UMONS
Université de Mons

A3TS

Généralités sur l'aluminium et les alliages légers

Prof Vitry Véronique

Service de Métallurgie

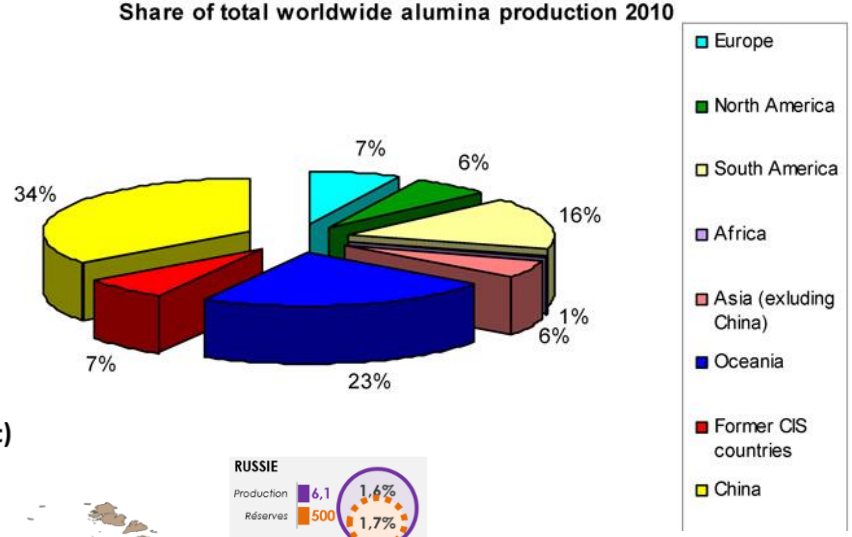
Veronique.Vitry@umons.ac.be

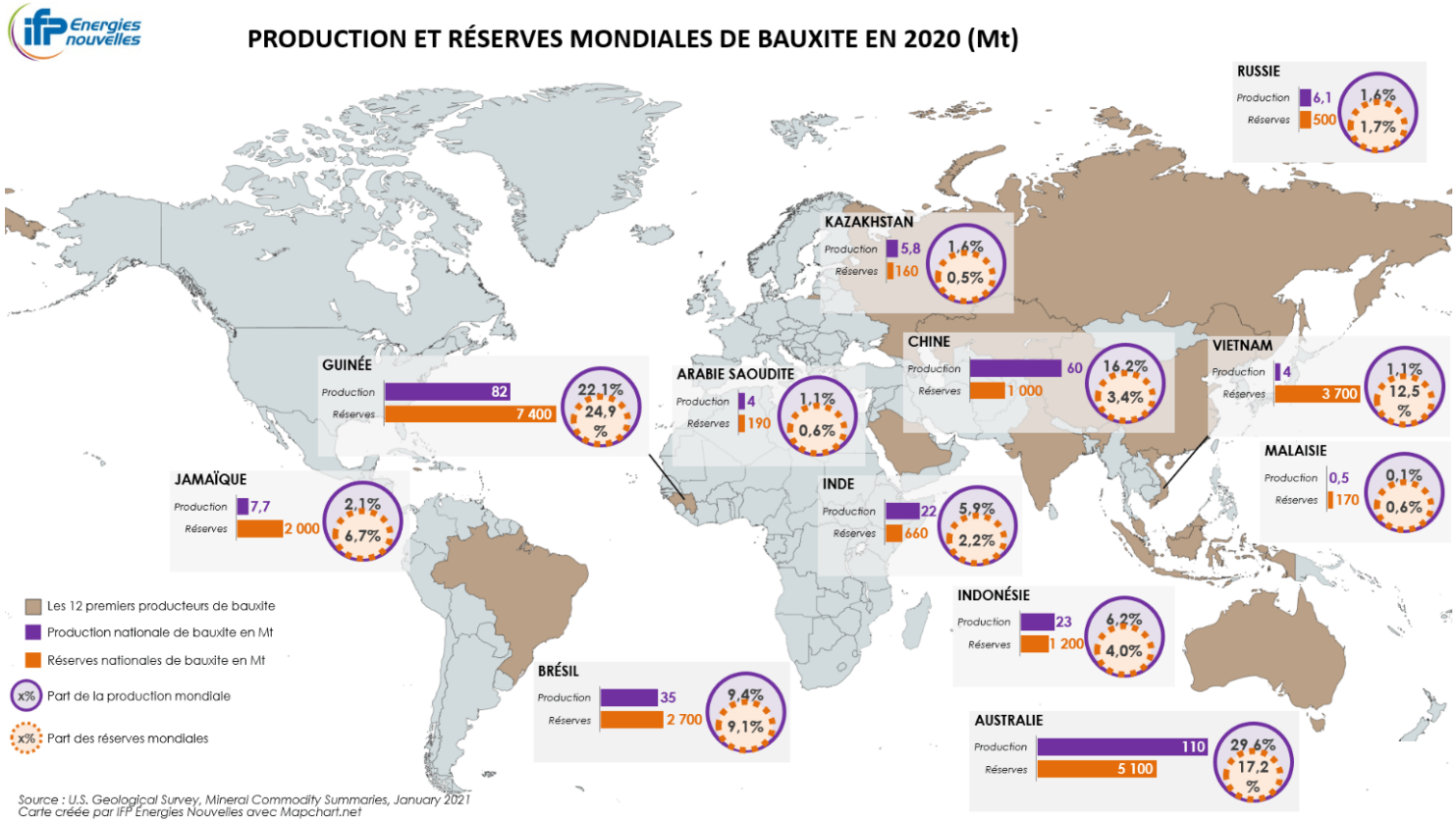
POLYTECH MONS

Juin 2023

Les alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium

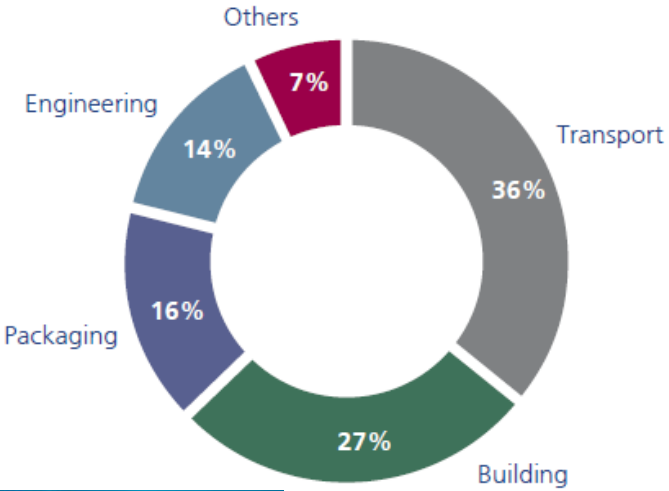




Les alliages d'aluminium

Données économiques

Main end-uses for aluminium products in Europe (2006):



The aluminum body of the Audi R8, based on Audi Space Frame technology is characterized by exceptional stiffness and above-average crash protection, yet at the same time by substantially lower weight.

