

وزارة التعليم والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المفكرة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

1ED

## ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : DE MINES ET METALLURGIE

### PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat.

#### S U J E T

ETUDE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE  
REVENU SUR LES CARACTERISTIQUES  
MECANIQUES DE L'ALLIAGE AL-SI-MG TYPE A-S10G  
ELABORE A LA S.N.V.I-C.V.I DE ROUIBA.

Proposé par :

V. ARZAMASSOV

Etudié par :

CHEBBAB  
DJILLALI

Dirigé par :

V. ARZAMASSOV

PROMOTION : FEVRIER 1986

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

--000--

II)) E D I C A C H S

--000--

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

Je dedie ce Modeste travail II-)) : -o-

- la mémoire de mon père
- la mémoire de ma soeur
- ma mère
- mes frères
- Tous ce qui me sont chers.

II)). - CHEBBAB / :

III. Traitement thermique des alliages d'alliages d'aluminium de fonderie :.....	29
III. 1. Généralité :.....	29
III. 2. Traitements thermiques permettant d'améliorer les caractéristiques mécaniques des alliages de fonderie	20
III.2.1. Chauffage de mise en solution :.....	30
III.2.2. La trompe :.....	32
III. 2.3. Durcissement structural par précipitations à la maturation ou revenu /:.....	32
III. 3 Défauts dus aux traitements thermiques :.....	38

Partie B : ETUDE EXPERIMENTALE

IV. Etude de l'alliage de l'alliage Al-Si-Mg Type A- S 10 G coulée en sable :.....	39
IV. 1 Composition chimique :.....	40
IV. 2. Influence de la composition chimique :.....	41
IV. 3. Traitement thermique :.....	42
IV. 3.1. Choix de température de mise en solution :.....	42
IV. 3.2. Choix du temps de mises en solution :.....	41
IV. 3.3. Trompe :.....	41
IV. 4. Influence du temps et température de revenu sur les caracté- ristiques mécaniques :.....	42
IV. 4.1. Propriétés mécaniques (propriétés statistiques)	43
IV. 5. Résultats expérimentaux :.....	45
IV. 5.1. Mécanisme intervenant pendant le revenu :.....	53
IV. 5.2. Interpretations des resultats :.....	58
<u>X</u> <u>C O N C L U S I O N</u> / : .....	62.

// TABLE DES FIGURES //

Fig 1 : Diagramme d'équilibre aluminium - silicium :.....	19
Fig 2 : Diagramme d'équilibre Aluminium - cuivre :.....	22
Fig 3 : Diagramme d'équilibre aluminium- Magnésium :.....	24
Fig 4 : La solubilité des éléments d'alliages dans l'aluminium....	31
Fig 5 : Schéma des phénomènes engendrés par le traitement thermique	34
Fig 6 a : A Solution solide de substitution :.....	35
Fig 6 b : Zone de GUINIER-PRESTON :.....	35
Fig 6 c : Composé intermétallique cohérent:.....	35
Fig 7 : Influence des conditions de revenu sur la dureté Brinell de L'A- S 10 G coulée en sable :.....	57
Fig 8 : Influence des conditions de revenu sur les caractéristiques mécaniques de L'A-S 10 G coulée en sable :.....	56
Fig 9 : Influence des conditions de revenu sur les caracté- ristiques de L'A-S 10 G coulée en sable :.....	57
Fig 10 : Alliage A-S 10 G - Etat trempé et revenu, variations des caractéristiques mécaniques avec la température de revenu pour T : 10 h :.....	60
Fig 11 : Evolution des caractéristiques mécaniques en fonction du traitement de mise en solution, trempe, et revenu :.....	61.

La fonderie se situe entre la métallurgie, qui élabore métaux et alliages et les industries de construction, qui les mettent définitivement en oeuvre.

Son rôle, en générale soit pour fabrication de pièce de formes compliqués qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, soit pour la production à un prix de revient intéressant de pièces plus simples, soit encore dans les deux cas précédents, pour profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement ..... etc), et des propriétés mécaniques particulières des divers métaux ~~xxx~~ et alliages coulés.

Seulement dans un cas exceptionnel que les métaux purs sont employés pour la réalisation des pièces de fonderie, car les métaux purs (Al, Cu, Zn, ...etc) présentent des caractéristiques physiques et chimiques, qui rendent les propriétés de fonderie très délicates et l'obtention de pièces saines, fort difficiles Exemple : l'Aluminium très oxydables, coule très mal; par contre il présente l'avantage d'être très léger.

En plus des difficultés de fonderie, qui ~~il~~ fond que les métaux purs sont pratiquement non employés, les faibles caractéristiques mécaniques de ces métaux purs leur font préférer les alliages de fonderie, c'est à dire l'union par fusion de plusieurs corps dont l'un au moins est un métal.

Les propriétés d'un alliage de fonderie dépendent de la composition chimique et de la structure métallographique de cet alliage dans le cadre de la fusion des alliages d'aluminium, le respect de la composition chimique est une des règles primordiales. Lors de l'élaboration de ces alliages, la composition chimique peut s'altérer et devenir incorrecte par les causes suivantes:

- Enrichissement en fer
- La pollution du bain par des éléments étrangers
- L'Hétérogénéité du bain dans le four.
- Les écarts de teneurs en Magnésium.

La structure des alliages de fonderie (Al-Si; Al-Cu; Al-Mg) est généralement biphasée du fait de la faible solubilité des éléments d'addition dans l'Aluminium à la température ambiante. Cette structure prend naissance pendant la solidification et se modifie au cours du refroidissement à l'état solide.

.../...

// PARTIE A : ETUDE THEORIQUE //

# I) CLASSIFICATION ET PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM

## I - 1) L'Aluminium et ses propriétés :

L'Aluminium est un produit métallurgique, ces très nombreuses applications sont dues à ses remarquables caractéristiques tant physiques que mécaniques ainsi qu'à ses propriétés chimiques. Ces différentes caractéristiques dépendent étroitement de la pureté du métal.

### Propriétés physiques et mécaniques :

L'Aluminium est le métal le plus léger après le Magnésium, sa densité n'est pas sensiblement modifiée dans les alliages légers où elle est toujours inférieure à 3.

### Constantes physiques:

Poids atomique .....	26,97
Structure cristalline (20°C).....	réseau C.F.C
Densité (20°C).....	2,70
Point de fusion .....	659,8 °C
Point d'ébullition .....	1800° C
Chaleur spécifique (0 - 100°C).....	0,2259 Cal/g°C
Coefficient linéaire de dilatation thermique (20°C)....	23,8 $10^{-6}$ /°C
Résistance électrique (20°C).....	2,699 microhm cm
Conductibilité thermique (20°C).....	0,52 Cal cm <sup>2</sup> 5 °C

### Propriétés Mécaniques

Résistance à la traction .....	9 Kg / mm <sup>2</sup>
Limite d'élasticité .....	3 Kg /mm <sup>2</sup>
Allongement à la rupture .....	45 %
Striction .....	80 %
Dureté .....	16 HB
Module d'élasticité .....	7800 Kg/mm <sup>2</sup>

La plupart des applications de l'aluminium pur sont justifiées par quelques propriétés physiques particulières comme :

### La conductibilité électrique :

Elle est considérablement plus élevée que celle de cuivre, diminue légèrement par déformation à froid et très fortement par la présence d'impuretés.

### La conductibilité thermique :

Un avantage de l'aluminium et des alliages légers réside dans leur chaleur

La haute conductibilité de l'aluminium est à la base de nombreuses applications dont la légèreté joue également un rôle important malheureusement son coefficient de dilatation Thermique est élevée.

Propriétés Chimiques :

Au point de vue metallurgique , le seul aspect des propriétés chimiques qui nous interesse vraiment , est la corrosion. L'Aluminium resiste excellemment à la corrosion atmosphérique, car se recouvre d'une pellicule d'oxyde épaisse et adhérent qui empêche la pénétration de l'oxygène. Son contact avec les métaux plus nobles forme des couples galvaniques dont les effets détruisent la couches d'alumine protectrice et entraînent ainsi une forte corrosion.

I.2. Alliages d'aluminium et leur classification /

La nécessité d'emploi d'alliages d'aluminium **est** due aux insuffisances de l'aluminium en constructions mécaniques qui découlent dans leur ensemble de ses faibles propriétés mécaniques.

C'est par addition d'éléments d'alliages qu'on peut améliorer considérablement ses principales propriétés tel que la résistance à la traction, la limite d'élasticité, la dureté, la résistance à la corrosion et la conductibilité électrique.

Les principaux éléments d'alliages sont : **silicium; magnesium** cuivre, puis manganèse, nickel, fer, **chrome**, zinc etc... pour des faibles teneurs ajoutées normalement de ces éléments augmentent la résistance à la traction et la dureté et **diminuent** les conductibilités électriques **et** thermique, la ductibilité et la tenacité.

La plupart des alliages d'aluminium sont susceptible d'un durcissement par **precipitation** augmentant considérablement la limite élasticité, la résistance à la traction et la dureté. Plusieurs types d'alliages d'alliages d'alluminium résulte d'un compromis qui permet de mettre au premier plan les propriétés recherchées en vue d'une application bien déterminée.

En générale, l'aluminium entre dans la constitution d'un très grand nombre d'alliages dont nous traitons que les principaux alliages composés de deux constituants dit binaire tel que : aluminium - silicium, aluminium - cuivre, aluminium **magnesium**. Tous ces alliages, à l'état d'équilibre forment une solution solide faiblement alliée et des **phases intermétalliques** tels que **Mg<sub>2</sub>Si**, **Cu Al<sub>2</sub>**, **Al<sub>3</sub> Mg<sub>2</sub>**.

Les alliages d'aluminium sont le plus souvent subdivisés selon leur applications en trois catégories.

- A - Alliages de **frittage**
- B - Alliage de forge et de **laminage**.
- C - Alliage de **fonderie**. .../...

### I.2.1. Alliage de frittage / :

En générale, la fabrication des produits frittés est une réaction à l'état solide entre particules d'une masse de poudre portée à une température n'atteignant pas le point de fusion, et qui, par transport de matière de recrystallisation entraîne, sans changement de forme, la consolidation de cette masse et la formation d'un solide continu cohérent.

L'Aluminium et ses alliages sont restés très longtemps ignorés des fabricants de pièces mécaniques frittés par suite de difficultés de compression et de frittage d'un métal très ductile et très réactif. La fabrication des alliages frittés en alliage d'aluminium, il y a moins de dix ans qu'a démarré aux Etats-Unis grâce aux efforts de promotion de deux producteurs d'aluminium **alcoa** et **Alcan**. L'emploi de mélange des poudres des constituants permet d'obtenir des alliages à propriétés intéressantes dans les types **Al-Cu-Si-Mg** et **Al-Zn- Mg - Cu** surtout après traitements thermiques habituel de durcissement par précipitation. Les pièces frittées permet de subir éventuellement tous les traitements de surface connus pour les métaux légers car elle ne sont pas perméables.

\* Les avantages offerts par cette technique sont par exemple :

- Perte de matière inférieure à 1 ÷ 2 % au cours de l'ensemble des opérations.
- Précisions de dimensions des pièces
- absence totale de défauts internes dus au métal (inclusions)
- Les pièces en alliages d'aluminium sont résistant à la corrosion atmosphérique.

### I.2.2. ALLIAGE DE FORGE ET DE LAMINAGE / :

7/

Ces alliages sont coulés sous forme de plaques ou de billettes et ensuite transformés en demi-produits : tôles, profilés, barres ...etc par laminage ou par filage, les demi-produits ainsi obtenus sont ensuite utilisés dans la Construction mécanique où ils sont assemblés par soudage, rivetage, vissage, dans le bâtiment, dans l'électricité etc...

Ces alliages se manifestent d'un bon comportement à la déformation plastique, associé à une résistance mécanique moyenne à élevée.

Suivant le processus par lequel les différents niveaux de caractéristiques mécaniques sont obtenus, on distingue pour les alliages de forge et de laminage.

#### \* Les alliages ou susceptibles de durcissement structural ou (non trempants).

Dans lesquels le niveau de caractéristiques mécaniques est obtenu par l'effet d'écrouissage dû aux déformations (laminage, filage...) ou par recuits.

Ces alliages sont du type Al-Mn et Al-Mg, ils présentent les meilleures performances du point de vue résistance à la corrosion ce qui justifie leurs applications les plus diverses dans les milieux les plus difficiles (milieu marin) ainsi que leur bon comportement aux basses températures ils présentent de très beau état de surface par oxydation anodique ce qui permet de nombreuses applications dans le domaine de la décoration.

#### Les alliages à durcissement structural (ou trempants).

Le durcissement structural de ces alliages est dû à des transformations métallurgiques à la suite des traitements thermiques de mise en solution de trempe et revenu, aboutissant à la précipitation à l'intérieur des grains ou aux joints de grains de précipité de phase durcissante. Bien que connu dans son principe depuis de très nombreuses années. Le durcissement structural des alliages d'aluminium est toujours l'objet d'étude métallurgique parmi ces alliages citons.:

.../...

DURALUMINS / : Ce sont des alliages Al-Cu-Mg additionnés de manganèse, le duralumin est durci par formation de zones de GUINIER-PRESTON de composition complexe et de phase métastables, la présence du manganèse améliore la tenue à la corrosion de l'alliage et augmente les propriétés mécaniques.

### I.2.3. Alliage de fonderie / :

Et enfin passons à une étude plus détaillée des alliages d'aluminium de fonderie qui sont notre sujet.

On entend en premier lieu des alliages de fonderie un comportement favorable lors de la solidification et des caractéristiques mécaniques suffisantes à l'état brut de coulée.

Pour la fonderie d'alliages ayant l'aluminium comme constituant principal, on peut envisager que des quantités d'addition qui donneront des alliages d'aluminium ayant une densité de 3,5 au maximum, car un alliage d'aluminium plus lourd ne serait plus considéré comme un métal léger, les quantités ajoutées sont donc déjà limitées par la considération du poids spécifiques.

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

La fonderie d'alliage d'aluminium consiste à produire une pièce par coulée d'un métal en fusion dans un moule, suivant le mode de coulée et la nature de moule on distingue.

Moulage en sable : dans ce type de moulage le métal est solidifié dans une cavité par du sable comprimé, les parties creuses sont réservées aux noyaux. Ce moulage est caractérisé par le fait que le refroidissement de la pièce est très lent. Moulage en coquille / : Le moulage en coquille est un procédé utilisant un moule métallique, le plus souvent en fonte, que l'on remplit en versant simplement l'alliage liquide, par un ou plusieurs trous, la pièce se démoule après solidification. comparé au moulage en sable, le moulage en coquille utilise un moule métallique.

permanent, lisse, rigide et conducteur qui permet les échanges thermiques entre l'alliage coulé et la coquille sont rapides, entraînant une solidification rapide de la pièce qui conduit :

\* A une structure métallographique fine qui permet :

- d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées par rapport au moulage en sable.
- d'éviter le gain grossier de la pièce.

