

5.1 PRÉSENTATION

Les cupro-aluminiums contiennent 4 à 14% d'aluminium.

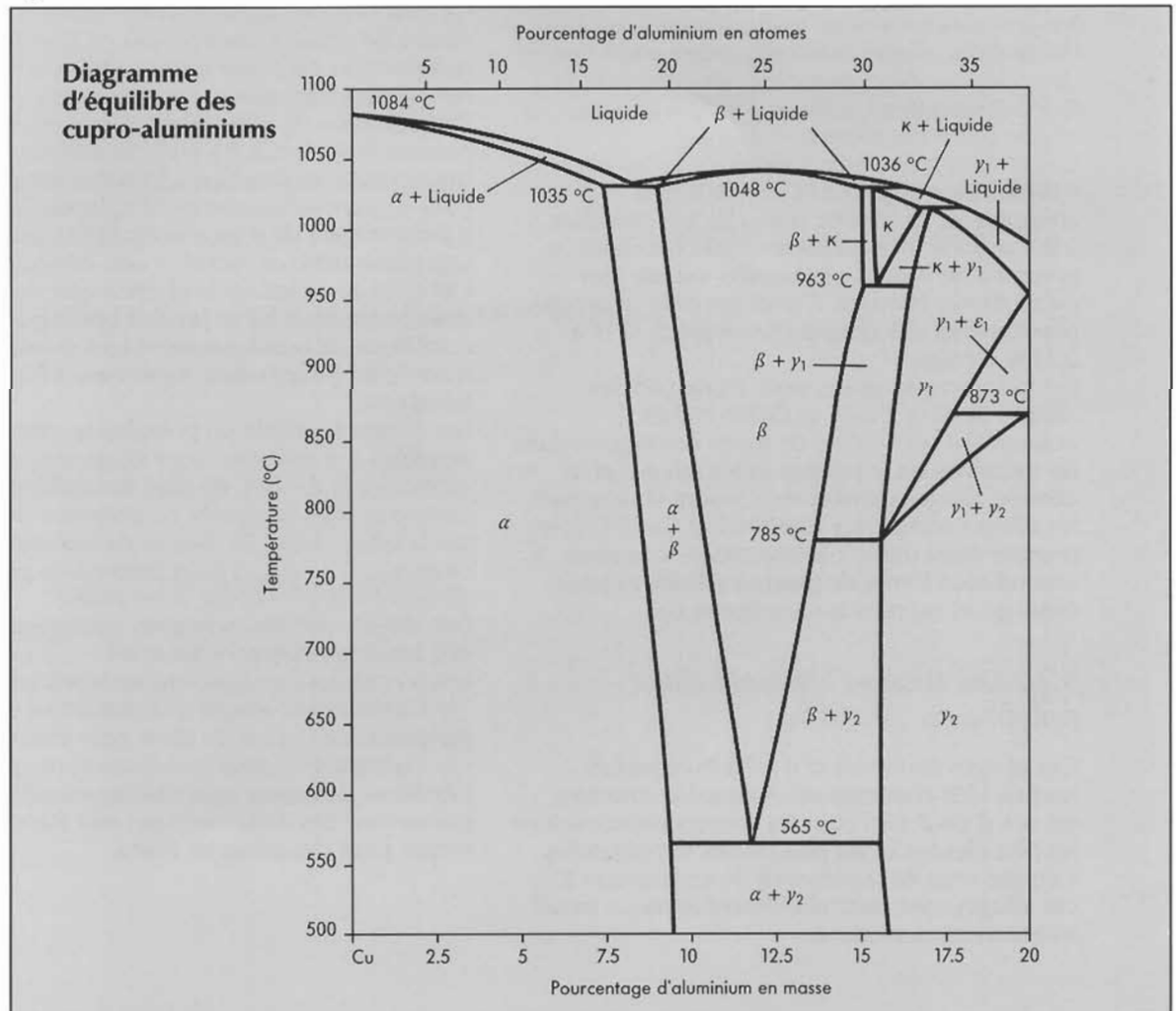
Des additions simultanées ou non de fer, nickel et de manganèse jusqu'à 6%, pour chacun de ces éléments sont couramment effectuées pour améliorer leurs propriétés.

