

Publié par :



Le « Feuillard technique » est publié exclusivement sur le site Internet du CQRDA. Pour télécharger cette publication, rendez-vous au <http://cqrda.ca/feuillard.php> ou au [http://cqrda.ca/ar\\_publications.php](http://cqrda.ca/ar_publications.php). Pour toute demande d'information, n'hésitez pas à nous contacter au 418 545-5520.

## Quelques définitions

- Réseau cristallin :** arrangement des atomes dans un cristal.
- Matrice :** principal constituant d'un alliage. Il présente une certaine continuité et les autres constituants y sont enrobés.
- Écrouissage :** augmentation de la dureté et de la résistance produite par une déformation plastique effectuée au-dessous de la température de recristallisation.
- Précipités :** constituant formé à partir d'une solution liquide ou solide, généralement lors de variations des conditions de température ou de pression ou des deux à la fois.
- Limite élastique :** la plus grande contrainte mécanique qu'une matière supporte sans qu'aucune déformation relative permanente ne subsiste après la suppression totale de la contrainte.
- Résistance en traction :** résistance d'un matériau, d'une pièce ou d'un ensemble de pièces à la rupture par traction. Il s'agit en principe de la contrainte maximale (c'est le quotient de la charge maximale, enregistrée lors de la traction d'une éprouvette, par la section initiale de cette éprouvette) que peut supporter le matériau ou la pièce; dans ce sens, le terme anglais « Tensile Strength » est synonyme d'« Ultimate Tensile Stress ».
- Allongement à la rupture :** extension permanente d'un échantillon, étiré jusqu'à la rupture lors d'un essai de traction. Le pourcentage d'allongement est une indication de la ductilité.
- Ductilité :** propriété d'un matériau à se laisser déformer facilement sous certaines conditions de température, de pression et de vitesse de sollicitation; en particulier d'un métal à se laisser étirer facilement sans se rompre.
- Recuit :** méthode de chauffage contrôlé, suivi d'un refroidissement contrôlé et, en général, lent, par lequel on recourt pour obtenir la ductilité des métaux.

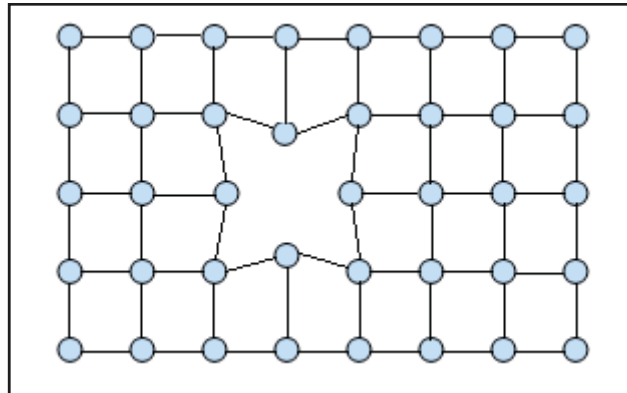
D'une façon générale, le traitement thermique fait référence à toutes les opérations de chauffage et de refroidissement faites dans le but de changer les caractéristiques mécaniques et la microstructure d'un métal ou les tensions résiduelles dans une pièce. Pour les alliages d'aluminium, le terme traitement thermique est surtout utilisé pour les opérations visant à augmenter les propriétés mécaniques des alliages de corroyage et de moulage dits « à durcissement structural » (tableau 1). On désigne ces familles d'alliages comme traitables thermiquement de façon à les distinguer des familles d'alliages à durcissement par écrouissage dont les propriétés mécaniques (limites élastiques et résistances à la traction) ne sont que peu ou pas augmentées par les traitements thermiques.