The ICE train makes extensive use of aluminium.

Matières premières

Essentiellement *BAUXITES* = alumine hydratée impure (boehmite, diaspore, gibbsite)

➡ Al_2O_3 : 45-60% SiO_2 : 5% Fe_2O_3 15-30%

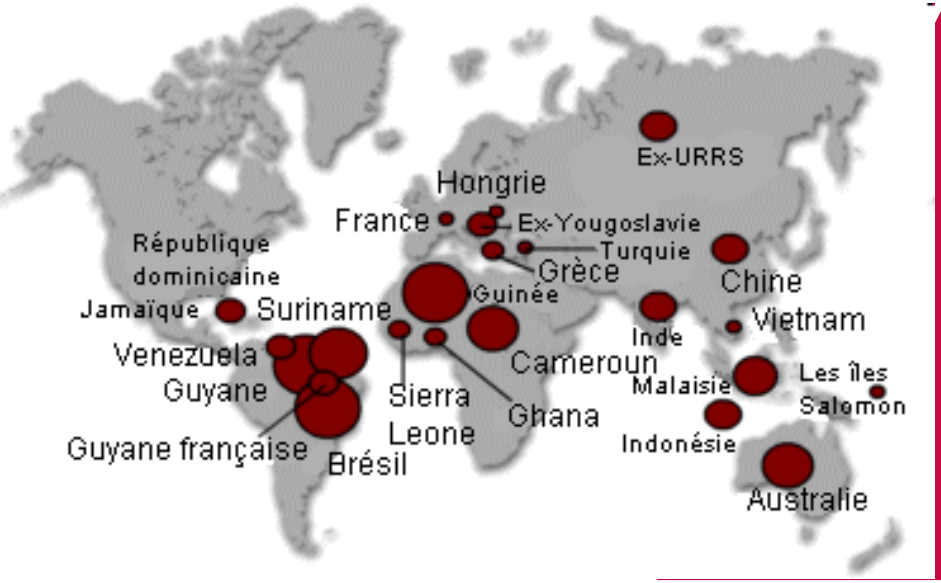
Gibbsite - $Al(OH)_3$ (le plus facile à utiliser)

Boehmite - $\gamma AlO{\bullet}OH$ (un peu moins facile)

Diaspore - $\alpha AlO{\bullet}OH$ (difficile à utiliser)

Extraction >200 Mt en 2007

Principaux producteurs: Australie, Brésil, Chine, Guinée et Jamaïque



Pays issus de l'ancienne URSS et Europe (~10 Mt)

Afrique (~20 Mt)

Amérique centrale et du sud (~44 Mt)

Australie (~63 Mt)

Asie (~65 Mt)

