

Matériaux métalliques

Les alliages ferreux (aciers)

Les aciers inoxydables

Les alliages non ferreux



1

V – Les alliages ferreux (aciers)

- Aciers non alliés : Fe-C + (Si, Mn, S, P)^{élaboration}

aciers « à ferrer les ânes »

- Aciers alliés : Fe-C + X (éléments d'addition)

aciers faiblement alliés

la somme des concentrations
de tous les éléments
d'addition est inférieure à 5%

Al	B	Cr	Co	Cu	Mn	Mo
0,1	0,0008	0,30	0,10	0,40	1,60	0,08
Ni	Nb	Si	Ti	W	V	
0,30	0,05	0,50	0,05	0,10	0,1	

teneur minimale séparant un acier allié
d'un acier non allié (% en masse)

aciers alliés

la concentration d'un élément
dépasse 5%

aciers réfractaires

aciers inoxydables

....

2

Principaux éléments d'addition

	symbole chimique	Z	A	symbole AFNOR
Aluminium	Al	13	27	A
Chrome	Cr	24	52	C
Cobalt	Co	27	59	K
Cuivre	Cu	29	63,5	U
Manganèse	Mn	25	55	M
Molybdène	Mo	42	96	D
Nickel	Ni	28	59	N
Niobium	Nb	41	93	Nb
Phosphore	P	15	31	P
Plomb	Pb	82	207	Pb
Silicium	Si	14	28	S
Soufre	S	16	32	F
Titane	Ti	22	48	T
Tungstène	W	74	184	W
Vanadium	V	23	51	V

Seuls les petits atomes (H, B, C, N, O) entrent en insertion dans les aciers. Les autres forment des solutions solides de substitution.

Dans les métaux la notion de trace est de l'ordre de la ppm (10^{-6})

On utilise souvent le millième (de %) ce qui correspond à 10 ppm

Les éléments d'addition agissent sur :

- la microstructure
- le comportement mécanique
- la tenue en température
- la résistance à la corrosion
- la trempabilité
- l'usinabilité...

Certains éléments (Si, S, P, Mn, O) proviennent de la phase sidérurgique
La plupart sont introduits volontairement lors de la phase « aciérie »
Enfin, certains éléments (Cu par exemple) proviennent du retraitement des ferrailles...

3

Influence sur la microstructure...

- stabilité des phases allotropiques cc et fcc
- formation de carbures...

Stabilité des phases allotropiques

certains éléments favorisent la phase cc (alphagènes) d'autres la phases cfc (gammagènes)
les éléments de volume atomique plus grand que celui du fer sont généralement alphagènes
ceux de volume atomique inférieur sont gammagènes.

alphagènes :	gammagènes :
<p>métaux cc (en substitution) Vb : V, Nb, Ta Vib : Cr, Mo, W</p> <p>métaux cfc ou hc Al, Zr, Be</p> <p>éléments non métalliques (en substitution dans cc) Si, S, P, B Ge, As,</p>	<p>éléments non métalliques (en insertion) C, N</p> <p>métaux cfc (en substitution) Ni, Co, Mn, Rh, Pd, Ir, Pt, Au</p> <p>métaux hc : Zn, Ru, Os</p> <p>en teneur importante, peuvent stabiliser la phase cfc à basse température (aciers austéno-ferritiques, aciers austénitiques)</p>

4

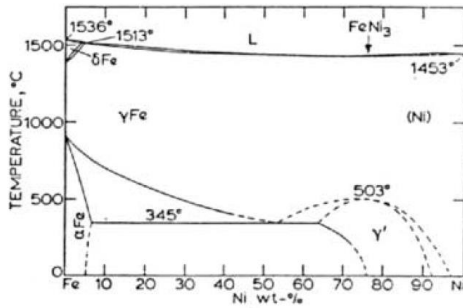
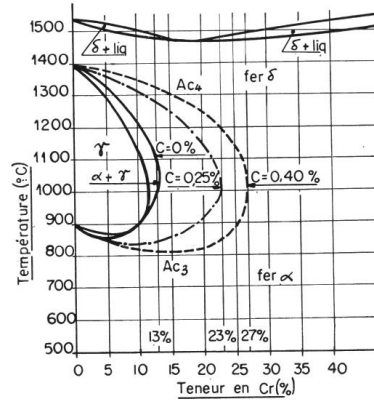


diagramme Fe-Ni

Ni : élément γ -gène
 → extension de la phase γ

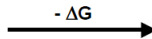
diagramme Fe-Cr
 Cr élément α -gène

→ forte réduction de la phase γ
 d'autant plus que la teneur en carbone (gammagène) est faible



5

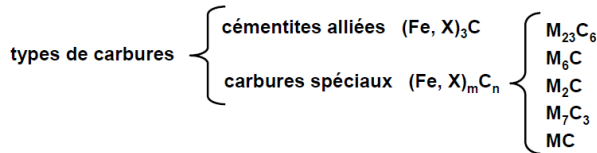
formation de carbures



Si - Al - Cu - Ni - Co - **Fe** - Mn - Cr - Mo - W - V - Ti - Nb

éléments
non-carburigènes

éléments
carburigènes



Mn : $(Fe, Mn)_3C$ uniquement

Cr : $(Fe, Cr)_3C$ de préférence, $(Fe, Cr)_mC_n$ éventuellement ($Cr_{23}C_6$)

Mo, W : $(Fe, X)_3C$ et $(Fe, X)_mC_n$ exemple : $(Fe, Mo)_3C$, MoC et $(Fe, Mo)_6C$ simultanément

V, Ti, Nb, Zr : $(Fe, X)_mC_n$ uniquement

Dans les aciers inoxydables (Fe, Cr, Ni), la précipitation de carbure de Cr entraîne une diminution locale de la teneur en Cr, pouvant conduire à la corrosion intergranulaire. En ajoutant des éléments plus carburigènes que Cr (Mo, W, V, Ti...) on réduit la précipitation de carbures de Cr.

6

durcissement

un alliage est toujours plus dur qu'un métal pur...

- durcissement de solution solide

la présence d'atomes étrangers rend le plan de glissement plus « rugueux » et contrarie le déplacement des dislocations, d'où un durcissement (augmentation de la limite élastique)

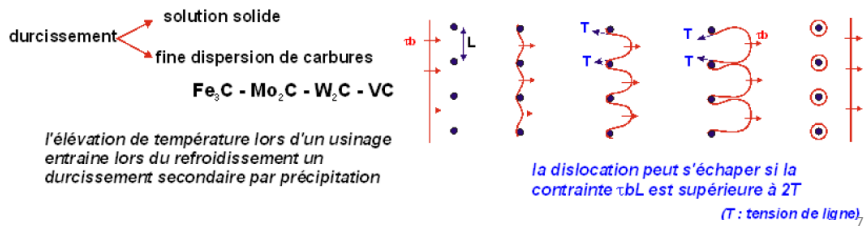
- carbone (insertion) pour les aciers
- W ou Co dans la ferrite (substitution) aciers pour outils

- durcissement par précipitation

la présence de précipités gêne le mouvement des dislocations (ancrage)

exemple : acier rapide 1%C - 0,4%Si - 0,4%Mn - 4%Cr - 5%Mo - 6%W - 2%V - 5%Co

les précipités de petite taille gênent le déplacement des dislocations



résistance à la corrosion

une teneur en Cr supérieure à 12% (« aciers inoxydables ») permet une résistance à la corrosion en milieu aqueux

Le Si, l'Al augmentent la résistance des aciers à l'action de l'oxygène ou des gaz chauds (aciers réfractaires en milieu oxydant)

Mo agit sur la passivité et la résistance chimique (aciers austénitiques)

trempeabilité

durcissement important d'un acier lors d'un refroidissement rapide (« trempé ») par formation d'une phase quadratique (« martensite », ferrite déformée) très dure...

