

L'ALUMINIUM :

Désignation normalisée

1. Comment fabrique-t-on l'aluminium

Pour obtenir de l'aluminium, on part d'un minerai, la bauxite, dont on extrait par un procédé chimique, un oxyde d'aluminium, l'alumine.

1.1. La bauxite, principal minerai d'aluminium

La bauxite contient de 40 à 60 % d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer. C'est l'oxyde de fer qui donne sa couleur rouge caractéristique à la bauxite.



Le nom de « bauxite » vient du village des Baux-de-Provence des Bouches-du-Rhône (France), plus vieux gisement aujourd'hui épuisé.

Le minéralogiste Pierre Berthier analysa le minerai en 1821.

Les principales réserves minières de bauxite sont concentrées dans trois grandes zones :

- L'Amérique centrale : Jamaïque, Guyane, Guyana, Surinam, le nord du Brésil,
- L'Afrique : pourtour du golfe de Guinée, dont Guinée et Cameroun,
- L'Australie, l'Indonésie, l'Inde.

1.2. L'intermédiaire, l'alumine

4 tonnes de bauxite sont nécessaires pour obtenir 2 tonnes d'alumine, desquelles on extrait par électrolyse 1 tonne d'aluminium.

Caractéristiques :

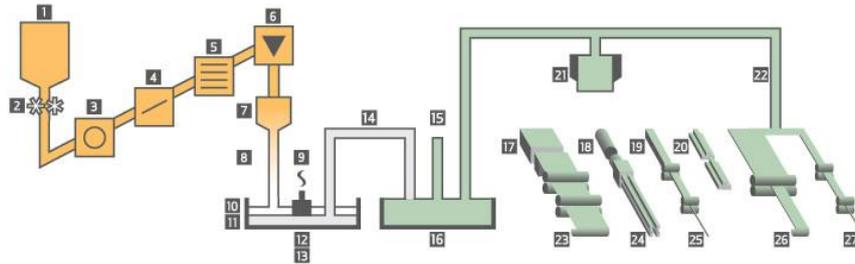
- Formule : Al_2O_3
- Aspect : Poudre blanche et fine
- Propriété : Très dure, chimiquement inerte et peu conductrice d'électricité

1.3. Le procédé Bayer

Le procédé de production industrielle d'alumine à partir de la bauxite a été mis au point en 1887 par le chimiste Karl-Josef Bayer. Il est toujours exploité aujourd'hui grâce à des améliorations essentielles apportées au cours du temps.

La bauxite est broyée puis mélangée à de la soude caustique à haute température et sous pression. La liqueur obtenue, l'aluminate de sodium, est débarrassée de ses impuretés (boue rouge), puis diluée et refroidie, ce qui provoque la précipitation d'oxyde d'aluminium hydraté-Hydroxyde d'aluminium $Al(OH)_3$. Celui-ci est alors calciné à $1200^{\circ}C$ pour obtenir l'alumine Al_2O_3 destinée à la production d'aluminium.

UN PROCÉDÉ DE FABRICATION MULTIDIMENSIONNEL



ALUMINIUM DE PREMIÈRE FUSION

ALUMINIUM DE DEUXIÈME FUSION

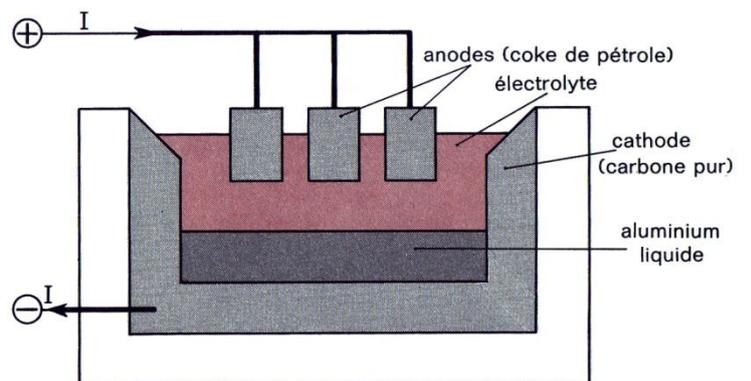
EXTRACTION DE L'ALUMINE À PARTIR DE BAUXITE	PROCÉDÉ D'ÉLECTROLYSE TRANSFORMANT L'ALUMINE EN ALUMINIUM	FONDERIE/RECYCLAGE ET TRANSFORMATION DE L'ALUMINIUM
1 BAUXITE	8 ALUMINE	15 MÉTAUX D'ALLIAGE
2 BROYEUR	9 ANODE	16 FOUR D'ATTENTE
3 AUTOCLAVE	10 ÉLECTROLYTE EN FUSION	17 LINGOT DE LAMINAGE
4 DÉCANTEUR	11 ALUMINIUM DE FUSION	18 LINGOT D'EXTRUSION
5 FILTRE-PRESSE	12 CATHODE	19 LINGOT DE TRÉFILAGE
6 DÉCOMPOSEUR	13 CUVE D'ÉLECTROLYSE	20 LINGOT DE REFONTE / FONDERIE
7 FOUR DE CALCINATION	14 ÉTAUX D'ALLIAGE	21 COULÉE EN LINGOTS
		22 COULÉE EN CONTINU
		23 TÔLE
		24 PROFILÉS
		25 FIL MACHINE
		26 TÔLE
		27 FIL MACHINE

1.4. La production d'aluminium : de l'alumine au métal

L'aluminium primaire est obtenu par **électrolyse de l'alumine** selon le procédé découvert en 1886, au même moment mais indépendamment l'un de l'autre, par l'Américain Charles Martin Hall et le Français Paul Héroult.

