

8. METAUX ET ALLIAGES NON FERREUX

8.1. L'aluminium et ses alliages

L'aluminium est un élément du III^{ème} groupe de la classification de Mendelév, dont le nombre atomique est 13 et la masse atomique 26,98 (environ 27). L'aluminium possède un réseau cubique à faces centrées à équidistance : $a = 4,0412 \text{ \AA}$, sa caractéristique la plus importante est la faible densité $2,7 \text{ g/cm}^3$ (celle du fer $7,8 \text{ g/cm}^3$ et celle du cuivre 9 g/cm^3). L'aluminium représente environ 7,5 % en masse dans l'écorce terrestre.

L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières qu'il présente :

- Légèreté et bonne résistance, ce qui facilite son utilisation dans la construction mécanique.
- Bonne conductivité de chaleur et d'électricité.
- Bonne tenue à la corrosion grâce à la formation en surface d'une pellicule très fine, $\approx 0,7 \text{ \mu m}$, et très résistante de Al_2O_3 , (plus l'aluminium est pur plus sa tenue à la corrosion est élevée). L'aluminium, en contact avec l'oxygène de l'air, forme très vite une couche d'oxyde Al_2O_3 qui protège le métal contre les attaques chimiques. Cette pellicule est non soluble dans l'eau, donc l'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et il est très utilisé surtout dans l'industrie chimique et alimentaire.
- Possibilité facile de déformation et de soudage.

8.2. Elaboration de l'aluminium

Le minerai utilisé pour l'élaboration de l'aluminium est la bauxite, c'est un oxyde d'aluminium contenant des impuretés tels que la silice, l'oxyde de fer et l'oxyde de titane. Le constituant essentiel est l'aluminium hydraté sous différentes formes : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Les deux types de bauxites sont :

- Les bauxites rouges dont la teneur en oxyde de fer est relativement élevée.
- Les bauxites blanches, qui contiennent peu de fer, mais beaucoup de silice.

Le plus souvent, on utilise les bauxites rouges pour l'élaboration de l'aluminium en raison de leur faible teneur en silice ($< 5\%$). La composition chimique moyenne d'une bauxite rouge est la suivante :

- Al_2O_3 : 53 %
- SiO_2 : 4 %
- H_2O : 13 %
- Fe_2O_3 : 25 %
- TiO_2 : 3 %

Les bauxites blanches servent à la fabrication de ciment, d'abrasif et de produits

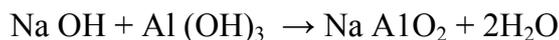
réfractaires. La bauxite se prépare le plus souvent selon le procédé BAYER et selon les étapes suivantes :

a. Concassage de la bauxite :

La bauxite est concassée et éventuellement broyée après séchage.

b. Attaque de la bauxite par la soude (Na OH) concentrée :

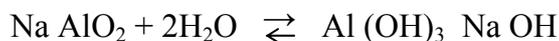
L'opération s'effectue dans des autoclaves à une température $T = 170^{\circ}\text{C}$ et une pression de 7 atmosphères. La bauxite est dissoute sous forme d'aluminate de sodium. Le fer ne se dissout pas, tandis que l'acide silicique passe dans les silicates de Na et Al :



Ce qui entraîne une perte en Al et NaOH. L'opération se fait généralement en marche continue par passage à travers une série d'autoclaves pour une durée de 6 à 8 heures. La lessive obtenue contient en plus de la soude concentrée, 270g de Al_2O_3 par litre.

c. Séparation de l'aluminate de sodium et précipitation de l'alumine :

La lessive est extraite des autoclaves pour être diluée afin d'obtenir une bonne concentration du reste de la solution et de la boue. Après dilution, concentration et filtrage, on obtient une liqueur claire dans laquelle l'aluminium est dissous, elle est envoyée ensuite aux réservoirs de précipitation où s'effectue à 60°C , l'opération inverse de la réaction de dissolution :



La cristallisation de $\text{Al}(\text{OH})_3$ pur, s'effectue très lentement. En cinq jours, il y a dépôt d'environ 60 % de l'alumine contenue dans l'aluminate. Pour accélérer le processus de dépôt, on ajoute à la liqueur claire, de l'hydroxyde d'aluminium solide (moyens de génération).

A la fin, $\text{Al}(\text{OH})_3$ cristallisé, est aspiré et filtré de la lessive et séché, ensuite acheminé vers les fours rotatifs. Le résidu de filtration subit l'opération de concentration par évaporation avant d'être utilisé comme soude concentrée.

d. Calcination de l'alumine :

L'aluminium hydraté, après séchage, subit une calcination dans les fours rotatifs à une température de 1200°C , on obtient de l'alumine avec une teneur en Al_2O_3 de 99,2 à 99,5 %.

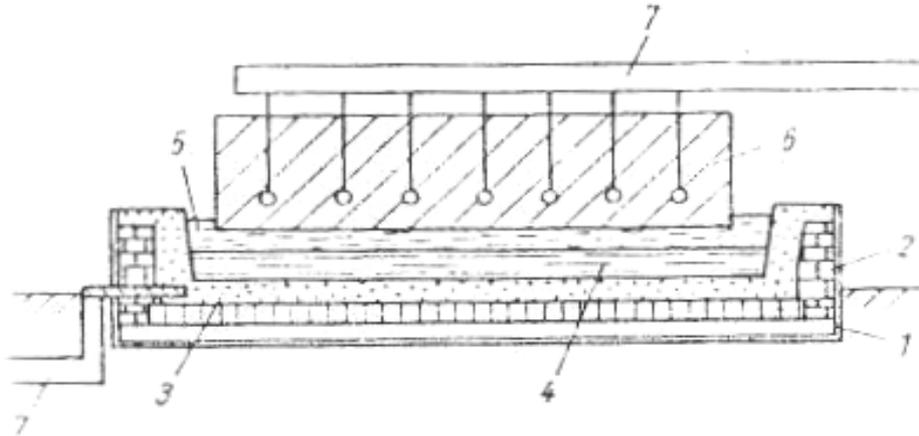
e. Electrolyse de l'alumine :

Du fait de la grande affinité de l'aluminium pour l'oxygène, l'aluminium ne peut être réduit par les réducteurs habituels (C ou Co) et l'on a recours à l'électrolyse. La décomposition électrolytique de l'alumine, s'effectue dans un bain de cryolite Na_3AlF_6 , à une température de 920 à 950°C . La cryolite pure, se fond à 1000°C , alors que l'alumine fond à 2000°C .

Durant l'électrolyse, la cryolite dissout de l'alumine, à cet effet on ajoute du Al_2F_3 pour la neutralisation des éléments alcalins accompagnant l'alumine, ainsi que pour avoir un électrolyte à caractère acide faible et enfin pour diminuer la température de fusion de l'électrolyte.

L'une des exigences envers la composition chimique de l'alumine est surtout la teneur de Fe_2O_3 , qui doit être inférieur à 0,04 % et celle de $\text{SiO}_2 < 0,3$ %, car ces deux composés sont plus nobles que l'aluminium et peuvent être séparés avec l'aluminium durant l'électrolyse.

Ce qui diminue la pureté de l'alumine est l'électrolyse proprement dite, effectuée dans un four, (fig. 144), avec une masse en carbone jouant le rôle de cathode et fermant le fond du four à la partie supérieure, où sont placées les anodes (anodes précuites ou anodes continues).



(fig. 144)

1. Tôle d'acier.
2. Brique refroidie.
3. Masse de carbone.
4. Aluminium liquide.
5. Electrolyte.
6. Anodes.
7. Alimentation électrique.

la tension de travail est de 4,5 volts et l'ampérage est de 30.000 à 100.000 Ampères. L'aluminium s'accumule sur le fond du four et forme pratiquement la cathode et de temps en temps, il est recueilli et coulé en lingots ou dans des mélangeurs. Pour l'élaboration d'une tonne d'aluminium, on a besoin de :

- 2000 kg d'alumine.
- 30 kg de cryolite.
- 30 kg de fluorure d'alumine.
- 550 kg d'anode en carbone.
- 15 à 20 MWH de charge électrique.

L'aluminium obtenu a une pureté de 99,2 à 99,9 % et les impuretés essentielles sont : Fe et Si et en faible quantité, Cu, Mg, Ti, Na.

Pour l'élaboration de l'aluminium pur à 99,99 %, il est nécessaire de procéder à une deuxième électrolyse. L'aluminium pur, possède une résistance chimique très élevée. Les alliages d'aluminium à grande résistance sont plaqués par de l'aluminium pur, afin de combiner la bonne résistance à la corrosion avec la résistance de l'alliage.

L'aluminium pur, peut avoir un éclat grâce aux différents procédés de trempage. L'oxydation anodique est le traitement superficiel le plus important pour l'aluminium. Il s'agit du renforcement du film d'oxyde naturel par la voie électrolytique, donc l'augmentation de l'action de protection contre la corrosion et l'amélioration de la dureté et du comportement contre l'usure. Dans le tableau ci-dessous est indiqué la composition chimique de l'aluminium pur selon TGL

Type	Quantité en %						
	Total	Fe	Si	Cu	Zn	Ti	Autres
Al 99,99 R	0,01	0,005	0,005	0,003	0,005	0,002	0,001
Al 99,95 R	0,05	0,025	0,020	0,015	0,005	0,005	0,005
Al 99,9 R	0,10	0,05	0,04	0,03	0,005	0,01	0,001
Al 99,8	0,20	0,12	0,10	0,01	0,04	0,03	0,01
Al 99,7	0,30	0,16	0,10	0,01	0,05	0,03	0,01
Al 99,5	0,50	0,40	0,16	0,02	0,06	0,03	0,01
Al 99,4	0,60	0,50	0,30	0,02	0,07	0,03	0,03
Al 99,0	1,00	0,60	0,40	0,02	0,08	0,03	0,04
E-Al	0,50	0,40	0,10	0,02	0,040	*	0,01

Remarques : *

Ti + Mn + Cr + V ≤ 0,03

Mn, V, Cr ≤ 0,010

8.3. Caractéristiques de l'aluminium

8.3.1. Caractéristiques physiques

- Température de fusion : 660°C.
- Point d'ébullition : 2060°C.
- Chaleur spécifique :
 - A 20°C : 0,214 cal/g°C
 - A 100°C : 0,223 cal/g°C
 - A 500°C : 0,266 cal/g°C
- Conductibilité thermique : (c'est un excellent conducteur de chaleur)
 - A 0°C : 0,50 cal/cm.s°C.
 - A 100°C : 0,51 cal/cm.s°C.
 - A 200°C : 0,52 cal/cm.s°C.
- Résistivité à l'état pur $2,63 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.
- Allongement linéaire : 20 à 100°C : $24 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$ et jusqu'à 600°C : $28,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$.

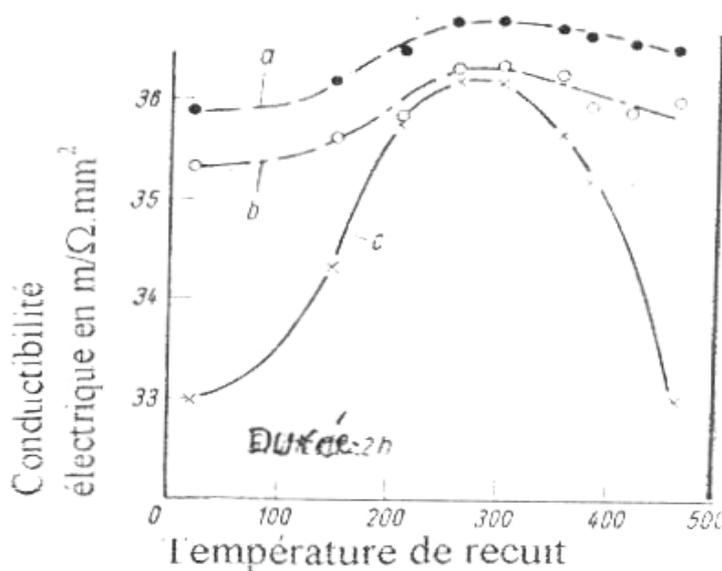
- Densité (à 20°C) : 2,7 g/cm³.
- Conductibilité électrique : (65% de celle du cuivre pour l'aluminium pur à 99,5 %). La conductibilité électrique de l'aluminium diminue lorsque les impuretés augmentent.

L'aluminium, grâce à sa résistivité, est surtout utilisé pour la fabrication de chaudière et d'ustensiles de cuisine. Lorsqu'il est poli, c'est un métal blanc et brillant et possède un grand pouvoir de réflexion, on l'utilise comme réflecteur pour chauffage et éclairage ou surface réfléchissante des miroirs de télescopes. La capacité de réflexion peut atteindre jusqu'à 90 %.

Un conducteur d'aluminium, comparé avec un autre en cuivre, peut avoir la même résistance, la moitié de son poids, mais 1,3 fois plus grand. Donc l'utilisation de l'aluminium dans l'électrotechnique est très limitée à cause du diamètre des conducteurs.

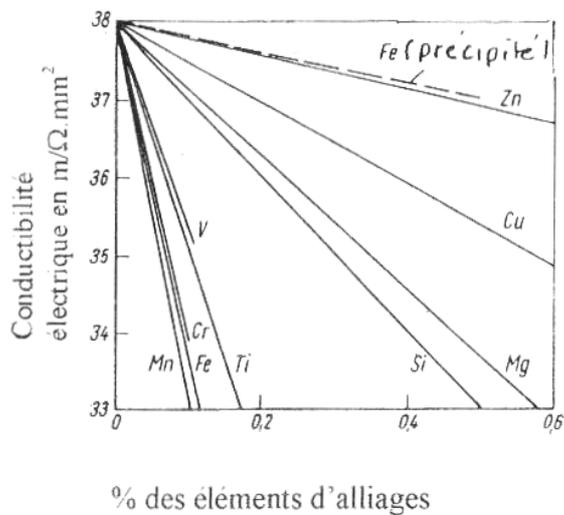
Les figures ci-dessous, montrent :

- **Figure 145** : la dépendance de la conductibilité électrique en fonction de la température de recuit.
 - Courbe a : 0,13 % Si et 0,30 % Fe.
 - Courbe b : 0,12 % Si et 0,50 % Fe.
 - Courbe c : 0,64 % Si et 0,10 % Fe.