En règle générale, les éléments d'addition favorisent la trempeabilité, en particulier le carbone.

Certains aciers sont dits « auto-trempeant », un simple refroidissement à l'air suffit.

Norme AFNOR (NF A35-5)**

peut sembler complexe mais donne des informations précises

aciers non alliés (Fe-C)

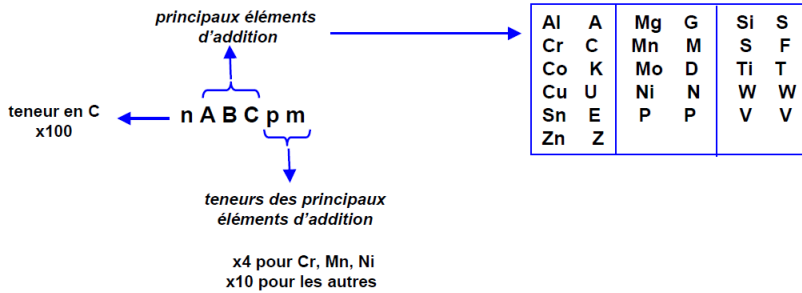
Cn $n=100(\%C)$ à 0,05% près

XCn si la teneur en C est mieux respectée

C12 : de 0,06 à 0,18%C
XC12 : de 0,09 à 0,16%C

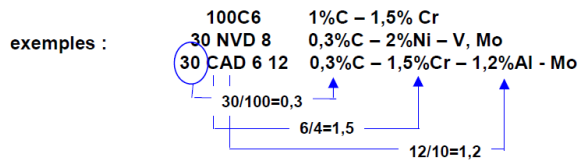
aciers faiblement alliés (Fe-C-X)

la somme de tous les éléments n'excède pas 5%



9

- ?
- on cherche à avoir des nombres entiers
 - selon la teneur moyenne courante:
 - on x par 4 les teneurs les plus élevées (Cr, Mn, Ni)
 - on x par 10 celles des éléments les moins importants



aciers fortement alliés (Fe-C-X)

Un ou plusieurs éléments d'addition ont une teneur dépassant 5%

même règle que précédemment (aciers faiblement alliés) mais :
- Z devant la teneur en C (x100)
- la teneur des principaux éléments d'addition est x1

Z6 CN 18-10 0,06%C - 18%Cr - 10%Ni
Z35 NCWS 32-11 0,35%C - 32%Ni - 11%Cr - W, Si

10

Désignation selon NF EN 10088-1		Désignation selon NF A 35-573:1990 et NF A 35-574:1990
Symbolique	Numérique	
X2CrNi12	1.4003	-
X2CrTi12	1.4512	Z 3 CT 12
X6CrNiTi12	1.4516	Z 8 CNT 12
X6Cr13	1.4000	Z 8 C 12
X6CrAl13	1.4002	Z 8 CA 12
X2CrTi17	1.4520	-
X6Cr17	1.4016	Z 8 C 17
X3CrTi17	1.4510	Z 4 CT 17
X3CrNb17	1.4511	Z 4 CNb 17
X6CrMo17-1	1.4113	Z 8 CD 17-01
X6CrMoS17	1.4105	Z 8 CF 17
X2CrMoTi17-1	1.4513	-
X2CrMoTi18-2	1.4521	Z 3 CDT 18-02
X2CrMoTiS18-2	1.4523	Z 3 CDFT 18-02
X6CrNi17-1	1.4017	Z 8 CN 17
X6CrMoNb17-1	1.4526	Z 8 CDNb 17-01
X2CrNbZr17	1.4590	Z 3 CNbZr 17
X2CrAlTi18-2	1.4605	Z 3 CAT 18
X2CrTiNb18	1.4509	Z 3 CTNb 18
X2CrMoTi29-4	1.4592	Z 2 CDT 29-04

Aciers inoxydables : comparaison entre les normes européennes et la norme AFNOR

certaines nuances ne sont pas forcément représentées dans toutes les normes

Désignation selon NF EN 10088-1		Désignation selon NF A 35-573:1990 et NF A 35-574:1990
Symbolique	Numérique	
X2CrNiN23-4	1.4362	Z 3 CN 23-04 Az
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	Z 5 CND 27-05 Az
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	Z 3 CND 22-05 Az
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	Z 3 CNDU 25-07 Az
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	Z 3 CND 25-06 Az
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	Z 3 CNDU 25-06 Az

aciers inoxydables ferritiques

aciers inoxydables austéno-ferritiques

! pour les inox on emploie souvent la norme US... elle est beaucoup moins précise que la norme européenne :

316L → X2CrNiMo 18-14-3 1.4435
 → X2CrNiMo 17-12-2 1.4404

11

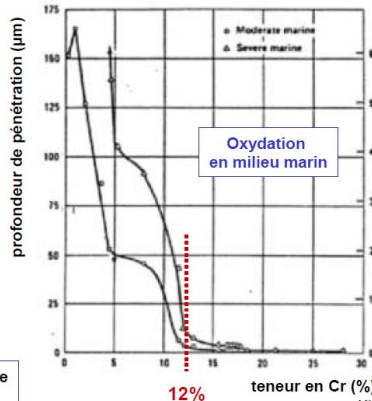
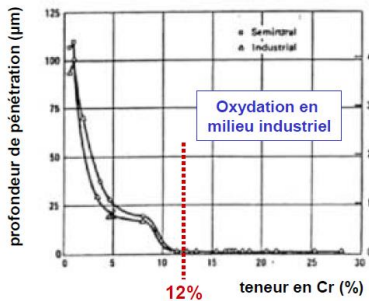
VI- Les aciers inoxydables

%Cr>10,5% %C<1,2%

En milieu oxydant (aqueux), Il se forme en surface des métaux ou alliages :

