

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

3/86

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

## SUJET

*Etude Métallographique des  
Alliages d'Aluminium de  
Fonderie*

Proposé par :  
Mr. V. ARZAMASSOV

Etudié par :  
A. DELLALI

dirigé par :  
Mr. V. ARZAMASSOV

PROMOTION JANVIER 1986

E.N.P. 10, Avenue Hacen Badi - EL-HARRACH - ALGER



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

«O»

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

«O»

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

«O»

DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE



# PROJET DE FIN D'ETUDES

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état

## SUJET

*Etude Métallographique des  
Alliages d'Aluminium de  
Fonderiè*

Proposé par :

Mr. V. ARZAMASSOV

Etudié par :

A. DELLALI

dirigé par :

Mr. V. ARZAMASSOV

PROMOTION JANVIER 1986

— Dédicaces —

- A mon père.

- A ma mère.

- A mes frères et sœurs.

- A tous ceux qui me sont chers.

Je dédie ce modeste travail

Duval

\*\*\* Remerciements \*\*\*

Je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à mon promoteur Mr. V. ARZAMASSOV pour son dévouement et pour l'aide qu'il m'a apporté durant tout le long de mon travail.

Par la même occasion, Je tiens à remercier tous les professeurs qui ont contribué à ma formation.

Que toutes les personnes ; collègues, enseignants et personnels qui m'ont de près ou de loin soutenu durant ce travail, trouvent ici ma profonde reconnaissance, en particulier M. BELMAHDI et A. KHABABA.

A. DELLALI /

2.	- Système aluminium - cuivre.....	10
3.	- Système aluminium - magnésium.....	16..
4.	- Eléments secondaires.....	18

### III. Traitement thermique des alliages d'aluminium de fonderie.

1.1.	- Généralités.....	21
2.	- Solubilité à l'état solide.....	21
2.	- Recuit.....	23
2.1	- Homogénéisation.....	23
1	- Température d'homogénéisation.....	24
2	- Durée d'homogénéisation.....	24
3	- Conséquences de l'homogénéisation.....	25
3.	- Trempe.....	25
1.	- Température de mise en solution.....	26
2.	- Durée de mise en solution.....	27
3.	- Refroidissement.....	27
4.1.	- Traitement de durcissement structural.....	28
2.	- Mécanisme du durcissement structural.....	29

### IV . Méthodes expérimentales et matériau utilisé. ....

1.	- Matériau utilisé.....	32
2.	- Préparation des éprouvettes.....	33
3.	- Techniques expérimentales.....	34
1.-	Recuit.....	35
2.-	Essais mécaniques.....	35
1	- <u>Traction</u>	
2	- <u>Dureté</u>	

3. - Analyse micrographique.....	37
4. - Essai de corrosion.....	38

V ..Résultats expérimentaux et interprétation.

1. - Structure et propriétés après fonderie.....	43
2. - Influence du recuit sur :.....	47
1. - La structure .....	47
2. - Les propriétés mécaniques .....	47
3. La résistance à la corrosion .....	58

<u>CONCLUSION.</u> .....	62
--------------------------	----

## INTRODUCTION.

Ce n'est pas sans raisons particulièrement valables que les emplois de l'aluminium et de ses alliages de fonderie se sont développés dans de telles proportions. Ces raisons sont à la fois techniques et économiques.

Les principales raisons techniques sont :

- L'aluminium résiste bien aux agents atmosphériques
- L'aluminium est un matériau robuste, de poids spécifique très faible, environ 2,7, sa résistance mécanique moyenne.
- Sa grande élasticité.
- L'aluminium est un matériau esthétique
- L'aluminium peut être employé à des températures étalées sur un large intervalle
- L'aluminium est un bon conducteur de la chaleur, et il n'est pas magnétique.

Enfin, l'aluminium n'est pas toxique, ce qui justifie son emploi dans les conditionnements des produits alimentaires et dans les fabrications du matériel culinaire.

Parmi les raisons économiques :

En volume, l'aluminium est le matériau industriel le moins coûteux après l'acier. Le cuivre, le magnésium, le silicium et le zinc sont les principaux éléments qui sont ajoutés à l'aluminium dans les fonderies. Ils ont un essor très remarquable dans le développement des industries mécaniques. Ces alliages servent surtout à augmenter la résistance de l'aluminium pur. Il est toujours possible de trouver dans la gamme étendue des alliages d'aluminium afin de satisfaire les impératifs de leur application. Il existe un certain nombre d'alliages d'aluminium qui résistent bien à des températures de l'ordre de 200°C souvent atteintes en aéronautique et en astronautique de même que certains alliages résistent à des températures très basses (environ - 190°C) utilisés pour le transport des hydrocarbures. En raison de leur résistance à la corrosion, l'aluminium et ses alliages dans de nombreux cas n'ont besoin d'aucune protection supplémentaire. L'aluminium et surtout ses alliages bénéficient à la fois d'une faible densité et de caractéristiques mécaniques élevées, ses alliages offrent de grandes facilités de travail.



CHAPITRE I.

CLASSIFICATION ET PROPRIETES GENERALES DES ALLIAGES

D'ALUMINIUM DE FONDERIE.

Les recherches qui ont provoqué le développement de l'aluminium illustrent particulièrement les influences respectives de la composition et des traitements thermiques sur les propriétés des métaux et alliages.

Les additions rentrant en solution solide constituent un autre mécanisme utilisé pour obtenir l'augmentation de la résistance à la déformation. Les alliages d'aluminium seront donc obtenus par des additions de métaux rentrant largement en solution solide.

I.1 : Classification des alliages.

Bien que des métaux et certains métalloïdes soient capables de former avec l'aluminium des solutions solides, les alliages d'aluminium sont en fait basés sur quelques systèmes seulement.

Les principaux éléments additionnés à l'aluminium sont : le cuivre, le magnésium, le silicium, le manganèse, le zinc et à un moindre degré : le nickel, le chrome, le fer, etc .....

Les alliages les plus répandus sont : aluminium - cuivre, aluminium - silicium, aluminium - magnésium, Al - Cu - Mg - Si, Al - Mg - Si et aussi Al - Zn - Mg - Cu.

A l'état d'équilibre, tous ces alliages forment une solution solide faiblement alliée et des phases intermétalliques  $Al_2 Cu$ ,  $Mg_2 Si$ ,  $Al_2 Cu Mg$ , etc ...

Les alliages d'aluminium peuvent être classés en trois groupes :

I.1.1 - Les alliages de forge et de laminage.

Ce groupe d'alliages est prévu pour l'obtention des demi-produits (tôles, plaques, barres, tubes, etc ...) ainsi que des pièces de forge produites par laminage, forgeage et estampage. Suivant l'aptitude au durcissement par traitement thermique.

Les alliages non durcis par traitement thermique et durcis par traitement thermique donc suivant le processus par lequel, les différents niveaux de caractéristiques mécaniques sont obtenus.

- Les alliages à durcissement structural (avec traitement thermique ou alliages trempants).

Le durcissement structural est obtenu par une gamme de traitement thermique comportant une mise en solution et une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation à la température ambiante.

- Les alliages non susceptibles de durcissement structural (alliages sans traitement thermique ou non trempants). Dans ce cas, le niveau des caractéristiques mécaniques est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage, etc ...) ou par recuit.

#### I.1.2 - Les alliages de frittage.

Ces alliages occupent une grande place en métallurgie des poudres. Le frittage est une opération qui donne à la pièce comprimée, sa structure et sa résistance mécanique.

L'opération se fait comme suit :

- Une préparation ultérieure et un mélange des poudres éventuel.
- Un chauffage (dit de frittage) à une température inférieure à la température de fusion.

#### I.1.3 - Les alliages de fonderie.

Les alliages d'aluminium de fonderie qui sont destinés au moulage forment plusieurs familles se différenciant nettement des alliages de forge et de laminage ainsi que des alliages frittés.

Chaque formule est un compromis entre les qualités de fonderie (coulabilité, absence de criques à chaud, forme et répartition du retrait volumique à la solidification) et les qualités d'usage exigées de la pièce (caractéristiques mécaniques, aspect de surface, aptitude au polissage, résistance à la corrosion, etc ...).

Le choix du procédé de moulage (sable, coquille, basse pression ou sous pression, s'il est le plus souvent dicté par des considérations techniques et économiques liées à la taille et à la forme des pièces, intervient également sur les caractéristiques mécaniques relevées dans les pièces. Le refroidissement plus rapide obtenu par la coulée en coquille donne aux pièces, un grain plus fin et amélioré par rapport au même alliage, coulée en sable et dans des proportions parfois importantes, les charges de rupture et les allongements.

Comme nous avons déjà dit, les propriétés mécaniques de l'aluminium peuvent être considérablement améliorées par addition d'éléments d'alliages,

ceci au dépens d'autres propriétés, telles que la ductilité, la résistance à la corrosion, les conductibilités thermique et électrique.

D'après la norme NF. A - 57 - 702, on distingue cinq grandes familles d'alliages.

- Les différentes nuances d'aluminium non allié.
- Les alliages au cuivre.
- Les alliages au silicium.
- Les alliages au magnésium.
- Les alliages au zinc.

Il convient d'y ajouter un alliage n'entrant dans aucune de ces catégories: l'alliage au manganèse. De point de vue industriel, les alliages aluminium silicium l'emportent de loin sur toutes les autres catégories.

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

Les propriétés de fonderie d'un alliage sont élevées lorsque sa structure comporte un eutectique. Un eutectique se forme dans de nombreux alliages dont la teneur en éléments additionnés est supérieure à la solubilité limite dans l'aluminium.

On distingue 2 catégories d'alliages de fonderie.

a) - Alliages sans traitements thermiques :

Des traitements thermiques sont utilisés à l'état brut de coulée et ils n'entraînent généralement aucune modification de leurs propriétés physiques.

- Alliages à faible résistance.

Ce sont essentiellement les alliages au silicium dont la teneur en Si est proche de 13 %.

L'AS13 (l'alpax) est l'alliage eutectique, celui dont la fusibilité est la meilleure, ayant une très bonne coulabilité. Ces alliages présentent une bonne résistance à la corrosion.

b) - Alliages antifrictions :

Ces alliages sont destinés à des pièces de frottement, deux propriétés principales sont recherchées :

- 1/- Par définition, les alliages antifrictions doivent permettre de bons coefficients de frottement (faibles) et s'opposer au phénomène de grippage, ils doivent donc se présenter sous forme de métaux plas-

tiques et cependant résistants.

On parvient à ce double résultat en réalisant par alliage de métaux convenablement choisis des constituants tels que l'alliage se présente sous forme de grains durs enrobés dans un ensemble plus mou formant un "ciment plastique".

2/- Le point de fusion doit être relativement bas.

Les métaux entrant dans la composition de ces alliages sont :

- l'Étain : Sn

- l'Antimoine : Sb

Exemple : (17 + 23) % Sn et (0,7 + 1,2) % Cu.

b/. \* Alliages avec traitements thermiques.

Ces alliages subissent des traitements thermiques dans le but de modifier dans un sens favorable leurs propriétés mécaniques et surtout la résistance.

Suivant ces propriétés, on distingue :

- Alliages à normale résistance :

Ce sont les alliages au silicium avec des additions de Cu, de Mg ou de Mn, leurs caractéristiques se résument ainsi :

HB = 55 + 80 ; Rm = 140 + 250 MPa ; A % = 2 + 4 %.

Exemple : AS5U3.

- Alliages à haute résistance :

Ces alliages présentent des propriétés mécaniques élevées obtenues par un durcissement structural lors des traitements thermiques.

Exemple : AS8U6 ; AG 10

- Les alliages résistants à chaud :

Pour ce type d'alliage, sont réunis des caractères ayant un point commun : ils sont fortement influencés par la température de travail des pièces et le temps de maintien à cette température.

Ce sont essentiellement les alliages au cuivre susceptibles de durcissement structural par traitement thermique.

Exemple : AU5M.

## 1.2 : Composition .

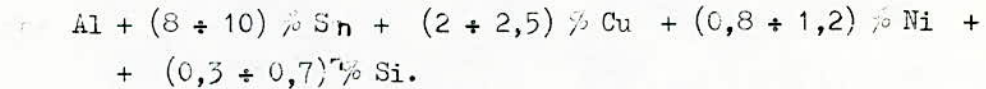
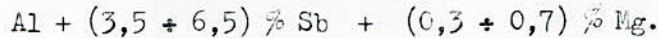
D'après la norme française AFNOR, les alliages d'Al utilisés en fonderie sont :

(a) - Alliages sans traitements thermiques.

- Alliages à faible résistance.