Les cupro-aluminiums sont caractérisés par une résistance élevée aux différentes formes de corrosion marine, érosion, cavitation, corrosion sous tension, fatigue sous corrosion, alliée à des caractéristiques mécaniques qui, pour certaines compositions, sont du même ordre que celles des aciers de construction.

Ces alliages ont également une bonne tenue dans de nombreux milieux chimiques, sauf en présence d'acides oxydants.

Le diagramme d'équilibre, représenté en figure 21, montre que les alliages binaires cuivre-aluminium sont constitués, à température ambiante et à l'équilibre d'une phase unique α de 0 à 9,4% d'aluminium et d'un mélange de deux phases $\alpha + \gamma_2$ de 9,4 à 16,2% d'aluminium. Mais en pratique l'équilibre indiqué par le diagramme n'est pas atteint et les alliages industriels ne sont monophasés que pour une teneur en aluminium inférieure à 8%. Au-delà de cette teneur on observe des phases métastables comme β_1 , β' , β'' , γ' (ces trois dernières martensitiques), issues de la phase β stable à chaud. Les cupro-aluminiums sont définis par les normes NF A 51-102 (tubes), NF A 51-113 (laminés), NF A 51-116 (barres) et NF A 53-709 (produits moulés).

Figure 21



5.2 LES CUPRO-ALUMINIUMS DE CORROYAGE

5.2.1 Les alliages monophasés (Al < 8 %)

Ces alliages contiennent 4 à 8 % d'aluminium et sont monophasés α .

Les additions les plus courantes, dans le cas des alliages complexes, sont celles de fer (2 %) ou de nickel (2 %) destinées essentiellement à augmenter les caractéristiques mécaniques. Particulièrement adaptés au travail à froid ces alliages permettent la réalisation de laminés et tubes dont les caractéristiques relevées par l'écroutissage sont supérieures à celles des laitons. Le travail à chaud et le soudage ne sont possibles que si les impuretés (Pb, Si...) sont strictement contrôlées. La tenue à la corrosion atmosphérique de ces alliages est bonne et ils présentent une belle couleur or.

Vis-à-vis des eaux et en particulier de l'eau de mer, ces alliages résistent bien au phénomène de corrosion sélective appelé désaluminisation (§ 5-2-2) qui atteint la phase β ou ses dérivés, absents dans ces alliages.

Ces alliages sont moins sensibles que les laitons à la corrosion sous contrainte en milieu ammoniacal. Ils sont en revanche très sensibles à la corrosion intergranulaire sous contrainte en présence de vapeur surchauffée, eau de mer ou saumures chaudes. On utilise, pour éviter ce phénomène, des alliages contenant de 0,15 à 0,35 % d'étain.

Les nuances principales sont, d'une part, les alliages binaires CuAl6 et CuAl8 utilisés notamment sous forme de tubes échangeurs dans les industries de la potasse et les salines, et comme alliages monétaires. Ce sont d'autre part les alliages complexes CuAl6Ni2 et CuAl7Fe2, le premier étant utilisé comme alliage monétaire, le second sous forme de plaques tubulaires pour échangeurs ou dans la chaudronnerie.

5.2.2 Les alliages biphasés ou polyphasés (Al > 8 %)

Ces alliages contiennent 8 à 9,5 % et parfois jusqu'à 10 % d'aluminium. A chaud la structure est $\alpha + \beta$ ou β seul pour les teneurs en aluminium les plus élevées et les plus hautes températures. Compte tenu de la présence de cette phase β , ces alliages sont particulièrement aptes au travail à chaud et à la soudure.

A la température ambiante la structure dépend du mode de refroidissement : pour des vitesses de refroidissement très lentes β se transforme en dessous de 565 °C en eutectoïde $\alpha + \gamma_2$; si le refroidissement est plus rapide, ce qui est le cas en pratique, apparaissent, en plus, d'autres phases métastables dérivées de β . La plupart de ces phases augmentent, comme γ_2 , la dureté et la fragilité de l'alliage. Elles limitent donc l'aptitude au travail à froid.