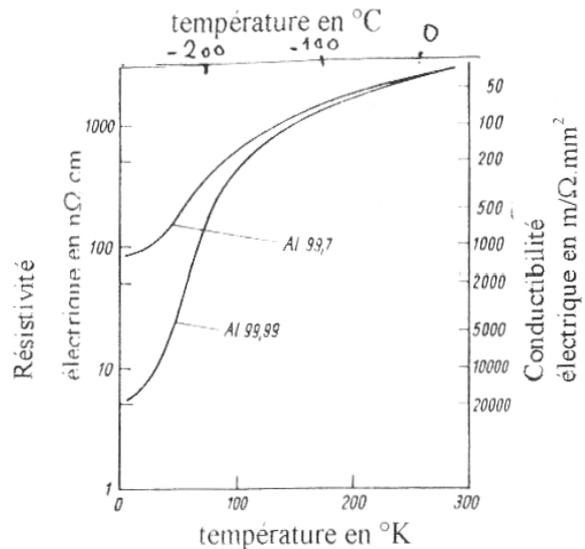


(fig. 145)

- **Figure 146** : l'influence des différents éléments d'alliages, dissous dans les cristaux mixtes, sur la conductibilité spécifique de l'aluminium à T = 20°C.
- **Figure 146** : l'influence du degré de pureté de l'aluminium sur la résistance spécifique électrique et sur la conductibilité électrique.



(fig. 146)



(fig. 147)

8.3.2. Caractéristiques mécaniques

A cause de sa structure du type CFC, l'aluminium pur est très bien déformable à froid et à chaud, il est donc très ductile. Cette plasticité élevée à l'état recuit rend très aisé le corroyage, par contre, son usinage étant mal aisé. L'aluminium se prête bien à toutes les modalités de soudage sous gaz inerte tels que l'argon ou l'hélium (gaz de protection), sinon l'aluminium s'oxyde facilement et forme une pellicule de Al_2O_3 .

Sa faible dureté et sa faible limite élastique sont défavorables pour son emploi en mécanique. Les propriétés mécaniques de l'aluminium dépendent :

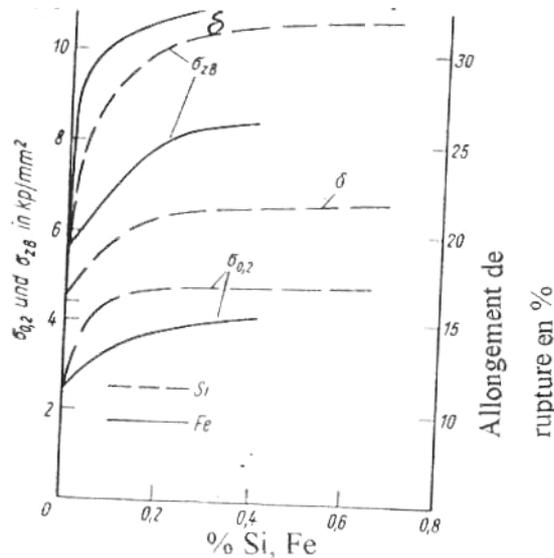
- Des traitements mécaniques (forgeage, laminage, etc.).
- Des traitements thermiques (trempe, recuit, etc.).
- Des éléments d'addition (Fe, Cu, Mn, Zn, Mg, Si).

A titre d'exemple :

- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (99,6 %) coulé sont :
 - R (résistance à la traction) = 70 à 100 N/mm^2 .
 - $R_{0,002}$ (limite élastique) = 30 à 40 N/mm^2 .
 - A (allongement) = 15 à 25 %.
 - HB (dureté brinell) = 15 à 25 HB.
 - E (module d'élasticité) = 67500 N/mm^2 .
- Les propriétés mécaniques de l'aluminium (haute pureté) recuit :
 - R = 50 N/mm^2 .
 - $R_{0,002}$ = 15 N/mm^2 .
 - A = 50 %.
 - E = 71000 N/mm^2 .

Une déformation plastique à froid de l'aluminium industriel augmente sa charge de rupture jusqu'à 150 N/mm² mais l'allongement baisse jusqu'à 6 %.

L'influence du fer et du silicium sur les propriétés mécaniques de l'aluminium à l'état de recristallisation (après un traitement thermique de 5 heures à 420°C) est montrée sur la figure 148.



(fig. 148)

Le silicium augmente la limite d'élasticité et la résistance de l'aluminium plus que le fer. Tandis que le fer améliore l'allongement, cela est expliqué par la précipitation des particules fines et hétérogènes de Al₃Fe dans l'alliage binaire Al-Fe, qui seront transformés en grain fins lors du recuit de recristallisation.

Les grains fins donnent essentiellement une plasticité meilleure que celle des gros grains. Le fer stabilise la grosseur des gros grains de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques et surtout la valeur de l'allongement et celle de rupture. Le cuivre aussi améliore la résistance, tandis que le zinc et le magnésium, avec de petites concentrations, ne montrent aucun effet.

A cause de la faible résistance à l'état recuit d'adoucissement, les produits en aluminium pur et très pur subissent un durcissement à froid répété.

- Al 99,99 % : $\sigma_{0,2} = 15 \text{ à } 25 \text{ N/mm}^2$ et $\sigma_{ZB} = 40 \text{ à } 60 \text{ N/mm}^2$.
- Al 99,5 % : $\sigma_{0,2} = 35 \text{ à } 45 \text{ N/mm}^2$ et $\sigma_{ZB} = 70 \text{ à } 90 \text{ N/mm}^2$.

8.3.3. Tenue à la corrosion

Le phénomène de la tenue à la corrosion est expliqué par la formation d'une pellicule ($\approx 0,7 \mu\text{m}$) non soluble dans l'eau et protégeant le métal contre les milieux oxydants et une éventuelle attaque chimique. L'aluminium est très résistant contre l'influence atmosphérique et contre beaucoup de produits de l'industrie chimique et alimentaire.

Le tableau ci-dessous donne une idée sur la tenue de la corrosion de l'aluminium et de ses alliages (sans couche de protection) pour les différents milieux.

Milieu	Al 99,5 %		Al Mg		Al Cu Mg	
Eau de mer	2	3	1	2	3	5
Viande	1		-		-	
glace	1		1		2	
Fréon	1		1		-	
Eau distillée	1	2	1	2	-	
Essence	1		1		1	3
Gasoil	1		1		1	
Plâtre	1	2	-		-	
Matériaux de construction	3	6	-		-	
Atmosphère et industrie	2	3	3	2	3	
Eau de fleuve	1	2	1		3	
Acétylène	1		-		2	3
Ammoniaque	1	2	1	2	-	
Alcool éthylique sans eau	5		-		-	
Alcool éthylique avec eau	1	2	-		-	
Ethane	1		1		-	
Produit alimentaire	1		-		-	
Légende						
1. Bon résistant		2. Résistant		3. Peu résistant		
4. Encore utilisable		5. Presque résistant		6. Non résistant		

8.4. Alliages d'aluminium

8.4.1. Influence des éléments d'alliages sur les propriétés de l'aluminium

L'aluminium pur, non allié possède des propriétés mécaniques faibles, afin d'améliorer ces propriétés, on est conduit à ajouter les éléments d'addition lors de sa fusion, tels que Mg, Mn, Cu, Si, Ni, Ti, Zn, Co, etc. Ces éléments entrent en solution solide ou formant des précipités qui entraînent des composition d'alliages industriels. L'avantage des alliages d'aluminium est qu'ils permettent d'avoir une bonne résistance mécanique tout en conservant une faible masse volumique.

a. Addition de Mg : Les alliages formés, possèdent une résistance mécanique moyenne. Ils sont utilisés dans le domaine de placage, lorsque avec l'aluminium, il s'avère difficile. Ils sont faciles à polir et conservent longtemps leur poli à cause de la haute résistance chimique.

b. Addition de (Mg + Mn) : Ces deux éléments augmentent la résistance mécanique sans modifier la déformabilité. Ils se prêtent bien à l'emboutissage et au polissage.

c. Addition (le (Cu + Si) : Ce sont des alliages de fonderie, présentant une bonne coulabilité et conviennent surtout pour les pièces compliquées.

d. Addition de (Co + Ti + Zn) : Accroissent la résistance mécanique sans altérer la coulabilité, l'addition de Cu et de Zn facilite l'usinage.

e. Addition de (Mg + Zn + Cu) : Ils sont aptes aux traitements mécaniques et présentent une résistance mécanique maximum. La présence de cuivre les rend durcissables à chaud.

8.4.2. Traitements thermiques des alliages d'aluminium

Pour assurer le durcissement des alliages d'aluminium, a recourt à la trempe et au vieillissement. Les structures hors d'équilibre et les défauts de structure produits par la déformation qui dégradent la plasticité de l'alliage sont éliminés en appliquant le recuit.

8.4.2.1. Trempe et vieillissement

Avec l'abaissement de la température, la solubilité dans l'aluminium, de la plupart des composants, diminue, ce qui permet d'utiliser la trempe et le vieillissement pour durcir les alliages.

a. Trempe des alliages d'aluminium :

La trempe structurale des alliages d'aluminium a des buts et des effets totalement différents de la trempe martensitique des aciers. Le cycle thermique de ce traitement comprend :

- Le chauffage jusqu'à la température de dissolution totale ou partielle des phases intermétalliques en excès dans l'aluminium.
- Le maintien à cette température.
- Le refroidissement suffisamment rapide (hypertrempe) jusqu'à la température ambiante pour obtenir une solide sursaturée.
- Le maintien isotherme ultérieur qui conduit au durcissement de l'alliage. Celui-ci est réalisé, soit à la température ambiante (vieillissement naturel ou maturation), soit à une température supérieure (appelé vieillissement artificiel ou simplement vieillissement).

Pour mieux comprendre les mécanismes de durcissement structurel engendré par la trempe, prenons l'exemple de l'alliage Al 4 %-Cu. D'après le diagramme Al-Cu, (fig.149), la trempe des alliages Al-Cu est déterminée par la ligne abc qui passe au dessus de la ligne de solubilité limite des alliages contenant une teneur en cuivre < 5,6 % et au dessous de ligne eutectique (584°C) pour les alliages contenant une plus grande quantité de cuivre (> 5,6%).

Lors de la chauffe pour trempe des alliages titrant 5,6 % Cu, la phase excédentaire en Al_2 se dissout complètement et le refroidissement rapide ultérieur ne fixe que la solution solide α sursaturée qui contient autant de cuivre qu'il y a dans l'alliage. Pour une teneur en cuivre > 5,6 %, la structure des alliages après trempe, se composera de solution solide α sursaturée dont la composition correspond au point b et de cristaux de la combinaison $CuAl_2$ non dissoute au chauffage.

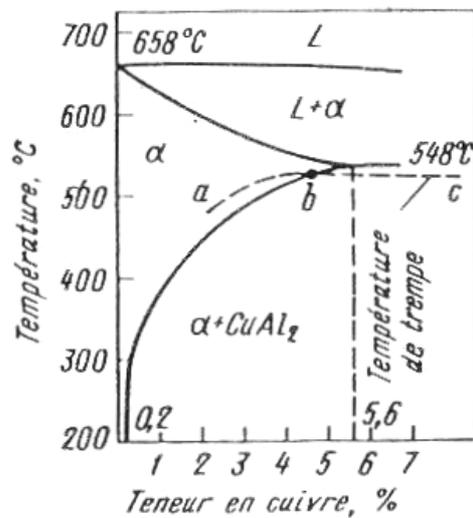


Diagramme d'équilibre Al Cu

(fig. 149)

La durée de séjour, à la température de trempe nécessaire pour la dissolution des phases intermétalliques, dépend de l'état structural de l'alliage, du type de four et de l'épaisseur de la pièce.

Exemple : pour des épaisseurs 0,5 à 150 mm, le temps de chauffage étant de :

- Fours de salpêtres : séjour de 10 à 80 min.
- Four électrique à circulation forcée d'air : séjour 30 à 210 min.
- Pièces moulées : 2 à 15 heures.

Après la trempe, les alliages de forge sont refroidis à l'eau froide et les moulages de forme à l'eau portée de 50 à 100°C, pour éliminer le gauchissement et la formation de tapures. Après la trempe, les alliages, tout en possédant une faible résistance (R , $R_{0,002}$), acquièrent une élasticité élevée (A , Z).

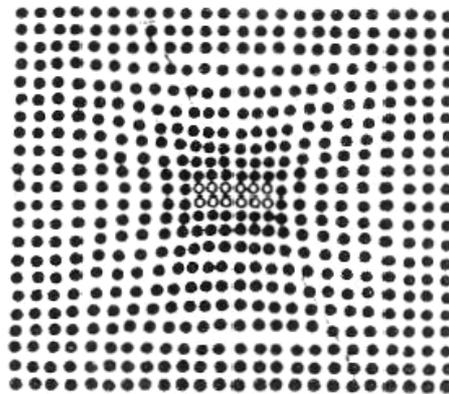
b. Vieillessement des alliages trempés :

La trempe est suivie d'un vieillissement qui représente est un maintien à l'ambiante pendant quelques jours (maturation) ou un maintien pendant 10 à 24 heures à une température accrue (vieillessement artificiel ou par revenu). Le vieillissement s'accompagne de décomposition de la solution solide sursaturée qui va de pair avec le durcissement de l'alliage.

Si la distribution des atomes de cuivre dans le réseau de l'alliage est statiquement uniforme, la décomposition de la solution solide sursaturée se produit en plusieurs stades, en fonction de la température et de la durée du vieillissement.

Le vieillissement naturel (maturation à 20°C) ou artificiel (durcissement par le revenu à basses températures, inférieures à 100 ou 150°C), ne révèle pas la décomposition de la solution solide avec isolation de la phase en excès à ces températures. Les atomes de cuivre se déplacent seulement à l'intérieur du réseau cristallin de la solution solide α à de très faibles distances et s'accumulent suivant les plans $\{100\}$ en agrégats bidimensionnels

lamellaires ou disques dits zones de GUINIER-PRESTON (GP1) comme le montre la figure 150.