#### MOULAGE SOUS PRESSION / :

Le moulage sous pression réalise le cycle de fabrication le plus court de la matière première à la pièce finie. Le succès du moulage sous pression réside dans le fait que :

- la production est rapide
- les pièces sont obtenues avec précisions dans des formes complexes.
- Les caractéristiques mécaniques sont satisfaisantes.

Le moulage sous pression est donc l'art de produire, en grandes séries, en forçant l'alliage à pénétrer dans l'empreinte d'un moule métallique, des pièces de dimensions suffisamment précises pour éliminer les opérations d'usinage ou les réduire au maximum.

En tenant compte de la symbolisation suivant la norme AFNOR NF A 57-702, les alliages de fonderie se divisent en Cinq grandes familles d'alliages.

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

I - 3 - 1) Alliage ne comportant aucun traitement thermique :

~~Les traitements thermiques de ces alliages n'entraînent~~  
Généralement aucune modification de leurs propriétés physique, ils sont utilisés à l'état brut le coulé. Dans ce groupe des alliages légers de fonderie il est bon de généraliser la stabilisation moléculaire par recuit dans le but d'éliminer les tensions moléculaires et l'hétérogénéité structurale. Le recuit stabilisateur est obtenu pour un lent chauffage de plusieurs heures à  $380 + 400$  °c suivi d'un refroidissement lentement dégressif à 100 °c à l'heure citons deux groupes de ce type d'alliage.

I - 3 - 1 - 1) Alliage à faible résistance : Exemple A - 513 :

Alliage de (10 + 13) % de silicium l'A-513 dénommé aussi Alpax, contient des cristaux primaires de Si relativement gros, alliage poreux et fragile, ces caractéristiques mécaniques sont faibles. Le traitement d'affinage se fait par le sodium, en ajoutant 0,1% de Na à l'alliage fondu juste avant la coulée, On obtient une structure eutectique très fines qui confère à l'alliage de bonnes propriétés mécaniques et surtout une grande ténacité sous l'effet de ce traitement la teneur eutectique passe de 11,7 à 13 % de Si (~~11,7~~) par suite d'une surfusion qui abaisse la température de solidification eutectique à environ 564 °c au lieu de 577 °c cet affinage peut être obtenu généralement par refroidissement brutal du métal au moment de la coulée (coulée en coquille) à savoir que l'effet du Na 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 Al - Si affiné. Ce traitement d'affinage s'appelle "Modification" et non "Amélioration" qui correspond à un traitement thermique. La structure de l'eutectique est normalement lamellaire mais la présence de certains éléments autres que l'aluminium et le silicium peut la transformer profondément.

I - 3 - 1 - 2) Alliages Antifrictions : Alliages antifrictions sont destinés à des pièces de frottement les principales propriétés recherchées par ce type d'alliage sont :

1/ bon coefficient de frottement et à apposer au phénomène de "gripage" (arrachement de parcelles métalliques entre surface frottantes).

2/ un point de fusion relativement bas 360 à 400 °c

.../...

Alliages Al - Sn : Le problème métallurgique posé par le développement des alliages (Al - Sn) concerne la répartition de l'étain au sein de la matrice de l'aluminium.

Il existe deux chasses de ces alliages.

1° ALLIAGE CONTENANT 6 % DE D'Sn environ.

L'alliage le plus courant L'A-E6 UN, a de bonne qualité de frottement, les caractéristiques mécaniques sont améliorés par l'addition du silicium à froid et par addition du NICKEL à chaud.

2° / Alliage contenant 20 % d'Sn environ.

Ces types d'alliages sont plus chargé en étain une addition du cuivre de 1 à 3 % destiné à durcir la matrice, ont une résistance mécanique plus faible que L'A- E 6 U N . La vitesse de refroidissement doit-être grande, le moulage en coquille métallique est préféré dans tous les cas au moulage en sable.

En mécanique, très souvent les pièces de fonderie en alliages légers sont utilisées à l'état brut de coulée cependant les traitements thermique sont de nature à élargir considérablement le champ d'application de ces alliages coulés.

Citons trois groupes d'alliages de fonderie qui subissent les traitements thermique.

1.3.2.1. Alliage à résistance <sup>normale</sup> morale /:

Ce sont des alliages Al-Si-Mg, les principaux alliages de cette famille sont : A-S7 G, A-57 G 03, A-57 G 06, A-510 G la plupart des alliages Al-Si-Mg présentent des caractéristiques mécaniques à chaud moyennes, celles-ci sont inférieures à celles des alliages Al-Cu et Al-Mg pour les températures à 200 ° C d'une manière générale, les caractéristiques de A-S7 G à 20° C se maintiennent à peu près jusqu'à 150° C à partir de cette température la résistance diminue rapidement à l'inverse des allongements.

A- S 10 G : Alliage à ( 9 ÷ 10,5 ) % Si et ( 0,17 ÷ 0,3 ) % de Mg.

Il a possibilité de transformer la structure par trempe et revenu comme il peut aussi améliorer les caractéristiques mécaniques et l'usinabilité il a une bonne résistance à la corrosion atmosphérique, leurs applications trouvent tous les marchés de pièces de fonderie.

L'Influence du temps et température de revenu sur les caractéristiques mécaniques sont étudiés au chapitre IV.

1.3.2.2. Alliage à haute résistance / :

Pour obtenir des caractéristiques mécaniques remarquables des alliages de fonderie à hautes résistances, principalement des bons allongements il faut que le métal soit bien désoxydé, dégagé et coulé dans les bonnes conditions et surtout avoir une basse teneur en fer.

.../...

Il présente après traitement thermique des caractéristiques mécaniques élevée, l'abaissement de ces caractéristiques dû à l'élévation de la température s'observe dès 200 ° C à 300 ° C il présente une excellente tenue à la corrosion atmosphérique et usinabilité élevée.

L'addition à l'alliage d'inoculants (titane, Zirconium) améliore les propriétés mécaniques alors que l'addition du beryllium diminue l'oxydation à la fusion ce qui permet de la conduire sans flux de protection.

Les plus utilisés de ces alliages sont des alliages Al-Cu, la teneur en cuivre est 4 à 5 %, pour augmenter la résistance à chaud et affiner la structure de ces alliages on ajoute souvent du titane, chrome, manganèse, parmi ces alliages citons.:

A-U4MF : Alliage à traitement thermique, l'affinage du grain est assuré par l'addition du titane. Cet alliage forme en plus de la phase Cu-Al<sub>2</sub>

Les phases Al<sub>2</sub>Ti et Al<sub>2</sub>MgCu qui prennent place au sein du volume de grain de la solution solide, la formation de ces phases intermétalliques et la présence du manganèse dans la solution solide augmentent la résistance à chaud.

<sup>U</sup>  
A-5GT : Le traitement thermique de cet alliage améliore toutes les caractéristiques mécaniques d'une manière spectaculaire, son durcissement est assuré par le remplacement des zones de GUINIER-PRESTON par une phase de transition Al<sub>2</sub>CuMg qui apparaît sous forme de précipités aiguillés cohérents avec la matrice qui s'oppose au passage de dislocations.

L'utilisation de l'alliage à l'état brut de couler ne présente aucun intérêt. Si l'on n'a pas besoin des hautes caractéristiques mécaniques que permet d'obtenir l'alliage A-U5GT traité, il vaut mieux choisir un autre alliage plus facile à mouler.

Pour le choix d'un alliage résistant à chaud il faut tenir compte de :

\* La température

\* La durée de préchauffage à cette température.

## I.4.1. PROPRIETES DE MOULAGE / :

4.1.1. Solidification : suivant leur composition, les alliages d'aluminium présentent un intervalle de solidification plus ou moins grand. La façon dont se déroule la solidification dans les moules dépend beaucoup de la valeur de cet intervalle :

- Lorsque celui-ci est très faible, la solidification s'effectue en couches minces.
- Lorsque celui-ci est grand, la solidification s'effectue en couches épaisses.

4.1.2 Coulabilité : La coulabilité est l'aptitude d'un alliage à remplir l'emprunte du moule, caractérisée par un indice que représente la longueur en centimètre d'une spirale.

Elle augmente avec la température, elle est plus élevée que l'intervalle de solidification est faible.

4.1.3 Criquabilité : La criquabilité est l'aptitude d'un alliage à donner des criques, ce défaut concerne que les alliages à grand intervalle de solidification.

Lorsqu'une zone en voie de contraction est voisine d'une zone à l'état **pateux**, des tensions se produisant qui provoquent l'apparition de crique à chaud celle-ci apparaissent donc toujours dans les régions d'une pièce qui se solidifient les dernières.

4.1.4 Aptitude à la retassure : Le refroidissement des pièces moulées s'accompagne d'une contraction volumétrique, si cette **contraction prend** naissance pendant la solidification elle provoque la formation de défauts appelés retassures.

Se présentant sous les formes suivantes :

- Macroretassures.
- Affaissements
- Microretassures.

Autres propriétés / :

Usinabilité : tous les alliages d'aluminium de fonderie s'usinent facilement dans de bonnes conditions **et** la plupart d'entre eux à grande vitesse. Certains traitements effectués en fonderie agissent sur la structure et peuvent changer le comportement de certains alliages à l'usinabilité parmi-eux :

- Le traitement de modification des alliages Al-Si qui **globalise** le Si eutectique. .../...

- Le Traitement d'affinage du silicium primaire par le phosphore pour les alliages hypersiliciés.

#### APTITUDE DES ALLIAGES A LA SOUDABILITE / :

Présque tous les alliages d'aluminium de fonderie présentent une excellente aptitude de soudage, toute fois comme le soudage est caractérisé par une fusion et un refroidissement très rapide entraînant des contraintes appréciables de retrait au refroidissement, ce sont les alliages possédant la meilleure aptitude au moulage qui se soudent le plus facilement et réciproquement.

ANODISATION / : Le procédé consiste à déposer par traitement électrolytique une couche d'alumine à la surface des pièces.

DOMAINE D'EMPLOI / : Décoration, protection contre la corrosion, protection contre l'usure, isolations thermiques et électrique.

#### I.4.2. PROPRIETES MECANIQUES / :

##### 4.2.1. INFLUENCE DE LA COMPOSITION / :

Les éléments d'addition présents dans les alliages ont pour rôle principale d'améliorer les caractéristiques mécaniques. Ils agissent soit en renforçant la solution solide (cas des alliages Al-Cu Al-Mg, Al-Zn) soit en se formant en plus, un constituant dur (cas des alliages Al-Si) notons aussi que toutes les caractéristiques mécaniques sont améliorées par un refroidissement rapide et un grain fin.

Elles s'améliorent légèrement lorsque la température baisse alors qu'elles s'abaisse fortement à hautes température (généralement voisine de 150° suivant la composition de l'alliage).

##### I.4.3. TENUE A LA CORROSION // :

La corrosion est l'ensemble des phénomènes qui provoquent une attaque des pièces pouvant aller jusqu'à la destruction de celle-ci en service.

#### LES PHENOMENES DE CORROSION / :

Les phénomènes de corrosion sont très complexes et d'origines diverses.

.../...

## II. Influence des éléments d'addition sur la structure et les propriétés d'aluminium.

### II.1. Influence de trois composants de base des principaux alliages d'aluminium

#### II.1.1. Influence du silicium.

Le diagramme de la figure 1. se caractérise par / :

- L'existence d'une solution solide Al-Si, la courbe de solubilité de si dans l'Al varie de 1,65 % à 577 ° C jusqu'à 0,05 % à 20° C
- L'existence d'un mélange eutectique constitué de solutions solides d'aluminium et de silicium presque pour la teneur global du mélange est de 12,6 % de si et la température du palier de solidification est voisine de 577 ° C.
- L'existence d'une phase primaire constituée de silicium presque pour.

Les alliages Al-Si forment le groupe le plus important des alliages légers de fonderie.

On déduit trois grandes familles d'alliages de l'étude du diagramme d'équilibre Al-Si.

a/ alliages à teneurs en si inférieure à 5 % (A-S2GT, A-54G)

Ces alliages ne sont pas sensible au traitement de modification du fait de leur faible teneur relative en silicium, mais il peuvent subir un traitement thermique.

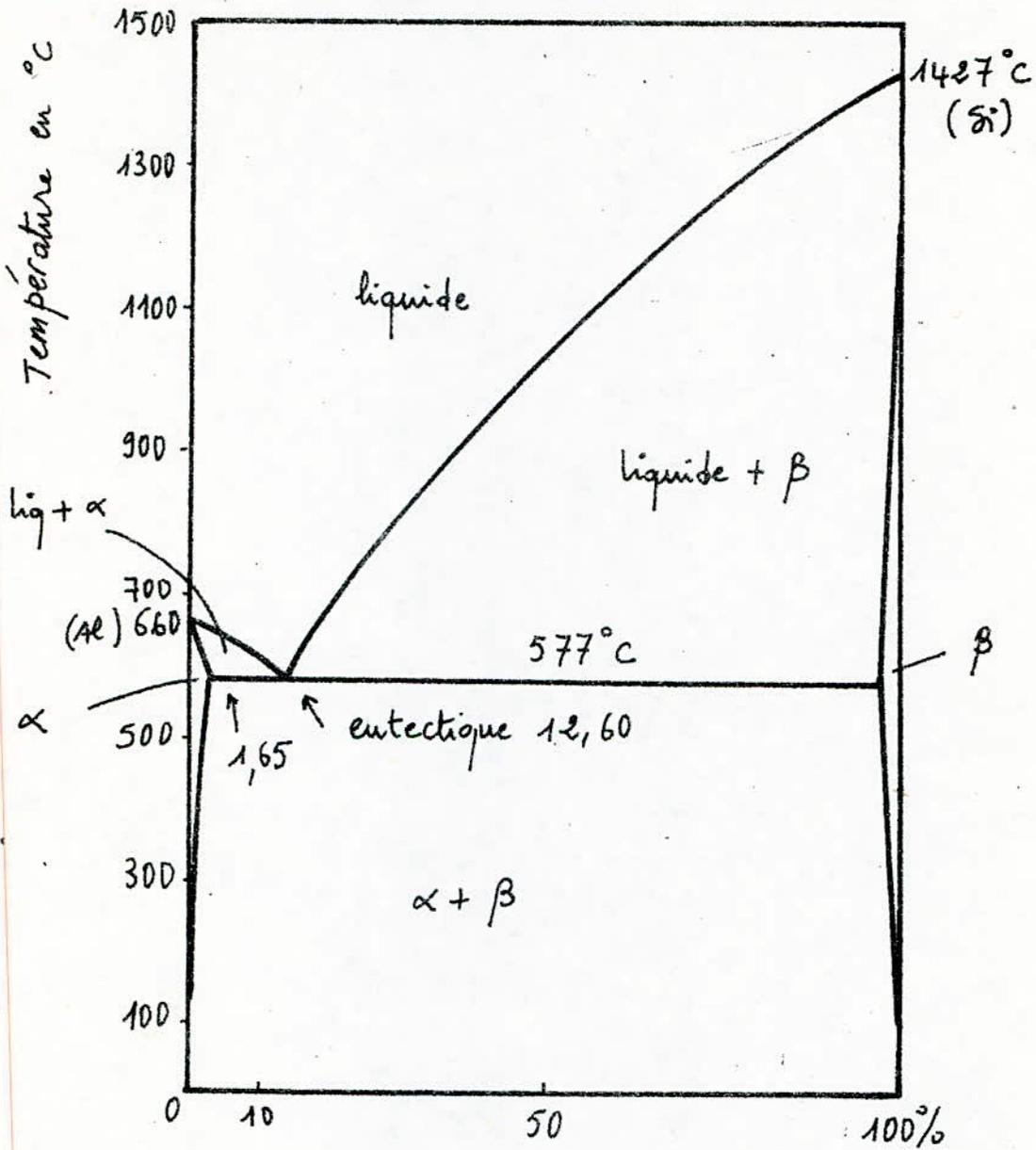
(A- 57G, A-510 G)  
A-513 )

b/ Alliages à teneur en silicium comprise entre 5 et 13%

Ce type d'alliages hypoeutectique peuvent subir les traitements de modification et, avec l'addition du magnésium à faible teneur, sont susceptibles de pouvoir subir un traitement thermique qui améliore leurs caractéristiques mécaniques ( Voir chapitre IV)

.../...