Les additions les plus courantes, simultanées ou non, sont, dans les alliages complexes, Ni, Fe et Mn, cela jusqu'à 6 % pour chacun de ces éléments. Le fer est l'élément qui relève le plus les caractéristiques mécaniques. Le manganèse relève également ces caractéristiques mais il améliore de plus le comportement à chaud de l'alliage et sa soudabilité. Le nickel augmente la solubilité du fer ; il est essentiellement introduit pour éliminer le phénomène de désaluminisation. Ce phénomène consiste en une dissolution du réseau de phase γ_2 ou dérivées de β , suivie d'une redéposition de cuivre poreux sans tenue mécanique. L'alliage est donc fragilisé. L'introduction de nickel dans des proportions convenables, Al < (8,2 + Ni/2) %, modifie les transformations de phases. La transformation de β en $\alpha + \gamma_2$ est supprimée et remplacée par la transformation de β en $\alpha + \kappa_{III}$, la phase κ_{III} étant une phase riche en nickel et non désaluminisable. Cet effet du nickel sur le phénomène de désaluminisation ne se produit que dans des conditions de refroidissement lent du métal après montée en température supérieure à 700 °C (soudage).

Les alliages biphasés ou polyphasés sont peu sensibles à la corrosion sous contrainte en milieu ammoniacal. Ils sont, de plus, insensibles à la corrosion sous contrainte en présence de vapeur surchauffée, d'eau de mer ou de saumures chaudes. L'addition d'étain préconisée pour les alliages monophasés est donc inutile.

Ces alliages ont des structures analogues à celles des aciers (austénite, martensite).

Les principales nuances sont les suivantes :

- le CuAl9Ni3Fe2 adapté à la réalisation de plaques tubulaires et de tôles pour chaudronnerie.
- le CuAl9Ni5Fe3 pour la réalisation de plaques tubulaires de hautes caractéristiques mécaniques permettant des dudgeonnages très étanches, même pour des tubes en titane.

5.2.3 Les alliages à mémoire de forme

Parmi les alliages de cuivre contenant de 4 à 10% d'aluminium et susceptibles de transformation martensitique, il existe des alliages de type CuZnAl, CuZnAlNi et CuAlNi qui ont la propriété de retrouver, après application d'une contrainte impliquant une déformation à une certaine température, leur forme initiale avant contrainte, par réchauffage à une température caractéristique de chaque alliage.

Ces alliages, dont le développement est encore récent, ont trouvé un certain nombre d'applications notamment dans le domaine de la connectique.

Ils sont caractérisés par la grande précision de la teneur de chacun des composants : en effet, une variation de l'ordre de 0,1% d'un des constituants d'un alliage à mémoire de forme peut entraîner une différence de plus de dix degrés sur la température de transformation martensite-austénite qui est à l'origine du mécanisme de mémorisation de forme.

On distingue :

- l'effet de mémoire simple qui caractérise la propriété que possède une pièce, déformée par application d'une contrainte, de retrouver sa forme initiale par simple réchauffage (transformation martensite en β). Toutefois un abaissement de la température (transformation β en martensite) ne permet pas de retrouver la forme d'origine.
- l'effet de mémoire réversible qui permet, après un traitement convenable dit "d'éducation", de créer des allers et retours multiples entre deux formes par simple changement de température et donc changement de structure.

5.3 LES CUPRO-ALUMINIUMS DE FONDERIE

Il s'agit de cupro-aluminiums titrant de 8 à 14% d'aluminium et généralement de 9 à 12%. En pratique, ils sont toujours biphasés ou multiphasés et sont de même nature que les alliages de corroyage polyphasés (§ 5.2.2). En particulier les phases en présence sont les mêmes. La teneur en Al, généralement plus élevée, conduit à un pourcentage plus important de phase β et de ses dérivés.

Pour obtenir une bonne résistance à la désaluminisation, il convient de faire une addition de nickel et de pratiquer un refroidissement lent après montée en température.

Les additions de Fe, Ni, Mn sont également utilisées pour relever les caractéristiques mécaniques.

Enfin, ces alliages sont susceptibles de recevoir des traitements thermiques de trempe et revenu qui augmentent leurs caractéristiques mécaniques. L'alliage binaire de base est le CuAl9 à l'état Y30 (moulé en coquille) et Y80 (centrifugation).

Les principaux alliages complexes utilisés en fonderie sont :

- CuAl9Ni3Fe2,
- CuAl10Fe3,
- CuAl10Fe5Ni5,
- CuAl12Fe5Ni5.

Ces alliages trouvent des applications dans la fabrication de pompes, hélices, turbines, boîtes à eau et plaques pour échangeurs.

