

# Diagramme de Solidification des Alliages Binaires

1

## 1 - PRINCIPE DE CONSTRUCTION

- En général , un alliage ne se solidifie pas , comme un métal pur , à température constante .  
La solidification commence à une température " T " et finit à une température " t " .
  - ⇒ Il y a intervalle de solidification
- Le diagramme de solidification est le lieu de ces températures " T " et " t " en fonction de la composition de l'alliage :
  - ⇒ Le lieu de " T " est le LIQUIDUS
  - ⇒ Le lieu de " t " est le SOLIDUS
- A l'état solide , la constitution physico-chimique d'un alliage peut subir des transformations . On dit qu'il présente des points de transformations :
  - ⇒ Le lieu de ces points constitue une ligne de transformation .
- L'ensemble  $\left\{ \begin{array}{l} \text{diagramme de solidification} \\ + \\ \text{lignes de transformation} \end{array} \right\}$  constitue :
  - ⇒ le DIAGRAMME D'EQUILIBRE

### 1.1 : TRACE DES DIAGRAMMES ( voir DOC 01 )

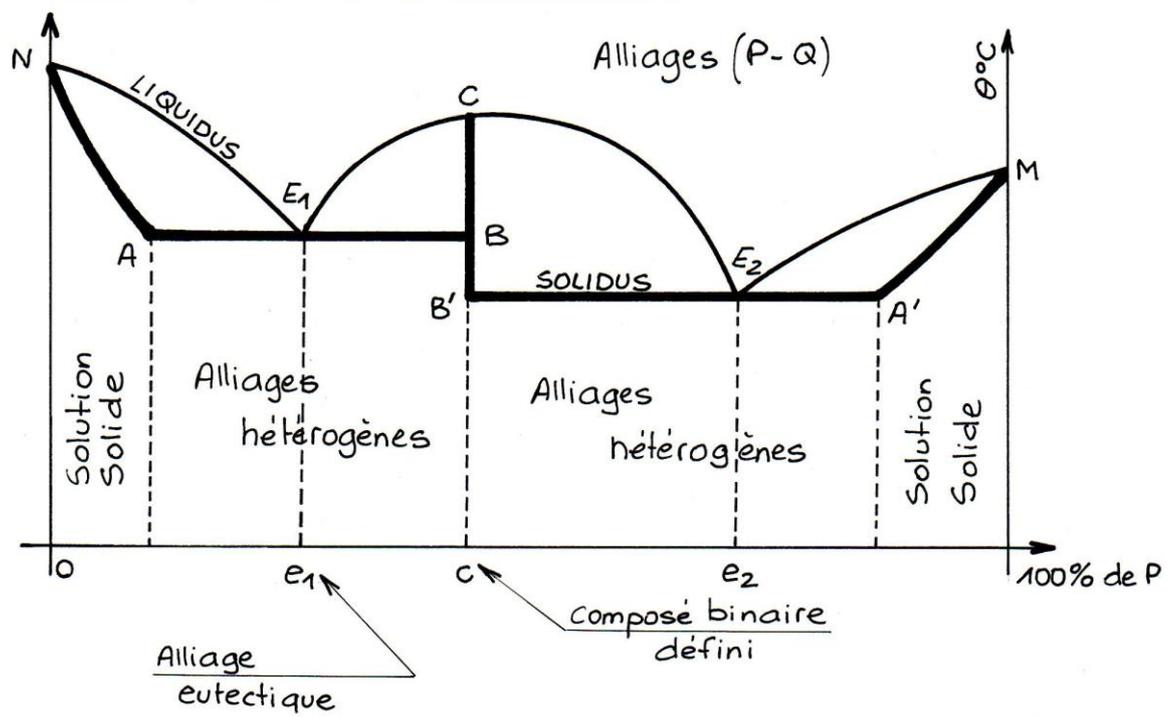
- Pour les alliages binaires la représentation se fait dans le plan :
  - On porte en abscisses les compositions des différents alliages ( A - B ) , exprimées en titre d'un des éléments de l'alliage .
  - On porte en ordonnées les températures " T " et " t " ( valeur de température à pression constante )