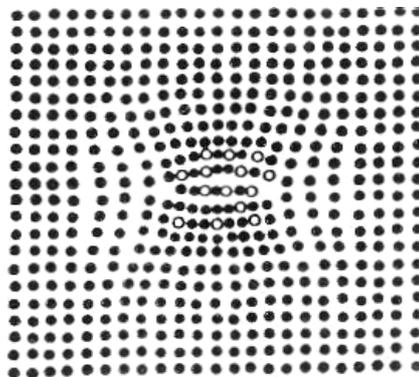
(fig. 150)

Au sein de chaque cristal, ces zones longues de quelques dizaines d'angströms (30 à 60 Å) et de 5 à 10 Å d'épaisseur se répartissent plus ou moins régulièrement. La concentration du cuivre dans les zones GP1 est plus faible que dans CuAl_2 (54 %).

En portant l'alliage après maturation en quelques secondes ou minutes à 230 ou 270°C et en le refroidissant rapidement, on supprime totalement le durcissement et l'alliage acquiert à nouveau les propriétés qu'il avait directement après trempe. Ce phénomène a reçu le nom de restauration. L'adoucissement à la restauration est dû au fait qu'à ces températures, les zones GP1 sont instables et c'est pourquoi elles se dissolvent dans la solution solide, alors que les atomes de cuivre se redistribuent de nouveau plus ou moins régulièrement dans le volume de chaque cristal de la solution solide, tout comme après la trempe.

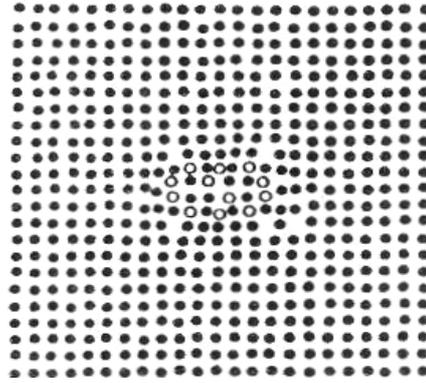
Le maintien ultérieur de l'alliage à l'ambiante, conduit à nouveau à la formation des zones GP1 et à son durcissement. Pourtant après la restauration et le vieillissement qui la suit, les propriétés anticorrosives de l'alliage se dégradent, ce qui rend plus difficile l'utilisation de la restauration dans des buts pratiques.

Le séjour durable à 100°C, ou pendant quelques heures à 150°C, conduit à la formation des grandes zones de Guinier Preston GP2, (fig. 151) (10 à 40 Å d'épaisseur et 20 à 300 Å de diamètre) avec une structure ordonnée différente de celle de la solution solide α .



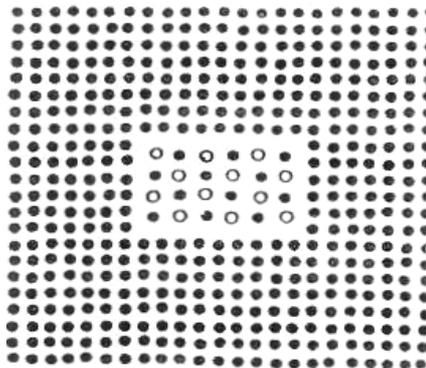
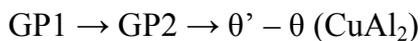
(fig. 151)

La concentration du cuivre dans ces zones correspond à la teneur dans CuAl_2 . Avec l'augmentation de la température de vieillissement, le processus de diffusion, transformations structurales ainsi que le durcissement lui même, deviennent plus rapides. Le maintien pendant plusieurs heures aux températures 150 à 200°C, conduit au droit des zones GP2, à la formation de particules dispersées (lamelles fines) de la phase θ' intermédiaire dont la composition chimique (CuAl_2) alors que son réseau cristallin est différent, (fig.152).



(fig. 152)

La phase θ est liée par cohésion à la solution solide (fig. 153) ; L'augmentation de la température jusqu'à 200 à 250°C, provoque la coalescence de la phase métastable et la formation de la phase stable, de la sorte, la maturation ne donne lieu qu'à la formation des zones GP1. Dans le cas du vieillissement par revenu, la succession des transformations structurales peut être schématisée de la forme suivante.



(fig. 153)

Cela ne signifie, pourtant pas qu'une formation se transforme « sur place » en une autre. Il se peut que l'apparition de la formation ou de la phase successive se produit après dissolution de la formation initiale.

Le meilleur durcissement des alliages s'obtient avec les alliages MgZn_2 , Mg_2Si et la phase S (Al_2CuMg) de structure complexe et de composition différente de celle de la solution solide α .

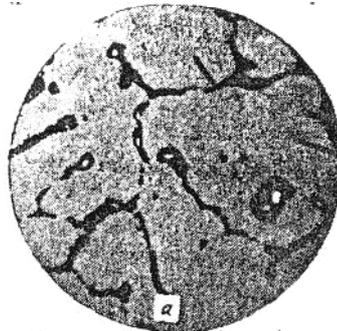
8.4.2.2. Recuit des alliages d'aluminium

Ses modalités sont :

- Recuit d'homogénéisation.
- Recuit de recristallisation.
- Recuit d'adoucissement (après trempe et vieillissement préalable)

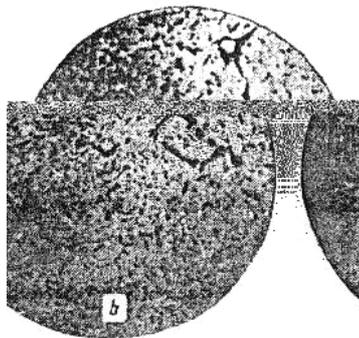
a. Recuit d'homogénéisation :

Ce traitement est appliqué aux lingots avant corroyage pour éliminer la ségrégation deudutique qui conduit à la formation d'une solution solide inhomogène et au dépôt des inclusions eutectiques fragiles hors d'équilibre CuAl_2 , Al_2CuMg (phase 5), Mg_2Si , $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ (phase T), etc... aux joints des grains et entre les branches de dendrites, (fig.154).



(fig. 154)

Au cours de l'homogénéisation, la composition des cristallites de la solution solide est uniformisée, alors que les combinaisons intermétalliques se déposent sous forme de fines inclusions secondaires uniformément réparties, (fig. 155)



(fig. 155)

Il s'ensuit que la plasticité de l'alliage coulé s'améliore, ce qui permet d'augmenter le degré de corroyage lors du formage à chaud, la vitesse de filage et diminuer les rebuts technologiques.

L'homogénéisation contribue à l'obtention d'une structure à grains fins dans les tôles recuites et diminue l'aptitude à la corrosion sous tension. Le cycle thermique de ce recuit comprend :

- Un chauffage jusqu'à une température élevée de 450 à 520°C.
- Un maintien qui varie de 4 à 40 heures.
- Un refroidissement lent ou dans le four.

b. Recuit de recristallisation :

Le recuit de recristallisation consiste à chauffer l'alliage déformé jusqu'aux températures supérieures à celles de la fin de recristallisation primaire. On l'applique pour supprimer l'écroutissage et obtenir un grain fin. Dans la plupart des alliages d'aluminium, lorsque la déformation atteint 50 à 75 %, la température de début de recristallisation s'échelonne de 290 à 400°C. La température de recuit de recristallisation varie suivant la composition de l'alliage de 350 à 500°C et le maintien de 0,5 à 2,0 heures.

Après le recuit de recristallisation des alliages non durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement est choisie arbitrairement. Pour les alliages durcis par traitement thermique, la vitesse de refroidissement allant jusqu'à 200 à 250°C doit être inférieure ou égale à 30°C/h. Le recuit comme opération intermédiaire est appliqué dans le travail à froid ou entre le corroyage à chaud et à froid.

Le recuit incomplet est une modalité de recuit de recristallisation. Il permet d'obtenir des propriétés intermédiaires entre l'état écroui et recristallisé. Dans ce cas, la température de recuit doit être inférieure à celle de la fin de recristallisation pour assurer l'obtention d'une structure sous forme de polygone, ou partiellement recristallisée, qui supprime en partie l'écroutissage. Le plus souvent, le recuit est appliqué dans le cas des alliages de forge et de laminage non soumis au durcissement per trempe et vieillissement.

c. Recuit d'adoucissement des alliages ayant subi la trempe et le vieillissement :

Il est effectué à une température de 350 à 450°C avec un séjour de 1 à 2 h. Ces températures assurent la décomposition complète de la solution solide sursaturée et la coalescence des phases qui durcissent. La vitesse de refroidissement ne doit pas dépasser 30°C/h. Après le recuit, l'alliage possède une faible charge de rupture, une plasticité suffisante et une résistance élevée à la corrosion sous tension.

8.4.3. Propriétés des alliages d'aluminium

Les principales caractéristiques des alliages d'aluminium sont :

a. Résistance à chaud : D'une certaine manière, on peut dire que la résistance à chaud est assez faible au delà de 150°C, sauf pour les alliages Al-Cu où l'on peut atteindre 300°C.

b. Résistance aux basses températures : Les alliages d'aluminium ont un réseau cristallin CFC, par conséquent, ils ne sont pas fragiles d'où leur application en cryogénie.

c. Résistance à la fatigue : De manière générale, le coefficient d'endurance R_m est de l'ordre de 0,5 pour les alliages non trempants et de (0,25 à 0,30) pour les alliages trempants.

d. Résistance à la corrosion : Comme pour l'aluminium pur; les alliages d'aluminium sont protégés contre la corrosion grâce à la formation d'une pellicule de Al_2O_3 . La protection anti-corrosion peut être améliorée par anodisation. Les risques de corrosion à craindre dépendent des éléments d'addition.

- Corrosion galvanique à craindre en présence du fer.
- Corrosion de type intergranulaire et sous tension, à craindre en présence d'additions telles que Cu, Mn, Mg + Si et Mg + Zn

e. Mise en forme : Les alliages d'aluminium sont faciles à laminier et emboutir. En particulier les alliages Al-Mg sont très appropriés au filage à chaud.

f. Soudage : De manière générale, le soudage est facile grâce à la couche protectrice d'alumine (procédés de soudage sous gaz protecteur TIG ou sous vide).

8.4.4. Classification des alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium les plus répandus sont Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg-Si, ainsi que Al-Zn-Mg-Cu. A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques $CuAl_2$, (phase θ), Mg_2Si , Al_2CuMg (phase S), Al_6CuMg_4 (phase T). Al_3Mg_2 , $Al_3Mg_3Zn_3$ (phase T) Tous les alliages d'aluminium peuvent être rangés en trois groupes :

- 1. Alliages corroyés :** destinés à la forge et le laminage, ils sont prévus pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, feuillards, barres. Profilés, tubes, etc.), ainsi que des pièces de forge et estampées produites par laminage, pressage, forgeage et estampage.
- 2. Alliages de fonderies :** prévus pour le moulage des formes.
- 3. Alliages frittés :** élaborés par frittage suivant la méthode de métallurgie des poudres.

8.4.4.1. Alliages corroyés avec et sans durcissement structural

Ils sont obtenus, fondus dans des fours à induction, car grâce au mouvement du bain induit qu'on obtient un mélange homogène, c'est à dire, une répartition homogène des éléments d'addition.

Le magnésium et le zinc, possédant pratiquement un point de fusion inférieur à celui de l'alliage d'aluminium de $750^\circ C$, sont ajoutés sous forme de métaux, cependant le Cu, Si, Mn sont introduits sous forme d'alliages, car ils possèdent un point de fusion inférieur à $750^\circ C$.

Suivant l'aptitude au durcissement par traitement thermique, les alliages corroyés sont classés en deux types :

- Alliages sans durcissement structural (non trempants).
- Alliages avec durcissement structural (trempants).

A. Alliages sans durcissement structural

Ce sont les alliages à base de Mn et Mg tels que Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Mn (alliages de forge et d'estampage). Leur durcissement naturel est du à la formation d'une solution solide et dans une moindre mesure aux phases en excès.

Leurs compositions chimiques et propriétés mécaniques sont données sur le tableau ci-dessous selon la norme GOST

Nuance	Composition chimique (%)		Propriétés mécaniques		
	Mn	Mg	R (kgf/mm ²)	R _{0,002} (kgf/mm ²)	A (%)
AMII	1,0 à 1,6	-	13 (17)	5 (13)	23 (10)
AMr2	0,2 à 0,6	1,8 à 2,8	20 (25)	10 (20)	23 (10)
AMr3	0,3 à 0,6	3,2 à 3,8	22	11	20
AMr5	0,3 à 0,6	4,8 à 5,8	30	15	20
AMr6	0,5 à 0,8	5,8 à 6,8	30 (40)	15 (30)	18 (10)

Ces types d'alliages se présentent bien au travail à froid (estampage, cuitrage, etc.), au soudage et possèdent une tenue à la corrosion élevée. La limite élastique et la résistance à la traction augmentent et l'allongement diminue. Au delà de la température de 150°C, le long séjour conduit à la diminution de la résistance.

Un recuit de recristallisation entre 350 à 450°C peut produire un retour à l'état doux. Pour obtenir une structure à grains fins lors de la recristallisation, il est exigé au préalable une déformation allant jusqu'à 50 %. Leur usinage à l'état recuit est très difficile.

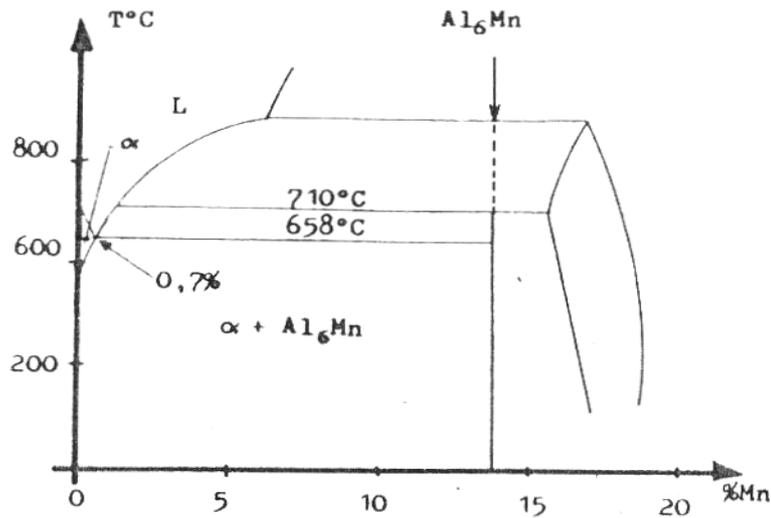
a. Alliage Al-Mn :

La teneur en manganèse est de 1,0 à 1,6 %. La résistance à la traction est supérieure que celle de l'aluminium pur, malgré que les propriétés de déformation sont identiques. La tenue à la corrosion est aussi meilleure que celle de l'aluminium pur. Une meilleure usinabilité peut être obtenue grâce à l'addition de magnésium (0,2 à 0,3) %, de titane ou de chrome. Le manganèse augmente aussi la température de recristallisation, l'addition d'une faible teneur en Mn permet d'augmenter nettement la résistance mécanique des alliages.