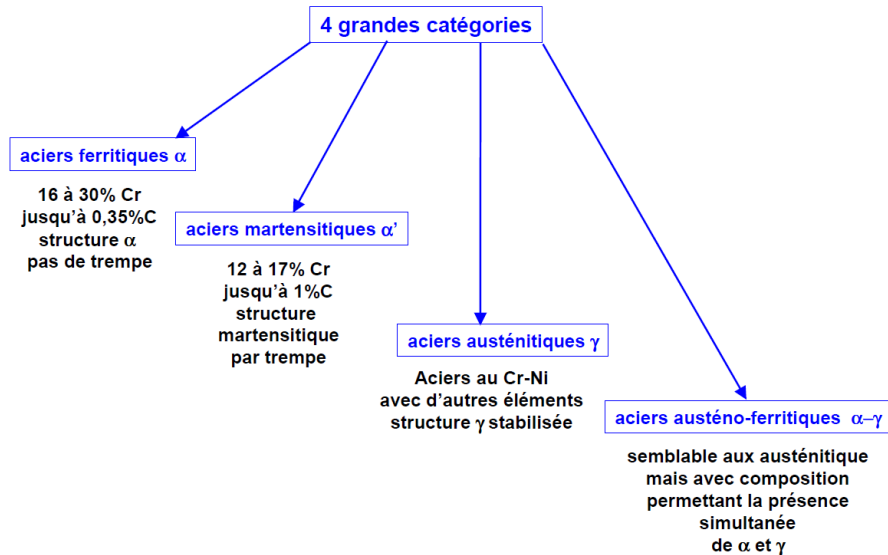
- soit un oxyde pulvérulent non protecteur (Fe, aciers) → corrosion
- soit un oxyde compact, protecteur (Al, Cr)

La présence d'une teneur en Cr de l'ordre de 10 à 12% préserve l'acier en formant une couche d'oxyde protectrice en surface (auto-restructurante)



Influence de la teneur en Cr sur la résistance à la corrosion dans différents milieux

12



13

Les différentes familles d'aciers inoxydables

Selon les teneurs respectives en Cr et en Ni, on distingue plusieurs nuances d'aciers inoxydables :

- les aciers inoxydables ferritiques
- les aciers inoxydables martensitiques
- les aciers inoxydables austénitiques
- Les aciers inoxydables austéno-ferritiques

I - Les Aciers inoxydables ferritiques

- Base : Fe-Cr (16 à 30% Cr)
- faible teneur en C (<0,1%)
 - Si 1% Mn 1%

ferromagnétiques au dessous du point de Curie et paramagnétiques au dessus

- ductilité moyenne
- mauvaise soudabilité
- fragilisation possible par la phase σ
- fragilisation par démixtion

- très bonne résistance à la corrosion
- utilisations :
 - construction (tuyau d'échappement...)
 - agro-alimentaire (couverts...)
 - industrie chimique
 - emploi à haute température

14

II - Les Aciers inoxydables martensitiques

	teneur en C (%)	teneur en Cr (%)
groupe I	<0,15	12 à 14
groupe II	0,20 à 0,40	13 à 15
groupe III	0,6 à 1,0	14 à 16
groupe IV	0,1	16 à 18 (+1 à 4%Ni)

*ferromagnétiques au dessous du point de Curie
et paramagnétiques au dessus*

Structure martensitique obtenue par trempe
(refroidissement rapide à partir d'une structure austénitique)

la forte teneur en carbone favorise l'apparition de la martensite

- très durs
- peu résistants à la corrosion aqueuses en température (T<50°C)
- applications nécessitant une bonne résistance à la corrosion et une grande dureté
(*soupapes, clapets, robinetterie, boulons, turbine hydraulique...*)

15

III – Les Aciers inoxydables austénitiques

18-8	C<0,12% C<0,05% C<0,03%	} malléabilité, emboutissage	les plus utilisés : 18-10 (304), 18-10 2%Mo (316) 25-20... (60% de tous les aciers inoxydables)
18-12 20-12 25-12 25-20	} résistance aux hautes températures		

On peut ajouter jusqu'à 2% de Mo pour améliorer la résistance aux acides et aux chlorures

- très bonne propriétés mécaniques (ductilité)
- très bonne résistance à la corrosion
- bonne résistance aux basses températures (-250°C)
- durcissement par écrouissage (emboutissage, tréfilage, usinage...)
- bonne soudabilité
- *risque de corrosion intercrystalline (addition de Ti ou Nb)*
- *risque d'apparition de la phase σ*

Utilisation :

- haute température en milieu corrosif
 - basse température (cryogénie)
 - chimie
 - pharmacie
 - laiterie
 - décoration ...
- lorsqu'il faut à la fois une bonne résistance à la corrosion et de bonnes propriétés mécaniques (casserolles...)*

16

IV - Les Aciers inoxydables austéno-ferritiques

structure mixte $\alpha + \gamma$

découverts par hasard dans les années 30

base : Fe-Cr-Ni

- Cr : 20 à 25%
- Ni : <8%
- C : 0,05%
- Mo 2,5% Cu 1,5% Mn 0,5%

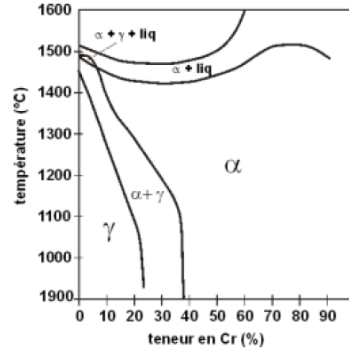
A partir des austénitiques les plus riches en Cr et en diminuant le Ni

la proportion de ferrite (30 à 50%) peut être ajustée par des traitements thermique

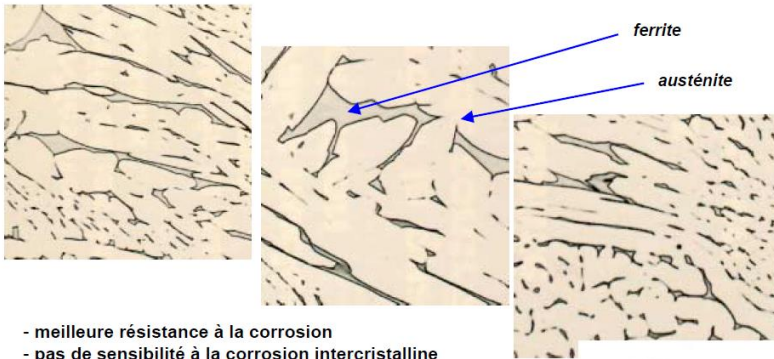
Lorsque la teneur en Cr croît, la structure peut devenir biphasée : ferrite+austénite

par exemple :
20- 12 sera austénitique
20- 8 sera austéno-ferritique

la teneur en Ni peut être réduite en augmentant la teneur en N (\rightarrow 0,25%) ce qui augmente la résistance à la corrosion, les propriétés mécaniques et diminue le prix...



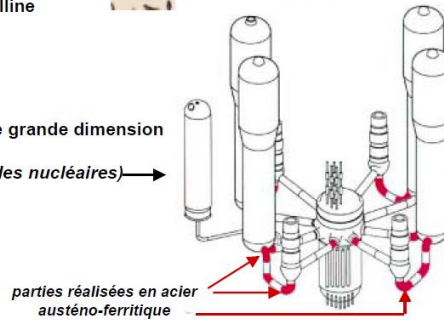
17



- meilleure résistance à la corrosion
- pas de sensibilité à la corrosion intergranulaire
- meilleure limite élastique
- meilleure soudabilité
- permet de réaliser des pièces moulées

Utilisation :

- ensemble chaudières-soudés de grande dimension
 - pièces moulées complexes
- (coudes moulés du circuit primaire des centrales nucléaires) \rightarrow
- réparation de soudure...

