

8/98

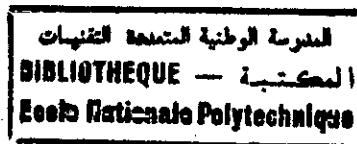
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

École Nationale Polytechnique

Département de Métallurgie

Projet de fin D'études



THEME

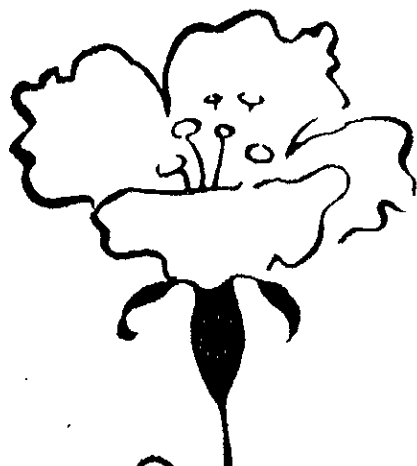
ÉTUDES DES CONDITIONS
D'ÉLABORATION DES ALLIAGES
DE CUIVRE TYPE Cu-Zn

Proposé et dirigé par M^{er} : K. ABADLI

Étudié par M^{er} : ZOUGARI SAAD

Promotion : Septembre 1998

ENP : 10, Avenue HASSAN BADI, EL HARRACH Alger.



Dédicaces

En achevant ce travail, je le dédie à ma mère, mon père, ma grand-mère Aïcha qui ont sacrifié leur vie à mon éducation et mon épanouissement ainsi, qu'à tous mes frères, sœurs et le reste des membres de ma famille.

Je le dédie également à tous les militants (es) de l'Union Nationale des Étudiants Algériens (UNEA) et tous mes amis (es) pour leur générosité et leur confiance.

Saad

REMERCIEMENTS



Je remercie très chaleureusement mon promoteur Monsieur **Abadli** pour le vif intérêt qu'il a accordé à mon projet de fin d'études, durant toutes l'année.

Je tien à remercier Monsieur le président et Messieurs les membres du jury qui ont examiné ce travail.

Je suis reconnaissant à l'ensemble des enseignants de notre département pour leurs contribution à notre formation.

Je remercie également mon collègue **Ait ben hammou Nabil** qui m'a aidé à préparer ce mémoire.

Département de Métallurgie

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Intitulé du Projet : ETUDES DES CONDITIONS D'ELABORATION
DES ALLIAGES DE CUIVRE TYPE Cu-Zn.

ملخص : الهدف من هذه الدراسة هو الوصول إلى التحكم في
معطيات انصهار الفلزات نحاس - زنك. هذه المعطيات هي :
حماية للمولدة الذائبة ، درجة حرارة التفريع والقيمة الفائتة
النتائج المتحصل عليها تثبت أن لهذه المعطيات دور هام
في عملية الانصهار .

Abstract : The aim of this study is to achieve the control of the
melting parameters of Cu-Zn alloys. These parameters
are : Protection of the melting bath, casting temperature
and the material losses during melting. Our results
have shown that these parameters do play an important
role on the melting process.

Résumé : l'objet de cette étude est d'arriver à maîtriser
les paramètres de la fusion des alliages Cu-Zn.
Ces paramètres sont : protection du bain, température de coulée
et les pertes au feu.
Les résultats montrent que ces paramètres jouent un rôle
important sur le procédé de la fusion.

Dirigé par : M^{re} K. ABADLI.....

Présenté par : ZOUGARI... SAAD.....

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....1

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DE ALLIAGES DE CUIVRE

I.1. LE CUIVRE.....	4
I.1.1. Les différentes nuances de cuivre.....	5
I.1.2. Propriétés physiques du cuivre.....	8
I.1.3. Caractéristiques mécaniques du cuivre.....	10
I.1.4. Résistance à la corrosion.....	11
I.1.5. Traitements thermiques.....	12
I.1.6. Influence des éléments étrangers sur les propriétés.....	15
I.2. LES ALLIAGES DE CUIVRE : LAITONS ET BRONZES.....	16
I.2.1. Les laitons.....	16
I.2.2. Les bronzes.....	31
I.3. COMPORTEMENT DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES VIS-À-VIS DE LA CORROSION	39
I.4. ÉLABORATION DES BRONZES ET DES LAITONS.....	40
I.4.1. Généralité.....	40
I.4.2. Fours de fusion.....	41
I.4.3. Creusets.....	43
I.4.4. Paramètre de la fusion.....	44
I.4.5. Règle de la fusion.....	45
I.4.6. Emploi des flux de fusion.....	46

CHAPITRE II : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

II.1. MATÉRIAUX ÉTUDIÉS: ALLIAGE À ÉLABORER.....	49
II.2. CONDITION D'ÉLABORATION.....	49
II.3. ESSAIS DE DURETÉ	53
II.4. CARACTÉRISATION STRUCTURALE.....	53

CHAPITRE III : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

III.1. SCHÉMA DU PROCESSUS DE L'ÉLABORATION.....	56
III.2. CONDITIONS D'ÉLABORATIONS.....	57
III.3. CALCUL DE CHARGE.....	58
III.3.1. Calcul de la quantité des éléments.....	58
III.3.2. Les pertes au feu.....	59
III.4 Conduite de la fusion et de la coulée des laitons.....	60
III. 4.1. Paramètres de la fusion.....	60
III.4.2. Ordre de chargement.....	61
III.4.3. La coulée.....	63
III.5. RÉSULTATS DE L'ÉLABORATION.....	63
III-5.1. Étude des effets des conditions d'élaboration.....	63
III.5.2. Structure des alliages élaborés.....	68
III.5.3. Variation de la dureté des alliages.....	73

CHAPITRE IV : INTERPRÉTATION ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS

IV.1. EFFET DU FLUX DE PROTECTION.....	76
IV.1.1. Effet sur la composition.....	76
IV.1.2. Effet sur les défauts.....	77
IV.2. EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE COULÉE.....	77
IV.2.1. Effet sur la composition en zinc.....	77
IV.2.2. Effet sur la qualité des pièces.....	78
IV.3. EFFET DES PERTES AU FEU.....	78
IV.4. EFFETS CONJUGUÉS DU FLUX DE LA TEMPÉRATURE DE COULÉES ET DES PERTES AUX FEUX.....	78
IV.5. EXPLOITATION DES RÉSULTATS.....	79
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	81
BIBLIOGRAPHIES.....	82

INTRODUCTION GENERALE

Les alliages de cuivre en particulier, les laitons et les bronzes occupent une place de choix dans les différentes branches de l'industrie. Leurs applications couvrent pratiquement tout les domaines de l'industrie parmi lesquels on peut citer :

- Industrie mécanique.
- Industrie électrique.
- Industrie électronique.
- Industrie chimique et pétrochimique.
- Industrie navale.
- Industrie aéronautique.
- Industrie électroménager et ménager.
- Articles de décoration.
- Robinetterie et pompes.

Ces applications sont dues aux qualités remarquables que possèdent ces alliages à savoir.

- Excellentes propriétés de fonderie.
- Aptitude à la déformation qui permet une bonne mise en forme à froid et à chaud par les procédés mécaniques (laminage, forgeage, emboutissage, étirage, ... etc.).
- Bonne résistance à la corrosion ce qui oriente les utilisateurs vers le choix en priorité de certains alliages de laitons et de bronzes (industrie navale, industrie chimique et pétrochimique, hydraulique).
- Bel aspect de surface due a la couleur et à l'état poli.

Parmi les contraintes d'ordre techniques posées par ces alliages, on peut citer la réussite de l'élaboration et la fusion. En effet, la méconnaissance des propriétés des alliages, et le non-respect des températures de la fusion conduisent souvent à des produits de mauvaise qualité et non conformes. Ce qui se traduit à l'échelle industrielle par des rebuts et des pertes de temps c'est à dire un effet sur les coûts de production et sur le rendement.

Afin de contribuer à la maîtrise des opérations de fusion, des alliages type Cu-Zn, nous avons pris en charge une étude sur les conditions d'élaboration de ces alliages.

Les travaux ont été réalisés au laboratoire de métallurgie de E.N.P et au laboratoire des réfractaires de l'Institut National des Matériaux de Construction.

Les résultats de notre travail sont présentés dans ce mémoire qui est structuré de la manière suivante :

- Un premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique des alliages de cuivre.
- Un deuxième chapitre présente la méthode expérimentale utilisée.
- Les résultats expérimentaux sont présentés dans le chapitre III
- Enfin dans un dernier chapitre, nous présentons l'interprétation et l'exploitation des résultats.

I.1. LE CUIVRE :

Introduction :

Le cuivre est un métal d'une belle couleur rouge, mou, ductile et malléable. Il est élaboré par deux procédés :

- Par pyroméallurgie pour les minerais sulfurés, le produit obtenu est appelé blister, il est impur son titre varie de 98 à 99,5% les impuretés sont Zn, Sb, As, Fe, Ni, Sn, Pb,...
- Par hydroméallurgie le produit obtenu sous forme de cathodes très pures et ne nécessite pas d'affinage.

Les anodes de blister subissent un affinage électrolytique dans un bain de CuSO_4 , leur dissolution conduit à un dépôt du cuivre sur les cathodes (cuivre raffiné).

Une partie des impuretés Zn, Fe, Ni, Co, Sn, Pb, restent dans le bain, par contre les métaux nobles Ag, Au et Pt insolubles dans la solution du sulfate de cuivre passent dans les barres, enfin les impuretés Pb, Sb et Te qui peuvent se déposer sur les cathodes seront éliminés ultérieurement.

Après affinage on obtient des cathodes de haute pureté qui peuvent être utilisées directement dans les charges de fonderie.

Ces cathodes ont, toutefois, l'inconvénient de posséder un mauvais état de surface et de contenir des porosités et des inclusions d'électrolyte. Il nécessite donc une refusion dans un four. Le métal est coulé sous forme de lingots de billettes, ...etc.

CHAPITRE I

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES ALLIAGES DE CUIVRE

Cette refusion, conduit à la dissolution d'une quantité tolérable ou non, d'oxygène, ce dernier peut être toléré ou éliminé par un désoxydant. On distingue ainsi trois familles de nuances de cuivre (norme NFA 51-050).

- Cuivre contenant de l'oxygène.
- Cuivre désoxydé avec désoxydant résiduel.
- Cuivre exempt d'oxygène ou désoxydant sans désoxydant résiduel.

I.1.1. Les différentes nuances de cuivre :

On distingue trois principales catégories de cuivre suivant deux critères :

- a. Présence ou non d'oxygène.
- b. Son mode d'élimination.

I.1.1.1. les cuivres contenant de l'oxygène :

Introduit au cours des opérations de fusion et de coulée, l'oxygène est présent à des teneurs de quelques centaines de parties par million (100 ppm=0,01%) et confère au cuivre des caractéristiques et aptitudes particulières. La structure micrographique fait apparaître de petits globules d'oxyde cuivreux Cu_2O , dénommés oxydules.

La présence des particules de Cu_2O tend à réduire légèrement l'aptitude à la déformation à froid du métal, mais seulement dans les cas les plus difficiles tels que le pliage le long des tôles très écrouies.

Les nuances disponibles de cette catégorie dépendent du procédé d'affinage : le procédé électrolytique conduit à la nuance très pur Cu-a₁. Le procédé thermique conduit aux nuances Cu-a₂ et Cu-a₃.

a. Le cuivre électrolytique Cu-a₁ :

Cette qualité a une composition définie par une teneur minimale en cuivre de 99,90% et une conductivité électrique minimale à l'état recuit à 20°C de 100% IACS (International Annealed Copper Standard). Sa résistance est de $1,7241 \cdot 10^{-8}$ Ωm . Cette valeur, qui correspond à une résistance de 0,15328 Ω pour un fil de 1m de long pesant 1g, a été retenu en 1913 par la commission électrotechnique internationale comme étalon de résistivité. La conductivité électrique du cuivre à 100% IACS est de 58 m/(Ωmm^2).

b. Le cuivre thermique Cu-a₂ :

Cette qualité possède les mêmes critères de composition et de conductivité électrique que le Cu-a₁, mais contient plus d'impuretés, notamment celles qui sont nuisibles à la transformation à chaud comme Se, Te, Pb. La désignation ISO de cette nuance est Cu-FRHC (Fire Refired High Conductivity).

c. Le cuivre thermique Cu-a₃ :

Moins pur que le Cu-a₂, cette nuance a une composition minimale en cuivre de 99,85%, la conductivité n'étant pas garantie.

Cette catégorie de cuivre est principalement réservée à l'élaboration d'alliages de fonderie. La désignation ISO équivalente est Cu-FRTP (Fire Refined Tough Pitch).

I.1.1.2. les cuivres désoxydés :

Il s'agit de cuivre affiné électrolytiquement ou thermiquement, la désoxydation du cuivre est obtenue en fonderie par addition du phosphore sous forme de phosphore de cuivre Cu_3P , ce qui a pour conséquence l'élimination de la fragilisation en atmosphère réductrice et donc une bonne soudabilité. Il existe dans cette catégorie, deux nuances dont la teneur minimale garantie en cuivre est de 99,90%.

a. Le cuivre Cu-b₁ (norme ISO Cu-DHP phosphorus0 deoxidised high residual phosphorus) : Il contient de 0,013 à 0,050% (130 à 500 ppm) de phosphore. Sa conductivité électrique se situe entre 70 et 90% IACS. Il est principalement utilisé laminé pour toiture.

b. Le cuivre Cu-b₂ (Cu-DPL) : La teneur en phosphore est de 0,004 à 0,012% (40 à 120 ppm), ce qui permet d'obtenir une conductivité électrique comprise entre 85 et 98% IACS. Ce cuivre représente un compromis conductivité-rétention d'écrouissage qui en fait un matériau souvent utilisé pour la fabrication de supports de composants électriques.

I.1.1.3. les cuivres exempts d'oxygène (OFHC) :

Ces cuivres, affinés par voie électrolytique, sont refondus au four à induction et coulés sous atmosphère inerte ou désoxydée sans désoxydant résiduel. Ils réunissent les avantages des deux catégories précédentes :

Hautes conductivités électrique et thermique et insensibilité aux atmosphères réductrices. Leur résistivité maximale imposée est la même que celle du cuivre Cu-a₁. Il existe deux nuances de cuivre exempt d'oxygène qui se distinguent par leur niveau de pureté.

a. Le cuivre Cu-C₁ (Cu-OF) :

La teneur minimale en cuivre est de 99,95% et la conductivité minimale garantie est de 100% IACS à l'état recuit à 20 °C. Ce cuivre ne se distingue du Cu-a₁ que par l'absence d'oxygène, les autres impuretés se trouvant aux mêmes teneurs moyennes.

b. Le cuivre Cu-C₂ :

Ce cuivre est caractérisé par une teneur minimale de 99,99% de cuivre, soit un total d'impuretés inférieur à 100 ppm et une conductivité minimale de 101% IACS à l'état recuit à 20 °C. Des teneurs maximales sont données pour 10 impuretés.