**Tableau 1**  
**Familles d'alliages à durcissement structural**

Familles d'alliages à durcissement structural	
Fonderie	Corroyage
2xx.x — Alliages Al-Cu	2xxx — Alliages Al-Cu
3xx.x — Alliages Al-Si + Cu ou Mg	6xxx — Alliages Al-Mg-Si
7xx.x — Alliages Al-Zn	7xxx — Alliages Al-Zn
8xx.x — Alliages Al-Sn	

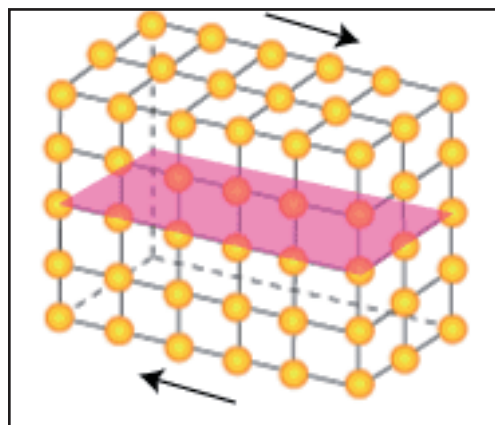
Le réseau cristallin d'un métal présente des imperfections dont les lacunes (absence d'atome à un nœud du réseau) (figure 1) permettent l'introduction d'atomes étrangers (éléments d'alliages), et leur déplacement dans le réseau. On parle de « solution à l'état solide » pour la distinguer d'une solution dans un liquide. Les atomes ajoutés (un métal tel le magnésium Mg, le cuivre Cu, le zinc Zn ou le silicium Si) peuvent se combiner entre eux et à ceux de l'aluminium pour former un réseau spécifique plus stable et différent de celui de la matrice d'aluminium laquelle contiendrait les atomes étrangers en solution solide. On nomme « constituants intermétalliques » ces réseaux spécifiques formant des précipités dans la matrice d'aluminium. Dans les alliages d'aluminium, les constituants intermétalliques les plus fréquemment rencontrés sont  $AlCu_2$ ,  $Mg_2Si$ ,  $MgZn_2$  et  $Al_2CuMg$ . On reconnaît dans ces composés intermétalliques les principaux éléments des familles d'alliages sensibles aux traitements thermiques.

**Figure 1**  
**Représentation 2D d'une lacune dans un réseau cristallin**



La limite élastique est atteinte lorsque les forces qui agissent sur une pièce provoquent un glissement des plans du réseau cristallin (figure 2). La déformation plastique cumulée qui en résulte provoque, par la suite, une rupture (résistance en traction). On peut comprendre que si les glissements ne sont pas possibles, le métal ne peut être mis en forme par déformation plastique. L'augmentation de la résistance mécanique se fait donc, du moins en partie, au détriment de la ductilité.

**Figure 2**  
**Glissement dans un réseau cristallin**



Aussi voir le site : <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/FRE/default.asp?catid=155&pageid=2144416466>

Les précipités jouent le rôle d'obstacles aux glissements susceptibles de se produire dans le réseau cristallin. Les précipités fins et bien dispersés sont plus efficaces pour bloquer les glissements. Le traitement thermique contrôle la dispersion et la taille des précipités de façon à maximiser leur effet. On peut ainsi, si on le souhaite, obtenir la résistance mécanique maximale que peut offrir un alliage. Le traitement thermique pour le durcissement structural des alliages d'aluminium est un procédé en trois étapes :