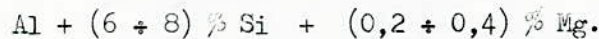
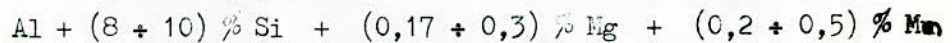
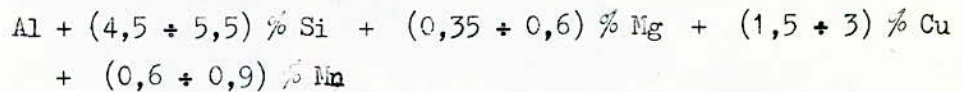


- Alliages antifrictions.

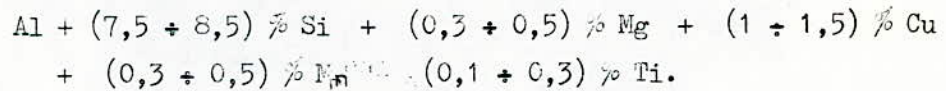
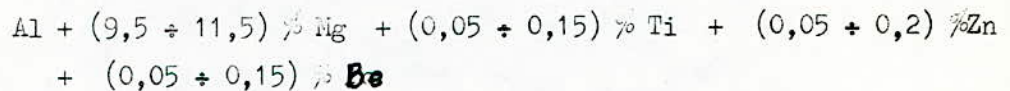


(b) - Alliages avec traitements thermiques.

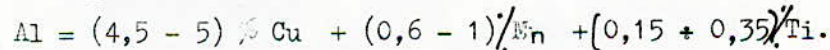
- Alliages à normale résistance.



- Alliages à haute résistance.



- Alliages résistants à chaud.



### I.3 : Propriétés générales des alliages d'Al de fonderie.

On envisage quelques règles générales qui permettent de prévoir le degré de difficulté présenté par une composition quelconque d'un alliage (nuance). L'aptitude au moulage et les défauts de fonderie sont à revoir. Le comportement de l'alliage liquide lors de son refroidissement (solidification pendant le moulage) a pour conséquences des différences essentielles dans les propriétés physiques et les propriétés de fonderie.

Dans la solidification en moule de fonderie, soit en moule de sable, (faible conductibilité thermique), la cristallisation des constituants qui se solidifient les premiers commence contre la paroi du moule et dans la direction de l'écoulement thermique (c-à-d perpendiculairement à la paroi). Il ne se forme pas de cristaux parfaits car les cristaux s'empêchent mutuellement de croître.

Les phénomènes qui se produisent pendant la solidification du métal dans le moule et ont une influence considérable sur la production d'une pièce de fonderie saine. Ces phénomènes découlent des propriétés physiques du métal et de l'alliage et ils déterminent les propriétés auxquelles on peut donner le nom général et aptitude au moulage. Une bonne aptitude au moulage nécessite les qualités suivantes :

- Bonne coulabilité.
- Faible diminution de volume.
- Faible criquabilité à chaud pendant la solidification.

Citons quelques propriétés des alliages fréquemment utilisés :

#### Alliages Al - Si :

Ces alliages ont reçu le nom de Silumines, leur coulabilité est très élevée et les moulages obtenus sont plus denses. L'alliage eutectique (13% Si ou Alpac) le plus usité après affinage, on obtient après coulée en coquille :  $(R = 25 + 30 \text{ Kg/mm}^2)$ .

Les alliages au Si hypoeutectiques (AS5G) se prêtent bien au moulage en sable et en coquille. Après trempe et revenu,  $R = 28 + 30 \text{ Kg/mm}^2$ .  $A \% = 2$ , possèdent une tenue à la corrosion satisfaisante de même que pour les alliages hypereutectiques.

#### Alliages Al - Cu :

Ces alliages, après traitement thermique, se prêtent bien à l'usinage.

Leurs propriétés de fonderie sont basses. (grand retrait, aptitude à la fissuration à chaud ...) Les alliages Al - Cu sont peu stables à la corrosion, pour parer à cet inconvénient, les pièces coulées subissent ordinairement l'anodation.

L'alliage AU5GT : après traitement thermique :

$R = 30 + 33$  (sable et coquille)

$E = 18 + 20$ .

$A \% = 5 + 7$ .

#### Alliages Al - Mg :

Les alliages d'Al avec le Mg ont de basses propriétés de fonderie du fait qu'ils ne contiennent pas l'eutectique. Leurs propriétés caractéristiques ont une bonne tenue à la corrosion.

Des additions font l'objet d'une amélioration des propriétés de fonderie (exemple : Si) . Notons que les formules : Mg :  $10 + 14 \%$  ; Zn  $1 + 3 \%$

sont susceptibles, en structure de fonderie et avec un traitement thermique complet de procurer :

$$R = 50 \text{ Kg/mm}^2 \quad ; \quad E = 30 \text{ Kg/mm}^2$$

avec une excellente tenue à la corrosion, mais malheureusement, elles sont très sensibles à la microfissuration de même que pour les alliages binaires Al - Mg à teneur élevée en Mg.

CHAPITRE II.

INFLUENCE DES ELEMENTS D'ADDITION SUR LA STRUCTURE ET  
LES PROPRIETES DE L'Al.

Généralités.

Pour la fonderie d'alliages ayant l'aluminium comme étant le constituant principal, on ne peut envisager que des quantités d'addition qui donneront des alliages d'aluminium ayant une densité inférieure à 3,8 maximum, car un alliage d'aluminium plus lourd ne serait plus considéré comme un alliage léger et son utilisation devient difficile sinon impossible. Tous les métaux d'addition sont plus lourds que l'aluminium sauf le Si et le Mg, les quantités ajoutées sont donc limitées par la considération du poids spécifique.

En fondant ensemble de l'aluminium et un ou plusieurs autres métaux, on obtient des alliages qui possèdent des propriétés nouvelles améliorées, différentes de celles de l'aluminium. On peut mentionner à cet égard les propriétés suivantes : coulabilité, résistance mécanique, stabilité chimique, usinage, dilatation thermique, conductibilité thermique, résistance à la chaleur, etc ...

La norme NF A 57 - 702 distingue 5 grandes familles d'alliages d'aluminium de fonderie :

- L'aluminium non allié.
- Les alliages au silicium.
- Les alliages au cuivre.
- Les alliages au magnésium.
- Les alliages au zinc.

Notons que la famille des alliages au manganèse est utilisée en fonderie.

2.1 : L'aluminium non allié.

Dans la norme NF A 57 - 702, trois nuances d'aluminium non allié sont indiquées.

- A7 : à 99,7 % d'aluminium.
- A5 : à 99,5 % d'aluminium.
- A4 : à 99 % d'aluminium.



Pratiquement l'aluminium non allié est peu utilisé en fonderie de moulage, sauf pour les applications nécessitant une exceptionnelle résistance chimique ou plus fréquemment une bonne conductibilité thermique et surtout électrique.

On utilise généralement de l'A7 ou de l'A5 de quantité spéciale caractérisé par des teneurs faibles en silicium et en titane.

Parmi les impuretés courantes de l'aluminium ces deux éléments sont en effet les plus néfastes sur la conductivité électrique.

## 2.2 : Alliages Aluminium - Silicium - Influence du Silicium.

Le diagramme d'équilibre Al - Si (fig1) montre que les deux constituants (Al et Si) sont entièrement miscibles à l'état liquide et forment une catégorie dite des alliages à deux solutions  $\alpha$  et  $\beta$  avec point eutectique, où  $\alpha$  représente la solution solide de Si dans l'aluminium, et  $\beta$  représente la solution solide de l'aluminium dans le silicium, l'eutectique (E) contenant 11,7 % Si, se forme à partir de la masse liquide à la température de 577°C.

Cette famille d'alliage est industriellement la plus importante, elle est caractérisée par l'existence d'un alliage sensiblement eutectique E : l'Alpax.

Lors du refroidissement de cet eutectique, on note la formation de cristaux importants en silicium libre, conduisant à un phénomène de surfusion qui se traduit par un décalage vers le bas du point eutectique. Ces cristaux très durs rendent l'alliage fragile et difficilement usinable, cet eutectique présente une structure grossière cassante à l'état coulé en sable. Ce n'est qu'après avoir été traités par le procédé Pasz (1920) pour l'affinage du grain que ces alliages deviennent techniquement intéressantes. On appelle ce procédé : "modification". Le silicium donne avec l'aluminium des alliages ayant une bonne tenue à la corrosion, bien meilleure que celle des alliages au cuivre. Par contre, la présence du silicium rend l'usinage un peu plus difficile et nécessite l'emploi d'outils en acier rapide ou mieux en carbures métalliques.

Le procédé dit de modification peut être appliqué aux alliages aluminium - silicium. Deux éléments jouent un rôle capital et antagoniste pour ce type d'alliage, le sodium et le phosphore.

Pour affiner la structure et éliminer les cristaux de silicium en excès, les silimines sont inoculés au sodium par un bain de sels de NaF et NaCl ou du sodium métallique.

L'incorporation à la fusion du sodium (métallique ou sous forme de sels) permet d'éviter le grossissement des cristaux de silicium, dans ces conditions, l'eutectique ou l'alliage en question acquiert une structure plus fine et se compose de petits cristaux de solutions solides et . Pendant la solidification, les cristaux de silicium recouverts d'une pellicule de siliciure de sodium ( $\text{Na}_2\text{Si}$ ) qui rend malaise leur croissance. Toutefois, l'effet du sodium ne doit pas être considéré comme provenant de la formation d'un alliage ternaire Al - Na - Si, mais comme dû à une surfusion qui se produit pendant la solidification de l'alliage aluminium - silicium affiné.

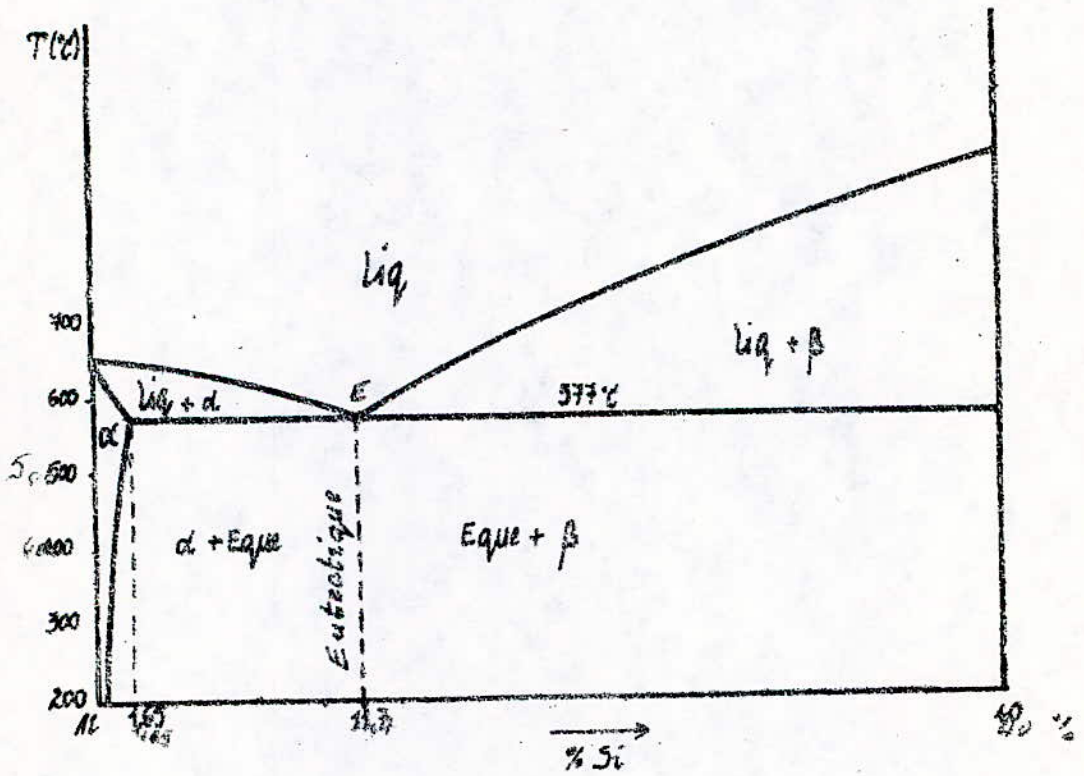
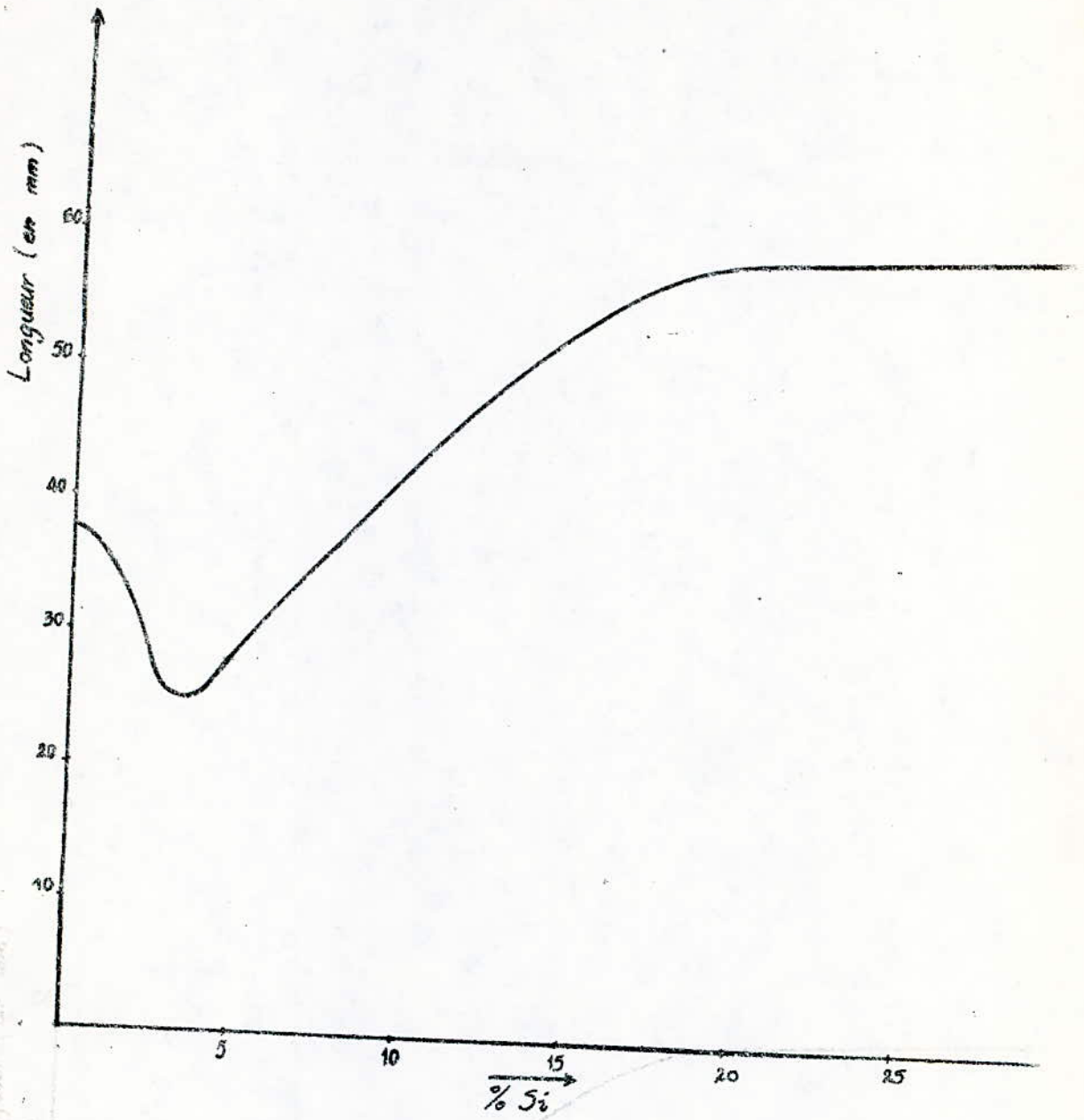