1.1.2. Propriétés physiques du cuivre :

Le cuivre est le 29^e élément du tableau périodique des éléments. C'est un métal de teinte rouge caractéristique, dont les principales propriétés physiques sont les suivantes :

- Numéro atomique 29.
- Masse atomique 63,5478 (69,1% d'isotope 63 et 30,9% d'isotope 65).
- Réseau cubique à faces centrées de maille $a=3,61 \text{ \AA}$ à 0 °C.
- Coefficient de dilatation thermique linéaire moyen :
 - ◆ Entre 20 et 100 °C : $16,8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.
 - ◆ Entre 20 et 300 °C : $17,7 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.
 - ◆ Entre 20 et 500 °C : $18,6 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

- Température d'ébullition 2578 °C.
- Capacité thermique massique à 20 °C : 385 J/(kg.k).
- Enthalpie de fusion 205000 J/kg.
- Matériau diamagnétique, susceptibilité magnétique : $-8,6 \cdot 10^{-8}$.
- Potentiel normal d'oxydo-réduction :

$$E^\circ(\text{Cu}/\text{Cu}^{2+})=0,340 \text{ v/ENH.}$$

$$E^\circ(\text{Cu}/\text{Cu}^+)=0,521 \text{ v/ENH.}$$

$$E^\circ(\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+})=0,154 \text{ v/ENH.}$$

(ENH : Électrode Normale à Hydrogène).

Les propriétés les plus influencées par la qualité du cuivre sont reportées dans le tableau 1 :

Tableau 1 : Propriétés physiques du cuivre.[1]

	Cu-a ₁ Cu-a ₁	Cu-b ₁	Cu-b ₂	Cu-C ₁	Cu-C ₂
Température de fusion °C	1065 à 1083	1083	1083	1084	1084
Masse volumique à 20 °C (kg/dm ³).	8,89 à 8,92	8,94	8,94	8,94	8,94
Conductivité thermique à 20 °C (w/m.k).	392	328	362	389	392
Conductivité électrique à 20 °C (% IACS).	100	70 à 90	85 à 98	100	101
Résistivité électrique à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m).	1,7	2,2	1,9	1,7	1,7
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100 °C (10 ⁻³ /°C)	3,9	3,1	3,6	3,9	3,9

I.1.3. Caractéristiques mécaniques du cuivre :

Il est caractérisé par sa faible dureté, mais il est malléable facilement et très ductile. Il peut être mis en forme facilement par déformation plastique. A l'état recuit ses propriétés sont mauvaises, mais on peut les améliorer par écrouissage.

Il est aussi mou et ne convient pas à la fabrication d'objets moulés, car il se solidifie rapidement et présente une masse bulleuse et poreuse. Les caractéristiques mécaniques ne dépendent pas de la nuance considérée et très peu de la forme des produits (laminés, tubes, barres...). Elles sont surtout influencées par l'écrouissage et à un degré moindre par la section finale du produit, leurs valeurs moyennes sont les suivantes :

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques du cuivre.[1]

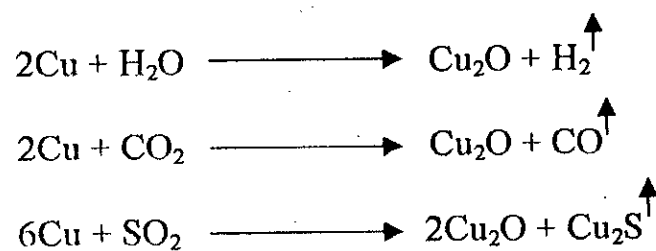
État	Symbole AFNOR	Charge de rupture (MPa).	Limite élastique à 0,2 (MPa).	Allongement (A%).	Dureté Brinell 10/500.	Dureté Vickers.
Recuit	0	230	60	450	45	50
¼ dur	H ₁₁	260	190	25	70	80
½ dur	H ₁₂	300	250	14	90	100
Dur	H ₁₄	350	320	6	100	110
Ressort	H ₁₅	390	360	4	105	115
Super ressort	H ₁₈	460	440	2	120	130
Moulé	-	150	40	25	40	45

-- Les constantes d'élasticité relatives au cuivre sont à 20 °C

- ◆ Module d'Young : E (élasticité de traction).
- ◆ Recuit : 120000 MPa.
- ◆ H_{14} : 125000 MPa.
- ◆ Module de torsion : G (élasticité de cisaillement).
- ◆ Recuit : 45000 MPa.
- ◆ H_{14} : 47000 MPa.
- ◆ Limite de fatigue pour 10^8 cycles :
- ◆ Recuit : 60 à 75 MPa.
- ◆ H_{12} : 90 à 100 MPa.
- ◆ H_{14} : 100 à 130 MPa.
- ◆ Coefficient de poisson : $\nu = 0,33$.

I.1.4. Résistance à la corrosion :

Le cuivre présente une assez bonne résistance à la corrosion. A la température ambiante, il se recouvre à l'air sec d'un film de Cu_2O qui protège la surface. Au chauffage, le cuivre s'oxyde au contact de l'oxygène, pendant la fusion le cuivre chauffé peut réagir avec la vapeur d'eau et de l'air, le gaz carbonique et l'anhydride sulfureux :



Les gaz (CO, H₂, SO₂) peuvent être dissous dans le cuivre fondu et lors de la solidification, ils se dégagent et s'échappent. Ce phénomène est connu sous le nom de « rochag », caractérisé par des soufflures, des boursoufflures et des pores sur toute la pièce de cuivre.

Le cuivre est attaqué par des acides et des chlorures, signalons enfin que l'eau pure est sans action, à n'importe quelle température sur le cuivre, alors que l'eau de mer n'agit que superficiellement.

I.1.5. Traitements thermiques :

Le seul traitement thermique appliqué aux différentes nuances du cuivre est le recuit. Le paramètre du recuit dépendant de la pureté du métal de l'écrouissage et de la durée de maintien en température (figure 1-2), les températures de recuit se situent entre 375 °C et 650 °C. Les nuances Cu-b₁ et Cu-b₂ nécessitant une température de recuit plus élevée (de 50 °C environ) que les cuivres sans phosphore Cu-a₁ et Cu-a₂.

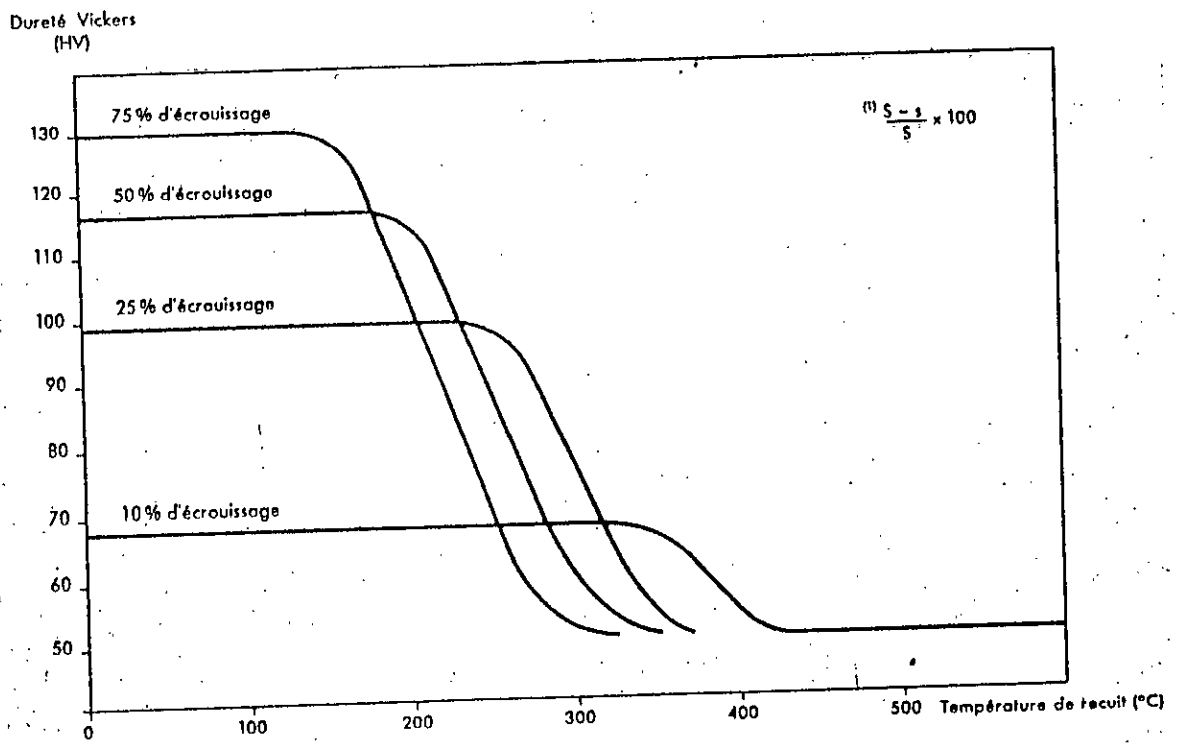


Fig 2 : influence de la température de recuit et du taux d'écrouissage sur la dureté du Cu-a1 pour un recuit d'une heure. [1]

I.1.6. Influence des éléments étrangers sur les propriétés :

Selon le taux des éléments étrangers contenus, on distingue le cuivre allié (ou faiblement allié) et les alliages.

- Si la teneur globale en éléments d'addition est inférieure à 2%, le système Cu-X est un cuivre allié.
- Si la teneur globale en éléments d'addition est supérieure à 2%, le système Cu-X-X' est alors un alliage de cuivre.

L'addition de certains éléments a pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques :

- De résistance (prise d'écrouissage) Cd, Sn, Mg.
- De stabilité mécanique aux hautes températures par des éléments solubles qui tendent à tendre l'adoucissement P, Ag, Sn, Zr, Cd, Mg.
- D'usinage par des éléments qui forment des globules fins et dispersés Te, S, Pb.
- Durcissement structural, Be, Co, ces alliages offrent des qualités.

D'autre part, le durcissement par précipitation remarquable après trempé offre au cuivre des propriétés mécaniques très intéressantes.

I.2. LES ALLIAGES DE CUIVRE : LAITONS ET BRONZES

I.2.1. Les laitons :

Introduction :

Les laitons sont des alliages à base de Cu et de Zn, ils contiennent de 5 à 45% en poids de Zn et, éventuellement, d'autres éléments tels que : Sn, Pb, Mn, Al, Si, Ni, As qui sont ajoutés en faibles proportions, pour améliorer les propriétés des alliages Cu -Zn.

Suivant la teneur en Zn et la présence d'éléments d'additions, les laitons peuvent être moulés et corroyés à chaud et à froid. Les produits de laitons sont :

- Pièces moulées produites de fonderie.
- Profils, barres, tubes, fils, produits de corroyage.

Les laitons présentent une excellente aptitude à la mise en œuvre supérieure à la plus part des alliages industriels par tous les procédés tels que : matriçage, emboutissage, usinage, frappe à froid, usinage... etc.

I.2.1.1. Les laitons binaires :

Les laitons binaires ou simples se sont les alliages Cu-Zn sans d'autres additions, ces alliages sont décrit par le diagramme d'équilibre en figure 3.

D'après ce diagramme les laitons sont constitués dans les conditions d'équilibre d'une seule phase α jusqu'à environ 36% Zn.

Ces alliages ont un intervalle de solidification très étroit et une température de fusion (liquidus) qui décroît de 1084 à 903 °C.

Lorsque le taux de Zn croît jusqu'à 33% ces deux phénomènes entraînent un bon comportement des alliages lors de la coulée. La phase α de structure C.F.C est très malléable à froid, ce qui explique la grande aptitude de ces alliages à la mise en forme par laminage, emboutissage, frappe à froid, repoussage, ... etc.

Lorsque le taux de Zn dépasse 36% et jusqu'à 46% les alliages CuZn sont dans les conditions d'équilibre biphasé $\alpha+\beta'$. La phase β' ordonnée et formée de deux réseaux cubiques simples enchevêtrés se transforme au-dessus de 454 °C en une phase β désordonnée qui cristallise dans le système cubique centré.

La phase β' est dure et fragile, les alliages biphasés se comportent bien à l'usinage à froid et à la mise en œuvre à chaud car la phase β ou de β' est très malléable au-dessus de 500 °C.

- Laitons ayant une teneur inférieure à 20% Zn sont appelés demi-rouge.
- Laitons ayant une teneur comprise entre 25 et 36% Zn ($25 < \%Zn < 36$) possèdent les meilleures propriétés de ductilité et connaissent la gamme d'application la plus large.

