

8/97

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

## PROJET DE FIN D'ETUDES

*THEME*

**ELABORATION ET  
CARACTERISATION DE  
LA MATIERE D'UNE  
ELECTRODE EN CUIVRE  
DE SOUDAGE**

Proposé par :  
ANABIB (P. T. S)

Etudié par Mr :  
BOUZALMAT HAMZA

Dirigé par Mme :  
N. KECHOUD

**PROMOTION : OCTOBRE 1997**

E.N.P : 10 , Avenue HASAN BADI , EL - HARRACH \* ALGER \*

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة - BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

**PROJET DE FIN D'ETUDES**

**THEME**

**ELABORATION ET  
CARACTERISATION DE  
LA MATIERE D'UNE  
ELECTRODE EN CUIVRE  
DE SOUDAGE**

Proposé par :  
ANABIB (P. T. S)

Etudié par Mr :  
BOUZALMAT HAMZA

Dirigé par Mme :  
N. KECHOUD

**PROMOTION : OCTOBRE 1997**

E.N.P : 10 , Avenue HASAN BADI , EL - HARRACH \* ALGER \*

<<..Thamazight dayem teqqim berra n wennar.

Amezruy nney yebda telt alaf isseggwasen aya (mebla ma yehseb bna dem legrun u zarmezruy), di telt alaf isseggwasen agi, ....., yiwen ur yuri s- etmazight, armi teqqim tmeslayt nnegh tdaε, ayen dagh iruhen di lweqt nni yakw ur is ε'ara azal.

T-taluft-a taqdimt i-glaq annemhu tura, ilaq - agh annesemnaε ayen akw iwimi nezmer deg - gwayen dagh d - iqqimen seg idles nnegh skud ur iruh ula d neffa .>>

Mouloud Mammeri.

## DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mon oncle Yahia, mort très jeune au champ d'honneur, pour l'indépendance du Pays.

Je pense également à ma mère Tassaâdit et mon père Smail qui ont constamment été là pour m'aider et m'encourager.

Je le dédie également à tous mes frères, soeurs et à toute ma famille.

Je salue à l'occasion, tous mes amis (es) pour leur générosité et leur confiance.

Bouzalmat Hamza.



### **REMERCIEMENTS:**

Je remercie très chaleureusement monsieur Hamadane Lakhdar, ancien fondateur de la SNTF, pour toutes ses contributions très profitables. L'occasion me présente pour saluer cet homme aux qualités professionnelles exemplaires.

Ce travail est réalisé avec le concours de madame *Kechoud*, ma promotrice, et je la remercie pour le vif intérêt qu'elle a accordé à mon projet de fin d'études, durant toute l'année.

Je remercie également monsieur M. Boutchebak pour ses remarques pratiques très bénéfiques.

Je suis très reconnaissant aux enseignants de notre département et plus spécialement messieurs: kasser, Bouabdellah, Mesrati et Chitroub pour leurs remarques très utiles sur le plan théorique et pratique.

Je remercie aussi monsieur Kecili, magasinier du département de Génie-Chimique pour son aide sur le plan matériel.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous les membres du jury qui auront à examiner mon travail.

# SOMMAIRE



	Page
<b>Introduction générale .</b>	1
<b><u>CHAPITRE I:</u> Etude bibliographique</b>	
<b>I- Le cuivre et ses alliages</b>	2
<b>I-1- Historique</b>	2
<b>I-2- Propriétés du cuivre</b>	2
<b>I-2-1- Propriétés physiques et mécaniques du cuivre</b>	3
<b>I-2-2- Propriétés chimiques du cuivre</b>	4
<b>I-3- Principales classes de cuivre et de ses alliages industriels</b>	5
<b>I-3-1- Types de cuivres industriels</b>	5
<b>a- Cuivres électrolytiques (Cu- a)</b>	5
<b>b- Cuivres désoxydés (Cu- b)</b>	6
<b>c- Cuivres libres d'oxygène (Cu- c).</b>	6
<b>I-3-2- Les alliages de cuivre</b>	7
<b>a- Cuivres faiblement alliés.</b>	7
<b>b- Cuivres fortement alliés</b>	8.
<b>c- Autres alliages de cuivre</b>	9
<b>I-4- Principales impuretés de cuivre</b>	10
<b>II- Elaboration des alliages de cuivre</b>	17
<b>III- Pratique de la fonderie des alliages cuivreux</b>	18
<b>III-1- Moulage en sable</b>	19
<b>a- Tracé des pièces</b>	20
<b>b- Remplissage et alimentation</b>	20
<b>III-2- Défauts de fonderie des alliages cuivreux</b>	20
<b>a- Défauts classiques</b>	20
<b>b- Défauts caractéristiques</b>	21
<b>IV- Traitements thermiques des alliages cuivreux</b>	22
<b>IV-1- Traitements thermiques des alliages fortement alliés</b>	23
<b>IV-2- Traitements thermiques des alliages faiblement alliés</b>	26

V- L'effet de l'érouissage sur les propriétés du cuivre.

27

**CHAPITRE II: Etude expérimentale.**



**I- Caractérisation des échantillons prélevés sur la roue d'origine.**

31

**I-1- Prélèvement des échantillons**

31

**I-2- Analyse chimique .**

31

**I-3- Essai de dureté**

32

**I-4- Observation micrographique**

32

**II- Elaboration de l'alliage de cuivre**

33

**II-1- Mode opératoire d'élaboration par moulage en sable**

34

**a- Dispositifs d'élaboration**

34

**b- Moulage, fusion de la matière première et désoxydation**

35

**c- Pièces coulées par deux procédés différents**

37

**c-1- Coulée en chute mixte**

37

**c-2- Coulée en source tangentielle**

38

**III- Post-traitements de l'alliage brut de coulée**

38

- Traitement thermique de mise en solution suivie d'une trempe (T)

40

- Traitement thermique de précipitation ou revenu (R).

40

**CHAPITRE III: Résultats et interprétations.**

**I- Résultats de la caractérisation des échantillons prélevés sur la roue d'origine**

41

**I-1- Résultats de l'essai de dureté**

41

**I-2- Micrographie**

41

**II- Résultats de l'élaboration**

44

**II-1- Pièces obtenues par coulée en chute mixte**

44

**II-2- Pièces obtenues par coulée en source tangentielle**

45

**III- Résultats de la caractérisation de la pièce choisie**

47

**III-1- observation micrographique**

47

**III-2- Résultats de l'essai de dureté.**

49

**IV- Résultats des post-traitements sur la pièce choisie**

50

**IV-1- Résultats du traitement thermique de la mise en solution suivie**

d'une trempe (T)

50

**IV-2- Résultats du traitement thermique de précipitation ou revenu (R).**

50

	<b>Page</b>
a- observation micrographique	50
b- Essai de dureté	54
<b>IV-3- Résultats relatifs aux autres traitements : Ecouissage</b>	<b>54</b>
<b>Conclusion générale et recommandations</b>	<b>58</b>
<b>Annexes</b>	
<b>Annexe I: Moulage par centrifugation de l'électrode de soudage.</b>	<b>60</b>
<b>Annexe II: Description de l'électrode de soudage</b>	<b>62</b>
<b>Annexe III: Résultats de la caractérisation de la roue élaborée localement par la SNTF.</b>	<b>65</b>
<b>Références bibliographiques.</b>	<b>69</b>



## Liste des figures présentées:



	Page
<b>CHAPITRE I: Etude bibliographique</b>	
Fig.1: Influence des impuretés sur la conductivité électrique du cuivre.	11
Fig.2: Diagramme d'équilibre cuivre-oxygène	12
Fig.3: Solubilité de l'hydrogène dans le cuivre	13
Fig.4: Equilibre oxygène -hydrogène	14
Fig.5: Diagramme d'équilibre Cu- Sn.	24
Fig.6: Diagramme d'équilibre Cu- Al.	25
Fig.7: Variation de la résistance à la rupture du cuivre avec le degré d'érouissage.	28
Fig.8: Variation de la dureté du cuivre en fonction du taux d'érouissage.	28
Fig.9: Variation de l'allongement du cuivre avec le degré d'érouissage.	29
Fig.10: Variation de la résistivité électrique de cuivre avec le degré d'érouissage	30.
<b>CHAPITRE II: Etude expérimentale.</b>	
Fig. 11: Pièce coulée en chute directe	37
Fig. 12: Schéma d'une pièce coulée en source tangentielle	38
Fig. 13: Diagramme d'équilibre Cu-Cr	39
<b>CHAPITRE III: Résultats et interprétations.</b>	
Fig. 14: Microstructure de l'échantillon d'origine (x 200).	41
Fig. 15: Microstructure de l'échantillon d'origine (x 400).	42
Fig. 16: Microstructure de l'échantillon d'origine (x 1000).	43
Fig. 17: Photographie des pièces coulées en chute mixte.	44
Fig. 18: Vue de dessus d'une coulée en chute mixte.	45
Fig. 19: Photographie des pièces coulées en source tangentielle	46
Fig. 20: Vue de dessus d'une attaque en source tangentielle	47
Fig. 21: Microstructure de l'échantillon élaboré (x 50).	48
Fig. 22: Microstructure de l'échantillon élaboré (x 100).	48
Fig. 23: Microstructure de l'échantillon élaboré (x 400).	49
Fig. 24: Microstructure de l'échantillon élaboré, trempé à partir de 1000°C et revenu à 500°C (x 200).	51

<b>Fig. 25:</b> Microstructure de l'échantillon élaboré, trempé à partir de 1000°C et revenu à 500°C (x 400).	51
<b>Fig. 26:</b> Microstructure de l'échantillon élaboré, trempé à partir de 1000°C et revenu à 500°C (x 1000).	52
<b>Fig. 27:</b> Microstructure de l'échantillon élaboré après traitements thermiques (x 50). . . .	53
<b>Fig. 28:</b> Microstructure de l'échantillon d'origine (x 50)	53
<b>Fig. 29:</b> Microstructure d'un échantillon chauffé à 1000°C, écroui et revenu à 500°C (x100).	55.
<b>Fig. 30:</b> Microstructure de l'échantillon chauffé à 1000°C, écroui et revenu à 500°C (x200).	56
<b>Fig. 31:</b> Microstructure d'un échantillon chauffé à 1000°C, écroui et revenu à 500°C (x200).	56.
<b>Fig. 32:</b> Disposition des attaques d'une coulée en source	59
 <b>Annexes</b>	
<b>Fig. I-1:</b> Dispositif de moulage par centrifugation à axe horizontal	60
<b>Fig. II-1:</b> Schéma indiquant les deux roues de soudage en action de souder un tube	62
<b>Fig. II-2 :</b> Schéma de l'électrode-avant de soudage	63
<b>Fig. III-1 :</b> Microstruture de l'échantillon élaboré par la SNTF (x 50).	66
<b>Fig. III-2 :</b> Microstruture de l'échantillon élaboré par la SNTF (x 100).	67

### INTRODUCTION GENERALE

Le soudage par points des tubes, réalisé par l'unité ANABIB, est assuré par la roue d'électrode "Newcor-lat w 1.5", dont l'alliage est à base de cuivre. En plus de sa haute conductibilité électrique avoisinant celle du cuivre pur, cet alliage doit aussi avoir une grande résistance mécanique pour éviter toute déformation de la roue suite à la pression de serrage qu'elle exerce sur les tubes à souder.

L'objectif de notre travail étant l'élaboration d'une roue de soudage; nous avons d'abord caractérisé l'alliage d'une roue de référence importée de l'étranger, caractérisation qui porte sur la composition chimique, la dureté et la microstructure.

Nous avons ensuite essayé d'élaborer, par coulée, un alliage dont les caractéristiques se rapprochent le plus de celles de l'alliage de référence. Pour ce faire, nous avons tenté, après coulée, des post-traitements dans le but d'amener l'alliage aux propriétés requises.

Le présent rapport, regroupant l'essentiel de notre étude, se présente sous forme de trois grands chapitres:

- Chapitre I, où se résume notre étude bibliographique portant tant sur le cuivre et ses alliages que sur la méthode de leur élaboration, ainsi que sur les post-traitements préconisés.
- Chapitre II, chapitre consacré à la partie expérimentale, où nous rapportons les différentes méthodes d'investigations utilisées au cours de notre étude.
- Chapitre III, dans ce chapitre sont dégagés les différents résultats obtenus ainsi que leurs éventuelles interprétations.

**CHAPITRE I:**

**ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **I- LE CUIVRE ET SES ALLIAGES:**

#### **I-1- Historique [1]:**

Le cuivre est l'un des premiers métaux utilisés par l'homme, depuis la plus haute antiquité (8000 ans avant notre ère).

Il a servi à la réalisation de beaucoup d'objets car il est très malléable et très ductile.

Vers 4000 ans avant J.C., un événement spectaculaire vient de survenir et a permis à l'homme d'obtenir du cuivre par simple chauffage de ses minerais en présence de charbon de bois.

Cette première invention métallurgique ouvrait de nombreuses perspectives chez l'être humain. Il se lança, tout d'abord, dans une industrie primitive à fins utilitaires et décoratives.

Il effectua hasardeusement des mélanges de minerais car les minerais de cuivre contenaient beaucoup d'impuretés. C'est ainsi qu'on tombait sur des alliages de cuivre à l'arsenic puis des bronzes. Puis on voit apparaître des alliages de cuivre au plomb et à l'antimoine et des laitons.

Après la découverte de l'électricité et de l'excellente qualité du cuivre à conduire le courant électrique, il fut l'objet de plusieurs applications industrielles.

Plus tard, les chercheurs ont élaboré d'autres alliages, tels que les maillechorts, les laitons spéciaux, les cupro-aluminiums et les cupronickels.

Actuellement, pour subvenir aux besoins très précis de l'industrie, de nombreux alliages à caractéristiques bien définies ont été créés, tels que les alliages de cuivre au cadmium, au plomb, et plus récemment, les cupro-berylliums, le cuivre au chrome, le cuivre au fer, etc...

#### **I-2- PROPRIETES DU CUIVRE:**

### **I-2-1- Propriétés physiques et mécaniques du cuivre:**

Le cuivre est un métal de couleur rouge - brun, élément (Cu) de numéro atomique 29 et de masse atomique 63.54 g.

Il existe dans la nature à l'état natif ou combiné à différents corps, notamment au soufre.

La principale qualité du cuivre est son excellente conductivité pour l'électricité et la chaleur, deux propriétés fondamentales qu'il doit à sa structure électronique [2]:

L'atome de cuivre présente un seul électron de valence.

Il est classé, juste après l'argent, meilleur conducteur d'électricité et de chaleur, d'où son usage comme:

- chaudières à évaporer, serpentins, cuves, etc...
- fils et câbles pour transports d'énergie électrique, enroulements de dynamos, etc...
- transformateurs, moteurs, générateurs électriques, électrodes de soudage, etc...

Ainsi, près de la moitié de la production mondiale du cuivre est destinée à des applications pour lesquelles cette caractéristique prime [3]. Il est également caractérisé par sa faible dureté, mais il est malléable facilement et est 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 [3].

Il est aussi mou et ne convient pas pour la fabrication d'objets moulés, car il se solidifie rapidement et présente une masse bulleuse et poreuse [4].

Ses principales constantes sont:

- Structure cristalline: cubique à faces centrées (paramètre de la maille à 0°C:  $a=3.61 \text{ \AA}$ ).
- Masse volumique :  $8.9 \text{ g/cm}^3$ .
- température de fusion :  $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Etude bibliographique

---

- Température d'ébullition: 2325 °C.
- Chaleur latente de fusion: 50.6 cal/g.
- Chaleur massique à 20°C : 0.092 cal / (g.°C).
- Coefficient de dilatation thermique linéaire à 25 °C:  $16.5 \times 10^{-6} / (°C)$ .
- Résistivité électrique à 20°C : 1.7241  $\mu\Omega.cm$
- Conductivité thermique à 20°C : 385  $\omega/(m.K)$ .

Ces deux dernières valeurs sont prises comme valeurs de référence et sont égales à 100% IACS (international annealed copper standard).

La conductivité électrique c (% IACS), particulière aux alliages cuivreux, est définie par le pourcentage de conductivité du matériau considéré par rapport à un cuivre de référence (cuivre IACS) de résistivité égale à 1.7241  $\mu\Omega.cm$  à 20°C [1].

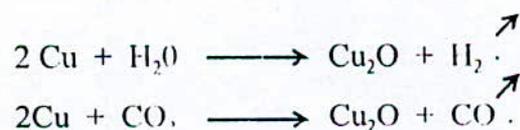
$$C (\%IACS) = \frac{1.7241}{\rho (\mu\Omega.cm)} \cdot 100$$

avec  $\rho$  ( $\mu\Omega.cm$ ): résistivité électrique du matériau considéré.

### 1-2-2- Propriétés chimiques du cuivre:

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 de l'air, le gaz carbonique et l'anhydride sulfureux (deux gaz de combustion) et donnent [5]:





Les gaz ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) peuvent être dissous dans le cuivre fondu et lors de la solidification, ils se dégagent et s'échappent [6]. Ce phénomène est connu sous le nom de "rochage", caractérisé par des soufflures, des boursoufflures et des pores sur toute la pièce de cuivre [5,6].

Le cuivre est attaqué par des acides et des chlorures.

A noter 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 [7].

### **I-3- PRINCIPALES CLASSES DE CUIVRE ET DE SES ALLIAGES INDUSTRIELS:**

#### **I-3-1- Types de cuivres industriels [8]:**

L'affinage a pour but de produire un cuivre de haute pureté dont la teneur minimale en cuivre est de 99,9%

En général, on le classe suivant la présence de l'oxygène ou non et le procédé suivi pour éliminer cet oxygène.