Diagramme d'équilibre des alliages aluminium-silicium.

fig:1



Coulabilité des alliages Aluminium-Silicium.  
Fig: 2.

le sodium est éliminé par combustion. En présence de sodium, les lignes du diagramme d'équilibre se déplacent, et l'alliage hypereutectique (ou eutectique) devient hypoeutectique. La structure affinée (inoculée par le sodium) améliore les propriétés mécaniques de l'alliage. L'alliage AS13 (l'Alpax) ne subit pas de traitement thermique de durcissement.

Pour les alliages à teneur en silicium supérieure à 13% (ou hypereutectiques ou hypersiliés), l'affinage se fait par incorporation du phosphore, qui en forme le composé AlP, sur lequel, vont germer les premiers cristaux de silicium. Ces alliages présenteront une structure fine mais seront difficiles à usiner du fait de la présence du silicium en grandes quantités. Ces alliages (hypersilicés) sont employés, d'une part par leurs propriétés de résistance au frottement et, d'autre part, pour le faible coefficient de dilatation, qui est d'autant plus faible que la teneur en silicium est élevée.

Les alliages hypereutectiques à teneur en silicium supérieure à 5% peuvent subir les traitements de modification (en l'inoculation par le sodium) et, avec l'addition d'éléments tels que Mg à faible teneur sont susceptibles de pouvoir subir un traitement thermique améliorant leurs caractéristiques mécaniques, la phase durcissante est  $Mg_2 Si$ . L'introduction simultanée de magnésium (Mg) et de cuivre (Cu) peut donner lieu à la formation des phases durcissantes :  $Cu Al_2$  ,  $Al_4 Mg_5$   $Cu_4 Si_4$  .

Ces alliages sont les plus utilisés.

Les alliages hypoeutectiques à teneur en silicium inférieure à 5% peuvent subir un traitement thermique mais, du fait de leur faible teneur relative en silicium, ne sont pas sensibles au traitement de modification.

Ces 3 classes d'alliages peuvent être complétées par des alliages plus complexes obtenus par addition complémentaire d'éléments tels que Cu, Ni ..... La présence du cuivre et du nickel améliore la résistance à chaud et l'usabilité de l'alpax (AS13) et AS12 UN.

. / ..

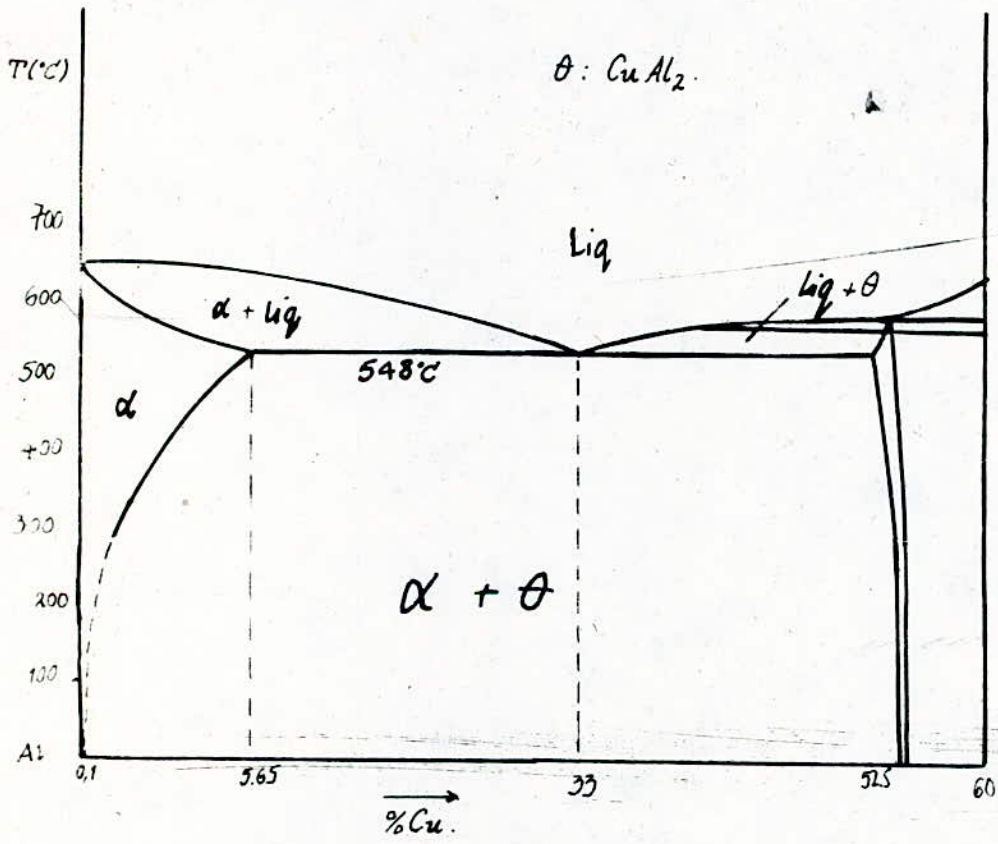


Diagramme d'équilibre des alliages aluminium - cuivre.

fig: 4.

## 2.4 Influence du magnésium.

Le diagramme d'état Al - Mg ressemble à celui des autres alliages binaires, le magnésium entre en solution solide dans l'Al pour former une phase  $\beta$  ( $Al_3 Mg_2$ ), le diagramme d'équilibre comporte un eutectique et fond à 450°C, à cette température la solubilité limite du Magnésium dans l'aluminium est de : 17,4 %, elle est relativement élevée par comparaison à celle d'autres éléments d'alliage.

On distingue 2 groupes d'alliages Al - Mg.

a) Alliages à teneur en magnésium  $\leq 5$  % :

Ils ont des propriétés de fonderie médiocres.

b) Alliages à teneur en magnésium  $> 6$  % :

La structure des alliages d'aluminium contenant de 9,5 à 11,5 % Mg se compose de la solution solide  $\alpha$  et d'inclusions grossières des particules  $Al_3 Mg_2$  qui se déposent aux joints de grains en fragilisant l'alliage, ces alliages subissent des traitements thermiques permettant à la phase durcissante ( $Al_3 Mg_2$ ) la dissolution dans la solution solide .

L'addition à ces alliages d'inoculants (Ti, Zn) améliore les propriétés mécaniques, alors que le Bérium diminue l'oxydation à la fusion. Les alliages renferment encore quelques pourcentages de Mn et environ 1 % de Ti pour l'affinage des grains, on utilise aussi des sels de bore destinés à introduire le bore (B) dans l'alliage comme élément affinant le grain. La coulabilité devient moins bonne à mesure que la teneur en magnésium augmente car l'intervalle de solidification devient plus grand. La tendance à la formation de microretassures et de criques à chaud est très grande. Ces alliages présentent une bonne tenue à la corrosion, des propriétés mécaniques accrues et une usinabilité élevée.

## 2.5 Influence des composants secondaires.

Ce sont le manganèse, le nickel, le cobalt, le titane, etc .....  
(auxquels il faut ajouter le magnésium dans le cas des alliages au cuivre

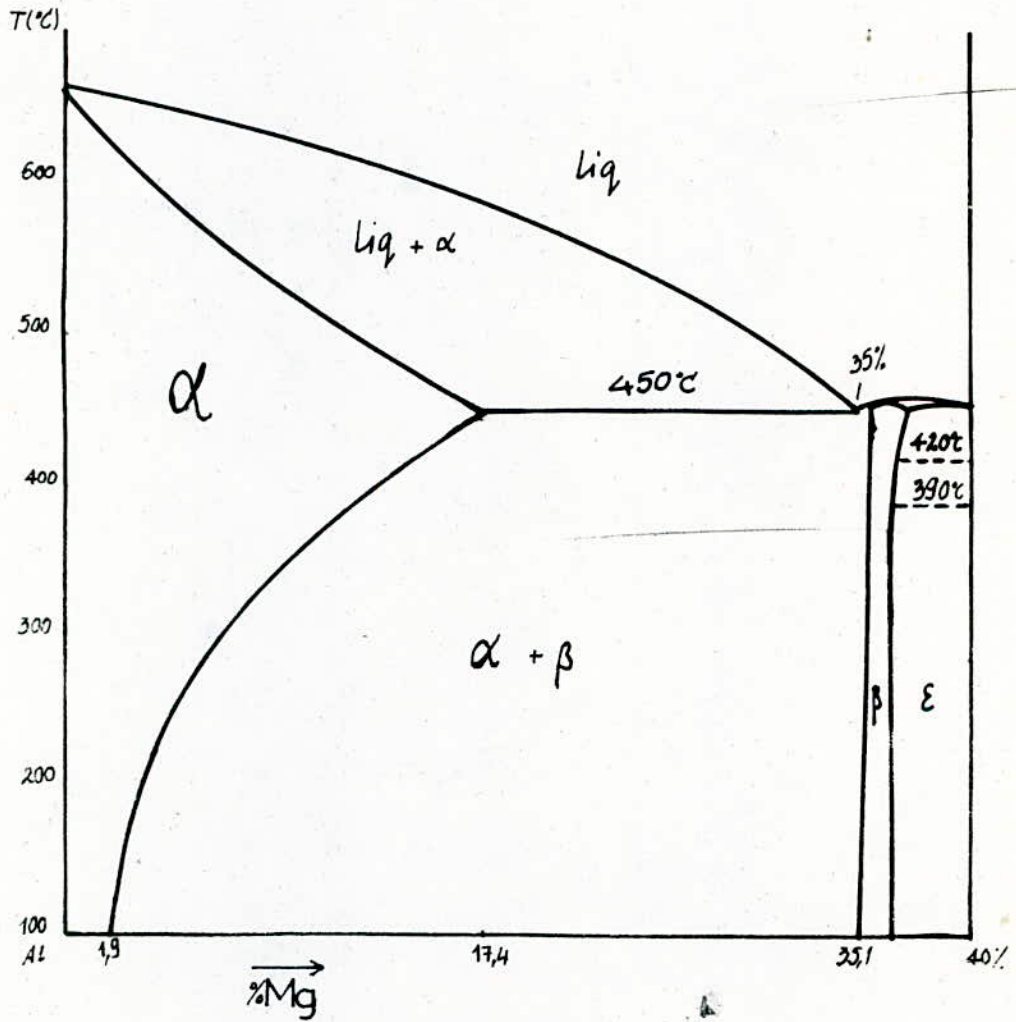


Diagramme d'équilibre des alliages  
aluminium - magnésium.

fig: 5



et des alliages au silicium). Tous ces éléments, ajoutés aux alliages, généralement à faibles pourcentages améliorent le grain des pièces coulées en l'affinant et dans certains cas, permettent d'améliorer les caractéristiques mécaniques par traitement thermique.