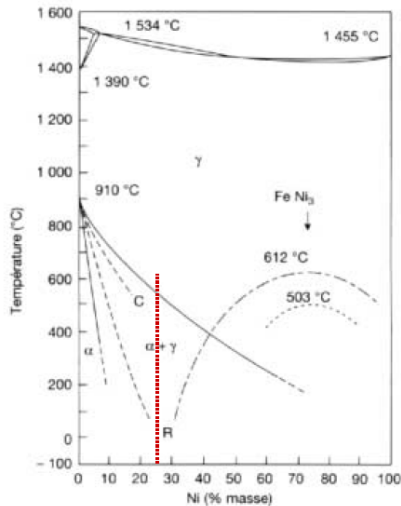


18

Propriétés mécaniques des aciers inoxydables , comparaison avec d'autres alliages

CARACTÉRISTIQUES	ACIERS			Aluminium recuit	Cuivre recuit	Zinc de couverture
	Non allié	Inoxydables				
		Ferritique	Austénitique			
Résistance à la traction en N/mm ² R_m	420	540	600	75/90	230	220
Limite d'élasticité à la traction en N/mm ² $R_{p0,2}$	220 moy.	245 mini.	195 mini.	25/35 moy.	70 moy.	120 moy.
Allongement à la rupture à la traction %	25 moy.	18 mini.	45 mini.	35/42 moy.	45 moy.	20 moy.
Module d'élasticité longitudinal kN/mm ² moyen	210	220	200	69	120	100
Masse volumique kg/dm ³	7,8	7,7	7,9	2,7	8,96	7,14
Dilatabilité linéique $k \cdot 10^{-6}/^{\circ}C$	12	10,2	16	24	16,5	29,3
Température de fusion $^{\circ}C$	1530 $^{\circ}C$	1500 $^{\circ}C$	1450 $^{\circ}C$	660 $^{\circ}C$	1083 $^{\circ}C$	419 $^{\circ}C$
Conductivité thermique W/m $^{\circ}C$	46	21	15	240	342	110

19



- α structure cubique centrée
- γ structure cubique à faces centrées
- diagramme d'équilibre
- - - diagramme métastable pratique (C chauffage, R refroidissement)
- - - diagramme de transformation magnétique (point de Curie) de la phase γ
- - - - diagramme de transformation ordre-désordre

Les alliages Fer-Nickel : l'INVAR

de la famille des alliages Fe-Ni, découvert en 1896 par Ch. Guillaume et fabriqué par la Société IMPHY, cet alliage à 36%Ni présente un très faible coefficient de dilatation thermique (30% inférieur au platine).

diagramme Fe-Ni

Au delà de 27%Ni, la structure est cfc à température ambiante (diagramme métastable, R)

En dessous de 27%, la structure est cc (aciers au Ni)

20

Applications des alliages Fe-Ni

de très nombreuses applications qui nécessitent une très faible dilatation thermique ou de bonnes performances magnétiques.....

- horlogerie

- horlogerie classique : ressorts en spirale
(Elinvar 36%Ni-12%Cr, Nivarox 38%Ni-8%Cr, Thermostat 40%Ni-9%Mo)
- horlogerie électronique : quartz oscillant et moteur pas-à-pas (alliages magnétiques)
Supra50 (50%Ni)
Permimphy 80%Ni-5%Mo

- régulation thermique (thermostats)

bilames thermostatiques

2 lames minces rigidement liées ensemble et avec des coefficients de dilatation différents

- l'une est en INVAR (lame passive, à faible allongement)
- l'autre est active, à forte dilatation thermique ($\alpha \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) :
on utilise actuellement des alliages Fe-Ni-Mn ou Fe-Ni-Cr (15 à 25%Ni)

- boîtiers de circuits intégrés

permet de réaliser des boîtiers ultra-minces à faible dilatation thermique

Fe-42%Ni, Fe-29%Ni-17%Co...

21

Une autre application importante : Les méthaniers

Le transport du gaz naturel sous forme liquide permet de réduire de 600 fois le volume transporté mais nécessite des température de -163°C à la pression atmosphérique.

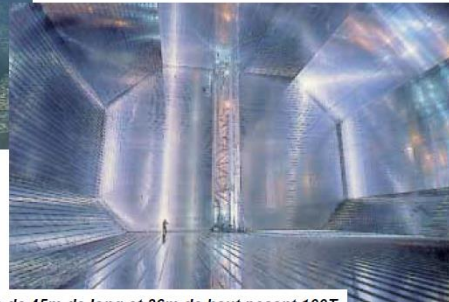
Depuis 1964, des navires méthaniers de grande capacité ($>25.000 \text{ m}^3$) ont été mis en service.



navire méthanier de 130.000 m^3

Une des solutions choisies est de réaliser les cuves en INVAR

La très basse température du méthane liquide pose des problèmes de dilatation thermique.



Cuve de 45m de long et 36m de haut pesant 100T

22

VII- Les alliages non ferreux

Un certain nombre de métaux servent de base à des alliages...

1) Les bases Nickel

donnent des alliages très résistants à la corrosion et des alliages réfractaires (« superalliages »)

- a) à la limite entre acier et base Ni : les Inconel
 Inconel 800 (alliage 800 ou Z10NC32 21) Ni 30 à 35%, Cr 19 à 23%
 Inconel 825 (Z5NCD 40-21-3) idem avec Cu 2% et Ti 1%
bonne résistance à la corrosion (tubes de GV des REP allemands et REP2000)
- b) les bases Ni
 Ni-Cu (résistance à la corrosion) : Monel (Ni-Cu35, Ni-Cu35AlTi)
 Ni-Cr : Ni-Cr20 (résistances de chauffage)
 Ni-Cr-Fe (tenue au fluage, réfractaire)
 - Inconel 600 (ou « alliage 600 ») Ni-Cr14Fe (Cr 14 à 17%, Fe 6 à 10%)
 - Inconel 690 Ni-Cr30Fe10 (Cr 21 à 27%, Fe 7 à 11%)
- Ni-Mo
 Hasteloy B (Ni-Mo28)
 Hasteloy C (Ni-Mo16Cr15)
 Rene41 : Ni-Cr19Co10Mo10 (réfractaire, ailette de turbine)
 Nimocast : Ni-Cr14Ti6Fe4 (+Co, Mo) (acier de moulage)
 Chromel : Ni-Cr10 (fil de thermocouple)
 Permalloy : Ni-Fe22 (tôle magnétique)

23

2) Les Alliages d'aluminium

notation AFNOR : A + symbole des éléments d'addition avec teneur en %

N : nickel	D : molybdène
C : chrome	U : cuivre
S : silicium	E : étain
G : magnésium	Z : zinc

- série 1000 (Al non allié, Al>99%) mou et ductile, pour câble électrique, alimentaire
- série 2000 (Al+4%Cu+Mg, Si, Mn) durcissement structural, aviation, pièces forgées
- série 3000 (Al+1%Mn) assez durs, ductiles, toitures, casseroles
- série 5000 (Al+3%Mg, 0,5%Mn) durs, écouissables, soudables, réservoirs, boîtes, navires
- série 6000 (Al+0,5%Mg, 0,5%Si) durcissement structural, huisserie
- série 7000 (Al+6%Zn+Mg, Cu, Mn) durcissement structural, aviation, ferroviaire
- Al-Mg : AG0,6 - AG4MC
- Al-Mn-Cu : AM1 - AM1G
- Al-Cu : AU2G
- AGS/L 76 (Almelec) 0,7%Mg - 0,5%Si - Fe<0,3%
pour les câbles des lignes à haute tension
- Al-Si alliages pour fonderie
 - AS13 ou alpax
 - AS9U3 pour les carter de moteur...