On peut donc, classer le cuivre en trois catégories:

- Cuivres électrolytiques (Cu-a).
- Cuivres désoxydés (Cu-b).
- Cuivres libres d'oxygène (Cu-c).

#### **a- Cuivres électrolytiques (Cu-a):**

Ce cuivre contient entre 0,01% et 0,04% d'oxygène, introduit lors des opérations de coulée et de fusion.

Ce cuivre à 99,9% se combine avec l'oxygène pour donner des oxydules ou l'oxyde cuivreux ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) sous forme de petits globules [8].

Le cuivre électrolytique est caractérisé par ses hautes conductivités thermiques et électriques et il est utilisé en électrotechnique sous atmosphère non réductrice [9].

- Le Cu-a1 (électrolytique) caractérisé par sa conductivité électrique supérieure à 100% IACS à l'état recuit à 20°C.
- Le Cu-a2 purifié par voie thermique et qui a une conductivité électrique identique à celle du cu-a1.
- Le Cu-a3 purifié par voie thermique et qui a une conductivité électrique non garantie.

### **b- Cuivres désoxydés (Cu-b):**

Ces cuivres sont affinés par voie thermique ou électrolytique et ils sont désoxydés par le phosphore qui doit-être ajouté d'une façon très précise [8].

En effet, tout excès en cet élément conduit à une diminution de la conductivité électrique et une augmentation de la température de recuit [8].

Ces cuivres peuvent-être emboutis, matricés, soudés et pliés [9].

Ils sont utilisés dans la fabrication de tubes de plomberie et d'échangeurs de chaleur [3]. Les nuances possibles dans cette catégorie sont [8]:

- Le Cu-b1 qui contient 0.013 à 0.05% de phosphore et une conductivité électrique allant de 70 à 90% IACS.
- Le Cu-b2 possédant une teneur en phosphore de 0.004 à 0.012 % et une conductivité électrique variant de 85 à 98% IACS.

### **c- Cuivres libres d'oxygène (Cu-c):**

Ces cuivres réunissent les avantages des deux cuivres précédents [9]. Ils sont affinés par procédé électrolytique, refondus au four à induction et la coulée s'opère sous atmosphère inerte, ou désoxydés sans désoxydant résiduel [8].

Ils sont caractérisés par leurs conductivités électriques et thermiques élevées grâce à leur haute pureté mais aussi à leur insensibilité aux atmosphères réductrices [8].

En effet, pour les deux gaz ( $\text{Co} + \text{N}_2$ ), par exemple, on remarque qu'ils sont insolubles dans ces cuivres liquides [1].

D'une part, il y a les cuivres obtenus en effectuant des opérations de fonderie sous atmosphère réductrice et sont de la marque OFHC (oxygen free high conductivity),

et d'autre part, il existe des cuivres obtenus par introduction d'une quantité bien précise de désoxydant et répondent aux cuivres de marque BE58 [8].

Ils conviennent à beaucoup d'applications scientifiques notamment celles relatives aux soudures cuivre - verre [1].

Deux types de nuances sont classés selon leur pureté [8]:

- Le Cu-c1 possède une teneur minimale en cuivre de 99.95%, une conductivité électrique supérieure à 100% IACS et se distingue par l'inexistence de l'impureté d'oxygène.
- Le Cu-c2 contient plus de 99.99% de cuivre, donc moins de 0.01% d'impuretés électriques et dépassant 101%IACS.

### **I-3-2- Les alliages de cuivre:**

Il existe plusieurs manières de classer les alliages de cuivre, et selon chaque classement, on retrouve un certain nombre de familles.

On choisit le classement ci-dessous [7]:

#### **a- Cuivres faiblement alliés:**

Il s'agit d'alliages qui possèdent une teneur en élément d'addition (Ag, Cd, Cr, Be....) inférieure à 1%, à l'exception du Béryllium dont la teneur peut aller jusqu'à 2%.

Ces alliages sont connus pour leur bonne conductivité électrique et leur résistance à la corrosion, mais leurs propriétés mécaniques sont médiocres et peuvent toujours être améliorées par écrouissage ou durcissement structural.

Voici des exemples de quelques nuances:

- **Alliage Cu-Ag (0.08% Ag):**

L'addition d'argent provoque une augmentation de la température de recristallisation et la résistance au fluage. Il est utilisé pour le bobinage de machines électriques tournantes.

- **Alliage Cu-Cr (0.5 à 0.9 % Cr) :**

Cet alliage est à durcissement structural (trempe à l'eau à 1000°C et revenu à 450°C). Sa résistance à la traction atteint 500 N/mm<sup>2</sup> et sa limite élastique 450 N/mm<sup>2</sup>. Il sert de matière pour les électrodes de soudage par points et les conducteurs de puissance.

- **Alliage Cu-Cd (0.7 à 1% Cd):**

A l'état écroui, sa résistance mécanique, sa limite de fatigue et sa limite de fluage sont améliorées par rapport au cuivre pur. On constate que pour 1% cd et 0.15% Sn, les propriétés mécaniques de cet alliage s'améliorent encore plus. Cet alliage est employé pour des fils et ressorts conducteurs.

- **Alliage Cu-Be (2% Be):**

Cet alliage présente un durcissement structural (trempe à l'eau à 800°C et revenu à 320°C). Ses propriétés mécaniques sont très élevées et il est utilisé comme ressorts, rondelles, relais et membranes.

### **b- Cuivres fortement alliés:**

Il y a deux groupes principaux dans cette catégorie:

Les laitons qui sont des alliages Cu-Zn et les bronzes qui sont des alliages Cu-Sn combinés à d'autres éléments.

En général, ces cuivres sont caractérisés par de bonnes propriétés mécaniques et technologique, une bonne tenue à l'usure et à la corrosion.

- **Laitons (Cu-Zn):**

Les laitons sont des alliages contenant 5 à 45% de zinc avec possibilité d'avoir d'autres éléments d'addition en faibles proportions.

Ils possèdent une teinte allant du rose au jaune suivant l'augmentation de la teneur en zinc. Ils sont bons conducteurs de chaleur et présentent une résistance électrique environ trois fois plus élevée que celle du cuivre. Ils sont par ailleurs ductiles, malléables et peuvent être moulés facilement [10].

L'aspect des pièces travaillées à chaud ou à froid, suivant leur composition est bon et elles ont une bonne aptitude aux traitements de surface. Souvent les laitons sont alliés à d'autres éléments (Al, Fe, Ni, Sn, Mn, Pb...) et dans ce cas on les appelle laitons spéciaux. L'introduction de ces éléments (sauf le Nickel) diminue la solubilité du Zinc dans le cuivre [9].

- **Bronzes (Cu-Sn):**

Les bronzes sont des alliages contenant 3 à 20% d'étain, mais à l'état corroyé, ils possèdent moins de 10% en étain [7].

La couleur des bronzes passe du rouge jusqu'à 5% Sn, au jaune à partir de 15%Sn.

Ils sont connus pour leurs bonne résistance à la corrosion [9].

Ils sont également utilisés en fonderie à cause de leur facilité de moulage [9]. Ils présentent une mauvaise malléabilité, d'où l'inconvénient d'un usinage difficile [9].

Les bronzes sont aussi assez fragiles et moins résistants que les laitons [10].

Les bronzes sont classés en deux groupes [9]:

- Les bronzes de corroyage qui contiennent au plus 4 à 6 % Sn, 0.4% P et 4.5% Pb. Ils sont élaborés sous forme de barres, ressorts, fils, et en général pour la production d'objets devant présenter une bonne élasticité.
- Les bronzes de fonderie qui contiennent une grande quantité de Zinc, de phosphore et souvent de plomb. Ils sont caractérisés par leur mauvaise coulabilité, un faible retrait, une tenue à la corrosion et de bonnes propriétés antifrictions.

**c- Autres alliages de cuivre:**

- **Les cupronickels (Cu-Ni)[7]:**

Ces alliages contiennent 5 à 45% de Nickel et sont surtout connus pour leur résistance à la corrosion par l'eau de mer circulant à grande vitesse.

- **Les mallechorts (Cu- Zn- Ni):**

Ce sont des alliages qui contiennent en moyenne 60% Cu, 30% Zn et 10% Ni [9]. Ils ont des propriétés intermédiaires entre celles des laitons et celles des

cupronickels [7]. Ces alliages sont malléables, ductiles et sont utilisés en horlogerie [10].

- **Les cuproaluminiums (Cu-Al):**

Ils sont des alliages de 6 à 12% d'aluminium, mais celui de 10% est le plus utilisé [11]. Ils résistent bien à la corrosion (marine, sous tension et par fatigue), possèdent de bonnes propriétés mécaniques mais leur élaboration est difficile à cause de la facile oxygénation de l'Aluminium [11]. Ils sont utilisés pour la fabrication de bagues, de sièges de guidage, de roues dentées, etc [9]...

### **I-4- PRINCIPALES IMPURETES DE CUIVRE:**

Contrairement aux éléments d'addition qui sont ajoutés au cuivre pour conférer au métal des propriétés mécaniques ou de fonderie plus intéressantes sans altérer ses qualités électriques, thermiques et de résistance à la corrosion, les impuretés sont des éléments métalliques ou non qui ne sont pas prévus dans la composition chimique de l'alliage et existent toujours car l'affinage ne réussit pas à les éliminer totalement [12].

Théoriquement, chaque impureté a une influence particulière sur le métal et dans certains cas des éléments sont ajoutés intentionnellement pour améliorer certaines propriétés.

Ces impuretés abaissent plus ou moins la conductivité électrique du cuivre, comme le montre la figure n° 1.

## Etude bibliographique

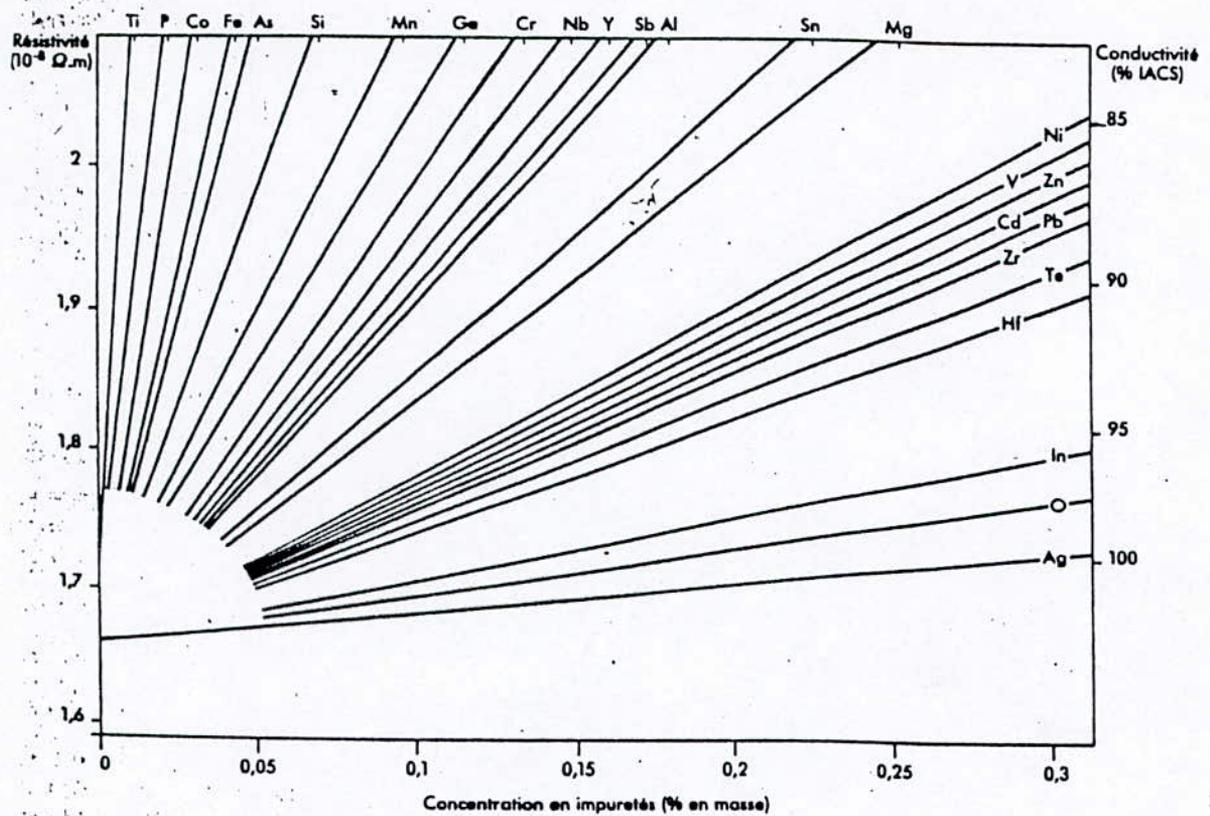


Fig. 1: Influence des impuretés sur la conductivité électrique du cuivre, [8].

L'argent et l'oxygène restent les moins nuisibles à cette conductivité.

Les principales impuretés dans le cuivre sont: l'oxygène, l'argent, le nickel, le plomb, le fer, le phosphore, le Bismuth, le carbone, le Silicium, le Manganèse et le soufre.

L'oxygène et le phosphore jouant un rôle important, méritent une mention particulière.

## Etude bibliographique

### • L'oxygène:

L'oxygène est présent dans le cuivre sous forme d'oxydures et joue un rôle important car il peut atténuer l'effet nocif de certaines impuretés comme le Bismuth [12]. Le cuivre chauffé jusqu'à 300°C, s'oxyde au contact de l'oxygène de l'air suivant la réaction ci-dessous [5]:



Le diagramme d'équilibre cuivre - oxygène (figure 2) indique différents types de structures selon la teneur d'oxygène [13]:

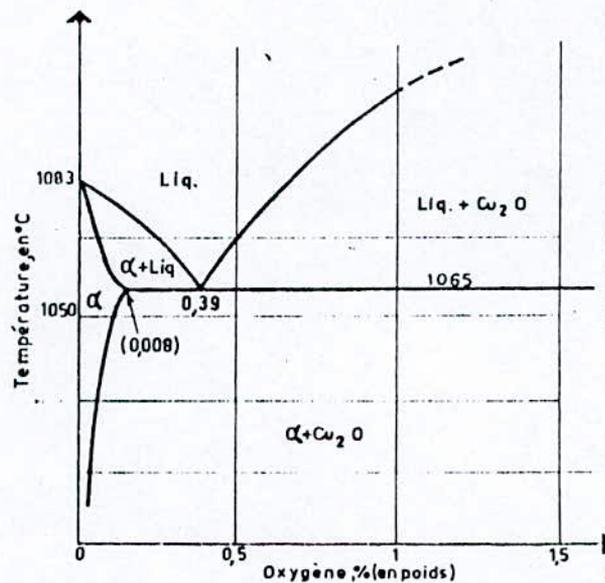


Fig. 2 : Diagramme d'équilibre cuivre - oxygène, [13].

- Une solution solide (phase  $\alpha$ ) jusqu'à 0.008% d'oxygène et à partir de cette teneur et jusqu'à 0.39% d'oxygène, il y a apparition d'un réseau d'eutectique Cu-Cu<sub>2</sub>O en proportions croissantes avec le pourcentage d'oxygène.

## Etude bibliographique

- Pour 0.39 % d'oxygène, la structure est totalement eutectique, et au delà, il y a formation de cristaux de  $\text{Cu}_2\text{O}$  sur un fond d'eutectique.

A la solidification, cet eutectique ( $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$ ) s'isole au niveau des joints de grains et fragilise le matériau [6].

Pendant la fusion, l'hydrogène peut se dissoudre dans le cuivre. Selon Rontgen et Moëller, sous une pression d'hydrogène d'une atmosphère, la solubilité de celui-ci dans 100 g de cuivre augmente régulièrement lorsque la température augmente. Elle subit un brusque accroissement à la température de fusion (figure 3). Cette solubilité peut atteindre  $12 \text{ cm}^3$  par 100 g de cuivre liquide à  $1400^\circ\text{C}$ .

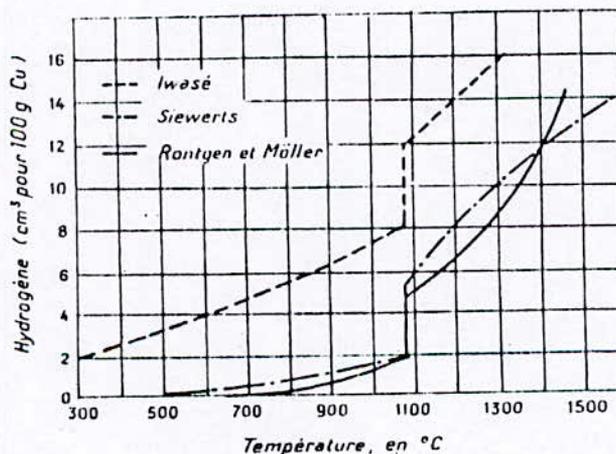


Fig. 3: Solubilité de l'hydrogène dans le cuivre, [15].

Pendant le refroidissement, la solubilité diminue progressivement à l'état liquide, pour devenir **sensiblement nulle à l'état solide**.

## Etude bibliographique

Le rôle de l'hydrogène sert à réduire l'hémi-oxyde de cuivre, à l'état liquide, mais provoque en même temps un dégagement de vapeurs d'eau lors de la solidification, suivant cette réaction [14]:



Cette vapeur d'eau en s'échappant rend le cuivre poreux et fragile.

Ce phénomène est couramment connu sous le nom de "maladie d'hydrogène du cuivre" [12].

A ce stade, pour éviter ce problème, on augmente artificiellement la teneur en oxygène, par soufflage d'air ou de flux oxydants pour diminuer la concentration en hydrogène dans le cuivre [15].

En effet, la figure 4 montre clairement que l'oxygène s'oppose à la mise en solution de l'hydrogène dans le cuivre.