Le manganèse est ajouté en pourcentage de 0,4 à 0,9 aux alliages au silicium, et à moins de 0,5 % à ceux du magnésium, augmentant néanmoins la tenue des alliages à la corrosion. Le nickel est ajouté à raison de 0,5 à 1,5 % aux alliages au cuivre et aux alliages au silicium, il affine le grain et augmente la résistance à chaud.

Le titane est ajouté de 0,05 à 0,15 % à quelques alliages spéciaux ainsi que le cobalt, ce dernier combattant l'influence néfaste du fer.

/// H' A . P . I . T . R . E . III.

TRAITEMENT THERMIQUE

3.1.1 Généralités.

Les traitements thermiques ont pour objet de satisfaire un ou plusieurs des buts suivants :

- Homogénéiser la structure après coulée.
- Atténuer le plus possible les tensions dues à la mise en oeuvre (coulées; soudure, etc ...)
- Stabiliser les dimensions.
- Donner aux alliages des caractéristiques mécaniques spéciales par trempe et revenu ou maturation.

Les alliages de l'aluminium de fonderie dans leur ensemble reçoivent soit une trempe suivie d'un revenu ou d'une maturation et parfois un recuit. Pour comprendre le sens du traitement, il convient de faire une courte incursion dans le domaine de la métallurgie et de se familiariser avec les modifications de structure que peuvent engendrer des cycles thermiques de ce type.

3.1.2 - Solubilité à l'état solide :

La figure ci-après, présente un diagramme d'équilibre binaire caractéristique de nombreux alliages d'aluminium. Par la suite de la discussion, il est sans importance que B soit un métal ou un composé intermétallique. Dans tous les cas, le métal pur Al et le métal (ou le composé) B appartiennent chacun à un système cristallin bien défini. De plus, on voit à la figure que chacun de ces deux systèmes cristallins est susceptible d'accueillir des atomes étrangers. Dans le diagramme d'équilibre, elle apparaît sous forme de domaines de structure homogène (solutions solides)

dont la largeur est fonction de la température et des éléments d'addition considérés.

Dans le cas de la figure, le cristal de type I est plus accueillant pour les atomes B que le cristal de type II pour les atomes A.

La solubilité est notamment fonction du rayon de l'atome accueilli et de la place à disposition dans le réseau-hôte.

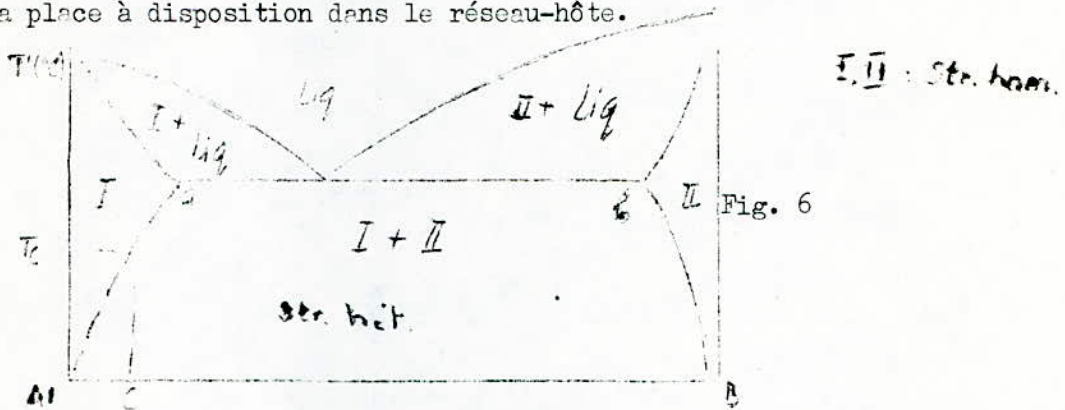


Diagramme d'équilibre d'un système binaire eutectique, la solution solide I acceptant des atomes étrangers du type B jusqu'à la concentration correspondant au point a, la solution solide II des atomes du type A jusqu'à la concentration au point b.

Dans le cas des alliages d'aluminium, c'est le comportement des solutions solides I riches en aluminium (solutions solides  $\alpha$ ). Lors de l'abaissement de la température, l'agitation thermique des atomes diminue, il en résulte que des atomes B de plus en plus nombreux sont expulsés de la solution solide et s'assemblent, si le temps est insuffisant, en précipités cristallins du type riche en atomes B. Dans le cas de la composition C, il peut se former au-dessous de la température  $T_c$ , une structure hétérogène, c'est à dire un mélange des solutions solides I et II.

Le processus de la précipitation et le processus inverse de la dissolution des précipités exigent une certaine mobilité atomique, qui n'existe qu'à la température élevée. Au-dessus de 200 à 400°C, la mobilité de la plupart des atomes étrangers dans l'aluminium est suffisante pour leur permettre

d'atteindre une configuration correspondent à l'état d'équilibre, moyennant un recuit assez long. Cela est en principe valable que le déplacement de l'équilibre soit dû à un abaissement de température (homogénéisation ou dissolution). Notons qu'il existe quelques éléments dont la diffusion dans l'aluminium solide est très lente. Le fer, par exemple, ne diffuse de façon sensible qu'au-dessus de 400° C'.

### 3.2. Recuit.

#### 3.2.1 - Homogénéisation :

Le terme d'homogénéisation est utilisé pour désigner aussi bien l'élimination de la sursaturation et de la ségrégation mineure à l'état brut de coulée que la mise en solution, c'est-à-dire, la dissolution de précipités, formée au cours d'une hétérogénéisation antérieure, par un chauffage prolongé à haute température. Les deux phénomènes peuvent être étudiés ensemble, car le processus atomique est sensiblement le même dans les 2 cas.

Le brut d'un traitement (recuit) d'homogénéisation est de dissoudre les hétérogénéités et d'obtenir une répartition régulière des atomes dissous en provoquant un remaniement de la texture de fonderie (en égalisant la composition au niveau microscopique par diffusion).

Dans tous les cas, il s'agit de porter le métal à une température suffisante pendant un temps assez long pour permettre aux atomes étrangers d'atteindre la configuration homogène à l'état d'équilibre par changement de place successifs dans le réseau.

En effet, à l'état brut de coulée, en présence de ségrégation mineure et de sursaturation, les atomes sont gelés dans un état hors d'équilibre. Après la solidification, ils ne sont exposés que très peu de temps à la température élevée où a lieu la diffusion, conduisant à la formation d'une solution solide homogène et au dépôt des inclusions eutectiques fragiles hors d'équilibre  $Cu Al_2$ ,  $Al_2 Cu Mg$ ,  $Mg_2 Si$ , etc ..., aux joints de grains et entre les branches des dendrites. Au cours du refroidissement ultérieur, les combinai-

sons intermétalliques se déposent sous forme de fines inclusions secondaires uniformément réparties. Il s'en suit que la plasticité de l'alliage coulé s'améliore. Lors d'un recuit d'hétérogénéisation ou de précipitation, se déroulent les processus inverses de ceux de la mise en solution : on donne aux atomes dissous, la possibilité de précipiter selon une configuration stable correspondant au diagramme d'équilibre. Les hétérogénéités qui se forment lors d'un recuit d'hétérogénéisation sont beaucoup plus fines que celles qui apparaissent lors de la solidification. La taille et la répartition des précipités sont beaucoup plus grandes et moins nombreuses lorsque le recuit est effectué à température plus élevée ou pendant un temps plus long.

### 3.2.2. — Température d'homogénéisation :

Les températures de mise en solution (d'homogénéisation) sont le plus souvent celles qui correspondent à l'état d'équilibre de la solution solide, que l'on trouve dans les diagrammes d'équilibres thermiques, elles coïncident sensiblement avec les températures indiquées pour la mise en solution avant trempé, dans le cas des alliages trempants, dans un tel cas, le type d'évolution recherché est l'uniformisation du titre de la solution solide.

Pour bénéficier des deux types d'évolution :

- Uniformisation de la solution solide.
- Précipitation fine du soluté en excès, il faut effectuer un traitement par deux chauffages à des températures échelonnées. Si la température est trop élevée, il peut y avoir fusion des eutectiques complexes qui entourent les cristallites et, si le dépassement de température est suffisant, il y a brûlure, celle-ci, entraînant la destruction de la cohésion métallique.

### 3.2.3 - Durée de l'homogénéisation :

La durée de séjour des alliages (pièces) à la température d'homogénéisation est fonction de l'importance des hétérogénéités ou ségrégation à résorber. Les ségrégations mineures sont considérablement atténuées, alors

que les ségrégations majeures le sont moins.

Les durées de maintien à température peuvent varier de 5 à 48H suivant l'alliage, les dimensions des pièces et leurs formes, la charge des fours et leur puissance. Il faut préciser que l'homogénéisation ne commence vraiment que lorsque la température est acquise dans toute la masse métallique.

### 3.2.4 - Conséquences de l'homogénéisation :

Les traitements d'homogénéisation sont d'autant plus efficaces qu'ils sont appliqués à l'état coulé. Ils donnent lieu aux variations de plusieurs propriétés :

- Les alliages trempants répondent plus rapidement aux traitements thermiques ultérieurs (trempe, revenu).
- Les caractéristiques mécaniques sont généralement améliorées.
- La plasticité est améliorée.
- La malléabilité à l'état recuit est améliorée, la limite élastique est abaissée et l'allongement augmenté. La résistance à la fatigue et au fluage est augmentée.

### 3.3. Trempe.

Le traitement de trempe caractérise les alliages dits à traitements thermiques ou trempants. Deux caractères communs et fondamentaux, d'ailleurs nécessaires mais non suffisants, sont :

- Les éléments d'addition sont en solution solide à haute température.
- Leur solubilité décroît avec la température.

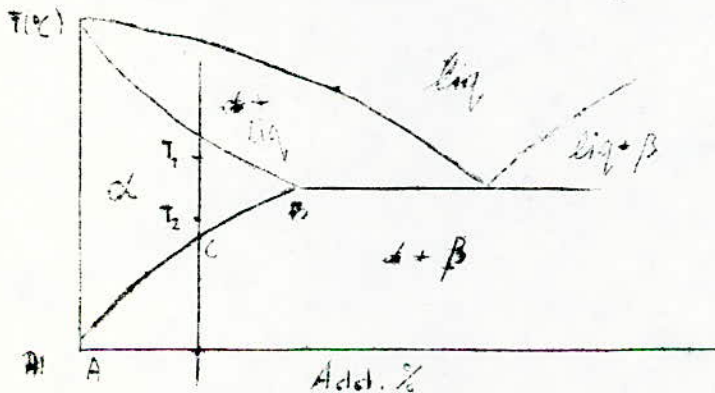


Fig. 7

Le chauffage porte l'alliage dans la zone de phase homogène à la température  $T_1$  (voir Fig. 7). Si l'on refroidit l'alliage assez lentement, à chaque température, l'équilibre a le temps de s'établir et, la solution solide qui serait sursaturée au-dessous de  $T_2$  se sépare en plusieurs phases : une solution solide, de moins en moins riche à mesure que la température décroît et un ou plusieurs précipités contenant des éléments dissous en forte proportion.

Par contre, si on refroidit l'alliage à partir de la phase homogène en l'amenant rapidement à la température ordinaire (l'ambiante par exemple), on saisit et on conserve l'état homogène. Mais la solution solide, sursaturée à la température ordinaire et alors dans un état métastable et a tendance à évoluer, dans le cas général, vers un état stable, par précipitation de la phase en sursaturation. C'est cette précipitation qui produit le durcissement structural par un vieillissement naturel (maturation) ou artificiel (revenu).