Le procédé consiste à réduire par électrolyse de l'alumine dissoute dans un bain de cryolithe (l'hexafluoroaluminate de sodium Na_3AlF_6) fondue à environ 1000 °C, dans une cuve traversée par un courant électrique de haute intensité. Ainsi soumis à l'action du courant électrique continu (c'est-à-dire passant toujours dans le même sens), les ions sont transportés aux deux électrodes.

L'électrode positive, l'anode, par où entre le courant, attire les charges négatives, l'oxygène (O^{2-}). L'anode est placée en haut du creuset où s'effectue l'électrolyse ; l'oxygène peut ainsi se dégager sous forme de CO_2 gazeux, après avoir brûlé le carbone qui constitue l'anode.



L'électrode négative, la cathode, par où sort le courant, attire les charges positives de l'aluminium (Al^{3+}). La cathode est située au fond du creuset où l'aluminium liquide plus lourd que le bain se dépose et reste sous forme d'une couche liquide.

Le phénomène global se traduit par la réaction : $2 \text{Al}_2\text{O}_3 + 3 \text{C} \rightarrow 4 \text{Al} + 3 \text{CO}_2$

1.5. Électrolyse de l'alumine

L'aluminium métal liquide se dépose au fond de la cuve lors de l'électrolyse. Il est régulièrement prélevé par siphonage dans une poche de coulée et conduit en fonderie pour être traité et mis en forme. De là, il sera transporté dans les usines de transformation.

1.6. Transformation de l'aluminium

L'aluminium obtenu par électrolyse est livré à des usines spécialisées où il est transformé en produits semi-finis, eux-mêmes destinés aux industries consommatrices.

Aux quatre grandes familles de procédés de transformation correspondent quatre types de productions :

- Les **plaques de laminage** pour la fabrication de tôles d'épaisseurs diverses utilisées dans les ailes d'avion, les citernes, le bardage, la fabrication de boîtes (emballage), la feuille mince...
- Les **billettes** de filage, cylindriques, pour la fabrication de la menuiserie métallique, des châssis et armatures de véhicules ferroviaires et routiers, des bâtons de ski ; et les billettes de forge pour les trains d'atterrissage, les bouteilles sous pression, etc.
- Le **fil machine** à usage mécanique (rivets, fil de soudage, grillage...)
- Les **lingots** destinés notamment à la fonderie (blocs-moteur pour l'automobile par exemple).



2. Généralités

Pur, l'aluminium qui présente une bonne tenue à l'air et aux corrosions courantes est utilisé notamment dans l'industrie de l'emballage. Il est malléable, ductile et peu résistant mécaniquement.

En alliage avec le cuivre (**duralumin**), il peut subir des traitements thermiques améliorant ses propriétés mécaniques, ce qui permet de l'utiliser dans l'industrie aéronautique. **Allié au silicium**, il est **moulé** pour la production notamment de blocs-moteurs et pistons d'automobiles.

3. Norme en vigueur

Conformément aux directives de l'Aluminium Association (Washington DC 2006, USA), 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.

Ce cours s'appuie sur différentes normes :

NF EN 573-1 (fev 2005) : Aluminium et alliages - Composition chimique et formes des produits **corroyés** (**Désignation numérique**)

NF EN 573-2 (oct 1994) : Aluminium et alliages - Composition chimique et formes des produits **corroyés** (**Désignation fondée sur les symboles chimiques**)

NF EN 1780-1 (janv 2003) : Aluminium et alliages – Lingots pour refusion en alu allié et produits moulés (désignation numérique)

ISO 209 :2007 : Aluminium et alliages – composition chimique

Il peut être intéressant de consulter la norme **NF EN 12258-1** concernant les termes et définitions des alliages d'aluminium.

Ex : retassure : vide laissé dans une pièce coulée résultant du retrait pendant la solidification.

4. Désignation numérique et symbolique des alliages d'aluminium

4.1. Désignation de l'aluminium corroyé

4.1.1. Aluminium corroyé

Le corroyage est une opération consistant à déformer une pièce avec allongement (forgeage, laminage, etc...) à chaud ou à froid afin d'obtenir une pièce de la forme désirée.

Il est à noter que la norme européenne **EN 573-1 (produits corroyés)** indique qu'un ensemble de 4 chiffres doit être précédé, pour les alliages destinées à être corroyés, par le préfixe EN, les lettres « A » (aluminium), « W » (pour les produits corroyés, wrought en anglais) et un tiret « - ».

Ex : EN AW-5052, EN AW-1070

4.1.2. Désignation numérique de l'aluminium corroyé non allié

La désignation numérique de l'aluminium corroyé non allié est constituée :

- Du préfixe **EN** suivi d'un espace
- De la lettre **A** qui représente l'aluminium
- De la lettre **W** qui représente les produits corroyés
- D'un **tiret**
- De **quatre chiffres** indiquant la pureté de l'aluminium :
 - Le premier chiffre est le **1** qui indique que le matériau est de l'aluminium avec une pureté supérieure ou égale à 99 %
 - Le **deuxième chiffre indique le nombre d'impuretés** pour lesquelles des contrôles sont prévus (0 correspond à l'alliage originel. Les chiffres de 1 à 9 correspondent aux modifications successives)
 - Les deux derniers chiffres indiquent le pourcentage d'aluminium (multiplié par 100) au-delà de 99 %.