L'alliage Al-Mn est une solution solide de manganèse dans l'aluminium qui comporte également une faible quantité de particules de la combinaison Al₆Mn, voir diagramme d'équilibre partiel Al-Mn, (fig.156). Ils sont utilisés pour les toitures, coffrages, revêtements, réservoirs, ustensiles de cuisine, etc.

Caractéristiques des nuances 3003 et 3004 à l'état recuit.

Nuances	Composition	Rm (MPa)	A (%)
A – MI 3003	(1 à 1,5) % Mn (0,05 à 0,2) % Cu	100 à 130	25
A – MIG 3004	(1 à 1,5) % Mn < 0,25 % Cu	120 à 160	22

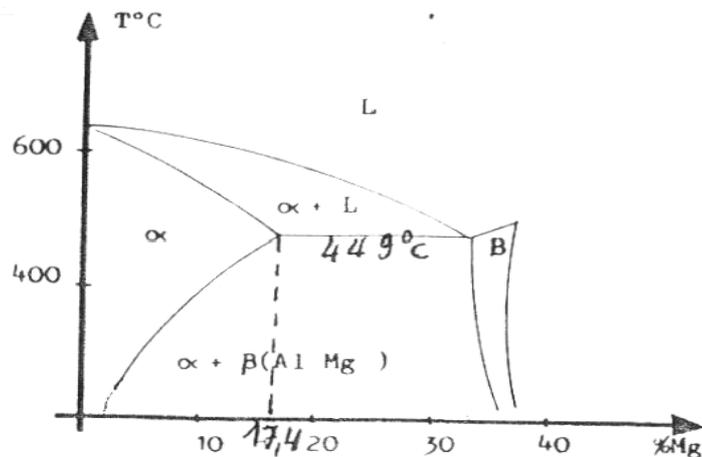


(fig. 156)

b. Alliage Al-Mg :

A ce groupe appartiennent les alliages avec une teneur en magnésium de 0,2 à 7,2 % et une teneur en Mn de 0,2 à 0,8 %. Ces alliages sont caractérisés par une résistance (stabilité) élevée contre l'eau salée. Les alliages avec une teneur en Mn jusqu'à 5 % s'adaptent bien à l'oxydation anodique à cause de leur structure fine et homogène. Les alliages avec une teneur > 5 % en Mn se laissent difficilement travailler et posent des problèmes aux soudages et s'inclinent devant la corrosion intercrystalline et sous tension. Les alliages à 7 % Mn sont caractérisés par de bonnes propriétés de surface.

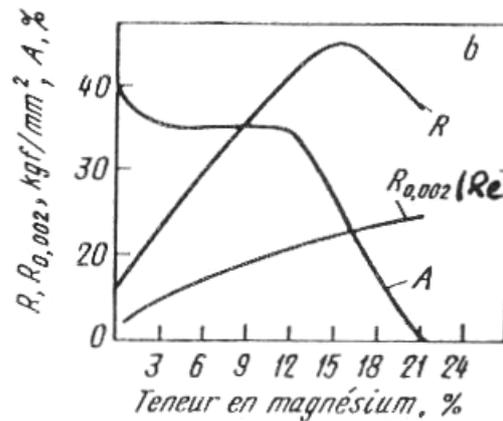
A l'état d'équilibre, après refroidissement, les alliages Al-Mg sont biphasés α + β, (Al₃Mg₂). Pourtant la haute stabilité de la solution solide et la faible vitesse de diffusion du Magnésium dans l'aluminium font que même, après refroidissement lent, ils ne contiennent pas de phase excédentaire et se composent d'équilibre partiel Al-Mg, (fig.,157).



(fig. 157)

Quand les alliages Al-Mg sont à l'état d'équilibre, la solubilité du magnésium dans la phase α est d'environ 15 % à 450°C mais elle se réduit jusqu'à 2 % à la température ambiante.

A basse température, la précipitation de la phase β ne donne pas un durcissement structural appréciable. Les alliages Al-Mg sont en général limités à 5 % Mg en raison des difficultés de mise en œuvre et de transformation. La variation des propriétés mécaniques de l'aluminium en fonction de la teneur en Mg est donnée sur la figure 158.



(fig. 158)

Le magnésium accroît fortement la résistance à la rupture jusqu'à 15 %, accroît moyennement la limite élastique et réduit brutalement l'allongement au delà de 12% Mg. Les alliages Al-Mg sont utilisés dans l'industrie automobile, aviation, navales, et pour des buts décoratifs.

c. Alliage Al-Mg-Mn :

Ces alliages contiennent de 1,6 à 2,5 % Mg et de 0,5 à 1,5 % Mn. Ils possèdent une excellente résistance contre l'eau salée. L'addition d'une faible quantité de chrome (0,2 à 0,5) % peut éviter les difficultés qui se posent lors du travail du métal, la formation d'une structure à gros grains et la formations des fissures de soudage. Ces types d'alliages sont utilisés surtout dans la construction navale, l'aviation, dans l'industrie chimique et alimentaire.

B. Alliages avec durcissement structural (alliages de forge et de laminage) :

Le durcissement des alliages d'aluminium a été découvert en 1906 par l'allemand Alfred Wilhr dans le système Al-Cu-Mg. Il est très connu aujourd'hui pour plusieurs alliages. Le but de ce traitement est d'augmenter la résistance mécanique et la résistance à l'usure du matériau.

Les différents alliages d'aluminium destinés au durcissement sont : AlCuMg, AlMgSi, AlZnMg, AlZnMgCu, leur composition chimique est indiquée sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Types	% d'éléments d'alliages				% d'éléments d'admixtion						
	Mg	Si	Cu	Mn	Si	Cu	Mn	Fe	Zn	Ti	autres
AlMgSi0,5	0,4 à 0,9	0,3 à 0,7	-	-	-	0,05	0,10	0,4	0,2	0,2	0,05
AlMgSi 1	0,7 à 1,5	0,7 à 1,5	-	0,05 à 1	-	0,10	-	0,5	0,2	0,2	0,05
AlCu4Mg1	0,4 à 1,1	0,2 à 0,7	3,5 à 4,8	0,4 à 1,0	-	-	-	0,7	0,3	0,2	0,05
AlCu4Mg2	1,2 à 1,8	-	3,9 à 4,8	0,4 à 1,1	0,5	-	-	0,5	0,3	0,2	0,05
AlCu3Mg	0,6 à 1,3	-	2,8 à 3,5	0,3 à 1,0	0,6	-	-	0,7	0,6	0,2	0,05
AlZnMgCu0,5	2,4 à 3,8	-	0,4 à 1,0	0,1 à 0,6	0,5	-	-	0,5	-	0,1	0,05

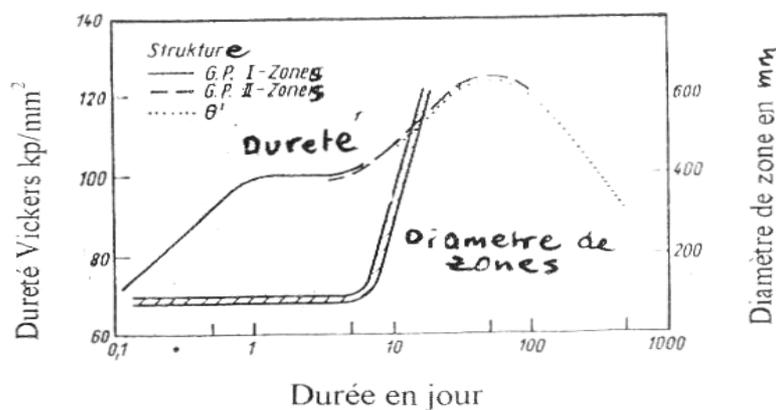
En plus Cr : 0,1 à 0,3 %.

Dans le passé, on utilisait surtout les alliages à haute résistance, tels que AlCuMg et AlZnCu, avec une limite de rupture $> 400 \text{ N/mm}^2$, surtout dans le domaine de l'aviation, mais au cours des dernières années, il s'est développée la production de l'alliage AlMgSi avec une résistance moyenne utilisée surtout pour les produits pressés. Techniquement on utilise aussi le durcissement pour CuCr, CuZr, CuCrZr, CuBe, PbCaNa, etc. et même pour les aciers alliés.

Conditions pour le durcissement d'un alliage :

- La diminution de la température décroissance de la solubilité des éléments d'alliages dans le métal de base.
- Il existe des cristaux mixtes homogènes à haute température qui doivent être surfusionnés à la température ambiante. Donc il n'est pas permis pendant le refroidissement brusque à leur décomposition en phase équilibrée.
- Une troisième condition plus importante c'est que le système en question doit accepter d'être durci. Il y a une série d'alliages qui remplissent les deux conditions, mais ne montrent aucun durcissement.

Un alliage d'Al-Cu avec 4 % Cu, avec recuit d'homogénéisation à 500°C , ensuite à partir de cette température, il est refroidi à l'eau (refroidissement brusque), cet alliage montre une augmentation de la dureté jusqu'à un certain niveau (plateau), ensuite de nouveau jusqu'au maximum, après dépassement du maximum, elle chute, (fig. 159). La première augmentation de la dureté jusqu'au plateau est désignée comme durcissement à froid, la seconde comme durcissement à chaud.



(fig.159)

A partir de ce processus, on peut expliquer un tel phénomène. Par le recuit à 500°C, les atomes de cuivre sont statiquement répartis dans le réseau cristallin de l'aluminium. Si on refroidit brusquement, à partir de cette température, les cristaux mixtes ne se décomposent pas et la répartition atomique reste conservée, mais avec le temps, les atomes de cuivre se rassemblent par le processus de diffusion dans le réseau d'aluminium.

Dans les zones de couches à atome unique, l'allongement de la surface provoque des tensions internes dans le réseau, ces dernières présentent à l'extérieur une augmentation de la résistance et de la dureté du matériau.

Le processus de durcissement n'est pas très clair pour la majorité des alliages à part l'alliage Al-Cu-Mg. Donc on comprend par traitement de durcissement, un recuit d'homogénéisation suivi par un refroidissement brusque (à l'eau) aux températures ambiantes ou élevées. Techniquement on distingue le durcissement à froid ou à chaud :

- Le durcissement à froid est un traitement de durcissement avec vieillissement à température ambiante.
- Le durcissement à chaud s'effectue à température élevée

a. Alliage Al-Cu-Mg :

Les alliages Al-Cu-Mg sont des alliages à haute résistance mécanique, ils contiennent environ 2 à 4,9 % Cu, 0,2 à 1,8 Mg, 0,2 à 1,1 Mn et dans certains cas, 0,2 à 0,6 % Si et sont caractérisés par une résistance élevée lorsqu'ils subissent la trempe et le revenu.

Ils présentent une bonne tenue à chaud, mais une soudabilité et une résistance à la corrosion faibles à cause de la teneur élevée en Cu, à cet effet ces types d'alliages sont toujours plaqués avec de l'aluminium pur. Les propriétés mécaniques de l'aluminium et de ses alliages ne peuvent atteindre celles des aciers, mais on essaie toujours de trouver un traitement thermique convenable pour l'amélioration des propriétés mécaniques.

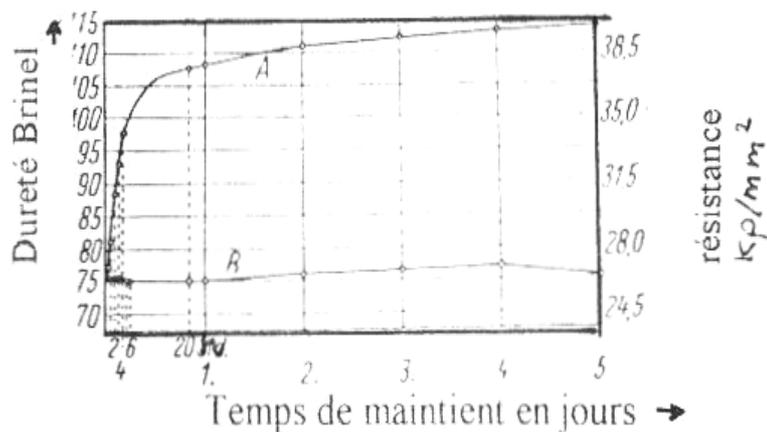
En 1906, l'allemand Alfred Wilm a réussi après plusieurs années de recherches, d'améliorer la dureté et la résistance de l'alliage Al-Cu-Mg par durcissement structural et un brevet d'invention a été déposé sous le nom de "Duralumin".

Donc on peut améliorer la dureté et les propriétés mécaniques (résistance à la rupture) d'un alliage d'Al-Cu-Mg avec la composition chimique de 4,2 % Cu, 0,52 % Mg, 0,6 % Mn et le reste Al avec des inclusions (Fe, Si, etc.), bien que le manganèse ne fait pas partie des phases durcissantes, sa présence dans les alliages est utile. Il améliore la tenue du Duralumin à la corrosion et sa présence sous forme de particules dispersées de la phase T ($Al_{12}Mn_2Cu$), augmente la température de recristallisation et améliore les propriétés mécaniques.