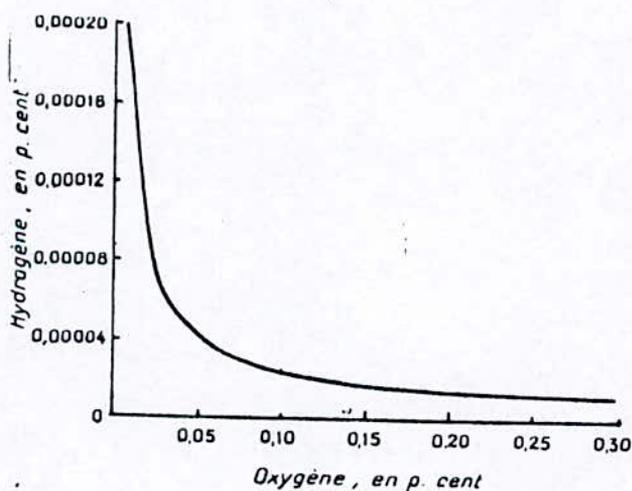


Fig. 4 : Equilibre oxygène - hydrogène, [15].

L'expérience indique que le meilleur équilibre oxygène - hydrogène se trouve aux environs de 0.00003% d'hydrogène et 0.045 à 0.055 % d'oxygène [12]. Cette oxydation artificielle doit s'accompagner, en deuxième étape, d'une désoxydation avec le phosphore par exemple [15].

- **Le Phosphore:**

Il provient du phosphure de cuivre, utilisé pour désoxyder le cuivre [7]. Ainsi la totalité de l'oxygène est fixée sous forme d'oxyde ( $P_2O_5$ ) [3]. Cet oxyde sera par la suite éliminé sous forme de scorie [11].

Ce désoxydant ne coûte pas cher, se dissout facilement dans le cuivre fondu et résiste aussi à la fragilisation par l'hydrogène [1].

Mais un excès en cet élément provoque une fragilisation de l'alliage et un abaissement considérable de la conductivité électrique (figure 1) et thermique [16]. L'expérience montre que moins de 0.05 % de phosphore n'aura pas des conséquences fâcheuses sur les propriétés mécaniques du cuivre mais diminue sa conductivité thermique et électrique (figure 1) [7].

- **Le Silicium [16]:**

C'est un désoxydant très énergique et peut améliorer la coulabilité du cuivre et sa dureté.

- **Le plomb [16]:**

Le plomb est difficilement incorporable car sa densité est élevée ( $11.37 \text{ g/cm}^3$ ), et pour cela, on brasse l'alliage avant coulée ou on ajoute environ 1% de Nickel.

Cet élément présente l'avantage d'un usinage facile.

- **Le Manganèse [16]:**

Il améliore les propriétés mécaniques des laitons et des bronzes en augmentant la compacité de ces deux alliages pour un taux ne dépassant pas 3%.

- **Le Nickel [16]:**

Il affine la structure des alliages cuivreux, augmente leurs dureté et leurs résistances à la corrosion.

- **Le fer [16]:**

Il améliore les caractéristiques mécaniques des alliages cuivreux, mais il est déconseillé dans le cas des bronzes car il crée des points durs.

- **L'argent [16]:**

L'argent n'altère pas la malléabilité du cuivre et n'a pas d'effet néfaste sur sa conductivité électrique (figure 1).

- **Le Bismuth [14]:**

Il se solidifie aux joints de grains et diminue la malléabilité du cuivre même en faibles teneurs.

Par conséquent, il y a formation de films autour des grains et donc gênent la mise en oeuvre.

- **Le Carbone [14]:**

L'oxyde de carbone (CO) peut être utilisé comme un réducteur, mais à noter que le cuivre ne peut absorber qu'une petite quantité en cet élément (CO).

- **Le soufre [14]:**

Le soufre réagit facilement avec le cuivre à l'état liquide et la réaction ci-dessous donne le sulfure "Cu<sub>2</sub>S":



Durant le refroidissement, le SO<sub>2</sub> forme de très petites soufflures qui diminuent le retrait du cuivre.

Mais en général, les pièces coulées auront de bonnes qualités mécaniques.

### II- ELABORATION DES ALLIAGES DE CUIVRE:

La conduite de l'élaboration des alliages cuivreux est dictée par les propriétés métallurgiques du cuivre.

On utilise pour ce fait, des fours à réverbère, fours à creuset et des fours électriques, mais généralement, les plus courants sont électriques car on obtient une qualité de pièces meilleure [17].

Le plus grand problème réside dans la capacité du cuivre à dissoudre des gaz qui, dans certains cas, réagissent sur lui.

Par conséquent, on doit éviter tout contact avec la vapeur d'eau, les hydrocarbures et les gaz de combustion; pour cela [5, 17, 18]:

- Vérifier que les constituants de la charge soient parfaitement secs et sans souillures de graisses d'huiles ou d'hydrocarbures.

Les éléments d'alliage possédant une température de fusion plus élevée que celle du cuivre (chrome, Manganèse, Nickel...) sont introduits sous forme de cupro-alliages, mais les éléments volatils (Zinc, Plomb...) sont introduits juste avant la coulée pour diminuer leur perte en feu.

- La flamme du brûleur doit-être réglée de façon à être légèrement oxydante.
- Le creuset doit-être chauffé au rouge cerise avant de mettre la charge.
- S'assurer de la formation de l'hémi-oxyde de cuivre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) dans le bain car celui-ci diminue la solubilité d'hydrogène et d'oxyde de carbone.

En effet, cette solubilité devient nulle pour uniquement 0.5% d'hémi-oxyde de cuivre (près de 0.05% d'oxygène dans le bain ).

Puis, on doit couvrir le bain d'une épaisseur plus ou moins importante de matières imperméables aux gaz (chlorure de sodium, sable silicieux ou verre pilé).

En finalité, on doit aussi couvrir le creuset.

- Le métal fondu doit-être maintenant protégé par un flux protecteur (charbon de bois par exemple ).

On doit écumer et décanter le bain car certaines impuretés sont dangereuses (Bismuth et le sélénium : un non-métal, par exemple) qui même en très faibles quantités ( $< 0.05\%$ ), rendent le métal très difficilement soudable et fragile à froid.

Selon l'impureté qui se présente, on emploie un procédé spécial. Pour le Bismuth, par exemple, on soumet le cuivre fondu à l'action d'une pression réduite ou on lui fait passer de l'hydrogène, du gaz de houille ou de l'azote, et pour le sélénium, on ajoute au métal fondu, un mélange de carbonate de sodium et de charbon.

Mais en général beaucoup d'additions (Zn, Mg, Si, P, ...) ont été essayées pour désoxyder le bain moyennant un agitateur à cloche ou un ringard.

Pour 0.05% de silicium, on obtient un métal compact et non fragile; on a essayé également le phosphore et le manganèse mais le premier fragilise l'alliage et le second diminue sa coulabilité.

- On doit chauffer préalablement la poche au rouge vif qui reçoit un métal fondu bien écumé.

On veille aussi à la poursuite de la désoxydation au niveau de la poche de coulée avant le transvasement.

### **III- PRATIQUE DE LA FONDERIE DES ALLIAGES CUIVREUX:**

La fluidité du cuivre fondu lui permet d'être coulé facilement mais des dégagements de gaz réducteurs dissous provoquent des pores et des soufflures inévitables, apparaissant sur toute la pièce.

En résumé, le cuivre pur se prête mal au moulage, et souvent, on lui préfère ses alliages.

Il existe plusieurs techniques pour couler les alliages cuivreux:

- Moulage en sable.
- Coulée en coquille par gravité.
- Coulée sous pression
- Centrifugation.
- Coulée continue.

Nous allons détailler la première technique car elle est la plus utilisée.

Il est utile de présenter la méthode par centrifugation (annexe I) car elle a une place privilégiée dans la bibliographie pour les résultats probants qu'elle donne.

### **III-1- MOULAGE EN SABLE:**

Les alliages cuivreux sont coulés dans des moules en sable à vert avec des châssis en fer profilé, en acier, en fonte ou en Aluminium [16].

Les sables de moulage sont à base de silice argileuse humide et contiennent, en moyenne, 10 à 12% d'argile [16].

Les grains de sable doivent être très fins et sphériques car il faut moins d'argile pour les recouvrir, se serrent plus facilement et plus rapidement [19].

Les grains sphériques ont plus d'homogénéité et donnent des interstices (pores) plus gros et plus réguliers et par conséquent, les sables auront une perméabilité meilleure [5].

En général, les sables utilisés ont les caractéristiques suivantes [16]:

- perméabilité : 25 unités A.F.A. au minimum.
- humidité : 5% au maximum.
- Indice de finesse A.F.A: 100 à 120.

Ensuite, on doit laisser reposer le sable préparé pendant 24 heures pour parfaire son homogénéité, laisser l'argile pénétrer à cœur et augmenter sa plasticité.

Pour éviter l'abreuvage, on doit pulvériser sur l'empreinte de l'huile de lin ou de l'huile lourde mélangée à la plombagine (mine de plomb).

Le problème de l'abreuvage est plus accru au niveau des noyaux et on peut le régler par:

- L'emploi de sable à indice de finesse élevé.
- La mise d'une couche d'enduit sur le noyau.

En outre, le serrage du sable est une opération importante qui exige beaucoup de précision car tout excès de serrage provoquerait une perméabilité moins importante [17].

### **a- Tracé des pièces [16]:**

Les règles générales de fonderie doivent - être appliquées soigneusement dans le tracé des pièces cuivreuses.

Ce tracé tient compte surtout du retrait à l'état solide (1.7 % en moyenne ).

Les règles spécifiques au cuivre moulé en sable sont :

#### **-Trous borgnes:**

diamètre minimale = 8 mm et la longueur maximale = 50 mm.

#### **- Trous débouchants:**

diamètre minimale = 8 mm et la longueur maximale = 100 mm.

#### **- Dépouilles :**

2.5 à 3.5 %

### **b- Remplissage et alimentation [17]:**

Le retrait élevé à la solidification est un problème de taille dans la fonderie des alliages cuivreux car il peut provoquer des retassures. On prévoit à cet effet, des masselottes au niveau des points chauds de la pièce et aussi sur chaque attaque de coulée. On peut aussi employer des refroidisseurs pour neutraliser l'action des pôles chauds où ils sont difficiles à alimenter par des masselottes.

Les refroidisseurs doivent-être secs et non oxydés, ainsi qu'on doit éviter à ce qu'ils ne soient pas touchés lors de la coulée.

## **III-2- DEFAUTS DE FONDERIE DES ALLIAGES CUIVREUX:**

Les défauts de fonderie des alliages cuivreux peuvent-être classés en deux catégories:

### **a- Défauts classiques:**

Ce sont des défauts que possèdent en général tous les métaux alliés.

#### **• Soufflures:**

Ce sont des cavités internes ou externes provoquées par un dégagement de gaz à travers l'alliage encore liquide. Les raisons peuvent-être liées à :

- une humidité élevée des moules ou des noyaux.

- un gazage de l'alliage pendant l'élaboration.
- dégagement de vapeur d'eau du sable.
- entraînement de quantités importantes d'air à la coulée et mauvais tirage dans le moule.
- moule d'une perméabilité insuffisante.

- **Gaz dissous:**

L'alliage dissout des gaz et cela par cause:

- d'une mauvaise composition de l'alliage.
- d'une surchauffe du métal coulé.
- d'une fusion du métal trop lente.
- de l'inexistence d'un couvercle pour le creuset.

- **Criques:**

C'est un défaut de surface qui se produit pendant la solidification et qui a la forme d'une petite fissure ouverte.

La cause principale est le retrait dû à une séparation de grains sous l'effet de contraintes anormales.

- **Retassures:**

Elles se présentent sous forme de cavité interne ou externe à paroi rugueuse. Les origines de ce défaut sont nombreuses:

- une température de coulée insuffisante.
- un masselottage insuffisant, mal placé, mal chargé ou mal taillé.
- une contraction du métal lors de sa solidification.
- un tracé défectueux de la pièce.

- b- Défauts caractéristiques:**

Ce sont des défauts qui concernent en particulier les alliages de cuivre et sont les suivants:

- **Ségrégations:**

Séparation partielle de différentes parties homogènes d'un alliage pendant sa liquéfaction. Ce défaut est une conséquence d'une hétérogénéité de la composition chimique de l'alliage et de la concentration des impuretés en différentes parties de la pièce.

- **Liquation:**

La liquation est une séparation par échauffement de deux métaux alliés due à une différence de fusibilité ou à un manque de miscibilité et sinon à une différence importante dans leurs densités.

- **Abreuvage:**

Ce défaut est caractérisé par une pénétration de l'alliage entre les grains de sable et affecte surtout les noyaux.

La surface de la pièce devient rugueuse, sale et inacceptable. les causes sont:

- utilisation d'un sable possédant une granulométrie et une refractairité inappropriées.
- un serrage insuffisant du sable.
- alliage trop fluide à cause de la présence de certains éléments, comme le phosphore dans les bronzes.
- une température de coulée élevée.

#### **IV- TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES CUIVREUX [16]:**

Le traitement thermique appliqué aux pièces de fonderie en cuivre parachevées de cycles thermiques appropriés permet d'obtenir des propriétés spécifiques adaptées à un emploi précis.

Simple ou complexe, le traitement thermique peut engendrer à la fois ou séparément les effets suivants:

- produire des modifications de la nature des constituants qui seront en fin d'opération en équilibre ou hors d'équilibre sans changement important de la composition chimique globale de l'alliage.

- entraîner des modifications structurales de dimension, de la forme et de la répartition des constituants, sans en changer la nature.
- utiliser certaines actions chimiques ou physico-chimiques pour augmenter ou diminuer la teneur de l'alliage en certains éléments ou modifier la nature de certains constituants, sous l'influence d'un milieu extérieur approprié ou de sa pression.
- donner des propriétés particulières aux couches superficielles de la pièce et modifier la répartition et l'intensité des contraintes résiduelles.

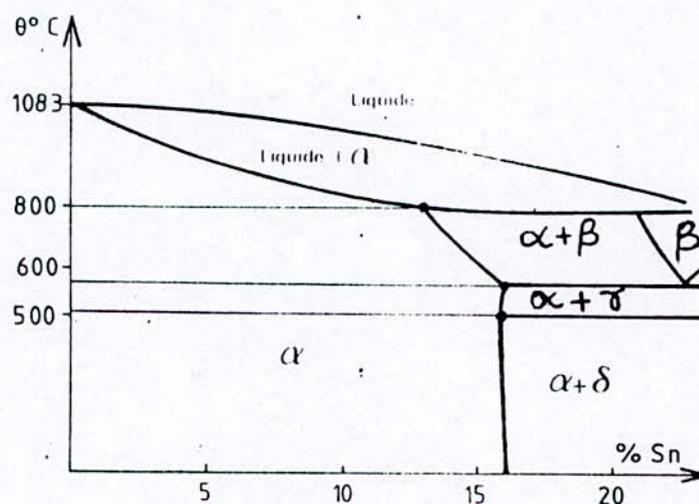
Enfin, il faut tenir compte dans le traitement thermique choisi de l'effet des dimensions de la pièce et de ses propriétés métallurgiques, de la durée de mise en température (durée nécessaire à laquelle la température voulue atteint le coeur ou une partie de la pièce à traiter ) et de la durée du maintien à la température choisie.

Pour les alliages de cuivre les plus utilisés, les traitements thermiques recommandés sont les suivants:

### **IV-1- TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES FORTEMENT ALLIES:**

- **Traitements thermiques des bronzes [16]:**

On utilise un recuit d'homogénéisation plus fréquemment pour faire disparaître le constituant dur et fragile  $\delta$  de formule chimique  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$  (figure 5).



**Fig. 5 : Diagramme d'équilibre Cu-Sn, [16].**

Ce traitement s'opérant de 500 à 600°C permet également d'adoucir les bronzes ayant subi des vitesses de refroidissement élevées.

Par conséquent, nous obtenons pour une teneur en étain supérieure à 8%, une augmentation de la résistance mécanique de l'alliage et de son allongement.

- **Traitements thermiques des laitons [9,11]:**

Il est recommandé d'utiliser deux traitements thermiques: un recuit de recristallisation et un autre de détente.

Le traitement de recristallisation de 600 à 700°C sert à poursuivre les opérations de façonnage, tandis que celui de détente est employé pour faire disparaître les contraintes propres. Ce dernier recuit effectué vers 300°C pendant une heure, atténue l'effet néfaste de ces contraintes internes qui sont à l'origine d'une corrosion fissurante dite "corrosion saisonnière".

- **Traitements thermiques des cupro-aluminiums [11]:**

L'alliage à 10% d'aluminium est le plus utilisé; on lui recommande après chauffage à 800°C, une trempe à l'eau suivie d'un revenu à 600°C.

La trempe martensitique arrête la transformation de la phase  $B$  de formule chimique  $Cu_3Al$  en eutectoïde (figure 6) et le revenu affine l'agrégat.

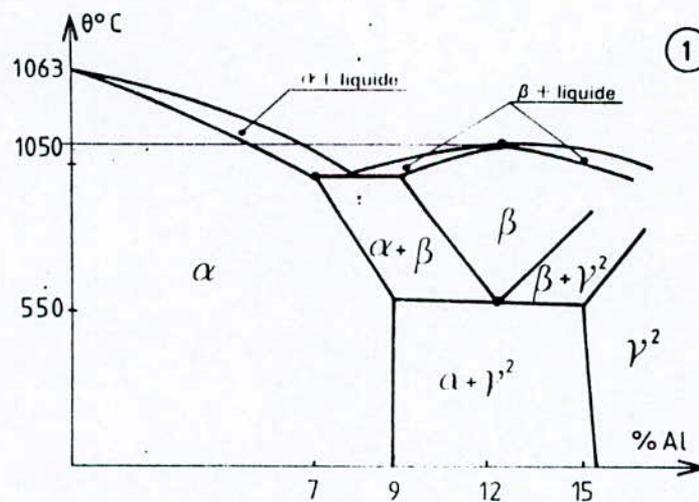


Fig. 6: Diagramme d'équilibre Cu-Al, [16].