Exemple : EN AW-1070. Cet aluminium (EN A) est corroyé (W) et composé d'aluminium ayant une pureté de 99,7 % (99 + 70/100).

4.1.3. Désignation symbolique de l'aluminium corroyé non allié

Elle est composée du symbole chimique de l'aluminium Al suivi de la pureté du métal exprimé en pourcentage avec une ou deux décimales.

Exemple : EN AW-1080[Al99,8] ou EN AW-Al99,8

Cet aluminium (EN A) est corroyé (W) et composé d'aluminium (Al) ayant une pureté de 99,80 %.

4.1.4. Désignation **numérique** de l'aluminium **corroyé allié**

La désignation de l'aluminium corroyé allié est composée :

- Du préfixe EN suivi d'un espace
- De la lettre A qui représente l'aluminium
- De la lettre W qui représente les produits corroyés
- Un tiret suivi de quatre chiffres indiquant la composition chimique de l'alliage.
 - Le premier chiffre indique le type d'alliage (voir tableau ci-dessous).
 - Le deuxième chiffre indique les modifications subies depuis l'alliage originel.
 - Les deux derniers chiffres donnent des précisions sur la composition chimique de l'alliage.

Groupe	Type d'alliage
2	Aluminium - Cuivre
3	Aluminium - Manganèse
4	Aluminium - Silicium
5	Aluminium - Magnésium
6	Aluminium - Magnésium - Silicium
7	Aluminium - Zinc
8	Autres alliages d'aluminium

*Exemple : **EN AW-4006**. Cet aluminium (EN A) corroyé (W) est un alliage d'aluminium et de silicium (4).*

4.1.5. Désignation **symbolique** de l'aluminium **corroyé allié**

Elle est composée du symbole chimique de l'aluminium Al suivi d'un espace puis des symboles chimiques des éléments d'addition suivi de leur teneur. Ces éléments sont classés par ordre décroissant de leur teneur.

*Exemple : **EN AW-2024 [AlCu4Mg1]** ou **EN AW-AlCu4Mg1***

Cet aluminium (EN A) corroyé (W) est composé d'aluminium (Al), de 4 % de cuivre (Cu4) et de 1 % de magnésium (Mg).

Principales désignations :

Le tableau suivant donne les désignations des principaux alliages des 6 familles d'alliage de corroyage (à l'exception de la famille 4000) avec différentes normes

Tab. – Désignation des principaux alliages de corroyage

France		ISO CEN
Nouveau	Ancien	
1000 : Aluminium sans élément d'addition		
1050 A	A5	Al99.5
1070 A	A7	Al99.7
1080	A8	Al99.8
1200	A4	Al99.0
2000 : Aluminium + Cuivre		
2011	AU5Pb6Bi	AlCu6BiPb
2014	AU4SG	AlCu4SiMg
2017 A	AU4G	AlCu4MgSi
2024	AU4G1	AlCu4Mg1
2030	AU4Pb	AlCuPbMg
2618 A	AU2GN	AlCu2MgNi
3000 : Aluminium + Manganèse		
3003	AM1	AlMn1Cu
3004	AM1G	AlMn1Mg1
5000 : Aluminium + Magnésium		
5005	AG06	Al Mg1
5052		Al Mg2.5
5056 A	AG5	Al Mg5
5083	AG4,5	Al Mg4.5Mn
5086	AG4MC	Al Mg4
5454		Al Mg3Mn
5754	AG3M	Al Mg3
6000 : Aluminium + Magnésium + Silicium		
6005 A		AlSi1 Mg
6060	AGS	Al MgSi
6061		AlMg1SiCu
6082	ASGM0.7	AlSi1 Mg
7000 : Aluminium + Zinc + Magnésium		
7020	AZ5G	AlZn4.5Mg1
7075	AZ5GU	AlZn6MgCu

Caractéristiques des alliages :

Les principales caractéristiques de ces alliages sont les suivantes :

Série 2000 :

Cet alliage avec addition éventuelle de magnésium se caractérise par une **excellente résistance mécanique** qui justifie son **coût généralement plus élevé** (le « duralumin » est particulièrement apprécié et doit ses qualités à la trempe suivie de maturation). Si le comportement à haute température est très correct, **il n'en est pas de même pour sa soudabilité ni sa résistance anticorrosive.**

Série 3000 :

C'est un alliage au manganèse qui conserve une **bonne durabilité dans une atmosphère marine** ou dans l'eau de mer.