### 1.2 : INDICATIONS FOURNIES PAR LE DIAGRAMME

#### 1.2.1 : Zones d'existence du liquide et du solide

- \* Tout point P au dessus du LIQUIDUS correspond à un alliage liquide
- \* Tout point P au dessous du SOLIDUS correspond à un alliage solide
- \* Tout point compris entre le liquidus et le solidus est figuratif d'un alliage en cours de solidification

1.2.2 : Nature des alliages à l'état solide



- La figure ci-dessus montre un diagramme de solidification théorique :

- Le SOLIDUS est formé de plusieurs " branches " :

- \* Des obliques NA et MA'
- \* Des horizontales AB et A'B'
- \* De la verticale CB'

- L'examen micrographique permet de voir que sous les branches obliques du SOLIDUS les alliages sont " homogènes " :

⇒ ces alliages sont des solutions solides

- Sous les portions horizontales du SOLIDUS les alliages sont " hétérogènes " la solidification se faisant en 2 temps

- Les branches verticales du SOLIDUS indiquent le dépôt de combinaisons chimiquement définies la solidification se faisant à température constante

1.2.3 : Points particuliers

- Ce sont les points d'intersection du Solidus et du Liquidus :

- \* Les alliages dont les compositions sont les abscisses de ces points se solidifient tous à température constante.

- Les points M et N correspondent aux métaux purs P et Q

- Les points E1 et E2 d'abscisses e1 et e2 sont appelés " points eutectiques " du diagramme : les alliages à e1% et e2% sont les alliages eutectiques

- Le point C est sur la verticale d'un alliage à c% de P correspond à un composé binaire défini des 2 métaux P et Q

- REMARQUE : Dans un domaine il ne peut y avoir qu'une ou deux phases .  
Tout franchissement d'une ligne oblique fait varier d'une unité le nombre de phases .

1.3 : LOI DES PHASES ( loi de GIBBS )

1.3.1 : En Chimie

\* La variance d'un système chimique en équilibre est définie par :

$$V = C + 2 - \varphi$$

V → variance ( ou degré de liberté ) : nombre de facteurs d'équilibre indépendants que l'on peut faire varier sans que la nature et le nombre des phases varient .

C → nombre de constituants indépendants ( ici nombre de corps purs simples présents dans l'alliage )

2 → représente les deux facteurs d'équilibre " température " et " pression " .

φ → nombre des phases du système

1.3.2 : En Métallurgie

\* On travaille , pratiquement , à la pression atmosphérique :

⇒ ce facteur devient donc négligeable

$$V = C + 1 - \varphi$$

1.3.3 : Application dans le cas d'un métal pur

- Ici C = 1 d'ou V = 2 - φ

Deux cas possibles :

a) Le métal existe sous un seul état physique :

liquide ou solide

$$\varphi = 1 \quad \text{d'ou} \quad V = 1 \quad , \text{ système " monovariant " }$$

⇒ La température peut changer sans que change l'état physique du métal .

b) Le métal existe sous deux formes :

liquide + solide

$$\varphi = 2 \quad \text{d'ou} \quad V = 0 \quad , \text{ système " invariant " }$$

⇒ La température ne peut être modifiée , parfaitement déterminée , elle restera constante pendant toute la durée du changement d'état .

Ex :      Liquide ⇌ Solide  
            Transformation allotropique

1.3.4 : Application dans le cas de l'alliage binaire

- à traiter sur                      feuille annexe

## 1.4 : CLASSIFICATION DES ALLIAGES BINAIRES

1.4.1 : Définition \* On dit que deux métaux sont " miscibles " quand ils ont la faculté de former un mélange homogène, en l'occurrence des solutions solides .