Fig 1 : diagramme d'équilibre Aluminium - Silicium.



C/ Alliages à teneur en silicium supérieure à 13 %  
(A-520 W, A-522 UNK)

Ce sont des alliages hypereutectique, leurs aptitude au moulage peu diminuée par suite de la séparation du silicium primaire pendant la solidification. Le silicium primaire qui se sépare de la pièce coulée en raison de sa faible densité est irrégulièrement réparti dans la structure. On peut arriver à provoquer une répartition homogène du silicium primaire à l'état de fines séparation par addition d'environ 1 % de pentachlorure de phosphore (PCL5).

Ces alliages hypersibiciles sont difficiles à usiner en raison de leur structure comportant des cristaux de silicium primaire on utilise généralement des outils avec des pastilles de diamant.

Ce type d'alliage est employé d'une part de leur faible coefficient de dilatation qui est d'autant plus faible que la teneur en si est élevée et d'autre part pour leurs propriétés de résistance au frottement.

1.1.2 Influence du silicium sur les caractéristiques mécaniques'

La structure des alliages Al-Si est toujours biphasée du fait de la faible solubilité du silicium dans l'aluminium à température ambiante. Les Alliages hypoeutectiques sont constitués de solution solide très riche en Al donc très plastique et de mélange eutectique comportant des plaquettes de si dures et fragiles. Les caractéristiques mécaniques statiques limite élastique (LE), la résistance de rupture (R), la dureté (HB) augmentent régulièrement avec la teneur en silicium, tandis que l'allongement (A%) diminue. Le passage aux alliages hypereutectiques constitués de silicium primaire et de mélange eutectique rend brusquement

L'alliage très fragile sans modifier beaucoup les autres caractéristiques.

### 1.1.3/ Influence du silicium dans les alliages autres que les Al-Si Le silicium.

- Améliore les propriétés de fonderie (coulabilité, aptitude au retassure, criquabilité). de tous les autres alliages du fait de son expansion à la solidification et de son action modératrice sur le retrait à l'état solide.
- Diminue plus ou moins la plasticité des alliages du fait de formation des plaquettes de si entectique ou des composés que peut former de Si avec les autres constituants de ces alliages (exple :  $Mg_2Si$ ).

### II.1.2. Influence du cuivre / :

Le diagramme de la figure 2 est caractérisé par / :

- L'existence d'une solution solide Al-cu, la solubilité du cuivre varie beaucoup avec la température de 5,65 % à 548° C jusqu'à 0,40 % à 20° C.
- L'existence d'un mélange entectique constitué de la solution solide et du composé défini  $Al_2Cu$ .

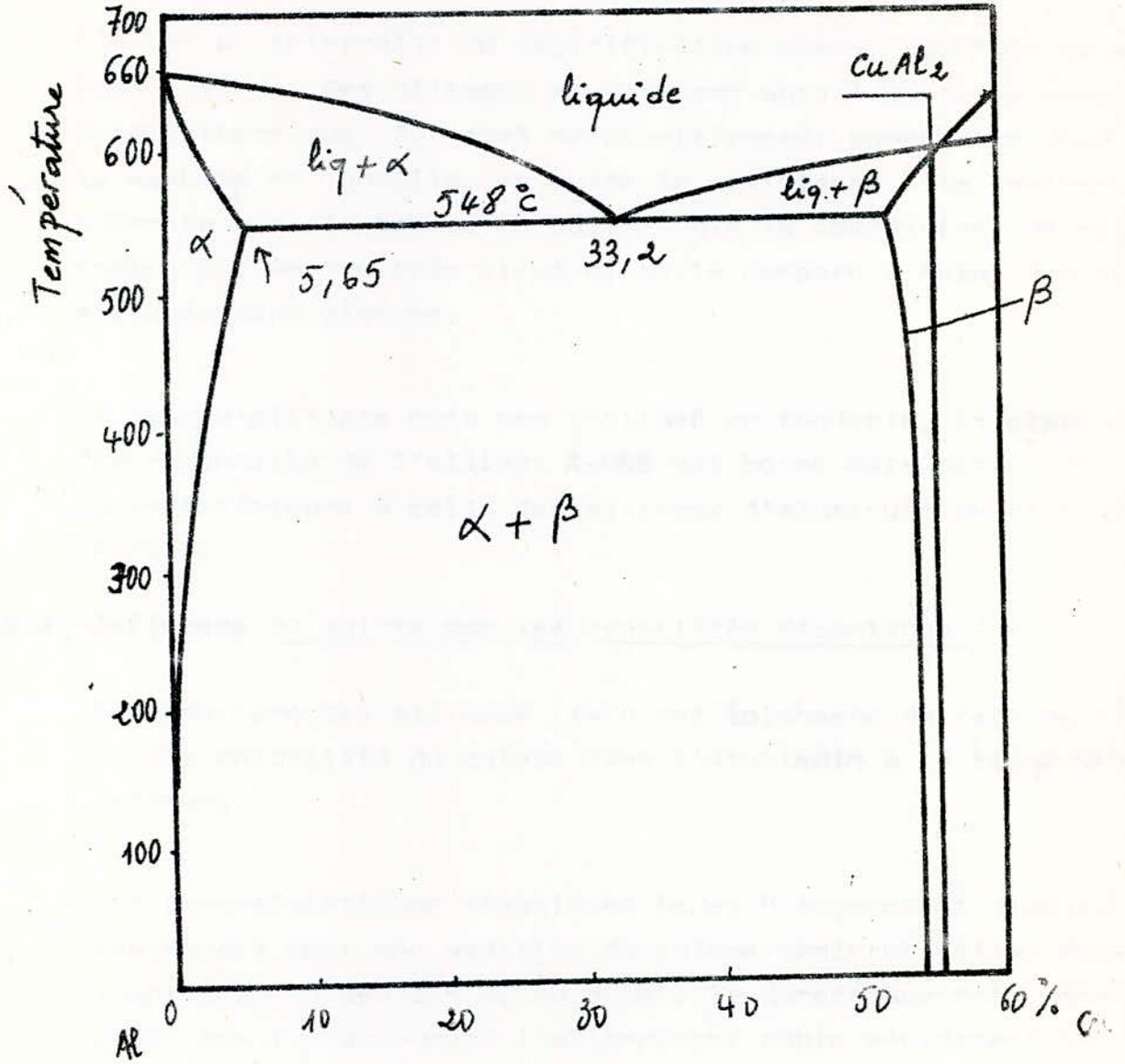
La teneur globale du mélange est de 33,2 % et la température du palier de solidification voisin de 548°C.

- L'existence d'une phase primaire dure constituée du composé  $Cu Al_2$ .

Ce diagramme fait apparaître sensiblement deux groupes principaux d'alliages.

a/ Alliages à teneurs en cuivre inférieure à 5 % (A-U5GT)  
(A-U4NT)

Fig 2 : diagramme d'équilibre Aluminium - Cuivre



Ces alliages présentent de plus grand intervalles de solidification par rapport aux autres alliages dont la teneur en cuivre est supérieure à 5% d'où risque de criques importants leurs caractéristiques après traitement thermique sont excellentes mais leurs propriétés de fonderie sont médiocres, ils ont une résistance assez faible à la corrosion que l'on peut toutefois améliorer par anodisation.

#### B) alliages à teneurs en cuivre supérieure à 6 % (A-U85, A-U1054)

Ils ont un intervalle de solidification moyen, aptitude au moulage moyenne. Ces alliages ne sont pas apte à subir un traitement thermique. Ils sont particulièrement appropriés pour **Le moulage** en coquille, en outre la résistance à la chaleur augmente avec la teneur en cuivre mais le coefficient de dilatation est encore très élevé si on le compare à celui des autres alliages pour pistons.

Ce type d'alliages sont peu utilisé en fonderie, la **stabilité** dimensionnelle de l'alliage **A-U85** est bonne mais reste toujours inférieure à celle des alliages d'aluminium au silicium (A-S13).

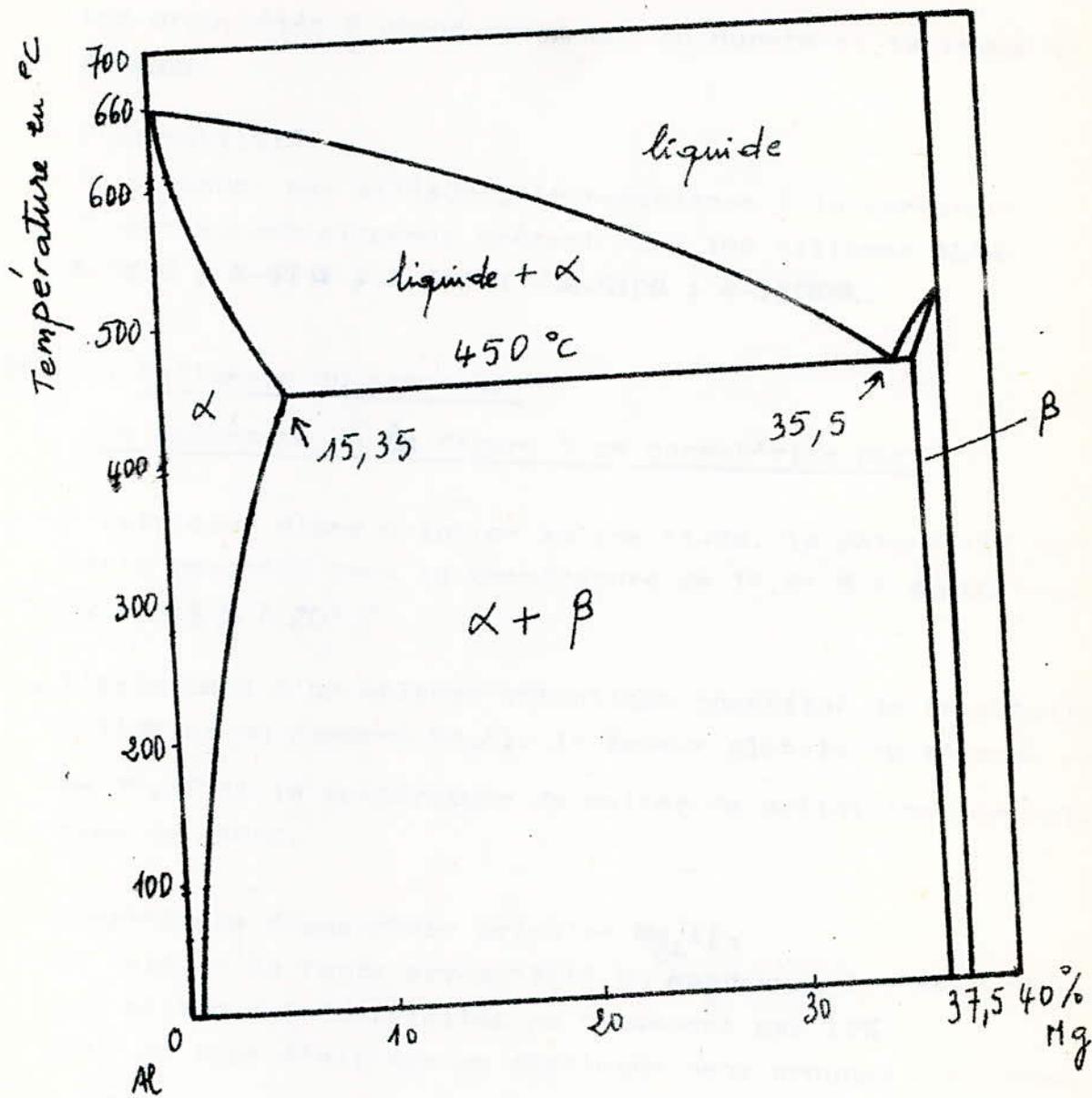
#### 1.2.1 / Influence du cuivre sur les propriétés mécaniques :

La structure des alliages Al-Cu est **binphasée** du fait de la faible solubilité du cuivre dans l'aluminium à la température ambiante.

Les caractéristiques mécaniques **Le** et **R** augmentent d'abord rapidement pour une addition du cuivre croissant, elles évoluent d'abord peu à 5 %, au delà, la dureté augmente considérablement. Par contre l'allongement chute rapidement au delà de 12% de cu. l'alliage devient extrêmement fragile et n'est plus utilisé industriellement.

Les alliages Al-Cu peuvent subir un traitement thermique de durcissement structural qui élève considérablement **Le**, **R** et **HB** tout en conservant une **pb** plasticité convenable.

Fig 3: diagramme d'équilibre Aluminium-Magnesium.



#### 4.2.2. / Influence du cuivre dans les alliages autres que Al-Cu

Le cuivre n'a pas d'action très importante sur les propriétés de moulage des autres alliages.

il améliore:

- Les caractéristiques mécaniques de résistance et de dureté en formant  $Cu Al_2$  mais en revanche diminue les allongements.

Les propriétés à chaud notamment en dureté et la tenue au fluage.