Série 4000 :

Composé d'aluminium et de silicium, cet alliage est principalement **utilisé comme métal d'apport lors du soudage.**

Série 5000 :

Cet alliage d'aluminium et de magnésium, d'un **coût relativement élevé**, présente une **exceptionnelle résistance à la corrosion, surtout à l'eau de mer** qui en fait tout l'intérêt, malgré une **qualité mécanique** somme toute assez **moyenne.**

Série 6000 :

Au composé précédent de la série 5000, aluminium et magnésium, il suffit d'ajouter un peu de silicium comme additif secondaire pour obtenir **l'alliage léger le plus couramment employé en application structurale.** Après un traitement thermique de trempe puis de revenu, ces métaux présentent une **bonne résistance mécanique, une remarquable inertie chimique vis-à-vis d'agents corrosifs divers** et une **soudabilité très correcte.** Il faut toutefois noter une chute notable de résistance à même le cordon de soudure.

Série 7000 :

Alliage à base de zinc et secondairement additionné de magnésium, ce métal se caractérise par une **corrodabilité modérée** jointe à une **résistance mécanique correcte** et une soudabilité ne présentant aucune sujétion (gêne) spéciale.

4.2. Désignation de l'aluminium moulé (NF EN 1706 :2010 – Pièces moulées)

4.2.1. Désignation numérique de l'aluminium moulé (NF EN 1780-1)

La désignation comporte :

- Le préfixe **EN** suivi d'un espace
- La lettre **A** qui représente l'aluminium
- une lettre qui représente la forme du produit :
 - la lettre **B**, qui représente les lingots en aluminium allié pour refusion,
 - la lettre **C**, qui représente les pièces moulées,
 - la lettre **M**, qui représente les alliages-mères*
- Un **tiret suivi de cinq chiffres** représentant les limites de composition de l'alliage.

Exemples : EN AB-44000, EN AC46200

* alliage contenant au moins de l'aluminium et un ou plusieurs éléments d'addition destinés à être ajouté à l'aluminium en fusion pour rectifier la composition chimique et/ou la structure brute de fonderie.

4.2.2. Système de désignation à 5 chiffres :

a) Lingots d'alliages d'aluminium et pièces moulées

Pour un alliage donné, les lingots et les pièces moulées doivent avoir la même désignation numérique.

- Le premier des cinq chiffres de la désignation indique l'élément principal de l'alliage, de la manière suivante :
 - cuivre : 2XXXX
 - silicium : 4XXX
 - magnésium : 5XXXX
 - zinc : 7XXXX
- Le second des 5 chiffres doit indiquer le groupe d'alliage
- Le troisième chiffre est arbitraire.
- Le quatrième chiffre est généralement 0.
- Le cinquième chiffre doit être 0 à l'exception des applications aérospatiales

2	1	XXX	: Al Cu ;
4	1	XXX	: Al SiMgTi ;
4	2	XXX	: Al Si7Mg ;
4	3	XXX	: Al Si10Mg ;
4	4	XXX	: Al Si ;
4	5	XXX	: Al Si5Cu ;
4	6	XXX	: Al Si9Cu ;
4	7	XXX	: Al Si(Cu) ;
4	8	XXX	: Al SiCuNiMg ;
5	1	XXX	: Al Mg ;
7	1	XXX	: Al ZnMg.



b) Alliages-mères

- Le premier des cinq chiffres du système de désignation doit être 9.
- Les second et troisième chiffres doivent représenter le numéro atomique de l'élément principal.
 - 05 pour le bore ; 14 pour le silicium ; 29 pour le cuivre.
- Les deux derniers chiffres doivent être chronologiques, mais le cinquième chiffre doit être :
 - pair, dans le cas d'un alliage-mère au niveau d'impureté faible ;
 - impair, dans le cas d'un alliage-mère au niveau d'impureté élevé

Exemple : EN AM-91400

Extraits de tableaux issus de la norme NF EN 1706 :2010

Caractéristiques mécaniques des alliages coulés en sable pour des éprouvettes coulées à part

Groupe d'alliage	Désignation de l'alliage		Désignation du traitement thermique	Résistance à la traction R_m MPa min.	Limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0,2}$ MPa min.	Allongement A % min.	Dureté Brinell HBW min.
	Numérique	Symboles chimiques					
Al	—	Al 99,6E	F	75	—	30	17
	—	Al 99,7E	F	75	—	30	17
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	T4	300	200	5	90
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	T6 T64	300 280	200 180	3 5	95 85
	EN AC-21200	EN AC-Al Cu5MgMn	T4	330	225	3	100
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi	F T6	140 240	70 180	3 3	50 85
	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg	F T6	140 220	80 180	2 1	50 75
AlSi7Mg	EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3	T6	230	190	2	75
	EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6	T6	250	210	1	85
	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	F T6	150 220	80 180	2 1	50 75
AlSi10Mg	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)	F T6	150 220	80 180	2 1	50 75
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	F T6	160 220	80 180	1 1	50 75
	EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	T6	230	190	2	75
	EN AC-44000	EN AC-Al Si11	F	150	70	6	45
AlSi	EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	F	150	70	4	50
	EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	F	150	70	5	50
	EN AC-44400	EN AC-AlSi9	F	170	80	4	50