### 1.4.2 : Métaux entièrement miscibles à l'état liquide

- Cas des alliages industriels :
  - a) une solution solide
  - b) deux solutions solides ( avec Eutectique ou Péritectique )
  - c) plus de deux solutions solides

### 1.4.3 : Métaux partiellement miscibles

- La masse fondue se sépare en deux couches liquides superposées de compositions différentes

### 1.4.4 : Métaux entièrement immiscibles

- Après un repos suffisant les métaux se superposent par ordre de masse volumique : ils se solidifient comme s'ils étaient seuls

Ex : Al - Pb ; Fe - Pb ; Ag - Fe

## 2 - ALLIAGE BINAIRE A UNE SOLUTION SOLIDE UNIQUE

- Dans ce cas les deux métaux sont entièrement miscibles à l'état solide , c'est-à-dire que l'alliage obtenu après solidification est toujours formé d'une solution dont le système cristallin est indépendant de la composition :

⇒ Solution solide unique

- Les courbes d'analyse thermique des différents alliages ( A - B ) en % sont toutes du type : " Solidification à température variable "
- L'allure générale des diagrammes de solidification peut être donnée par l'étude de la solidification des alliages " Cu - Ni "

( voir Doc 03 )

### 2.1 : INTERPRETATION DU DIAGRAMME (voir Doc 02 )

- L'examen graphique du diagramme permet de déterminer pour une température " t' " la "composition chimique " et la "masse " de chacune des phases liquide et solide en cours de solidification .

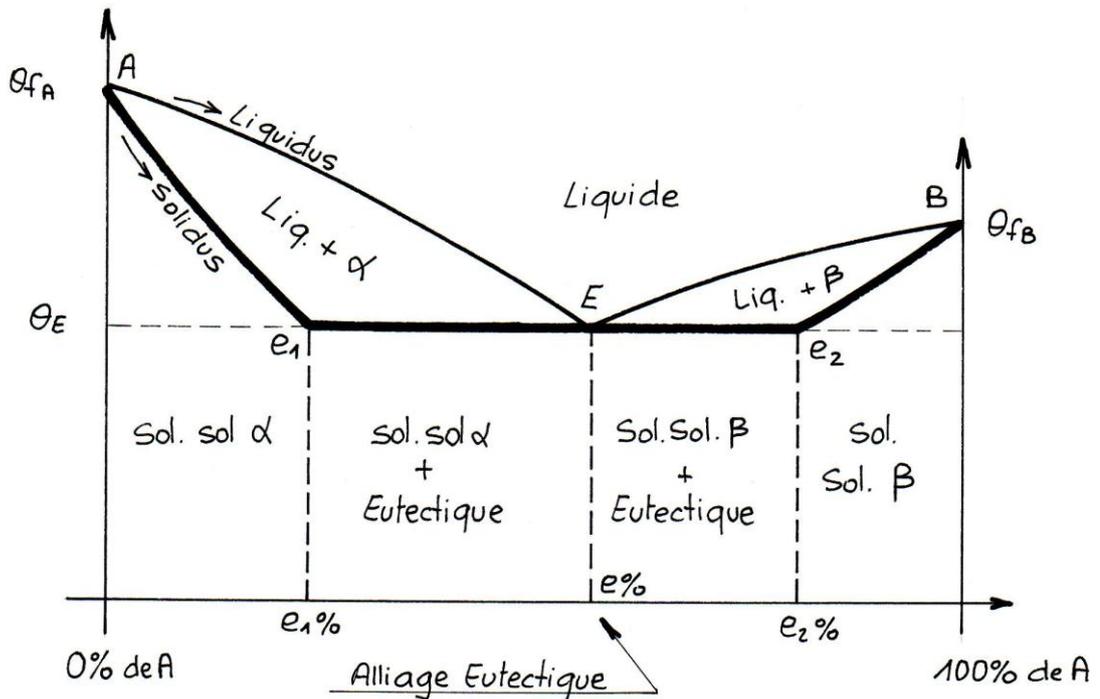
### 2.2 : APPLICATION : Alliages " Cu - Ni "

- Problème : Considérons l'alliage à 50 % de Cu , pris à la température  $\theta = 1260 \text{ }^\circ\text{C}$  . Prenons un lingot de 100 Kg , déterminons la composition chimique des 2 phases et la masse X ( en Kg ) de la phase solide à  $\theta = 1260 \text{ }^\circ\text{C}$  .