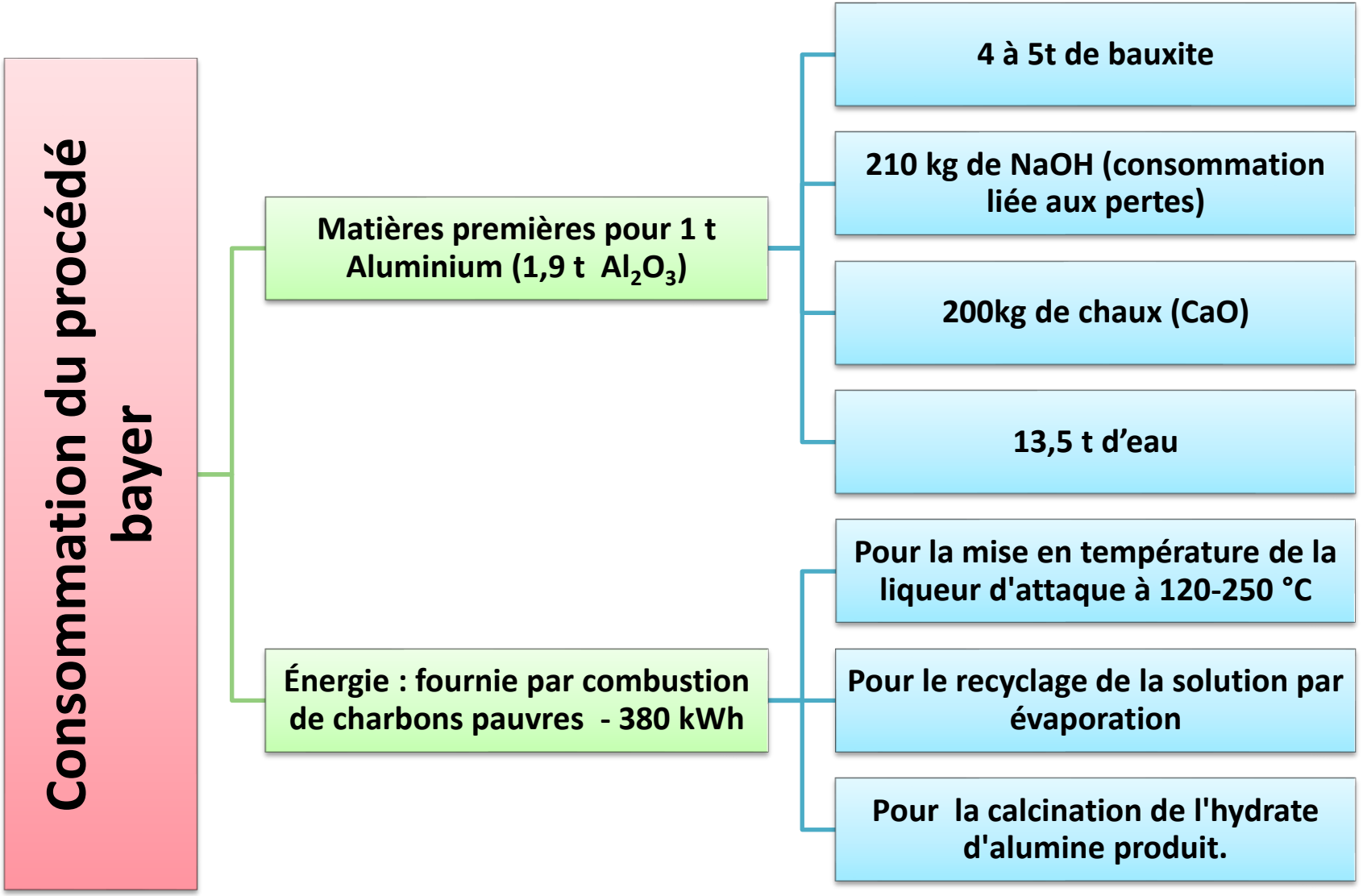
Préparation du minerai

Obtention d'alumine pure ou presque à partir de la bauxite, par hydrométallurgie

Production d'Alumine par le procédé bayer:

une méthode en 3 étapes

Préparation du minerai



Extraction de l'aluminium

Aspects généraux

Electrolyse en bains de sels fondus à 950°C (V = 4,7 V)

Cellule d'électrolyse composée de :

- ✓ Anode (consommable) en carbone
- ✓ Électrolyte = bain de sel fondu : cryolithe Na_3AlF_6 (75-90%, T_f=977°C) + additifs
- ✓ Cathode = Al liquide (connexion via une sole en carbone conducteur)

Réactions

✓À la cathode: $2\ Al^{3+} + 6e^- \rightarrow 2\ Al$ À l'anode: $2\ AlO_3^{3-} \rightarrow 3/2\ O_2 + Al_2O_3 + 6\ e^-$ $(3\ O^{2-} \rightarrow 3/2\ O_2 + 6\ e^-)$

✓**Globalement:** $Al_2O_3 \rightarrow 2\ Al + 3/2\ O_2$

Consommation énergétique: ~13000-17000 kW.h/t d'Al (47-61 GJ)

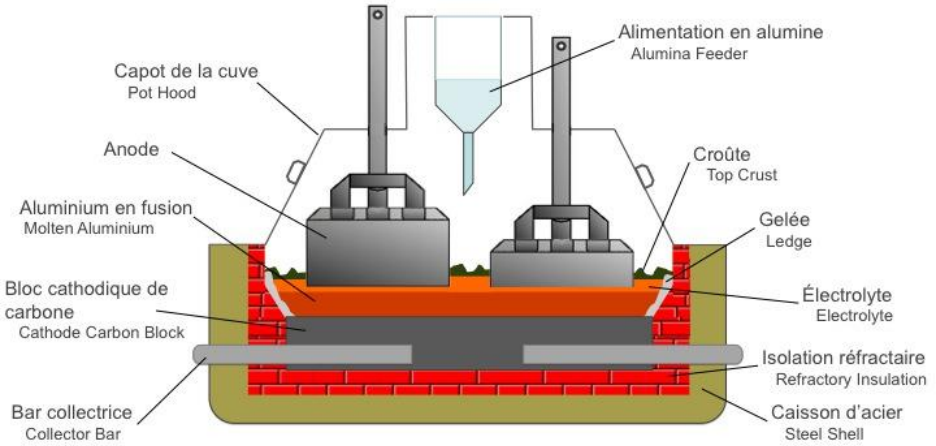
Réserve d'alumine (ρ = 3,96)

Ne pas en mettre trop et alimenter en continu, sinon, ça 'coule'

Cryolithe (ρ= 2,1)

Aluminium liquide (ρ = 2,3)

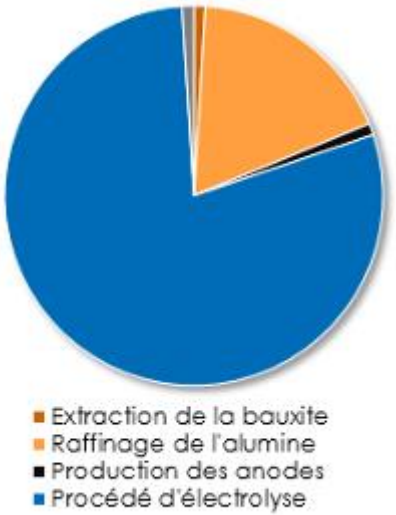
Récupéré par siphonage sous vide



Recyclage de l'aluminium

Aluminium de deuxième fusion

Processus de recyclage utilise seulement 5% de l'énergie consommée pour la production primaire