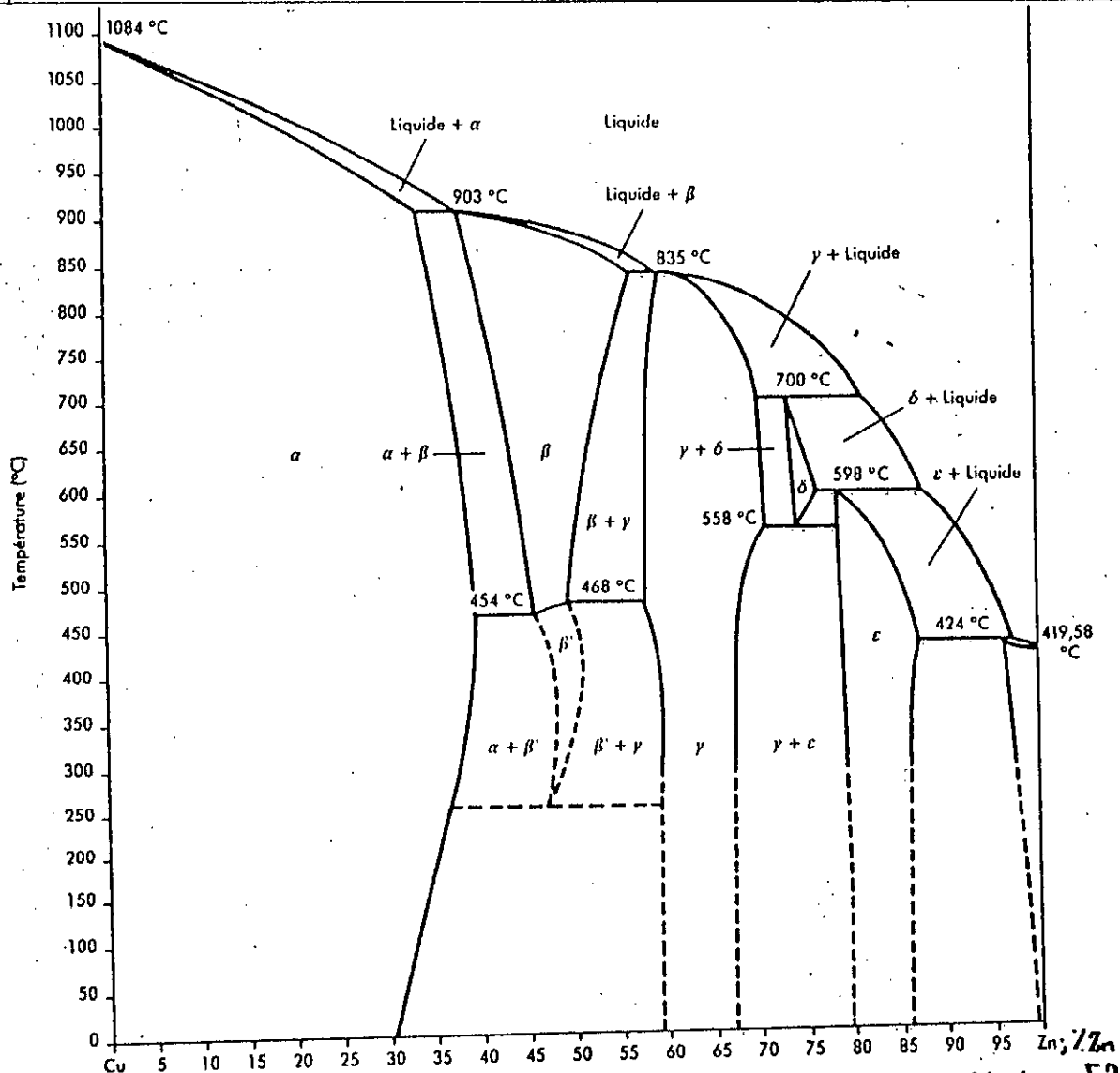


Fig. 3 - Diagramme d'équilibre des laitons binaires [2].

I.2.1.2. Les laitons au Plomb :

Le plomb insoluble se trouve sous forme de globules qui provoquent la fragmentation des coupeaux et diminue le frottement de l'outil sur la pièce. L'aptitude à l'usinage constitue la caractéristique fondamentale des laitons au plomb, à laquelle il est souvent nécessaire d'associer des aptitudes à la déformation à froid ou à chaud. Les laitons au plomb couvrent ainsi une gamme de composition assez large qui va des alliages monophasés α à forte teneur en cuivre de type $\text{CuZn}_{35}\text{Pb}_2$ jusqu'aux alliages biphasés riches en phase β' comme le $\text{CuZn}_{40}\text{Pb}_3$.

Trois compositions de base illustrent l'étendue des caractéristiques des laitons au plomb.

- CuZn₃₅Pb₂

Cet alliage à teneur élevée en cuivre autorise des déformations à froid importantes. C'est un alliage de sertissage et de frappe à froid qui accepte facilement les opérations complémentaires d'usinage.

- CuZn₃₃Pb₂

La structure $\alpha+\beta$ riche en β à température élevée en fait d'abord un alliage de matriçage. A la température ordinaire la structure $\alpha+\beta'$ est voisine de celle de l'alliage CuZn₄₀Pb₃ et permet les opérations d'usinage de finition dans de bonnes conditions.

- CuZn₄₀Pb₃

C'est l'alliage de décolletage par excellence, il permet les usinages de grandes séries à vitesse de coupe élevée. La présence importante de plomb favorise le fonctionnement des coupeaux.

Les laitons au plomb sont définis par des normes NF A51-101 (laminés) et NF A51-105 (barres).

I.2.1.3. Les laitons complexes :

Ce sont des alliages Cu-Zn (laiton simple) avec l'addition des éléments tel que : Ni, Mn, Sn, Al, Cd, Si... etc. Les additions doivent être en faible quantité afin que les éléments soient dissous dans les phases α et β' . Ces additions entraînent deux conséquences :

1. La modification des propriétés intrinsèques des phases dans lesquelles ils entrent en solution.
2. La modification des quantités relatives des phases qui correspondent à la structure biphasée.

Pour mettre en évidence la modification relative des phases du diagramme d'équilibre des laitons biphasés, sous l'effet d'une addition d'autres éléments, on applique la théorie du titre fictif de Guillet. Selon cette théorie, à chaque élément d'addition on attribue une équivalence en Zn. On passera ainsi du titre réel en cuivre %Cu au titre fictif Cu% par application de la formule :

$$\text{Cu}'\% = \text{Cu}\% \frac{100}{100+x(k-1)}$$

- x est la teneur de l'élément d'addition considéré.
- k est le coefficient d'équivalence de l'élément d'addition, il représente le pourcentage de zinc qui a le même effet que l'addition de 1% de cet élément.

Les coefficients d'équivalence des principaux éléments d'addition sont :

Elément	Ni	Co	Pb	Mn	Cd	Fe	Sn	Al	Si
k	-1,2	-1	0	0,5	0,7	0,9	2	6	10

Trois cas possibles :

- $k = 1$ $Cu' \% = Cu \%$ pas de changement.
- $k < 1$ $Cu' \% < Cu \%$ la proportion de α est augmentée, β' diminue, l'alliage est plus ductile et il a une bonne malléabilité à froid.
- $k < 1$ (Si, Al, Sn) la proportion de β' augmente. Bonne aptitude à l'usinage et à la déformation à chaud.

Parmi, les laitons complexes, les plus utilisés, nous citons :

1- $CuZn_{30}As$

Cet alliage possède une bonne résistance à la corrosion en milieu aqueux. La présence d'arsenic est fondamentale pour éviter la dézincification. Il est couramment utilisé dans la fabrication de tubes pour échangeurs en eau douce.

2- $CuZn_{29}Sn_1$ (laiton amirauté)

L'addition de 1% d'étain 70/30 arsénié favorise la formation en service d'un film d'oxyde stannique SnO_2 résistant et protecteur. C'est pour cette raison que la principale application de cet alliage concerne la fabrication de tubes d'échangeurs thermiques et d'évaporateurs en contact avec des eaux acides ou polluées, cependant peu salines.

3- $CuZn_{38}Sn_1$ (naval brass)

Cet alliage est adapté à la fabrication des laminés épais pour plaques d'échangeurs.

4- $CuZn_{22}Al_2$

L'addition d'aluminium aboutit à un meilleur résultat que dans les cas précédents avec une tenue particulièrement bonne à la corrosion érosion. On trouve les mêmes applications dans le domaine des échangeurs thermiques pour utilisation en eau douce ou en eau de mer.

5- $CuZn_{35}Pb_{2,5}As$

Cet alliage destiné au décolletage présente l'intérêt d'être non dézincifiable dans les eaux agressives en raison de sa structure monophasée et de la présence d'arsenic.

Il est utilisé en robinetterie et notamment pour la réalisation de siège de robinet.

6- Les laitons haute résistance

Ce sont des alliages désignés par le symbole $CuZn^+$ le signe + indique la présence de nombreux éléments d'addition destinés à accroître leur résistance mécanique.

Parmi ces alliages, on peut notamment citer les compositions suivantes :

- $CuZn_{37}Mn_2Al_1FePb$.
- $CuZn_{36}Mn_3Al_2SiPb$.

Ces alliages de hautes performances se caractérisent par une charge de rupture qui peut dépasser 600 MPa et une limite élastique qui atteint 300 MPa.

7- Les alliages à mémoire de forme

Les alliages du type CuZnAl et CuZnAlNi entrent dans cette catégorie.

8- Le laiton moulé CuZn₄₀ (Y30 et 40)

Cet alliage qui contient environ 1% d'aluminium et 2% de plomb est le laiton classique de la fonderie en coquille, il constitue l'alliage de base pour la fabrication des pièces de robinetterie fondues.

9- Le laiton moulé CuZn₂₃Al₄ (Y20)

Cette composition caractérisant un alliage de fonderie de haute résistance, la teneur modérée en zinc et la présence d'aluminium et de manganèse (3%) en quantité importante favorise l'obtention de pièces moulées à caractéristiques mécaniques élevées.

I.2.1.4. Propriétés physique des laitons :

La plupart des propriétés physiques des laitons sont influencées par la teneur en zinc. Les additions de plomb, contrairement aux autres éléments d'addition ne modifient pratiquement pas ces propriétés. Les propriétés physiques des principaux laitons sont indiquées sur le tableau (3).

I.2.1.5. Caractéristiques mécaniques des laitons :

La plupart des caractéristiques mécaniques des laitons sont croissantes avec la teneur en zinc, comme illustré en figure (2) puis atteigne leur maximum pour

une teneur en zinc d'environ 30%. Les caractéristiques mécaniques des laitons sont sur le tableau (4).

- Déformabilité à chaud : la teneur en impuretés (notamment Pb et Bi) étant sévèrement limitée. Les laitons α sont très déformables à chaud bien que leur résistance mécanique fasse limiter l'importance des passes de laminage ou des rapports de filage.
- Déformabilité à froid : tous les laitons α renommés pour leur ductilité à froid supportent des réductions de 90% et plus par laminage ou étirage tréfilage et il se prête à des mises en forme par pliage, emboutissage, formage, gravage mécanique (tôles) et forgeage à froid (barres et fils).
- Recuits : l'évaporation du zinc dans les laitons peut devenir sérieuse au-dessus de 650 °C, mais elle est rarement un problème en recuit industriel. Sur tôles épaisses, par exemple de quelques millimètres d'épaisseur l'emploi d'une atmosphère légèrement oxydante réduit fortement cette dézincification et le décapage subséquent complète l'assainissement du produit. Dans ce cas, l'obtention de grains de diamètres 120 à 300 μm environ est accessible car le taux d'écrouissage préalable reste limité. Pour les demi-produits d'épaisseur moyenne ou faible, on utilise généralement une atmosphère neutre ou légèrement réductrice pour limiter ou même supprimer tout décapage éventuel tandis que des traitements en continu de durée très courte ou des recuits statiques à basse température (<500 °C) permettent d'éviter toute perte significative de zinc.

Tableau 3. Propriétés physiques des laitons. [1]

	CuZn ₅	CuZn ₁₀	CuZn ₁₅	CuZn ₂₀	CuZn ₃₀	CuZn ₃₃	CuZn ₃₆	CuZn ₄₀	CuZn ₃₅ Pb ₂	CuZn ₃₉ Pb ₂	CuZn ₄₀ Pb ₃	CuZn ₂₉ Sn ₁	CuZn ₂₂ Al ₂
Température du liquidus (°C)	1065	1045	1025	1000	955	935	930	905	910	895	890	875	1000
Température du solidus (°C)	1050	1020	990	965	915	905	905	900	885	880	875	890	935
Intervalle de solidification (°C)	15	25	35	35	40	30	25	5	25	15	15	85	65
Masse volumique à 20°C (Kg/dm ³)	8,86	8,8	8,75	8,67	8,53	8,5	8,45	8,39	8,51	8,45	8,48	8,53	8,33
Coefficient de dilatation linéaire (10 ⁻⁶ /°C)	18	18	19	19	20	20	21	21	19	20	21	20	20
Capacité thermique massique à 20°C (J/(Kg.k))	376	376	376	376	376	376	376	376	376	376	376	376	376
Conductivité thermique à 20°C (W/(m.k))	234	188	159	138	121	121	121	121	117	117	121	109	100
Conductivité électrique à 20°C (%IACS)	56	44	37	32	28	28	28	28	26	27	28	25	23
Résistivité électrique à 20°C (10 ⁻⁸ Ω.m)	3,1	3,9	4,7	5,4	6,2	6,2	6,2	6,2	6,6	6,4	6,2	6,9	7,5
Coefficient de température de la résistivité de 0 à 100°C (10 ⁻³ /°C)	2,3	1,9	1,6	1,5	1,5	1,6	1,7	2	1,5	1,6	1,8	1,3	1,3

Tableau 4 : caractéristiques mécaniques des laitons. [1]

a- Laitons binaires (valeurs moyennes)					
	État.	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2% (MPa)	Allongement (A %).	Dureté Vickers.
CuZn ₁₀	Recuit	275	100	45	65
	H ₁₁	320	250	25	85
	H ₁₂	370	320	12	105
	H ₁₄	430	380	5	127
CuZn ₃₃	Recuit	340	120	60	80
	H ₁₁	375	280	42	105
	H ₁₂	430	360	22	125
	H ₁₄	525	430	8	150
CuZn ₃₆	Recuit	350	120	60	80
	H ₁₁	375	280	43	105
	H ₁₂	430	350	23	122
	H ₁₄	520	425	8	150
CuZn ₄₀	Recuit	370	160	40	90
	H ₁₁	390	265	30	120
	H ₁₂	440	314	25	135
	H ₁₄	510	440	8	162

b- Laitons complexes moulés (valeurs minimales)					
	Mode d'obtention	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,02% (MPa)	Allongement (A %).	Dureté Brinell 10/3000
CuZn ₄₀	Moulé Y30	340	-	8	-
CuZn ₂₃ Al ₄	Moulé Y20	500	250	8	160

c- Laiton au Plomb (valeurs minimales pour un écrouissage moyen)					
	Diamètre ou épaisseur (D ou e) (mm).	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2% (MPa)	Allongement (A %).	
CuZn ₃₅ Pb ₂	3 ≤ D ou e ≤ 7	450	320	7	
	7 < D ou e ≤ 15	410	300	10	
	15 < D ou e ≤ 30	370	250	18	
CuZn ₃₉ Pb ₂	3 ≤ D ou e ≤ 7	480	350	5	
	7 < D ou e ≤ 15	430	300	8	
	15 < D ou e ≤ 30	380	250	15	
	30 < D ou e ≤ 50	360	200	20	
	50 ≤ D ou e ≤ 80	350	180	25	
CuZn ₄₀ Pb ₃	3 ≤ D ou e ≤ 7	500	370	4	
	7 < D ou e ≤ 15	450	360	6	
	15 < D ou e ≤ 30	400	300	12	
	30 < D ou e ≤ 50	380	250	18	
	50 ≤ D ou e ≤ 80	370	220	22	
d- Laitons complexes corroyés (valeurs moyennes)					
	Etat.	Charge de rupture (MPa)	Limite élastique à 0,2% (MPa)	Allongement (A %).	Dureté Vickers.
CuZn ₂₉ Sn ₁	Recuit	380	180	50	90
	H ₁₁	450	380	20	165
CuZn ₂₂ Al ₂	Recuit	400	200	45	100
	H ₁₁	550	450	20	165

1.2.1.6. Mise en œuvre des laitons :

1. Le décapage :

Le décapage des laitons s'effectue généralement en bain d'acide sulfurique dilué (10 à 15 % en volume d'H₂SO₄ pur dans l'eau) à des températures ne dépassant pas 40 °C. plus le titre en zinc est élevé et plus le risque d'apparition de taches rouges (dépôts locaux de cuivre) est probable. Ces taches peuvent être éliminées en bain sulfochromique (30cm³ d'H₂SO₄ et 130g de CrO₃ dans 1 litre d'eau).