- Les alliages des métaux présentent deux séries d' "Alliages homogènes" :
  - \* les uns riches en métal A (donc pauvres en métal B ) sont formés d'une solution solide dite  $\alpha$
  - \* les autres riches en métal B sont formés d'une solution solide dite  $\beta$

⇒ Ces deux solutions solides diffèrent par leur " maille cristalline "

3.1 : ALLURE DU DIAGRAMME



- Du point A partent les branches du Liquidus et du Solidus correspondant au dépôt de la solution solide  $\alpha$
- Du point B il en est de même pour la solution  $\beta$
- Les deux branches du Liquidus se coupent au point E ( point dit "eutectique" car situé entre les points  $e_1$  et  $e_2$  )

En ce point E il y a 3 phases en présence :

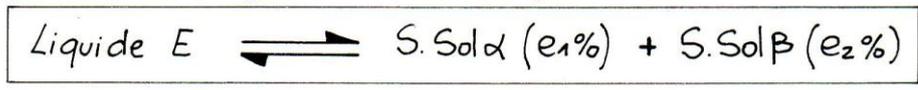
- \* — Le liquide E
  - \* — La solution solide de titre  $e_1$
  - \* — La solution solide de titre  $e_2$
- } à la temp.  $\theta_E$

- Le solidus est formé par :

- \* — Les branches obliques Ae1 et Be2
- \* — L'horizontale  $e_1e_2$

3.2 : LA TRANSFORMATION EUTECTIQUE

- Au point E la loi des phases ( $v = C + 1 - P$ ) donne :  
 $v = 2 + 1 - 3 = 0$  système " invariant "  
 ⇒ l'équilibre ne peut exister qu'à la température  $\theta_E$
- a) Pour toute température supérieure à  $\theta_E$  l'alliage est entièrement liquide ( phase unique ) de titre e % .
- b) A la température  $\theta_E$  l'équilibre se traduit par :



- ⇒ Si l'alliage , tout en restant à la température  $\theta_E$ , cède de la chaleur au milieu ambiant , la solidification se fait par le dépôt simultané des deux solutions solides  $e_1$  et  $e_2$  .
- ⇒ L'alliage eutectique , après solidification , est donc un AGREGAT , mélange hétérogène généralement très fin .
- ⇒ Le rapport des masses est donné par la règle des segments inverses :

$$\frac{\text{masse } e_1}{\text{masse } e_2} = \frac{E \cdot e_2}{E \cdot e_1}$$

- REMARQUE : le point de fusion  $\theta_{fE}$  de l'alliage eutectique est INFERIEUR à celui de tous les alliages voisins formés des mêmes constituants