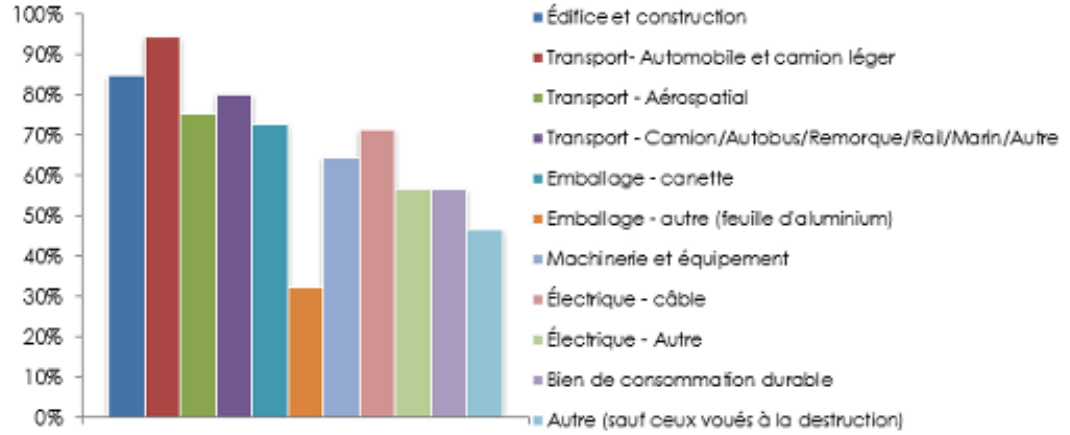
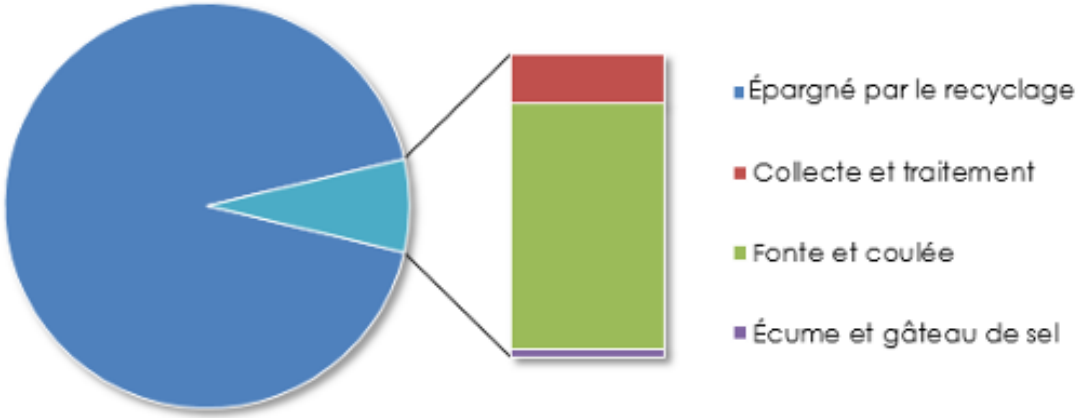
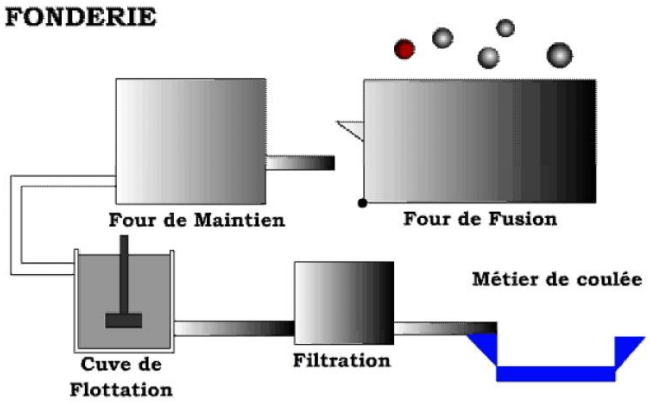


Figure 1. Taux de collecte mondiale estimés d'aluminium selon les différents secteurs (2015) [1].



Recyclage de l'aluminium

Aluminium de deuxième fusion



Entrée

Séparation par courants de Foucault

Découpage en pièces de taille égale

Nettoyage et compactage

Fusion des blocs (750 °C ± 100 °C)

Élimination de l'écume et de l'hydrogène dissout

Mise à nuance

Coulée

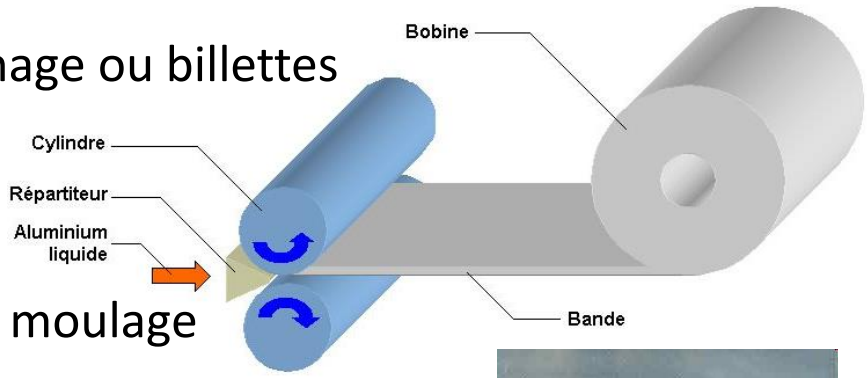
sortie

Al fondu réduit H_2O et les contaminants hydrocarbonés
⇨formation d'H_2
élimination d'H_2 par Cl_2 et N_2

Utilisations de l'aluminium

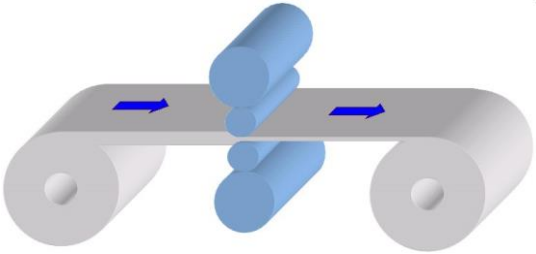
Coulée et solidification

- Coulée semi-continue : Plaques pour laminage ou billettes
- Coulée et laminage continu
  - Fil machine (7- 25 mm diam.)
  - Bandes
- En lingotières : Lingots en Al ou alliages de moulage



Laminage et mise en forme

- Laminage
  - Laminage à chaud (400-500°C) ➡ tôles > 2,5 mm ép.
  - Laminage à froid ➡ tôles 5 µm ép.
- Filage : Barres, tubes ou profilés
- Forgeage et matriçage : à partir de billettes ou de plaques, pour les industries de pointe : aérospatiale, nucléaire, armement, …
- Moulage
  - 25% des utilisations d'Al
  - Prix très compétitif
  - Bon aspect esthétique
  - Cotes suffisamment précises pour limiter l'usinage



