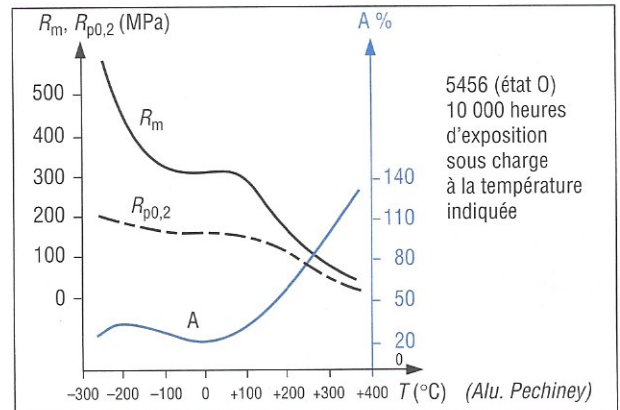


Fig. 18. Évolution des propriétés mécaniques de l'alliage 5456 [AlMg5Mn1Cu] en fonction de la température

Nuance	Mg	Autre addition	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
5005 [AlMg0,6]	0,5-1,1	-	O	100-140	-	20
			H14	140-180	120	4
			H24	140-180	110	8
			H18	180	160	3
5150 [AlMg1Ti]	1,3-1,7		O	130-170	-	25
			H14	170-210	150	6
5052 [AlMg3]	2,2-2,8	Cr 0,15-0,35	O(H111)	170-220	60	20
			H24	230-280	180	9
			H28	270	220	4
5754 [AlMg3Mn]	2,6-3,6	Mn 0,5-1,0 Cr 0,05-0,2	O(H111)	190-240	80	20
			H22	220-270	130	11
			H25	240-290	160	8
			H26	260-310	190	7
5086 [AlMg4MnCr]	3,5-4,5	Mn 0,2-0,7 Cr 0,05-0,25	O(H111)	240-290	100	18
			H22	280-330	190	8
				310-360	230	7

Tableau 5. Exemples des propriétés d'alliages de la série 5000

6. ALLIAGES À DURCISSEMENT STRUCTURAL

6.1 Alliages aluminium-cuivre (2XXX ou AXX)

Le processus du durcissement de ces alliages a été décrit précédemment (§ 3.3.2). D'autres additions de magnésium, de silicium, sont effectuées pour augmenter encore les propriétés de résistance par précipitation d'une phase Mg_2Si .

Ces alliages peuvent être classés en plusieurs familles suivant leur utilisation.

6.1.1 Alliages pour déformation plastique

(tableau 6)

L'alliage représentatif de cette famille est l'alliage 2117 [AlCu2Mg] : Cu = 2,2-3 %, Mg = 0,2-0,5 %. Le traitement thermique comporte une trempe à l'air calme et une maturation. Ses caractéristiques sont une bonne résistance à la corrosion, une bonne aptitude à la mise en forme par emboutissage et au soudage.

Un autre alliage de cette famille est l'alliage 2002 [AlCu2MgSi], dont les propriétés mécaniques sont améliorées par addition de silicium qui entraîne la précipitation d'une phase durcissante $Al_5Cu_2Mg_8Al_6$.

Nuance	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)	\bar{r}	n
2117 (T4)	300	180	29	0,63	0,248
2002 (T4)	320	180	30	0,59	0,248

où \bar{r} = coefficient d'anisotropie, n = coefficient d'écroutissage (cf. p. 193 et 194)

Tableau 6. Propriétés d'alliages de la série 2000 aptes à la déformation plastique

6.1.2 Alliages à résistance mécanique élevée

Ces alliages contiennent un pourcentage de cuivre plus élevé, de l'ordre de 4 %. Ils sont caractérisés par des résistances élevées à l'état trempé-revenu, une bonne tenue à chaud, mais une soudabilité et une résistance à la corrosion faibles.