Ces traitements thermiques donnent des résultats comparables à ceux d'un acier mi - dur.

### IV-2- TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES FAIBLEMENT ALLIES [4,8]:

Ces alliages présentent un durcissement structural pour certaines nuances (Cu-Cr, Cu-Zn, Cu-Be...), phénomène exploité pour améliorer leurs propriétés mécaniques et électriques.

En fait, le durcissement structural ne se produit que lorsque la solubilité de l'élément d'addition augmente rapidement et fortement avec la température.

Il comprend un traitement thermique de mise en solution (homogénéisation), une trempe et un revenu (précipitation).

- Le traitement de mise en solution consiste à chauffer l'alliage à haute température (750 à 1000°C selon la nuance) pour mettre l'élément d'addition en solution, ce qui permet de disséminer régulièrement les atomes de cet élément au sein du cuivre.

- Ce traitement est aussitôt suivi d'une trempe à l'eau, à l'huile ou à l'air comprimé pour obtenir à la température ambiante une solution solide sursaturée ou métastable et homogène.

L'alliage dans cet état peut subir un façonnement facile à la température ordinaire mais caractérisé aussi par sa mauvaise conductivité électrique et thermique.

- Un revenu qui consiste à chauffer l'alliage à une température peu élevée (300 à 550°C selon la nuance).

Il provoque un retour progressif à l'état initial, donc une réapparition de la seconde phase sous forme de particules.

A ce stade, on améliore les caractéristiques de résistance de l'alliage et ses propriétés thermiques et électriques.

Souvent, le durcissement structural ne suffit pas et un écrouissage est nécessaire pour améliorer certaines propriétés de l'alliage.

## **V- L'EFFET DE L'ECROUISSAGE SUR LES PROPRIETES DU CUIVRE:**

Si on déforme un fil recuit en cuivre et on lui fait subir des pliages alternés, à la température ambiante, on remarque au fur et à mesure que le nombre de pliages augmente, que le métal devient dur: on dit qu'il est écroui [2]

A l'échelle microscopique, l'écrouissage au cours de la déformation plastique, provient d'un déplacement de dislocations sur des plans de glissement actifs [3]. Par conséquent, nous constatons que l'écrouissage provoque des modifications structurales non négligeables sur le métal entraînant certains changements dans ses propriétés.

Métallurgiquement, l'écrouissage correspond à une trempe structurale car le métal est mis dans un état hors d'équilibre dans une structure physico-chimique en équilibre [4].

En effet, le cuivre écroui est caractérisé par la présence d'une très forte densité de dislocations ( $10^8$  à  $10^{12}$  cm/cm<sup>3</sup>), éventuellement des macles mécaniques, des lacunes, des interstitiels et par un changement dans la forme et l'orientation cristalline des grains [14].

L'intérêt d'appliquer un écrouissage aux alliages cuivreux réside dans le fait qu'il est susceptible de modifier leurs propriétés mécaniques, électriques et chimiques [2]:

- Il a pour effet d'augmenter la résistance du cuivre :

Limite d'élasticité, résistance à la rupture (figure 7) et la dureté (figure 8).

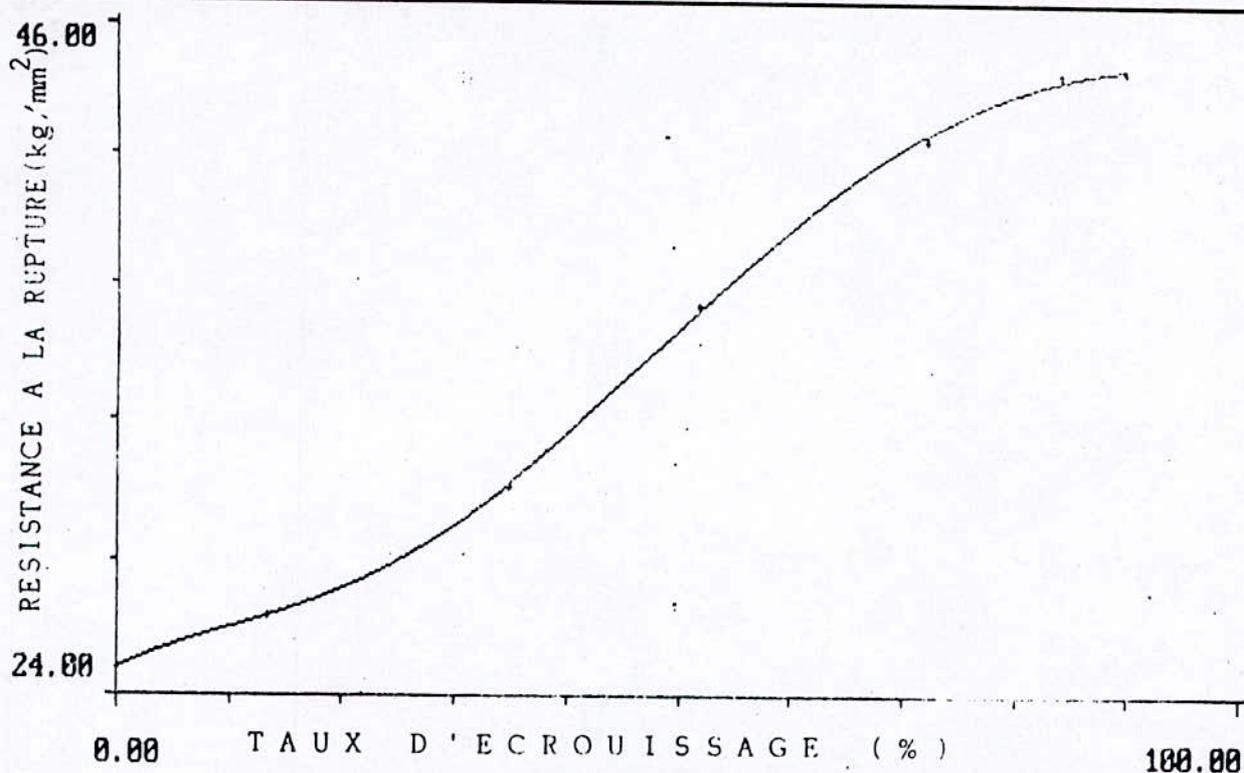


Fig. 7: Variation de la résistance à la rupture du cuivre avec le degré d'écrouissage, [20].

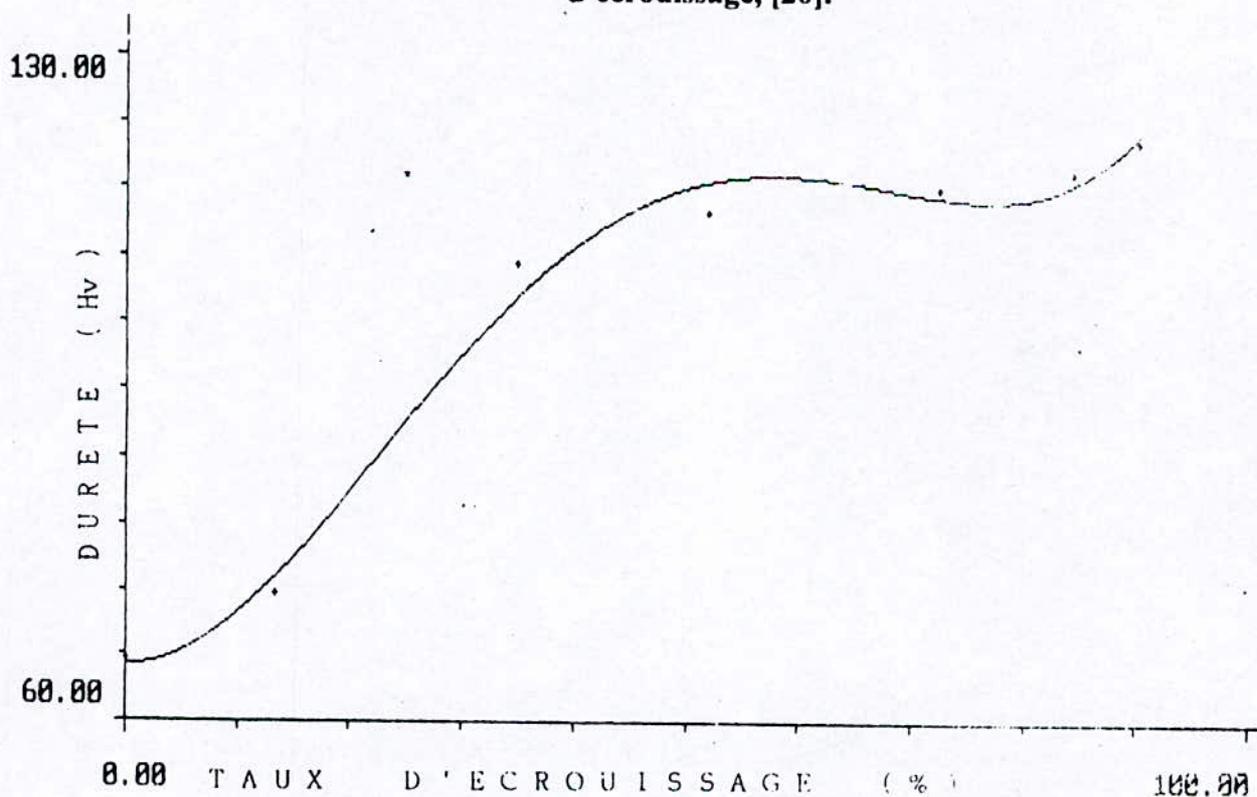
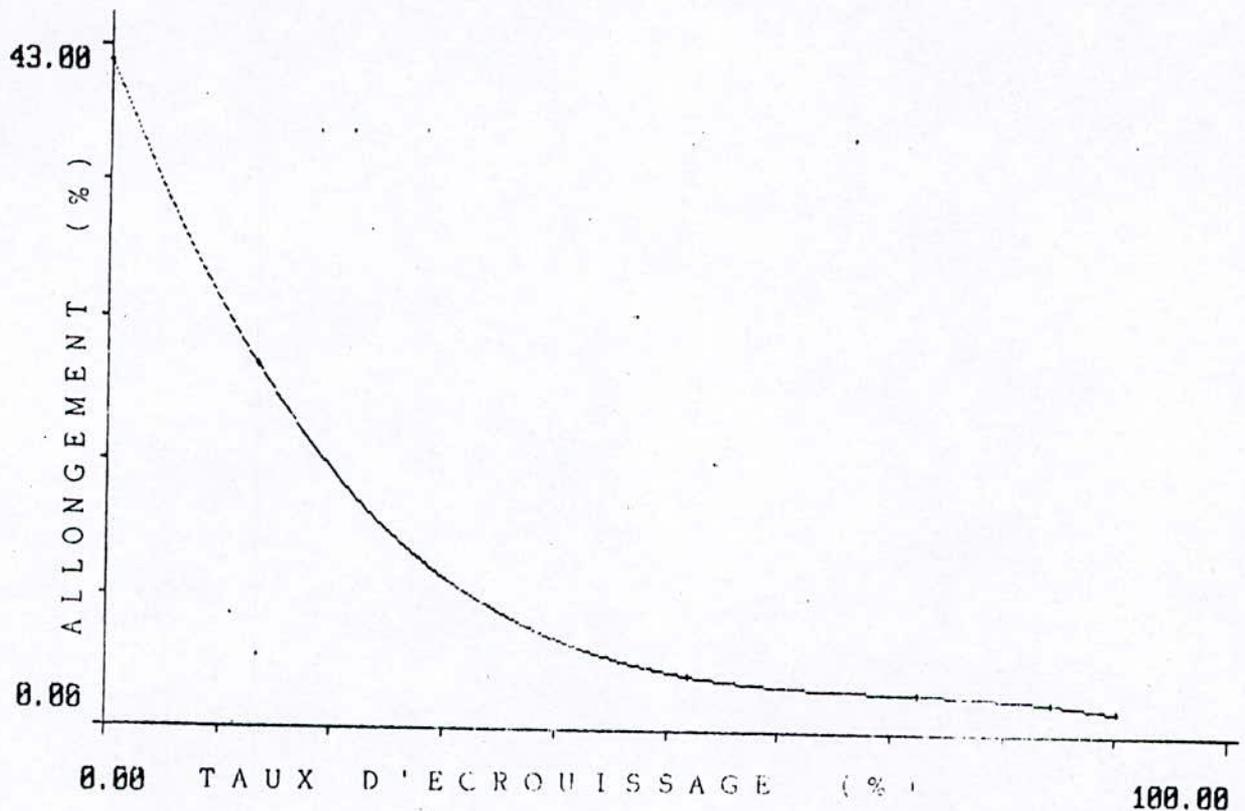


Fig. 8: Variation de la dureté du cuivre en fonction du taux d'écrouissage, [20].

Simultanément, les propriétés de ductilité sont réduites: l'allongement à la rupture (figure 9), la striction et la résilience.

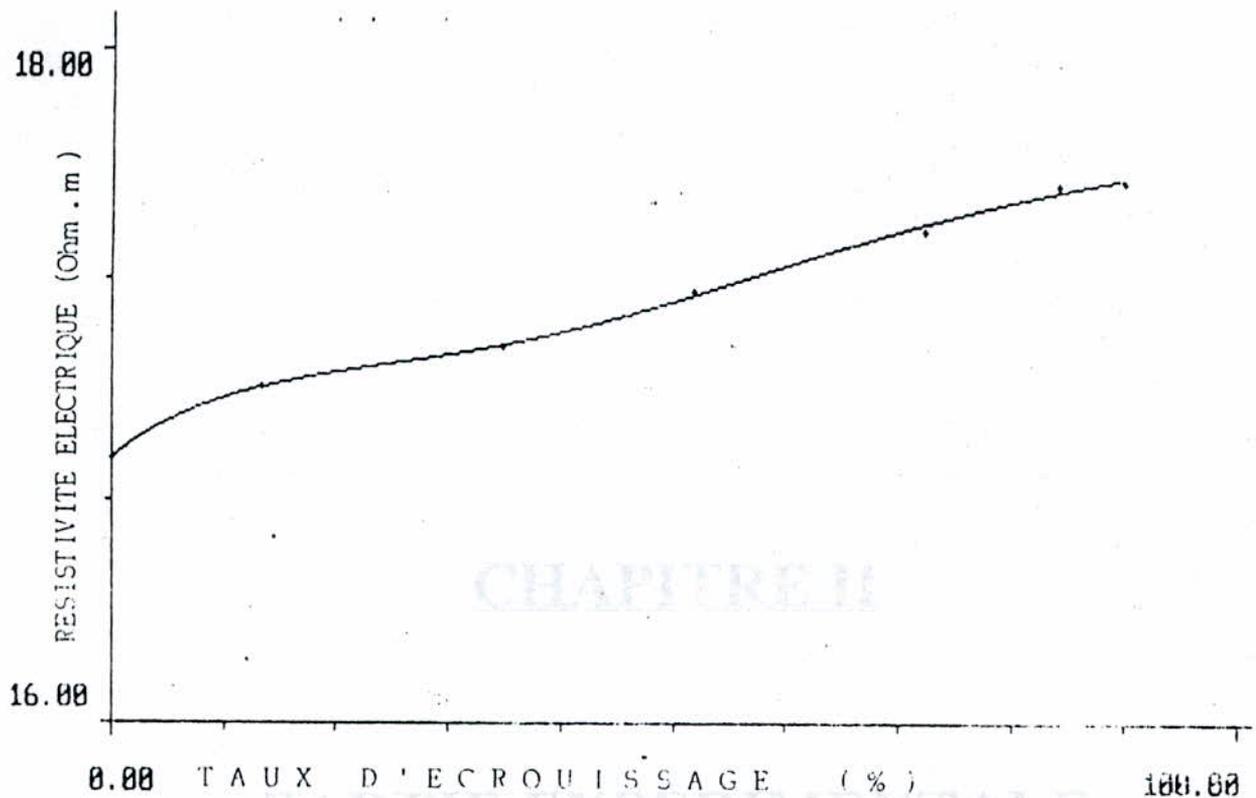


**Fig. 9: Variation de l'allongement du cuivre avec le degré d'érouissage, [20].**

Il faut se garder d'utiliser un érouissage important car il entraînerait la formation d'une texture, qui rend généralement les propriétés du métal anisotropes.

En outre, l'érouissage peut agir sur les propriétés mécaniques des alliages cuivreux à précipitation: la forte densité de défauts modifie les conditions de précipitation (germination et croissance des précipités).

- Il fait augmenter la résistivité électrique du cuivre (figure 10) car celle-ci devient élevée par la présence de défauts ponctuels (intersticiels, mais surtout lacunes) et des dislocations provoquées par la déformation.



**Fig. 10: Variation de la résistivité électrique de cuivre avec le degré d'écrouissage, [20].**

Le métal écroui possède une résistivité dépendant de la température de déformation: plus cette température est basse, plus la résistivité est élevée.

Après déformation, la résistivité décroît rapidement par élimination des lacunes et ensuite beaucoup plus lentement par élimination très partielle des dislocations.

- L'écrouissage peut accroître faiblement la susceptibilité du métal à la corrosion. En effet, il peut avoir un effet indirect sur la corrosion du métal:
  - l'écrouissage engendre des contraintes internes, responsables d'une corrosion sous tension.
  - la présence de ségrégations ou de précipités formés dans la structure écrouie peut entraîner des phénomènes de vieillissement.