- 1 Mise en solution : maintien d'une pièce à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez longue pour que les éléments d'alliage soient distribués de façon homogène. Le temps de chauffage varie selon la géométrie de la pièce. Il peut aller d'une minute pour une feuille mince à 20 heures pour une grosse pièce de fonderie au sable. Il faut accorder une attention particulière à la disposition des pièces dans le four pour assurer un chauffage homogène. On respectera les paramètres de mise en solution puisqu'une surchauffe entraînera la perte des propriétés et une dégradation de la pièce. Au contraire, un chauffage insuffisant ou inégal signifiera que la pièce n'atteindra pas les propriétés mécaniques souhaitées.
- 2 Trempe : refroidissement rapide d'une pièce pour l'amener à la température ambiante afin de préserver l'effet de la mise en solution. On va donc amener l'alliage le plus rapidement possible à la température ambiante de manière à immobiliser les atomes dans leur position en solution solide. La trempe est, de bien des façons, l'étape la plus critique dans le procédé de traitement thermique parce que le refroidissement rapide introduit des contraintes. Cela explique que bien que la trempe se réalise le plus souvent par immersion dans l'eau fraîche, il arrive que les pièces complexes, ayant de grandes variations dans l'épaisseur de ses parois, soient trempées dans un milieu procurant un refroidissement moins rapide, comme l'eau chaude, une solution aqueuse de glycol, de l'air forcé ou un brouillard (parfois au détriment des propriétés métallurgiques optimales).
- 3 Vieillessement : juste après la trempe (on dit : état de trempe fraîche), l'alliage se trouve dans un état très malléable et, dépendamment de l'alliage, reste dans cet état pour quelques minutes, quelques heures ou quelques jours. Au cours de cette période, on procédera à des opérations de dégauchissement ou de mise en forme. Le durcissement structural (formation de précipités) produit ensuite à température ambiante pendant une longue période, ce qu'on appelle le vieillissement naturel, ou, dans un four à température et temps contrôlés, le vieillissement artificiel.

### Système de désignation des états métallurgiques

Le système de désignation des états métallurgiques des alliages traitables thermiquement est le même pour les alliages de produits corroyés et les alliages de fonderie. Le système est basé sur les séquences de traitements mécaniques et thermiques, utilisés pour produire les différents états. La désignation est à la suite du numéro d'alliage et séparé de celui-ci par un tiret. Les états de base consistent en une lettre majuscule. On indique les subdivisions par un ou des chiffres suivant la lettre. Ces chiffres désignent les séquences des traitements thermomécaniques qui produisent une combinaison spécifique de caractéristiques. Les conditions du traitement thermique (comme la température et le temps de vieillissement, la température de mise en solution et la sévérité du refroidissement au cours de la trempe) utilisées pour obtenir un état donné varient d'un alliage à l'autre.

**Tableau 2**  
**Différence de paramètres pour un même état métallurgique**

Différence de paramètres de traitement thermique pour obtenir l'état T6 pour des alliages de fonderie					
Alliages	Mise en solution		Trempe	Vieillessement artificiel	
	Température (°C)	Temps (h)		Température (°C)	Temps (h)
201.0 — T6	525-530	14-20		155	20
A356.0 — T6	540	12		155	3-5
771.0 — T6	590	6		130	3
851.0 — T6	480	6		220	4

## États de base

### F **Brut de fabrication**

Cet état s'applique aux produits issus de procédés de transformation au cours desquels aucun contrôle de durcissement structural ou d'écrouissage n'a été utilisé. Pour les produits de corroyage dans cet état, on ne donne aucune limite de propriété.

### O **Recuit**

Cet état s'applique aux produits corroyés, recuits pour obtenir l'état avec la plus faible résistance mécanique. Il s'applique aussi aux produits moulés, recuits pour augmenter leur ductilité et leur stabilité dimensionnelle. Le O est suivi par un chiffre autre que 0.

### H **Écroui (alliages de corroyage seulement)**

Cet état s'applique aux produits dont la résistance augmente par écrouissage, avec ou sans traitements thermiques supplémentaires, pour produire des diminutions de résistance. Le H est toujours suivi par au moins un chiffre. (Sera traité dans le prochain Feuillard technique).

### W **Traitement de mise en solution**

Cet état instable s'applique uniquement aux alliages qui vieillissent spontanément à température ambiante après un traitement thermique de mise en solution. Cette désignation est spécifique seulement lorsqu'on indique la période de vieillissement à température ambiante; exemple « W ½ hr ».

### T **Traitements thermiques pour obtenir un état stable autre que F, O ou H**

S'applique aux produits traités thermiquement pour obtenir des états stables, avec ou sans écrouissage supplémentaire. Au moins un chiffre suit toujours le T.