24

3) Alliages de cuivre

- alliages faiblement alliés (Te 0,7%max, Cr 0,9%max, Cd 1%max, Be 2%max)
- laitons (CuZn) 5 à 45%Zn
- bronzes (CuSn) 3 à 20% Sn
- cupro-aluminium (4 à 14%Al) (résistants à la corrosion marine)
- cupro-nickel (5 à 45%Ni) (résistants à la corrosion marine)

4) Alliages de Zinc

- ZA4G, ZA4U1G (Zamak) 4%Al, 1%Cu, 0,05%Mg (alliages de fonderie)

5) Alliages de magnésium

- Mg-Al : GA9, GA6Z1, GA9Z1
- Mg-Zr (0,4 à 1%Zr)

6) alliages de Ti

- pour l'aéronautique (turbine, ailettes...), génie chimique, implants chirurgicaux
- TA5E, TA8DV, TA6V, TA6V6E

7) alliages de Zr

faible section efficace de capture des neutrons, bon comportement mécanique, résistance à la corrosion, utilisé pour les gaines de combustibles des réacteurs nucléaires

- Zircaloy 4 : Sn 1,2 à 1,7% - Fe 0,18 à 0,24% - Cr 0,07 à 0,13% (centrales occidentales)
- M5 (Zr-Nb) Nb 1%, Fe 0,01% (centrales russes)

25

Les alliages d'aluminium



*Les plus utilisés
après les aciers*

26

L'élément aluminium

Tf = 660°C
 $\rho = 2700 \text{ kg.cm}^{-3}$
 Structure c.f.c

13
 Al

Très oxydable \longrightarrow Al_2O_3 qui protège

27

Un peu d'histoire:

1831: Berthier découvre la bauxite
 (minerais d'aluminium),

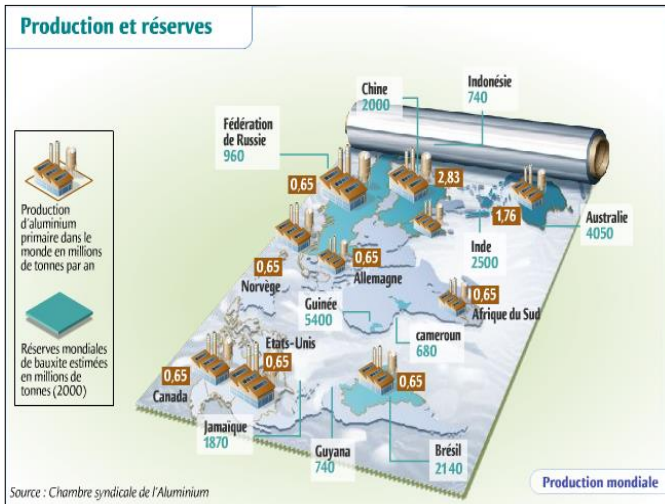
1845: Wölher obtient de l'aluminium
 impur,

1854: Sainte-claire Deville produit de
 l'aluminium pur,

1886: Bayer fait breveter un procédé
 industriel de fabrication.

28

Dans la nature: Très abondant dans la croûte terrestre:



- 18570 Mt recensées,

-10 à 20 Mt produites (1-2% acier).

29

Très facile à recycler:
c'est le métal qui l'est le plus.



30

Les propriétés:

Les secrets de l'aluminium

Résistance à la corrosion

L'aluminium est utilisé de façon courante par les architectes, aussi bien dans les édifices publics que pour les habitations individuelles. Tout en offrant de nombreuses possibilités de formes et de couleurs, les structures de bâtiment en aluminium demandent peu d'entretien et résistent bien dans le temps.

Autres utilisations

Navires (coques, mâts...), Citernes de transports, Panneaux de signalisation




Les secrets de l'aluminium

Allègement

On utilise plus de 70 % d'alliages à base d'aluminium dans la construction d'un avion, ce qui entraîne une division par deux du poids de sa structure. L'aluminium étant trois fois moins lourd que l'acier, cela induit une réduction du poids, d'où une diminution de la consommation et de l'émission de gaz à effet de serre.

Autres utilisations

Camping, Bicyclette, Transport ferroviaire




Les secrets de l'aluminium

Conductibilité électrique

L'aluminium offre une excellente conductibilité électrique pour un poids inférieur à celui du cuivre. L'utilisation d'aluminium fait réaliser un gain de poids de 50 %. C'est pour cela qu'on emploie de plus en plus pour les lignes à haute tension.

Autres utilisations

Câble souterrains, Fils de bobinage pour transformateurs



31


Les secrets de l'aluminium

Conductibilité thermique

L'aluminium se distingue par une exceptionnelle conductibilité thermique (60 % de celle du cuivre). Il véhicule et transmet la chaleur, aussi le retrouve-t-on tout naturellement dans la plupart des capteurs solaires.

Autres utilisations

Radiateurs, Disques de freins, Casseroles, poêles, autocuiseurs




Les secrets de l'aluminium

Esthétique

L'aluminium, par la multiplicité des traitements de surface : lisse, brossé, satiné, brillant, mat..., permet de créer des objets du quotidien originaux et designs, tels que réfrigérateurs, fours, mais aussi des chaises, tables...

Autres utilisations

Etuils à lunettes, Appareils photo, Montres, Valises




Les secrets de l'aluminium

Solidité

En 2000, une voiture européenne contient en moyenne 100 kg d'aluminium : bloc moteur, carter, radiateur, jantes... et, de plus en plus souvent, carrosserie et châssis. L'aluminium, allié à d'autres métaux ou traité à froid, se révèle aussi résistant que l'acier. Il confère aux véhicules une résistance améliorée aux chocs, ainsi qu'une meilleure tenue de route.

Autres utilisations

Bouteilles sous pression, Ponts, Trains d'atterrissage



Les secrets de l'aluminium

Protection contre les ultraviolets et l'humidité

Aux États-Unis, 100 % des boîtes de boisson, sont en aluminium. Tous les emballages en aluminium autorisent un niveau optimal de conservation des liquides et des aliments frais ou appertisés. Ce métal constitue de plus une barrière fiable contre l'oxygène et les micro-organismes.

Autres utilisations

Conditionnements de médicament, Opercules de yaourt, boîtes de conserve



32

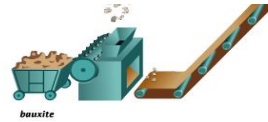
L'élaboration

En cinq étapes

1. Extraction de la bauxite

La bauxite est le minerai le plus couramment utilisé pour obtenir de l'aluminium. Il en faut environ 4 tonnes pour obtenir 1 tonne d'aluminium. Les gisements de bauxite, souvent à ciel ouvert, se trouvent sous les tropiques pour la plupart.