Composition chimique des alliages de fonderie

En pourcentage en masse

Groupe d'alliage	Désignation de l'alliage		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti ^{h)}	Autres ^{a), g)}		Aluminium
	Numérique	Symboles chimiques												Chaque	Total	
Al ^{d)}	—	Al 99,6E	0,10	0,30	0,01	0,007	0,02	0,005	—	0,04	—	—	—	0,03 ^{e)}	—	99,60 min.
	—	Al 99,7E	0,07	0,20	0,01	0,005	0,02	0,004	—	0,04	—	—	—	0,03 ^{f)}	—	99,70 min.
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi	0,20 (0,15)	0,35 (0,30)	4,2 à 5,0	0,10	0,15 à 0,35 (0,20 à 0,35)	—	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15 à 0,30 (0,15 à 0,25)	0,03	0,10	Reste
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti	0,18 (0,15)	0,19 (0,15)	4,2 à 5,2	0,55	—	—	—	0,07	—	—	0,15 à 0,30 (0,15 à 0,25)	0,03	0,10	Reste
	EN AC-21200	EN AC-Al Cu4MnMg	0,10	0,20 (0,15)	4,0-5,0	0,20 à 0,50	0,15 à 0,50 (0,20 à 0,50)	—	0,05 (0,03)	0,10 (0,05)	0,03	0,03	0,10 (0,05)	0,03	0,10	Reste
AlSiMgTi	EN AC-41000 ⁱ⁾	EN AC-Al Si2MgTi	1,6 à 2,4	0,60 (0,50)	0,10 (0,08)	0,30 à 0,50	0,45 à 0,65 (0,25 à 0,65)	—	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05 à 0,20 (0,07 à 0,15)	0,05	0,15	Reste
AlSi7Mg	EN AC-42000 ⁱ⁾	EN AC-Al Si7Mg	6,5 à 7,5	0,55 (0,45)	0,20 (0,15)	0,35	0,20 à 0,65 (0,25 à 0,65)	—	0,15	0,15	0,15	0,05	0,25 ^{j)} (0,20)	0,05	0,15	Reste
	EN AC-42100 ⁱ⁾	EN AC-Al Si7Mg0,3	6,5 à 7,5	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25 à 0,45 (0,30 à 0,45)	—	—	0,07	—	—	0,25 ^{j)} (0,18)	0,03	0,10	Reste
	EN AC-42200 ⁱ⁾	EN AC-Al Si7Mg0,6	6,5 à 7,5	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,45 à 0,70 (0,50 à 0,70)	—	—	0,07	—	—	0,25 ^{j)} (0,18)	0,03	0,10	Reste
AlSi10Mg	EN AC-43000 ⁱ⁾	EN AC-Al Si10Mg(a)	9,0 à 11,0	0,55 (0,40)	0,05 (0,03)	0,45	0,20 à 0,45 (0,25 à 0,45)	—	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Reste
	EN AC-43100 ⁱ⁾	EN AC-Al Si10Mg(b)	9,0 à 11,0	0,55 (0,45)	0,10 (0,08)	0,45	0,20 à 0,45 (0,25 à 0,45)	—	0,05	0,10	0,05	0,05	0,15	0,05	0,15	Reste
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	9,0 à 11,0	0,65 (0,55)	0,35 (0,30)	0,55	0,20 à 0,45 (0,25 à 0,45)	—	0,15	0,35	0,10	—	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Reste
	EN AC-43300 ⁱ⁾	EN AC-Al Si9Mg	9,0 à 10,0	0,19 (0,15)	0,05 (0,03)	0,10	0,25 à 0,45 (0,30 à 0,45)	—	—	0,07	—	—	0,15	0,03	0,10	Reste
	EN AC-43400 ⁱ⁾	EN AC-Al Si10Mg(Fe)	9,0 à 11,0	1,0 (0,45 à 0,9)	0,10 (0,08)	0,55	0,20 à 0,50 (0,25 à 0,50)	—	0,15	0,15	0,15	0,05	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Reste
	EN AC-43500 ⁱ⁾	EN AC-Al Si10MnMg ^{g)}	9,0 à 11,5	0,25 (0,20)	0,05 (0,03)	0,40 à 0,80	0,10 à 0,60 (0,15 à 0,60)	—	—	0,07	—	—	0,20 (0,15)	0,05	0,15	Reste

EN 1706:2010 (F)

Caractéristiques mécaniques des allages coulés en coquilles
pour des éprouvettes coulées à part

Groupe d'alliage	Désignation de l'alliage		Désignation du traitement thermique	Résistance à la traction R_m MPa min.	Limite conventionnelle d'élasticité $R_{p0,2}$ MPa min.	Allongement A % min.	Dureté Brinell HBW min.
	Numérique	Symboles chimiques					
AlSi10Mg	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)	F T6 T64	180 260 240	90 220 200	2,5 1 2	55 90 80
	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)	F T6 T64	180 260 240	90 220 200	2,5 1 2	55 90 80
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)	F T6	180 240	90 200	1 1	55 80
	EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg	T6 T64	290 250	210 180	4 6	90 80
AlSi	EN AC-44000	EN AC-Al Si11	F	170	80	7	45
	EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)	F	170	80	5	55
	EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)	F	170	80	6	55
	EN AC-44400	EN AC-Al Si9	F	180	90	5	55
AlSi5Cu	EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4	F	170	100	1	75
	EN AC-45100	EN AC-Al Si5Cu3Mg	T4 T6	270 320	180 280	2,5 < 1	85 110
	EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg	T4 T6	230 280	140 210	3 < 1	85 110
	EN AC-45400	EN AC-Al Si5Cu3	T4	230	110	6	75
	EN AC-45500	EN AC-Al Si7Cu0,5Mg	T6	320	240	4	100
AlSi9Cu	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3	F	170	100	1	75
	EN AC-46300	EN AC-Al Si7Cu3Mg	F	180	100	1	80
	EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg	F T6	170 275	100 235	1 1,5	75 105
	EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2	F	170	100	1	75
AlSi(Cu)	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)	F	170	90	2	55
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg	T5 T6	200 280	185 240	< 1 < 1	90 100
AlMg	EN AC-51100	EN AC-Al Mg3	F	150	70	5	50
	EN AC-51300	EN AC-Al Mg5	F	180	100	4	60
	EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)	F	180	110	3	65
AlZnSiMg	EN AC-71100	EN AC-Al Zn10Si8Mg	T1	260	210	1	100

NOTE 1 N/mm² = 1 MPa.

