

4.1 PRÉSENTATION

Le bronze est un alliage de cuivre avec addition d'étain, bien que cette dénomination soit improprement utilisée pour désigner parfois d'autres alliages cuivreux tels que les cupro-aluminiums, les cupro-bérylliums ou les laitons au manganèse.

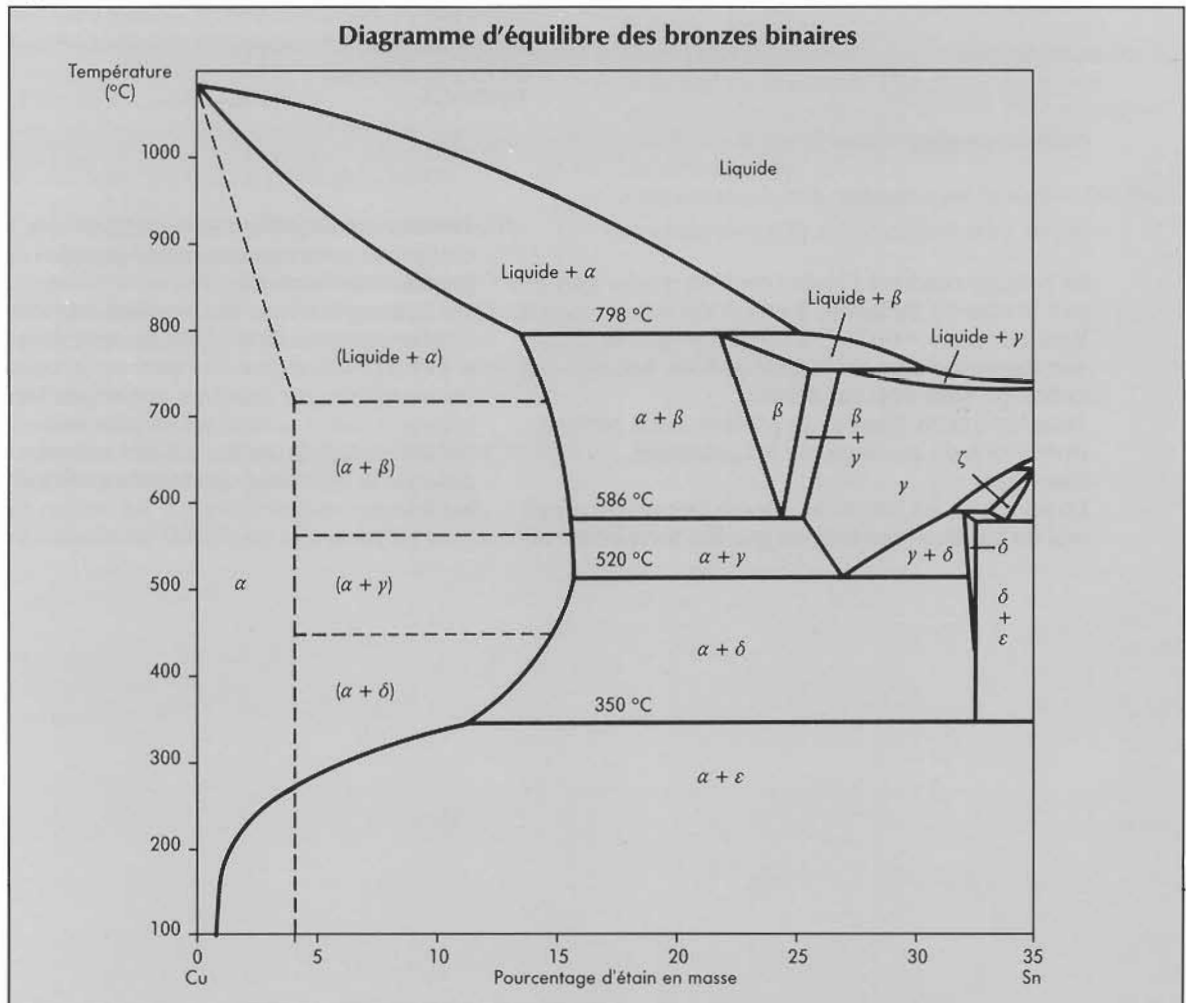
L'appellation bronze est par extension utilisée pour désigner les alliages ternaires cuivre-étain-zinc.