Les alliages d'aluminium

Classification selon 4 critères

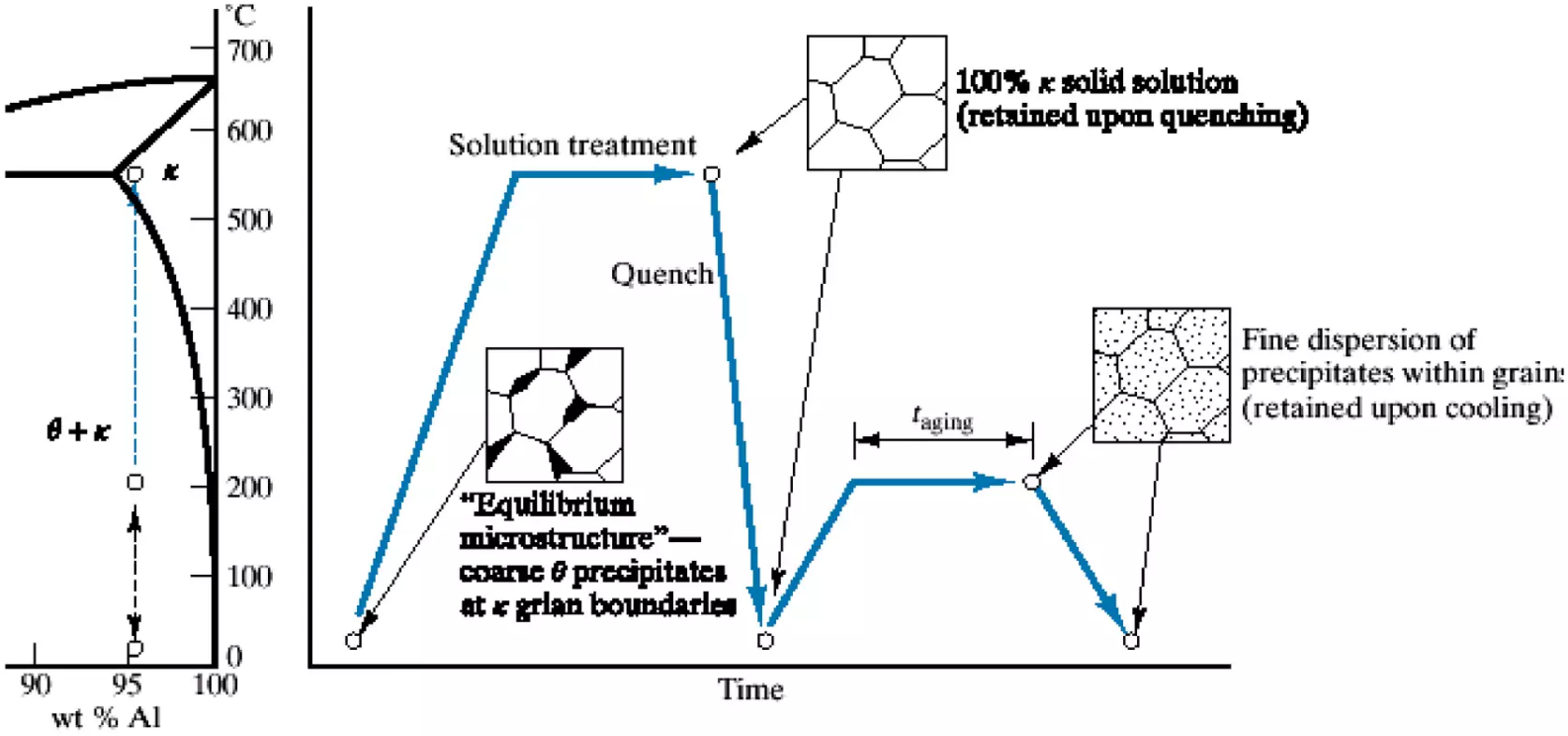
Mode de fabrication des demi-produits

Les alliages d'aluminium

Principe du durcissement structural

Pour les alliages possédant un **eutectique** (ou eutectoïde)

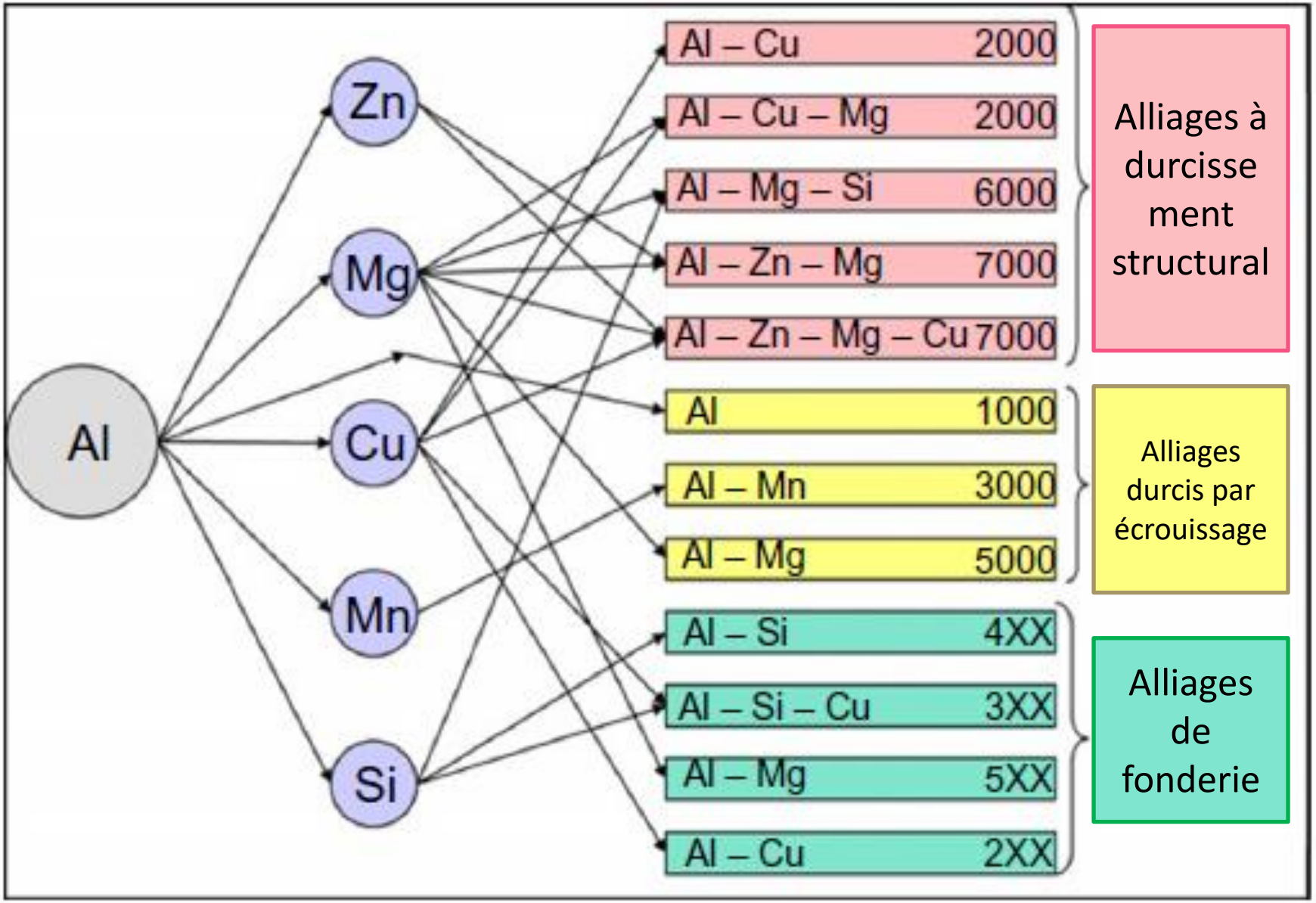
+ une **diminution de solubilité** sous la température eutectique (eutectoïde)