Le traitement de trempe consiste essentiellement à porter l'alliage à une température suffisante pour qu'il se trouve, aussi complètement que possible, à l'état solide et à le refroidir rapidement.

### 3.3.1 - Température de mise en solution :

Pour la majorité des alliages, si l'on considère les courbes représentant la variation des caractéristiques mécaniques, relevées après durcissement structural en fonction de la température de trempe, on constate que toutes les caractéristiques passent par un maximum pour une bande plus ou moins étroite de températures et s'abaissent rapidement ensuite pour des températures de mise en solution supérieures ou inférieures. Les températures supérieures à un certain optimum pratique étant des températures de brûlure qu'il faut évidemment éviter.

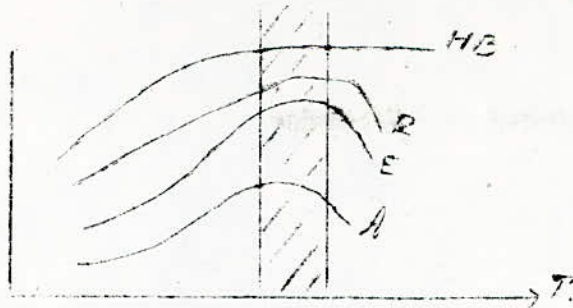


Fig.8

Variation des propriétés mécaniques avec la température de trempe.  
(En quadrillé : zone de brûlure).

Aux températures inférieures à l'optimale, l'abaissement des caractéristiques résulte de la mise en solution incomplète des constituants actifs. Aux températures supérieures à l'optimale, il y a fusion des eutectiques complexes intergranulaires et il y a donc brûlure et décohésion fragilisante ; le métal perd son allongement, présente un grain de cassure grossier et n'est plus récupérable.

3.3.2 - Durée de la mise en solution (maintien) :

Les durées de mise en solution aux températures optimales sont alors généralement de l'ordre du temps nécessaire à la mise en température de toute la masse.

Le temps de séjour à la température de trempe doit être le plus réduit possible, lorsqu'il s'agit d'alliages protégés par un placage, afin d'éviter une diffusion trop importante des constituants dans la couche plaquée car cela diminuerait ou annulerait la protection contre la corrosion.

3.3.3 - Refroidissement (trempe) :

La solution solide obtenue à chaud par une mise en solution doit être conservée dans le même état par un refroidissement suffisamment rapide pour éviter la séparation de ses constituants. Si une précipitation a lieu, cela correspond finalement à une mise en solution incomplète défavorable au durcissement structural ultérieur, et, par conséquent, aux caractéristiques mécaniques finales.

Pour obvier à cet inconvénient, il faut que la vitesse de refroidissement



soit supérieure à ce que l'on dénomme vitesse critique de trempe, variable avec les alliages, selon la plus ou moins grande stabilité de la solution solide correspondante. Pour certains alliages, le temps de séjour à l'air libre, nécessaire à transférer les pièces depuis la sortie du four jusqu'au milieu où s'effectue la trempe ; suffit à amorcer une précipitation nuisible. Cet effet du délai au transfert, appelé aussi "délai de trempe" est particulièrement sensible sur les alliages de zinc.

Immédiatement après trempe et pendant une certaine durée, variable selon les alliages, le métal est dit à l'état de trempe fraîche. Il y a des charges de rupture, des limites élastiques et des duretés basses par rapport aux valeurs que ces caractéristiques atteindront par durcissement structural spontané ou provoqué, tandis que les allongements sont généralement élevés. Il en résulte un état temporaire relativement malléable.

#### 3.4. Traitement de durcissement structural.

Comme on l'a déjà mentionné, la possibilité de traiter thermiquement un alliage est due à l'augmentation, avec la température, de la solubilité à l'état solide des éléments d'addition (voir Fig. de trempe).

Le traitement thermique de durcissement structural comporte trois grandes étapes :

- 1ère étape : chauffage de mise en solution ; la température minimale de mise en solution se trouve en C<sub>s</sub> sur la ligne de solubilité AB.
- 2ème étape : dite de refroidissement (rapide).
- 3ème étape : dite de durcissement structural. Cette solution solide se trouvant à l'état dit hors équilibre, va avoir tendance à **retrouver** l'équilibre, en rejetant sous forme de précipité une partie de l'élément durcissant qui est en saturation, c'est ce phénomène qui est responsable du durcissement structural par maturation à la température ambiante.

Toutefois, ce retour à l'état d'équilibre de la solution solide sursaturée après trempe peut être lent, à la température ambiante par ensuite des faibles vitesses de réaction (vieillessement naturel). Cette évolution peut être accélérée par des maintiens à températures relativement supérieures qui constituent des traitements de revenu (vieillessement artificiel), et qui se traduisent généralement par un durcissement plus important de l'alliage.

### 3.4.1 - Mécanisme du durcissement structural :

Le vieillissement artificiel provoque un durcissement par précipités incohérents. Lorsque la température de vieillissement augmente, plusieurs processus de décomposition ou de précipitation se déroulent simultanément ou l'un après l'autre.

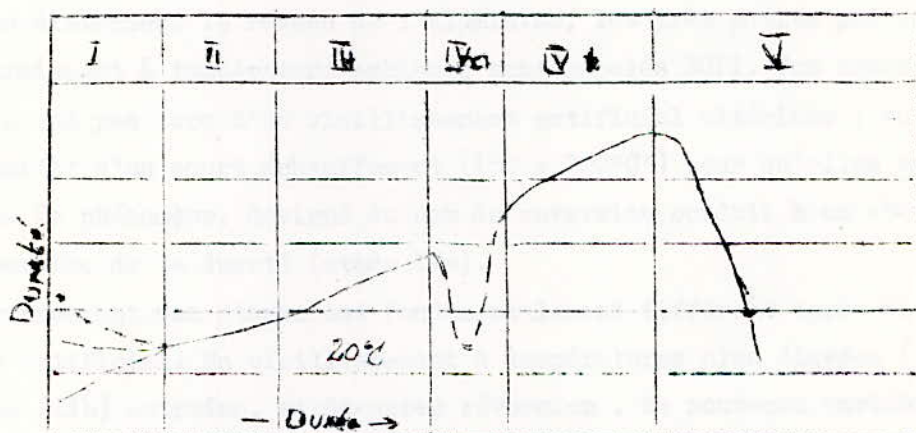


Fig. 9

Principe de durcissement structural des alliages d'aluminium (à traitement thermique).

- Etape I : traitement préalable non précisé.
- Etape II : traitement de mise en solution.
- Etape III : vieillissement naturel (ZGPI).
- Etape IV<sub>a</sub> : reversion (dissolution du ZGPI).
- Etape IV<sub>b</sub> : vieillissement artificiel (revenu) (ZGPII puis phase  $\theta'$ ).
- Etape V : hyperrevenu (phase  $\theta$ ).

microscope électronique, l'alliage est alors plus tendre qu'à l'état fraîchement trempé, car le durcissement de solution solide dû aux atomes d'éléments d'addition dissous n'existe plus.

Exemple : système : Al - Mg<sub>2</sub> Si : ces alliages sont susceptibles de trempe et maturation ou revenu durcissant. Au début de la maturation, et en permanence à la température ambiante, les atomes de Mg et de Si se regrouperaient en particules filiformes. Au début de quelques heures à 150°C'. Ces fils sans aucune structure apparente s'organisent et prennent la périodicité de 4,04 Å (distance interatomique de l'aluminium). Puis à 200°C', ces fils se rassemblent, enfin à 300°C précipite le composé Mg<sub>2</sub>Si (phase d'équilibre) de structure bien défini (C.F.C. : a = 6,35 Å).

CHAPITRE IV.METHODES EXPERIMENTALES ET MATERIAU UTILISE.4.1 : Matériau utilisé.

L'étude expérimentale a été faite sur de l'alliage AS13, eu tectique du système aluminium - silicium, élaboré à la S.N.V.I. - C.V.I. de ROUIBA.

La composition chimique de l'alliage eutectique AS13 suivant la norme NF : A 57 - 702.

% Fe	% Si	% Cu	% Zn	% Mg	% Mn	% Ni	% Pb	% Sn	% Ti	% Co
0.70	11+13,5	0.10	0.15	0,10	0.30	0.05	0,10	0.05	0.15	0,20

La composition ci-dessus correspond aux tolérances de composition dans les pièces coulées en sable et en coquille.

L'alliage A-S13 entrant dans ces tolérances de composition élaboré donne des éprouvettes ayant au moins les caractéristiques mécaniques suivantes :

Désignation	Etat	R (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Re (Kgf/mm <sup>2</sup> )	A (%)	H B
Sable	y 20	16,5	8	4	50
Coquille	y 30	18	8	5	60

Les caractéristiques de l'A-S13 sont les suivants :

Conductibilité thermique à 20°C : ..... 0,4 th cm/cm<sup>2</sup>.S.°C.  
 Resistivité à 20°C : ..... 4,5 cm<sup>2</sup>/cm.  
 Coefficient de dilatation entre 20 et 100°C : .... 20.10<sup>-6</sup>.  
 Température de solidification : ..... 575°C.  
 Retrait moyen : ..... 11 % .

Comme nous l'avons déjà indiqué, il est très important d'étudier l'influence des éléments alliés à l'alliage eutectique aluminium - silicium.

Pour une teneur voisine de l'eutectique, le silicium donne à l'alliage (aux pièces) une excellente propriété de moulage, la teneur en silicium peut varier de 11 à 13,5 sans que les caractéristiques mécaniques soient sensiblement modifiées. Les caractéristiques seront obtenues si l'alliage présente une structure caractérisée par la finesse des grains de silicium.

On obtient les charges de rupture les plus élevées avec des teneurs en fer comprise entre 0,5 et 0,6 %. Au delà de la teneur maximale 0,7 %, le fer forme avec le silicium et l'aluminium un constituant lamellaire qui diminue rapidement les allongements et la charge de rupture. Par contre, une teneur en fer proche du maximum tend à diminuer les retassures.

Aux teneurs indiquées par la norme, le manganèse et le cobalt n'ont pas d'influence sur les caractéristiques, ils peuvent retarder l'apparition du constituant fragile Al - Si - Fe.

Au delà de 0,10 % teneur maximale de magnésium, les allongements diminuent. Cependant, la présence d'une faible teneur en magnésium 0,05 à 0,10 % améliore l'efficacité de l'affinage. Lorsque les teneurs en cuivre, nickel et zinc dépassent celles indiquées par la norme, on note une baisse de l'allongement, et une diminution de la résistance à la corrosion dans le cas du cuivre.

#### 4.2. : Préparation des éprouvettes (du métal).

La fusion du métal se fait dans un four électrique, la masse liquide subit un traitement de dégazage dans le four. La température du four étant déterminée au moyen d'un pyromètre, le métal est coulé dans une poche où on procède à l'opération de l'affinage. Les éprouvettes ont été coulées dans des moules en sable, on introduit dans la poche remplie de métal fondu environ 0,5% de poudre d'affinage, suivant la température de coulée. On porte la température à  $780 + 820^{\circ}\text{C}$ , on laisse la poudre en contact avec le métal. Le temps entre l'introduction de la poudre d'affinage et la coulée ne doit pas dépasser 10 à 12 mn. Le métal ainsi solidifié est dit brut de coulée.

La composition chimique du brut de coulée : l'expérimentation a été faite sur des éprouvettes de différents lits de fusion. Les essais de coulée ont donné la composition suivante :

- Contraintes du 1er type : contraintes équilibrées dans le volume de la pièce, elles sont dites macrocontraintes dues essentiellement aux processus de fabrication subits par la pièce.
- Contraintes du 2ème type : contraintes équilibrées au sein d'un grain ou de plusieurs blocs, elles sont dites : microcontraintes, elles sont produites de la déformation du métal lors d'une inégalité de tensions élastiques. La présence de ces contraintes, entraîne une variation du paramètre réticulaire selon les grains et les blocs.
- Contraintes du 3ème type : ces contraintes sont localisées dans le volume d'une maille cristalline par déplacement des atomes à partir du réseau cristallin.

b) - Déformations :

. Déformation élastique : une déformation est dite élastique si elle disparaît lorsqu'on supprime la charge provoquant cette déformation. La déformation élastique ne produit pas de modifications permanentes, la charge appliquée produit un déplacement relatif et réversible des atomes.

. Déformation plastique : lorsque les contraintes dépassent la limite d'élasticité, la déformation devient irréversible. La suppression de la charge appliquée n'élimine pas la déformation, cette déformation est dite : plastique.

4.3.1. Pour éliminer les contraintes du 2ème type qui peut provoquer une corrosion de la pièce dans certains milieux, on applique aux pièces un recuit, qui a pour but d'homogénéiser la solution solide et supprimer l'effet des contraintes.