L'élaboration des bronzes se fait généralement par fusion en milieu réducteur ce qui conduit à la désoxydation du métal avant coulée. Cette désoxydation étant effectuée le plus souvent au moyen de phosphore de cuivre, la plupart des bronzes renferment donc une certaine teneur résiduelle en phosphore de l'ordre de 0,03 à 0,1%. La figure 17 représente une partie du diagramme

d'équilibre Cu-Sn relative aux bronzes binaires. Ce diagramme fait apparaître notamment une décomposition eutectoïde de la phase δ en-dessous de 350 °C ainsi qu'un rétrécissement du domaine de la phase α en-dessous de 300 °C. En réalité ces phénomènes ne sont observés qu'après des recuits de plusieurs centaines d'heures et en pratique on n'observe pas la phase ε . Le tracé en trait plein délimite les domaines des phases en équilibre. Les lignes pointillées indiquent les limites pratiques de saturation de la phase α pour les états bruts de coulée (états hors équilibre).

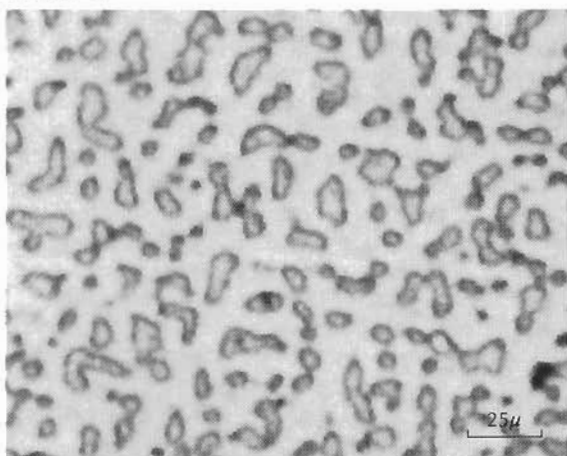
A l'état brut de fonderie, les bronzes ne sont donc constitués de phases α que pour une teneur en Sn inférieure à 4%. Au-delà, en raison des ségrégations de fonderie, ils présentent une structure $\alpha + \beta$ qui se transforme au refroidissement en $\alpha + \gamma$ puis en $\alpha + \delta$.

Figure 17



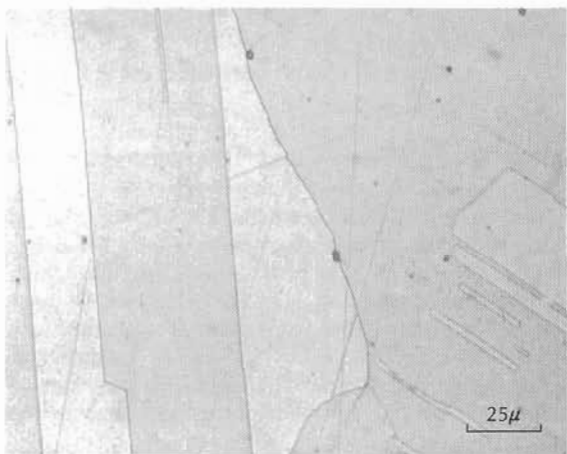
Les photos 18 et 19 illustrent deux types de structures de bronzes à l'état brut de coulée et après traitement d'homogénéisation.

Photo 18



CuSn6P. Brut de coulée continue.
Structure dendritique composée de α et de l'eutectoïde $\alpha + \delta$

Photo 19



CuSn6P.
Structure monophasée α après traitement d'homogénéisation

A l'état corroyé, selon leur teneur en étain et en fonction des conditions de recuit et de la vitesse de refroidissement, les bronzes sont constitués soit d'une solution solide α soit d'un mélange de cette solution et de l'eutectoïde $\alpha + \delta$.

La phase α , riche en cuivre, est malléable à froid. La phase δ est dure et fragile. On cherche donc souvent à l'éliminer par des traitements thermiques d'homogénéisation.

La teneur en étain des alliages industriels est comprise entre 3 et 20 %.

Les bronzes possèdent une excellente résistance à la corrosion, de bonnes propriétés de frottement leur assurant une grande résistance à l'usure et des caractéristiques mécaniques élevées.

En atmosphère industrielle ou marine, la tenue à la corrosion des bronzes est bonne.

Les bronzes sont peu sensibles à la corrosion sous contrainte, en particulier les titres ne contenant pas de zinc.

Vis-à-vis de l'eau de mer, la résistance des bronzes aux différentes formes de corrosion est d'autant meilleure que la teneur en étain est élevée.

Enfin ce type d'alliage est peu sensible à la piqûre.

En outre les bronzes ont une excellente aptitude au moulage ce qui leur vaut un vaste champ d'application dans le domaine de la fonderie.