5. Influence des conditions de fabrication- Traitements d'amélioration

5.1. Classement

5.1.1. Les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants)

Le **durcissement** est **obtenu**, pour cette catégorie, par l'effet combiné des **éléments d'addition (Mg, Mn, Fe, Si, etc.)** et de la déformation plastique du métal, appelé « **écrouissage** ». De plus, en combinant l'effet de durcissement par écrouissage et l'effet d'adoucissement par traitements thermiques de recuit ou de restauration*, on obtient pour chaque alliage une plage étendue de dureté depuis l'état recuit (O) à plasticité maximale et dureté minimale jusqu'à l'état extra dur (H19) à dureté maximale et plasticité minimale. Cette catégorie comporte les alliages des familles **1000, 3000 et 5000**.

**traitement de recuit sur un métal ou alliage écroui, ayant pour effet de réduire sa résistance à un niveau donné, sans qu'il soit complètement adouci.*

5.1.2. Les alliages à durcissement structural (alliages trempants)

Ces familles d'alliages qui contiennent du **Cu, Mg, Si et Zn** sont susceptibles de **durcissement structural obtenu par une séquence de traitements thermiques**. Cette famille comprend les alliages des séries **2000, 6000 et 7000**.

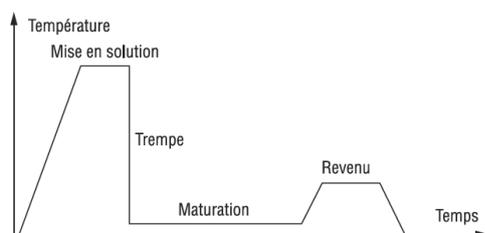


Fig. Séquence de traitement de durcissement structural

5.2. Traitements thermiques

5.2.1. La mise en solution

La première étape de ce traitement, qui se fait à température élevée, est le traitement de mise en solution solide jusqu'à dissolution complète des éléments d'alliages. Cela consiste à dissoudre dans le métal de base, par un maintien à température élevée, les éléments d'alliage qui s'y trouvent en phases séparées. Cela permet donc à un ou plusieurs des éléments d'alliage d'entrer dans la solution solide.

Par refroidissement brutal de la solution solide ainsi obtenue, on obtient un état trempé.

Une température de mise en solution optimale est définie et doit être respectée. La durée du traitement varie de 20 à 270 min.

5.2.2. La trempe

La mise en solution est suivie d'un refroidissement brutal très rapide, généralement par immersion dans l'eau froide, appelé « trempe ». La solution solide est dans un état sursaturé.

5.2.3. La maturation

Le métal ainsi trempé est dans un état métastable. Il évolue vers une structure plus stable à température ambiante, dans laquelle les éléments d'alliages sont chassés de la solution

solide sursaturée et rejetés sous forme de précipités. Ce phénomène qui s'accompagne d'une augmentation sensible de la dureté est le **durcissement structural**.

C'est un phénomène plus ou moins rapide suivant la composition chimique de l'alliage.

La plasticité de l'alliage diminue au fur et à mesure que sa dureté augmente. Pendant les premiers moments de la maturation, le métal présente encore une plasticité suffisante pour supporter des mises en forme importantes. C'est l'état de trempe fraîche.

Au bout de quelques jours (par exemple pour le 2017 A) ou de quelques semaines (par exemple pour le 7020), les caractéristiques mécaniques de l'alliage restent à peu près stables.

Il peut être accéléré par un maintien à des températures plus élevées, ce qui se traduit pour certains alliages par un durcissement plus important : c'est le phénomène de revenu.

5.2.4. Le revenu

Pour certains alliages à traitements thermiques, l'évolution des caractéristiques mécaniques est accélérée par un traitement à température supérieure à celle ambiante. C'est le traitement de revenu, ou vieillissement artificiel, qui confère à l'alliage une structure différente de celle de la maturation qui **conduit généralement à des caractéristiques mécaniques supérieures**, en particulier pour la limite élastique.

Remarque : Des durées de maintien en température inférieure à celle correspondant au durcissement maximal conduisent à un état sous revenu. Dans ce cas, on peut amener le métal à l'état revenu par un traitement complémentaire. Dans le cas contraire, le métal est dans l'état surrevenu qui ne peut être corrigé qu'en effectuant un nouveau cycle complet de traitements thermiques.