## Subdivision des états T; durcis structurellement

*La numérotation de 1 à 10 suivant le T indique la séquence spécifique des traitements de base.*

### T1 **Refroidi d'un procédé de transformation à chaud et vieilli à température ambiante pour obtenir un état stable**

S'applique aux produits non travaillés à froid après le refroidissement, suite à la transformation à chaud ou chez lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce ne modifient pas les propriétés mécaniques de celle-ci

### T2 **Refroidi d'un procédé de transformation à chaud, travaillé à froid et vieilli à température ambiante pour obtenir un état stable**

S'applique aux produits travaillés à froid afin d'améliorer leur résistance après qu'ils soient refroidis, suite à la transformation à chaud ou chez lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce modifient les propriétés mécaniques de celle-ci.

### T3 **Trempe travaillée à froid et vieillie à température ambiante pour obtenir un état stable**

S'applique aux produits travaillés à froid pour augmenter leur résistance, suite à une trempe ou chez lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce modifient les propriétés mécaniques de celle-ci.

### T4 **Trempe vieillie à température ambiante pour obtenir un état stable**

S'applique aux produits travaillés à froid suite à une trempe et où les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce ne modifient pas les propriétés mécaniques de celle-ci. (Selon les alliages, vieillissement de deux semaines pour un état stable.)

### T5 **Refroidi d'un procédé de transformation à chaud suivi d'un vieillissement artificiel**

S'applique aux produits non travaillés à froid suite à une trempe ou chez lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce ne modifient pas les propriétés mécaniques de celle-ci.

**T6 Trempe suivie d'un vieillissement artificiel**

S'applique aux produits non travaillés à froid, suite à une trempe ou chez lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce ne modifient pas les propriétés mécaniques de celle-ci.

**T7 Trempe suivie d'un survieillissement/stabilisation**

S'applique aux produits corroyés ayant reçu un vieillissement artificiel suite à une trempe afin de les amener à un point au-delà de la résistance maximale et ainsi contrôler certaines caractéristiques importantes. Cette définition touche également les produits moulés qui ont subi un vieillissement artificiel après une trempe afin de stabiliser leur intégrité dimensionnelle et leur résistance.

**T8 Trempe travaillée à froid, suivie d'un vieillissement artificiel**

S'applique aux produits travaillés à froid pour augmenter leur résistance ou pour lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce modifient leurs propriétés mécaniques.

**T9 Trempe : vieillissement artificiel, suivi d'un travail à froid**

S'applique aux produits travaillés à froid pour augmenter la résistance.

**T10 Refroidi d'un procédé de transformation à chaud, travaillé à froid, suivi d'un vieillissement artificiel**

S'applique aux produits travaillés à froid pour augmenter la résistance ou pour lesquels les effets du travail à froid pour l'aplanissement ou le redressement de la pièce modifient leurs propriétés mécaniques.

On ajoute des chiffres additionnels, dont le premier ne peut pas être zéro, à la suite des désignations T1 à T10 pour indiquer une variation laquelle modifie significativement les caractéristiques du produit par rapport à celles obtenues suite au traitement de base. Toutefois, certains chiffres supplémentaires ont une signification précise par exemple T51 pour une détente par étirage ou T52 pour une détente par compression.

**Tableau 3**  
**Propriétés mécaniques de l'alliage 6063 à différents états métallurgiques**

État	Résistance à la traction		Limite élastique		Allongement %	Dureté <sup>a</sup> HB	Résistance au cisaillement		Résistance en fatigue <sup>b</sup>	
	MPa	ksi	MPa	ksi			MPa	ksi	MPa	ksi
O	90	13	48	7	—	25	69	10	55	8
T1	152	22	90	13	20	42	97	14	62	9
T4	172	25	90	13	22	—	—	—	—	—
T5	186	27	145	21	12	60	117	17	69	10
T6	241	35	214	31	12	73	152	22	69	10
T83	255	37	241	35	9	82	152	22	—	—
T831	207	30	186	27	10	70	124	18	—	—
T832	290	42	269	39	12	95	186	27	—	—

**a)** charge de 500 kg load/ bille 10 mm diam.

**b)** 5 X 10<sup>8</sup> cycles, test R.R. Moore

Bien que rarement rencontré, il existe d'autres désignations des états métallurgiques tels qu'on peut le voir dans le tableau 4.