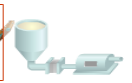
La bauxite contient de 40 à 60 % d'oxyde d'aluminium hydraté, mélangé à de la silice et de l'oxyde de fer.



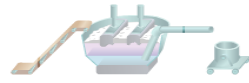
bauxite



1-Minerais



2-Alumine



3-Alu primaire



4-Alu liquide



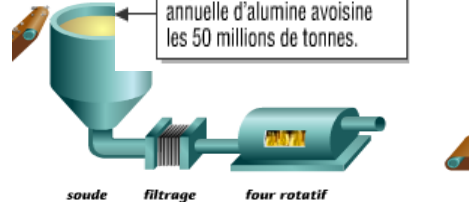
5-Produit final

33

2. Elaboration de l'alumine : le procédé chimique Bayer

Après avoir été broyée, la bauxite est mélangée à de la soude à haute température et sous pression. On obtient un liquide qui, une fois épuré et calciné, donne l'alumine (poudre blanche), produit intermédiaire.

La production mondiale annuelle d'alumine avoisine les 50 millions de tonnes.



soude filtrage four rotatif



1-Minerais



2-Alumine



3-Alu primaire



4-Alu liquide

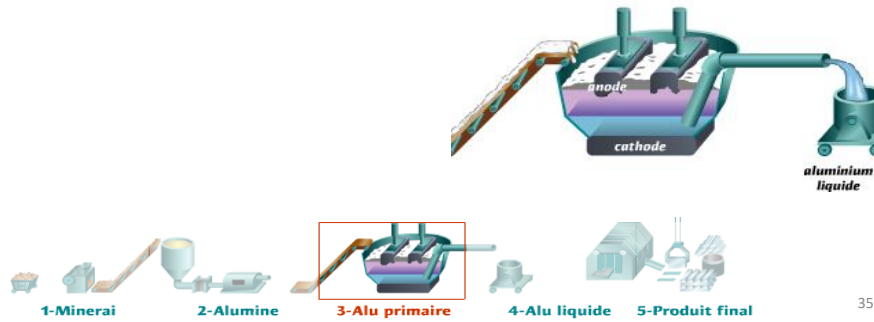


5-Produit final

34

3. Production d'aluminium primaire

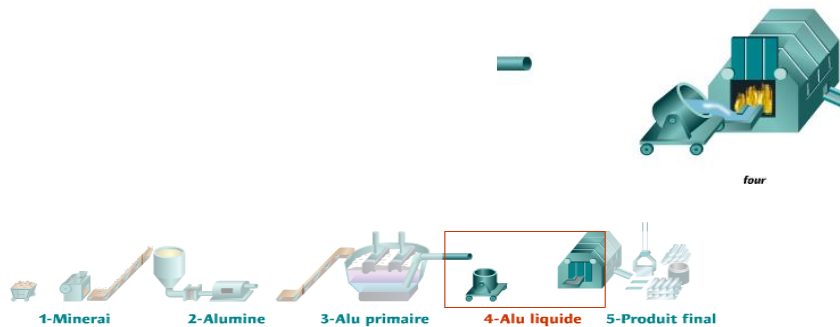
L'aluminium s'obtient à partir de l'alumine en utilisant un procédé inchangé depuis 1886 : l'électrolyse, aujourd'hui gérée par ordinateur.



35

4. Coulée de l'aluminium liquide

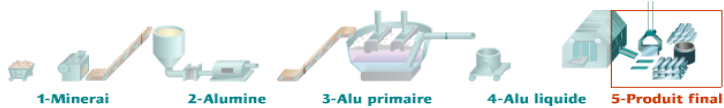
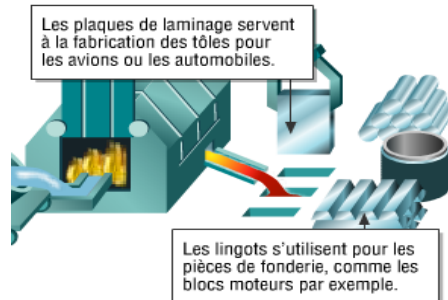
L'aluminium liquide est siphonné au fur et à mesure. Transporté sur un chariot vers la fonderie, il est déversé dans un four. D'autres métaux peuvent être alors ajoutés lorsqu'il s'agit de produire des alliages.



36

5. Obtention des produits

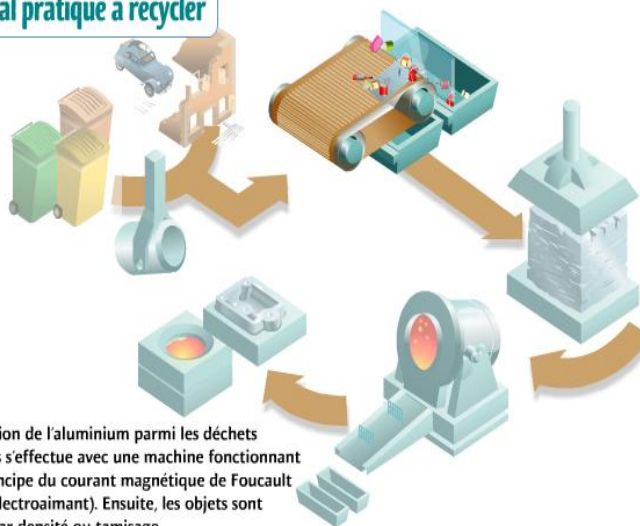
L'aluminium sort de la fonderie sous des formes diverses, en fonction de la destination des produits. Les billettes cylindriques forment les armatures routières et ferroviaires. Le fil est dédié aux câbles de distribution d'énergie, aux grillages...



37

Le recyclage: En quatre étapes

Un métal pratique à recycler

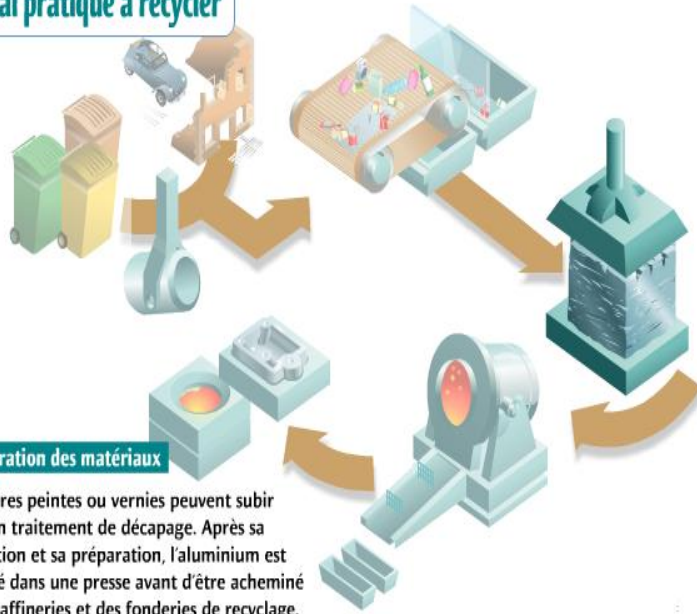


Le tri

La détection de l'aluminium parmi les déchets ménagers s'effectue avec une machine fonctionnant sur le principe du courant magnétique de Foucault (sorte d'électroaimant). Ensuite, les objets sont séparés par densité ou tamisage.