Le Duralumin contient aussi comme inclusions le fer et le silicium, le fer diminue la résistance et la plasticité du Duralumin. En se liant au cuivre, le fer affaiblit au vieillissement, l'effet durcissant, c'est pourquoi la teneur en fer ne doit pas dépasser 0,5 à 0,7 %. Le silicium contribue à la dégradation de la résistance, mais participe au durcissement avec une faible proportion.

L'alliage possède, à l'état initial, une résistance de 16 à 22 kp/mm², une dureté de 40 à 60 kp/mm², un allongement de 15 à 25 %. Si on fait le recuit de cet alliage à T = 500°C pour une durée de maintien de 15 min, suivie d'un refroidissement brusque (à l'eau), on obtient une amélioration des propriétés mécaniques tels que l'augmentation de la résistance à 32 kp/mm², de la dureté à 78 kp/mm² et l'allongement reste près de 25 %.

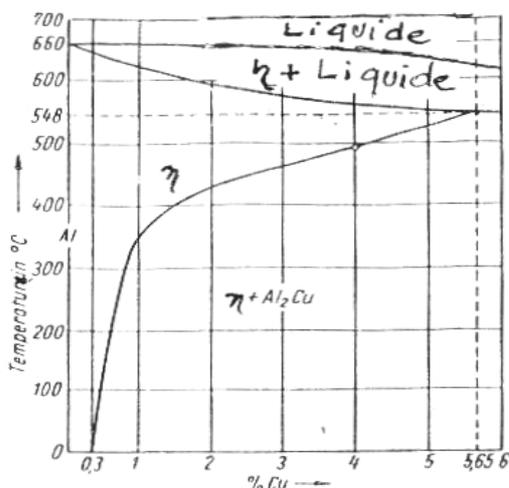
Sur la figure 160, on peut constater l'élévation des propriétés mécaniques (résistance et dureté) en fonction du temps de maintien. On remarque que l'allongement reste presque invariable.



Courbe A : Résistance et dureté
 Courbe B : Allongement

(fig. 160)

La résistance (ténacité) de cet alliage peut encore augmenter en faisant subir à l'alliage une déformation à froid, on obtient un alliage avec des propriétés équivalentes à celles d'un acier de construction à résistance moyenne, c'est à dire on atteint une résistance à la rupture équivalente à 55 kp/mm², un allongement d'environ 10 % et un bon rapport de la limite élastique. Ce type de traitement thermique est utilisé pour certains alliages métalliques dans le système Al-Cu, (fig. 161).



(fig. 161)

On reconnaît que l'aluminium possède une certaine solubilité pour le cuivre, c'est à dire dans le cristal d'aluminium, les atomes d'aluminium peuvent être remplacés par des atomes de cuivre. La solubilité est maximale à 5,65 % de Cu et à $T = 548^{\circ}\text{C}$.

A température ambiante, un alliage avec 4% de Cu se compose de cristaux mixtes Al-Cu avec une teneur inférieure à 0,5 % de Cu et d'une liaison intermétallique Al_2Cu . Un tel alliage, s'il est porté à la température de 550°C , les cristaux mixtes Al-Cu sont en situation d'absorber une grande partie du cuivre, ensuite la liaison Al_2Cu sera dissoute et on aura uniquement la présence de cristaux mixtes Al-Cu avec une teneur de 4 %.

Cette dépendance entre la température et la solubilité est une condition pour le vieillissement. Maintenant si on refroidit lentement l'alliage homogène à partir de $T = 550^{\circ}\text{C}$ on a une précipitation de nouveau Al_2Cu correspondant à une solubilité qui baisse, mais on refroidit brusquement à l'eau. L'alliage homogène, dans ce cas, le cuivre reste dans les cristaux: mixtes, c'est à dire on obtient une solution sursaturée. Cet état est instable et les atomes de cuivre cherchent à se diffuser des cristaux mixtes.

L'augmentation de la dureté et de la résistance ont pour cause le phénomène de l'état instable. Donc on peut retenir que :

- Dans l'état stable on a la formation d'une phase de cristaux mixtes avec solubilité décroissante pour des températures décroissantes.
- Lors du chauffage dans le domaine de solubilité élevée avec ensuite le refroidissement induit la formation de cristaux mixtes sursaturés par surfusion.

Dans le tableau ci-dessous, on peut constater que les propriétés mécaniques de l'alliage diminuent avec l'augmentation de la section (S) des barres ou l'épaisseur (E) des tôles.

Alliage	Produit	$\sigma_{0,2}$ (kp/mm ²)	σ_{ZB} (kp/mm ²)	δ (%)	HB (kp/mm ²)
AlCuMg1	Barre				
	$S \leq 2000 \text{ mm}^2$	26	38	12	100
	$S = 2000 \text{ à } 8000 \text{ mm}^2$	27	40	10	100
	$S \geq 8000 \text{ mm}^2$	22	36	8	90
	Tôle				
	$E = 1 \text{ à } 10 \text{ mm}$	27	40	15	100
$E = 10 \text{ à } 20 \text{ mm}$	24	38	14	90	
AlCuMg2	Barre				
	$S = 500 \text{ à } 2000 \text{ mm}^2$	31	45	9	115
	$S = 2000 \text{ à } 8000 \text{ mm}^2$	34	48	8	125
	$S \geq 8000 \text{ mm}^2$	25	40	6	105
	Tôle				
	$E = 1 \text{ à } 6 \text{ mm}$	29	44	14	110
	$E = 6 \text{ à } 10 \text{ mm}$	28	43	12	110
$E = 10 \text{ à } 20 \text{ mm}$	26	41	10	110	

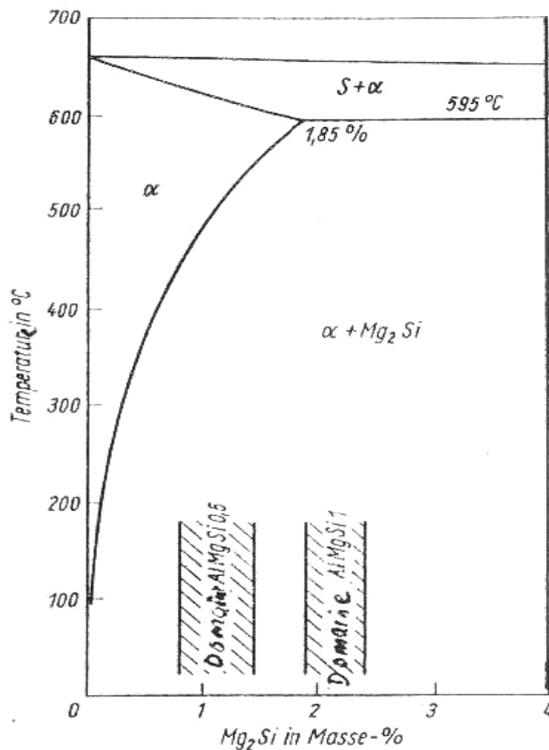
Cela est expliqué par l'influence de la vitesse de refroidissement exigée pour la surfusion des cristaux mixtes homogènes à haute température lors du refroidissement.

Avec l'augmentation de la section de la surface du matériau, la chaleur à évacuer est très importante et le refroidissement à l'intérieur du matériau (cœur) se ralentit, ce qui provoque lors du refroidissement une décomposition d'une partie des cristaux mixtes et lors du processus de durcissement, on n'a pas la présence de la totalité de la concentration de l'alliage et on ne peut pas atteindre une augmentation de la résistance, donc on a la présence d'un alliage avec une faible concentration en éléments durcissants. Donc il est très important de surveiller (utiliser) un refroidissement brusque surtout pour les alliages Al-Cu-Mg.

Le Duralumin livré en tôles, est protégé contre la corrosion par plaquage, c'est à dire par l'apport d'une couche fine d'aluminium très pur. L'épaisseur d'une telle couche doit être au moins de 4 % de l'épaisseur de la tôle. Le plaquage diminue sensiblement la résistance et la charge de rupture des tôles.

b. Alliage Al-Si-Mg (alliage Avial) :

Ces alliages ont une très bonne aptitude à la transformation à chaud, ils sont très résistants à la corrosion. Leur durcissement est du à la précipitation de la phase durcissante Mg_2Si . Ce groupe d'alliage comprend les alliages avec 0,4 à 1,4 % Mg, 0,3 à 1,6 % Si et de 0 à 1 % Mn.



(fig. 162)

De bonnes propriétés peuvent être atteintes lorsque la composition du Mg_2Si correspond au rapport de $Mg/Si = 1,7$. Un surplus de silicium peut améliorer la résistance mais diminuer la tenue à la corrosion et la ténacité. Leur diagramme d'équilibre est donné par la figure 162.

Les alliages Al-Si-Mg sont moins résistants que le Duralumin mais ils ont une meilleure plasticité à froid et à chaud, ils se soudent bien et leur limite de fatigue est élevée.

Le recuit de dissolution s'effectue à une température de 500 à 540°C suivi d'un refroidissement brusque. Le durcissement à chaud s'effectue à une température de 140 à 160°C.

Les alliages avec des concentrations 0,5 % Si, 0,7 % Mg sont utilisés pour des buts décoratifs, fils et câbles électriques, tandis que les alliages avec 1,1 % Si et 1,0 % Mg sont

utilisés en construction navale, aviation, mécanique de précision, électrotechnique et les pièces qui imposent une plasticité élevée à chaud et à froid.

c. Alliage Al-Zn-Mg :

Les alliages appartenant à ce groupe ont la composition chimique suivante :

- Zn : 4 à 5 %
- Mg : 0,5 à 3,5 %
- Mn : 0 à 1 %
- Cr : 0 à 0,3 %

L'alliage avec 4 à 5 % Zn , 0,5 à 1,5 % Mg, 0 à 1 % Mn et 0 à 0,3% Cr se durcit automatiquement selon le recuit de dissolution à la température de 350 à 500°C, une trempe à l'eau n'est pas exigée.

La dureté maximale est atteinte après un séjour de 30 jours. Un durcissement à chaud à des températures de 120 à 140°C peut donner des valeurs de résistance élevées.

Après chauffage, par exemple lors du soudage, il y a renouvellement de l'effet de durcissement. L'alliage possède de bonnes propriétés de déformation et oxydable anodiquement à cause de sa structure homogène.

Une couche supplémentaire de protection contre les actions de corrosion est nécessaire.

Les phases durcissantes de cet alliage sont $MgZn_2$ et $Al_2Mg_3Zn_3$. Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croît, alors que la plasticité et la tenue à la corrosion diminuent. La tenue à la corrosion et les propriétés mécaniques peuvent être améliorés par l'addition de faibles quantités de manganèse, de chrome et de vanadium ou par un refroidissement lent jusqu'à moyen.

d. Alliage Al-Zn-Mg-Cu :

Ce type d'alliage représente une suite développée des alliages Al-Zn-Mg, c'est un alliage à haute résistance. L'addition du cuivre et du manganèse augmente la résistance mécanique, suivant la composition, on atteint des valeurs de 46 à 54 kp/mm².

La bonne tenue à la corrosion est obtenue aussi par l'addition de Mn, Cr, Va ou par le plaquage. Comme matériaux de plaquage, on utilise un alliage d'aluminium contenant du zinc (1 à 3) %. Le recuit de dissolution s'effectue près de 450 à 470°C avec trempe à l'eau. La valeur de résistance maximale est atteinte par un durcissement à chaud de 120 à 140°C.

Les phases durcissantes de cet alliage sont : $MgZn_2$, la phase T ($Al_2Mg_3Zn_3$) et la phase S (Al_2CuMg). Avec l'augmentation de la teneur en Zn et Mg, la résistance de l'alliage croît, alors que leur plasticité et tenue à la corrosion diminuent. Ils ont une bonne plasticité à chaud et se prêtent relativement bien au corroyage à froid après recuit.

L'alliage avec 3,8 à 5,2 % Zn, 2,4 à 3,8 % Mg, 0,4 à 1,0 % Cu, 0,1 à 0,4 % Mn et 0,1 à 0,3 % Cr à une résistance à la traction de 46 à 50 kp/mm² et est utilisé dans le domaine de construction à sollicitation élevée, aviation, machines, exploitation minière.

Un alliage avec 5,1 à 6,1 % Zn, 2,1 à 2,9 % Mg, 1,2 à 2 % Cu, 0 à 0,3 % Mn, 0,18 à 0,4 % Cr à une résistance à la traction de 50 à 54 kp/mm² est utilisé dans le domaine de l'aviation, le matériel roulant et les machines complexes.

La composition chimique et les caractéristiques mécaniques principales de l'alliage Al-Zn-Mg-Cu sont données dans le tableau ci-dessous.

Cu (%)	Mg (%)	Mn (%)	Si (%)	Zn (%)	Cr (%)	R _{0,002} (Kp/mm ²)	R (Kp/mm ²)	A (%)
1,4 à 2,8	0,4 à 1,0	0,4 à 1,0	0,7 à 1,2	5 à 8,6	0,1 à 0,25	53 à 63	56 à 57	7 à 8

8.5. Alliages d'aluminium de fonderie (moulage)

Une grande partie des besoins en aluminium est utilisée comme pièce de fonderie. La matière première utilisée pour l'obtention des alliages d'aluminium de fonderie est, le plus souvent, la matière secondaire tels que déchets, rebuts d'aluminium, etc. Dans certains pays, elle est basée sur 70 % de la production.

Avant, on utilisait comme alliages d'aluminium de fonderie, les alliages d'aluminium avec des teneurs élevées en Cu ou Zn, alors qu'aujourd'hui, l'alliage le plus utilisé, est l'alliage d'Al-Si avec des additions en magnésium et cuivre.

Les alliages prévus pour le moulage, doivent posséder une coulabilité élevée, un retrait relativement faible, une faible aptitude à la fissuration à chaud et à la porosité et de bonnes propriétés mécaniques avec une résistance élevée à la corrosion.