Différentes additions sont effectuées :

– magnésium : alliages 2017 A ([AlCu4Mg] ou duralumin) avec 0,4-1 % Mg, et 2024 [AlCu4Mg1] avec 1-1,2 % Mg. Les caractéristiques du deuxième alliage sont meilleures car la teneur plus importante en Mg conduit à la précipitation de la phase Al_2CuMg . Les applications concernent les transports aéronautiques, la mécanique (tableau 7) ;

– silicium + magnésium : alliage 2014 [AlCu4SiMg] avec 0,5-1 % Si et 0,2-0,8 % Mg. Cet alliage a dans l'état T4 des

Nuance	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (Mpa)	A (%)
2017 A	T4	300	180	27
2024 A	T4	465	320	18
	T6	475	390	10
	T81 trempé, écroui 1 %, revenu	480	445	7

Tableau 7. Propriétés d'alliages de la série 2000 à résistance mécanique élevée

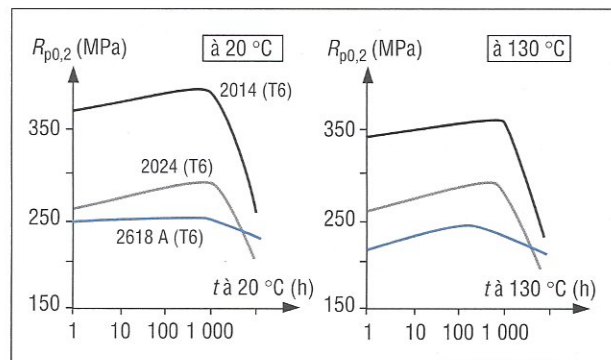


Fig. 19. Comparaison de la résistance à 20 °C et à 130 °C de différents alliages de la série 2000

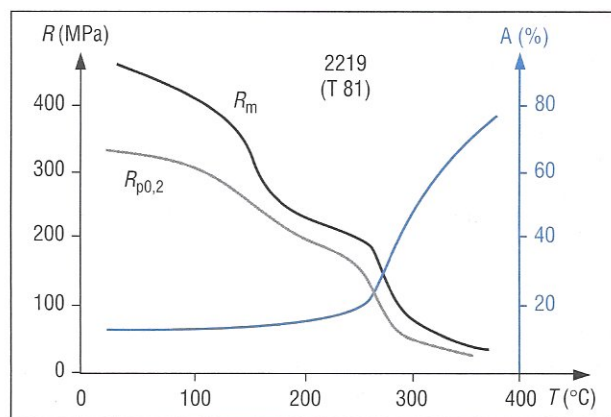


Fig. 20. Propriétés de l'alliage 2219 (traction à T °C après 10 000 h de maintien à T °C)

propriétés équivalentes à celles de l'alliage 2017 A, mais meilleures dans l'état T6 ;

– magnésium + nickel + fer : alliage 2618 A [AlCu2MgNi] avec 1,2-1,8 % Mg, 0,8-1,4 % Ni, 0,9-1,4 % Fe. Dans cet alliage existent, en plus de la phase durcissante Al_2CuMg , des phases insolubles du type Al_3FeNi qui augmentent la tenue à chaud (fig. 19) ;

– nickel : alliage 2218 [AlCu4Ni] avec 1,7-2,3 % Ni. Il est utilisé à l'état T6 sous forme de produits forgés nécessitant une bonne tenue à chaud ;

– manganèse + titane + zirconium : alliage 2219 (non normalisé AFNOR) avec 0,2-0,4 % Mn, 0,02-0,1 % Ti, 0,1-0,25 % Zr. Cette famille présente la meilleure résistance à la traction (fig. 20) et au fluage de 200 °C à 325 °C, et la meilleure soudabilité de la série 2000 ;

– manganèse + magnésium + titane : alliage 2001 [AlCu6MnMgTi] avec 0,15-0,35 % Mn, 0,2-0,4 % Mg, 0,1-0,2 % Ti. Cet alliage est destiné à la fabrication de corps creux sous pression.

6.1.3 Alliages pour décolletage

Pour cette application, les additions classiques de plomb et/ou de bismuth (total < 1,3 %) sont effectuées pour rendre les copeaux cassants. Les nuances normalisées sont les nuances 2030 [AlCu4Pb] et 2011 [AlCu5PbBi].

6.2 Alliages aluminium-silicium-magnésium (6XXX [AlMgSi], [AlSiMg])

Le diagramme d'équilibre (fig. 21) est une coupe du diagramme ternaire Al-Mg-Si pour un rapport atomique Mg/Si = 2. Le composé Mg_2Si peut être considéré comme un composé simple et on peut raisonner sur ce diagramme comme dans le cas de l'alliage aluminium-cuivre. Le durcissement est dû à la précipitation de phases transitoires de Mg_2Si .