Les éprouvettes du brut de coulée ont subi un traitement de recuit à une température de 300°C, et ce pendant des durées variables : 1h, 2h, 3h, 5h et 8 heures.

4.3.2. Essais mécaniques.

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques des éprouvettes, on a utilisé la traction et la dureté qui représentent les essais mécaniques de base

L'allongement relatif total est :

$$\epsilon = \int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} \frac{dL}{L} = 1 \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln (1 + e) = \ln \frac{S_0}{S}$$

: l'abscisse de la courbe rationnelle est :  $\epsilon = 1 \ln \frac{S_0}{S}$

## 2./- L'essai de dureté.

La dureté est la propriété d'une pièce (ou d'un corps quelconque) de s'opposer à la déformation plastique provoquée par des contacts de la couche externe du corps. La méthode utilisée dans nos essais est celle de Brinell. Elle consiste à enfoncer dans la pièce sous une charge constante P, une bille en acier dur de diamètre D et à mesurer après l'enlèvement de la charge, l'empreinte laissée à la surface du métal, de diamètre d.

$$\text{dureté HB} = \frac{\text{Charge}}{\text{Surface de l'empreinte}}$$

$$\text{alors HB} = \frac{2 P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Kgf/mm}^2)$$

### 4.3.3. Examen micrographique.

La micrographie a pour but de mettre en évidence les constituants. Pour cela, on procède à l'examen au microscope métallographique par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée.

Cet examen consiste au prélèvement des échantillons, un polissage, une finition et l'attaque.

Le polissage consiste à rendre la surface de l'échantillon à analyser plane et brillante de façon à ce qu'elle ne présente aucune rayure susceptible de gêner l'examen ultérieur. L'attaque a pour but de révéler les joints des cristaux, et de différencier les constituants de l'alliage.

L'examen au microscope.

Le microscope métallographique est essentiellement constitué d'un objectif qui donne de l'objet une première image réelle et agrandie, et d'un oculaire qui donne de l'image précédente une image définitive agrandie.

#### 4.3.4. L'essai de corrosion.

La destruction plus ou moins rapide et plus ou moins complète des matériaux métalliques soumis à l'action d'un milieu est appelée : "corrosion".

##### 1 - Mode de corrosion.

Le processus d'attaque du matériau métallique par un milieu d'attaque peut être soit chimique, soit électrolytique.

a/ Corrosion chimique : correspond à tous les cas de réaction chimique directe du métal et du milieu ambiant : gaz - métal par exemple. Ce mode de corrosion est appelé : corrosion sèche - car elle ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique.

b/ Corrosion électrochimique : elle se produit lorsqu'il existe une hétérogénéité, soit dans le métal, soit dans le réactif. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile ; un courant électrique circule entre anodes et cathodes et les zones qui constituent, les anodes sont attaquées.

c/ Corrosion biochimique : c'est l'attaque bactérienne des métaux en particulier dans les canalisations enterrées.

Il existe d'autres types de corrosion : corrosion avec érosion, avec frottement, etc ...

##### 2 - Morphologie de la corrosion.

Les principales façons dont la corrosion peut se développer :

a/ Corrosion uniforme :

La vitesse et l'attaque de la corrosion est la même en tout point du métal. Ce type est très observé dans le cas de la corrosion sèche. Les caractéristiques mécaniques du métal rapportées à l'unité de section ou



de longueur, ne sont pas sensiblement modifiées.

b/ Corrosion intergranulaire :

Ce type de corrosion se manifeste aux joints du grain. Elle est due en général à la précipitation d'une phase ou à la formation d'un produit de corrosion aux joints de grain. Les caractéristiques mécaniques dans ce cas sont affaiblies.

c/ Corrosion par piqûres :

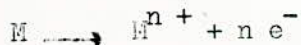
Elle se localise en certains points de la surface métallique. Ce type de corrosion peut avoir comme origine l'existence d'inclusions etc ...

d/ Corrosion intragranulaire :

Elle se manifeste à l'intérieur des cristaux. Ce type apparaît en particulier dans les matériaux de structure cubique à faces centrées soumis à une contrainte de traction et plongés dans un milieu spécifique. La corrosion dépend essentiellement de la concentration du réactif, le pH du milieu d'attaque, l'état de surface du matériau et sa composition chimique.

L'essai de corrosion a été réalisé sur des échantillons de l'alliage A - S13, polis. Le milieu d'attaque utilisé est une solution électrolytique très concentrées de chlorure de sodium dans l'eau naturelle.

Tout métal M, de valence n, plongé dans une solution tend à émettre des ions et à se charger négativement suivant la réaction suivante :



L'interface métal - solution est constituée d'une couche double d'ions métalliques équilibrés électriquement par les électrons. Si les électrons qui se trouvent sur le métal M sont évacués, il y a déséquilibre électrique, les ions  $M^{n+}$  sont libérés et le métal se corrode. C'est ce qui se passe en général dans tout phénomène de corrosion électrolytique qui peut se schématiser comme suit :

. / ..

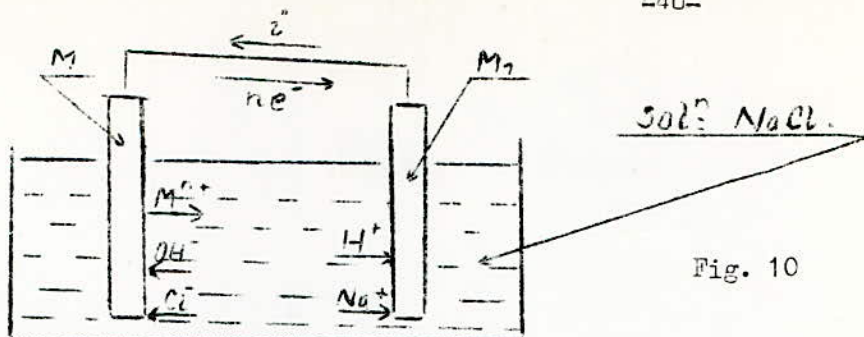
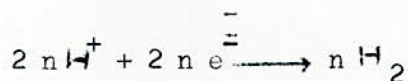


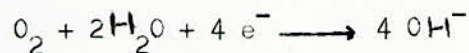
Fig. 10

Une anode en métal  $M$  est reliée électriquement à une cathode en métal  $M_1$  ; les deux métaux plongent dans une solution d'électrolyte de chlorure de sodium. Il y a déséquilibre électrique, par suite de la différence de potentiel de dissolution existant entre les deux métaux. Le métal  $M$  se corrode en émettant des ions  $M^{n+}$  et les  $n$  électrons libérés vont se déplacer vers  $M_1$ .

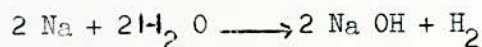
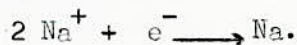
Dans un premier cas : les ions  $H^+$  qui migrent vers la cathode  $M_1$  sont déchargés par les électrons qui arrivent sur  $M_1$  suivant la réaction suivante :



Si la solution saline contient suffisamment d' $O_2$  dissous, l'hydrogène moléculaire est détruit suivant les réactions possibles :

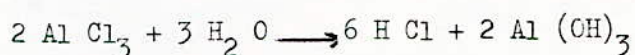
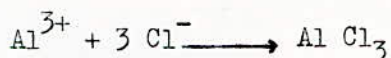


Il y a dépolérisation cathodique par l'oxygène ou encore activation du processus de corrosion. Au voisinage de la cathode, la solution tend à devenir alcaline, d'une part par disparition d'ions  $H^+$ , d'autre part par suite de la réaction du sodium sur l'eau :



. / ..

A l'anode, il y a formation d'un sel ou d'un hydrate du métal constituant l'anode, pour l'anode d'aluminium, et la solution Na Cl, on aurait :



Dans un second cas : les électrons qui arrivent en  $M_1$  ne sont pas évacués. En l'absence d'oxygène, l'hydrogène moléculaire qui se forme au début du métal  $M_1$  n'est pas détruit et, s'il ne peut se dégager, il forme une barrière entre  $M_1$  et la solution, il n'y a plus de passage de courant possible et le métal  $M$  ne se corrode pas. On dit qu'il y a polarisation cathodique ou encore passivation.

Parmi les types de corrosion localisée, on cite la corrosion sous contraintes, du fait que l'alliage étudié présente des contraintes du 2ème type, qui peut provoquer ce type de corrosion.

Il s'agit d'un type de corrosion tout à fait général, qui se produit sous l'action combinée d'une contrainte et d'un milieu agressif. En l'absence des contraintes, le phénomène de corrosion ne se produit pas.

La corrosion sous contraintes se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être soit intergranulaires, soit transgranulaires. Les pertes de poids des matériaux corrodés sont en général très faibles car la corrosion est localisée. Cependant, ce type de corrosion a des conséquences pratiques importantes étant donné la variété des matériaux métalliques qui en sont le siège.

Parmi les facteurs qui peuvent accentuer cette corrosion, on cite :

a/ - Contraintes :

Les contraintes d'origine interne proviennent des opérations du processus de fabrication. Les contraintes d'origine externe sont en général facile à définir. Elles résultent des conditions d'utilisation. Seules, les contraintes de traction sont à l'origine d'une fissuration sous contrainte

tes. Les contraintes même inférieures à la limite d'élasticité peuvent provoquer la corrosion.

b/ - La nature du milieu environnant :

Le cas des alliages d'aluminium, un milieu en  $\text{Cl}^-$ , eau de mer, provoque une corrosion intergranulaire.

c/ - L'état de surface :

Il joue un rôle très important du fait que la corrosion débute à la surface. Dans le cas des alliages d'aluminium, la résistance à la corrosion sous contrainte est plus élevée après sablage que si l'alliage présente un bon poli.

d/ - La température :

La corrosion sous contraintes est très favorisée par l'élévation de la température.

## CHAPITRE V

### RESULTATS EXPERIMENTAUX ET INTERPRETATIONS.

#### 5.1 - Structures et propriétés après fonderie.

L'examen micrographique des échantillons représentatifs des pièces en A-S13 coulées en sable (Y 20) a été fait sans attaque.

Le brut de coulée sans modification présente une structure proeutectique en aiguilles, avec de nombreux cristaux libres de silicium primaire. Une telle structure donne des caractéristiques mécaniques faibles et présente une mauvaise usinabilité.

La structure du brut de coulée avec modification (Fig. 11) présente des dendrites d'aluminium bien orientées et ne contenant pas de silicium libre, l'eutectique aluminium - silicium est très fin et divisé. La présence de cristaux libres de silicium est due au mauvais traitement d'affinage à la poudre de sodium.

Les essais mécaniques effectués sur des éprouvettes circulaires de section :  $149,50 \text{ mm}^2$ , ont donné :

a) L'essai de traction :

La charge appliquée étant de 40 KN.

Alors,

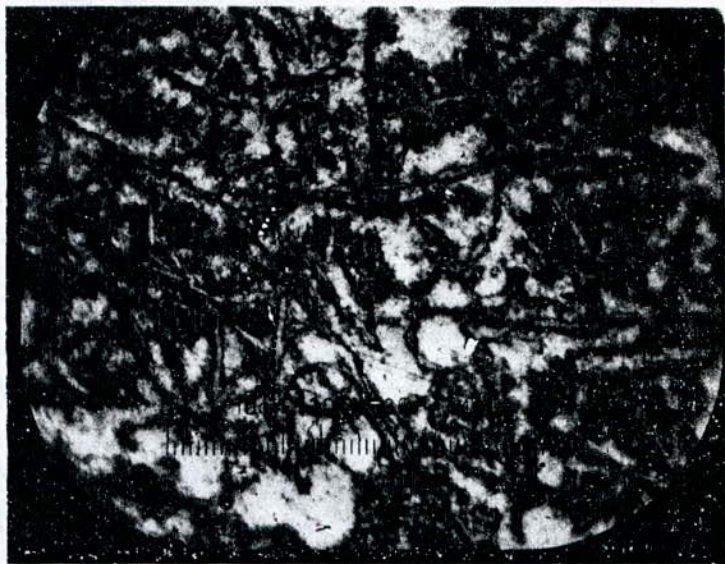
$$L:E = 2,14 \text{ Kgf/mm}^2.$$

$$R_r = 14,05 \text{ Kgf/mm}^2.$$

$$A = 3,93 \text{ \%}.$$

On peut tirer ces caractéristiques en traçant la courbe conventionnelle à partir du diagramme : charge - déformation enregistrés pendant l'essai de traction. On dresse le tableau suivant en utilisant le diagramme de traction.

. / ..



<sup>-11-</sup>  
fig: ~~13.A~~ . Brut de coulée (Y 20) .

$F/S_0$	2,17	4,35	8,03	12,44	13,11	13,91	14,05
A	0,36	0,71	1,43	2,14	2,86	3,57	5,8

où  $F/S_0$  est la contrainte conventionnelle en  $Kgf/mm^2$ .