Pour mener à bien l'élaboration de l'alliage de cuivre pouvant servir comme matière de base de la roue de soudage, nous avons d'abord analysé la roue d'origine (décrite en annexe II), tant pour connaître sa composition chimique, sa microstructure que sa dureté, propriétés qui nous permettent d'avoir une idée sur les post-traitements à effectuer.

En deuxième lieu, nous allons essayer d'élaborer localement un alliage possédant des propriétés proches de l'alliage de la roue d'origine.

La matière élaborée sera également caractérisée, du point de vue microstructure et dureté.

En vue d'améliorer certaines propriétés de l'alliage élaboré, nous réaliserons un post-traitement thermique.

Par ailleurs, nous avons caractérisé des échantillons prélevés sur une roue, produit d'une élaboration qui n'a pas réussi, réalisé par la SNTF. A toute fin utile, les résultats sont présentés en annexe III.

### **I- CARACTERISATION DES ECHANTILLONS PRELEVES SUR LA ROUE D'ORIGINE:**

#### **I-1- Prélèvement des échantillons:**

On prélève quelques échantillons de la roue d'origine moyennant une fraiseuse. Ces échantillons sont découpés sous forme de petits morceaux (épaisseur moyenne: 1 à 1.5 cm) et à section triangulaire. Lors du découpage, on note déjà que la matière paraît assez dure.

Les échantillons découpés sont maintenant surfacés jusqu'à l'obtention d'une surface plane et lisse par une fraiseuse.

#### **I-2- Analyse chimique:**

L'analyse chimique est une étape importante de caractérisation car elle permet de donner avec précision la teneur des éléments existants dans l'alliage.

## Etude expérimentale

---

Cette analyse, réalisée par l'unité CEEFAMETAL, détermine la teneur en moyenne, de chaque élément par dosage volumétrique.

Nous avons demandé à ce que l'on dose les éléments les plus cités dans la bibliographie, souvent utilisés pour l'élaboration de la matière des électrodes de soudage.

Les résultats de cette analyse chimique sont donnés par le tableau suivant:

Elément	Cu	Cr	Ni	P	Fe
teneur massique (%)	98.44	0.66	< 0.1	—	—

Il s'agit d'un alliage de cuivre à environ 0.7% de chrome.

C'est le type de cuivre faiblement allié qui se prête au durcissement structural par précipitation.

### **I-3- Essai de dureté:**

La méthode Rockwell d'échelle B convient au cuivre et à ses alliages. On utilise comme corps pénétrant un cône en diamant à pointe arrondie (angle au sommet est de 120°) avec une charge de 100 KgF.

La bille est en acier trempé et qui fait 1.5875 mm.

Le duromètre utilisé est à affichage direct digital de la dureté. Les échantillons pris de la roue d'origine sont plans et bien polis. Cet essai est effectué sur plusieurs plages différentes et éloignées.

### **I-4- Observation micrographique:**

Les observations micrographiques des alliages cuivreux nécessitent un bon polissage, un choix précis du type du réactif chimique pour l'attaque et un recours à plusieurs essais pour le choix adéquat du temps de l'attaque chimique.

Ces alliages sont aussi très sensibles à l'action abrasive des papiers de polissage, d'où la nécessité d'effectuer soigneusement le polissage. Ce dernier a été réalisé avec des papiers abrasifs de finesse progressive suivante: 120, 320, 600, 1000 et 1200.

Les surfaces deviennent lisses et brillantes en terminant le polissage sur un tapis imbibé d'une patte diamantée dont la taille des particules en suspension est de 6  $\mu\text{m}$ .

L'échantillon d'origine a été attaqué par trois réactifs chimiques préparés selon les proportions suivantes [21, 22]:

<b>Réactif n° 1</b>	- Acide chlorydrique (HCl). - Chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ) à 6 $\text{H}_2\text{O}$ . - Eau distillée ( $\text{H}_2\text{O}$ ).	25 ml 8 g 100 ml
<b>Réactif n° 2</b>	- Ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). - Eau distillée ( $\text{H}_2\text{O}$ ). - Eau oxygénée ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) à 30%.	50 ml 50 ml 20 ml
<b>Réactif n° 3</b>	- Acide chlorydrique (HCl). - Dichromate de potassium ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) saturé en eau.	5 ml 100 ml

Seul le dernier réactif (n°3) a donné de bons résultats après une attaque chimique relativement longue (15 minutes).

L'échantillon rincé à l'eau distillée puis séché est alors observé au microscope optique.

On effectue des prises de photos à différentes plages éloignées et à grossissements différents.

## II- ELABORATION DE L'ALLIAGE DE CUIVRE:

L'électrode de soudage est lourde avec un diamètre maximum de 61 cm. Il est donc plus sage d'essayer de réaliser de petites roues ayant la forme de l'électrode, ne

## Etude expérimentale

---

consommant pas beaucoup de matières premières et ne nécessitant pas beaucoup de sable, car celles-ci seront élaborées par moulage en sable.

Des galets de recuit en cuivre servent de matières premières pour réaliser ces petites roues.

Les résultats de l'analyse chimique, effectuée par dosage volumétrique, sur deux échantillons de cette matière première sont les suivants:

Elément chimique	Cu	Cr	Ni	Fe	P
% massique	98.68	0.71	< 0.1	—	—

Cet alliage a une composition chimique proche de celle de l'alliage de la roue d'origine.

Par conséquent, nous allons élaborer de petites roues grâce à cette matière première, puis caractériser celle qui apparaît qualitativement meilleure.

### **II-1- Mode opératoire d'élaboration par moulage en sable:**

#### **a- Dispositifs d'élaboration:**

- **Creuset:**

Nous disposons d'un four à creuset métallique à gasoil, de 680 mm de hauteur et de 515 mm de diamètre. Ce creuset est à 800 points (peut contenir 800 Kg de Bronze liquide). Il est couvert à l'intérieur par une matière réfractaire: pizé.

Le four ne fonctionne qu'à une seule température qui dépasse légèrement 1400°C. Cette température peut provoquer un surchauffage du métal et par conséquent une oxydation beaucoup plus accrue.

Le four ne dispose pas de son couvercle naturel, chose qui a été solutionnée partiellement par l'emploi d'une tôle épaisse en acier pour diminuer la pénétration de l'air lors de la fusion.

On couvre aussi, à l'intérieur, la poche de coulée par le pizé.

- **Dispositifs de moulage en sable:**

Pour le moulage, nous avons utilisé de petits châssis d'acier, de forme circulaire et rectangulaire et deux qualités de sable.

- Le sable de moulage utilisé usuellement par la SNTF, dont les caractéristiques ne sont pas bien définies; c'est le mélange de sable naturel à grains relativement gros, et d'argile à des taux imprécis.

- Le sable de moulage utilisé par la SNVI qui possède les caractéristiques suivantes:

- Indice de finesse: 55 à 60.
- Argile : 8.62 % .
- Humidité : 4 à 4.2 %.

- b- Moulage, fusion de la matière première et désoxydation:**

La pièce à obtenir est de forme circulaire ayant un creux rond au milieu. Pour cela, nous avons utilisé un modèle en Aluminium de diamètre 110 mm et d'épaisseur 25 mm.

Pour matérialiser la forme intérieure creuse de la pièce, on a utilisé un noyau en sable (30 mm de diamètre).

On lui prévoit une portée pour éviter qu'il soit entraîné par le métal liquide.

Le sable a été préparé de trois manières différentes:

- Sable de SNVI à vert (sans chauffer).
- Sable de SNVI à sec (chauffage ultérieur).
- Sable de SNTF à sec (chauffage ultérieur).

## Etude expérimentale

---

Le four à creuset a été mis en marche ; on évite de mettre la charge à l'intérieur tout de suite pour deux raisons:

- permettre au four d'atteindre sa température de marche.
- permettre au four de brûler les impuretés qui restent souvent sur les parois, lors des fusions antérieures.

Une fois devenu rouge cerise, on met la charge (matière première) à l'intérieur et le trou supérieur du four est couvert aussitôt par la tôle.

Grâce à une barre métallique, on vérifie à chaque fois la fusibilité de la charge. Devenue liquide, un mouvement rapide de rotation de 45° du creuset nous permet de décrasser le bain moyennant un ringard.

C'est une opération rapide pour éviter un éventuel surchauffage du bain.

On a utilisé le phosphore comme désoxydant dont la teneur ne doit pas dépasser 0.05 % par rapport à la charge [7].

Ce phosphore se trouve à l'état combiné ( $\text{Cu}_3\text{P}$ ).

La plus grande quantité de désoxydant doit - être mélangée à l'alliage liquide, après décrassement.

Après transvasement, le reste est ajouté dans la poche de coulée, car l'oxydation des alliages cuivreux se fait d'une manière plus importante pendant le chauffage.

Nous avons mis, avant le transvasement, 150 g de phosphure de cuivre ( $\text{Cu}_3\text{P}$ ) pour 56 Kg de charge. Ce composé chimique fond facilement et grâce au ringard, on mélange convenablement la nouvelle composition.

A travers l'orifice inférieure du creuset, on verse le métal fondu rapidement dans la poche déjà préchauffée.

On poursuit la désoxydation dans la poche, en ajoutant 50 g de  $\text{Cu}_3\text{P}$ .

Enfin, on effectue la coulée à travers les trous de coulée en sable. On laisse refroidir les pièces dans leurs châssis respectifs, puis pendant près d'une heure, on procède au démoulage.

### c- Pièces coulées par deux procédés différents:

On réalisera six pièces dont trois sont obtenues par coulée en source tangentielle et trois autres en chute mixte.

Pour chaque procédé de coulée, on utilisera les trois types de sable précédents.

#### c-1- Coulée en chute Mixte:

Dans cette technique de moulage, nous avons utilisé deux châssis:

- Le châssis supérieur contient deux trous: l'un pour le jet du métal liquide et l'autre pour garantir le remplissage complet de l'empreinte. Les deux évènements sont utilisés pour évacuer les gaz.
- Le châssis inférieur contient l'empreinte de la pièce et le noyau avec sa portée. On met une poudre en talc sur le moule pour éviter l'abreuvage et consolider la surface du sable.

Les deux châssis sont superposés et une charge au dessus du châssis d'en haut assure leur serrage.

On a réalisé une coulée en chute mixte (figure 11):

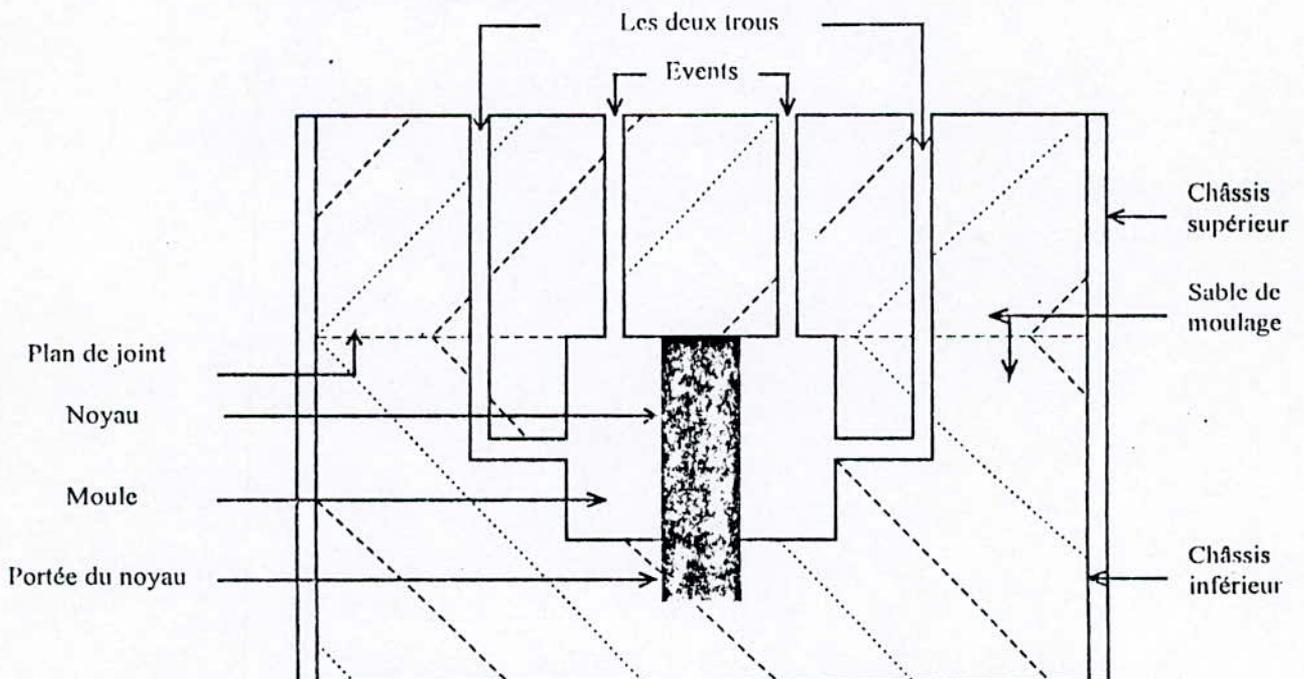
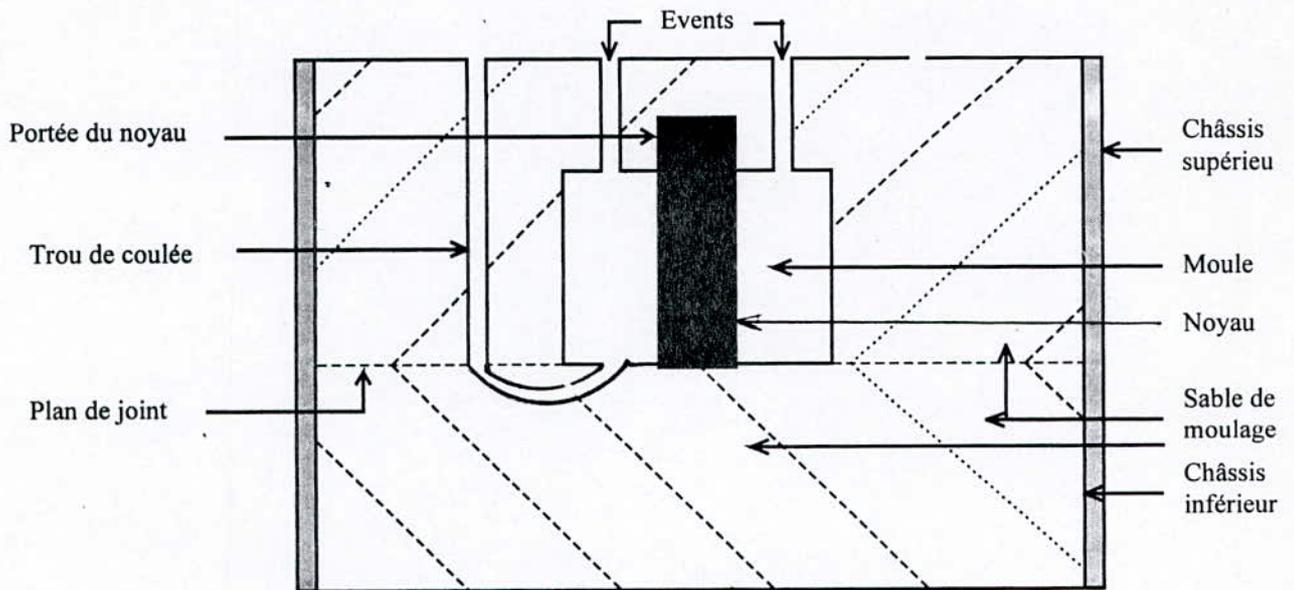


Fig. 11: Pièce coulée en chute Mixte.

### c-2- coulée en source tangentielle:

Pour ce mode de coulée, le remplissage s'effectue par le haut du moule.

Le métal surgit à la partie inférieure de l'empreinte et son niveau monte progressivement jusqu'au remplissage de l'empreinte, comme schématisé par la figure 12:



**Fig. 12: Schéma d'une pièce coulée en source tangentielle.**

### III- POST-TRAITEMENTS DE L'ALLIAGE BRUT DE COULEE:

L'alliage brut de coulée, après l'élaboration, doit subir quelques traitements thermiques pour améliorer certaines de ses propriétés.

Ce cuivre faiblement allié au chrome présente un durcissement structural, phénomène qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques et électriques du métal élaboré.

Le diagramme d'équilibre du cuivre - chrome (figure 13) permet de comprendre la possibilité de durcissement structural pour cet alliage.