2. Les traitements thermiques :

Les traitements dits «de détente» consistent à chauffer le laiton entre 250 et 325 °C pendant ½ à 2 heures, cette opération a pour but d'éliminer les gradients de contraintes internes qui ont pour origine les déformations subies lors de l'élaboration du laiton corroyé. Cela permet d'éviter les risques de corrosion fissurante, dite «crique saisonnière» qui, en pratique, ne concerne que les laitons contenant plus de 15% de zinc et travaillant dans un milieu agressif spécifique comme l'ammoniaque par exemple.

Les recuits de recristallisation sont réalisés dans un intervalle de températures plus élevées, dont l'étendue et les valeurs extrêmes dépendent de la composition de l'alliage, de la durée du recuit et du taux d'écrouissage. en pratique, les recuits s'opèrent entre 300 et 700 °C.

3. La dézincification des laitons :

Lorsque ce phénomène se produit la zone dézincifiée est remplacée par une masse poreuse de cuivre, qui n'a plus de solidité. Il s'agit non pas d'une attaque sélective du zinc, mais plutôt d'une dissolution simultanée de cuivre et zinc avec redéposition de zinc dans les laitons biphasés, la phase β plus anodique est préférentiellement attaquée, mais α peut l'être éventuellement aussi, dans les laitons α , tout le métal est effectué (généralement moins sévèrement que dans les laitons biphasés).

La dézincification a été pendant longtemps la cause principale de corrosion des laitons par les eaux. Dans les laitons α , elle a maintenant pratiquement disparu grâce à l'introduction d'additions comme l'arsenic (0,03% en masse).

Dans les laitons $\alpha+\beta$ qui sont de toute façon les alliages les plus affectés par ce phénomène, aucune solution parfaite n'a été avancée.

L'introduction de 1% en masse d'étain réduit cependant l'importance du phénomène en eau de mer. Ainsi le laiton Naval Brass (CuZn39Sn1) trouve-t-il des applications marines sous forme de plaques épaisses.

4. Laitons utilisés au contact des eaux :

L'intérêt des laitons réside dans leurs caractéristiques mécaniques plus élevées et surtout dans le fait que la couche protectrice formée au contact des eaux est plus solide que celle du cuivre. Sous forme de tubes, trois nuances monophasées sont essentiellement utilisées :

- CuZn30As
 - CuZn29Sn1As
 - CuZn22Al2As
- } Réservées aux eaux douces
- } convenant aussi pour l'eau de mer

Sous forme de plaques pour échangeurs. Les alliages précédents sont utilisés ainsi que le CuZn39Sn1 qui, bien que biphasé, est moins sujet de dézincification que le CuZn40 et peut convenir pour les produits épais, même en eau de mer.

5. Couples électriques avec les autres métaux :

Dans le couple formé par deux métaux, c'est le métal le moins noble (potentielle plus bas) qui est anodique et subit donc la corrosion galvanique.

Le cuivre est cathodique par rapport à la plupart des autres métaux et alliages industriels. Il en résulte un risque théorique de corrosion accélérée pour ces derniers quand ils sont en liaison électrique avec le cuivre en présence d'un électrolyte constitué d'une solution conductrice ionique acide ou basique (corrosion humide).

Les risques de corrosion galvanique sont considérablement atténués dans plusieurs cas :

- Lorsque les surfaces cathodiques sont négligeables devant les surfaces anodiques.
- Lorsque le milieu dans lequel se trouve le couple galvanique est peu conducteur.
- Lorsque les produits de corrosion insolubles et adhérents permettent la passivation des surfaces anodiques.

6. Corrosion sous contrainte (ou sous tension) :

La cuivre et les alliages cuivreux présentent une résistance à la fatigue sous corrosion peu différente de leur limite de fatigue dans l'air.

Les contraintes peuvent être d'origine interne ou externe. Les contraintes internes sont celles qui résultent soit de la fabrication des produits soit de leur façonnage ultérieur.

Les contraintes extérieures sont celles qui sont appliquées pendant le service, et peuvent être dues, par exemple, à un montage défectueux ou à des dilatations différentielles. Les tensions externes peuvent parfois aussi être périodiques lorsque l'appareil est le siège de vibration, on parlera de fatigue sous corrosion.

Les laitons contenant plus de 20% de Zinc sont des alliages qui sont sensibles à la corrosion sous tension en présence de certains agents agressifs et en particulier en présence d'ammoniaque humide. C'est ce qui a été appelé jadis la crique saisonnière ou encore seacon cracking. Ce terme date d'une époque où l'on pensait que la température était directement en cause et où l'on n'avait pas bien compris que les variations de température ne jouent en fait un rôle qu'en créant des condensations dans lesquelles se concentrent les agents corrosifs de l'atmosphère.

Le principal agent corrosif est l'ammoniaque humide, et il suffit de très peu d'ammoniaque pour provoquer cette corrosion. Le dioxyde de soufre a également la réputation de déclencher ce phénomène.

Pour éviter ce phénomène, il faut éliminer les tensions internes du laiton en fin de fabrication ou après façonnage par un traitement thermique à plus de 300°C.

I.2.2. Les bronzes :

Introduction :

Les bronzes sont les alliages à base de cuivre et d'étain. Les alliages ternaires Cu-Sn-Zn appartiennent aussi à cette famille. L'état des alliages binaire Cu-Sn est représenté par le diagramme d'équilibre (figure 4). A l'état brut les bronzes sont constitués d'une phase α pour un taux en Sn inférieur à 4%. Au-delà de cette composition, les alliages Cu-Sn sont biphasés, ils présentent une structure $\alpha+\beta$ qui se transforme au refroidissement en $\alpha+\delta$.

La phase δ se décompose à 350°C en un mélange eutectoïde $\alpha+\epsilon$.

En réalité cette dernière transformation n'est réalisée qu'après des recuits de plusieurs centaines d'heures et en pratique on n'observe pas la phase ϵ . La teneur en étain des alliages industriels est comprise entre 3 et 20%.

Les alliages renferment moins de 4% Sn sont monophasés (α) et malléables à froid. Les alliages renferment de 4% à 20% Sn sont biphasés ($\alpha+\delta$). La phase δ est dure et fragile. Ces alliages sont plus tenaces.

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. Ces alliages sont aussi peu sensibles à la corrosion sous contraintes, en particulier les titres ne contenant pas de Zinc.

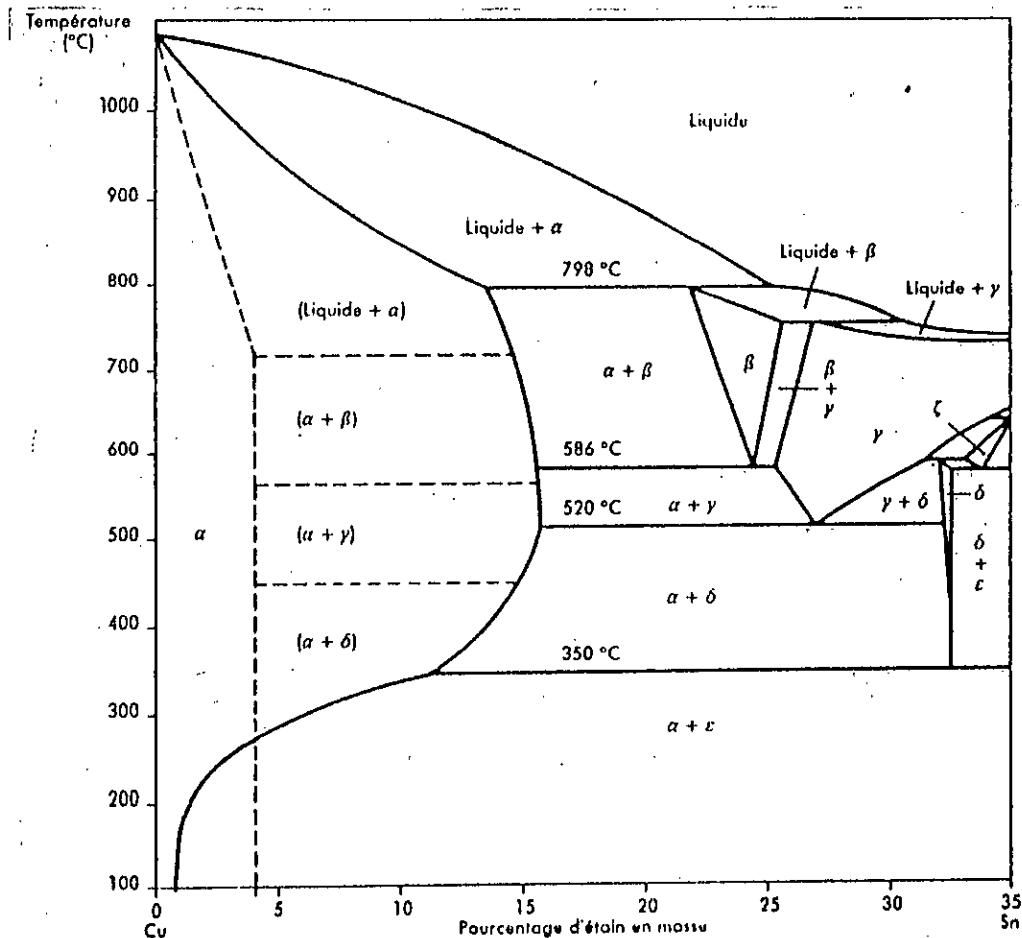


Fig 4 : Diagramme d'équilibre des bronzes binaires. [2]

1.2.2.1. 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 .

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 Cu Sn12. Ces nuances sont caractérisées par leur grande aptitude au moulage, leurs excellentes propriétés de frottement et leurs bonnes caractéristiques mécaniques.

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% à fin 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 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 les excellentes propriétés antifriction et sont utilisés pour la fabrication de coussinets.

3. Les bronzes au zinc et au plomb :

Dans ces alliages, le zinc 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 adoptés à la production de pièces étanches.

1.2.2.2. 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 foncés jusqu'à 15% d'étain teinte qui pâlit lorsque le taux d'étain croit au-delà de 15%. Le tableau 5 résume les propriétés physiques des principaux bronzes.

1.2.2.3. Caractéristiques mécaniques des bronzes :

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 fonctions de la taille de grain obtenue. Dans les bronzes à deux phases (pièces de fonderie), les caractéristiques 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.

Tableau 5 : Propriétés physiques des bronzes. [1]

a- Bronzes de corroyage					
	CuSn ₄ P	CuSn ₆ P	CuSn ₉ P	CuSn ₃ Zn ₉	CuSn ₃ Zn ₄
Température du liquidus (°C)	1070	1050	1020	1030	1020
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

b- Bronzes de fonderie					
	CuSn ₁₂	CuSn ₃ Pb ₂₀	CuSn ₁₀ Pb ₁₀	CuSn ₃ Pb ₃ Zn ₃	CuSn ₇ Pb ₆ Zn ₄
Température du liquidus (°C)	1000	930	940	1010	980
Température du solidus (°C)	820	900	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

Ce pendant, les progrès réalisés tant dans les techniques d'élaboration et de fusion des alliages, qui dans les méthodes de moulage, permettent qualité et de caractéristiques suivies.

Les caractéristiques mécaniques moyennes des principaux bronzes corroyés et moulés sont sur le tableau (6).

Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques des bronzes. [1]

a- Bronzes de corroyage

	État	Charge de rupture (Mpa)	Limite élastique à 0,2% (Mpa)	Allongement (A%)	Pureté Vickers
CuSn ₄ P	Recuit	345	180	50	95
	H12	460	380	30	155
	H14	600	550	5	190
	H15	740	710	-	215
CuSn ₆ P	Recuit	375	190	50	105
	H12	500	400	20	165
	H14	660	620	5	205
	H15	770	740	-	235
CuSn ₉ P	Recuit	405	210	50	110
	H12	570	490	20	180
	H14	740	730	5	225
	H15	820	800	-	250
CuSn ₃ Zn ₉	Recuit	355	180	40	90
	H12	510	440	15	155
	H14	645	620	4	205
	H15	715	690	-	220
CuSn ₅ Zn ₄	Recuit	355	-	50	95
	H12	460	-	15	155
	H14	610	-	5	195
	H15	680	-	-	220
CuSn ₄ Zn ₄ Pb ₄	Recuit	345	-	-	90
	H12	430	-	25	140
	H14	550	-	3	170

b- Bronzes de fonderie

	Mode d'obtention	Charge de rupture (Mpa)	Limite élastique à 0,2% (Mpa)	Allongement (A%)
CuSn ₈	Y20	250	130	16
	Y30	220	130	2
CuSn ₁₂	Y20	240	130	5
CuSn ₁₂ P	Y20	240	130	13
	Y30	240	150	13
	Y70-80	270	150	15
CuSn ₅ Pb ₂₀	Y20	150	60	5
	Y70-80	180	80	7
CuSn ₁₀ Pb ₁₀	Y20	180	80	7
	Y70-80	220	140	6
CuSn ₅ Pb ₅ Zn ₅	Y20	200	90	12
	Y30	250	100	12
CuSn ₇ Pb ₆ Zn ₄	Y20	220	100	12
	Y30	260	120	12

I.2.2.4. Mise en œuvre des bronzes :

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 oxyde résiduels peuvent être complètement éliminés si nécessaire par un décapage complémentaire dans un bain acide oxydant (par exemple H₂SO₄+H₂O 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 cuprobéryllium, 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 taille révèle ou non l'existence d'une facette traduisant les propriétés abrasives de la surface.

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 déformation à froid par exemple se déroulent à des températures comprises entre 200 et 350°C pendant au moins une heure.

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 chargé en phase δ et de 80 pour bronze CuSn5Pb5Zn5.

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 chaude. Les bronzes à faible et moyenne teneur en étain ($\text{Sn} < 8\%$) 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.

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

I.3. COMPORTEMENT DU CUIVRE ET DE SES ALLIAGES VIS-À-VIS DE LA CORROSION :

Le cuivre et ses alliages sont plus nobles que la plupart des autres métaux vis-à-vis des eaux. De ce fait le cuivre est par nature peu réactif. Il se peut réduire l'hydrogène de l'eau, et ne se corrode donc en principe que dans les eaux aérées, la réaction cathodique étant alors la réduction en ion OH^- de l'oxygène dissous.