F : la charge instantanée.

$S_0$  : la section de l'éprouvette :  $S_0 = 149,50 \text{ mm}^2$ .

A : l'allongement =  $\frac{L - L_0}{L_0} \times 100$  (en %).

$L_0$  : la longueur de l'éprouvette sous charge.

et L : la longueur instantanée.

courbe conventionnelle : Fig : 12.

b) Dureté :

L'essai de dureté a été effectué en utilisant une bille de diamètre 10 mm, la charge appliquée étant de 2 000 KN.

dureté brinell : HB = 54,3

## 5.2 - L'influence du recuit sur la structure et les propriétés.

Les éprouvettes du brut de coulée affiné ( $\gamma$  20) ont subi un recuit à 300°C pendant des durées variables.

Ces éprouvettes ont été l'objet d'un examen métallographique et des essais mécaniques.

### 5.2.1. L'influence du recuit sur la structure :

Dans la structure du brut de coulée (Fig. 11) subsistent des cristaux de silicium primaire, ceci est dû à une insuffisance du traitement de modification, les causes en sont :

- Température non respectée,
- Insuffisance du sodium,
- Temps d'attente était trop court ou trop long entre l'introduction du sodium et la coulée,
- Le métal a été agité pendant l'attente d'où perte de sodium.

Suivant les structures des Figures 14, 15, 16, 17 et 18, on remarque une homogénéisation croissante, elle est relativement totale pour une durée de recuit de cinq heures.

### 5.2.2. L'influence du recuit sur les propriétés mécaniques :

Pour la détermination des caractéristiques mécaniques des éprouvettes recuites, on a utilisé la traction et la dureté.

Comme nous l'avons déjà indiqué, la machine de traction est équipée d'un système d'enregistrement des diagrammes : charge - déformation, la charge utilisée étant toujours de 40 KN, les diagrammes sont donnés dans la Figure 13.

A partir de ces diagrammes, on trace la courbe conventionnelle correspondante à la durée d'homogénéisation totale.

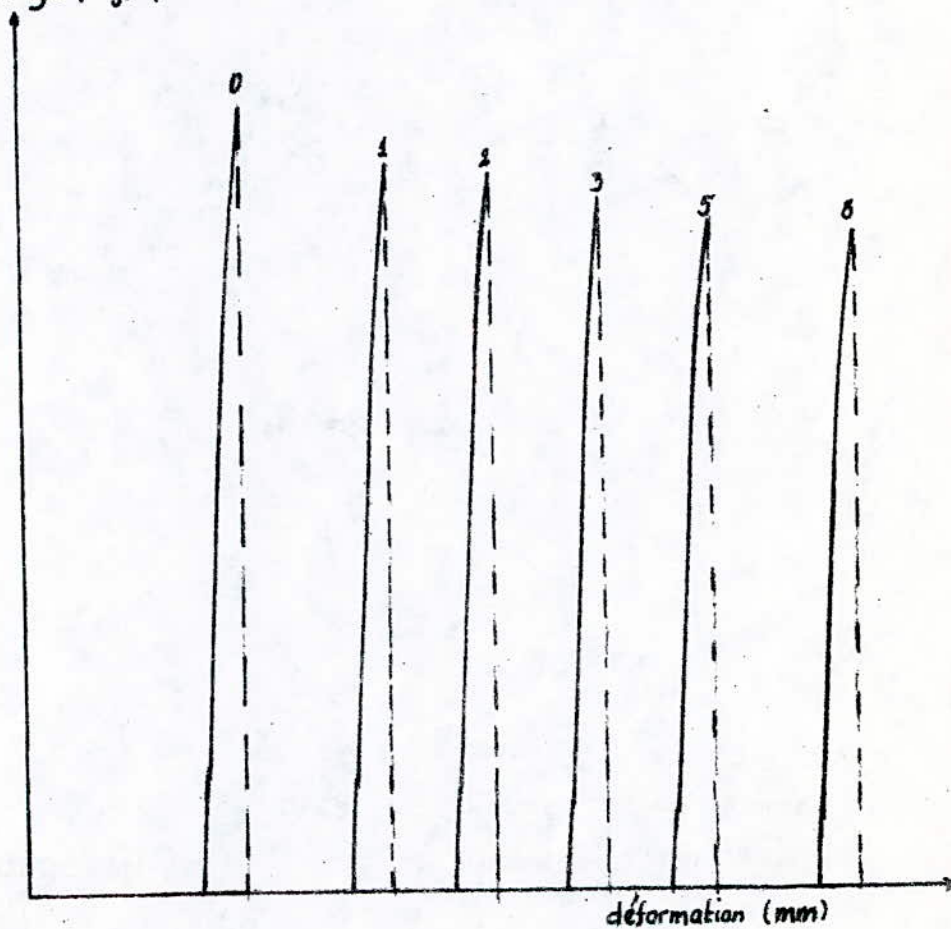


L'échelle :

Charge : 100 Kgf : 5 mm .

déformation : 1mm : 2mm .

charge ( Kgf )



Diagrammes: Charge - déformation : enregistrés par la machine de traction .

0 : Brut de coulé .

1, 2, 3, 5, 8 temps de recuit des éprouvettes .

fig: 13



fig:14 . Brut de coulée recuit : 1h à 300°C

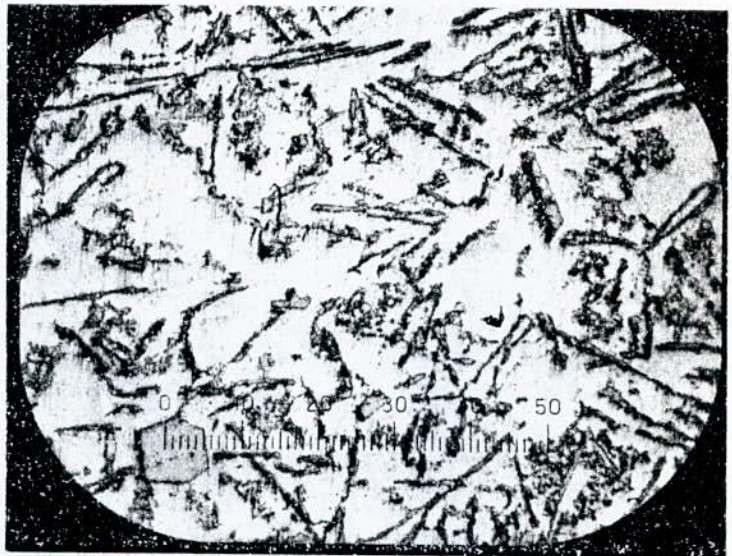


fig:15 . Brut de coulée recuit :  
2h à 300°C .



fig:16 . Brut de coulée recuit:  
3h à 300°C.

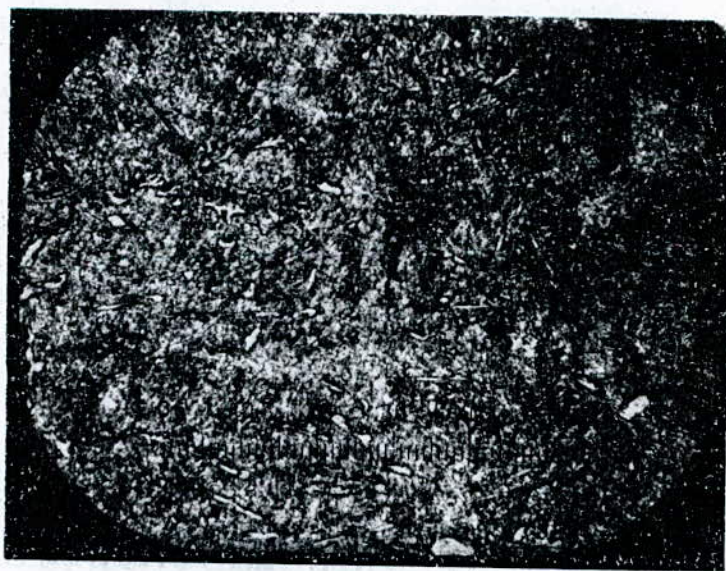


fig:17 . Brut de coulée recuit:  
5h à 300°C

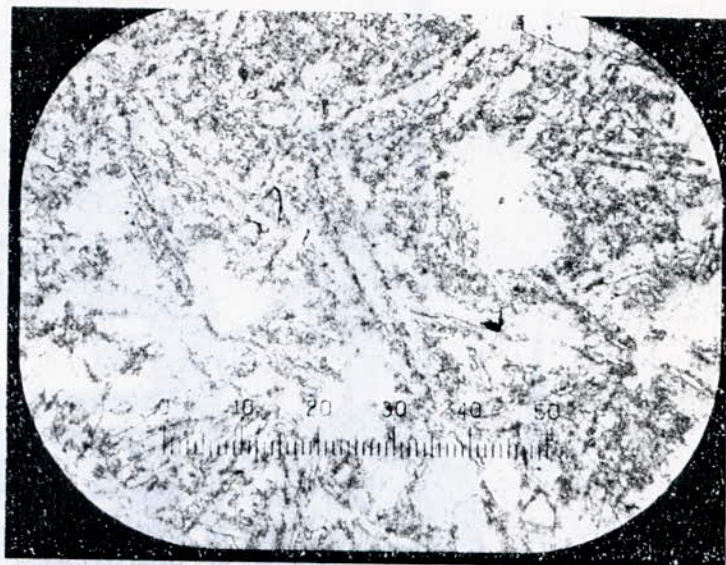


fig: 18 , Brut de coulée recuit :  
8h à 300 °C

On dresse le tableau suivant :

$F/S_0$	1,60	1,81	4,82	7,69	10,03	11,04	11,77	12,04
A	0,71	0,86	1,43	2,14	2,86	3,21	3,57	5,50

où :  
 $F/S_0$  : la contrainte conventionnelle en  $Kgf/mm^2$ .  
A : l'allongement en %.

Rr étant la résistance à la rupture correspondent à la charge maximale.

L.E le passage entre les domaines de déformation élastique et plastique, parfois difficile à mettre en évidence sur les courbes. Dans ce cas, on est amené à définir une limite d'élasticité conventionnelle :  $R_{0,2}$  mesuré à l'intersection de courbe charge -déformation et d'une droite parallèle à la courbe de déformation élastique, dont l'abscisse à l'origine est 0,2 %.

Pour la détermination de la dureté des éprouvettes ayant le recuit, on utilise une bille de 10 mm de diamètre et une charge de 2 000 KN.

A partir de ces données, on trace les graphes représentant les caractéristiques mécaniques (Rr, LE, A, HB) en fonction du temps de recuit.

Les résultats sont illustrés dans le tableau de la page suivante :

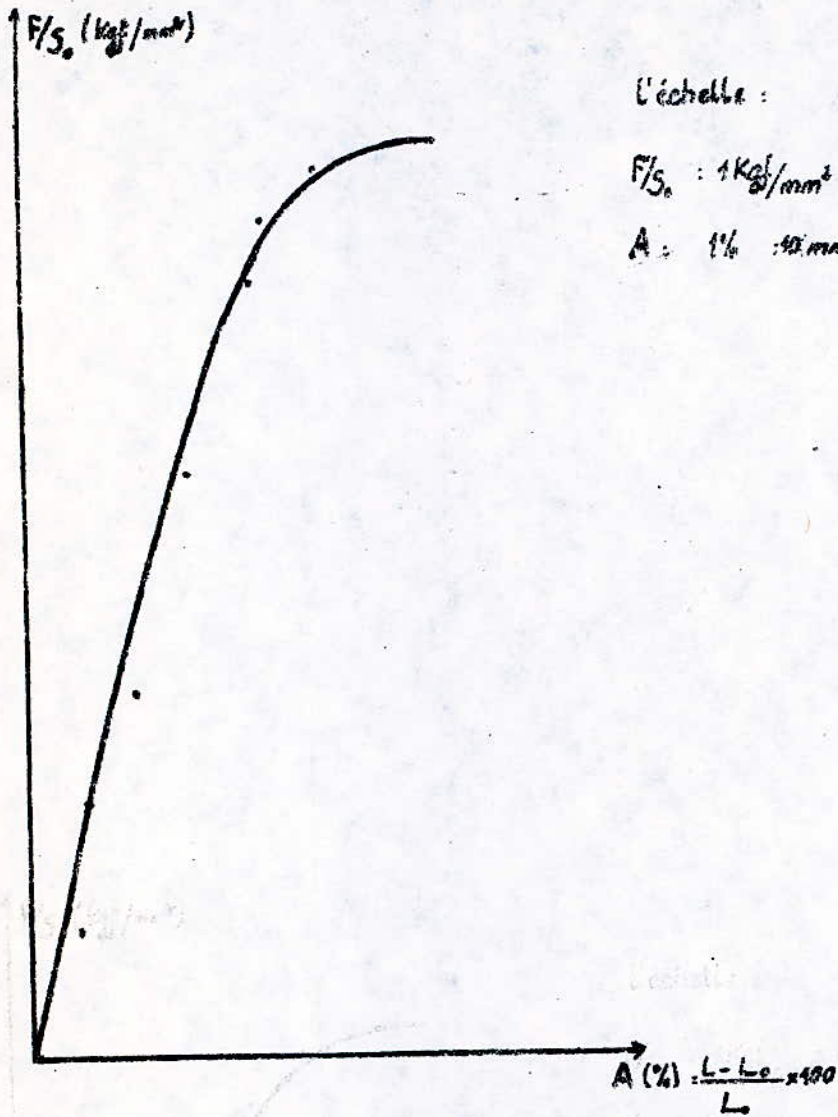


Diagramme de traction : courbe conventionnelle :  
recuit : 5h.

fig: 19.