Les bronzes sont définis par les normes NF A 51-108 (laminés), NF A 51-111 (fils) et NF A 53-707 (produits moulés).

4.2 LES BRONZES DE CORROYAGE

4.2.1 Les bronzes binaires

Les bronzes de corroyage ne peuvent être élaborés qu'en phase α . Ils contiennent la plupart du temps moins de 10% et en pratique entre 2 et 9% d'étain. En effet, aux fortes teneurs en étain les bronzes contiennent la phase δ dure et fragile qui limite les possibilités de déformation. On trouve encore cette phase δ à l'état résiduel dans les bronzes à moins de 10% d'étain. Cette phase δ résiduelle, conséquence des ségrégations de fonderie, doit être éliminée par un traitement d'homogénéisation à 680-780 °C. Ces bronzes sont très difficiles à corroyer à chaud. On préfère généralement utiliser le procédé de coulée continue des fils ou bandes qui permet d'obtenir directement des ébauches de faible section d'excellente qualité métallurgique. Les bronzes de corroyage binaires présentent une bonne aptitude à la déformation à froid et de meilleures caractéristiques mécaniques que le cuivre ou le laiton. Les principales nuances sont CuSn4P, CuSn6P et CuSn9P.

4.2.2 Les bronzes phosphoreux

Ce n'est qu'à des teneurs supérieures à 0,1% que le phosphore a une action sensible sur les propriétés mécaniques des bronzes et qu'il peut être considéré comme un élément d'addition ; au-dessus de 0,1 à 0,2 %, il forme, en effet, avec le cuivre le composé Cu_3P , dur et fragile, qui augmente la dureté et, surtout, améliore les qualités de frottement. La teneur en phosphore dépasse rarement 0,5% (frottements durs). La norme NF A 51-111 impose une teneur maximale de 0,40% de phosphore pour les fils.

4.2.3 Les bronzes au zinc

Il s'agit de cupro-étain avec addition de 4 à 10% de zinc. Dans le métal liquide le zinc agit comme désoxydant et facilite le dégazage du bain. L'addition de zinc a pour effet de diminuer la proportion de phase δ , ce qui améliore la malléabilité de l'alliage mais diminue les qualités de frottement. La substitution partielle de zinc à l'étain permet d'améliorer la conductivité électrique et de réduire le prix de l'alliage tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques. Dans cette catégorie de bronzes, les nuances les plus courantes sont le CuSn3Zn9 et le CuSn5Zn4, connues sous le nom de bronzes chrysocale.

4.2.4 Les bronzes complexes

Il existe des bronzes corroyés comprenant un certain nombre d'autres additions comme le nickel ou le plomb. L'addition de plomb, en particulier, confère au bronze des propriétés d'usinabilité voisines de celles des laitons de décolletage. L'alliage au plomb normalisé est le CuSn4Zn4Pb4.

4.3 LES BRONZES DE FONDERIE

Les bronzes de fonderie contiennent en général de 4 à 13 % d'étain avec le plus souvent des additions de Zn, Pb, Zn et Pb ou encore Zn et P, cette dernière catégorie étant bien adaptée aux pièces de frottement sous forte charge. Aux teneurs plus élevées en Sn les bronzes deviennent de plus en plus fragiles et sont alors réservés à des emplois particuliers comme le bronze à cloches (20 à 25 % Sn) qui présente une remarquable sonorité grâce à la présence de la phase δ .

4.3.1 Les bronzes binaires

Dans les bronzes à deux phases qui constituent le cas général en fonderie, les caractéristiques mécaniques dépendent principalement de la teneur en phase δ . D'une manière générale, la charge de rupture et l'allongement diminuent lorsque la proportion de phase δ augmente, tandis que la limite élastique et la dureté sont notablement relevées.

Les deux nuances principales sont le CuSn8 et le CuSn12. Ces nuances sont caractérisées par leur grande aptitude au moulage, leurs excellentes propriétés de frottement et leurs bonnes caractéristiques mécaniques.

4.3.2 Les bronzes au plomb

Le plomb est insoluble dans les bronzes et s'isole sous forme de globules dont la finesse et l'homogénéité de répartition constituent un important facteur de qualité de ces alliages. Pour les usages ne nécessitant pas de caractéristiques mécaniques particulières, le plomb est ajouté aux bronzes à des teneurs inférieures à 7 %, afin d'améliorer l'aptitude à l'usinage et l'étanchéité des pièces moulées.