Les alliages de la série 6XXX ont une très bonne aptitude à la transformation à chaud et à froid, un bon comportement aux basses températures et une très bonne résistance à la corrosion. Mais leur résistance à chaud est limitée.

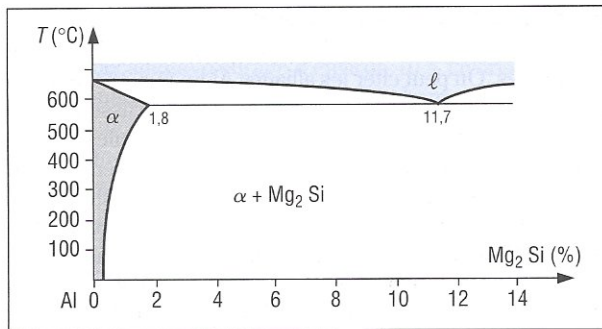


Fig. 21. Diagramme d'équilibre Al-Si (d'après Aluminium Pechiney)

6.2.1 Alliages du type [AlMgSi]

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 (grâce à des additions de Cu et de Cr) et présente la meilleure résistance à la corrosion des alliages trempants.

Une série d'alliages de cette famille est utilisée pour le transport de l'énergie électrique. C'est principalement la nuance 6101 (Almelec), avec 0,55-0,80 % Mg, 0,45-0,65 % Si, Fe ≤ 0,3 % et les autres impuretés limitées au maximum, qui est utilisée.

6.2.2 Alliages du type [AlSiMg]

Dans ces alliages, la teneur en silicium est supérieure à celle du 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 les alliages 6005 A [AlSiMg0,5], 6081 [AlSiMgMn0,3] ou 6082 [AlSiMgMn0,7]. Ces dernières années, des alliages spécifiques ont été développés pour la carrosserie automobile (par exemple 6016). Le tableau 8 regroupe les propriétés de quelques alliages de la série 6000.

Nota : des alliages de décolletage avec plomb existent également dans cette série.

Nuance	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
6060	T5	185	145	
	T651 filé	310	275	17
6061	T5	290	270	11
	T4	230	130	20
6082	T6	320	280	12,5

Tableau 8. Propriétés de quelques alliages de la série 6000

6.3 Alliages aluminium-zinc-magnésium (7XXX ou [AlZnMg])

Le diagramme d'équilibre Al-Zn montre, du côté de l'aluminium, une solution solide à 50 % de Zn à 445 °C, mais à seulement 5 % de Zn à la température ambiante. Cela conduit à des alliages monophasés lorsque la teneur en Zn est inférieure à 5 % et diphasés lorsqu'elle est supérieure à 5 %. Cependant, les alliages obtenus ont des propriétés inférieures à celles des autres alliages d'aluminium, ce qui entraîne que la base Al-Zn, seule, n'est pas utilisée.

En revanche, on utilise l'alliage Al-Zn avec du magnésium, qui devient alors un alliage à durcissement structural avec précipitation tendant vers la phase $MgZn_2$. Le diagramme d'équilibre Al-MgZn₂ est représenté sur la figure 22. Comme pour les autres alliages, le durcissement s'effectue par décomposition de la solution solide sursaturée obtenue par trempe, par apparition de zones GP (voir § 3.3.2) dans les plans {111} de la solution solide. Le maximum est obtenu vers 100 °C pour une précipitation cohérente. Le passage à la phase d'équilibre $MgZn_2$ incohérente correspond au sur-revenu et se traduit par une chute de dureté.

La vitesse critique de trempe correspond à un refroidissement à l'air calme. L'intervalle entre solidus et limite de solubilité en phase α est très grand, ce qui donne un intervalle de mise en solution avant trempe confortable. La cinétique de précipitation est lente.