5.4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES CUPRO-ALUMINIUMS

La diminution de la masse volumique des alliages Cu-Al est quasiment proportionnelle à l'augmentation du taux d'aluminium contenu dans l'alliage.

Les propriétés physiques des principaux cupro-aluminiums sont représentées au tableau suivant :

Propriétés physiques des cupro-aluminiums					
<i>Cupro-aluminiums de corroyage</i>					
	CuAl6	CuAl8	CuAl7 Fe2	CuAl9 Ni3Fe2	CuAl9 Ni5Fe3
Température du liquidus (°C)	1 080	1 045	1 110	1 070	1 070
Température du solidus (°C)	1 050	1 035	1 045	1 050	1 050
Intervalle de solidification (°C)	30	10	65	20	20
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	8,1	7,9	7,9	7,7	7,6
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18	18	17	17	18
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	418	418	418	418	418
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	80	71	65	50	42
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	16	15	13	10	8
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	10	11	13	17	22
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100 °C (10 ⁻³ /°C)	0,9	0,8	0,8	0,5	0,5
<i>Cupro-aluminiums de fonderie</i>					
	CuAl9	CuAl9 Ni3Fe2	CuAl10Fe3	CuAl10 Fe5Ni5	
Température du liquidus (°C)	1 040	1 070	1 090	1 075	
Température du solidus (°C)	1 035	1 050	1 045	1 060	
Intervalle de solidification (°C)	5	20	45	15	
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	7,6	7,7	7,6	7,6	
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18	17	18	17	
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	418	418	418	418	
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	63	50	63	42	
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	13	10	13	8	
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	13	17	13	22	
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100 °C (10 ⁻³ /°C)	0,8	0,5	0,8	0,5	

5.5 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES CUPRO-ALUMINIUMS

5.5.1 Caractéristiques de traction et de dureté

Elles sont fonction :

- de la teneur en éléments d'addition,
- des conditions de refroidissement,
- des traitements thermiques,

- de l'état métallurgique.

Les caractéristiques mécaniques minimales des principaux cupro-aluminiums corroyés et moulés sont données au tableau suivant :

Caractéristiques mécaniques des cupro-aluminiums				
<i>Cupro-aluminiums de corroyage</i>				
Alliage	Etat	Charge de rupture (Mpa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement (A%)
CuAl6	Recuit H 14	310	115	40
		415	165	20
CuAl8	Recuit H 14	345	140	30
		450	170	20
CuAl6Ni2	Recuit H 14	345	140	30
		450	170	20
CuAl7Fe2	Recuit H 14	485	200	35
		530	290	20
CuAl9Ni3Fe2	Recuit	500	180	25
CuAl9Ni5Fe3	Recuit	620	250	10
<i>Cupro-aluminiums de fonderie</i>				
Alliage	Mode d'obtention*	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement (A%)
CuAl9	Y30	500	-	20
	Y80	550	200	15
CuAl9Ni3Fe2	Y20	500	180	18
	Y30	650	250	20
	Y70-80	550	220	20
CuAl10Fe3	Y20	500	180	13
	Y30	650	250	20
	Y70-80	650	200	20
CuAl10Fe5Ni5	Y20	630	250	12
	Y30	650	300	7
	Y70-80	680	300	15
CuAl12Fe5Ni5	Y70-80	750	400	7

* Y20 : moulé en sable, sans traitement thermique - Y30 : moulé en coquille, sans traitement thermique - Y70 : moulé en coulée continue, sans traitement thermique - Y80 : moulé par centrifugation, sans traitement thermique.

5.5.2 Constantes d'élasticité

Le module d'Young E (élasticité de traction) et le module de torsion G (élasticité de cisaillement)

sont donnés pour les cupro-aluminiums de corroyage à l'état recuit et pour les cupro-aluminiums de fonderie obtenus en moule de sable (Y20), dans le tableau suivant :

Constantes d'élasticité des cupro-aluminiums		
<i>Cupro-aluminiums de corroyage</i>		
	Module d'Young (MPa)	Module de torsion (MPa)
CuAl6	126 000	48 000
CuAl8	124 000	47 000
CuAl7Fe2	120 000	45 000
CuAl9Ni3Fe2	120 000	45 000
CuAl9Ni5Fe3	129 000	49 000
<i>Cupro-aluminiums de fonderie</i>		
CuAl9	120 000	45 000
CuAl9Ni3Fe2	120 000	45 000
CuAl10Fe3	120 000	45 000
CuAl10Ni5Fe5	120 000	45 000

Le coefficient de Poisson de ces alliages est voisin de 0,32.