Tab. – Traitement de durcissement structural (trempe + maturation et/ou revenu)

Alliages	Etat	Traitement de mise en solution	Milieu de trempe	Traitement de revenu		Maturation
		Température en °C		Maintien en température (heures) Température	Attente entre trempe et revenu	
2001	T4 T8	510 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	14 h à 160 °C ± 5 °C		4 jours minimum
2014	T6	505 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	18 h à 22 h à 160 °C ± 3 °C ou 10 h à 175 °C ± 5 °C		
2017 A	T4	500 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum			4 jours minimum
2024	T3	495 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum			4 jours minimum
2030	T4	475 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum			4 jours minimum
2618 A	T8 T851	530 °C ± 5 °C	Eau à 80 °C maximum	10 h à 21 h à 190 °C ± 3 °C	24 h maximum ou 10 j minimum	
6005 A	T4 T6	530 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	8 h à 175 °C ± 5 °C ou 6 h à 185 °C ± 5 °C	1)	8 jours minimum
6060	T4 T6	530 °C ± 5 °C	Air soufflé ou eau ²⁾	8 h à 175 °C ± 5 °C ou 6 h à 185 °C ± 5 °C		8 jours minimum
6061	T4 T6	535 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	8 h à 175 °C ± 5 °C ou 6 h à 185 °C ± 5 °C	1)	8 jours minimum
6082	T4 T6	535 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	16 h à 165 °C ± 5 °C ou 8 h à 175 °C ± 5 °C	1) 2 h maximum ou 5 j minimum	8 jours minimum
6106	T4 T6	530 °C ± 5 °C	Eau ou brouillard	8 h à 175 °C ± 5 °C ou 624 à 26 h à 140 °C ± 5 °C		8 jours minimum
7020	T6	530 °C ± 10 °C	Air soufflé ou eau ²⁾	4 à 6 h à 100 °C ± 5 °C ou 6 h à 185 °C ± 5 °C	4 j minimum	4 jours minimum

Alliages	Etat	Traitement de mise en solution	Milieu de trempe	Traitement de revenu		Maturation
		Température en °C		Maintien en température (heures) Température	Attente entre trempe et revenu	
7049 A	T6	465 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	12 h à 135 °C ± 5 °C		Traitement pour les profilés
7075	T6	465 °C ± 5 °C	Eau à 40 °C maximum	12 à 16 h à 1350 °C ± 5 °C		Traitement pour les tôles
				6 à 8 h à 108 °C ± 5 °C		Traitement pour les barres

Ce tableau confère les caractéristiques mécaniques optimales associées aux valeurs de A % les plus élevées.
 1) Les caractéristiques mécaniques sont maximales quand le revenu est effectué aussitôt après la trempe. Une attente de 48 h entre la trempe et le revenu fait perdre environ sur la valeur de R_e à l'état T6 : 20 Mpa pour le 6005 et 30 Mpa pour le 6061, ainsi que 40 Mpa pour le 6082.
 2) Ces alliages présentent une faible vitesse de trempe. De ce fait, les produits de faible épaisseur peuvent être trempés à l'air soufflé.

5.2.5. Le recuit

Ce traitement **confère au métal le maximum de malléabilité et le minimum de résistance mécanique**. Il est appliqué aux alliages d'aluminium pour détruire l'effet de l'érouissage (tous alliages) ou l'effet de la trempe (séries 2000, 6000 et 7000).

Un traitement de recuit est défini par une température et une durée de maintien à cette température. L'évolution de la charge de rupture du métal en fonction de la durée de maintien à la température de recuit est comparable à celle représentée sur la figure suivante où l'on distingue trois stades :

- le **stade de restauration** (tronçon A-B), pour lequel la texture cristalline reste à peu près celle de l'état éroui ;
- le **stade de recristallisation** (B-C), avec naissance progressive de nouveaux cristaux d'orientation différente de ceux de l'état éroui. La charge de rupture s'abaisse considérablement ;
- le **stade de recristallisation complète** (C-D.) : l'alliage présente la dureté minimale et la plasticité maximale

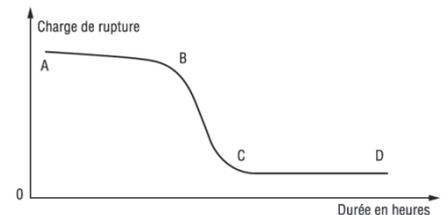


Fig. Évolution de la charge de rupture R au cours d'un traitement.

Tab. – Traitement de recuit et de restauration

Alliages	Traitement de recuit sur métal éroui				Traitement de restauration		Recuit sur métal trempé		
	Température en °C	Maintien à température en minutes	Refroidissement	Érouissage + recuit °C	Température en °C	Maintien à température en heures	Température en °C	Maintien à température en heures	Refroidissement
Alu 1050 A	325-360	30	Air	20 %	225-280	1 à 4			
2014-2017 A 2024-2618 A	375-410	30	Lent	15 %			415	2 à 3	Lent
3003	365-400	30		20 %	260-300	1 à 4			
3004-3005	345-380	30	Air	20 %	250-300				
5005-5083 5086-5764	345-380	30	Air	20 %	240-280	1 à 4			
6061-6062	375-410	30	Lent	20 %			415	2 à 3	Lent
7049-7075	375-410	30	Lent	15			415	2 à 3	Lent

5.3. Traitements mécaniques

5.3.1. L'érouissage

Il est possible d'augmenter la résistance mécanique de l'aluminium et de tous ses alliages par déformation à froid, appelée « érouissage » (laminage, filage, étirage). De cette manière, on réussit à en doubler la résistance sans provoquer de fragilisation notable. Bien que cette déformation diminue simultanément l'aptitude des alliages à la déformation à froid, il sera possible de lui faire retrouver sa résistance mécanique minimum par un traitement thermique de recuit (généralement adoucissant).