Mais cette corrosion en présence d'oxygène dissous, loin d'être nuisible est au contraire essentielle, dans la mesure où elle permet la formation sur le métal d'une couche isolante de produits de corrosion (oxydes, carbonates, etc) qui protège le cuivre de toute attaque ultérieure.

En pratique, le bon comportement du cuivre et de ses alliages dépend, pour une part très importante de la formation et de la bonne tenue de ce film continu et protecteur de produits insolubles de corrosion.

Beaucoup d'alliages de cuivre sont encore plus résistants à la corrosion que le cuivre lui-même, cela étant dû soit à l'addition d'éléments eux-mêmes résistants à la corrosion comme le nickel et l'étain, soit à l'addition d'éléments comme l'aluminium qui participe à la formation du film protecteur.

Le tableau (7) donne les vitesses de corrosion atmosphériques (corrosion sèche) du cuivre et de ses principaux alliages. Ces vitesses de corrosion ont été mesurées à New York sur une durée de 20 ans.

Les pertes de poids sont déterminées après nettoyage dans l'acide sulfurique froid ou l'acide chlorhydrique et grattage de la surface avec une brosse. Pour certaines alliages l'aspect pratiquement inchangé de la surface du métal occulte le phénomène de corrosion.

Tableau 7 : Vitesse de corrosion du cuivre et de ses alliages en atmosphère sèche.[1]

Alliages	En mg/dm ² /jour	Alliage	En mg/dm ² /jour
Cu-a1/Cu-b1	0,31	CuSn8P	0,56
CuAl8	0,41	CuNi20Zn5	0,60
CuBi3Mn	0,43	CuNi29Sn1	0,62
CuZn29Sn1	0,47	CuZn30	0,71
CuZn15	0,48	CuZn22Al15Mn3Fe3	2,00

I.4. ÉLABORATION DES BRONZES ET DES LAITONS :

I.4.1. Généralité :

La fusion est l'opération qui consiste à fusionner – rendre liquide- une charge métallique. L'opération se déroule dans un four, elle vise :

- Soit la coulé direct du bain liquide dans des moules.
- Sort à élaborer un alliage à couler.

La coulée consiste à déverser la charge liquide après fusion dans des moules.

L'opération se déroule en trois phases.

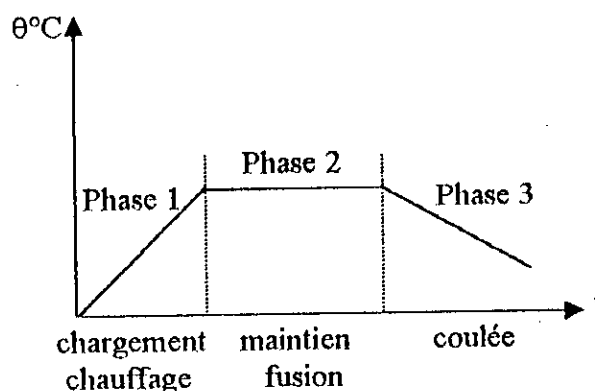


Fig 5 : Cycle d'élaboration d'un alliage.

D'une manière générale, le cuivre et ses alliages dissolvent très facilement les gaz et en particulier l'hydrogène. Il s'ensuit que les opérations de fusion comprennent :

- Une période d'oxydation pour fixer l'hydrogène qui peut être dissout ainsi que le soufre dont l'affinité avec le cuivre est grande (le soufre provient des combustibles solides, liquides ou gazeuse utilisés dans les fours de fusion).
- Une période de réduction des oxydes ainsi formés.
- Une période de l'hydrogène restant.

I.4.2. Fours de fusion :

La fonderie d'alliages cuivreux utilise des fours de types très variés et brûlant des combustibles très divers : coke, houille, gaz, gaz pauvre, bois, huile lourde. Parfois, l'énergie électrique est également mise à contribution.

I.4.2.1. Fours a creuset :

Presque partiellement enfoncé dans le sole, pour des commodités de chargement, d'entretien et de conduite. Il n'y a souvent pas de cheminée, les gaz s'échappent librement à l'air, ainsi que les fumées.

1. Fours potagers : Les plus anciennement employées, simples, consommation de coke élevée. Ils sont enfoncés dans le sol. Ils sont à tirage naturel, soit à foyer soufflé.
2. Fours basculants : La virole en tôle est garnie de réfractaire. Le creuset est fixé à l'intérieur sur un fromage. Le four bascule sur deux tourillons. Fours toujours soufflés.

I.4.2.2 Fours sans creuset :

1. Fours charlier : Cylindre sur tourillons. Horizontal. Les fonds sont démontables. Brûleur à gaz ou à mazout au centre. La porte de chargement est sur le cylindre, coté brûleur. Garnissage, pisé serré sur un mandrin. Métal en contact avec flamme et gaz.
2. Fours à réverbères : Très anciens, utilisés pour les fusions de gros tonnages, monument, cloches, hélices. De forme très compliquée.
3. Reverbère sur tourillons : Petit appareil chauffé au mazout ou au gaz. La cheminée sert de rehausse de chargement. Basculement à l'aide d'un mouvement de poche de fonderie. Intéressant pour les petits tonnages.

I.4.2.3. Fours électrique :

Au contraire du four de sidérurgie, le four électrique pour alliages cuivreux n'a pas un but d'affinage. Il permet seulement une plus grande précision et une plus grande régularité dans les opérations. L'analyse cherchée peut être approchée avec sûreté de très près. La perte au feu est minimum et pratiquement constante d'une opération à l'autre. Bien conduit cet appareil ne revient pas plus cher que les fours à coke. Le développement du four électrique en fonderie d'alliage cuivreux a pris naissance aux États-Unis, à la suite des travaux de recherche et d'essais de bureau des mines de Washington.

1. Fours électriques à creuset : D'abord chauffés par des résistances placées autour du creuset. On a eu de graves inconvénients : fumées abondantes (combustion des résistances) fusion très lente, rendement très bas. Pour augmenter le rendement et ne pas chauffer le réfractaire, on a imaginé des fours à plusieurs creusets. Les résistances ont une durée très courte. Le prix de revient est prohibitif.

2. Fours électriques à sole : Il existe trois types.

- Four à résistance, à radiation.
- Four à Arc.
- Fours à induction.

I.4.3. Creusets :

Dans certains fours, le métal est contenu dans un récipient appelé creuset, chargé de recevoir la charge et de la protéger du contact du combustible si non des gaz.

I.4.3.1. Creusets en terre réfractaire :

Ne sont plus employés pour les alliages cuivreux. Leurs inconvénients étaient trop importants. Constitués par un mélange de sable silico-argileux et d'argile. Ce mélange est placé dans des moules et serré à la presse hydraulique. Le creuset démoulé est légèrement étuvé, pour faire évaporer l'eau d'addition et durcir la terre. Puis, peu à peu, le creuset est chauffé. Avant la mise en service on le sonne, il doit rendre un son clair.

I.4.3.2. Creuset en Plombagine :

Mélange de graphite et d'argile. On doit épurer le graphite de sa chaux et des oxydes métalliques. Ces creusets sont moulés comme les précédents, mais peuvent être cuits plus facilement. Ils doivent être conservés dans des endroits secs. Ces creusets sont moins fragiles que les précédents. Leur mise en service doit être faite avec précaution.

I.4.3.3. Creusets en graphite :

Au lieu d'agglomérer le graphite avec l'argile (agglomérant volumineux et mauvais conducteur), on utilise d'autres agglomérants (Brai). Le graphite beaucoup plus pur conduit mieux la chaleur et le creuset est bien moins fragile. Ce sont les creusets à chauffe extra rapide. Dans la plupart des cas, on peut mettre ces creusets directement en service dans le four ; il suffit de conduire la première fusion avec douceur.

I.4.3.4. Creusets en acier :

Bons conducteurs. Ne craignent pas les différences brusques de température, mais se laissent attaquer et il se dissout du fer dans le métal. Ces creusets sont utilisés couramment pour les fours d'attente de coquilles ou les fours d'attente de machines à couler sous pression. On doit les protéger fréquemment pour diminuer l'attaque de l'acier par l'alliage de cuivre.

I.4.4. Paramètre de la fusion :

Pour une charge de composition donnée les paramètres de la fusion sont :

- 1- La composition et la granulométrie de la charge, la qualité et la quantité de la charge.
- 2- La température de fusion. Elle détermine la température de coulée.
- 3- La température de coulée : Si elle est trop élevée, elle provoque la surchauffe. La structure finale de l'alliage sera à gros grains et fragile.
- 4- La durée de fusion : Elle a les mêmes effets que la température de coulée.
- 5- Les traitements du bain : Pour obtenir un alliage sain.
- 6- L'état du four, du creuset et de l'outillage.

- 7- Le mode de chauffage qui influe sur la qualité des alliages.
- 8- L'atmosphère : Influe sur la qualité de l'alliage (gaz dissout, oxydes, ...)

I.4.5. Règle de la fusion :

1. Préparation et contrôle de la qualité des charges.
 - Éviter les erreurs dans la manipulation des charges.
(Stockage, étiquetage avec composition spécifique).
 - Éviter toutes traces d'humidité, d'oxydation et de corrosion.
2. L'outillage : Utiliser des outils de fusion en acier ou en fonte doit être soigneusement poteyés et préchauffés préférer les creusets en graphite ou en Carborundum si non il faut poteyer et préchauffer le creuset en acier avant l'opération.
3. Contrôle de la température du four : Il faut une bonne régulation. Éviter un maintien à température élevée et éviter la surchauffe, toujours inutile.
4. Utiliser des flux absolument secs. Un étuvage est nécessaire sauf pour les flux contenant de l'hexachlorethane. Utiliser des flux appropriés à l'alliage considéré pour une opération bien définie, et suivant un processus déterminé, à la température et en qualité indiquée.
5. Éviter de perturber le bain (décrassage, introduit des flux, brassage). Sauf si nécessaire car les réactions avec l'air peuvent provoquer un gazage ou une oxydation.
6. Ne charger le métal que dans un creuset chaud.
7. Ne jamais introduire dans le bain d'outil froid (il peut être chargé d'humidité). Risque de projection de bouillonnements, et à coup sûr dissolution de gaz.

8. Protéger le bain dès sa formation, surtout dans le cas des laitons par addition d'un flux de protection.
9. Utiliser les ringards de graphite ou mieux les ringards recouverts d'argile, de préférence à ceux en fer.
10. Couler dès que le four. Ne pas surchauffer à l'excès pour limiter le plus possible l'absorption des gaz.
11. Dans le cas de coulée à la poche, couler dans des poches chaudes.
12. Obtenir un bain liquide parfaitement homogène.
13. Obtenir une surchauffe suffisante pour permettre la bonne venue des pièces et le fonctionnement normal des alimentations.

I.4.6. Emploi des flux de fusion :

Généralement une charge donnée constituée d'un mélange et contenue dans un creuset conduit lors de sa fusion à un alliage qui n'est pas conforme. En effet elle présente, du point de vue chimique et structurale quatre types de problèmes.

1. Elle subit l'oxydation par contact avec l'air des oxydes M_xO_y vont se former et s'introduire dans le bain. Le problème est accru l'affinité des éléments M_i pour l'oxygène est élevée et si leur densité est faible.
2. Elle subit des pertes en éléments légers (Sn, Zn, ...).
3. Elle contient des gaz dissout (H_2 , O_2 , CO) qui proviennent de la charge ou de l'atmosphère.
4. Une mauvaise régulation de la température conduit à une surchauffe

Pour atténuer ou éliminer ces phénomènes on utilise quatre types de flux.

1. Flux de protection : Contre l'oxydation, l'introduction des gaz et fumées, ajouter en début de fusion, forme une couche protectrice en surface.

2. Flux de dégazage : Pour éliminer les gaz H_2 , O_2 , CO introduit au cours de la fusion.
3. Flux de désoxydation pour désoxyder Cu_2O et d'autres oxyde, ajouter enfin de fusion.
4. Flux d'affinage pour régler la finesse du grain.

CHAPITRE II
MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

II.1. MATÉRIAUX ETUDIÉS: ALLIAGE À ÉLABORER :

Les alliages élaborés ont été obtenus par des charges composés d'un alliage mère et du zinc pur.

Les compositions de l'alliage mère et du zinc sont :

- Alliage mère :

Cu 91,27 %

Sn 5,94 %

Zn 0,76 %

Pb 0,86 %

Ni 0,34 %

Reste 0,83 %

- Zn pur : 99,995 %

L'alliage mère sous forme de barreaux cylindriques de diamètre ϕ 20mm a subit un découpage en morceaux de différentes tailles avec une taille maximale de 5mm environ.

Le zinc se présente sous forme de poudre de granulomètre assez grossière entre 1 et 2 mm.

Pour la constitution de la charge nous avons utilisé une balance de précision de marque Mettler à 1/10000 après.

II.2. CONDITION D'ÉLABORATION :

Pour l'élaboration nous avons dans une première étape étudiée et réalisée un four au laboratoire de département de métallurgie de l'ENP.

Après avoir réaliser quelques essais, le four est tombé en panne suite à un court circuit qui a endommagé les résistances. Comme nous avons trouvé des difficultés pour acheter des résistances, nous avons décidé de poursuivre les expériences dans un autre laboratoire (celui de l'Institut National des Matériaux de Constructions situé à Boumerdes).

*** Structure du four réaliser à l'ENP :**

Le schéma de ce four est présenté dans la figure . Les matériaux de construction de four sont :

1- Les résistances :

En Ni, Cr, 80/20 recommandé pour un fonctionnement à 1200°C.

2- La paroi réfractaire :

Pièces moulées de forme en raigile réfractaire à base de silice et d'alumine et contenant respectivement 41,40 % Al_2O_3 et 54,32 % SiO_2

3- La paroi isolante :

Constitue d'un produit appelé perlite sous forme de poudre.

4- Le creuset :

En acier, capacité environ 0,5 litres d'épaisseur 3mm.

5- La sonde :

Nous avons utilisés une sonde type « K ».

6- La régulation :

Le régulateur de marque Kontel alimenté par un relais.

7- La structure métallique :

Elle est constituée d'une tôle d'acier dont une partie a été récupérée d'un ancien four.

- Caractéristique technique du four :

+ Température max : 1200°C

+ Dimension optimales du creuset

$$d_{\max} = 10\text{c}$$

$$h_{\max} = 15\text{cm}$$

+ dimension du four :

$$\phi = 47 \text{ cm}$$

$$H = 50 \text{ cm}$$

+ Puissance : 3,3 KW

* Four utilisé au laboratoire de INMC :

Four à résistance à creuset marque Mecker température maximale 1200°C.
Creuset en graphite. Capacité 250 ml, puissance 2 KW. Le four assure une régulation très précise de la température.