Les principaux alliages de fonderie avec leurs compositions chimiques sont indiqués sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Types	% d'éléments d'alliages				% d'autres éléments					
	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Fe	Zn	Ni	Cu	Pb+Sn
G-Al Mg3	2,0 à 4,0	0,5 à 1,3	0,05 à 0,5			0,5	0,10		0,05	
G-Al Mg3dek	2,0 à 4,0	≤ 0,5	0,05 à 0,5			0,5	0,10		0,05	
G-Al Mg5	3,5 à 5,5	0,5 à 1,3	0,05 à 0,5			0,5	0,10		0,05	
G-Al Si 5 Mg	1,35 à 0,6	4,5 à 6,0	0,15 à 0,5		0,15	0,5	0,10		0,05	
G-Al Si 7 Mg	0,25 à 0,5	6,5 à 8,0	0,15 à 0,5		0,15	0,5	0,10		0,05	
G-Al Si 10 Mg	0,2 à 0,4	8,5 à 10,5	0,15 à 0,5		0,15	0,6	0,10		0,05	
G-AlSi10Mg(Cu)	0,2 à 0,4	8,5 à 11,5	0,2 à 0,5		0,15	0,6	0,5	0,3	0,5	0,2
G-Al Si 6 Cu	0,25 à 0,55	5,5 à 7,0	0,2 à 0,5	1,0 à 2,0	0,15	0,6	0,5	0,2		0,1
G-Al Si 7 Cu1	0,25 à 0,6	6,5 à 8,0	0,2 à 0,5	1,0 à 2,0	0,15	0,8	1,0	0,3		0,3
G-Al Si 7 Cu2	0,2 à 0,7	6,5 à 8,0	0,2 à 0,5	1,0 à 2,0	0,15	0,9	1,2	0,3		0,3

Les propriétés mécaniques, ainsi que le type de moulage pour lequel elles sont destinées, sont représentées dans le tableau suivant.

Désignation	Type de moulage	Etat	$\sigma_{0,2}$	σ_{ZB}	δ	HB	σ_{bW}	$\sigma_{0,2}$ 300 h 200°C
			(Kp/mm ²)		(%)	(Kp/mm ²)		
G-Al Mg3	Sable	S.T.	8 (7)	14 (13)	3 (3)	50 (50)	6	9
	Sable	T.C.	13 (12)	21 (16)	2 (2)	72 (65)	8	
	Coquille	S.T.	9 (7)	15 (14)	3 (3)	50 (50)	7	
	Coquille	T.C.	15 (12)	22 (18)	4 (2)	70 (65)	8,5	
G-Al Mg5	Sable	S.T.	8,5 (8)	15 (13)	2 (1)	55 (55)	6	8
	Coquille	S.T.	9 (8)	17 (14)	3 (1)	60 (55)	7,5	
G-AlSi5Mg	Sable	S.T.	10 (9)	14 (13)	1 (0,5)	55 (55)	6	
	Sable	T.A.	14 (12)	18 (14)	2 (1)	70 (70)	7,5	
	Sable	T.C.	20 (16)	22 (17)	1 (0,5)	80 à 110	7,5	
	Coquille	S.T.	12 (10)	16 (14)	1,5 (1)	60 (60)	7	
	Coquille	T.A.	16 (13)	20 (17)	2 (1)	70 (70)	8,5	
	Coquille	T.C.	22 (18)	24 (19)	1 (0,5)	90 à 115	8,5	
G-AlSi6Cu	Sable	S.T.	11 (9)	16 (15)	1 (1)	70 (65)	6,5	8,5
	Sable	T.A.	15 (15)	21 (18)	1,5 (1)	80 (75)	8	7
	Sable	T.C.	18 (16)	22 (19)	0,6 (0,05)	90 à 115	8,5	6,5
	Coquille	S.T.	12 (11)	19 (17)	2 (1)	75(70)	8,5	5,5
	Coquille	T.A.	16 (16)	23 (20)	2 (1)	90 (80)	9,5	
	Coquille	T.C.	20 (18)	24 (22)	0,8 (0,6)	95 à 120	9,5	
G-AlSi7Cu2	Sable	S.T.	12 (11)	17 (14)	0,6 (0,4)	75 (70)		
	Sable	T.A.	17 (13)	19 (15)	0,3	85 (80)		
	Coquille	S.T.	14 (12)	19 (15)	0,8 (0,4)	80 (75)		
	Coquille	T.A.	18 (14)	20 (15)	0,4	85 (80)		
	Pression	S.T.	14	20	1	80		
G-AlSi10Mg	Sable	T.A.	18 (17)	20 (20)	1,2 (1)	80 :110	10	
	Coquille	S.T.	11 (10)	20 (18)	2 (1)	65 (60)	9	
	Coquille	T.A.	20 (18)	24 (22)	1,2 (1)	85 à 115	11	5,5
	Pression	S.T.	12	21	1,5	70	7,5	

S.T. : Sans Traitement
T.C. : Traitement à Chaud
T.A. : Traitement A Froid

Les propriétés de fonderie d'un alliage sont élevés lorsque sa structure comporte un eutectique. Un eutectique se forme dans de nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limite dans l'aluminium. C'est ce qui détermine la teneur en éléments plus élevés dans les alliages de fonderie que dans les alliages corroyables.

Le plus souvent, on emploie les alliages AlSi, AlCu, AlMg additionnés d'une faible quantité de cuivre et de magnésium (AlSi), de silicium (AlMg), de manganèse, nickel et chrome (AlCu).

Pour affiner les grains, et par suite, améliorer les propriétés mécaniques, on introduit les inoculants (Ti, Zr, B, Cl, V, etc.).

De nombreuses pièces coulées soumises au traitement thermique. suivant le caractère de la pièce et les conditions de son service, on a recourt à l'une des modalités de traitements thermiques suivantes :

a. Vieillissement par revenu (T1) : (notation conventionnelle T1) $T = 170$ à 180°C pendant un séjour de 5 à 20 h et sans trempe préalable, destiné au renforcement de la résistance et amélioration de l'usinage.

b. Recuit (T2) : $T \approx 300^{\circ}\text{C}$, séjour de 5 à 10 h, refroidissement à l'air, destiné à supprimer les contraintes produites par la coulée. ainsi que les contraintes résiduelles dues à l'usinage, il augmente légèrement la plasticité.

c. Trempe et maturation (T3, T4) : $T = 510$ à 545°C , trempe à l'eau chaude (40 à 100°C). Après la trempe, les pièces coulées sont maintenues un temps assez long à l'ambiante. Le régime T_1 correspond à la trempe et maturation.

d. Trempe et vieillissement par revenu de courte durée (T5) : (2 à 3) h, à 175°C . Ces températures et durées font que le vieillissement n'est pas complet. Destinés à l'augmentation de la résistance tout en gardant la plasticité élevée.

e. Trempe et vieillissement par revenu complet (T6) : $T = 200^{\circ}\text{C}$, séjour de 3 à 5h, assurent une résistance maximale mais diminuent la plasticité.

f. Trempe et revenu de stabilisation (T7) : $T = 230$ à 250°C pendant 3 à 10 h, appliqués pour stabiliser la structure et les changements volumiques de la pièce coulée tout en conservant une résistance suffisante.

g. Trempe et revenu d'adoucissement (T8) : $T = 240$ à 260°C durant 3 à 5h, la température élevée du revenu diminue sensiblement la résistance mais augmente la plasticité et la stabilité des dimensions.

8.5.1. Alliages Al-Si

Ces alliages portent le nom de "silumines", lesquels s'apparentent quand à leur composition à un alliage eutectique, leur coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses. Ils sont destinés à la coulée sous pression.

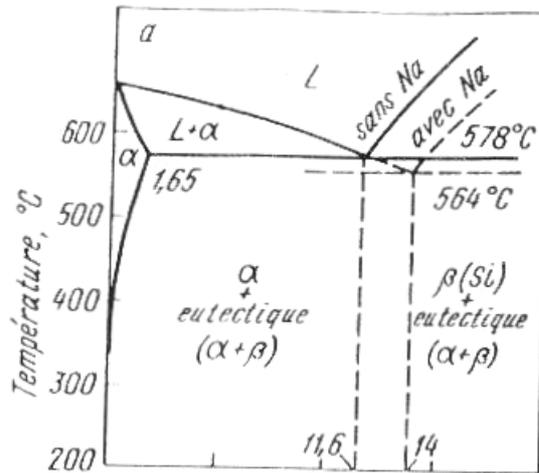
Sur le diagramme d'équilibre Al-Si (fig.163), on peut constater que la solidification commence par une cristallisation des cristaux mixtes riches en aluminium α et se termine par la cristallisation de l'eutectique $\alpha + \beta$ (Si) et éventuellement, avec d'autres phases formées par d'autres éléments.

La phase (Si) est présente en se déposant d'abord sous forme de gros. cristaux aciculaires (en forme d'aiguilles), qui jouent le rôle d'entailles internes dans la solution solide α plastique, les propriétés mécaniques de cette structure sont faibles.

Plus près de l'alliage eutectique, se trouvent le plus souvent les cristaux primaires de silicium, c'est à dire, il y a accumulation (excès) de cristaux de silicium, qui ne sont pas

fondu et lors de la recristallisation, ils agissent comme germes cristallins pour la cristallisation du silicium.

Donc avec l'augmentation du chauffage du bain métallique ainsi que l'augmentation de la vitesse de refroidissement, on obtient une solidification normale de l'eutectique, c'est à dire une cristallisation couplé $\alpha + (\text{Si})$ est atteinte. Une telle cristallisation est obtenue aussi par le traitement du bain métallique en ajoutant des inoculants tels que le sodium.



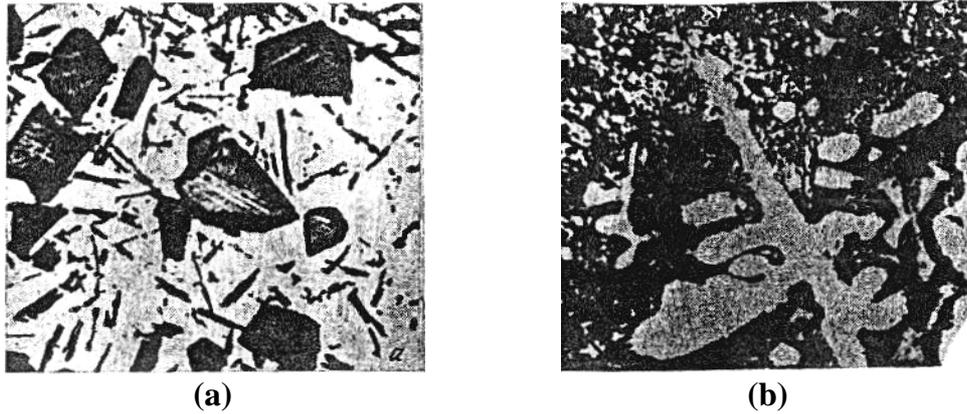
(fig. 163)

Cette observation est faite en premier par A. Pacz en 1921 sur un alliage eutectique Al-Si (silumin) et elle est connue sous le nom de «effet silumin». Il s'agit de l'affinage de la structure et l'élimination des cristaux de silicium en excès. Les silumines sont inoculés au sodium (0,05 à 0,08) %, par addition au bain de sels de 67 % NaF et 33 % NaCl. Le traitement d'affinage du bain métallique, proprement dit s'effectue de la manière suivante.

De 730 à 750°C, on plonge une quantité (0,25 % du bain métallique) et le sel d'affinage dans le bain métallique, après sa fusion, on mélange et après dépôt du sel, on l'extrait du bain, ensuite à l'aide d'une cloche de plongée, on ajoute du sodium propre (0,03 à 0,06) %. Ce dernier s'évapore en agissant sur le bain métallique et à la fin, on refait le traitement du bain une dernière fois avec une quantité (0,75%) et après un temps très court, c'est à dire juste après son introduction, on procède à la coulée du métal. Ce traitement doit être effectué directement avant la coulée du métal car le sodium, peut brûler en quittant le bain et son effet sera diminué.

La quantité de sodium exigée pour la coulée en sable est importante par rapport celle exigée dans la coulée en coquille, car la solidification rapide dans la coquille donne une cristallisation eutectique. En présence du sodium, les lignes du diagramme d'équilibre se déplacent et l'alliage hypereutectique devient hypoeutectique.

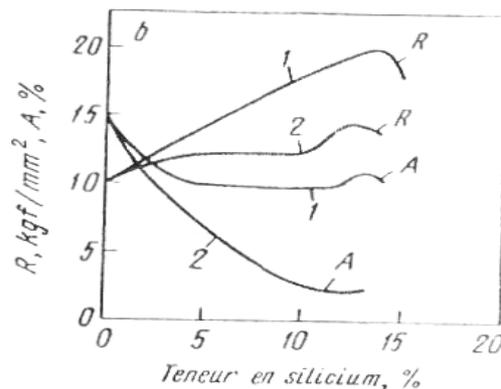
Dans ce cas au lieu du silicium excédentaire, on observe dans la structure de l'alliage, l'apparition de cristaux de la solution α comme le montre les figures : 164 a (avant modification) et 164 b (après modification).



(fig. 164)

Dans ces conditions l'eutectique acquiert une structure plus fine et se compose de petits cristaux des solutions β (Si) et α .

Pendant la solidification, les cristaux de silicium se couvrent d'une pellicule de siliciure de sodium (Na_2Si) qui rend difficile leur croissance. Cette structure inoculée améliore les propriétés mécaniques de l'alliage (fig. 165) dont la courbe 1 est modifiée et la courbe 2 non modifiée.



(fig. 165)

L'alliage Al-Si ne contenant pas de Mg, Mn, ne subit pas le traitement thermique de durcissement. Les alliages hypoeutectiques additionnés de manganèse en plus de l'inoculation, peuvent être durcis par un traitement thermique. La phase durcissante est Mg_2Si . L'introduction simultanée de magnésium et de cuivre peut donner lieu à la formation des phases CuAl_2 et $\text{W}(\text{Al}_x\text{Mg}_5\text{Cu}_4\text{Si}_4)$.