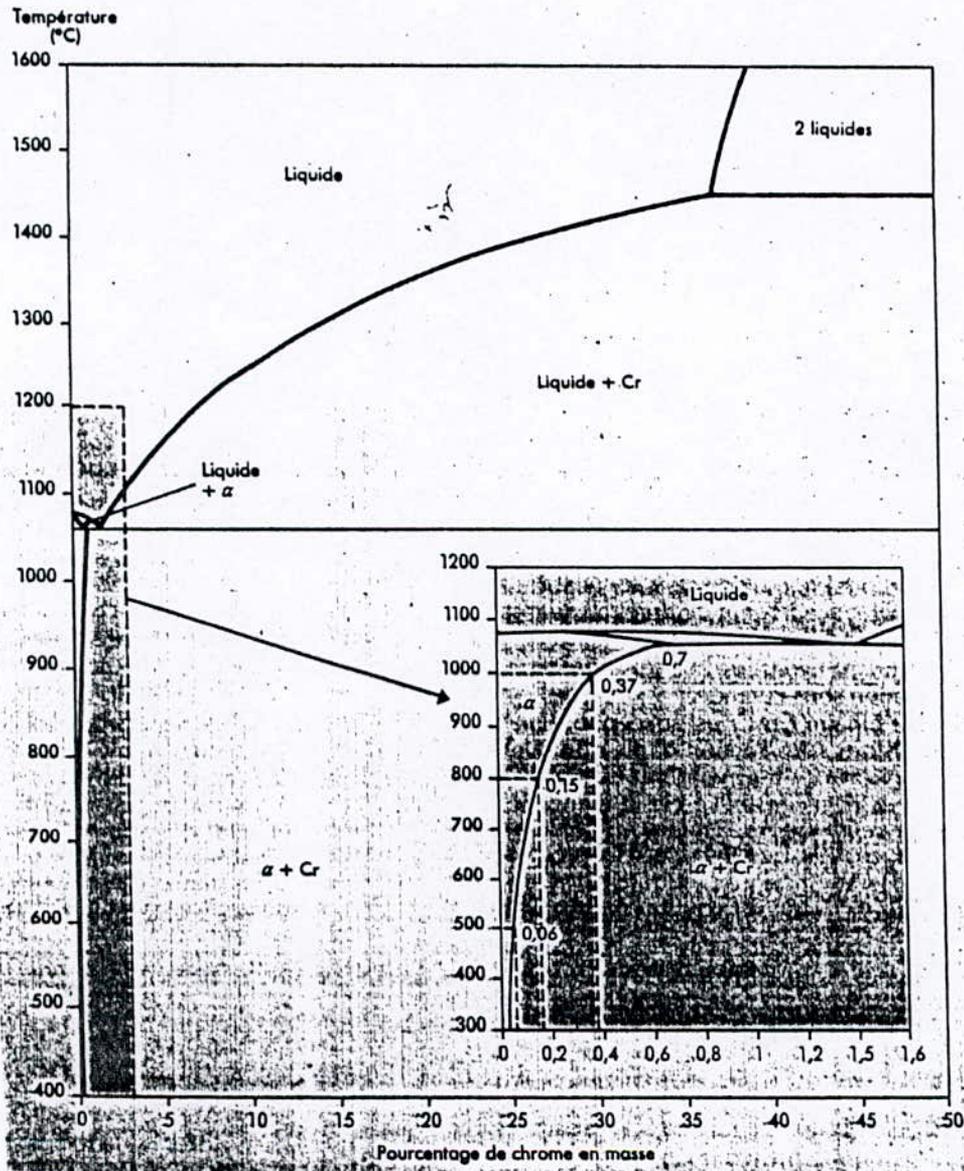


Fig. 13: Diagramme d'équilibre Cu-Cr, [8].

A 1000°C, 0.37% de chrome se trouve en solution solide ( $\alpha$ ).

On rentre donc dans le domaine monophasé  $\alpha$  qui possède une solubilité maximale de 0.70% de chrome à environ 1050°C.

La forte présence du chrome (0.37%) abaisse la conductivité électrique de l'alliage à 35% IACS.

Par trempe depuis 1000°C jusqu'à la température ambiante, la phase  $\alpha$  est figée et donc sursaturée en chrome.

Le retour à l'équilibre de la concentration en élément de chrome s'effectue lors du revenu (500°C) grâce à la diffusion du chrome à travers la maille cristalline de la solution solide riche en cuivre, provoquant des déformations du réseau cristallin. Ces déformations provoquent des contraintes que l'on retrouve sous forme de propriétés mécaniques améliorées.

Ce revenu se traduit également par une expulsion du chrome hors de la solution solide, et de ce fait, il reste moins de 0.06% de chrome avec une nette remontée de la conductivité électrique (80% IACS) [8].

Dans notre cas, les échantillons ont subi deux types de traitements thermiques:

- **Traitement thermique de mise en solution suivie d'une trempe (T) [22,23]:**

Nous avons chauffé au four électrique quelques échantillons à 1000°C pendant une durée de 30 minutes.

La durée écoulée, on trempe à l'eau les échantillons pour figer leurs structures.

- **Traitement thermique de précipitation ou revenu (R) [22, 23]:**

Ce traitement thermique consiste à réchauffer les échantillons déjà trempés. La température est fixée à 500°C pour une durée d'une heure. Puis, on effectue une trempe rapide à l'eau.

## **CHAPITRE III**

# **RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

### I- RESULTATS DE LA CARACTERISATION DES ECHANTILLONS PRELEVES SUR LA ROUE D'ORIGINE:

#### I-1- Résultats de l'essai de dureté:

Les résultats de l'essai de dureté sur cet alliage de cuivre à 0.70 % de chrome sont:

HRB	71.0	74.0	75.2	77.1
( $\phi_{\text{bille}} = 1.5875\text{mm}$ et $P = 100 \text{ KgF}$ ).				

La dureté moyenne est de 74.3 HRB qui est relativement élevée.

#### I-2 Micrographie:

Les microstructures (figures 14 et 15) montrent clairement la présence de macles, caractéristique d'une structure de recuit.



**Fig.14: Microstructure de l'échantillon d'origine, attaqué au réactif n° 3 pendant 15 minutes (x 200).**



**Fig. 15: Microstructure de l'échantillon d'origine, attaqué au réactif n° 3 pendant 15 minutes (x 400).**

En effet, les métaux de structure C.F.C dont l'énergie de défaut d'empilement n'est pas trop forte, comme le cuivre, sont caractérisés par la présence de macles de recuit qui se forment pendant la recristallisation et surtout lors de la croissance des grains [24].

Ces macles apparaissent sous forme de lamelles qui peuvent traverser les grains.

Notons l'apparition d'une seconde phase (chrome ou  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) sous forme de particules fines globulées, particulièrement aux joints de grains mais aussi à l'intérieur du grain (figure 16).



**Fig. 16: Microstructure de l'échantillon d'origine, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 1000).**

Pour trancher avec exactitude sur l'identité de cette phase, une microanalyse au M.E.B. ou une diffraction X est indispensable, ce que nous n'avons pas pu faire malheureusement.

### **Conclusion:**

Cet échantillon prélevé sur la roue d'origine a certainement subi un traitement thermique, vu la présence des macles de recuit.

## Résultats et interprétations

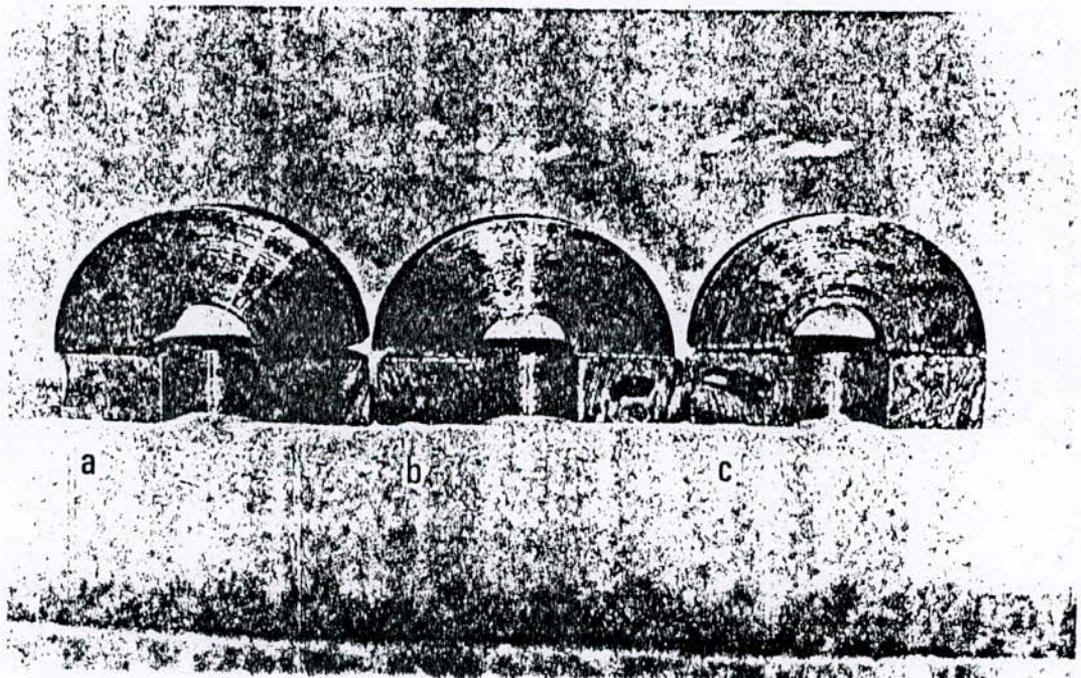
---

Traitement qui a affiné la structure, fait d'ailleurs conforté par la forte dureté enregistrée.

### II- RESULTATS DE L'ELABORATION:

#### II-1- Pièces obtenues par coulée en chute mixte:

Les trois pièces obtenues par ce mode de coulée, sont surfacées grâce à une fraiseuse. Ces pièces sont coupées au milieu dans des endroits suspectés et sont présentées sur la figure n°17.



**Fig. 17: Photographie des pièces coulées en chute mixte avec:**

- a- Sable de moulage à vert de SNVI.**
- b- Sable de moulage à sec de SNVI.**
- c- Sable de moulage à sec de SNTF.**

## Résultats et interprétations

Ces pièces sont caractérisées par:

- La présence de soufflures et de piqûres sur la surface à de faibles proportions.
- La pièce obtenue par le sable de la SNTF est caractérisée par une cavité interne au niveau de l'attaque à parois rugueuses et qui perce dans le sens de la largeur.
- Les pièces obtenues par le sable de la SNVI (à vert et à sec) sont caractérisées par la formation d'une cavité interne à parois rugueuses, au niveau de l'attaque et s'étale longitudinalement.

Par conséquent, ces trois pièces sont rejetées.

Nous pensons que la raison principale de cette défaillance est imputable au mode de coulée (figure 18).

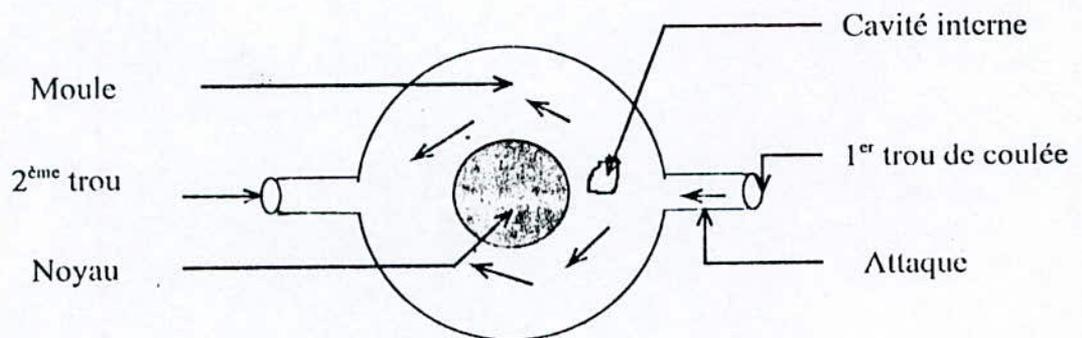
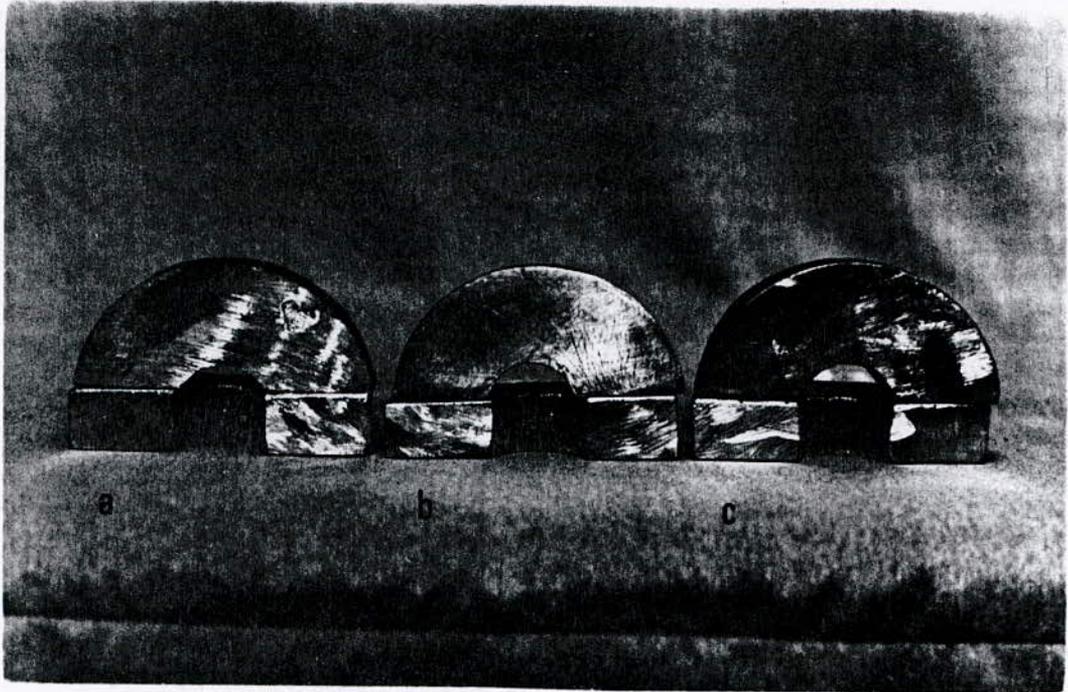


Fig. 18: Vue de dessus d'une coulée en chute mixte .

En effet, le métal arrivant d'une façon turbulente prend deux directions différentes et peut être évacué par le deuxième trou, formant ainsi un détachement du métal lors de la solidification, provoquant ainsi une cavité interne juste au niveau de l'attaque.

### II-2- Pièces obtenues par coulée en source tangentielle:

Les trois pièces obtenues par cette technique sont surfacées à l'aide d'une lime et coupées par une scie à métaux. Le résultat de cette coulée est donné par la figure n°19.



**Fig. 19: Photographie des pièces coulées en source tangentielle avec:**

**a- Sable de moulage à sec de SNTF.**

**b- Sable de moulage à vert de SNVI.**

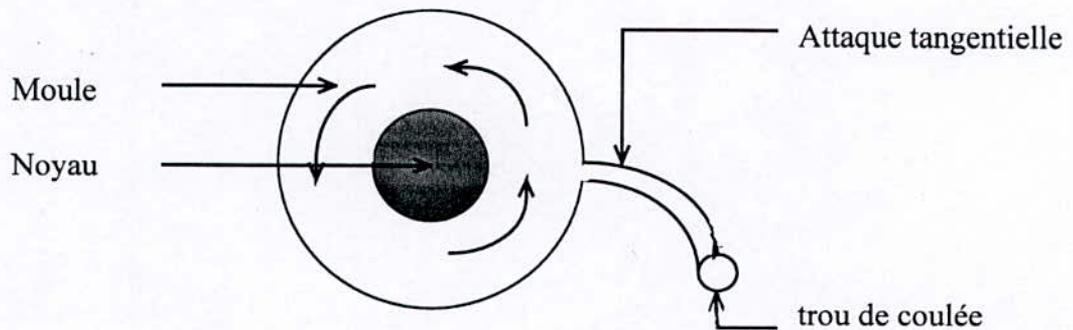
**c- Sable de moulage à sec de SNVI.**

Ces pièces ont à la surface de petites soufflures mais ne présentent pas de gros pores.

Celle obtenue par le sable de la SNTF (figure 19-a) présente une cavité interne juste au niveau de l'attaque de coulée, due probablement à la qualité du sable, et elle est par conséquent rejetée.

Ce mode de coulée a donné de meilleurs résultats que le précédent, la morphologie externe des pièces obtenues y est plus homogène avec beaucoup moins de soufflures, ce que nous expliquons à priori par le fait que la pièce étant circulaire, l'attaque tangentielle de la coulée utilisée provoque un mouvement de rotation de

l'alliage jusqu'à remplissage complet de l'empreinte, comme schématisé par la figure n°20:



**Fig. 20: Vue de dessus d'une attaque en source tangentielle.**

### **Choix de la meilleure pièce:**

Au terme d'une observation à la loupe des deux pièces coulées en source tangentielle au sable sec et l'autre au sable vert de la SNVI, nous avons opté pour cette dernière, qui présente le moins de soufflures.

### **III- RESULTATS DE LA CARACTERISATION DE LA PIECE CHOISIE:**

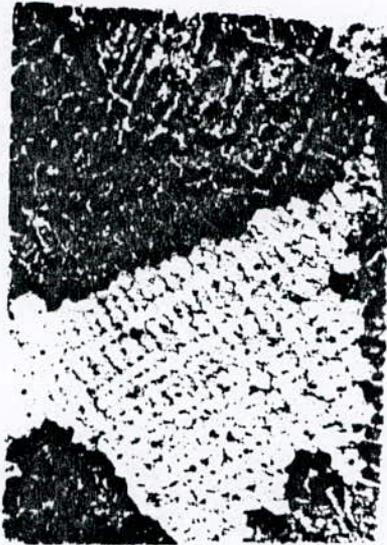
La pièce choisie (sable de SNVI à vert et coulée en source tangentielle ) est caractérisée à l'état brut de coulée, sans aucun post-traitement.

Nous avons procédé à la double étude de la microstructure et de la dureté.

Il nous semble utile de souligner qu'au cours des prélèvements des échantillons de la pièce choisie, nous n'avons pas relevé la présence de soufflures en volume.

#### **III-1- Observation micrographique:**

Les micrographies des figures n°21 et 22 présentent une structure dendritique, caractéristique d'un matériau coulé.