38

Un métal pratique à recycler

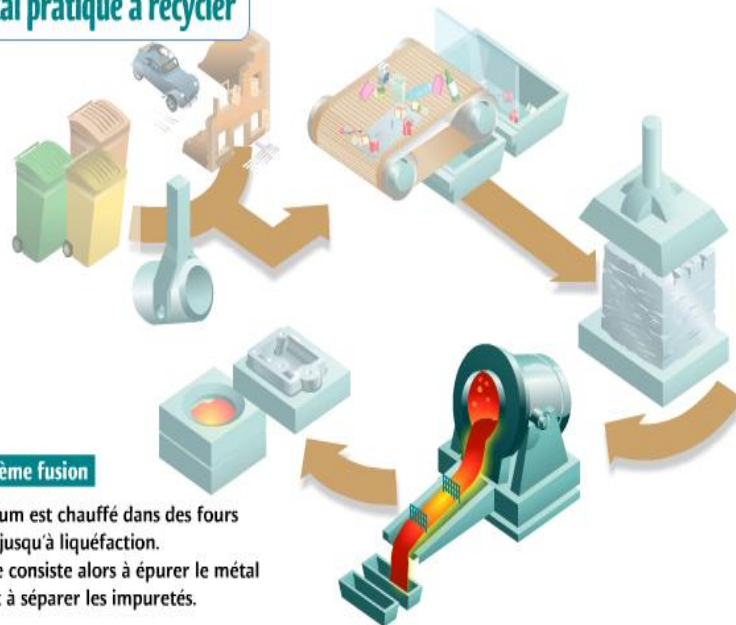


La préparation des matériaux

Les matières peintes ou vernies peuvent subir de plus un traitement de décapage. Après sa récupération et sa préparation, l'aluminium est comprimé dans une presse avant d'être acheminé vers des raffineries et des fonderies de recyclage.

39

Un métal pratique à recycler

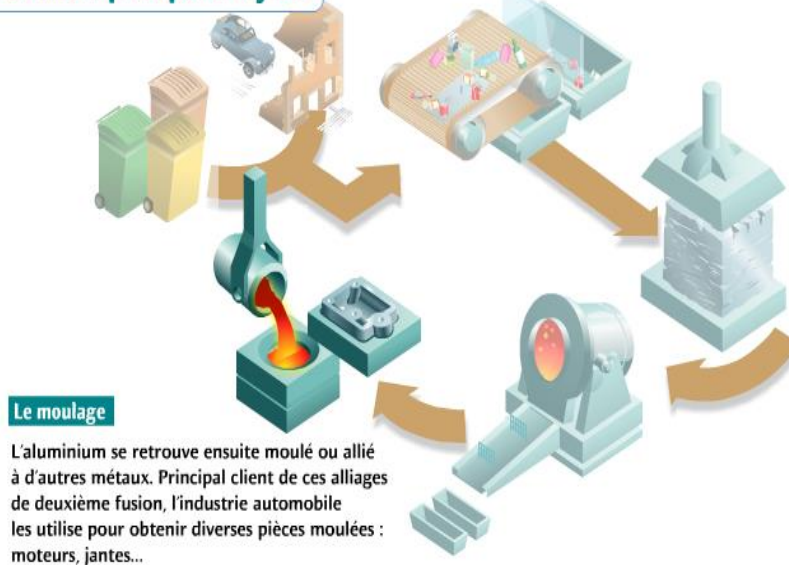


La deuxième fusion

L'aluminium est chauffé dans des fours spéciaux jusqu'à liquéfaction. L'affinage consiste alors à épurer le métal liquide et à séparer les impuretés.

40

Un métal pratique à recycler



41

La mise en forme:

Structure c.f.c = déformable



Corroyage = déformation plastique

Température de fusion basse



Moulage = fonderie

42

Les traitements

Trois traitements possibles :

- Les traitements d'homogénéisation,
- Les traitements d'adoucissement,
- les traitements de trempe

43

L'homogénéisation

Objectif: dissoudre les phases métalliques en excès et réaliser une homogénéisation de la composition de la solution solide.

- Maintient de 6 à 48h
- Températures de 450 à 600 °C

44

L'adoucissement

Objectif: Adoucir un alliage durci par écrouissage ou par trempe.

- Traitement de restauration
Température: 200 à 300°C
Temps: 1 à 8h
- Traitement de recristallisation
Température : 300 à 400°C
Temps : 0,5 à 3h

45

La trempe structurale

Objectif: Améliorer les caractéristiques de dureté de l'alliage.

- En deux phases:
- Trempe sévère
Température: 500 à 550°C
Fluide: eau
 - Revenu
Température : 20 à 400°C
Temps : 0,5 à ...h


46

Les états métallurgiques

Plusieurs états possibles pour le métal:
écroui, recuit, trempé ...

Symbole	Etat
F	Brut de fabrication
O	Recuit
H	Ecroui
T	Traité thermiquement
W	Trempé

1 ^{er} chiffre (a)		2 ^{ème} chiffre (b)	
1	Ecroui seulement	2	$\frac{1}{4}$ dur
2	Ecroui - restauré	4	1/2 dur
3	Ecroui - stabilisé	6	$\frac{3}{4}$ dur
		8	dur
		9	Extra dur

Les états H et T sont
subdivisés: Hab 

47

Les alliages pour corroyage

Destinés à être mis en forme par
déformation plastique:

laminage, filage, matriçage, forge ...

On les classe en deux familles selon qu'ils
pourront être durcis par trempe (alliages
trempants) ou par écrouissage (alliages non
trempants).

48

Désignation des alliages

Généralement, les alliages d'aluminium sont désignés selon les normes américaines: on affecte à chaque type d'alliage un nombre de 4 chiffres.

Le premier de ces chiffres indique l'élément d'alliage principal et identifie la série. Le deuxième indique les variantes et les deux autres sont des numéros d'ordre.

Série	1	2	3	4	5	6	7	8
Elément d'alliage principal	Rien	Cu	Mn	Si	Mg	Mg-Si	Zn	Autres

49

Une deuxième désignation symbolique existe qui reprend les symboles des constituants de l'alliage, suivis, pour les principaux, de leurs proportions dans l'alliage.

Exemple : Al Si5Cu3Mg = 5% de silicium, 3% de cuivre et moins de 1% de magnésium.

50

Elément	Aluminium	Bore	Chrome	Etain	Magnésium	Cobalt	Manganèse	Nickel	Silicium	Titane	Cuivre	Zinc
Symbole chimique	Al	B	Cr	Sn	Mg	Co	Mn	Ni	Si	Ti	Cu	Zn
Symbole <i>métallurgique</i>	A	B	C	E	G	K	M	N	S	T	U	Z

En langage de métallurgiste:

- Les **AU** pour les alliages Aluminium-Cuivre,
- Les **AS** pour les alliages Aluminium-Silicium,
- Les **AG** pour les alliages Aluminium-Magnésium et
- Les **AZ** pour les alliages Aluminium-Zinc.