5.6 MISE EN ŒUVRE DES CUPRO-ALUMINIUMS

5.6.1 Le décapage

Le décapage chimique des cupro-aluminiums est une opération difficile en raison de l'insolubilité de l'alumine dans les bains acides classiques, même additionnés d'un agent oxydant. Aussi, on préfère en général au décapage chimique, l'une des solutions suivantes :

- l'utilisation d'atmosphères protectrices, N₂ ou N₂ + H₂ par exemple, qui ont l'avantage de limiter l'oxydation à la formation d'une couche d'alumine très mince.
- l'enlèvement mécanique, à la meule, sur produits épais.
- le décapage mécanique par projection d'abrasifs en milieu sec ou humide.
- laisser les oxydes, comme cela se fait pour des ensembles de chaudronnerie.

Lorsque le décapage chimique est indispensable, il est possible d'utiliser les bains suivants :

- mélange sulfonitrique à 80 °C (10% HNO₃, 1% H₂SO₄) : l'alumine est incomplètement éliminée.

- mélange sulfochromique + acide fluorhydrique : l'alumine est complètement éliminée mais la durée du décapage est longue (1/2 heure environ).
- les pièces de petites dimensions peuvent être traitées au tonneau en bain sulfochromique ou en bain sulfurique avec persulfate de potassium. Ce type de traitement permet l'élimination de l'alumine par action mécano-chimique.

5.6.2 Les traitements thermiques

Les recuits sont effectués entre 500 et 750 °C pour les alliages monophasés, entre 800 et 850 °C pour les alliages polyphasés.

Les températures de travail à chaud, comme le laminage ou le filage, sont comprises entre 800 et 970 °C.

Les recuits de détente, après usinage ou déformations à froid par exemple se font à des températures comprises entre 300 et 400 °C, pendant deux heures environ.

Les alliages polyphasés au nickel doivent être refroidis lentement après traitement thermique afin d'améliorer la tenue à la corrosion marine sans risque de désaluminisation.

5.6.3 L'usinage

Les cupro-aluminiums polyphasés, dont les conditions d'usinage équivalent à celles d'un acier demi-dur, se travaillent plus aisément que les alliages monophasés.

5.6.4 Les méthodes d'assemblage

Les cupro-aluminiums se brasent tous par brasage tendre ou brasage fort sans difficulté.

Tous les cupro-aluminiums y compris les alliages monophasés sont soudables par les procédés classiques à l'exception du soudage au chalumeau. Cependant les alliages biphasés ou polyphasés ($Al \geq 8\%$) permettent d'exécuter les opérations de soudage avec plus de confort.

Les procédés les plus utilisés sont les suivants :

- soudage à l'arc avec électrodes enrobées,
- soudage à l'arc sous argon (TIG ou MIG),
- soudage à la torche avec électrode en graphite et baguette d'apport nue.

Le métal d'apport est généralement de la même nuance que l'alliage de base, avec une teneur en

aluminium légèrement supérieure.

Les assemblages cupro-aluminiums/acier sont exécutés à l'arc.

Enfin les cupro-aluminiums peuvent être soudés par résistance électrique, par points ou à la molette. L'ensemble de ces techniques de soudage doit être mis en œuvre avec certaines précautions qui sont relatives à trois types de problèmes :

- Le risque d'inclusions d'alumine qui peut être évité par l'utilisation d'une atmosphère protectrice efficace.
- L'apparition de criques de retrait dans le métal de base, au moment du refroidissement que l'on évite en réalisant des assemblages qui permettent au retrait de s'effectuer librement et en utilisant des métaux de base et d'apport de bonne pureté.
- La tenue à la corrosion qui peut être moindre dans les zones soudées où sont souvent présentes des contraintes résiduelles. Afin d'éviter un tel risque de corrosion il est nécessaire de faire des additions d'étain dans les alliages monophasés, et, dans le cas des alliages polyphasés au nickel, de veiller au refroidissement lent de l'alliage après soudage.