Les alliages d'aluminium

Mode de fabrication → / Mode de durcissement ↓	Alliages corroyés	Alliages moulés
Alliages trempants (durcissement structural)	Alliages corroyés à durcissement structural	Alliages moulés à durcissement structural
Alliages non-trempants	Alliages corroyés à durcissement par écrouissage	Alliages moulés à durcissement par effet de solution solide

Les alliages d'aluminium



Les alliages d'aluminium

Les nuances (de fonderie et de corroyage)

Corroyés			De fonderie		
1XXX	Al > 99%	Non-trempants	1XX.X	Al > 99%	Non -trempants
3XXX	Al-Mn				
4XXX	Al-Si		4XX.X	Al-SI	
5XXX	Al-Mg		5XX.X	Al-Mg	
2XXX	Al-Cu (Mg)	Trempants	2XX.X	Al-Cu	Trempants
			3XX.X	Al-Si (Cu,Mg)	
6XXX	Al-Mg-Si		6XX.X	NON UTILISE	
7XXX	Al-Zn(Mg,Cu,Cr, Zr)		7XX.X	Al-Zn (Cu, Mg)	
8XXX	Al-Sn-Li		8XX.X	Al-Sn	

Les alliages d'aluminium

Les états de traitement thermique

Letter	Description
F	As manufactured or fabricated
O	Annealed
H	Strain hardened (wrought products only) : H1x: Strain hardened only H2x: Strain hardened only and partially annealed to achieved required temper H3x: Strain hardened only and stabilized by low-temperature heat treatment to achieve required temper H12, H22, H32: Quarter hard, equivalent to about 20–25% cold reduction H14, H24, H34: Half hard, equivalent to about 35% cold reduction H16, H26, H36: Three quarter hard, equivalent to about 50–55% cold reduction H18, H28, H38: Fully hard, equivalent to about 75% cold reduction
W	Solution heat treated
T	Thermally treated to produce stable tempers other than F, H, and O. Usually solution heat treated, quenched, and precipitation hardened. T1: Cooled from elevated-temperature shaping process and aged naturally to a substantially stable condition T2: Cooled from elevated-temperature shaping process, cold worked, and aged naturally to a substantially stable condition T3: Solution heat treated, cold worked, and aged naturally to a substantially stable condition T4: Solution heat treated and aged naturally to a substantially stable condition T5: Cooled from elevated-temperature shaping process, and then aged artificially T6: Solution heat treated, then aged artificially T7: Solution heat treated, then stabilized (overaged) T8: Solution heat treated, cold worked, then aged artificially T9: Solution heat treated, aged artificially, then cold worked T10: Cooled from an elevated- temperature shaping process, artificially aged, then cold worked

Note: A large number of numeric additions have been introduced to indicate specific variations.

Alliages durcis par écrouissage

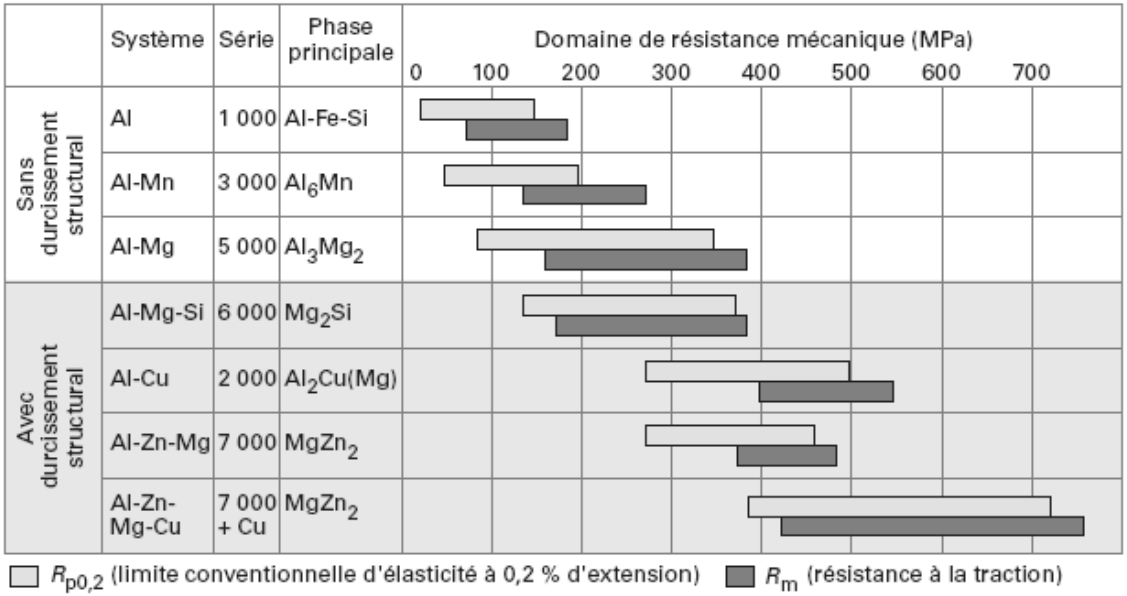
Alliages à durcissement structural

Alliages corroyés

- **Propriétés des alliages corroyés**

Alliage (Groupe)	Limite élastique $R_{0.2}$[MPa]	Allongement à la rupture A [%]	Résistance à la corrosion	Aptitude: usinabilité	Aptitude: soudage/ brasage
Al	<100	60,00	A	D - E	A
Al-Cu d	300 - 600	10-25	D	B	C -D
Al-Zn d	"	"	C	B	C
Al-Mg_2Si d	150 - 300	8	A - B	C - D	A
Al-Si (d)	"	"	A	B	D - E
Al-Mn	<150	30	A	D - E	A - B
Al-Mg	"	"	A	D - E	A - C