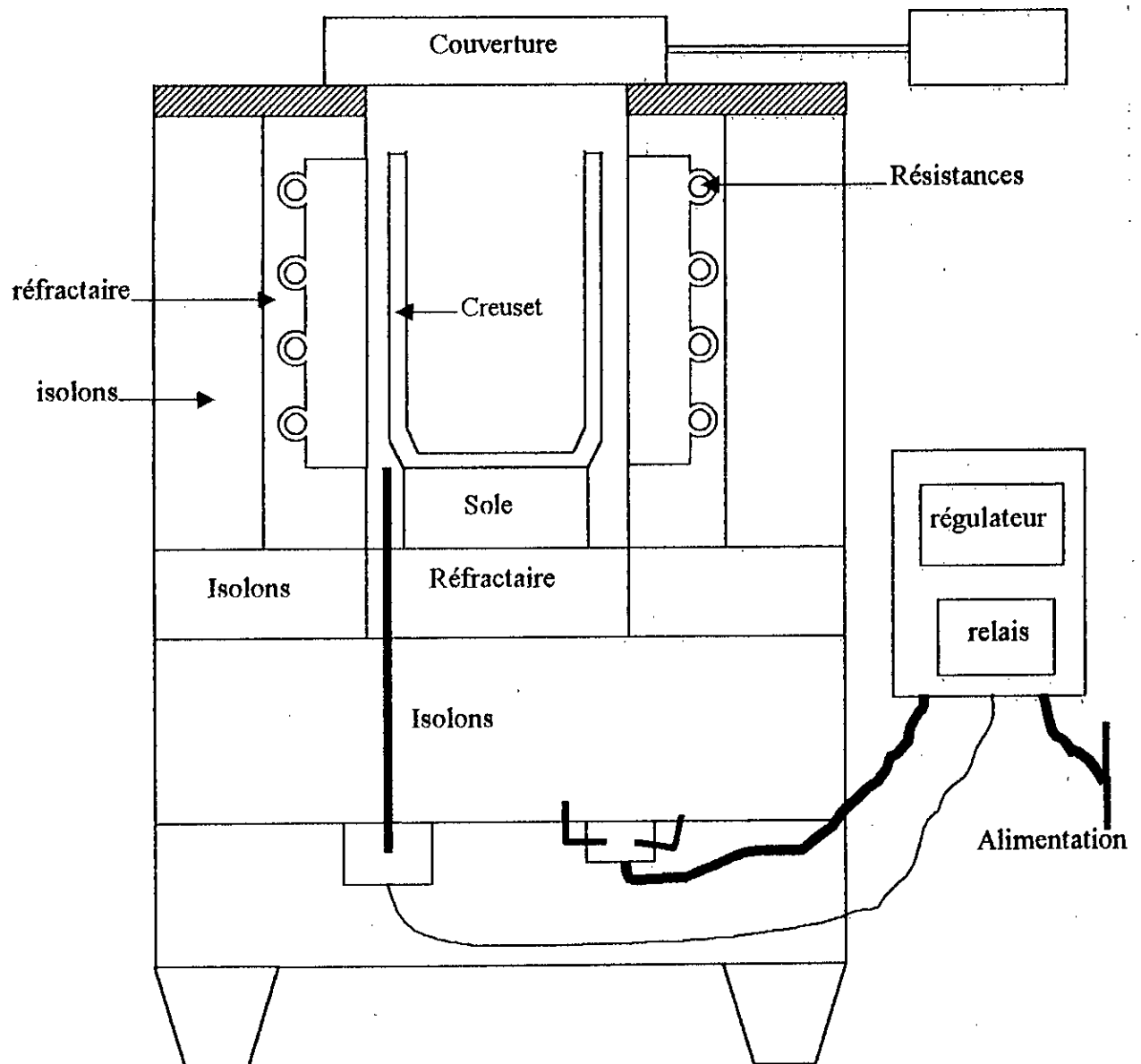


Fig 6 : Four réalisé au département de métallurgie de l'ENP.

Nous avons, avant d'entamer les essais de fusion, procédé au contrôle de la température dans le creuset.

Outillage :

Pour le traitement du bain nous avons utilisé une louche, en acier avant de l'introduire dans le bain, la louche subit un poteyage avec une solution à base de graphite et un chauffage à 600°C.

Pour le prélèvement nous utilisons une deuxième louche identique poteyée et préchauffée.

La coulée se fait dans de petits creuset moules en graphite (forme cylindrique). Le brassage se fait avec une petite louche en acier poteyée et préchauffée à 600°C. Le préchauffage se fait dans un four à chambre, à 600°C.

II.3. ESSAIS DE DURETÉ :

Les essais ont été réalisés à l'aide d'un duromètre de marque Wolpert. Les conditions des essais sont conformes à la norme NF A03-252. Charge 3000 Kgf, diamètre de la bille 10mm.

II.4. CARACTÉRISATION STRUCTURALE :

Les échantillons utilisé pour la caractérisation micrographique ont subit une préparation.

- 1- Tronçonnage, dégrossissage à la moule.
- 2- Rinçage.
- 3- Polissage au papier environ 50cm légère lubrification d'eau. Les papiers utilisés sont : 120, 250, 300 400, 600 et 1000.
- 4- Rinçage et nettoyage aux ultrasons.
- 5- Finition au tissu avec la pâte diamantée et sous lubrification appropriée.
- 6- Nettoyage aux ultrasons.
- 7- Rinçage et attaque chimique. Le réactif d'attaque choisi après plusieurs essais est composé de la manière suivante :

-05 parts d'acide nitrique

-05 parts d'acide acétique

-01 parts d'acide phosphorique

Les conditions de l'attaque sont : durée environ trois seconde, température 25°C.

CHAPITRE III
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

INTRODUCTION :

Dans le but d'obtenir des résultats proches des produits industriels, nous avons appliqué un procédé normal basé sur le respect des températures de coulée de l'application des flux et des durées de fusion.

III.1. SCHEMA DU PROCESSUS DE L'ÉLABORATION :

- 1- Mise en marche du four et fixation de la température de coulée.
- 2- Préparation de la charge découpage des morceaux de l'alliage A. Pesée de la charge.
- 3- Poteyage des louches et préchauffage.
- 4- Chargement d'une couche de flux de protection.
- 5- Chargement de la charge (alliage A).
- 6- Chargement d'une couche de flux.
- 7- Décrassage du laitier.
- 8- Introduction du zinc à l'aide *d'une louche*.
- 9- Brassage soigné et coulé.

Nous avons constaté que la charge devient liquide après 10 à 15 mm environ. La coulée se fait après 5mm de l'introduction du zinc. Le brassage est réalisé par une petite louche potoyée et préchauffée à 600°C.

L'analyse chimique à été réalisé par un spectrographe de masse.

III.2. CONDITIONS D'ÉLABORATIONS :**1- Perte au feu :**

Cu : 0,8 – 1,0 %

Zn : 2 - 3 %

2- Températures de coulée minimales :

Alliage % Zn	5	10	15	20	25	30	35	40
θ_c (°C)	1100	1100	1060	1050	1020	1000	980	950

3- Traitement du bain :

- Flux de protection : poussière de charbon de bois.
- Flux de désoxydation : poudre de zinc (gralunométrie 1-2 mm).

4- Préparation de la charge :

- Pour enlever les couches ternie oxydé et contaminées de la surface. La charge a subi un décapage dans la solution suivante : bain H_2SO_4 à 8% à 50°C.
- Étuvage à 50°C de la charge de l'alliage mère.
- La pesée des charges.
- Le chargement dans le creuset lorsque celui-ci est au rouge.

III.3. CALCUL DE CHARGE :

Nous voulons constituer un alliage A de masse M et de composition a en Cu, b en Zn, c en Sn. A partir de trois alliages.

A₁ de masse M₁ de composition a₁, b₁, c₁.

A₂ de masse M₂ de composition a₂, b₂, c₂.

A₃ de masse M₃ de composition a₃, b₃, c₃.

La solution de ce problème est comme suit :

La conservation de la matière permet d'écrire

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \dots \dots \dots (1)$$

Avec $M_1 = xM \dots \dots \dots (2)$

$$M_2 = yM \dots \dots \dots (3)$$

$$M_3 = zM \dots \dots \dots (4)$$

x, y, z étant respectivement les fraction massiques des alliages A_i avec x+y+z = 1.

III.3.1. Calcul de la quantité des éléments :

- Dans l'alliage A :

$$A_{Cu} = \frac{a}{100} M \dots \dots \dots (5)$$

- Dans les alliages A₁, A₂ et A₃ les quantités de cuivre sont respectivement :

$$\frac{a_1 M_1}{100}, \frac{a_2 M_2}{100} \text{ et } \frac{a_3 M_3}{100}$$

La conservation en cuivre permet d'écrire

$$(m_{\text{Cu}})_A = (m_{\text{Cu}})_{A_1} + (m_{\text{Cu}})_{A_2} + (m_{\text{Cu}})_{A_3}$$

donc
$$\frac{a}{100} M = \frac{a_1}{100} M_1 + \frac{a_2}{100} M_2 + \frac{a_3}{100} M_3$$

$$aM = a_1xM + a_2yM + a_3zM$$

et en fin
$$\boxed{a = a_1x + a_2y + a_3z} \dots\dots\dots(6)$$

La même chose pour Zn et Sn

$$\boxed{b = b_1x + b_2y + b_3z} \dots\dots\dots(7)$$

$$\boxed{c = c_1x + c_2y + c_3z} \dots\dots\dots(8)$$

On obtient un système de 3 équations à 3 inconnus x, y et z. La solution du système permet de calculer les quantités des alliages A₁, A₂ et A₃.

$$M_1 = xM$$

$$M_2 = yM$$

$$M_3 = zM$$

III.3.2. Les pertes au feu :

La consultation bibliographique et des revus spécialisées nous permis de fixer les pertes au feu en Cu, Zn et Sn. Ces pertes sont :

Cu perte : 0,75%

Zn perte : 3,5 %

Sn perte : 2%

Soit « a » la valeur théorique du pourcentage final à obtenir en cuivre et Δa les pertes au feu. La valeur réelle a utilisée est $a' = a + \Delta a$

Exp : On vise un alliage a 86% Cu, 2% Zn et 8%Sn.

Quantité visée en Cu : $a = 0,86$

Quantité réelle en Cu : $a' = 0,86 + (0,75/100) = 0,8675 \rightarrow (86,75\%)$.

Quantité visée en Zn : $b = 0,02$

Quantité réelle en Zn : $b' = 0,02 + (3,5/100) = 0,055 \rightarrow (5,5\%)$.

Quantité visée en Sn : $c = 0,08$

Quantité réelle en Sn : $c' = 0,08 + 0,02 = 0,1 \rightarrow (10\%)$.

Donc la charge a introduire dans le creuset doit avoir la composante suivante c'est-à-dire :

86,75% Cu, 5,5% Zn et 10% Sn

III.4 Conduite de la fusion et de la coulée des laitons :

III. 4.1. Paramètres de la fusion :

1- Température du four :

La température de coulée doit se situer entre 950 et 1150°C selon la composition de l'alliage.

2- La durée de la fusion :

Elle doit être aussi faible que possible afin d'éviter les phénomènes d'oxydation de surchauffe et de la dissolution de gaz.

3- Charges :

a) d'alliages mères en petits «lingots» de composition déterminées. Ces alliages sont bien stokes pour éviter l'humidité et la contamination.

- b) Les additions en zinc, étain et plomb. Sous forme de petits morceaux ou granules, bien emballées dans des sacs, boîtes,...

4- Les flux :

- a) Flux de protection : On utilise à l'échelle industrielle plusieurs types de flux, charbon de bois. Parfois mélangé à des sables boulés.
- b) Flux de dégazage : une petite addition de l'aluminium (1%) permet un dégazage et une protection du bain par la formation d'une couche protectrice de Al_2O_3 .
- c) Flux de désoxydation : On utilise généralement le phosphore de cuivre Cu_3P . Le zinc ajouté en fin de fusion est un désoxydant efficace.

III.4.2. Ordre de chargement :

- 1- fixer la composition de l'alliage à élaborer, la température de couler et la durée de la fusion.
- 2- préparation des charges selon l'alliage visé et tenant compte des pertes au feu. On utilise d'abord les alliages mères et les métaux à température de fusion élevée, préparation des additions.
- 3- préparation des différents flux.
- 4- poteyage du creuset en acier et des outils de fusion et de coulée, appliqués sur la surface.
- 5- mise en marche du four et régulation de la bonne température.
- 6- dès que le creuset est chauffé au rouge procéder au chargement. L'ordre de chargement doit se faire de la manière suivante :
 - Une partie du flux de protection : charbon de bois.
 - Quelques jets de petites dimensions pour garnir avant agencement le fond étroit du creuset et par leurs multiples point de contact avec la paroi chaude facilitent la formation du bain.

Ils évitent en même temps les chocs thermiques brutaux et le coincement des lingots dans le creuset.

- chargement des lingots et des morceaux importants en évitant de les tombés brutalement au fond du creuset et en évitant de les ranger trop serrés car lors de leur dilations peuvent coincer et exercer pression importante sur les parois du creuset causant la déformation et la rupture.

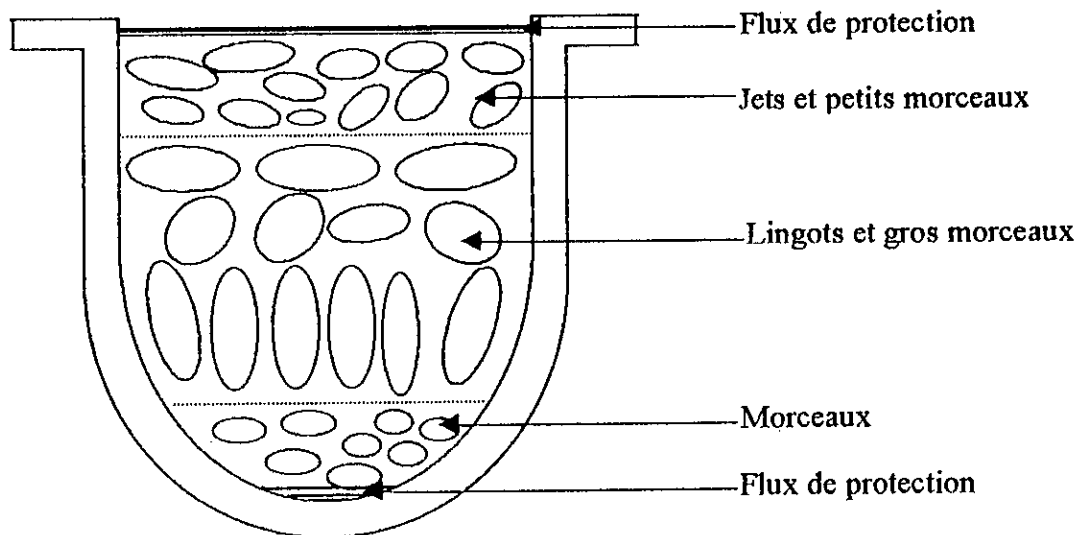


Fig 7 : Méthode de chargement du creuset

- 7- lorsque toute la charge est introduite placer le couvercle et préchauffer l'outillage.
- 8- dès que la charge devient liquide décrasser, introduire le flux de dégazage et brasser soigneusement le bain en profondeur, appliquer une couche du flux de protection.
- 9- quelque minute après décrasser et introduire le flux de désoxydation
- 10- brasse soigneusement.
- 11- quelques minutes après de crasse et couler.