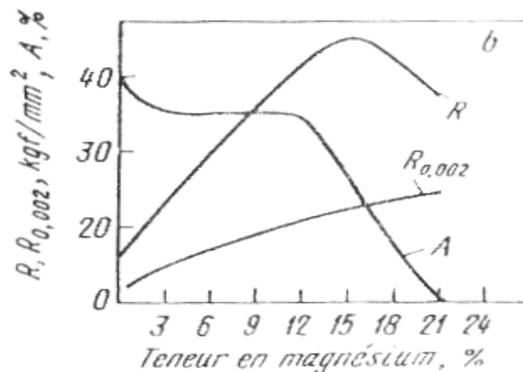
Les pièces en alliage contenant du Mg et Mn, sollicitées par des charges moyennes, subissent seulement le vieillissement par revenu (T1), alors que les grosses pièces très changées, (carters des compresseurs, carters et bloc cylindres des moteurs), la trempe et le vieillissement par revenu (T6). Les pièces coulées en alliages contenant du Mg, imposant une plasticité accrue, sont soumises à la trempe (T4) et pour augmenter leur résistance, à la trempe et au vieillissement (T6). Lorsqu'il importe d'obtenir une plasticité élevée et une stabilité des dimensions, la trempe est suivie de revenu à 250°C pendant 3 à 5 h.

Les principaux types d'alliages Al-Si figurent sur le tableau ci-dessous, selon TGL.

Désignation	Composition (%)	Addition (%)	Limite 0,2 (Kp/mm ²)	Résistance Traction R (Kp/mm ²)	Allongement rupture (%)	HB (Kp/mm ²)	Résist. flexion alternée Kp/mm ²
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm ³							
G-AlSi12	Si: 11,0 à 13,5	Fe : 0,6	8 à 9 (7)	17 à 22 (16)	8 à 4 (2)	50 à 60 (45)	5,5 à 6,5
G-AlSi12g	Mn : 0 à 0,5	Ti : 0,15	9 à 10 (8)	18 à 22 (16)	10 à 6 (5)	50 à 60 (50)	8,5 à 10
GK-AlSi12	Al : reste	Zn : 0,10	9 à 11 (9)	20 à 26 (16)	7 à 3 (2)	55 à 70 (50)	7 à 8
GK-AlSi12g	SiFe > 0,4 → Mn > 0,25	Cu : 0,05 Mg : 0,05	9 à 11 (9)	20 à 26 (16)	10 à 6 (4)	50 à 60 (50)	9 à 10
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm ³							
G-AlSi10Mg	Si: 9,0 à 11,0	Fe : 0,6	9 à 11 (8)	18 à 24 (17)	5 à 2 (2)	55 à 65 (55)	6,5 à 7,5
G-AlSi10Mga	Mg : 0,2 à 0,4	Ti : 0,15	17 à 26 (17)	22 à 20 (20)	4 à 1 (1)	80 à 110 (75)	9 à 11
GK-AlSi10Mg	Mn : 0 à 0,5	Zn : 0,10	11 à 15 (10)	20 à 26 (18)	4 à 1 (1)	65 à 85 (60)	8 à 10
GK-AlSi10Mga	Al : reste SiFe > 0,4 → Mn > 0,25	Cu : 0,05	20 à 28 (18)	24 à 32 (22)	4 à 1 (1)	85 à 115(80)	10 à 11
Poids spécifique : 2,70 Kg/dm ³							
G-AlSi15Mg	Si: 4,5 à 6,0	Fe : 0,5	10 à 13 (9)	14 à 18 (13)	3 à 1 (0,5)	55 à 70 (55)	6 à 6,5
G-AlSi15Mgka	Mg : 0,5 à 0,8	Zn : 0,10	15 à 18 (12)	18 à 25 (14)	5 à 2 (1)	70 à 85 (70)	7 à 7,5
G-AlSi15Mga	Mn : 0 à 0,5	Cu : 0,05	22 à 29 (16)	24 à 30 (17)	2 à 0,5(0,5)	80 à 110 (80)	7 à 7,5
GK-AlSi15Mg	Ti : 0 à 0,20		12 à 16 (10)	16 à 20 (14)	4 à 1,5 (1)	90 à 75 (60)	7 à 7,5
GK-AlSi15Mgka	Al : reste		16 à 19 (13)	21 à 27 (17)	6 à 2 (1)	70 à 90 (70)	8 à 8,5
GK-AlSi15Mga	SiFe > 0,4 → Mn > 0,25		24 à 29 (18)	26 à 30 (19)	3 à 1 (0,5)	90 à 110 (90)	8 à 8,5

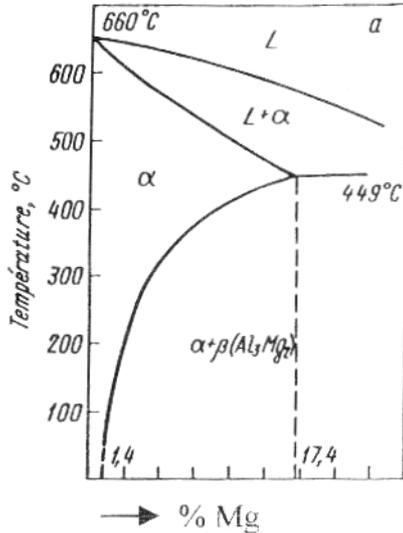
8.5.2. Alliages Al-Mg

Les alliages Al-Mg possèdent de faibles propriétés de fonderie du fait qu'ils ne contiennent pas d'eutectique. Leur propriété caractéristique est la bonne tenue à la corrosion et leurs propriétés mécaniques sont accrues avec une usinabilité élevée. L'addition à l'alliage Al-Mg (9,5 à 11,5) % Mg et d'inoculants (Ti, Zr), améliorent les propriétés mécaniques, alors que le béryllium diminue l'oxydabilité de la fusion, ce qui permet de la conduire sans flux de protection. Le magnésium accroît fortement la résistance des alliages (fig.166) jusqu'à 12 ou 14 %, avec le Mg, la plasticité change peu mais ensuite elle se dégrade brusquement.



(fig. 166)

Les alliages Al-Mg sont en plus additionnés de manganèse qui forme des particules dispersées Al_6Mn , durcit l'alliage et affine le grain. Ces types d'alliages sont prévus pour les pièces travaillant dans une atmosphère humide, par exemple dans la construction navale et aéronautique. La structure de ces alliages, se compose de solution solide α et d'inclusions grossières de particules Al_3Mg_2 qui se déposent aux joints de grains en fragilisant l'alliage, (fig. 167).



(fig. 167)

C'est pourquoi, ces alliages s'emploient après trempe à 430°C avec refroidissement à l'huile (40 à 50)°C et un séjour à la température de trempe pendant 12 à 20 h, ce qui assure la dissolution des particules Al_3Mg_2 dans la solution solide α et l'obtention après trempe, d'une solution solide homogène. L'addition aux alliages Al-Mg jusqu'à 1,5 % Si, améliore les propriétés de fonderie par suite la formation d'un eutectique triple. Ces alliages s'emploient dans la construction navale et aéronautique.

Les principaux types d'alliages Al-Mg sont donnés sur le tableau ci-dessous selon TGL.

Désignation	Composition (%)	Addition (%)	Limite 0,2 (Kp/mm ²)	Résistance Traction R (Kp/mm ²)	Allongement rupture (%)	HB (Kp/mm ²)	Résist. flexion alternée Kp/mm ²
Poids spécifique : 2,7 Kg/dm ³							
G-Al Mg3	Mg : 2,0 à 4,0	Fe : 0,5	8 à 10 (7)	14 à 19 (13)	8 à 3 (3)	50 à 60 (50)	6 à 6,5
G-Al Mg3a	Si : 0 à 1,3	Zn : 0,10	13 à 16 (12)	21 à 28 (16)	8 à 2 (2)	70 à 90 (65)	7,5 à 8
GK-Al Mg	Mn : 0 à 0,5	Cu : 0,05	9 à 12 (7)	15 à 20 (14)	8 à 3 (3)	50 à 60 (50)	7 à 7,5
GK-Al Mg3a	Ti : 0 à 0,20		15 à 18 (12)	22 à 33 (18)	15 à 4 (2)	65 à 90 (65)	8 à 9
	Al : reste						
Poids spécifique : 2,6 Kg/dm ³							
G-Al Mg5	Mg : 4,0 à 5,5	Fe : 0,5	9 à 10 (9)	16 à 9 (13)	5 à 2 (1)	55 à 70 (55)	6 à 6,5
GK-Al Mg5	Si : 0,5 à 1,5	Zn : 0,10	9 à 10 (9)	17 à 25 (14)	8 à 3 (1)	60 à 80 (55)	7 à 7,5
	Mn : 0 à 0,5	Cu : 0,05					
	Ti : 0 à 0,20						
	Al : reste						
Poids spécifique : 2,65 Kg/dm ³							
G-Al Mg5 Cu	Mg : 4,0 à 5,5	Fe : 0,5	9 à 10	16 à 19 (9)	5 à 3 (1)	55 à 70 (55)	
	Si : 0,5 à 1,5	Zn : 0,10	9 à 10 (9)	17 à 25 (14)	8 à 2 (2)	60 à 80 (55)	
	Cu : 0,4 à 0,6						
	Mn : 0 à 0,5						
	Ti : 0 à 0,20						
	Al : reste						

8.5.3. Alliages Al-Cu

Leur composition chimique et les caractéristiques mécaniques principales sont données dans le tableau suivant.

Mn (%)	Cu (%)	Autres et Ti (%)	R (Kp/mm ²)	R _{0,002} (Kp/mm ²)	A (%)
0,6 à 1	4,5 à 5,3	0,25 à 0,45	24	16	7

Ces alliages possèdent, après traitement thermique, de hautes propriétés mécaniques à l'ambiante et aux températures élevées et se prêtent bien à l'usinage. Leurs propriétés de fonderie sont basses (grand retrait, aptitude à la fissuration à chaud). L'alliage s'emploie pour la fabrication des moulages de petites pièces de formes simples (armatures, supports).

Pour obtenir une résistance accrue après la trempe, les moulages sont soumis au revenu à 150°C pendant 2 à 4 heures. La présence dans la solution solide du manganèse et la formation dans le volume du grain des phases intermétalliques, augmentent la résistance à chaud. L'addition du titane affine le grain.

Le durcissement de l'alliage s'obtient par trempe et vieillissement à 175°C pendant 3 à 5 h. Les alliages Al-Cu sont peu stables à la corrosion et pour parer à cet inconvénient, les pièces coulées subissent ordinairement l'anodisation.

8.5.4. Alliages Al-Si-Cu

Ce groupe d'alliages comprend les alliages avec une bonne coulabilité et de bonnes propriétés de résistance. La tenue à la corrosion est faible, cela est dû à la présence du cuivre. Les alliages avec 6 % Si, \approx 3 % Cu, sont utilisés dans tous les domaines de construction des machines et des moteurs où ils existent uniquement des sollicitations moyennes. Les alliages avec une teneur de 12 % Si ne durcissent pas eux mêmes et ils sont utilisés pour les pièces compliquées.

8.6. Le cuivre et ses alliages

Le mot cuivre est dérivé du mot « cuprum » qui signifie métal de l'île de Chypre, où il fut découvert à l'état natif pendant l'antiquité. Son numéro atomique dans la classification de Mandéléév est 29, sa masse atomique 63.54. Le cuivre est un métal rouge à cassure rose.

La teneur totale de l'écorce terrestre en cuivre, est relativement faible (0,01 % en masse). Dans la nature on le trouve à l'état natif plus souvent que les autres métaux. Les blocs de métal natif atteignent parfois des dimensions importantes. A cause de son existence à l'état natif et de la facilité de son usinage, il fut utilisé par l'homme avant tout autre métal.

8.6.1. Procédés d'élaboration et d'affinage du cuivre

La plus grande partie du cuivre est obtenue à partir des minerais de cuivre qui sont formés de sulfures et d'oxydes. mais généralement 80 % du cuivre est obtenu à partir des sulfures tels que :

- Chalcopyrite : $\text{Cu}_2\text{S}, \text{FeS}_3$, qui est le répandu, il est d'une couleur jaune d'or.
- Chalcosine Cu_2S de couleur noire.
- Les oxydes :
 - Cuprite : Cu_2O .
 - Malchite : $\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$.
 - Azurite : $\text{CuCO}_3, \text{Cu}(\text{OH})_2$.

Les minerais de cuivre contiennent toujours du fer en grande quantité sous forme de FeS_2 , et contiennent d'autres éléments tels que Sb, As, Pb, Bi, Au, Ag, Ni. Ce qui rend la teneur du cuivre très faible dans le minerais.

Les procédés métallurgiques d'élaboration du cuivre se différencient selon la composition chimique du minerais de cuivre. Il existe deux types de procédés :

- Procédé par voie sèche.
- Procédé par voie humide.

Dans cette partie on abordera que le premier procédé.

Procédé par voie sèche :

Ce procédé est le plus important et opère sur des minerais dont la teneur minimale en métal après concentration avoisine 15 %. Plusieurs phases peuvent être distinguées dans ce procédé.

a. Concentration du minerai :

Les minerais de cuivre sont très pauvres en cuivre (1 à 4) % et il est nécessaire de leur faire subir un traitement d'enrichissement. Le minerai est concentré ou enrichi par flottation afin d'éliminer une partie de la frange et d'amener la teneur en cuivre jusqu'à 25 %.

b. Elimination partielle du fer :

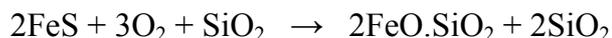
Le concentré du minerai, les additions et le coke sont enfoncées dans un four à cuve où ils sont fondus dans sa partie inférieure où une partie du fer est éliminée et passe dans la scorie et le soufre subit un grillage partiel. Après cette fusion, on obtient la charge fusionnée appelée matte, laquelle est rassemblée dans un avant-creuset ou elle est encore séparée de la scorie.

La matte contient entre 20 à 50 % de cuivre, 20 à 30 % de soufre et de 30 % de fer. Dans la scorie se trouvent de 0,2 à 0,4 % de cuivre. La grande quantité de fer et de soufre se trouvant dans la matte est éliminée par oxydation lors de son enfournement dans le convertisseur à tambour.

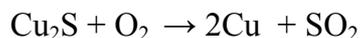
c. Oxydation de la matte :

L'oxydation de la matte appelée aussi convertissage, du nom de l'appareil utilisé, se fait en deux phases dans le même appareil. Durant la première phase s'effectue l'oxydation

du sulfure de fer (élimination du fer) par soufflage d'air avec addition de SiO₂. L'oxyde de fer forme s'unit à la silice et est ainsi éliminée à l'état de scorie qui est par la suite évacuée.