- L'usinabilité.
- Il diminue, par ailleurs, la résistance à la corrosion il est essentiellement présent dans les alliages AL-Si A-S2 U ; A-55 U ; A-512 U - A-510G ; A-52LUNK.

#### II.1.3. Influence du magnésium

Le diagramme de la figure 3 se caractérise par :

- L'existence d'une solution solide Al-Mg. la solubilité du Mg varie beaucoup avec la température de 15,35 % à 450°C jusqu'à 0,3 % à 20° C.
- L'existence d'un mélange eutectique constitué de la solution solide et du composé  $Mg_2Al_3$ . la teneur globale du mélange est de 35,5% et la température du palier de solidification voisine de 450°C.
- L'existence d'une phase primaire  $Mg_2Al_3$  du fait de la forte oxydabilité du magnésium à l'état liquide les alliages industrielles ne dépassent pas 12%  
Pour ce type d'alliage on distingue deux groupes d'alliages:

Alliages à teneurs en Mg inférieure ou égale à 5 %

(A-G3T)

(A-G4Z)

Elisent des propriétés de fonderie médiocres (coulabilité et crikuebilité). Ces alliages sont utilisés pour mouler des pièces qui doivent posséder une bonne résistance à la corrosion on ne peut pas faire de traitement de mise en solution pour ces types d'alliages car ce traitement n'améliore pas des caractéristiques mécaniques.

#### B) Alliages à teneurs en Mg supérieure à 6% (A-G10- A-G11)

Pour ces alliages à haute teneurs en magnésium peuvent subir un traitement thermique améliorant leurs caractéristiques mécaniques leurs inconvenants est marqué au phénomène de vieillissement car leurs caractéristiques évoluent défavorablement dans le temps, alliages très sensibles à la crikue ce qui les destine de préférence à la coulée au sable pour laquelle le refroidissement est lent. Dans ces conditions le phénomène de vieillissement est plus sensible mais on peut le ralentir sans toutefois le supprimer en ajoutant des éléments stabilisants.

#### 4.3.4 / Influence du magnésium sur les propriétés mécaniques/

La structure des alliages Al-Mg est généralement biphasée du fait de la faible solubilité du magnésium dans l'aluminium toutefois, dans le cas des alliages industriels c'est à-dire pour les teneurs en Mg. Inférieure à 12 %.

La solution solide en aluminium constitue l'essentielle de la structure de l'alliage.

Les caractéristiques mécaniques LE, R et MB augmentent d'abord rapidement jusqu'aux environs de 2 % de Mg puis plus lentement, l'allongement évolue en sens inverse il est possible de traiter thermiquement les alliages Al-mg dont la teneur en Mg est supérieure à 8% et les caractéristiques mécaniques obtenues après une mise en solution et trempe c'est-à-dire avec une structure de solution solide homogène.

sont particulièrement élevées.

Toutefois l'évolution structurale qui se produit par simple maturation provoque, à échéance plus ou moins longue, une précipitation aux joints des gains du constituant  $Mg Al_3$  qui fragilise l'alliage.

### 1.2.3. / Influence du mg dans les alliages autres que AL-Mg

Le magnésium / :

- Altère légèrement mais sensiblement les propriétés de fonderie des autres alliages.

\* Il diminue la coulabilité du fait de son oxydabilité.

\* il accentue un peu la tendance à la retassure.

\* il augmente la criquabilité.

- Forme avec les autres éléments des composés chimiques tels que  $Mg_2Si$   $Mg Cu Al_2$ ,  $Mg Zn_2$  qui :

\* renforcent et durcissent les alliages non traités thermiquement.

\* permettent le durcissement structural des alliages traités thermiquement <sup>la teneur doit être</sup> précises : trop faibles, elles sont insuffisantes pour obtenir le durcissement structural, trop fortes, elles risquent de provoquer des bûlures de trempes ou trop grande fragilité.

- Améliore la tenue à la corrosion des alliages au Zinc.

- Améliore la tenue à chaud des alliages à pistons.

## II.2. Influence des éléments secondaires d'additions / :

### II.2.1. Influence du manganèse / :

L'addition du manganèse aux alliages AL-Si neutralise l'influence défavorable du fer, il transforme en effet, le composé quaternaire en écriture chinoise (Al Fe Mn Si).

La présence d'une quantité de manganèse ne dépassant pas 0,40 % dans les alliages AL-Mg améliore très sensiblement les caractéristiques mécaniques de ces alliages. .../...

II.2.2. Influence du beryllium.

Le beryllium possède la propriété intéressante de réduire l'oxydation à l'état liquide des alliages d'aluminium même à des teneurs extrêmement basses (Be = 0,0040 %). Sa présence est surtout très utile dans les alliages Al-Mg, dans les autres alliages, les avantages qu'il procure sont minimes et ne justifient pas son introduction.

II.2.3. Influence du Zirconium / :

Le zirconium, affinant de la solution solide riche en Al présente l'intérêt d'améliorer la tenue à chaud, en particulier au fluage, des alliages d'aluminium.

II.2.4. Influence du titane et du bore / :

L'addition du titane dans les alliages d'aluminium a pour but d'affirmer le gain (germes de Ti Al) en vue :

- d'améliorer les caractéristiques mécaniques des alliages à solution solide riche en aluminium prédominante.
- d'améliorer les propriétés de moulage notamment par une diminution notable de la cinquantabilité.
- d'améliorer l'aspect des pièces après certains traitements de surface tels que le polissage et l'anodisation.

Les teneurs généralement visées sont de 0,15 % pour les alliages Al-Si et de 0,20 à 0,25 % pour les autres alliages l'action affinant du titane est généralement renforcée par la présence d'une faible quantité de bore (germe Ti B<sub>2</sub>) un excès de titane est nocif car il fait apparaître des cristaux fragiles et durs du composé intermétallique Ti Al<sub>3</sub> et les caractéristiques mécaniques diminuent.

### III. Traitement thermiques des alliages d'aluminium de fonderie /:

29/

#### III.1. Généralité sur les traitements thermiques.

##### -- Définition et le but des traitements thermiques / :

Les traitements thermiques sont des opérations qui comportent des cycles thermiques -- chauffages et refroidissement contrôlés -- effectués dans le but d'améliorer certaines propriétés de l'aluminium ou de ses alliages par une modification de leur structure métallographique obtenue à l'état brut de coulée.

-- Une telle gamme de caractéristiques mécaniques est obtenue non seulement en agissant sur la composition des alliages, mais aussi et pour une partie très importante en effectuant des traitements thermiques qui permettent d'ailleurs d'agir dans deux sens à savoir:

a/ soit dans le sens de diminution de la résistance mécanique, diminutions accompagnées généralement d'une augmentation de l'aptitude à la déformation plastique (ce sont des traitements d'adoucissement).

b/ soit au contraire dans le sens d'une augmentation de la résistance mécanique (ce sont des traitements de durcissement).

-- Les traitements thermiques n'ont pas comme seul but d'agir sur le niveau de résistance mécanique, ils sont susceptibles d'influencer un grand nombre d'autres propriétés parfois très importantes pour les utilisateurs telles que : l'aptitude à la transformation à chaud la résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage, l'aptitude à l'oxydation anodique, la conductibilité électrique, la stabilité dimensionnelle aussi il semble que de plus en plus, dans la métallurgie des alliages d'aluminium la tendance soit de mettre au point ou de définir des traitements thermiques vraiment spécifiques en vue d'améliorer une propriété donnée d'un alliage déterminé.

##### PRINCIPAUX TYPES DE TRAITEMENT THERMIQUES / :

Les traitements thermiques appliqués aux alliages d'aluminium peuvent être classés en trois types principaux :

1/ traitement dit d'homogénéisation

2/ -- d'adoucissement par recuit ou restauration

.../...

3/ Les traitements de trempe structural comprenant :

30 /

- \* Une mise en solution
- \* Une trempe
- \* Une maturation ou un revenu produisant le durcissement.

### III.2. TRAITEMENT THERMIQUE PERMETTANT D'AMELIORER LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE Fonderie / :

Pour qu'un alliage d'aluminium puisse donner lieu a un phénomène de durcissement structural, il faut reunir trois conditions indispensables, qui sont les suivantes :

- a) le diagramme d'équilibre entre l'aluminium et l'un au moins des éléments d'alliage doit comporter une solubilité à l'état solide qui augmente avec la température. (Fig 4).
- b) Le retour à l'équilibre physicochimique à partir de la solution solide suractivée doit se faire par précipitation fine et homogène.
- c) Le retour à l'équilibre physicochimique doit se faire en passant par des formes transitoires de précipitation présentent avec la matrice une cohérence par épitaxie (relations d'orientation entre le précipité et la matrice d'aluminium).

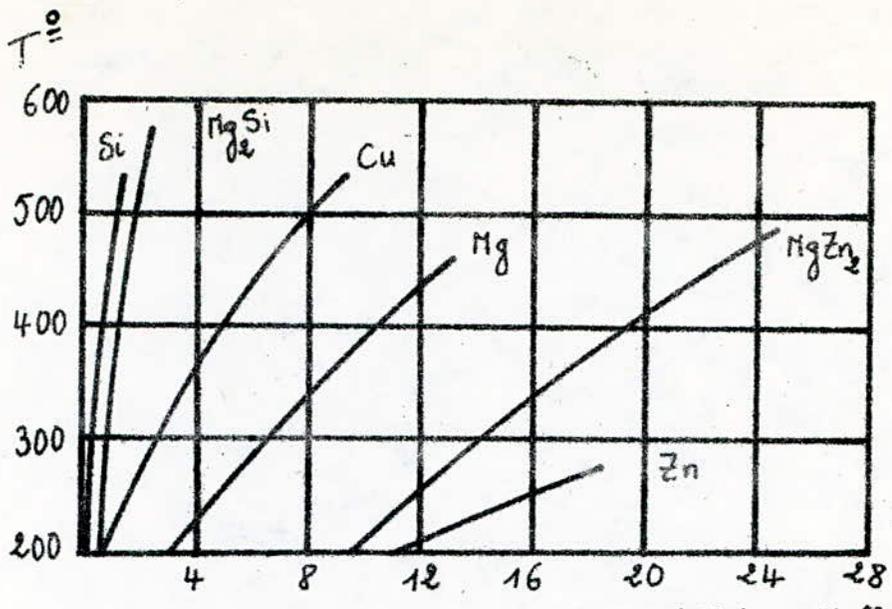
Ces trois conditions ne sont remplies que pour les systèmes suivants:

- \* Al-Cu Précipitation d' $Al_2Cu$
- \* Al-Si-Mg Précipitation de  $Mg_2Si$
- \* Al-Mg-Zn -"- de  $MgZn_2$
- \* Al-Cu-Mg -"- d' $Al_2CuMg$

### LE TRAITEMENT THERMIQUE COMPORTE TROIS PHASES DISTRICTES / :

#### III.2.1. / Le chauffage de mise en solution / :

Cette opération consiste à porter l'alliage à une température suffisante pour dissoudre dans l'aluminium les éléments d'alliages nécessaires à assurer la précipitation.



addition d'alliage en %  
Fig 4 la solubilité des éléments d'alliage dans l'aluminium

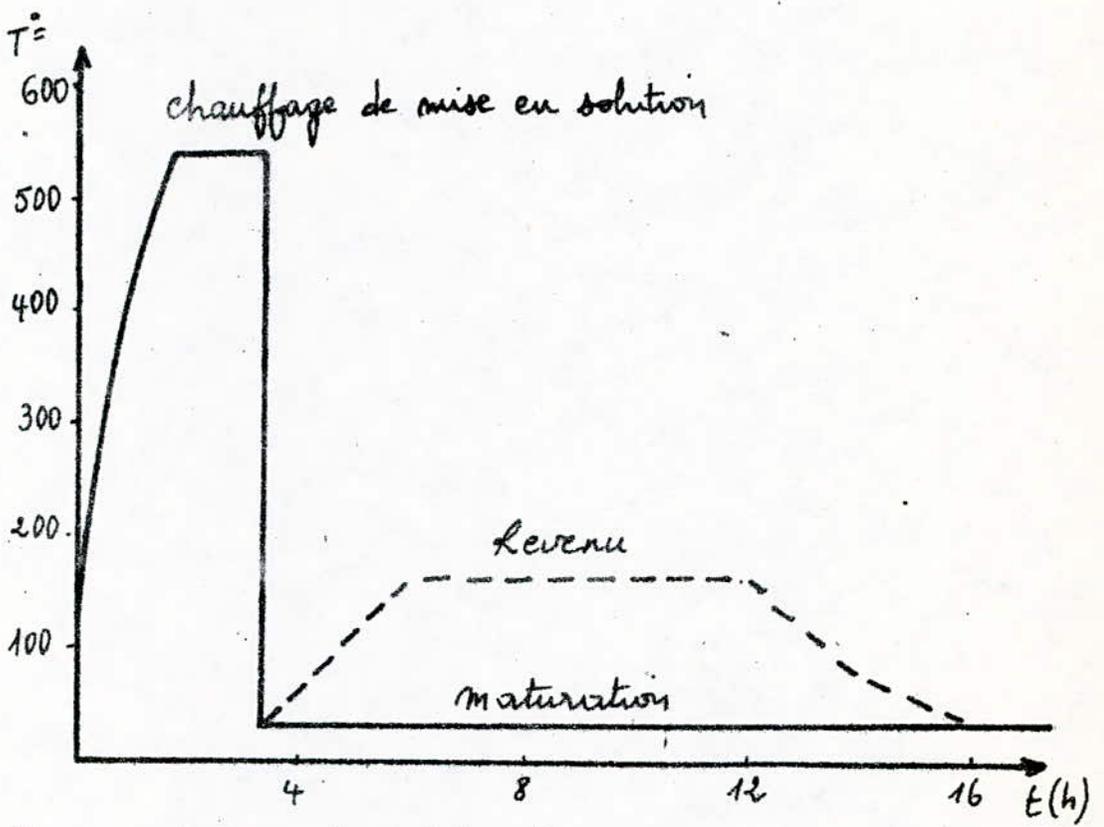


Fig 5 : schema des phénomènes engendrés par le traitement thermique

Après solidification dans un moule de fonderie, un tel alliage présente une structure composée d'une part de solution solide riche en aluminium et d'autre part du mélange eutectique; solution solide  $\alpha$  + Composé défini si nous élevons la température il y a mise en solution progressive du composé défini dans la solution solide et homogénéisation de celle-ci (Fig 5).

En pratique, il est nécessaire de maintenir d'alliage un certain temps à une température pour obtenir l'état d'équilibre car les phénomènes de diffusion à l'état solide ne sont pas instantanés.

Afin de faciliter cette mise en solution, On porte d'alliage à la température maximale possible, c'est à dire aussi près que possible de la température de fusion.