**Tableau 4**  
**Autres désignations des états métallurgiques**

Désignations équivalentes des états métallurgiques					
Europe	Allemagne	Royaume-Uni	États-Unis	ISO	Inde
EN	DIN				
F	0,07	M	F	M, F	M
F	0,08	M	F	M, F	M
O	0,01n	O	O	O	O
H1	0,20	H	H1	H1	H
H11	0,22	—	H11	—	—
H12	0,24	H2	H12	H1B	H1
H14	0,26	H4	H14	H1D	H2
H16	0,28	H6	H16	H1F	H3
H18	0,30	H8	H18	H1H	H4
H19	0,32	—	H19	H1J	—
H19	0,33	—	H19	H1J	—
H19	0,34	—	H19	H1J	—
H19	0,35	—	H19	H1J	—
H21	0,23	—	H21	—	—
H22	0,25	H2	H22	H2B	H1
H24	0,27	H4	H24	H2D	H2
H26	0,29	H6	H26	H2F	H3
H28	0,31	H8	H28	H2H	H4
H32	—	—	H32	H3B	H1
H34	—	—	H34	H3D	H2
H36	—	—	H36	H3F	H3
H38	—	—	H38	H3H	H4
T1	—	—	T1	TA	—
T2	—	—	T2	TC	—
T3	0,51	TD	T3	TD	WD
T4	0,41	TB	T4	TB	W
T5	0,61 0,71	TD	T5	TE	P
T6	0,61 0,62	TF	T6	TF	WP
T6	0,71 0,72	TF	T6	TF	WP
T7	—	—	T7	TM	WS
T8	0,73	TH	T8	TH	WDP
T9	—	—	T9	TL	WPD
—	—	—	T10	TG	—

## Sources de référence en ligne

Le site [www.matweb.com](http://www.matweb.com) est une base de données contenant l'information sur plus de 68 000 matériaux : polymères, céramiques ou métaux et, plus particulièrement, au-dessus de 1 200 produits d'aluminium différents. Pour chaque matériau, MatWeb offre les compositions chimiques ainsi que les propriétés physiques, mécaniques et thermiques.

Le <http://aluminium.matter.org.uk> est un site web facilement accessible lequel vise à fournir des outils de formation en ligne innovants et interactifs relatifs à la science et aux technologies de l'aluminium.

## Fournisseurs de traitements thermiques

[icriq.com](http://icriq.com)-Aluminium, le répertoire des entreprises en transformation de l'aluminium permet d'identifier un fournisseur correspondant à vos besoins. Disponible uniquement sur notre site, nous vous invitons à le consulter au [www.cqrda.ca/icriq.php](http://www.cqrda.ca/icriq.php).

## Bibliographie

Aluminum and Aluminum Alloys, ASM Specialty Handbook, 1996.

KAUFMAN, J. Gilbert. Introduction to Aluminum Alloys and Tempers, Materials Parks, Ohio, ASM International, 1999, 400 p.

KAUFMAN, J. Gilbert. Properties of Aluminum Alloys : Tensile, Creep & Fatigue Data, Materials Parks, Ohio, ASM International, 1999, 400 p.

RICHARD, Michel et TESSIER, Yves. Les traitements thermiques des alliages d'aluminium moulés, Sèvres, ÉTIF, 1992, 92 p.

VARGEL, Christian. Corrosion de l'aluminium, Paris, Dunod, 1999, 502 p.

### Le Feuillard technique est publié par :

Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium  
637, boulevard Talbot, bureau 102  
Chicoutimi (Québec) G7H 6A4  
Téléphone : 418 545-5520 | Télécopieur : 418 693-9279  
[info@cqrda.ca](mailto:info@cqrda.ca) | [www.cqrda.ca](http://www.cqrda.ca)

#### Rédaction

Édith Villeneuve

#### Collaboration

Maurice Duval

#### Conception

Mireille Clusiau

#### Révision linguistique

Communication Velpro inc.



Partenaire financier :