III.4.3. La coulée :

Cette opération souvent négligée doit être poursuivie en cherchant à éviter l'oxydation de l'alliage et l'entraînement de crasses à la coulée. Dans le cas où le creuset servirait à la coulée, seule importe la coulée des moules, mais pour la conservation des creusets surchauffés il convient de ne pas les poser sur un lit de sable humide. Il vaut mieux disposer aux endroits convenables une dalle réfractaire et horizontale, en un lieu à l'abri des courants d'air.

Coulée des moules : En général ne pas couler de haut. Tenir les coulées en gogées et éviter les entraînements de crasses. Allumer les gaz qui se dégagent du moule.

La coulée des moules importants est souvent conduite de la manière suivante : un bassin de coulée, dans lequel aboutissent les jets d'alimentation, suffisant pour contenir tout le métal, destiné à remplir de moule est construit au-dessous du moule. Les coulées sont obstruées par des quenouilles, le métal est versé dans le bassin lorsque le bain est calme, on arrache les quenouilles et le métal s'en gouffre dans l'empreinte, les masselottes sont souvent réalimentées en métal chaud si elles sont importantes.

III.5. RÉSULTATS DE L'ÉLABORATION :

III-5.1. Étude des effets des conditions d'élaboration :

Première expérience :

Fusion sans traitement du bain et sans tenir compte des pertes aux feux. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (8).

Tableau 8 : Résultats d'élaboration sans traitement du bain.

Alliages	Addition %Zn	$\theta_c(^{\circ}\text{C})$	Résultats		
			Cu	Zn	Sn
A ₁	10	1100	89,15	8,66	3,81
A ₂	15	1100	80,69	13,36	4,10
A ₃	20	1100	76,47	17,74	4,23

Deuxième expérience :

Influence du flux de protection sans tenir compte des pertes aux feux. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (9).

Tableau 9 : Influence du flux de protection.

Alliages	Addition %Zn	$\theta_c(^{\circ}\text{C})$	Résultats		
			Cu	Zn	Sn
A ₄	10	1100		9,89	4,14
A ₅	15	1100		14,13	4,09
A ₆	20	1100		17,93	3,98

Troisième expérience :

Influence de la température de coulée avec addition de 2% de Zn (perte au feu) pour l'alliage à 10% Zn. Les résultats obtenus sont dans le tableau (10).

Tableau 10 : Influence de la température de coulée.

Alliages	Perte au feu	Addition	θ_c	Résultats		
				Cu	Zn	Sn
A ₇	Cu 0,8 Zn 2	22	1050	71,69	21,52	4,89
A ₈		22	1100	72,58	21,10	4,32
A ₉		22	1150	74,43	19,73	3,93
A ₁₀		22	1200	76,19	18,54	3,52

Quatrième expérience :

Influence des pertes au feu à température constante pour l'alliage à 10%Zn.
Les résultats obtenus sont dans le tableau (11).

Tableau 11 : Effets des pertes au feu sur la composition des alliages.

Alliages	Perte		Addition	θ_c	Résultats		
	Cu	Zn			Cu	Zn	Sn
A ₁₁		2	12	1100	83,98	9,73	4,32
A ₁₂		2,5	12,5	1100	84,32	9,81	4,05
A ₁₃		3	13	1100	84,45	9,82	3,93
A ₁₄		3,5	13,5	1100	83,82	10,78	3,65
A ₁₅		4	14	1100	81,95	12,34	3,81

Pour déterminer les effets de la température de coulée sur la composition nous calculons les écarts à la composition fixée, nous obtenons des résultats que nous présentons dans le tableau (12)

Tableau 12: Effet de la température de coulée sur la composition des laitons.

Alliages composition fixée %Zn	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
	20	20	20	20
pourcentage	✓	✓	✓	✓
θ_c (°C)	1050	1100	1150	1200
Composante obtenue %Zn	21,52	21,10	19,73	18,54
Écart Δ Zn (%)	-0,48	-0,9	-2,27	-3,46

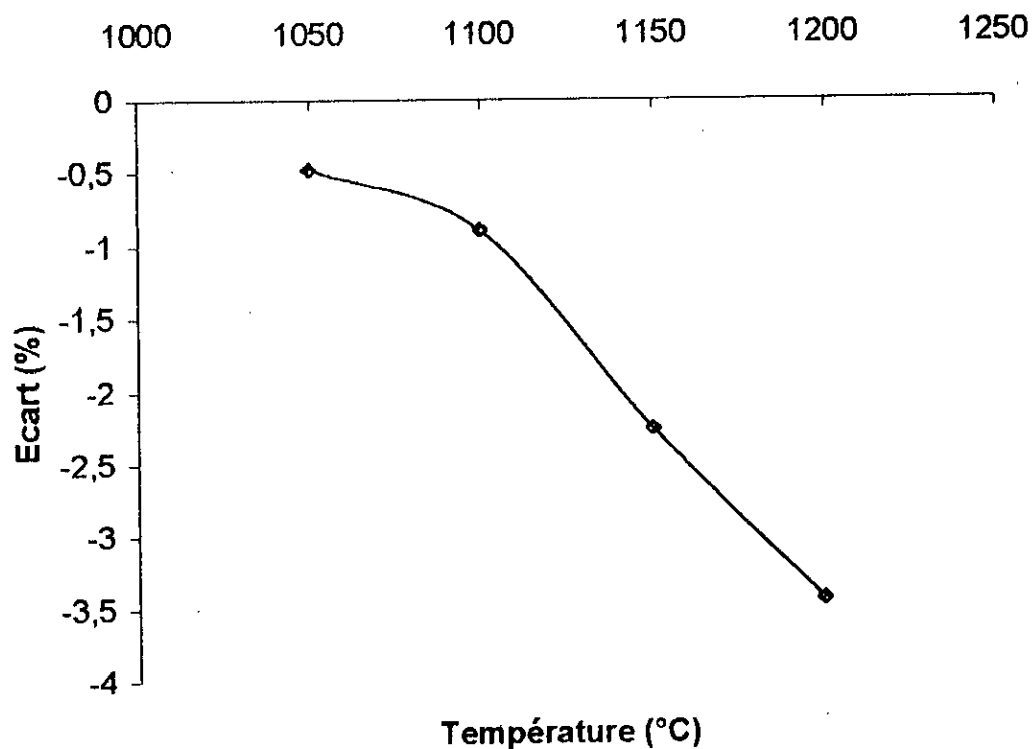


Fig 8 : Effet de la température de coulée sur la composition des laitons.

Influence des pertes aux feux à différentes température de coulée à l'alliage 10%Zn. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 13

Tableau 13 : Effets conjugués de la température de coulée et des pertes au feu Sur la qualité des laitons.

Alliages	Perte %Zn	Addition	θ_c	Résultats		
				Cu	Zn	Sn
A ₁₆	3	13	1100	85,03	9,84	3,98
A ₁₇	3	13	1150		9,52	3,61
A ₁₈	3	13	1200		8,71	3,33

Des résultats obtenus on peut réaliser le tableau suivant qui permettra de déterminer les pertes au feu fonctionnels. On peut affirmer que dans le cadre de cette étude que les pertes au feu a utiliser se situent entre 2,5 et 3,5%Zn

Tableau 14 : Détermination des pertes au feu fonctionnels ($\theta_c = 1100^\circ\text{C}$).

Alliages %Zn	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	A ₁₄	A ₁₅
	10	10	10	10	10
Perte %Zn	2	2,5	3	3,5	4
Composante finale %Zn	9,73	9,81	9,82	10,78	12,34
Écart ΔZn (%)	-0,27	-0,19	-0,18	+0,78	+2,34

si pertes au feu < 3-1/2
 écart a la composition souhaité
 ne dépasser pas 0,1-1/2 sinon
 les écart devient important.

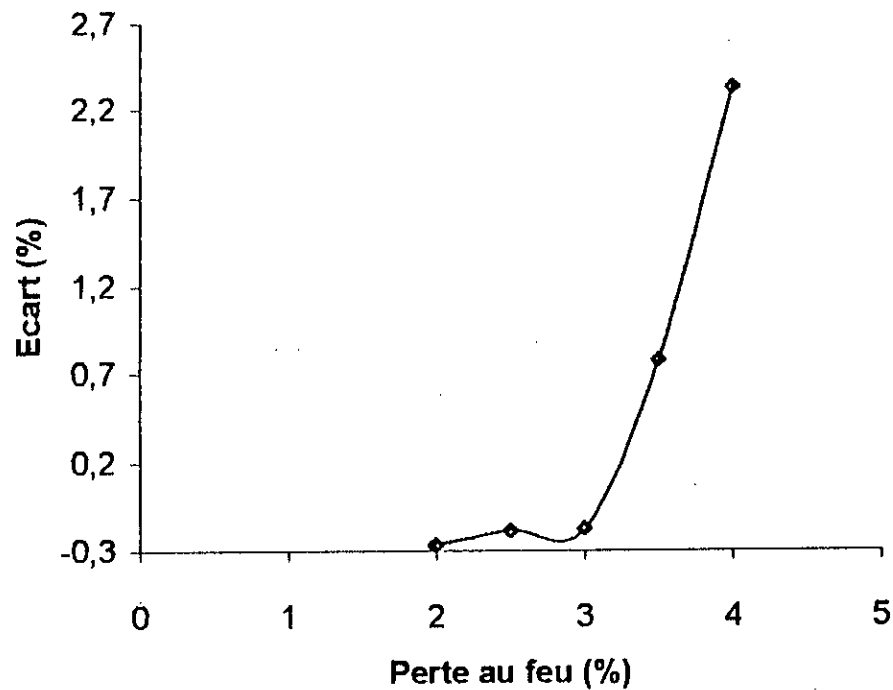


Fig 9: effet des pertes au feu sur la composition des laitons.

III.5.2. Structure des alliages élaborés :

A partir de l'observation microscopique des échantillons des différents alliages A_i nous avons caractérisé les structures suivantes :

III.5.2.1. Structure de l'état brut :

La structure des échantillons de l'état brut de coulée dépend des conditions de la fusion

Dans le cas des fusions sans traitement de bain (expérience N°1). Nous constatons la formation de défauts (figure 10. a, b).

Ces défauts se présentent sous forme de porosités et de soufflures qui sont très importantes.

Pour les fusions avec traitement de bain au flux de protection (expérience N°2), nous remarquons une diminution sensible des défauts surtout aux basses températures.

Par contre, la structure est très hétérogène sur le plan structural et donc chimique (figure 11. a, b, c). En effet nous obtenons quelques plages biphasés ($\alpha+\beta'$) à côté de plages monophasés α . La phase β' apparaît plus sombre.

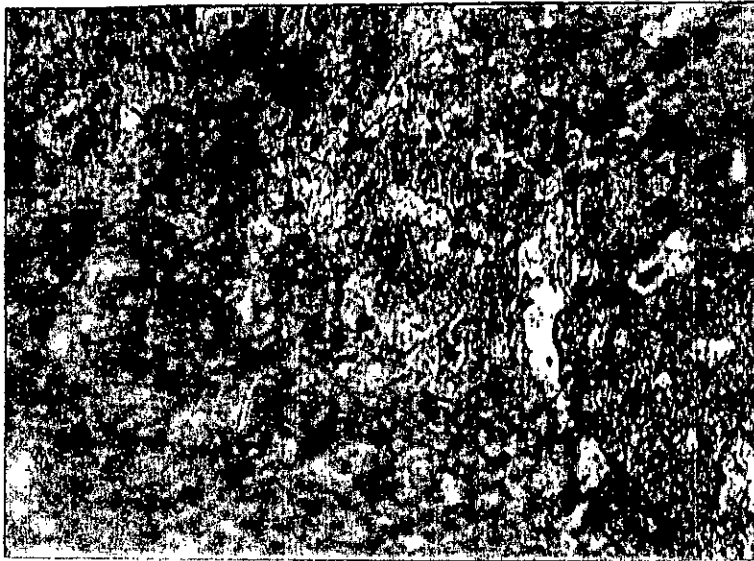
II.5.2.2. Structure après traitement d'homogénéisation :

Nous avons procédé à un traitement de recuit d'homogénéisation, on à 700°C pendant 48 heures, des alliages obtenus des bains traités par le flux de protection.