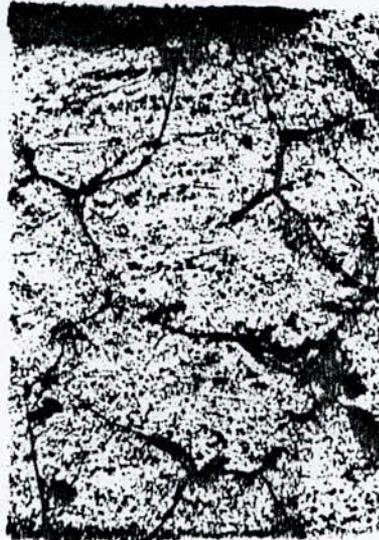
**Fig. 21: Microstructure de l'échantillon élaboré, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 50).**



**Fig. 22: Microstructure de l'échantillon élaboré, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 100).**

## Résultats et interprétations

La microstructure de la figure n°23, nous renseigne sur la présence de petits nodules distribués sur les joints de grains mais également à l'intérieur des grains.



**Fig. 23: Microstructure de l'échantillon élaboré, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 400).**

Ces petites particules pourraient-êtré du chrome sous forme de précipités ou d'oxyde de cuivre ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ).

### **III-2 Résultats de l'essai de dureté:**

Les mesures de dureté HRB ( $\phi_{\text{Bille}} = 1.5875 \text{ mm}$ ,  $P = 100 \text{ KgF}$ ) sur plusieurs plages sont données par le tableau suivant:

<b>HRB</b>	12.0	12.6	13.4	15.0	15.6
------------	------	------	------	------	------

La dureté moyenne est de 13.7 HRB.

## Résultats et interprétations

---

La faible dureté enregistrée s'explique aisément par la grosseur des grains. Cette structure peut s'affiner par des traitements thermiques qui donneront une dureté meilleure.

### **IV- RESULTATS DES POST - TRAITEMENTS SUR LA PIECE CHOISIE:**

Nous allons mettre en évidence l'influence des post-traitements thermiques sur le métal élaboré.

L'influence de ces traitements, décrits dans la partie expérimentale, portera sur la dureté et la microstructure du métal élaboré.

#### **IV- 1- Résultats du traitement thermique de la mise en solution suivie d'une trempe (T):**

L'échantillon chauffé à 1000°C pendant 30 minutes puis trempé à l'eau présente au terme de l'essai de dureté les résultats suivants:

<b>HRB</b>	15.4	17.1	20.9	22.4
( $\phi_{\text{Bille}} = 1.5875 \text{ mm}$ , $P = 100 \text{ KgF}$ ).				

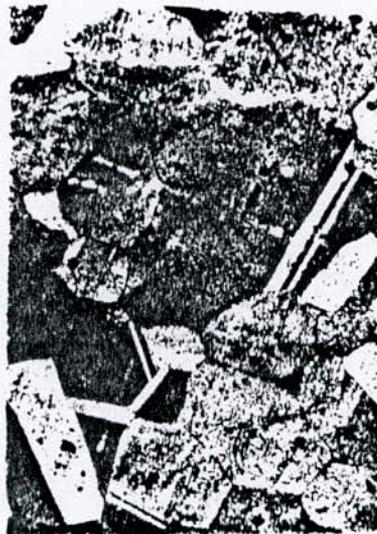
La dureté moyenne est de 18.9 HRB qui est supérieure à celle de l'état brut d'élaboration.

#### **IV-2- Résultats du traitement thermique de précipitation ou revenu (R):**

##### **a- Observation micrographique:**

L'échantillon trempé à l'eau après 30 minutes à 1000°C puis chauffé à 500°C pendant 1 heure présente les caractéristiques suivantes:

- Les microstructures (figures n°24 et 25) montrent clairement la disparition de la structure dendritique.



**Fig. 24:** Microstructure de l'échantillon élaboré, trempé à partir de 1000°C et revenu à 500°C, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 200).



**Fig. 25:** Microstructure de l'échantillon élaboré, trempé à partir de 1000°C et revenu à 500°C, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 400).

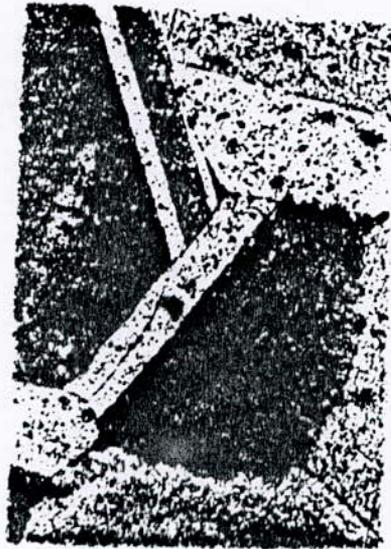
## Résultats et interprétations

---

Cette structure dendritique est substituée par de nouvelles structures granulométriques avec apparition de macles, caractéristique d'un matériau recuit.

Ces macles sous forme de lamelles sont orientées d'une façon aléatoire.

Notons la présence de nodules minuscules (de chrome ou de  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) entre des grains et sur leurs joints, comme le montre le fort grossissement de la microstructure de la figure n° 26.



**Fig. 26: Microstructure de l'échantillon élaboré, trempé à partir de 1000°C et revenu à 500°C, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 1000).**

Notons que la microstructure de l'alliage que nous avons élaboré (figure n°27) ressemble beaucoup à celle de l'alliage de la roue d'origine (figure n°28), mais avec des grains relativement plus gros.



**Fig .27: Microstructure de l'échantillon élaboré après traitements thermiques, attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 50).**



**Fig. 28: Microstructure de l'échantillon d'origine , attaqué au réactif n°3 pendant 15 minutes (x 50).**

### b- Essai de dureté:

Cet essai a permis d'enregistrer les valeurs suivantes:

HRB						
( $\phi_{\text{Bille}} = 1.5875 \text{ mm}$ , $p = 100 \text{ KgF}$ )	22.0	22.2	23.3	23.4	24.6	25.7

La dureté moyenne est passée de 18.9 à 23.5 HRB, qui correspond à un durcissement important du métal.

La dureté reste insuffisante malgré le double traitement thermique (T + R ) effectué, fait d'ailleurs confirmé par l'observation micrographique qui a révélé des grains relativement gros.

### IV- 3- Résultats relatifs aux autres traitements : écrouissage [23]:

Bien que cette essai n'ait donné de résultats concluants, nous avons jugé utile de les présenter quand même, parce que l'écrouissage en soi permet d'augmenter les

propriétés mécaniques de l'alliage d'une part et de renfermer éventuellement les petites soufflures imputables à l'élaboration par coulée .

L'écrouissage a été simulé par des coups de marteau sur le métal chauffé. Sachant l'épaisseur initiale ( $h_0$ ) de l'échantillon et voulant un taux d'écrouissage de 40%, nous pouvons calculer l'épaisseur finale voulue ( $h_1$ ).

Le taux d'écrouissage est donné par la formule suivante:  $\epsilon = \text{Ln} (h_0/h_1)$ .

Le métal chauffé à 1000°C pour 30 minutes, écroui à  $\epsilon = 0.4$  et trempé à l'eau, a donné une dureté moyenne de 15.8 HRB.

## Résultats et interprétations

---

Ce même métal ayant subi un revenu à 500°C pendant 1 heure, donne une dureté moyenne plus élevée mais non suffisante (21.8 HRB) comparée à celle de l'alliage de référence.

Les microstructures présentées sur les figures n°29 et 30 révèlent des grains équiaxes issues d'une structure écrouie.



**Fig. 29: Microstructure d'un échantillon chauffé à 1000°C, écroui et revenu à 500°C, attaqué au réactif n°3 pendant 10 minutes (x 100).**



**Fig. 30: Microstructure d'un échantillon chauffé à 1000°C, écroui et revenu à 500°C, attaqué au réactif n°3 pendant 10 minutes (x 200).**

Les macles se présentent bien en lamelles dans la microstructure donnée par la figure n°31.



**Fig.31: Microstructure d'un échantillon chauffé à 1000°C, écroui et revenu à 500°C, attaqué au réactif n°3 pendant 10 minutes (x 200).**

A noter une grave fissuration du métal: Les microfissures (figures n°29 et 30) se propagent préférentiellement suivant les joints de grains.

A priori, nous attribuons ce résultat fâcheux à la méthode plutôt archaïque utilisée pour l'écroutissage; conjuguée à la présence des petites soufflures qui ont probablement contribué à l'amplification des fissurations.

**CONCLUSION GENERALE ET**  
**RECOMMANDATIONS.**

L'étude de l'électrode de soudage d'origine a montré qu'il s'agit de cuivre faiblement allié au chrome (0.7%Cr), qui a subi un traitement thermique vu la présence des macles de recuit dans la microstructure qui présente des grains fins.

L'élaboration que nous avons tentée, pour notre part, bien que s'étant réalisée dans des conditions plutôt favorables à l'oxydation, mauvaise protection du bain de l'air, température de fonctionnement trop élevée ( $> 1400^{\circ}\text{C}$ ), nous a donné des pièces sans trop de défauts, et ce probablement grâce au phosphore de cuivre ( $\approx 0.05\%$ ) utilisé comme désoxydant, qui a pu freiner partiellement l'oxydation. De son côté, le mode de coulée en source tangentielle a aidé à une meilleure qualité de la pièce coulée, qui semble homogène avec peu de pores qui restent quand même néfastes.

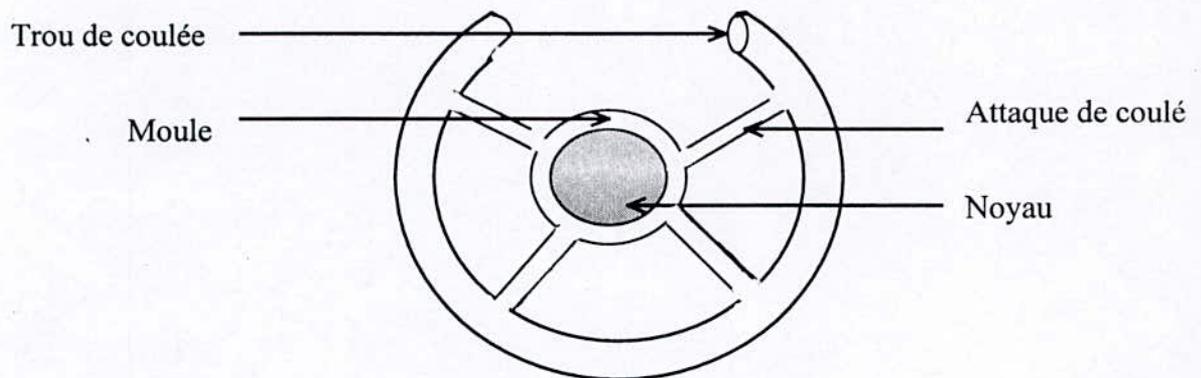
Ainsi la pièce obtenue a subi un traitement thermique de durcissement structural (mise en solution à  $1000^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes suivie d'une trempe à l'eau et d'un revenu à  $500^{\circ}\text{C}$  pendant une heure) qui a quelque peu affiné sa microstructure mais ne lui a pas, malheureusement, conféré la dureté requise, enregistrée sur la pièce d'origine.

Aussi, à l'issue de notre étude nous pouvons dire que nous nous sommes sensiblement rapprochés des caractéristiques recherchées sans pour cela les atteindre et ce probablement à cause des mauvaises conditions de fusion d'une part et du type de désoxydant ( $\text{Cu}_3\text{P}$ , utilisé généralement plutôt pour les bronzes) d'autre part, que nous avons été amenés à utiliser parce que le seul disponible. Cela étant, le traitement thermique préconisé par la bibliographie dans le cas de notre alliage, n'a pu donner les résultats escomptés.

Au vu de ce que nous avons réalisé, tant bien que mal, nous nous permettons de dégager quelques recommandations qui pourraient certainement améliorer les qualités de la pièce élaborée:

- L'utilisation d'un four à creuset muni d'un couvercle et d'une stabilisation de la température à celle de fusion de l'alliage ( $\approx 1080^{\circ}\text{C}$ ) serait bénéfique, avec une opération de fusion rapide.

- Le désoxydant doit - être plus approprié à ce type d'alliage, à savoir le silicium par exemple (lequel d'ailleurs favorise bien la précipitation du chrome), qui ne doit subsister qu'à l'état de traces dans le produit final.
- Le mode de coulée doit - être à source tangentielle, surtout dans le cas d'une pièce circulaire ; si en plus la pièce est grande (cas de la roue de soudage), il faudrait prévoir plusieurs attaques afin d'assurer une alimentation rapide et complète de toute l'empreinte comme schématisé ci-dessous:



**Fig. 32: Disposition des attaques d'une coulée en source.**

Par ailleurs, il faut veiller à l'utilisation d'un sable à vert ayant séjourné 24 heures , aux conditions de moulage bien caractéristique (citées dans le paragraphe III.1).

- Enfin, la mesure de la résistivité de l'alliage élaboré dans de bonnes conditions et post - traité n'est pas à dénier afin de s'assurer de sa propriété électrique à faire un bon soudage par la suite.

*ANNEXES*

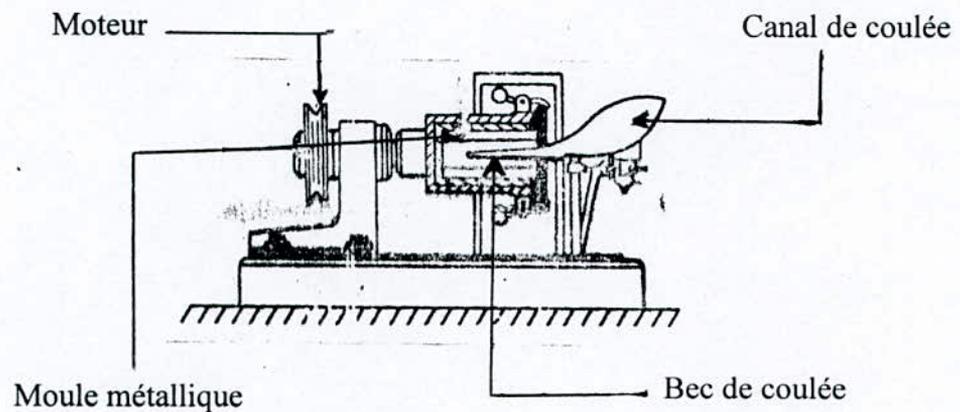
**ANNEXE I:**  
**Moulage par centrifugation:**

**Moulage par centrifugation de l'électrode de soudage [25]:**

L'électrode de soudage en cuivre peut-être élaborée par une technique qui donne de meilleurs résultats; il s'agit du moulage par centrifugation.

Elle consiste à animer le moule d'un mouvement de rotation autour d'un axe fixe bien défini. L'axe de rotation recommandé pour notre pièce doit - être horizontal.

La coulée de l'alliage cuivreux (Cu- Cr) est faite latéralement par un canal horizontal parallèle à la génératrice du cylindre (figure I-1).



**Fig.I-1: Dispositif de moulage par centrifugation à axe horizontal, [5].**

Grâce à l'action de l'inertie centrifuge, l'alliage est plaqué contre la paroi du moule suivant une épaisseur régulière.

Cette paroi tourne à grande vitesse jusqu'à la solidification totale du métal. C'est ainsi que nous obtenons une pièce creuse sans l'utilisation d'un noyau.

Le moule utilisé est métallique en acier ou en fonte.

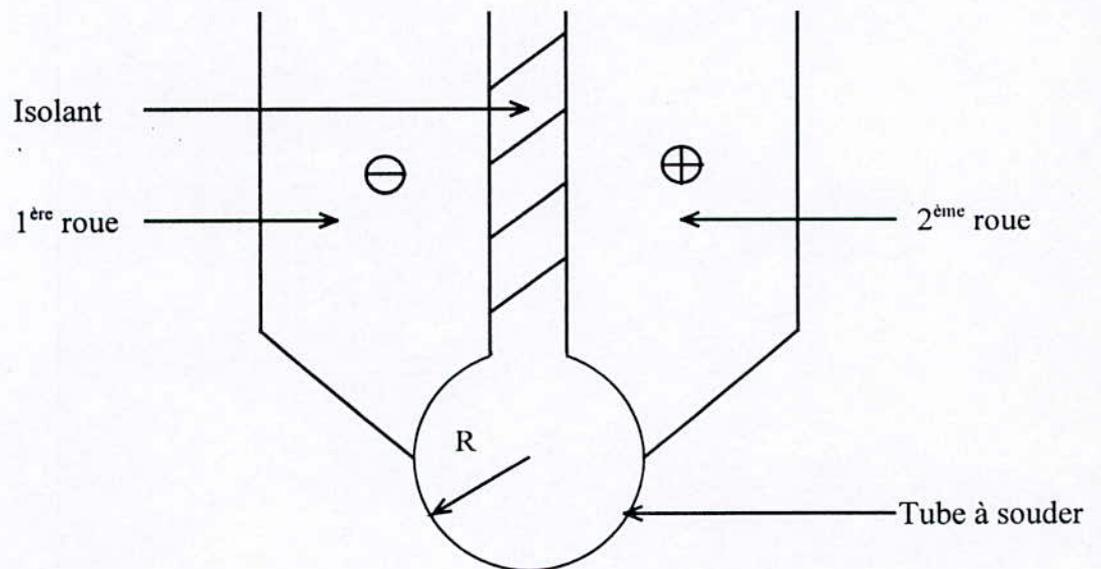
Les avantages que présentent cette technique sont nombreux:

- Accroître la pureté du métal par décantation centrifuge en rejetant vers le centre les inclusions.
- Obtenir une haute précision dans la forme de la roue, ce qui permet de réduire l'ébarbage et l'usinage.
- réaliser une économie de métal en raison de la simplification du dispositif de coulée, de l'élimination des masselottes et de la réduction des rebuts.
- Augmenter la production grâce à la rapidité du travail (encombrement très réduit des machines).
- Affiner la structure métallique de l'alliage (Cu-Cr) grâce au refroidissement rapide provoqué par les moules métalliques d'où accroissement de la résistance mécanique de l'alliage : le procédé permet d'obtenir une structure du métal plus serrée, plus homogène, plus compacte et plus fine (les germes de recristallisation se multiplient).