Alliages corroyés		Durcissement structural
1xxx	≥ 99 wt.% Al	
2xxx	Cu (-Mg)	X
3xxx	Mn	
4xxx	Si	
5xxx	Mg	
6xxx	Mg-Si	X
7xxx	Zn (-Mg, -Cu, -Cr, -Zr)	X
8xxx	Sn or Li	X



Alliages corroyés

Les alliages corroyés: sans durcissement structural

Série 1000 (Al)

Alliages corroyés

Les alliages corroyés: avec durcissement structural

Série série 2000: Al-Cu

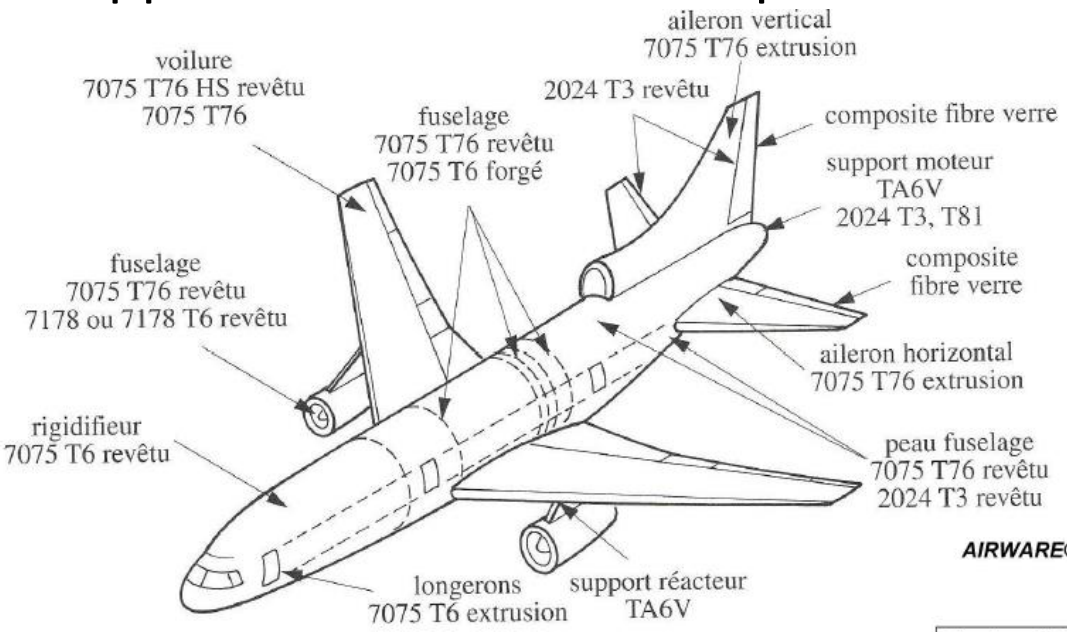
Alliages corroyés

Les alliages au lithium, pour un allégement maximal

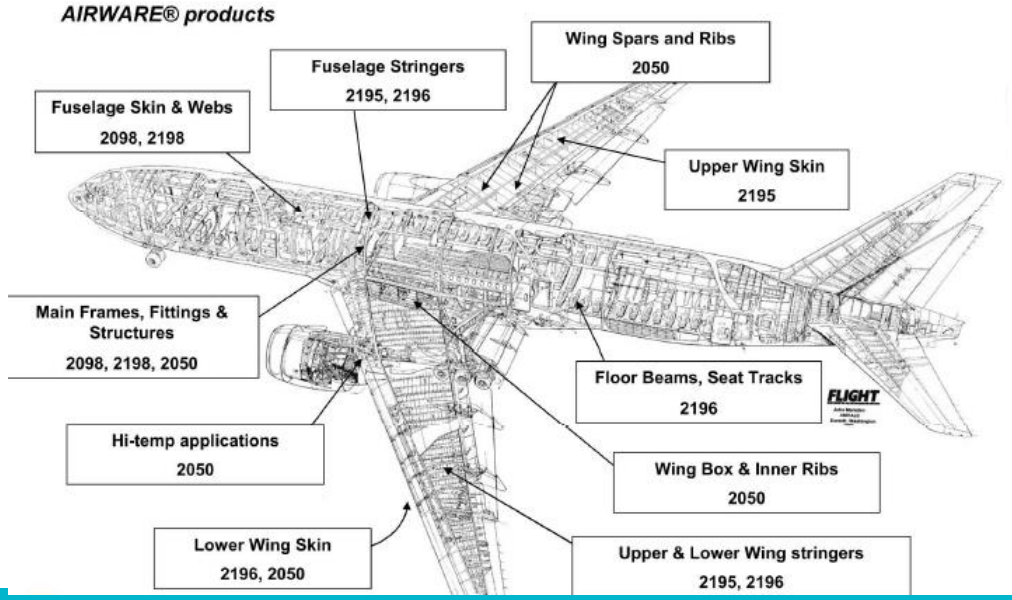
Généralités

Alliages corroyés

Applications en aéronautique



Quelques matériaux de structure dans un avion.



Alliages de fonderie

Mise en forme par moulage en coquille métallique, par gravite ou sous pression ou par moulage en sable.

Teneur en Si et Cu plus élevée que les alliages corroyés, mais allongement et résistance à la fatigue inférieure.

Alliages de fonderie		Durcissement structural
1xx.x	≥ 99 wt.% Al	
2xx.x	Cu	X
3xx.x	Si + Cu and/or Mg	X
4xx.x	Si	
5xx.x	Mg	
6xx.x	Not used	
7xx.x	Zn + Cu and/or Mg	X
8xx.x	Sn	X
9xx.x	Other elements	(X)

Tableau 2 – Coulabilité des principaux alliages de fonderie

Famille	Désignation	Indice de coulabilité (1)
Aluminium commercial	Al 99,5	76
Al-Si et Al-Si-Mg	AlSi2MgTi	66
	AlSi7Mg0,3	72
	AlSi7Mg0,6	
	AlSi10Mg	81
	AlSi12	100
	AlSi13	
	AlSi12CuNiMg	105
Al-Cu	AlCu4MgTi	63
	AlCu8Si	73
Al-Mg	AlMg3	57
	AlMg5	62
Al-Zn	AlZn5Mg	62
Al-Zn-Si-Mg	AlZn10Si8Mg	71

(1) Les indices de coulabilité sont évalués en pourcentage par rapport à celui de l'alliage eutectique AlSi12 qui est égal à 100 %.