### III.2.2. La trempe / :

C'est le traitement consécutif à la mise en solution qui assure par un refroidissement approprié, le maintien de l'état de sursaturation de la solution solide à la température ambiante, cet état est dénommé l'état de trempe fraîche.

Il est nécessaire d'obtenir un refroidissement suffisamment rapide pour éviter une précipitation grossière et non homogène du composé défini. Il existe pour chaque alliage une vitesse critique de trempe qui est la vitesse de refroidissement minimale évitant cette précipitation.

### III.2.3. / : DURCISSEMENT STRUCTURAL PAR PRECIPITATION A LA MATURATION / :

#### Ou revenu

C'est au cours de cette étape que les caractéristiques mécaniques évoluent le plus. Elle correspond à un retour vers l'état d'équilibre physicochimique de l'alliage.

Le phénomène de durcissement structural peut commencer à la température ambiante. Il s'accroît lorsque l'on élève la température. On tend alors vers un retour à l'équilibre physicochimique.

Solution solide sursaturée -----> solution solide saturée + composé défini la précipitation sera d'autant plus marquée qu'elle sera fine et qu'elle se fera par des formes transitoires présentant une cohérence par épitaxie (cohérence entre l'orientation cristalline de la solution solide et du précipité).

Dès la fin de la trempe, soit par maturation naturelle, soit par une légère augmentation de la température, et dans le cas d'une solution de substitution (Fig 6 a), les atomes du soluté situés aux nœuds du réseau et répartis

Au hasard vont se regrouper en essaims tout en restant aux nœuds du réseau de la matrice (Fig 6 b) ces essaims forment des zones dites de GUINIER-PRESTON dont les formes peuvent prendre les aspects les plus divers (sphériques filiformes, planes, ... etc...). La formation des zones de GUINIER-PRESTON passe parfois par l'intermédiaire de phases métastables, mais on peut dire que tout durcissement structural passe par la création de ces zones.

Les zones de GUINIER-PRESTON ont la même structure cristallographique que la matrice et constituent des hétérogénéités de concentration de région enrichies en atomes de soluté. Cette germination constitue la précipitation et elle donne en général, la structure de maturation. Si on élève la température, c'est-à-dire si on passe de l'état de maturation à l'état de revenu pour des températures comprises entre 150° et 200 °C ces zones de GUINIER-PRESTON sont progressivement remplacées par des particules de composés intermétalliques dans lesquelles les atomes sont régulièrement repartis aux nœuds d'un réseau différent de celui de la matrice (Fig 6c).

On n'obtient généralement pas directement le composé défini en solution à la trempe mais on observe des composés de transition de composition différente de celle de l'équilibre. Lorsque la particule intermétallique ainsi formée est petite, elle est souvent cohérente avec la matrice, c'est-à-dire que les plans cristallins sont continus au passage de l'interface (AD et DC) (Fig 6 C). Les formes particule intermétalliques sont variées (aiguilles batonnets, sphères, etc...). ce sont les zones de GUINIER-PRESTON et les composés intermétalliques qui par leur forme et leur répartition créent des zones d'hétérogénéité qui s'opposent aux déformations plastiques de l'alliage, c'est-à-dire à l'action des dislocations et donnent à l'alliage

Les meilleures caractéristiques mécaniques, les allongements sont évidemment diminués.

On observe bien sûr pour beaucoup l'alliage un très grand nombre de type de précipitations pouvant être obtenues par décomposition d'une solution solide sursaturée. Mais dans la plus part des cas, on n'observe pas d'amélioration notable des caractéristiques mécaniques ou très faiblement.

Il faut, en effet, que le soluté précipite suivant une forme ou des formes transitoires telles qu'il y ait blocage s'opposant aux déformations plastiques.

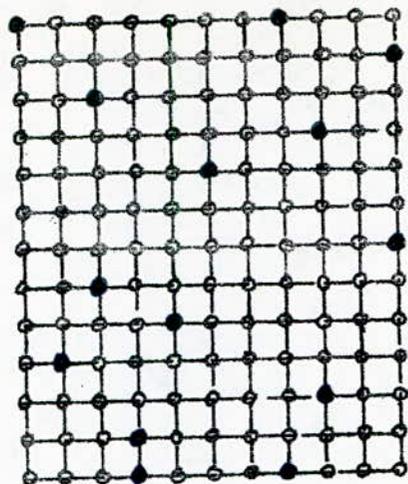


Fig 6 a  
solution solide de substitution  
○ atomes de la matrice.  
● atomes de soluté.

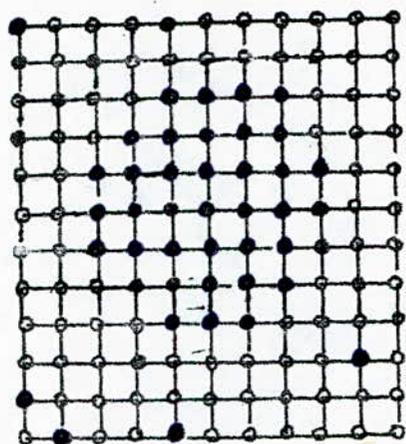


Fig 6 b  
Zone de GUINIER-PRESTON  
les atomes de soluté se  
rassemblent en essaims  
tout en restant aux nœuds  
du réseau.

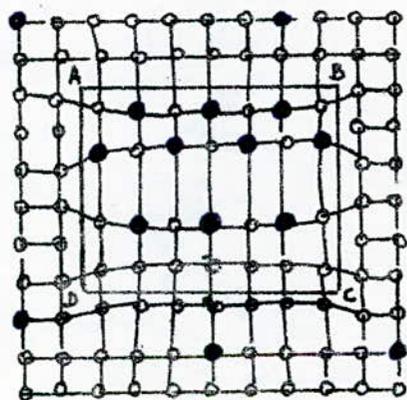


Fig 6 c  
Composé intermétallique.  
Cohérent.  
le composé possède un  
réseau et une structure  
propre.

\* AUTRES TYPE DE TRAITEMENTS THERMIQUES / :

## - Traitement d'homogénéisation.

Il consiste à des échauffages prolongés (6 à 48 Heures) à des températures élevées en vue de :

- a) Dissoudre les phases intermétalliques en excès (par rapport à l'équilibre)
- b) niveller les concentrations dans la solution solide.

Ces deux effets peuvent permettre d'améliorer certaines propriétés des alliages comme des conductibilités thermiques et électriques ou comme l'aspect après anodisation.

\* TRAITEMENT THERMIQUE SPECIAL / :

Certains traitements particuliers souvent appelés "revenu" ont d'autres buts que celui des revenus durcissants parmi ces traitements.

- TRAITEMENT DE STABILISATION DIMENSIONNELLE / :

Ces traitements, appliqués aux pièces coulées, sont souvent appelés "revenu de stabilisation" parce que la température aux quelles il se pratiquent sont souvent semblables à celles que l'on emploie pour les revenus durcissants des alliages légers.

Lorsque le refroidissement, à la coulée est suffisamment rapide, les pièces obtenues peuvent être considérées, après coulée, comme plus ou <sup>moins</sup> trompées et il suffit souvent de pratiquer un simple revenu sans trempe préliminaire pour obtenir des caractéristiques satisfaisantes.

L'échauffement ou le refroidissement produit des transformations des phases accompagnées de variations de volume. Aussi, ce traitement de stabilisation est-il parfois appliqué afin d'amener les alliages dans un état tel que, dans les conditions d'emploi, il ne soient plus sujets à des variations.

On utilise alors des traitements à des températures égales ou supérieures à celles d'utilisation.

Ce traitement donne des caractéristiques mécaniques inférieures aux caractéristiques optimales. La température et le temps sont choisis de telle façon que la baisse soit acceptable.

Dans certains cas (pièces très ajourées, coulées en sable ou coquille) les déformations en cours d'usinage deviennent importantes pour qu'une stabilisation soit obligatoire.

#### - TRAITEMENT DES PISTONS / :

Pour les pistons, on utilise des alliages spéciaux, appelés alliages pour pistons (exemple : A- S22 UNI), contenant 12 à 25 % de Si et d'autres éléments comme le cuivre, Nickel, cobalt ....etc la proportion élevée de cristallin de Si dans l'alliage a pour effet une diminution de la dilatation thermique et une augmentation de la résistance à l'usure.

Dans la première phase de transformation de l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique le piston doit posséder un certain nombre de propriétés bien définies et parfois contradictoires, en particulier :

- Une résistance à chaud suffisamment élevée, une bonne résistance au contact direct avec la flamme ainsi que résistance à la fatigue satisfaisante.
- Une bonne usinabilité, une résistance à la corrosion élevée et une stabilité dimensionnelle satisfaisante imposant la compatibilité des coefficients de dilatation thermique du piston et du cylindre.
- Un bon coefficient de transfert thermique et une faible masse spécifique.

Le traitement des pistons de dimensions courantes sont traités de 6 h à 18 h à 200 °C afin que les côtés ne soient plus modifiés en fonctionnement.

Il est nécessaire de prolonger les durées de traitement pour les pistons de plus grandes dimensions.

### III.3. DÉFAUTS DUS AUX TRAITEMENTS THERMIQUES / :

#### \* Brûlures de trempe.

Parmi les accidents susceptibles de compromettre les effets du traitement thermique, le plus grave est la brûlure de trempe.

La brûlure est une fusion localisée aux joints de gain, cette fusion partielle est due soit à une sur chauffe, soit à une mauvaise composition chimique, la brûlure est heureusement un défaut relativement rare, et en principe la composition chimique est contrôlée par spectrographie, pour éviter ce type de défaut.

#### - CONSÉQUENCES DE LA BRÛLURE / :

L'alliage perd ses bonnes caractéristiques mécaniques, il devient fragile et peut casser sous des efforts très faibles, aucun traitement ultérieur ne peut le régénérer

#### \* Déformation après trempe.

L'origine de la déformation après trempe provienne :

- de certaines contraintes introduites à la trempe.
- de l'état plastique de l'alliage à la température de mise en solution.

// PARTIE B : ETUDE EXPERIMENTALE //

Rappelant le diagramme d'équilibre bien connu de la figure (1). L'alliage binaire aluminium à 10 % de silicium est un alliage hypoeutectique à entectique prédominant présente deux phases :

- Une solution solide primaire très riche en aluminium se solidifiant entre 600° et 577 ° C environ.
- Un entectique composée d'un mélange d'aluminium et de 12,7 % de silicium se solidifiant à 577 ° C.

Les propriétés de moulage en sable sont excellentes en raison de la teneur en silicium et de faible intervalle de solidification de l'alliage sa tendance à la microretassures est faible, bonne coulabilité, insensible à la crique.

Ce type d'alliage nécessite un traitement d'affinage à l'aide du sel de sodium juste avant la coulée dans la poche pour avoir un grain fin à cause de son influence bénéfique :

- Sur les propriétés mécaniques
- Sur le traitement de finition
- Sur l'efficacité du traitement thermique.

La compensation de l'appauvrissement de l'alliage en magnésium se fait par Mg sous forme d'alliage mère à 10 % de Mg (A-G10).

La correction est faite uniquement pour les pièces qui subissent les traitements thermiques.

IV.1. COMPOSITION CHIMIQUE / :

40 /

La composition chimique de l'alliage A-S10 G suitent la norme NF A 57 702.

% Fe	% Si	% Cu	% Zn	% Mg	% Mn	% Ni	% Pb	% Ti	% Co
≤ 0,55	9 à 10,5	≤ 0,10	≤ 0,10	0,17 à 0,40	≤ 0,50	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,20	-

La composition chimique de l'alliage sur quoi on a travaillé.

% Fe	% Si	% Cu	% Zn	% Mg	% Mn	% Ni	% Pb	% Sn	% Ti	% Cd
0,56	10,5	0,08	-	0,18	0,45	-	-	-	-	-

- \* Silicium : Jusqu'aux limites de tolérances entre 9 et 10,5 % les variations du silicium ont peu d'influence sur les caractéristiques mécaniques, hors de ces limites par exemple si le silicium augmente on risque d'avoir des retassures.
  
- \* Magnésium / : Le magnésium formant le composé  $Mg_2Si$  permet le traitement thermique de l'alliage ; si la teneur en magnésium est supérieure à 0,40 % la dureté après traitement thermique croît rapidement, les allongements diminuent et l'alliage devient fragile.  
Si la teneur en magnésium est inférieure à 0,17 % la charge à la rupture la dureté et la limite élastique diminuent rapidement.
  
- \* Manganèse / : Il atténue l'influence défavorable du fer et rend l'alliage moins fragile en transformant le composé (Al-Fe Si) aiguille en composé eutectique (Al Mn Fe Si) qui cristallise sous forme plus ramassée en écriture chinoise.
  
- \* Fer / : La teneur en fer doit être inférieure à 0,55 pour éviter une trop forte fragilisation de l'alliage. Si le pourcentage du fer est supérieure à 0,55 il forme des cristaux lamellaires qui diminuent les caractéristiques mécaniques malgré la présence du manganèse aux teneurs prérites.
  
- \* Titane / : Une teneur voisine de 0,1 % provoque un affinage de grain de l'alliage, pour une teneur supérieure à 0,20 % risque de voir apparaître des points durs dans la pièce à un usinage plus difficile
  
- \* Cuivre / : En dehors de la tolérance, il diminue la résistance chimique
  
- \* Zin, Nickel, Plomb, étain : au dessus des tolérances indiquées dans la norme diminue les caractéristiques mécaniques de l'alliage.

IV. 3.1. / : choix de la température de mise en solution / :

La température de mise en solution est de  $540^{\circ}\text{C}$ , cette température est choisie en tenant compte d'un certain nombre de facteurs pour que tout le  $\text{Mg}_2\text{Si}$  de l'alliage puisse entrer en solution solide par une plus grande vitesse de diffusion et l'homogénéisation, se fait rapidement.

IV. 3.2. Choix du temps de mise en solution . ./

Puisque le temps de mise en solution a également un effet sur les caractéristiques mécaniques obtenues. On a choisi un temps  $t$  : 8 h suffisamment long pour que le composé  $\text{Mg}_2\text{Si}$  ait le temps de se dissoudre et pour que l'homogénéisation puisse se faire.

IV. 3.3. Trempe / : c'est l'opération qui consiste à porter l'échantillon de la température de mise en solution à la température ambiante avec rapidité suffisante pour éviter que les transformations au refroidissement se produisent.

On a utilisé l'eau froide pour nous donner le refroidissement le plus énergique et limite les risques de transformation.

IV. 4. L'INFLUENCE DU TEMPS ET DE LA TEMPÉRATURE DU REVENU SUR LES CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES / :

L'influence de ces deux paramètres est impossible à séparer d'où on a essayé d'étudier l'évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du temps pour chaque température de revenu.