**ANNEXE II:****Description de l'électrode de soudage :****I-1- Schéma et description de l'électrode [26, 27]:**

L'électrode de soudage est fixée aux bras par l'intermédiaire de porte - électrodes.

Elle est généralement en cuivre et comporte deux roues, l'une jouant le rôle du pôle positif et l'autre du pôle négatif. Ces deux roues sont séparées entre elles par un isolant en Bakélite, comme schématisé par cette figure:



**Fig. II-1: Schéma indiquant les deux roues de soudage en action de souder un tube.**

Le schéma industriel complet donnant les dimensions exactes et l'état de surface que doit avoir certains endroits de l'électrode est donné par la figure n°II.2.

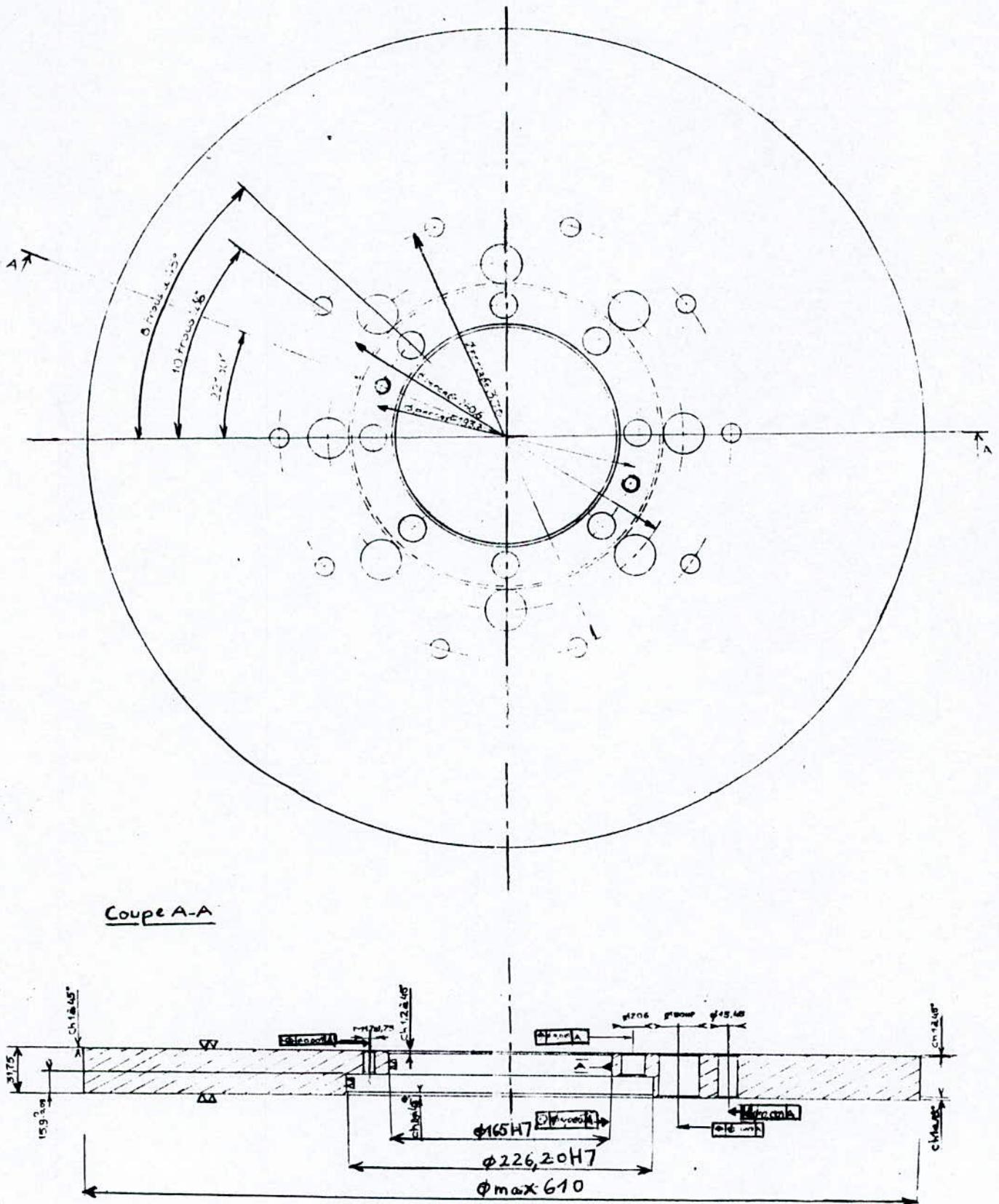


Fig. II-2: Schéma de l'électrode - avant de soudage, [28].

Lors du passage du tube à souder sous l'électrode, un courant de court circuit ( $u=0$ ) passe. Il s'agit d'un courant continu très élevé ( $I \sim 1500$  A) qui chauffe les deux roues.

La chaleur est aussitôt transmise aux lèvres du tube et les fait fusionner. C'est ainsi que nous obtenons une soudure sans métal d'apport étanche et continue. Les électrodes de soudage utilisées ont tendance à se déformer et à s'écraser, d'où leur emploi pour des tôles minces uniquement (0.01 à 3 mm d'épaisseur).

Pour des besoins industriels bien définis, on effectue souvent un usinage des deux roues. Il arrive aussi que l'état de surface de l'une des roues (sur la partie périphérique qui effectue des soudages) ne soit pas bon (existence de pores par exemple), l'usinage dans ce cas est nécessaire car le moindre défaut de la roue peut provoquer une mauvaise soudure des tubes.

Le diamètre de la roue est de 61 cm, mais par usinage, peut arriver jusqu'à 40 cm. Mais au delà de ce diamètre, la roue n'est plus opérationnelle car elle ne peut plus entrer en contact avec le tube à souder.

### **I-2- Mode de soudage effectué par l'électrode [25,26]:**

Le mode de soudage effectué par l'électrode est le plus souvent appelé par soudage à la molette. C'est un soudage dérivé du soudage par points et qui permet de réaliser des soudures continues et étanches.

les paramètres essentiels de ce type de soudage sont:

- Diamètre et épaisseur des roues.
- Effort de serrage.
- Intensité du courant.
- Vitesse de soudure (m / min) et modulation.

On peut exécuter des soudages d'aciers inoxydables, d'aciers à 0.3% de carbone (teneur maximale) et rarement l'Aluminium et ses alliages.

**ANNEXE III:**

**Résultats de la caractérisation de la roue élaborée localement par la SNTF:**

La roue élaborée par la SNTF a été réalisée, mais sans succès, dans les conditions suivantes:

- La matière première est la même avec la notre, c'est à dire des galets de recuit en cuivre.
- Le four à creuset servant à la fusion de cette matière est le même avec le notre, mais sans couvercle.
- Aucune addition n'a été faite, c'est à dire la désoxydation du bain et dans la poche n'a pas été effectuée.
- On ignore la durée attendu pour faire le transvasement à la poche.
- On n'a pas de détails précis quant à la rapidité du jet du métal fondu dans le moule.
- Le sable utilisé est naturel avec des taux imprécis d'argile (sable de moulage de la SNTF) et a subi un chauffage ultérieur (à sec).
- La pièce est coulée en chute Mixte avec un deuxième trou indiquant le remplissage de l'empreinte, donc dans les mêmes conditions avec nos trois premières pièces.
- Aucun traitement thermique ou écrouissage ultérieur n'a été fait .

La pièce obtenue est "spongicuse": la répartition de gros pores, criques, retassures, soufflures, piqûres et fissures apparaissent sur les deux faces de la pièce.

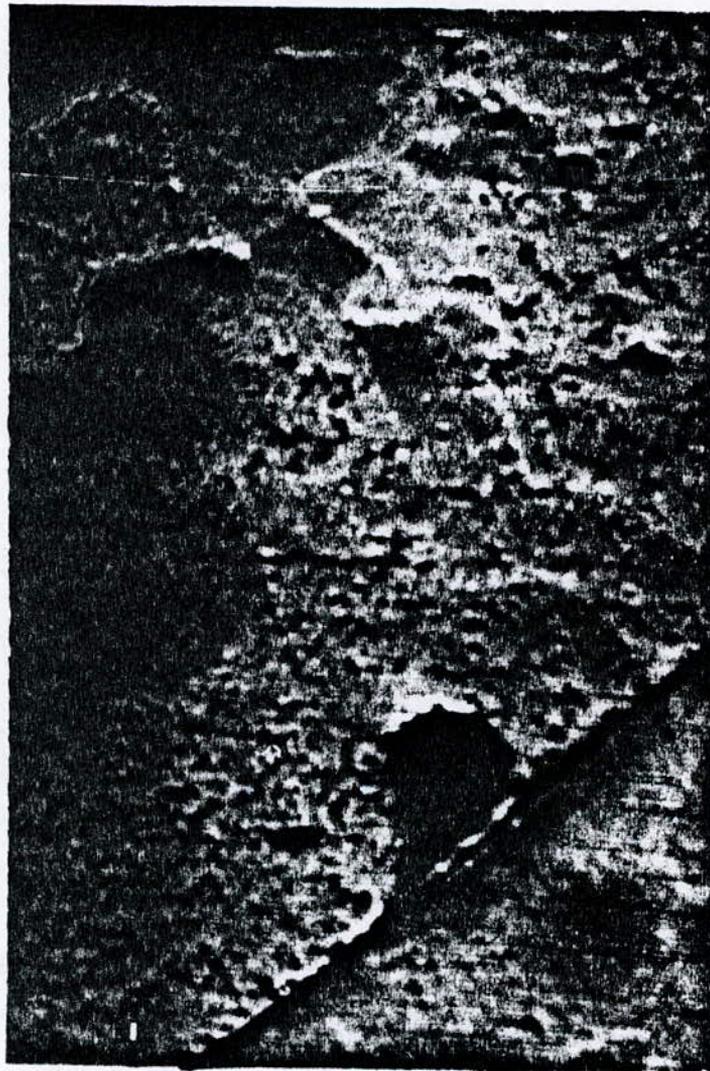
Des coupes à plusieurs niveaux montrent l'existence de ces défauts à l'intérieur de la pièce.

L'analyse chimique faite par la CEEFAMETAL (par dosage) sur deux échantillons, a donné les teneurs (en moyenne ) suivantes:

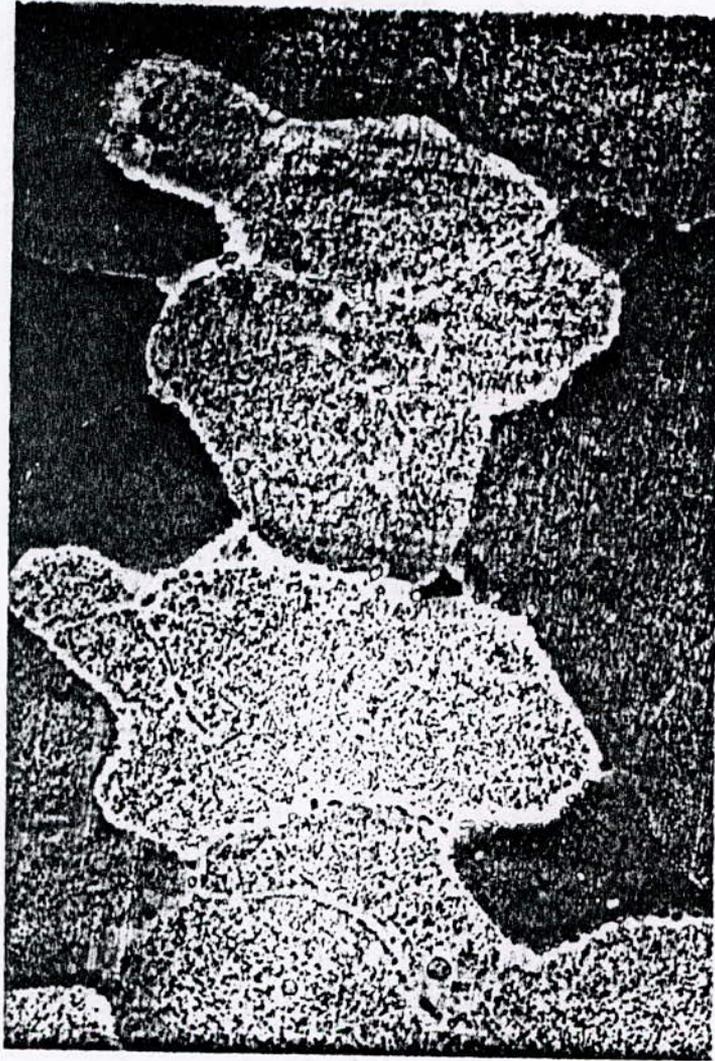
<b>Elément</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Fe</b>
<b>% Massique</b>	98.72	0.69	< 0.10	0.00	traces

Puis nous avons pris plusieurs échantillons, surfacés et polis (papiers abrasifs: 120, 320, 600 et 1200).

Le réactif n°3 (page 33) a donné de bons résultats après 3 minutes d'attaque chimique. L'observation métallographique a permis de prendre quelques photos de microstructures de cet alliage.



**Fig. III-1: Microstructure de l'échantillon élaboré par la SNTF, attaqué au réactif n°3 pendant 3 minutes (x 50).**



**Fig. III-2: Microstructure de l'échantillon élaboré par la SNTF, attaqué au réactif n°3 pendant 3 minutes (x 100).**

La microstructure de la figure n°III-1 montre clairement des micropores de différentes dimensions et une microfissure linéaire.

Tandis que celle présentée sur la figure n°III-2 montre de très gros grains.

Le chrome ou le  $\text{Cu}_2\text{O}$  se trouve essentiellement sur les joints de grains.

On a également effectué des mesures de dureté (HRB) dont les résultats sont les suivants:

## Annexes

---

<b>HRB</b>								
( $\phi_{\text{Bille}} = 1.5875 \text{ mm}$ $p = 100\text{KgF}$ )	1.7	7.4	8.2	13.3	16.1	17.3	21.9	28.1

Les résultats de cet essai sont disproportionnés, et par conséquent il nous est impossible de faire une moyenne.

Mais on peut déduire que la pièce n'est pas dure, chose qui s'est confirmée lors du prélèvement des échantillons par la scie à métaux et à l'échelle microscopique par la grosseur des grains.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **D. Arnaud.**  
Le cuivre et ses alliages.-Technique de l'ingénieur- M430 (1985).
  
- [2] **D. Arnaud.**  
Comparaison des principales propriétés d'usage des alliages de cuivre -  
Technique de l'ingénieur - M431 (1985).
  
- [3] **J. M. Darlot, J. P. Bailon et J. Masounave.**  
Des matériaux - Editions de l'Ecole Nationale Polytechnique de Montréal  
(1986).
  
- [4] **J. Jignon.**  
Matériaux non ferreux -Delagrave (1975).
  
- [5] **Quillet.**  
Encyclopédie des sciences industrielles (Tome III) -Librairie Aristide Quillet  
(1974).
  
- [6] **Syndicat général des fondeurs de France.**  
Fonderie " Mémento de métallurgie appliquée" - Sico France (1976).
  
- [7] **J. Barrallis et G. Maeder.**  
Précis de métallurgie - Elaboration, structures, propriétés et normalisation -  
Nathan (1991).
  
- [8] **Centre technique du cuivre.**  
Le cuivre et ses alliages. Edition 1992.
  
- [9] **N. Bouaouadja.**  
**Matériaux métalliques (Tome I) -O.P.U.(1992).**

- [10] **A. Campa.**  
Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens (tome II)- Foucher (1971).
- [11] **C. Chaussin et G. Hilly.**  
Alliages métalliques (Tome I) -Dunod (1976).
- [12] **H. Deleiris.**  
Métaux et alliages (tome III) - Masson et Scie (1971).
- [13] **D. Arnaud.**  
Fonderie n°390 -Editions techniques des industries de fonderie (juin, 1979).
- [14] **K. Abadli.**  
Etude de la structure des fils de cuivre en fonction de l'érouissage engendré par tréfilage: P.F.E. (E.N.P. 1982).
- [15] **D. Arnaud et G. Sosnowski.**  
Fonderie n° 348- Editions techniques des industries de fonderie -( Août - septembre, 1975).
- [16] **G. Facy et M. Pompidou.**  
Précis de fonderie -Afnor (1992).
- [17] **R. Safarov.**  
Fonderie des alliages non ferreux - O.P.U. (Annaba -1977).
- [18] **P. Pascal.**  
Nouveau traité de chimie minérale (tome III) -Masson et Scie (1957).
- [19] **Syndicat général des fondeurs de France.**  
Alliages cuivreux (réédition 1967).

- [20] **Y. Aktouf et M. Hadj Aïssa.**  
Comportement du cuivre et de l'aluminium au cours de l'écroutissage par tréfilage, et au cours de la recristallisation: P.F.E. (E.N.P.- 1989).
- [21] **J. Smithells.**  
Metals reference book (Volume 1)- Butter worths et Co (1967).
- [22] **Metals hand books.**  
metallography and microstructures (Volume 9).
- [23] **L. Guillet.**  
Précis de métallographie - Masson (1984).
- [24] **J. Benard.**  
Métallurgie générale - masson (2<sup>ème</sup> édition 1984).
- [25] **H. Coste.**  
Cours élémentaire de fonderie (Tome VI).- Imprimerie de sceaux (1961).
- [26] **S. Benissaad.**  
Le soudage (Tec 340)- O.P.U. (1995).
- [27] **R. Legouic.**  
Précis de soudage - brassage et techniques connexes - Eyrolles (1982).
- [28] **“Document Anabib”.**  
Electrode - avant : Soudeuse Newcor-Lat W 1.5 (1995).