Tableau 1 – Principales familles d'alliages d'aluminium de moulage

Familles génériques	Familles dérivées
Aluminium-silicium (Al-Si)	Al-Si-Cu Al-Si-Mg Al-Si-Cu-Mg(Ni)
Aluminium-cuivre (Al-Cu)	Al-Cu-Mg Al-Cu-(Ni) (Co)
Aluminium-magnésium (Al-Mg)	Al-Mg-Si Al-Mg (Si) (Mn)
Aluminium-zinc (Al-Zn)	Al-Zn-Mg Al-Zn-Si-Mg

Alliages de fonderie

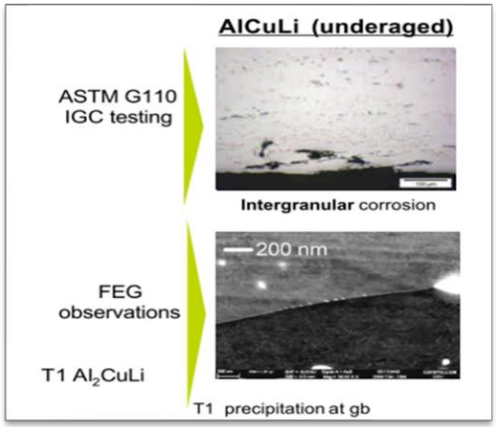
Principaux alliages de fonderie (séries 3XX.X et 4XX.X) fontes d'aluminium

Alliages Al-Si

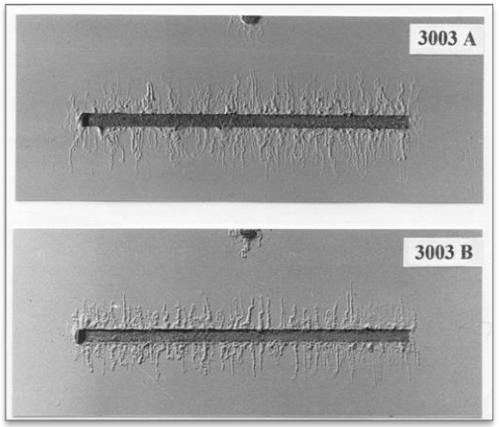
Corrosion de l'aluminium

Modes de corrosion typiques de alliages d'aluminium

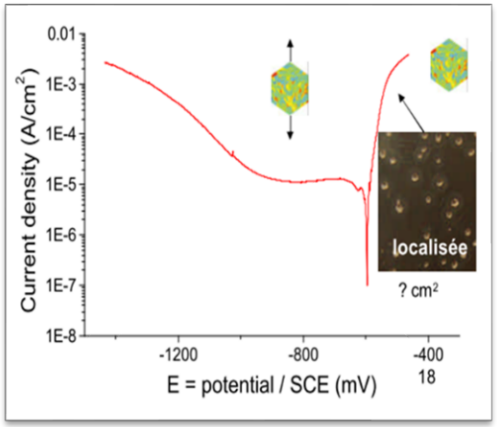
Intergranulaire



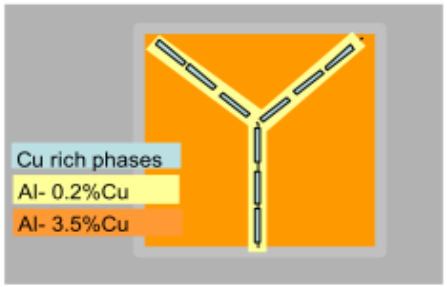
Filiforme

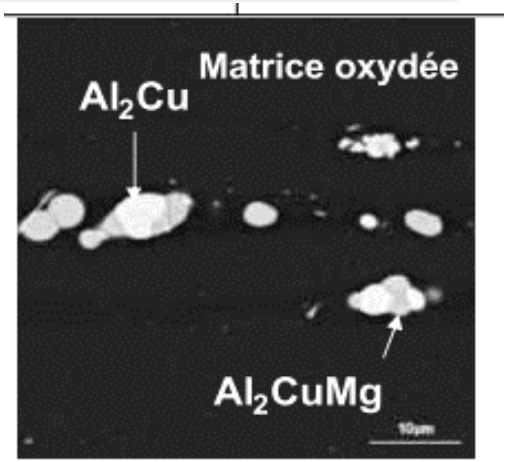


Par piqûre (notamment en présence de précipités)



Localised corrosion of Cu depleted zone at grain boundary





Les alliages d'aluminium et la corrosion

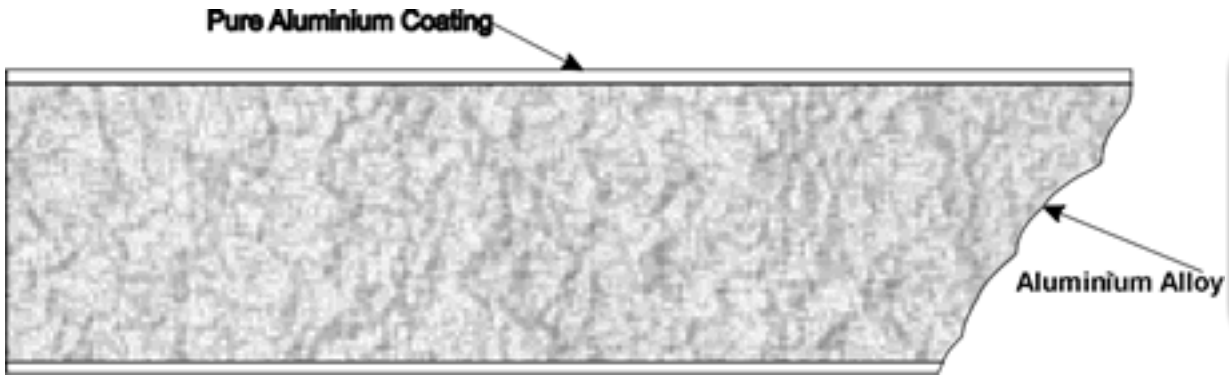
Anodisation

Peinture

Choix des nuances

Protection de l'Al contre la corrosion

2024 Al Clad



on protège un alliage aux bonnes propriétés mécaniques mais qui résiste mal à la corrosion par une feuille d'Al pur