Les bronzes renfermant de 6 à 30% de plomb, avec des teneurs en étain adaptées aux conditions de service, permettent de résoudre la majorité des problèmes de frottement doux dans un large domaine de charges et de vitesses.

Pour les teneurs élevées en plomb, la dissémination correcte de cet élément dans le bronze est réalisée soit par l'addition de 1% de nickel, soit par l'emploi de techniques spéciales de coulée, telles que la coulée continue et la coulée centrifuge, dans lesquelles la solidification rapide évite la ségrégation du plomb. Les deux nuances normalisées sont le CuSn10Pb10 et le CuSn5Pb20 qui peuvent chacun contenir jusqu'à 2% de zinc et de nickel.

Ces alliages sont caractérisés par d'excellentes propriétés anti-frottement et sont utilisés pour la fabrication de coussinets.

A noter qu'il existe des alliages binaires cupro-plomb qui possèdent des propriétés de frottement analogues.

4.3.3 Les bronzes au zinc et au plomb

Dans ces alliages, le zinc agit comme désoxydant et améliore la coulabilité ainsi que les caractéristiques mécaniques tandis que le plomb assure l'étanchéité et améliore l'usinabilité. Ces bronzes sont utilisés en robinetterie d'eau sous pression, en robinetterie de vapeur ainsi que pour les pièces qui doivent être étanches au *pétrole* ou à l'*essence*.

Les deux nuances normalisées sont le CuSn5Pb5Zn5 et le CuSn7Pb6Zn4 particulièrement adaptés à la production de pièces étanches.

4.4 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BRONZES

Les bronzes sont de couleur rose lorsque la teneur en étain n'excède pas 5%, ils prennent une teinte or de plus en plus foncée jusqu'à 15% d'étain,

teinte qui pâlit lorsque le taux d'étain croît au-delà de 15%. Le tableau suivant résume les propriétés physiques des principaux bronzes.

Propriétés physiques des bronzes					
<i>Bronzes de corroyage</i>					
	CuSn4P	CuSn6P	CuSn9P	CuSn3 Zn9	CuSn5 Zn4
Température du liquidus (°C)	1 070	1 050	1 020	1 030	1 020
Température du solidus (°C)	950	900	850	925	910
Intervalle de solidification (°C)	120	150	170	105	110
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18	18	18	18	18
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	376	376	376	376	376
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	90	57	54	85	85
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	20	13	12	20	20
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	9	13	14,5	9	9
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100 °C (10 ⁻³ /°C)	1	0,7	0,6	0,8	0,8
<i>Bronzes de fonderie</i>					
	CuSn12	CuSn5 Pb20	CuSn10 Pb10	CuSn5 Pb5Zn5	CuSn7 Pb6Zn4
Température du liquidus (°C)	1 000	930	940	1 010	980
Température du solidus (°C)	820	760	850	855	850
Intervalle de solidification (°C)	180	170	90	155	130
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³)	8,7	9,3	9,3	8,8	8,8
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18	18	18	18	18
Capacité thermique massique à 20 °C (J/(kg.K))	376	376	376	376	376
Conductivité thermique à 20 °C (W/(m.K))	46	46	50	71	59
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS)	10	10	11	15	12
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	17,2	17,2	15,7	11,5	14,4