Propriétés statiques / :

Les propriétés mécaniques statiques indiquent la tenue des alliages à des efforts dont la variation dans le temps est lente ces propriétés sont :

- La résistance à la rupture par traction ( $R_{\text{TP}}$ )
- l'allongement à la rupture (A %)
- la limite d'élasticité ( $I_0$ )
- la dureté (HB).

Les trois premières sont déterminés par un essai de traction est la dureté mesurée par la méthode de Brinell sur la même éprouvette avant de subir l'essai de traction.

\* PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES / :

Les éprouvettes caractérisants les pièces sont coulées à part avec du métal provenant du même four que les pièces et en même temps on moule du même sable pour les pièces.

\* ESSAI DE TRACTION / :

Cet essai est effectuée conformément à la norme NF A 03 251.

Diamètre de la partie utile : 13,8 mm

section de la partie utile :  $S$  : 150 mm<sup>2</sup>

La longueur initiale entre repères  $L_0 = 5,65 \sqrt{S} = 70$  mm

l'essai de traction consiste à tirer sur une éprouvette en augmentant progressivement l'effort appliqué jusqu'à la rupture cet essai détermine.

- La charge de rupture qui est l'effort maximal atteint pour casser l'éprouvette.

..../....

- La résistance à la rupture ( $R_m$ ) rapport entre la charge et la section initiale de l'éprouvette.

44 /

- L'allongement de rupture qui est le rapport de la différence de longueur de l'éprouvette après ( $L$ ) et avant ( $L_0$ ) essai sur la longueur initiale ( $L_0$ ).

$$\Delta \% = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

Dureté / : La dureté d'un alliage est la résistance à la pénétration d'un élément étranger. Elle est mesurée sur la même éprouvette par la pénétration d'une bille d'acier de 10 mm de diamètre sous 1000 Kgs de charge. Le résultat est lu sur une table en fonction du diamètre de l'empreinte laissée par la bille.

Micrographie / :

La micrographie a pour but de mettre en évidence les constituants des produits des métallurgiques (métaux purs, solutions, solides...etc...) pour cela on procède à l'examen au microscope optique par réflexion d'une surface polie et attaquée.

Polissage / : pour avoir une surface plane et brillante on a frotté le métal enrobé sur des abrasifs de plus en plus fin respectivement 100 - 180 - 320 - 600 - 1200 ( grains/  $\text{mm}^2$  ) en utilisant au finissage de la pâte diamantée.

Attaque chimique / : Pour révéler les joints des grains et de différencier de constituants de l'alliage, on a trempé la face à attaquée dans dans la l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{S O}_4$  ) solution à 20 % chauffée à 70 à 80 ° C l'échantillon est lavé et soché à l'air comprimé pour passer à l'examen au microscope optique et examinant la structure obtenus.

- BRUT DE COULEE (SANS MODIFICATION) /:

CARACTERISTIQUES MECANIQUES / :

ESSAIS	d (mm)	HB 10/1000/30	P. (DAN/)	$R_T$ (DAN/mm <sup>2</sup> )	$L$ (mm)	A %
Essai	4,32	64,9	2610	17,40	71,80	2,57
Essai n° 2	4,32	64,9	2565	17,10	71,80	2,57
Moyenne	4,32	64,9	2587,5	17,25	71,80	2,57

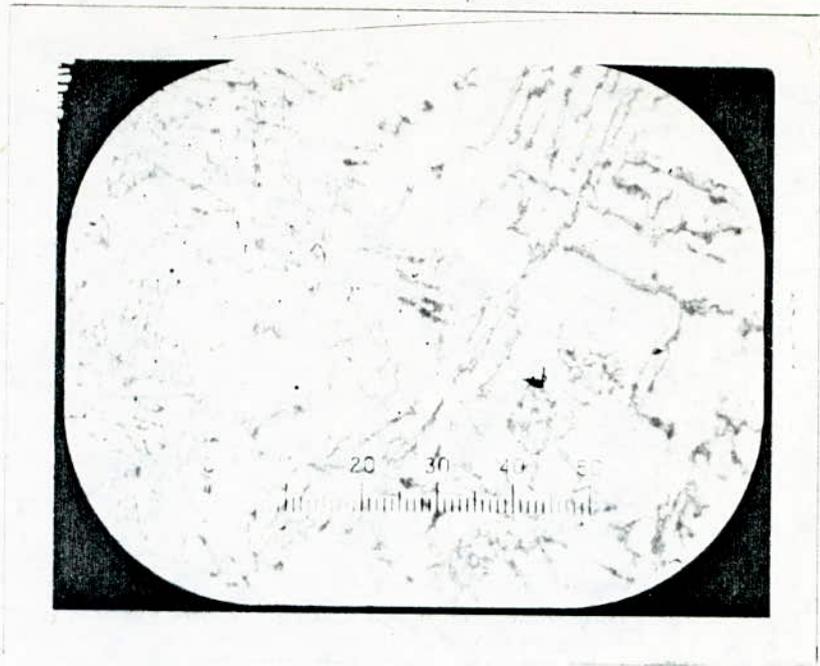
- BRUT DE COULLE (AVEC MODIFICATION)

CARACTERISTIQUES MECANIQUES /:

Essais	D (mm)	HB 10/1000/30	P (DAN)	$R_T$ (DAN/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	A %
Essai N° 1	4,58	57,3	2505	16,70	72,75	3,93
Essai N° 2	4,58	57,3	2505	16,70	72,60	3,71
Moyenne	4,58	57,3	2505	16,70	72,68	3,82

Après un chauffage de mise en solution de l'alliage à une température de 540°C pendant 8 Heures et trempe à l'eau froide, on note déjà un léger durcissement de l'alliage car la solution est renforcée par la présence supplémentaires des atomes de l'éléments d'addition. On note surtout une augmentation de la plasticité de l'alliage due à la disparition du composé défini, fragile qui existait aux joints des grains de solution solide.

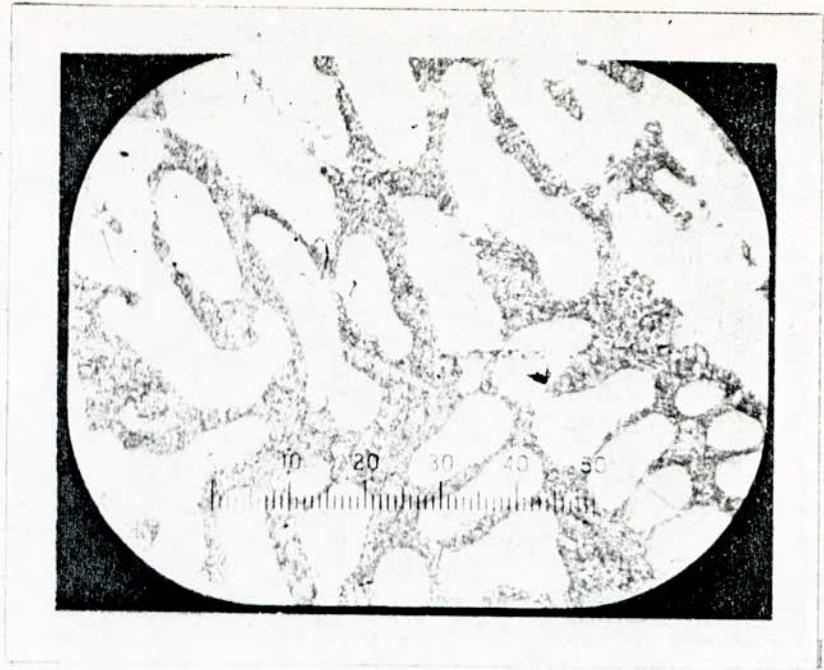
ETAT	HB	$R_T$ (DAN/mm <sup>2</sup> )	A %
Brut de coulée	57,3	16,70	3,82
Trempe	77,9	21,40	4,14



x 200

brut de coulée avant modification

attaque H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4 à 20 % ( 70 - 80 ) ° C

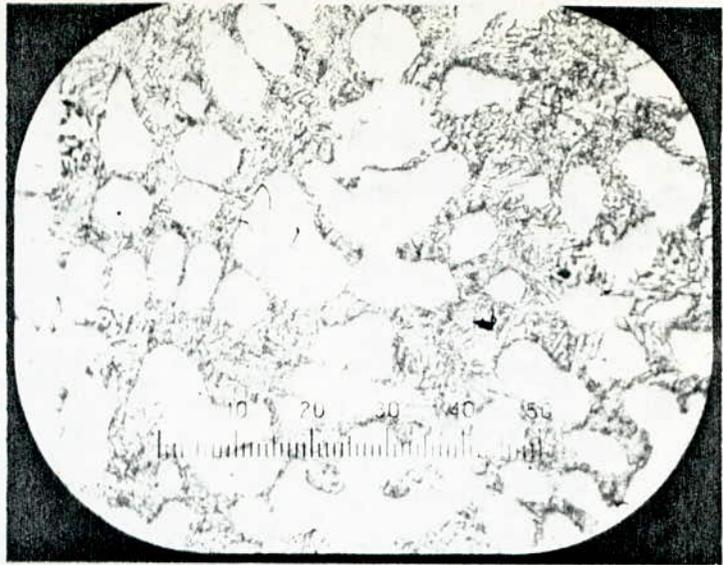


x 200

brut de coulée après modification

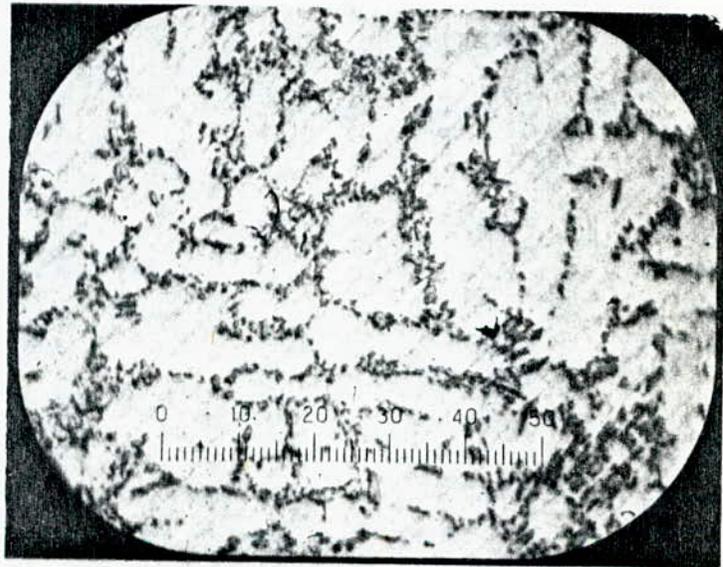
attaque :  $H_2SO_4$  à 20 % ( 70 - 80 ) ° C

(a)



x 200

(b)



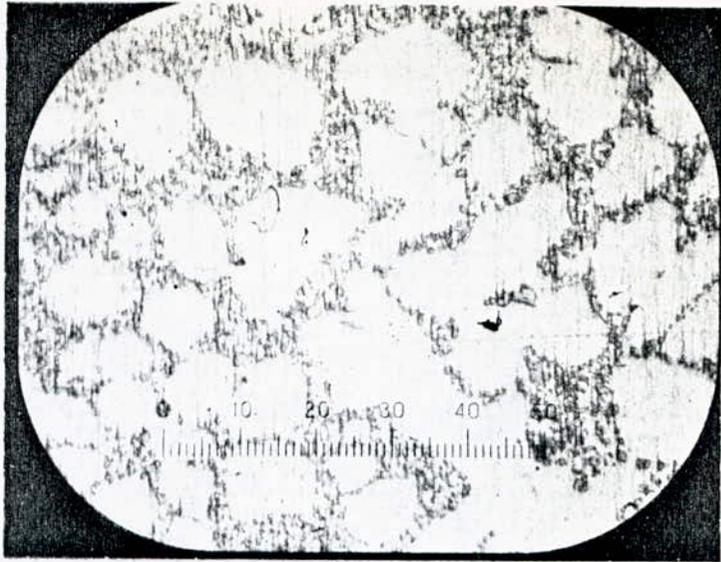
x 200

Microstructure de l'A - S 10 G

a/ brut de coulée après modification

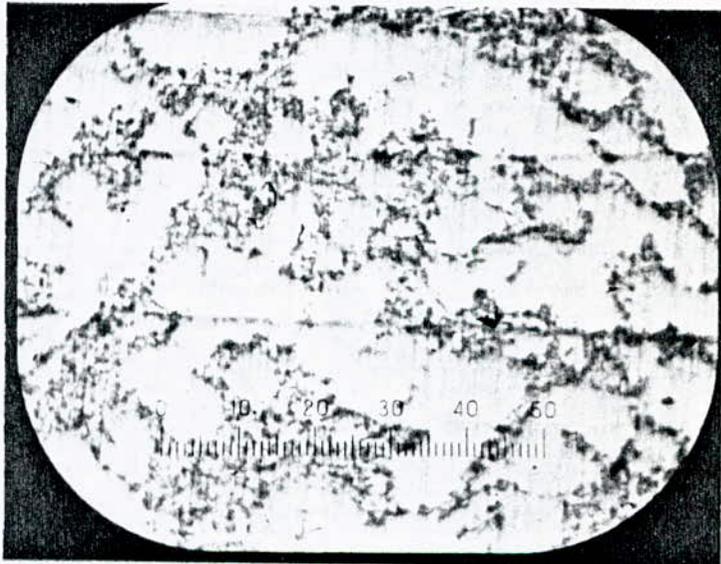
b/ trempé et revenu à  $t = 20 \text{ h}$  -  $T = 160^\circ \text{ C}$

(a)



x 200

(b)



x 200

Microstructure de l' A-S 10 G  
trempé et revenu à :

a/ t = 10 h - T = 160°C

b/ t = 10 h - T = 180°C

TABLEAU N° 1 : RESULTATS DES ESSAIS DE DURETE  
ET DE RACTION DES EPROUVETTES A T : 160° C

50/

TEMPS (H)	ESSAIS	D (mm)	HB/10/1000/30	P DAN	RF (DAN/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	A %
02	ESSAI N° 1	3,80	84,9	3300	22,00	72,10	3,00
	ESSAI N° 2	3,86	82,1	3150	21,00	72,50	3,57
	MOYENNE	3,83	83,0	3225	21,50	72,30	3,30
06	ESSAI N° 1	3,68	90,07	4400	29,33	71,40	2,00
	ESSAI N° 2	3,68	90,7	4400	29,33	72,00	2,86
	MOYENNE	3,68	90,7	4400	29,33	71,70	2,43
08	ESSAI N° 1	3,68	90,7	4200	28,00	71,50	2,14
	ESSAI N° 2	3,74	87,7	4000	26,66	71,00	1,43
	MOYENNE	3,71	89,7	4100	27,33	71,25	1,78
10	ESSAI N° 1	3,76	86,7	3700	24,70	71,20	1,71
	ESSAI N° 2	3,72	88,7	4000	26,66	71,20	1,71
	MOYENNE	3,74	87,7	3850	25,66	71,20	1,71
20	ESSAI N° 1	4,03	73,2	3500	23,33	71,40	2,00
	ESSAI N° 2	4,02	75,5	3330	22,20	71,80	2,56
	MOYENNE	4,05	73,9	3415	22,76	71,60	2,28

TABLEAU N° 02 RESULTATS DES ESSAIS DE DURETE ET DE TRACTION  
DES EPROUVETTES A T : 180°C.