Durant la deuxième phase, il reste uniquement Cu₂S (matte blanche) et l'oxydation continue par soufflage d'air afin de transformer le Cu₂S en cuivre brut.



Dans le convertisseur, on a besoin d'ajouter du combustible car la combustion du soufre fournit la chaleur nécessaire pour la fusion de la charge. Le cuivre brut obtenu contient 97 à 99 % de cuivre et une série d'éléments secondaires tels que : Fe, As, Pb, Ni, Ag, Au. Le cuivre brut est ensuite affiné dans un four.

d. Affinage du cuivre brut :

L'affinage du cuivre comporte généralement deux phases successives : l'affinage par voie sèche au celui électrolytique.

- Affinage par voie sèche au four :

Le cuivre brut est affiné dans un four à flamme après fusion, on a de l'air pour abaisser la teneur en Pb, Fe et le reste du soufre. L'antimoine et l'arsenic sont aussi partiellement oxydés. Durant cette opération, une grande quantité du cuivre est oxydée, ce qui donne du Cu₂O, lequel est réduit à la fin de l'opération d'oxydation par addition du bois humide, ce qui provoque une formation de la vapeur d'eau et d'hydrogène carburé. Ce processus est appelé broissage.

Le cuivre obtenu après cette opération contient de 99 à 99,6 % de cuivre, une partie est coulée en blocs et en brames et porte le nom de cuivre affiné. L'autre partie est destinée à subir l'électrolyse et porte le nom de cuivre anodique.

- Affinage électrolytique :

L'affinage électrolytique du cuivre a deux buts essentiels :

- Obtenir du cuivre pur, ce qui conduit à l'augmentation de la conductibilité électrique et la capacité de déformation.
- L'extraction des métaux purs (Au, Ag).

L'électrolyse du cuivre s'effectue dans une solution d'acide sulfurique de 40 à 60°C avec une densité de 200A/m² (0,2 à 0,3) V. Le cuivre destiné à l'électrolyse est préparé sous forme de panneaux plats qui jouent le rôle d'anodes.

Le cuivre et les éléments qui l'accompagnent tels que Ni, Ph, Zn etc. sont dissous de l'anode dans l'électrolyte mais ne l'accompagnent pas dans la cathode à cause de leur potentiel de séparation (précipitation). Les autres éléments tels que Au, Ag, As et antimoine coulent lentement à partir de l'anode en formant une boue anodique, cette dernière est traitée pour en extraire l'argent et l'or. Un bon cuivre électrolytique, renferme jusqu'à 99,98 % Cu.

8.6.2. Cuivre pur (non allié)

C'est un métal rouge, plus ou moins foncé, présentant une cassure rose. L'application technique du cuivre, dans les différents domaines, est liée aux propriétés technologiques que présente ce métal tels que :

- Conductibilité thermique et électrique élevée.
- Bonnes propriétés de résistance.
- Bonne capacité de déformation.
- Bonne tenue à la corrosion.
- Bonne soudabilité.

Une amélioration des propriétés technologiques, mécaniques et de la tenue à la corrosion est obtenue par l'addition des éléments d'alliages tels que l'étain, le zinc, l'aluminium, le nickel, et d'autres éléments importants.

Une grande partie de la production de ce métal est utilisée à l'état pur et une faible partie comme alliage de cuivre. Grâce à son excellente conductibilité électrique et thermique, il est très utilisé surtout dans le domaine de l'électrotechnique. Le cuivre ne pourra jamais être remplacé par l'aluminium à cause de ses bonnes propriétés de soudage et sa bonne flexibilité et sa grande conductibilité.

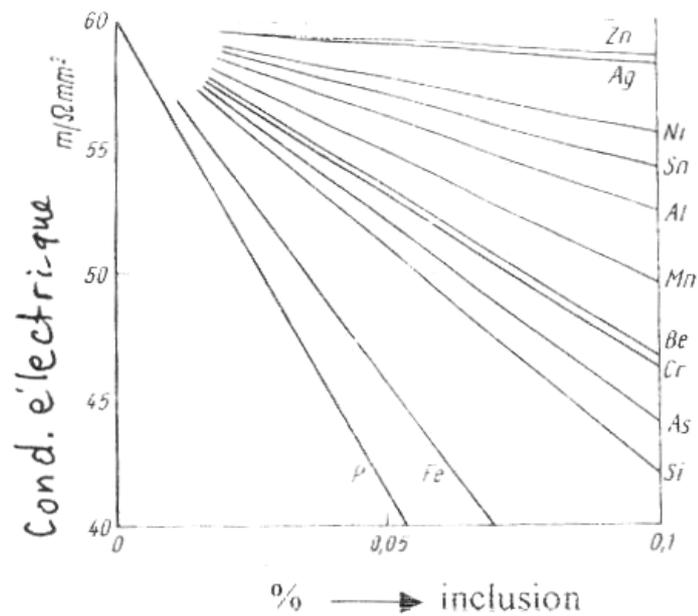
Le tableau, ci-dessous, montre les différents types de cuivre pur avec les pourcentages d'inclusions (éléments secondaires).

Désignation	Inclusions en %											
	O2	Bi	Sb	As	Sn	Ni	Fe	Pb	Zn	S	Ag	P
Cuivre électrique libre d'oxygène												
Se-Cu 99,97	0,0003	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,003	0,002	0,005		0,002
Se-Cu 99,95	0,0008	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,003		0,005	
Cuivre raffiné et désoxydé												
Dr-Cu 99,99	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,04	
Dr-Cu 99,97	0,002	0,005	0,01		0,2		0,01	-		-	0,04	
Dr-Cu 99,95	0,003	0,05	0,05	0,005	0,4	0,05	0,03	-	0,01	-	-	
Cuivre avec oxygène												
E-Cu 99,9	0,04	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,005	0,005	0,005	0,005	0,003	-
R-Cu 99,7	0,08	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2	0,05	0,01	-	0,01	-	-
R-Cu 99,5	0,10	0,003	0,05	0,05	0,05	0,4	0,05	0,05	-	0,01	-	-
R-Cu 99,25	0,06	0,02	0,05		-		-	0,1	-	0,02	-	-

Les éléments secondaires dissous dans le cuivre, augmentent principalement la résistance spécifique électrique $R = 1/\rho$.

La figure 168 représente l'influence de certains éléments, comme impuretés ou éléments d'alliage, sur la conductibilité spécifique électrique.

La conductibilité électrique la plus élevée du cuivre, mesurée à la température de 20°C, est de 60,1 m/Ωmm².



(fig. 168)

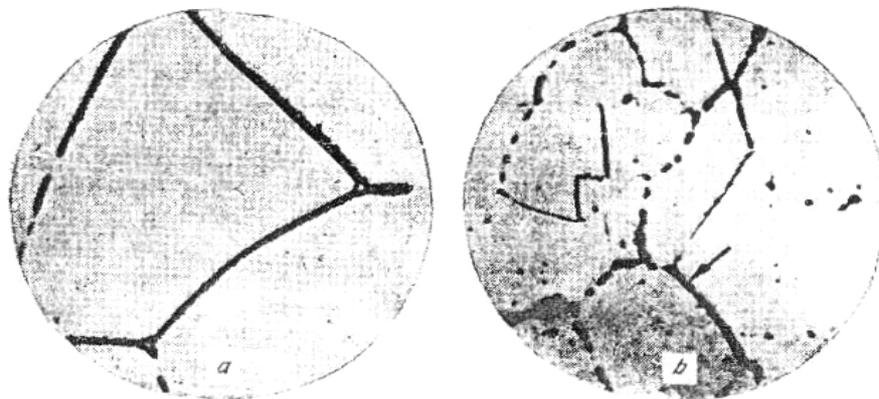
Les inclusions présentes dans le cuivre exercent une forte influence sur ses propriétés, selon leur action, elles peuvent être rangées dans l'ordre suivant :

a. Celles qui forment des solutions solides, Ni, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P, etc. :

Ces inclusions améliorent la résistance mais altèrent brusquement les conductibilités électriques et thermiques (surtout Sb et AS). C'est pourquoi, les conducteurs de courant se font en cuivre contenant $\leq 0,002\%$ Sb et $\leq 0,002\%$ As. De plus l'antimoine rend difficile la déformation à chaud.

b. Les inclusions de plomb, bismuth, etc. :

Elles sont pratiquement insolubles dans le cuivre et forment avec lui des eutectiques, facilement fusibles, qui, précipités aux joints de grains, rendent plus difficile le corroyage. La figure 169 représente la microstructure du cuivre (a : avec addition de 0,2 % Bi et b : avec addition de 0,3 % Pb).

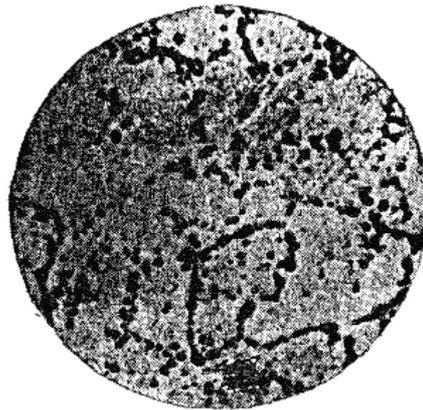


(fig. 169)

Lorsque la teneur en bismuth atteint 0,005 %, le corroyage à chaud désagrège le cuivre. Avec une teneur en bismuth encore plus élevée, le cuivre devient fragile à froid. Ces inclusions influent peu sur la coulabilité électrique.

c. Les inclusions d'oxygène et de soufre :

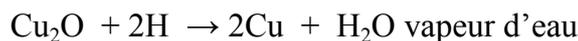
Elles forment avec le cuivre des combinaisons fragiles Cu_2O , Cu_2S , qui entrent dans la composition de l'eutectique, (fig.170).



(fig. 170)

L'influence de ces inclusions sur la conductibilité électrique est faible. Le soufre améliore l'usinabilité. L'oxygène forme avec le cuivre un protoxyde et provoque la fragilisation par hydrogène.

Lorsque le cuivre est chauffé (recuit), dans une atmosphère contenant l'hydrogène ou d'autres gaz, ces derniers diffusent en profondeur. Si le cuivre comporte des inclusions Cu_2O , elles réagissent avec H_2 , en formant des vapeurs d'eau suivant la réaction :



Cette réaction s'accompagne d'augmentation de volume car les molécules H_2O (vapeur d'eau) ne peuvent pas se diffuser dans le réseau cristallin du cuivre, elles se rassemblent dans de petits espaces produisant ainsi une pression élevée et donne lieu à la formation de microfissures qui peuvent entraîner la rupture du métal, donc le métal devient fragile et une éventuelle déformation conduit à l'interruption des limites de grains (joints de grains).

Ce phénomène est connu sous la maladie d' H_2 et ne se manifeste pas lorsque le cuivre ne contient pas de Cu_2O où la totalité de l' O_2 est liée avec d'autres éléments, dont leurs oxydes sont réduits par H_2 comme par exemple le phosphore et le lithium. Donc il est recommandé d'effectuer le recuit du cuivre contenant du Cu_2O dans une atmosphère non réductrice.

Le soudage résiste bien à la corrosion dans les conditions atmosphériques ordinaires, dans l'eau douce, l'eau de mer et dans d'autres milieux agressifs. Mais sa tenue est mauvaise dans les gaz sulfureux et l'ammoniac.

Caractéristiques physiques du cuivre :

- Température de fusion : 1083°C.
- Réseau cristallin CFC ($a = 3,607\text{\AA}$) = $3,6 \cdot 10^{-8}$ cm.
- Point d'ébullition : 2350°C.
- Chaleur de fusion : 49,9 cal/g.
- Chaleur spécifique : $C_p_{20^\circ\text{C}} = 0,092$ cal/g.yrd.
- Massé volumique à 20°C : 8,94 g/cm³.
- Conductibilité thermique (20°C) : 0,941 cal/cm.S.grd = 385 W/ μk .
- Coefficient de dilatation linéaire (0 à 1083)°C = 2,25 %.
- Résistivité électrique (20°C) : $\rho = 1,724 \mu\Omega\text{cm} \approx 0,0175 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$.

Le cuivre est le meilleur conducteur de chaleur et d'électricité après l'argent (6 %), d'où son usage comme chaudière à évaporer, serpentins, cuves, fils et câbles pour transport d'énergie électrique, enroulements de dynamos, etc.

La conductibilité, du cuivre est influencée par la température, les traitements mécaniques et les inclusions. Pour le cuivre pur, elle peut diminuer pour des températures de 100°C jusqu'à 78 % de sa valeur à 20°C, de même que la déformation à froid provoque des distorsions de réseau, ce qui diminue la conductibilité. Les distorsions peuvent être égalisées par un traitement thermique à 450°C de même que les inclusions agissent aussi dans le même sens.

Caractéristiques mécaniques du cuivre :

Le cuivre est un matériau assez ductile et tenace, mais il est mou et de plus, il présente une faible limite élastique. C'est pour cette raison que dans beaucoup de cas, on l'utilise sous forme d'alliages. Le cuivre est malléable à froid et s'écroute facilement. Il se prête aisément au corroyage, mais son usinage est mauvais. A cause de sa grande ténacité, au cours du travail à froid, on doit procéder à un recuit pour faire cesser l'érouissage, mais on peut également effectuer le travail à chaud de manière que le recuit compense l'érouissage. Un fort retrait rend mauvaises, ses propriétés de fonderie.

Le cuivre se prête bien au brasage et fondage à l'étain. Le cuivre à faible teneur en oxygène est plus élastique, il est le matériau principal de la fabrication des conducteurs de courant. La fluidité du cuivre fondu lui permettrait d'être facilement coulé, mais les soufflures (gaz dissous SO₂, CO₂, ...) inévitables, rendent l'opération difficile. Le cuivre peut être forgé et laminé vers 600°C, mais nécessite des recuits au rouge sombre avec un refroidissement à l'eau.

Caractéristiques	Etat recuit	Etat écroui
Rm (traction) en N/mm ²	210	400
Re en N/mm ²	40	-
Module élasticité : E en N/mm ²	12 500	12 500
Allongement A en %	40	5
Dureté HB	45 à 60	90 à 110