Les limites de composition sont fixées par des instabilités structurales entraînant des corrosions sous tension et des décohésions. Pour combattre ces problèmes, on ajoute du

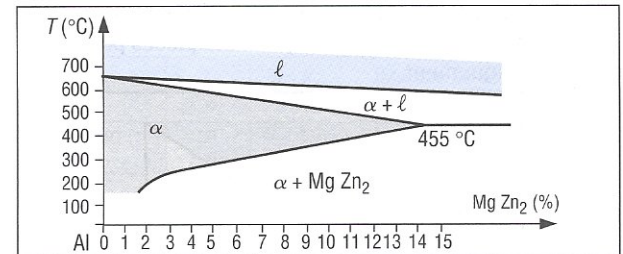


Fig. 22. Diagramme d'équilibre Al-MgZn₂

Nuance	État	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A (%)
7020	T4	350	240	20
	T6	380	310	15
7075	T6	570	500	11
	T73	500	430	13

Tableau 9. Propriétés de deux alliages de la série 7000

chrome (0,1-0,2 %) et surtout du cuivre (1-2 %), ce qui permet d'augmenter la teneur en zinc. Deux familles d'alliages se développent donc (tableau 9) :

- alliages Al-Zn-Mg : alliage 7020 [AlZn5Mg] avec 3,7-5 % Zn, 0,9-1,5 % Mg, qui est le plus utilisé;
- alliages Al-Zn-Mg-Cu : alliage 7075 [AlZn5MgCu] avec 5,1-6,1 % Zn, 2,1-2,9 % Mg, 1,2-2 % Cu, 0,18-0,35 % Cr, qui a des propriétés mécaniques supérieures au 7020.

Les caractéristiques optimales des alliages de la série 7000 sont obtenues par mise en œuvre de traitements thermomécaniques (TTM) complexes, visant à augmenter la ductilité, la ténacité et la résistance à la corrosion sous contrainte, sans dégrader la résistance mécanique.

On emploie deux procédures principales de TTM :

- TTMI ou traitement thermomécanique intermédiaire, qui a pour but de diminuer l'influence néfaste de la structure de coulée en provoquant une recristallisation intermédiaire ;
- TTMF ou traitement thermomécanique final, qui a pour but de créer une structure dislocative dont l'interaction avec les précipités est plus favorable.

7. ALLIAGES ALUMINIUM-SILICIUM (4XXX OU [AlSi])

Le diagramme d'équilibre Al-Si (fig. 23) est caractérisé par un eutectique à 11,7 % Si, et une très faible solubilité du silicium dans l'aluminium.

Les microstructures et les propriétés de ces alliages sont fortement influencées par deux éléments, le sodium et le phosphore :

- le sodium empêche la formation de cristaux de silicium primaire et change la structure de l'eutectique : l'alliage est dit modifié ;
- le phosphore a un effet opposé à celui du sodium : le composé AlP_3 sert de germe pour les cristaux de silicium primaire. Ces alliages sont surtout utilisés au voisinage de cette composition eutectique comme alliages de fonderie : ce sont les alliages [AlSi13] (ou Alpac), qui ont une aptitude au moulage excellente. Ils sont utilisés pour des pièces peu sollicitées mécaniquement.

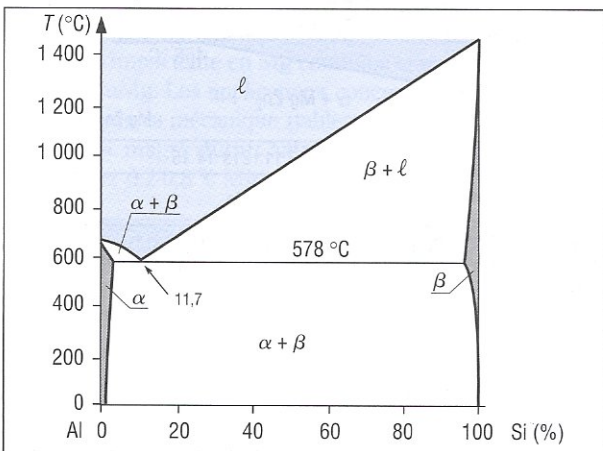


Fig. 23. Diagrammes d'équilibre Al-Si

D'autres alliages qui peuvent être corroyés et traités thermiquement sont obtenus avec des additions de magnésium, de nickel et de cuivre :

- l'alliage [AlSi7Mg] ;
- les alliages [AlSi9Cu3] (utilisés pour des culasses, des carters, etc.) ;
- les alliages hypersiliés [AlSi20Cu], [AlSi22CuNiCo] utilisés pour la fabrication de pistons grâce à leur faible coefficient de dilatation ($18.10^{-6}K^{-1}$), à leur bonne tenue à l'usure et leur bonne tenue à chaud.