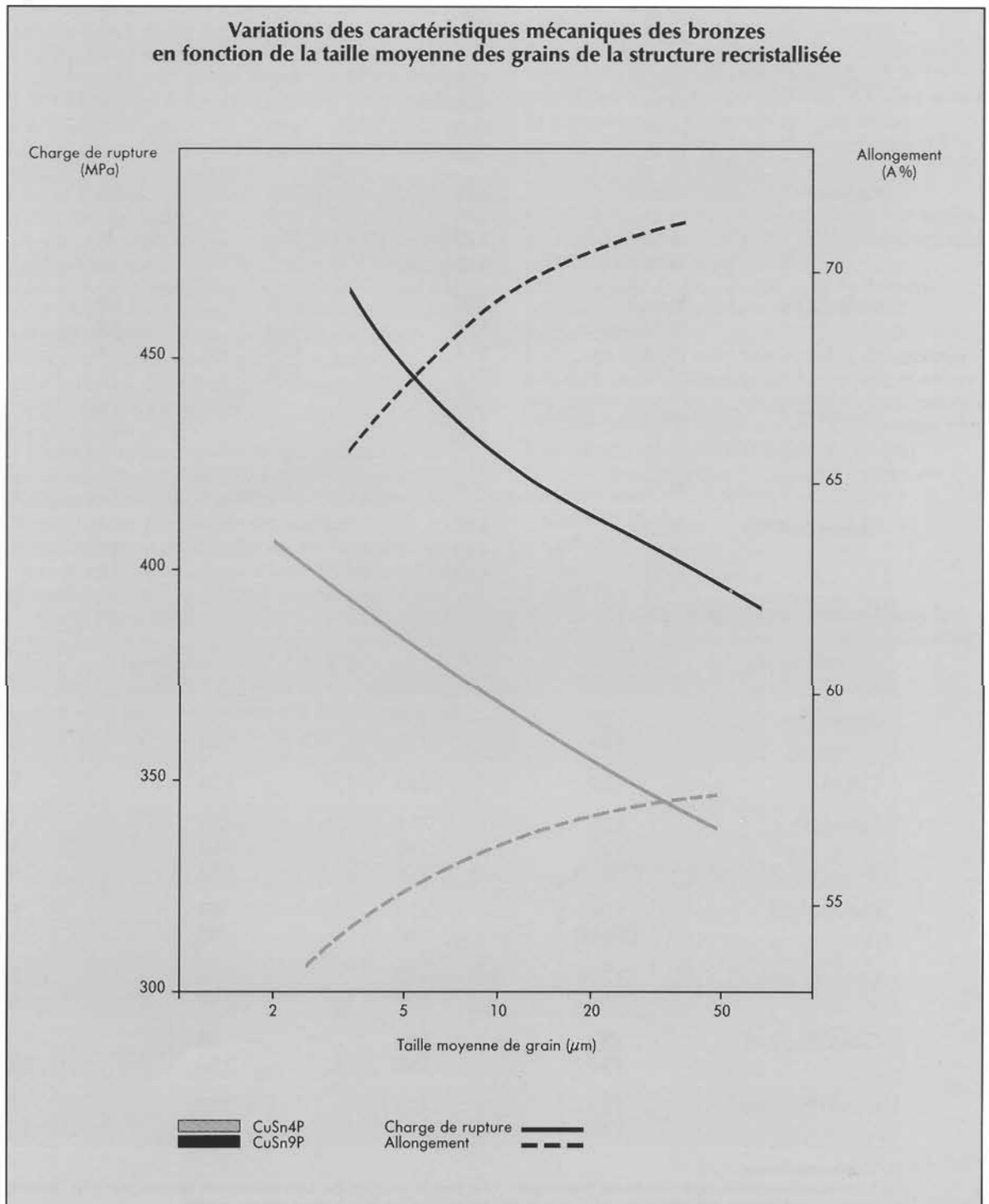
4.5 CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES BRONZES

4.5.1 Caractéristiques de traction et de dureté

Les bronzes monophasés peuvent acquérir par écrouissage (laminage, tréfilage, étirage à froid) des caractéristiques mécaniques relativement élevées. A l'état recuit les caractéristiques mécaniques sont fonction de la taille de grain obtenue comme représenté sur la figure 20. Dans les bronzes à deux phases (pièces de

fonderie), les caractéristiques mécaniques sont trop fortement influencées par la teneur en composé δ , donc par les conditions de refroidissement, pour qu'il soit possible d'indiquer des valeurs précises en fonction de la seule composition. Cependant, les progrès réalisés, tant dans les techniques d'élaboration et de fusion des alliages, que dans les méthodes de moulage, permettent d'obtenir couramment des pièces d'une haute qualité et de caractéristiques suivies.

Figure 20



Les caractéristiques mécaniques moyennes des principaux bronzes corroyés et moulés sont les suivantes :