TEMPS (H)	ESSAIS	D(MM)	HB 10/1000/30	P (DAN)	RP (DAN/CM <sup>2</sup> )	L (MM)	A %
02	ESSAI N° 1	3,84	83,0	3800	25,33	71,00	1,43
	ESSAI N° 2	3,80	84,9	4000	26,66	70,80	1,16
	MOYENNE	3,82	83,9	3900	26,00	70,90	1,30
06	ESSAI N° 1	3,86	82,1	3600	24,00	71,80	<del>2,57</del>
	ESSAI N° 2	3,82	83,9	3500	23,33	71,40	2,00
	MOYENNE	3,84	83,0	3550	23,66	71,60	2,30
08	ESSAI N° 1	3,96	77,9	3550	23,66	71,80	2,57
	ESSAI N° 2	3,80	84,9	3300	22,00	72,00	2,86
	MOYENNE	3,88	81,3	3425	22,83	71,9	2,71
10	ESSAI N° 1	3,90	80,4	3300	22,00	72,50	3,57
	ESSAI N° 2	3,86	82,1	3450	23,00	71,80	2,57
	MOYENNE	3,88	81,3	3375	22,50	72,15	3,07
20	ESSAI N° 1	4,16	70,2	3150	21,00	72,10	3,00
	ESSAI N° 2	4,10	72,4	3000	20,00	72,40	3,43
	MOYENNE	4,13	71,0	3075	20,50	72,25	3,21

## TABLEAU N° 03 RESULTATS DES ESSAIS DE DURÉE ET DE TRACTION

DES REPROUVETTES A T : 200° C

TEMPS (H)	ESSAIS	D (mm)	HB 10/1000/30	P (DAN)	RT (DAN/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	A %
01	ESSAI N° 1	3,90	80,4	3620	24,20	70,80	1,16
	ESSAI N° 2	3,86	82,1	3550	23,66	70,40	0,58
	MOYENNE	3,88	81,3	3585	23,90	70,60	0,86
02	ESSAI N° 1	3,90	80,4	3600	24,00	70,80	1,16
	ESSAI N° 2	3,90	80,4	3500	23,33	71,20	1,71
	MOYENNE	3,90	80,4	3550	23,66	71,00	1,43
06	ESSAI N° 1	4,02	75,5	3300	22,00	71,80	2,57
	ESSAI N° 2	3,94	78,7	3000	20,00	72,10	3,00
	MOYENNE	3,98	77,1	3150	21,00	71,95	2,78
08	ESSAI N° 1	4,04	74,07	3100	20,66	72,50	3,57
	ESSAI N° 2	4,04	74,7	3000	20,00	72,00	3,00
	MOYENNE	4,04	74,7	3050	20,33	72,30	3,28
10	ESSAI N° 1	4,12	71,9	3000	20,00	71,90	4,14
	ESSAI N° 2	4,06	73,9	2850	19,00	72,40	3,43
	MOYENNE	4,09	72,4	2925	19,50	72,65	3,78
20	ESSAI N° 1	4,40	62,4	2700	18,10	72,90	4,14
	ESSAI N° 2	4,32	64,2	3000	20,00	73,00	4,29
	MOYENNE	4,36	63,6	2850	19,00	72,95	4,21

Le revenu ou durcissement structural est l'étape au cours de laquelle l'alliage, acquiert ses caractéristiques d'utilisation à l'état trempé il est constitué en plus des cristaux de silicium et des constituants au fer par une solution solide sur saturée. Pendant le revenu, la structure va évoluer vers l'équilibre physicochimique.

À basse température, la première modification qui intervient est un simple rassemblement des atomes de soluté (Mg et Si) qui, tout en restant aux noeuds du réseau de la matrice se regroupent dans certaines régions. Ces regroupements d'atomes en essaims constituent ce que l'on appelle les zones de GUINIER-PRESTON.

Dans le cas d'alliage A-S10G Ces rassemblements sont filiformes et leurs formations est accompagnée d'une augmentation de la charge de rupture, tandis que l'allongement conserve des valeurs relativement élevées.

Dans le cas où l'alliage est conservé seulement à la température ambiante après trempé, cette transformation est la seule à se produire. En effet la germination des zones de G.P. est facile grâce au nombre important des lacunes obtenues par la mise en solution et la trempé.

Lorsque le revenu est effectué à température plus élevée (exple : 150° - 160° - 180° ...) la formation des zones G.P. constitue la première étape. l'étape suivante se manifeste par une très fine, précipitation en aiguilles d'un constituant dont la composition correspond à Mg<sub>2</sub>Si.

Contrairement aux zones de G.P., les précipités possèdent un réseau différent de celui de la matrice mais présentent avec elle une forte cohérence par épitaxie. Cette cohérence s'accompagne d'une forte distorsion aussi bien du réseau de la matrice que de celui du précipité au voisinage de l'interface.

Ces distorsions provoquent des tensions internes élevées qui s'opposent au passage des dislocations lorsque l'alliage est soumis à une contrainte c'est la raison pour laquelle cette précipitation correspond à l'obtention du maximum de dureté, résistance à la traction associé à un allongement faible.

Si on augmente le temps de maintien ou on fait ~~croître~~ la température de revenu, les précipités perdent peu à peu leur cohérence et évoluent vers. .../...

la phase II<sub>2</sub> Si sous forme de plaquettes. Cette perte de cohérence <sup>54/</sup> marque  
le début de l'adoucissement de l'alliage.

Lorsque le temps ou la température continue à ~~croître~~, les précipités  
coalescents prennent la forme de bâtonnets et l'adoucissement continue  
à s'accroître.

Fig 7 : influence des conditions de revenu sur la dureté Brinell de l'A-S10G coulé en sable.

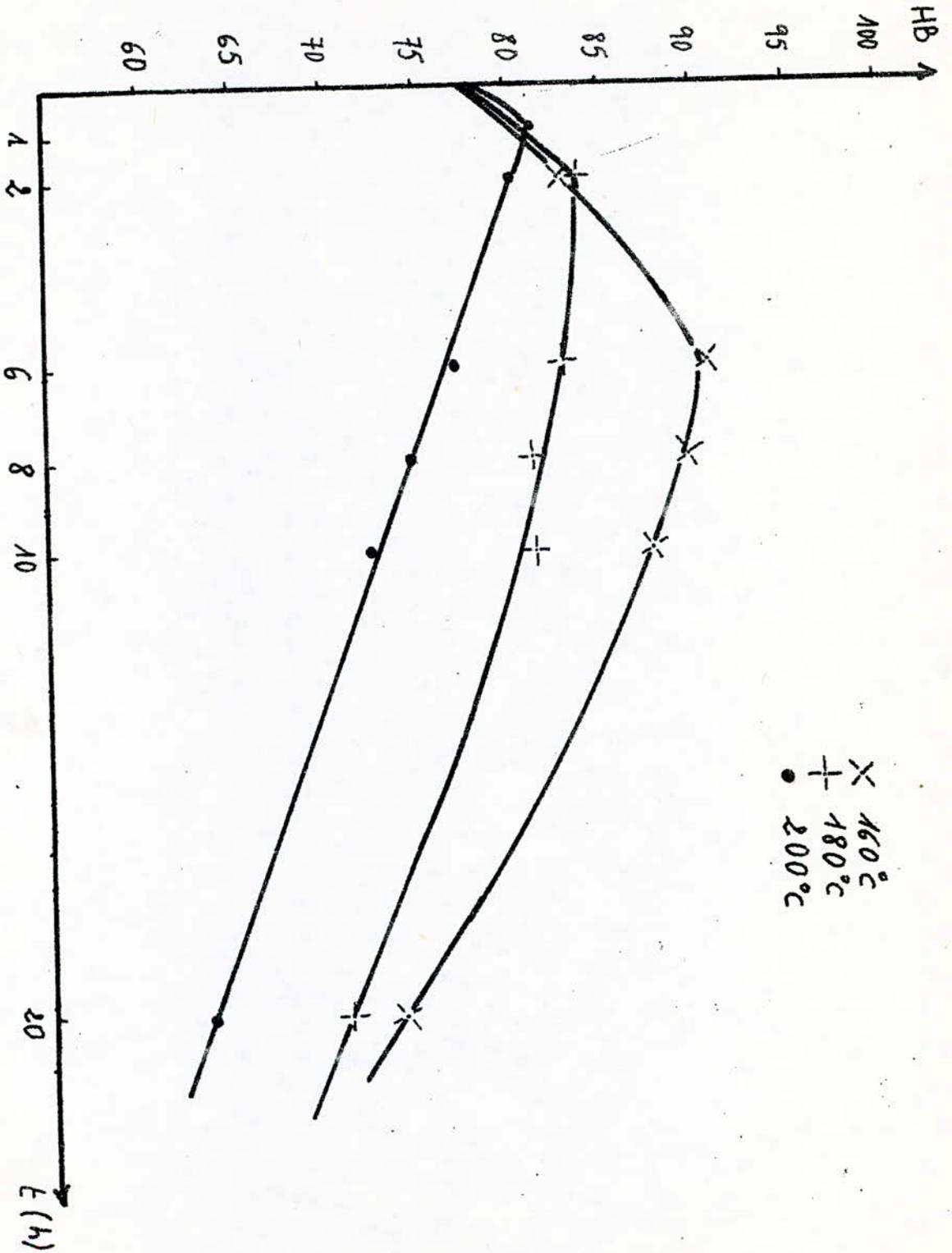


Fig 8 : influence des conditions de revenu sur les caractéristiques de l'A-S10G coulée en sable.

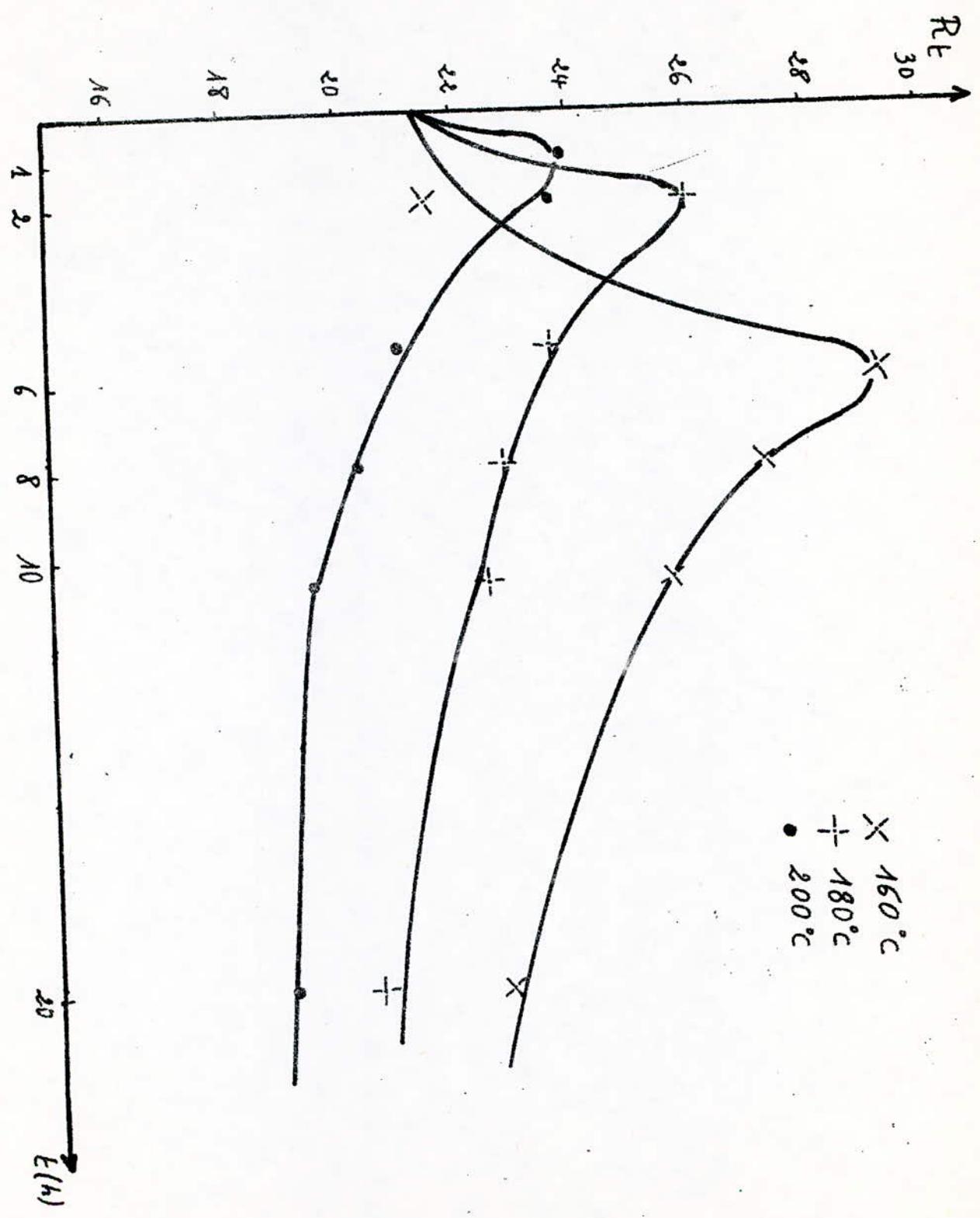
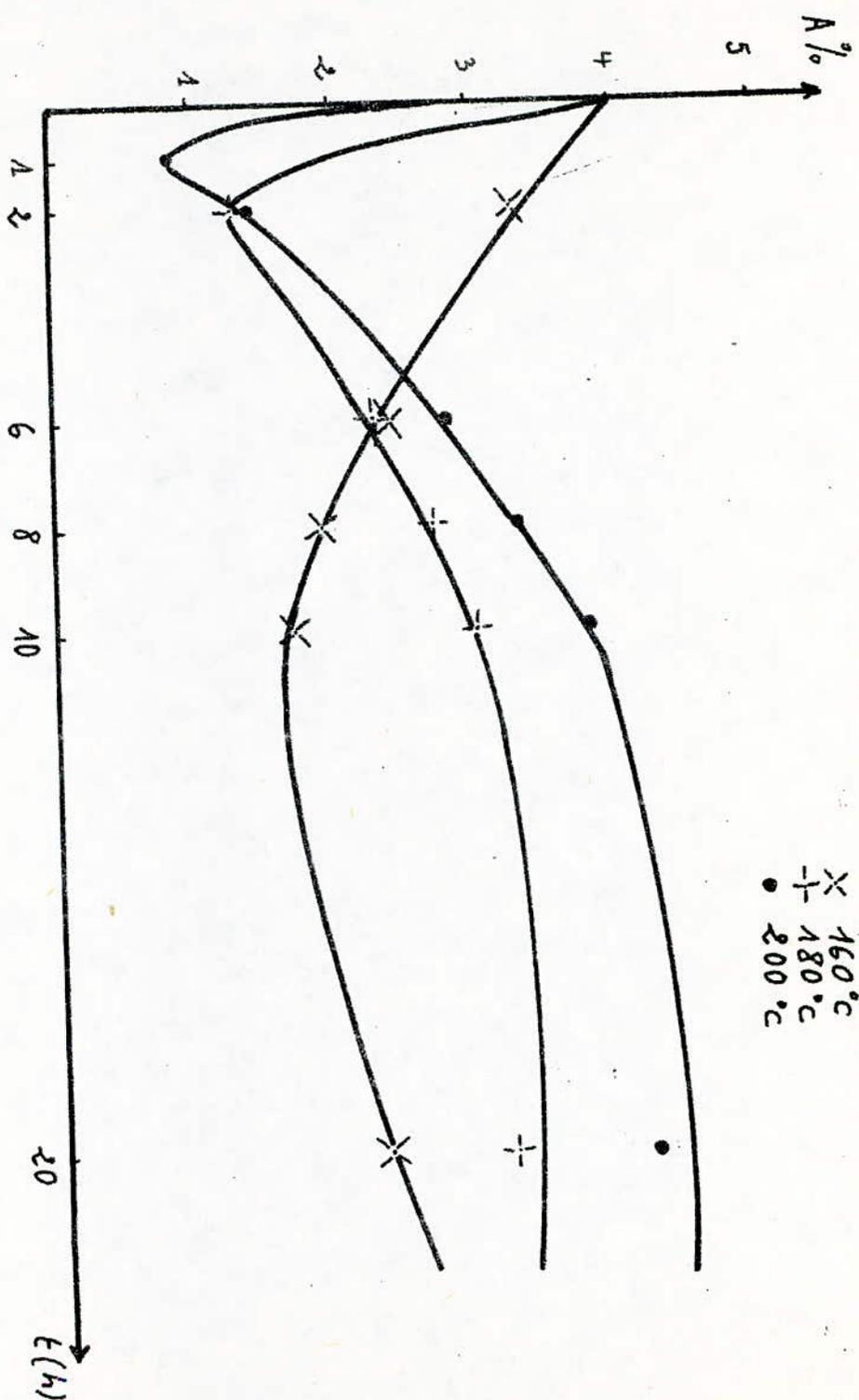