8. AUTRES ALLIAGES D'ALUMINIUM

8.1 Alliages de la série 8000

Ces alliages comprennent des familles aux propriétés bien spécifiques. On peut citer les alliages Al-Fe (1 à 2 %), qui permettent l'obtention de bandes minces d'une épaisseur de 10 à 100 μm . Ces alliages sont utilisés pour les capsules de bouchage, les emballages simples et le papier ménager. Ce sont les alliages 8011 (AlFeSi), 8006 (AlFeMn), 8018 (AlFeSiCu). Les alliages pour frottement sont des alliages Al-Sn renforcés de différentes additions (Cu, Ni, etc.). Les alliages à 6 % d'étain (type 8020) permettent la fabrication de produits massifs (coussinets), tandis que les alliages à 20 % d'étain (type 8081) sont déposés par colaminage sur un support en acier pour le même type d'application.

8.2 Alliages aluminium-lithium

Dans le domaine aéronautique et aérospatial, pour diminuer la consommation de carburant et augmenter la charge utile, il faut alléger les structures. On peut pour cela modifier le dessin des pièces en utilisant des matériaux à propriétés améliorées. Mais le moyen le plus efficace reste le recours à des matériaux plus légers. Une nouvelle catégorie d'alliages d'aluminium, les alliages aluminium-lithium, a été développée dans ce but. De masse volumique plus faible et de module de Young plus élevé que les autres alliages d'aluminium, ils offrent l'intérêt, par rapport aux matériaux composites à matrices organiques, de ne changer ni les techniques de fabrication, ni les procédures de contrôle.

Ces alliages ont été introduits vers le début du siècle, abandonnés une première fois, réintroduits dans les années 50, abandonnés une deuxième fois dans les années 70 à cause de leurs très mauvaises performances sur le plan de la ductilité et de la ténacité à rupture.

Ils sont intéressants car une addition de 1 % en masse de Li diminue leur masse volumique de 3 % et augmente leur module de Young de 6 %. Ces perspectives alléchantes expliquent la reprise des études et la mise au point de modifications permettant par un contrôle microstructural plus pointu de pallier les inconvénients précédents.

Leur durcissement est lié à la formation au cours du revenu de précipités δ' - Al_3Li cohérents avec la matrice, qui ont la particularité, contrairement à la majorité des autres alliages d'aluminium, de rester cohérents même après des vieillissements artificiels de longue durée.

Trois alliages commerciaux ont été développés : les nuances 2090-2091 et 8090 contenant de 1,7 à 2,7 % de Li et couvrant la gamme de propriétés des alliages classiques types 2024-T3, 2214-T6 et 7075-T73 avec un gain de densité de 8 à 12 % (tableau 10). Les demi-produits sont des tôles minces ($e < 3,5$ mm) et semi-épaisses ($3,5 \text{ mm} < e < 8$ mm) et des produits extrudés.

L'addition d'environ 0,1 % de Zr et l'emploi d'un traitement de type T8 permettent d'améliorer considérablement la ténacité à rupture K_{IC} . Le zirconium donne des précipités cohérents Al_3Zr qui servent de germes à la phase δ' - Al_3Li et conduisent à la formation de précipités « duplex » non cisailables par les dislocations. Les bandes de déformation ne sont plus localisées mais dispersées, avec comme conséquence une meilleure ductilité et une meilleure ténacité à rupture. Un traitement thermomécanique d'étirage d'environ 10 % favorise une dispersion intragranulaire très fine et très homogène des précipités et améliore encore les propriétés précédentes, ainsi que la résistance à la traction.

Ces alliages ont une tenue en fatigue supérieure à celle des autres alliages de la série 2xxx ou 7xxx, tout au moins pour des spectres de sollicitation essentiellement en traction. Les trajets de fissures y sont structurellement tortueux et donnent des lèvres de fissures rugueuses, ce qui retarde la propagation par un phénomène décrit dans le chapitre sur la mécanique de la rupture. Cet avantage disparaît pour les cycles essentiellement en compression et pour les fissures courtes.