L'érouissage a des effets sur plusieurs propriétés de l'alliage :

- La charge de rupture, la limite élastique et la dureté augmentent, alors que l'allongement à la rupture et la capacité de déformation à froid diminuent.
- La conductivité électrique diminue.
- La résistance à la corrosion diminue.

L'écrouissage est la seule façon de durcir les alliages sans durcissement structural (alliages non trempants).

Ces alliages appartiennent aux trois familles suivantes :

- série 1000 : aluminiums sans éléments d'addition ;
- série 3000 : aluminium + manganèse ;
- série 5000 : aluminium + magnésium.

Il y a aussi la série 4000 avec la présence de silicium mais elle est surtout utilisée comme métal d'apport pour le soudage.

5.4. Symbolisation conventionnelle

5.4.1. Alliages d'aluminiums de fonderie

La désignation appliquée au moulage en fonderie est représentée par la lettre Y suivie d'un couple de deux chiffres précisant le mode de coulage et le traitement appliqué.

Tab. – Désignation conventionnelle des modes et états de livraison des alliages de fonderie

État de livraison	Mode d'obtention		
	Coulé ou sablé	Coulé en coquille	Moulé sous pression
Non traité thermiquement	Y 20	Y 30	Y 40
Trempé et revenu	Y 23	Y 33	
Trempé et mûri	Y 24	Y 34	
Stabilisé	Y 25	Y 35	Y 45
Suivant prescriptions spéciales	Y 29	Y 39	Y 49

5.4.2. Alliages d'aluminiums corroyés

Tab. – Désignation des états de livraison des alliages de corroyage

État de livraison	Désignation conventionnelle					
Brut de fabrication	F					
Recuit	O					
Durci par écrouissage	Degré de dureté obtenue					
Subdivisions :	1/8	1/4	2/4	3/4	4/4	extra
– écrouissage à froid	H11	H12, H13	H14, H15	H16, H17	H18	H19
– écrouissage suivi d'un adoucissement		H22	H24	H26	H28	
– écrouissage suivi d'une stabilisation	H31	H32	H34	H36	H38	
Durci par tremp thermique Opérations :	Traitement au four			Déformation à chaud		
– tremp + maturation	T4			T1		
– tremp + écrouissage + maturation	T3			T2		
– tremp + revenu	T6			T5		
– tremp + sous-revenu	T61			T51		
– tremp + sur-revenu	T66			T56		
– tremp + sur-revenu désensibilisant à la corrosion sous contrainte	T73					
– tremp + sur-revenu désensibilisant à la corrosion exfoliante	T76					
– tremp + écrouissage + revenu	T8			T10		
– tremp + revenu + écrouissage	T9					

6. Propriétés mécaniques

6.1. Résistance

L'alliage dont les possibilités mécaniques se rapprochent le plus de celles de l'acier est un composé d'aluminium additionné de silicium et de magnésium, qui offre une limite élastique de 190 à 280 MPa, tout à fait comparable à celle de l'acier « doux » (série 6000, alliage 6060, 6082). Cette limite, assez élevée, est obtenue par trempe suivie d'un revenu (état T5 ou T6), opération qui réduit assez sensiblement le domaine plastique puisque la rupture se produit vers 300 MPa, ce qui est peu dans la mesure où l'acier ne se rompt qu'à 450 MPa.

L'allongement est alors de 10 % environ, bien inférieur à celui de l'acier qui avoisine 25 %. On en conclut que si la performance mécanique atteint celle de l'acier, c'est tout de même au prix d'une baisse des qualités élasto-plastiques.

Il existe également des séries super-résistantes atteignant 400 MPa, de limite élastique à l'état T5 ou T6, et d'autres aux performances mécaniques plus modestes comme les alliages 5000 dont la limite élastique est d'environ 100 MPa.

6.2. Élasticité

Le module élastique de l'aluminium et de ses alliages est pratiquement le même, égal à 70 GPa. Il est donc environ trois fois plus faible que celui de l'acier (200 GPa), autrement dit, les flèches des éléments d'alliages légers sont trois fois celles des éléments acier soumis aux mêmes charges.

Tab. – Caractéristiques mécaniques des alliages légers

Alliages	Applications	État	Caractéristiques mécaniques			Dureté Brinell
			R _m en MPa	R _{p02} en MPa	A %	
1050 A	Bâtiment	0	80	30	42	20
	Cuisine	H24	115	80	25	30
2017 A	Mécanique générale	T4	420	280	18	105
2024	Aéronautique	T3	465	320	18	120
2030	Décolletage	T3	450	390	10	115
5083	Chimie, cryo, transport	0	305	160	23	70
		H116	335	230	20	
5086	Chimie, cryo, const. navale	0	278	135	25	63
		H22	310	225	18	
5754	Chaudronnerie marine	0	220	100	23	50
		H24	270	215	10	
6060	Bâtiment	T5	220	190	16	75
6082	Transport	T6	315	280	12	95
7075	Aéronautique	T6	565	495	11	150