Les structures obtenues présentent des alliages monophasés α , avec des grains de formes polyédriques avec des contours très nets. Nous constatons aussi la présence de macles thermiques qui traversent les grains (figure 12. a, b, c)



a. Alliage A₁
(G=200)



b. Alliage A₃
(G=500)

Fig10 :Structure de l'état brut (bain non traité)



a. Alliage Λ_6
(G=500)

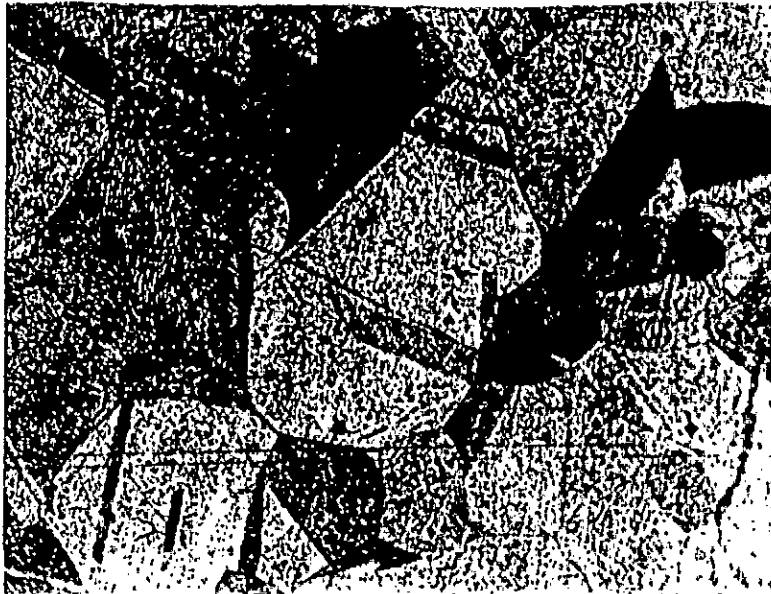


b. Alliage Λ_8
(G=500)

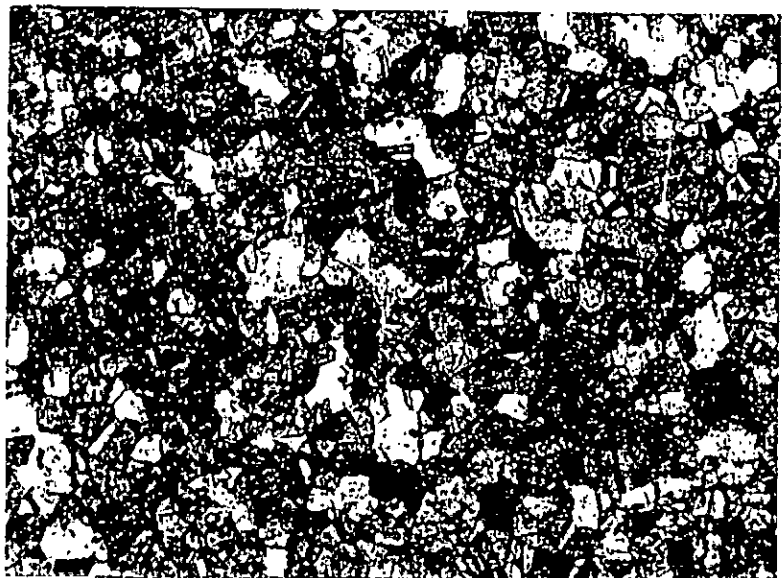


c. Alliage Λ_{10}
(G=200)

Fig11 :Structure de l'état brut (bain traité au flux de protection)



a. Alliage A_8
($G=500$)



b. Alliage A_{10}
($G=100$)



c. Alliage A_{15}
($G=200$)

Fig12 : Structure des alliages après recuit d'homogénéisation à 700°C

III.5.3. Variation de la dureté des alliages :

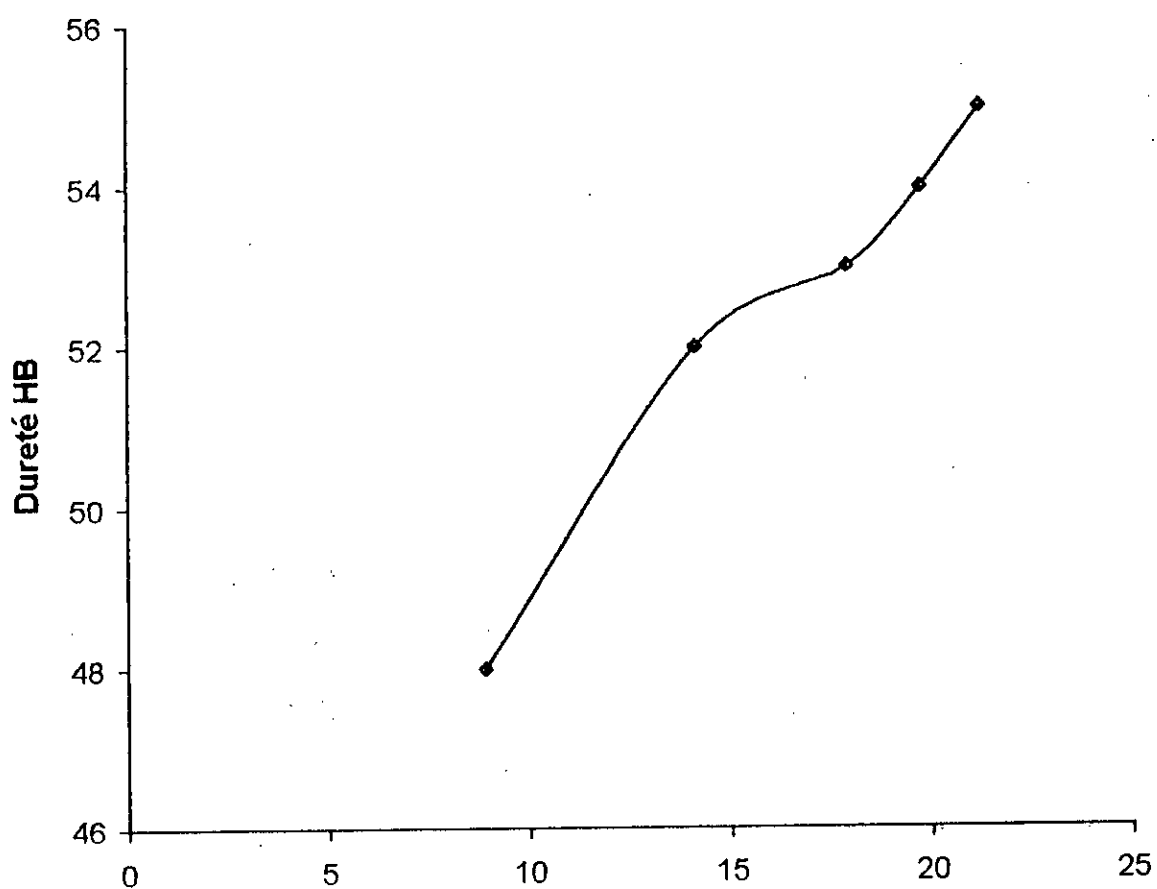
Les résultats obtenus sont une moyenne de trois mesure sur chaque échantillon. Ces résultats qui sont présentes dans les tableaux suivants (15et16) montrent qu'un accroissement du taux de Zn de 8,9% à 21,52% provoque une augmentation de la dureté de 48 points à 55,13 points. De ces résultats on constate qu'un accroissement de 14,2% en Zn engendre seulement une variation de 14,58% en dureté ce qui est montré par la figure

Tableau 15 : Résultats des essais de dureté des alliages.

Échantillons	Moyennes
A ₁	46,89
A ₂	51,16
A ₃	53,16
A ₄	48,08
A ₅	52,31
A ₆	53,29
A ₇	55,13
A ₈	55,87
A ₉	54,06
A ₁₀	53,91
A ₁₁	50,44
A ₁₂	50,51
A ₁₃	50,18
A ₁₄	51,24
A ₁₅	51,54
A ₁₆	50,28
A ₁₇	49,76
A ₁₈	47,18

Tableau 16 : Effet des additions du Zn sur la dureté des laitons.

Alliage	A ₄	A ₅	A ₆	A ₉	A ₇
%Zn	8,9	14,13	17,93	19,73	21,52
Dureté HB	48	52	53	54	55

**Fig 13 : Effet du taux de Zn sur la dureté des laitons.**

CHAPITRE IV
INTERPRÉTATION
ET EXPLOITATION DES
RÉSULTATS

INTRODUCTION

Dans l'étude entamée sur les conditions d'élaboration des alliages Cu-Zn, nous avons utilisé les paramètres suivants :

1. Utilisation du flux de protection c'est à dire le charbon de bois. Nous n'avons pas utilisé un flux de désoxydation car ce rôle est bien joué par le zinc dans les laitons.
2. La température de coulée.
3. Les pertes au feu.

Ces trois paramètres, jouent un rôle important sur la qualité des alliages élaborés du point de vue la composition et des défauts d'élaboration.

IV.1. EFFET DU FLUX DE PROTECTION :

IV.1.1. Effet sur la composition :

Nous avons constaté que le flux de protection (charbon de bois en poudre fine) affecte aussi bien la composition que la qualité des pièces coulées. Les effets sur la composition se traduisent par une diminution des pertes en zinc (tableau 8) car le flux constitue un écran entre le bain et l'atmosphère oxydante. Le zinc ayant une densité et une température de fusion plus faible que le cuivre remonte en surface et « brûle » par oxydation sous forme de fumées noires.

Signalons toutefois que les résultats des deux tableaux sont proches et que les niveaux des pertes sont comparables à cause peut être de la température de coulée (1100°C).

IV.1.2. Effet sur les défauts :

Les effets du flux sur la qualité des pièces est révélées par les photographies obtenus.

Nous constatons que lorsque le bain n'est pas protégé, les défauts son formés de pores, de microfissures, et de soufflures sont importantes.

Ceci est dû aux gaz introduits lors de la fusion à une température élevée (supérieure à 1000°C).

La diffusion de l'oxygène (qui est introduit par contamination par les outils et les charges humides) est élevée.

L'utilisation du flux agit pour freiner la diffusion de l'oxygène et des fumées dans le bain.

IV.2. EFFET DE LA TEMPÉRATURE DE COULÉE :

D'après les résultats obtenus la température de coulée agit sur la composition et sur la qualité des pièces.

IV.2.1. Effet sur la composition en zinc :

Les résultat présentés dans le tableau (10) montrent que plus la température de coulée est élevées plus les pertes en zinc sont importantes. Les mesures résultantes sont obtenues par des températures inférieures à 1100°C.

Ce phénomène s'explique par l'accroissement de la cinétique de la diffusion et des réactions mises en jeu à savoir :

- Diffusion des gaz dans le bain.
- Oxydation du Zn.
- Oxydation du Cu et de l'étain.

Les pertes minimales sont obtenues pour des températures inférieure à 1050°C.

IV.2.2. Effet sur la qualité des pièces :

L'augmentation de la température de coulée accélère le phénomène de la formation des défauts (pores, soufflures, retassure,...). Ces résultats sont tirés par les micrographies.

On peut expliquer ceci par l'accélération de la diffusion des gaz (O₂, H₂, etc).

IV.3. EFFET DES PERTES AU FEU :

D'après les résultats obtenus nous remarquons que les pertes au feu doivent se situer dans une fourchette précise. En dehors de cette fourchette, les écarts à la composition souhaitée deviennent importants voir tableau (.14.).

Le niveau des pertes au feu est lié à la température du bain, et à l'application du flux de protection qui ont un rôle important sur les pertes au zinc lors de la fusion.

IV.4. EFFETS CONJUGUÉS DU FLUX DE LA TEMPÉRATURE DE COULÉES ET DES PERTES AUX FEUX :

En pratiquant un flux, de protection appropriée (charbon de bois) on peut étudier les effets conjugués de la température de coulée, et des pertes au feu.

En effet on constate qu'une température de coulée basse (entre 1050 et 1000°C) et des pertes au feu situés entre 2,5 % et 3,5% donnent les meilleurs résultats qui se traduisant par une composition proche de celle calculée avec un écart ne dépassant pas 0,1% en valeur absolue.

De même, les défauts de fonderie deviennent minimales, ce qui permet de couler des pièces saines dans des conditions acceptables.

IV.5. EXPLOITATION DES RÉSULTATS :

En considérant les résultats obtenus, nous pouvons fixer les conditions optimales pour l'élaboration des alliages Cu-Zn à condition de travailler avec les mêmes charges c'est à dire :

- Alliage Cu 90%, Zn 4%, Sn 6%.
 - Zinc pur avec une granulométrie appropriée.
1. Calcul des charges rigoureux pour les éléments dont le taux est égal ou supérieur à 1%.
 - Pour Zn 2,5 – 3,5 %
 - Pour Sn
 - Pour Cu
 - Pour Pb.
 3. Choix du flux de protection :
 - Charbon de bois en poudre granulomètre inférieure à 1mm.
 4. Choix de la température de coulée en fonction de la composition de l'alliage.

Alliage visé	5-10	10-15	15-20	20-30
Température de coulée	1100-1050	1050-1100	1000-1050	950-1000

5. Entretien des outils et creuset, nettoyage, préchauffage et poteyage.
6. Respect des règles de fusion et de coulée exposée dans le chapitre III.

Effet de la température de coulée sur la composition finale :

Les résultats sont présentes dans le tableau (10).

Nous constatons que les écarts à la composition souhaitée sont faibles lorsque la température de coulée est inférieure à 1100°C, et que l'écart augmente avec la température de coulée dans le sens de l'appauvrissement du bain en zinc puisqu'on attend des pertes de 3,46% en Zn pour une coulée de 1200°C.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif visé par notre étude et de fixer la conduite et les paramètres de la fusion et de l'élaboration des alliages Cu-Zn.

Les paramètres pris en compte sont le flux de protection, la température de coulée et les pertes au feu en zinc.

Les résultats obtenus nous ont permis de comprendre l'effet de ces paramètres sur les conditions de l'élaboration. Nous sommes arrivés, malgré la courte durée de projet à fixer les conditions optimales pour l'élaboration et la fusion des laitons binaires.

Cette étude dont les résultats sont important surtout à l'échelle industrielle, pourra être poursuivie pour obtenir des résultats encore plus fiables et qui permettront de maîtriser l'élaboration et la fusion des alliages de cuivre.

Les travaux devront à notre humble avis s'orienter vers les domaines suivants :

- Natures des charges, alliage mère, addition.
- Flux.
- Effet de la température de coulée.
- Effet des pertes au feu.
- Effet des atmosphères.

L'utilisation de moyen de caractérisation de grande précision comme.

- La microscopie électronique à balayage.
- L'analyse RX.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) « Les propriétés du cuivre et de ses alliages »
 - 2) L. GUILLET, « Technique de l'ingénieur », M 300, ed (1992).
- J. BARRALIS, G. MEADER, « Précis de métallurgie », 5^{ème} ed. NATHAN.
J. BERNARD, « Métallurgie générale », 2^{ème} ed. MASSON (1984).
 - J. LAINE « Les alliages de cuivre moulés ».
 - « Le cuivre et ses alliages », Technique de l'ingénieur, M431.
 - D. ARNAUD, « Fonderie et moulage des alliages de cuivre », Technique de l'ingénieur, M800
 - Cuivre et alliages de cuivre corroyés », Technique de l'ingénieur, M 436, M 433, M434.
 - L. GUILLET, « Propriétés des alliages cuivreux », Technique de l'ingénieur, M 430.
 - « Données numériques sur le cuivre et ses alliages », Technique de l'ingénieur 433, (1992).
 - D. ARNAUD « Propriétés du cuivre et ses alliages », Technique de l'ingénieur, M 430, (1992).
 - G. FACY, M. POMPION « Précis de fonderie », 2^{ème} ed. ANON, (1992).
 - « Les alliages cuivreux », ed. Syndicat général des fonderies de France, (1967).
 - C. CHAUSSIN, G. HILLY, « Alliages métalliques », (1976)