Les applications des alliages Al-Li restent, en majorité, dans le domaine des potentialités, que ce soit pour le remplacement d'autres alliages comme le 7075 ou le 2024 ou pour leur prise en compte dans la conception de structures nouvelles. L'accroissement actuel des capacités de production de lingots, de billettes, de plaques et de tôles en une variété d'alliages Al-Li témoigne du regain d'intérêt pour ces matériaux.

Les alliages Al-Cu-Li-Mg-Ag plus récents, 2094, 2096, 2195 (famille Weldalite 049) de très bonne soudabilité ainsi que l'alliage Al-Cu-Li-Mn, 2197, sont pris en considération dans des programmes spatiaux et aéronautiques et entrent déjà dans quelques applications commerciales.

Code Pechiney	Norme	Propriétés	ρ (kg.m ⁻³)	E (MPa)
CP274	2091	Moyenne résistance + ténacité	- 8 %	+ 7 %
CP271	8090	Moyenne résistance + faible densité	- 10 %	+ 11 %
CP276	2XXX	Haute résistance	- 3 %	+ 11 %

Tableau 10. Quelques alliages Al-Li

8.3 Alliages obtenus par métallurgie des poudres

La métallurgie des poudres, décrite par ailleurs, est très prometteuse pour obtenir des alliages d'aluminium à haute résistance mécanique, résistant à l'usure et au frottement,

et surtout résistants à chaud. Pour cette dernière propriété, une application consiste à obtenir, par solidification rapide, un renforcement par dispersion fine et homogène de phases intermétalliques stables en volume important (20 à 40 %). La plupart des alliages développés sont à base de fer (8 à 12 %) avec des additions soit de cérium, soit de vanadium et de silicium, soit de molybdène. Il apparaît possible d'envisager des températures d'utilisation de ces alliages voisines de 300 à 400 °C alors que l'usage des alliages traditionnels (nuance 2219) est limité à 200-250 °C.

8.4 Matériaux composites à matrice aluminium

Le renforcement des alliages d'aluminium peut être obtenu par des fibres de carbone, d'acier inoxydable, mais il est plus couramment réalisé par des fibres ou particules de céramiques (SiC, Al_2O_3). Les fibres sont alors polycristallines, monocristallines (« whiskers »), de diamètre compris entre 2 et 10 μ m, longues de quelques dizaines de μ m (fibres courtes) à quelques mm (fibres longues). Les fibres peuvent être assemblées sous forme de « préformes ».

Les particules ont un diamètre qui varie de 5 à 30 μ m. La réalisation de pièces s'effectue par deux voies : par infiltration de préformes par l'aluminium liquide, ou, selon un processus de fonderie, par fusion d'un lingot de matériau composite (cas des particules principalement). Les propriétés obtenues apparaissent dans les tableaux 11 et 12. On remarquera le gain en valeur du module de Young, le gain en résistance à chaud, mais la forte perte de ductilité. La résistance à l'usure est également augmentée.

Bien qu'un fournisseur ait mis à son catalogue des alliages de fonderie (société Duralcan), on ne trouve que peu d'applications dans l'industrie à cause du coût de ces matériaux (deux à cinq fois le prix de l'aluminium non renforcé). Seule l'aéronautique utilise de tels alliages (rotors d'hélicoptères), et l'industrie automobile s'intéresse au développement de disques de frein, d'arbres de transmission et de renforcements locaux (pontets intersoupapes, chemises, etc.).

Matériau	T (°C)	R_m (MPa)	Module de Young (MPa)	A (%)
AlCu5MgTi (T6) non renforcé	20	370	68 000	6,6
	200	290	59 000	9,8
	300	125	51 000	15
Renforcé avec 20 % fibres Al_2O_3	20	390	90 000	1,4
	200	275	74 000	1,9
	300	165	26 000	2,9

Tableau 11. Comparaison entre un matériau non renforcé et un matériau renforcé

Matériau	T (°C)	R_m (MPa)	Module de Young (MPa)	A (%)
AlSi10Cu3Mg (T6) + 20 % SiC	20	350	90 000	0,05

Tableau 12. Caractéristiques d'un alliage de fonderie renforcé par des particules