Fig 3 : influence des conditions de revenu sur les caractéristiques de l'A-510G coulé en sable.



On remarque de l'étude de l'influence du temps et température de revenu de l'alliage **A-5106** (Fig 7) (Fig 8) (Fig 9) que pour chaque température de revenu les étages étudiés précédemment interviennent on se superposent plus au moins. La résistance à la traction et la dureté croissent en fonction du temps de revenu, par un maximum quand la seconde phase ( $Mg_2Si$ ) et précipités rediment au fur et à mesure que les précipités perdent leur cohérence, tandis que ~~la~~ <sup>l'allongement</sup> varie au sens contraire et passe par un minimum lorsque les autres propriétés sont à leur maximum.

Pour chaque température étudiée il y a un maximum de la résistance à la rupture qui est atteint d'autant plus vite que la température est plus élevée, et ce maximum est d'autant plus élevé que la température est basse car la précipitation est plus <sup>fine</sup> à basse température (Fig 8). L'allongement à la rupture diminue lorsque la durée de revenu augmente et ceci d'autant plus rapidement que la température est plus élevée (Fig 9).

d'autre part, la vitesse de diffusion augmente beaucoup avec la température de sorte que le temps de maintien nécessaire pour atteindre le maximum de la courbe varie considérablement avec la température. Notons aussi que la stabilité de la structure obtenue pendant un temps de 10 Heures et à la température de  $160^{\circ}C$  est plus grande que celle obtenue

par d'autres temps et d'autres température (Fig 8). on a même fait quelques essais à  $T : 140^{\circ}C$  pendant  $T : 10h, 14h, et 20h$ , on a remarqué que le maximum de la courbe est obtenu à  $T : 14h$  mais la stabilité structurale n'a pas été encore obtenue pour  $T : 20h$  donc il faut prolonger la durée de chauffage.

.../...

Variation des caractéristiques mécaniques avec la température.

Températures	D(mm)	HB 10/1000/30	P <sub>du</sub>	P <sub>dH</sub> <sup>+</sup> dH/mm <sup>2</sup>	L (mm)	A %
140° C	3,68	90,7	3700	24,75	70,80	1,16
160° C	3,74	87,7	3850	25,66	71,20	1,71
180° C	3,88	81,3	3375	22,50	72,15	3,07
200° C	4,09	72,4	2925	19,50	72,65	3,78

D'après les résultats obtenus on remarque que les caractéristiques mécaniques sont obtenues à une basse température et se maintiennent jusqu'à 160° à 180° C elles diminuent fortement à 190° environ et devient très fragile aux températures supérieures de plus l'allongement à la rupture commence à augmenter brusquement à partir d'une certaine température ( Fig 10).

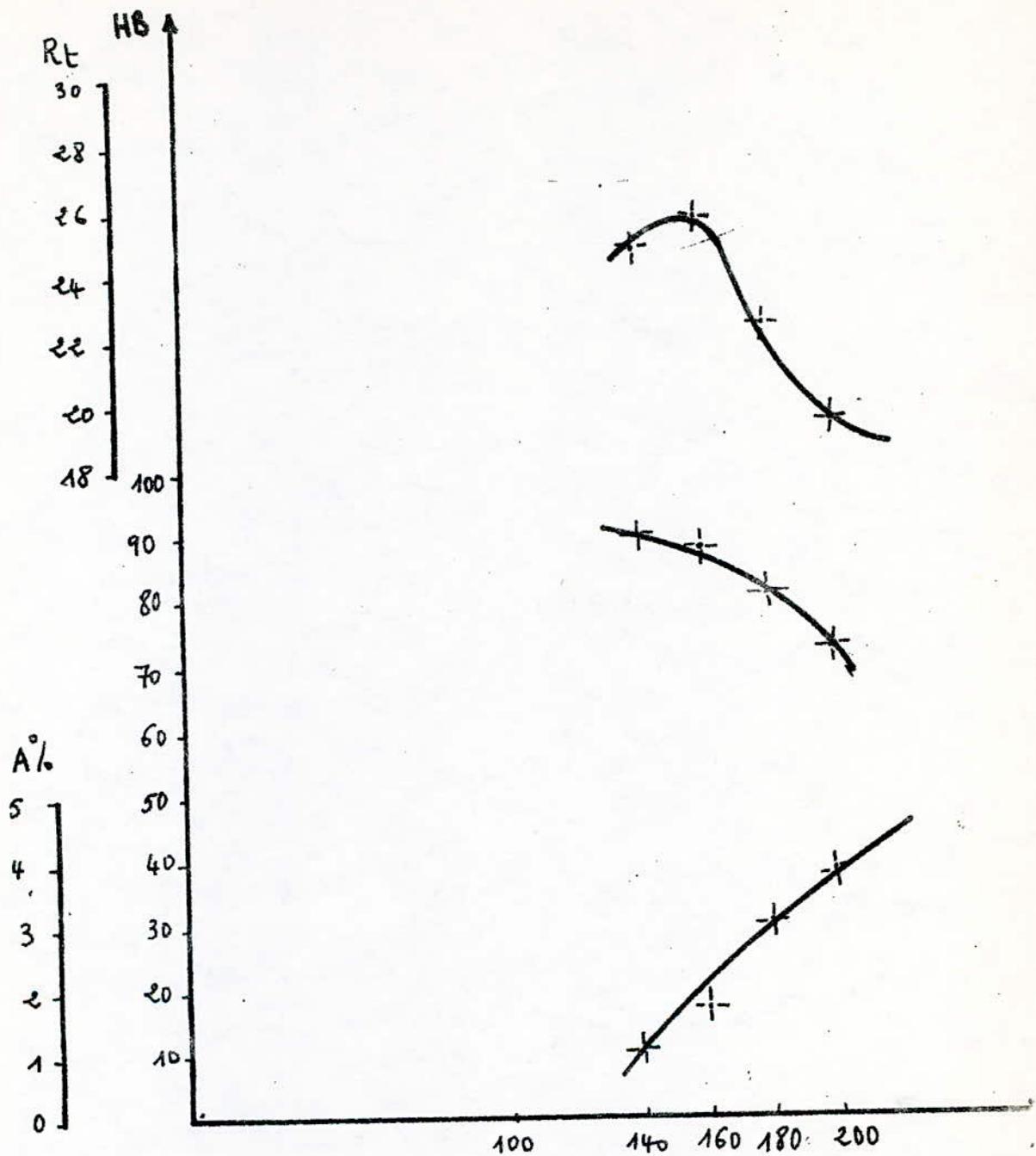


Fig 10: alliage A-S10G état trempé et revenu.  
Variations des caractéristiques mécaniques  
avec la température de revenu  
pour  $t = 10$  h.

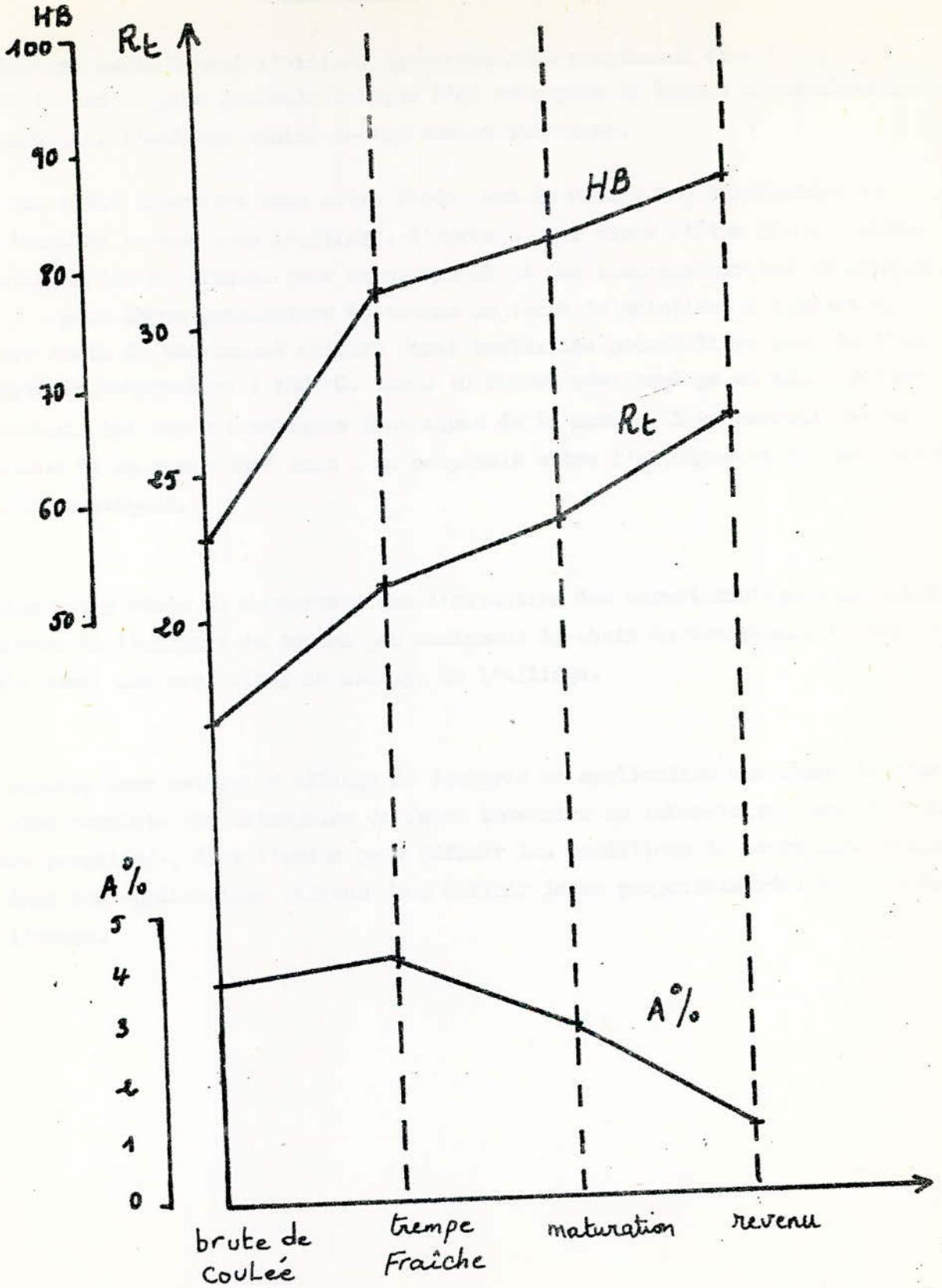


Fig 11: évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du Traitement de mise en solution, trempe, revenu.

BIBLIOGRAPHIE / :

1. R. IRIZANI - Fonderie d'aluminium (1957) DUNOD.
2. L. GIAI - BRUGNI - Fonderie (1983) DUNOD
3. Groupe PÉCHINEY - L'Aluminium tome 1 (1964) MYROLLES
4. H. LIGNON, R. MAILLEBUAU - Matériaux non ferreux (1976) DUNOD
5. TECHNIQUE de l'ingénieur - Traitements Thermiques.
6. ALBERT DE SY et JULIEN VIDTS - Métallurgie structurale (1964)  
Masson et Cie.
7. J. HERRENGUEL, Métallurgie spéciale tome 1 (1962)
8. JACQUES LAMHONY - L'aluminium et les alliages légers (1952) série  
que sais-je.
9. J. de SMITH - La pratique des traitements thermiques des métaux  
industriels (1963) DUNOD.
10. C. VARGEL . Le comportement de l'aluminium et de ses alliages (1979) DUNOD
11. I. LAKEFILIÉ - Métallurgie et traitements thermiques des métaux (1978)  
Mir-Moscou.
12. Revue scientifique - Fonderie - Mars 1974.
13. Groupe Péciney - Fonderie d'Aluminium.