Caractéristiques mécaniques des bronzes					
Bronzes de corroyage					
	Etat	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement ⁽¹⁾ (A%)	Dureté Vickers
CuSn4P	Recuit	345	180	50	95
	H 12	460	380	30	155
	H 14	600	550	5	190
	H 15	740	710	—	215
CuSn6P	Recuit	375	190	50	105
	H 12	500	400	20	165
	H 14	660	620	5	205
	H 15	770	740	—	235
CuSn9P	Recuit	405	210	50	110
	H 12	570	490	20	180
	H 14	740	730	5	225
	H 15	820	800	—	250
CuSn3Zn9	Recuit	355	180	40	90
	H 12	510	440	15	155
	H 14	645	620	4	205
	H 15	715	690	—	220
CuSn5Zn4	Recuit	355	—	50	95
	H 12	460	—	15	155
	H 14	610	—	5	195
	H 15	680	—	—	220
CuSn4Zn4Pb4	Recuit	345	—	—	90
	H 12	430	—	25	140
	H 14	550	—	3	170
Bronzes de fonderie					
	Mode d'obtention ⁽²⁾	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2 % (MPa)	Allongement (A%)	
CuSn8	Y20	250	130	16	
	Y30	220	130	2	
CuSn12	Y20	240	130	5	
CuSn12P	Y20	240	130	13	
	Y30	240	150	13	
	Y70-80	270	150	15	
CuSn5Pb20	Y20	150	60	5	
	Y70-80	180	80	7	
CuSn10Pb10	Y20	180	80	7	
	Y70-80	220	140	6	
CuSn5Pb5Zn5	Y20	200	90	12	
	Y30	250	100	12	
CuSn7Pb6Zn4	Y20	220	100	12	
	Y30	260	120	12	

(1) Valeurs minimales

(2) Y20: moulé au 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.

4.5.2 Constantes d'élasticité

Le module d'Young E (élasticité de traction) et le module de torsion G (élasticité de cisaillement) sont donnés pour les bronzes de corroyage à l'état recuit et pour les bronzes de fonderie obtenus en moule de sable (Y20), dans le tableau suivant :

Constantes d'élasticité des bronzes		
	Module d'Young (MPa)	Module de torsion (MPa)
<i>Bronzes de corroyage</i>		
CuSn4P	122 000	45 000
CuSn6P	118 000	44 000
CuSn9P	108 000	40 000
CuSn3Zn9	112 000	41 000
CuSn5Zn4	112 000	41 000
<i>Bronzes de fonderie</i>		
CuSn12P	105 000	39 000
CuSn5Pb20	75 000	28 000
CuSn10Pb10	75 000	28 000
CuSn5Pb5Zn5	100 000	37 000
CuSn7Pb6Zn4	100 000	37 000

Le coefficient de Poisson pour ces alliages est voisin de 0,35.

4.6 MISE EN ŒUVRE DES BRONZES

4.6.1 Le décapage

L'opération de décapage est une opération particulièrement importante car l'oxyde stannique formé lors des recuits oxydants est abrasif et susceptible d'user les outils de découpe.

Le décapage est généralement effectué, comme pour le cuivre, à l'aide d'acide sulfurique dilué. Les oxydes d'étain, difficilement solubles dans l'acide, sont en partie éliminés sous forme de boues. Les oxydes résiduels peuvent être complètement éliminés si nécessaire par un décapage complémentaire dans un bain acide oxydant (par exemple $H_2SO_4 + H_2O_2$ ou un bain sulfochromique) qui permet en outre d'éliminer le cuivre pulvérulent.

Un test d'usure, appelé "scroll test", initialement mis au point pour le cupro-béryllium, a été adapté aux bronzes pour évaluer la qualité du décapage : il consiste à faire frotter sur la surface traitée par décapage, avec une pression constante, une bille de dureté donnée ; l'examen au microscope de la surface de la bille révèle ou non l'existence d'une facette traduisant les propriétés abrasives de la surface.

4.6.2 Les traitements thermiques

Les traitements d'homogénéisation sont effectués entre 680 et 780 °C.

Après écrouissage le recuit est pratiqué de 500 à 700 °C.

Les revenus de détente, après usinage ou déformations à froid par exemple se déroulent à des températures comprises entre 200 et 350 °C pendant au moins une heure.

4.6.3 L'usinage

La vitesse d'usinage est influencée par la teneur en phase δ , qui est dure et fragile ainsi que par la teneur en plomb.

L'indice d'usinabilité par rapport au laiton de décolletage CuZn39Pb2, pris comme base 100, est de l'ordre de 20 pour les bronzes sans plomb et peu chargés en phase δ et de 80 pour le bronze CuSn5Pb5Zn5.

4.6.4 Les méthodes d'assemblage

Les bronzes se brasent facilement par brasage tendre. En revanche les assemblages par brasage fort ou soudage sont plus délicats en raison de leur tendance à la fissuration à chaud. Les bronzes à faible et moyenne teneur en étain ($Sn < 8\%$) sont soudables à l'arc.

Les nuances à très bas taux de phosphore peuvent être soudées mais difficilement au chalumeau oxyacétylénique. Les nuances contenant du zinc ou du plomb sont difficilement soudables.

Le soudage par résistance électrique des bronzes est possible en raison de la résistivité importante de ces alliages.