Essais mécaniques des éprouvettes recuites à 300°C.

	L.E (Kgf/mm <sup>2</sup> )	R (Kgf/mm <sup>2</sup> )	A (%)	HB
Brut de coulée	2.14	14.05	3.93	54.3
1 de recuit	2.07	12.91	3.93	49.6
2 H de recuit	1.94	12.81	4.00	48.6
3 H de recuit	1.81	12.37	4.14	47.5
5 H de recuit	1.34	11.97	4.29	43.7
8 H de recuit	1.20	11.77	4.58	38.6

D'après les graphes (Fig.20) représentant la variation des caractéristiques mécaniques en fonction du temps de recuit des éprouvettes, on constate que la limite élastique, la résistance à la rupture et la dureté diminuent en prolongeant la durée du recuit, ce traitement modifie sensiblement les caractéristiques de dureté. Par contre, l'allongement augmente avec l'augmentation de la durée du recuit. Donc, on peut dire que le recuit augmente la plasticité des pièces coulées en sable à partir de l'eutectique aluminium - silicium.

5.2.3. L'influence du recuit sur la résistance à la corrosion :

L'essai de corrosion des échantillons recuits à des durées variables à 300°C, a été effectué dans un milieu électrolytique fort de chlorure de sodium en solution dans l'eau naturelle et ce à la température ambiante.

Pour contrôler l'effet de la corrosion sur les échantillons, la perte du métal en poids étant très négligeable, alors on s'est limité au calcul ou mesure du pourcentage de la surface corrodée.

Soient :

S : La surface de l'échantillon avant l'attaque électrolytique.

S<sub>corr</sub> : la surface du même échantillon après une semaine d'attaque.

% S : le pourcentage de la surface corrodée.

$$\% S = \frac{S_{\text{corr}}}{S} \times 100.$$

Ces résultats sont illustrés dans le tableau de la page suivante.:



Essai de corrosion effectué à la température ambiante.

Temps de recuit	0	1	2	3	5	8
S	1461	1517	1508	1547	1548	1608,75
S <sub>corr</sub>	555,0	537,0	490,0	320,0	270,0	318,0
% S	38,0	35,4	32,5	20,7	17,4	19,8

5.2.4 - Analyse complémentaire : analyse radiographique :

Le recuit que subissent les pièces coulées en A - S13 est effectué dans le but de supprimer ou de diminuer les contraintes du IIème type existant au sein du grain.

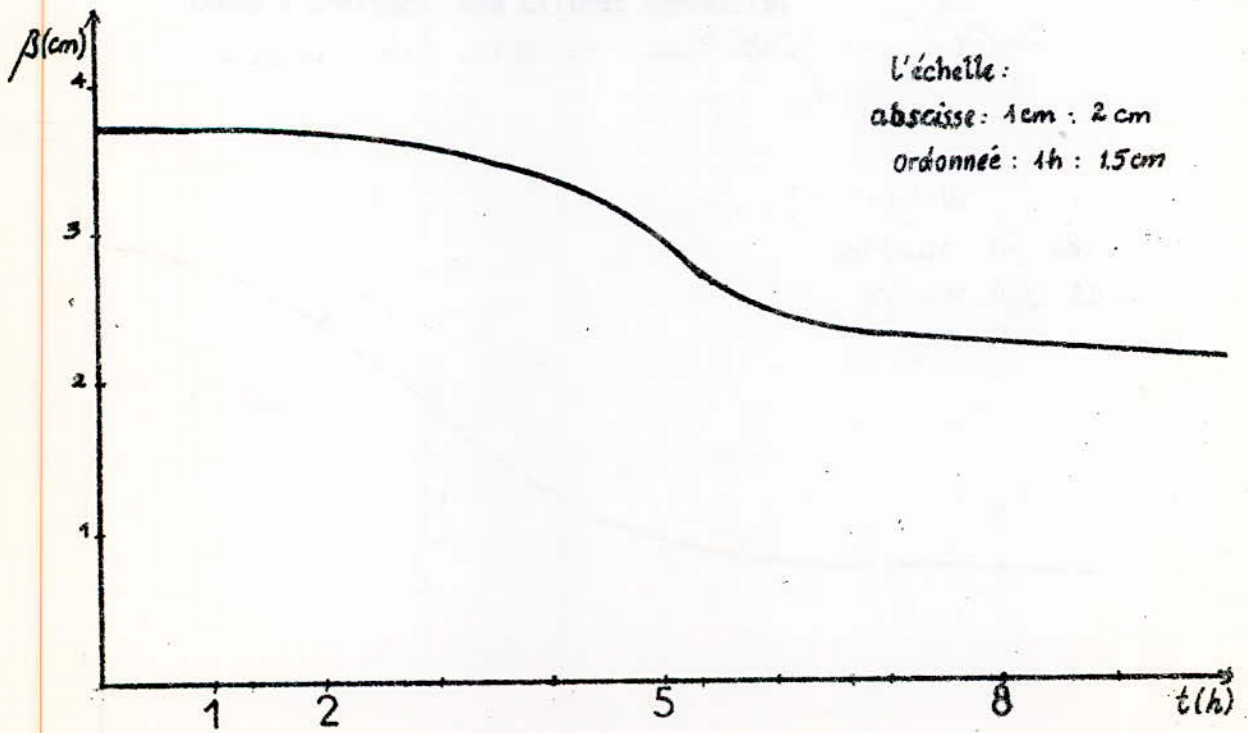
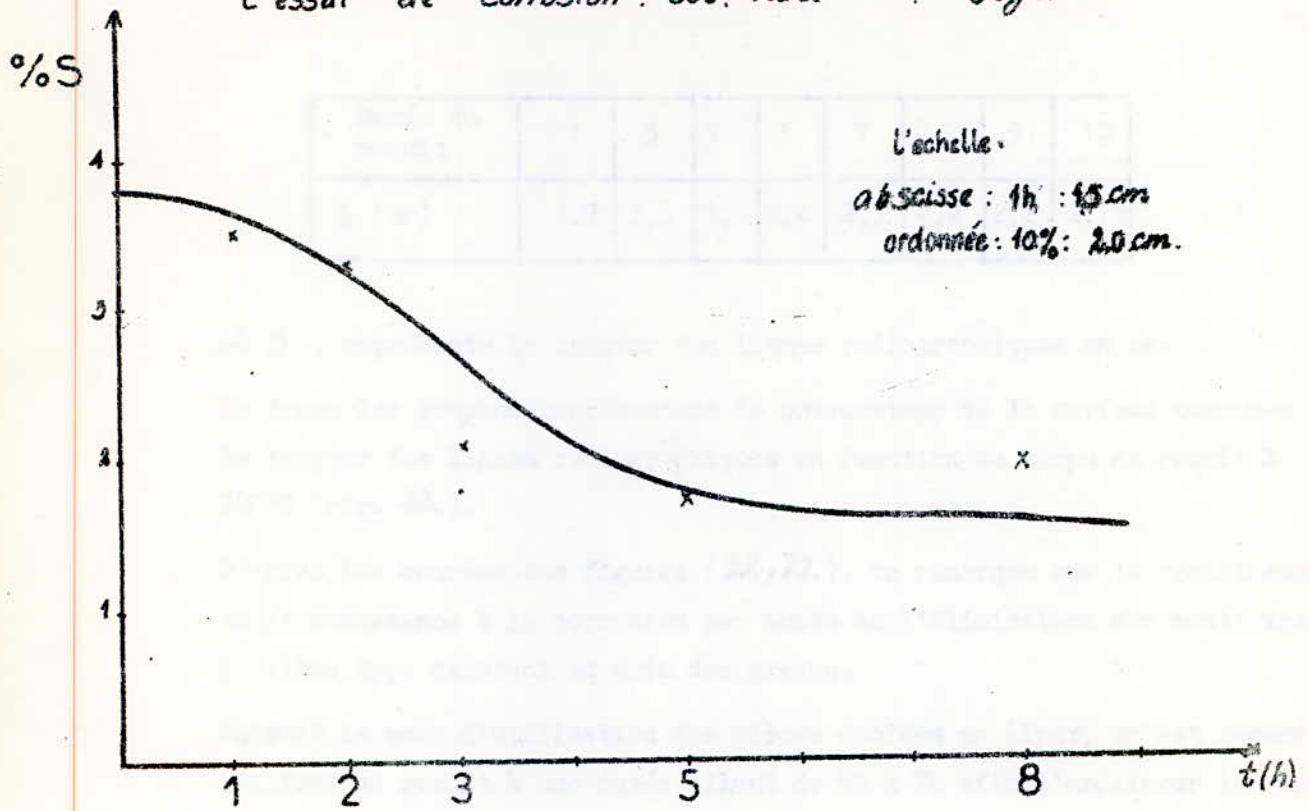
L'analyse radiographique est un moyen de contrôle de l'effet du recuit.

L'examen radiographique a été effectué en utilisant la méthode des poudres en employant un rayonnement  $X$  monochromatique.

La présence des contraintes du IIème type fait que le paramètre réticulaire diffère suivant les grains et les blocs suite des distorsions du réseau cristallin. Alors, il résulte une radiographie l'élargissement des anneaux d'interférence.

En utilisant l'équivalent du montage de DEBBYE - SCHERRER, par une rotation continue de l'échantillon, le signal du détecteur est amplifié et intégré. On obtient ainsi un diagramme I ( $2\theta$ ) formé de pics correspondant aux réflexions (110). La largeur des lignes radiographiques des échantillons suivant le plan (110) est représenté dans le tableau suivant :

L'essai de corrosion : sol<sup>n</sup> NaCl : fig:22



Analyse radiographique de : Al-Si15.

fig:21.

## II O N C L U S I O N .

---

Le travail effectué a été basé sur l'étude de l'influence du recuit sur la structure, les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion des pièces moulées en alpax (aluminium - silicium).

Le recuit diminue la limite élastique, la résistance et la dureté tandis qu'il ~~diminue~~ <sup>augmente</sup> l'allongement. Donc, la plasticité des pièces est améliorée après un recuit de 300°C.

De même, le recuit, en éliminant les contraintes existantes au sein des grains, rend les pièces très résistantes à la corrosion même en présence d'électrolyte fort.

Alors, on a conclu que pour une simple vérification de la possibilité d'éliminer les contraintes, les pièces travaillent dans des milieux corrosifs tels que : l'eau salée, l'eau de mer, régions très humides, etc ....

Lista des figures.

Fig.1.....pag.12...  
Fig.2.....pag.13.  
Fig.3.....pag.15.  
Fig.4.....pag.17.  
Fig.5.....pag.19,  
Fig.6.....pag.22.  
Fig.8.....pag.27.  
Fig.9.....pag.29.  
Fig.10.....pag.40  
Fig.11.....pag.44  
Fig.12.....pag.46  
Fig.13.11.....pag.48  
Fig.14,15.....pag.49  
Fig.16,17.....pag. 50  
Fig.18.....pag.51  
Fig.19.....pag. 55  
Fig.20.....pag. 57  
Fig.21,22.....pag. 60  
Fig.7..... pag.25.  
./..

## B I B L I O G R A P H I E

- Précis de métallurgie appliquée A. ROOS, B. MILLET 1982.
- L'ALUMINIUM . PECHINEY. tome 1 et 2.
- Métallurgie. tome 1 - Alliages métalliques . C. CHAUSSIN, G. HILLY Ed. DUNOD. 1976.
- Technique de l'ingénieur, fonderie et moulage des alliages d'Aluminium.  
R. PORTALIER. 1982.
- Un regard à l'intérieur de l'Aluminium. D. ALTENPHOL . Ed. Eyrolles. 1976.
- La métallurgie générale. J. BENARD, J. PHILIPERT, Ed. MASSON 1969.
- Métallurgie et traitements thermiques des métaux. Ed. MIR. MOUSCOU. I. LAKHTINE.