51

La série 1000

Non trempants

C'est l'aluminium des métallier, il contient moins de 1% d'impuretés (le deuxième chiffre de la série indique la première décimale après 99%) .

- Conducteurs électricité, évaporateurs, radiateurs
- Basses T cryogénie
- Déformables électroménager
- Corrosion humide et marine
 emballage, bâtiment, chimie

52

La série 2000

Trempants

Ce sont les alliages Al - Cu et Al - Cu - Mg,
Ils contiennent entre 2 et 6% de cuivre et entre 0 et 1,5 %
de magnésium.

Ils sont durcis par précipitation des phases
 Al_2Cu et/ou $CuMgAl_2$.

La présence de fer est néfaste sauf en présence de
Ni, celle de Si ou Mn est favorable.

Bonnes caractéristiques mécaniques mais mauvaise
tenue en corrosion. Peu soudables.

Aéronautique, mécanique.

53

La série 3000

Non trempants

Ce sont les alliages Al - Mn à 1 - 1,5%.
Ils contiennent souvent du magnésium (<1,2%) qui provoque
un durcissement secondaire par solution solide.

Ils sont durcis par précipitation de Al_6Mn .

Faciles à mettre en forme, facilement soudables et
bien en corrosion atmosphérique.

→ Tôles, barres, tubes, fils profilés...

Bonnes caractéristiques mécaniques Remplacent la
série 1000 si besoin de propriétés mécaniques.

54

La série 4000

Ce sont les alliages Al - Si

Très peu utilisés pour le corroyage

Utilisés seulement pour la soudure :
4006, 4043 par exemple.

55

La série 5000

Non trempants

Ce sont les alliages Al - Mg (<4%):

- Caractéristiques mécaniques moyennes,
- Excellents en corrosion,
- Très bonne soudabilité,
- Excellente déformabilité à chaud,
- Excellent état de surface si on limite Fe et Si.

→ Construction navale, décoration, chimie...

56

La série 6000

Trempants

Ce sont les alliages Al - Mg - Si

AGS (6060,6061) , ASG

Ils sont durcis par précipitation de Mg_2Si .

- Caractéristiques mécaniques moyennes (< 2000, 7000),
- Excellents en corrosion,
- Bonne soudabilité,
- Excellente déformabilité à chaud,

—————> filage, forgeage...

57

La série 7000

Trempants

Ce sont les alliages Al - Zn (4 - 8%) - Mg(1 - 3%)

AZ5G (7020), AZ5GU (7075)

Ils sont durcis par précipitation de $MgZn_2$.

- Bonnes caractéristiques mécaniques (aidé par Cu)
- Corrects en corrosion (Cr),
- Moyennement soudables,
- Faible résistance à chaud,

—————> armement, aéronautique, sport...

58

- alliages d'aluminium (alliages à « durcissement structural »)

utilisés dans les cas où l'on cherche à éviter toute déformation plastique en service

- alliages d'Al : - 2024 (Al-Cu-Mg) durcissement par précipitation d'Al₂Cu
 - 7075 (Al-Zn-Mg-Cu)

alliages légers utilisés pour la réalisation de voilure et de fuselage aéronautique

Si on refroidit lentement un alliage Al-4%Cu à partir de 550°C (solution solide Al-Cu) on obtient une précipitation essentiellement intergranulaire d'Al₂Cu (phase θ), de grande taille et qui oppose aux dislocations une faible résistance (métal mou)

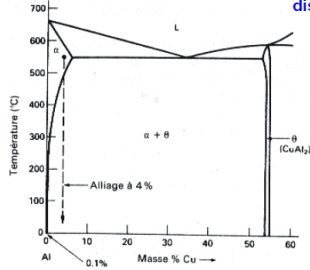
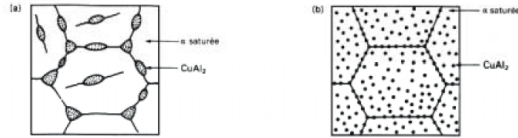
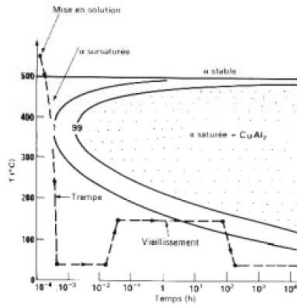


diagramme Al-Cu

Pour obtenir un durcissement structural il faut une très fine précipitation transgranulaire



59

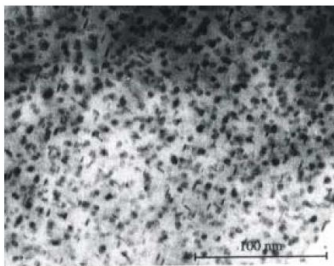


Pour cela on opère ainsi :

- mise en solution à 550°C
- refroidissement rapide (trempé à l'eau ou à l'huile) (pour éviter le "nez" de la courbe TTT)
- on obtient une solution solide sursaturée (d'un facteur 40)
- maintien 100h à 150°C (vieillesissement)
- précipitation de la phase θ

→ structure très fine alliage très dur

La réalité est un peu plus compliquée et la précipitation de Al₂Cu (phase θ) n'est pas immédiate, il faut franchir différentes étapes



Fine précipitation de Al₂Cu dans un alliage 7075

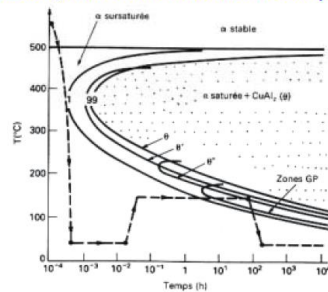
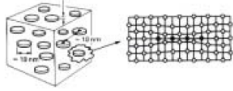


diagramme TTT détaillé de l'alliage Al-4%Cu

60

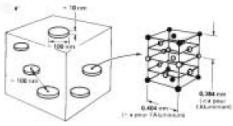
On part d'une solution solide de substitution saturée en Cu

1. zones de Guinier-Preston



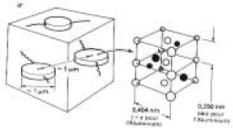
1ère phase (50 à 150°C) :

formation de zones GP (Guinier-Preston). ce sont des amas d'atomes de Cu, en forme de petits disques, cohérents avec la matrice



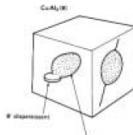
2ème phase (150 à 200°C) :

à partir de certaines zones GP, apparition de très fins précipités θ'' sous forme de disques (diamètre 100 nm, épaisseur 10 nm) de structure tétragonale, dont le plan de base est en cohérence avec une face cubique de la maille CFC de l'Al. Cela provoque une distorsion élastique. Les autres zones GP se dissolvent



3ème phase :

de nouveaux précipités, tétragonaux, θ' germent sur les dislocations et croissent par dissolution des précipités θ'' . Les faces des disques sont encore cohérents avec la matrice mais plus les côtés



4ème phase :

la phase θ germe aux joints de grains et aux interfaces par dissolution des précipités θ' . Cette phase est totalement incohérente avec la matrice et croît sous forme de globules