3.3 : APPLICATION : Alliages " Plomb - Etain " ( Pb - Sn )  
 voir Doc 04

- Problème : Etudier la solidification de l'alliage à 80 % de Sn

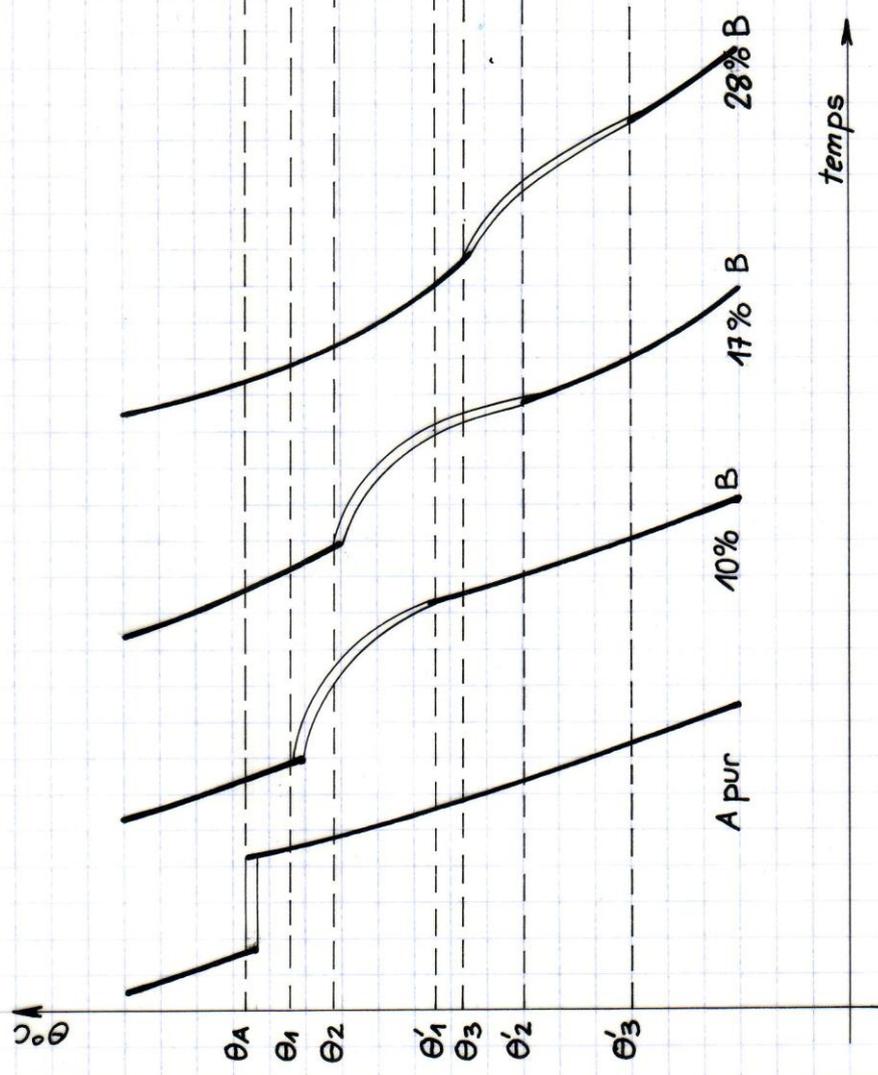
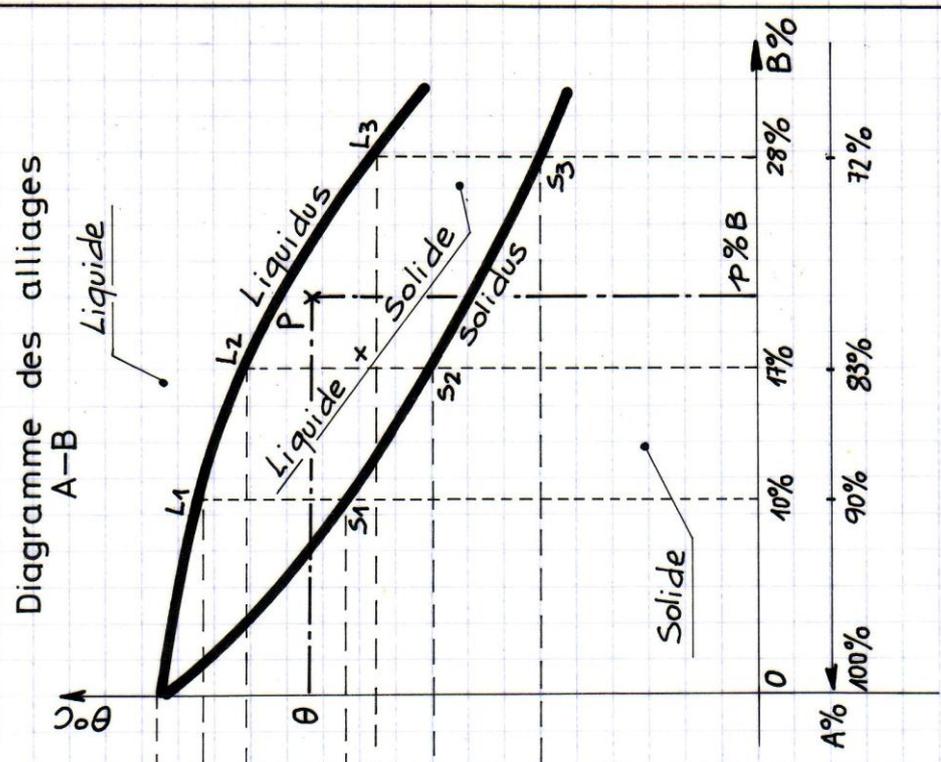


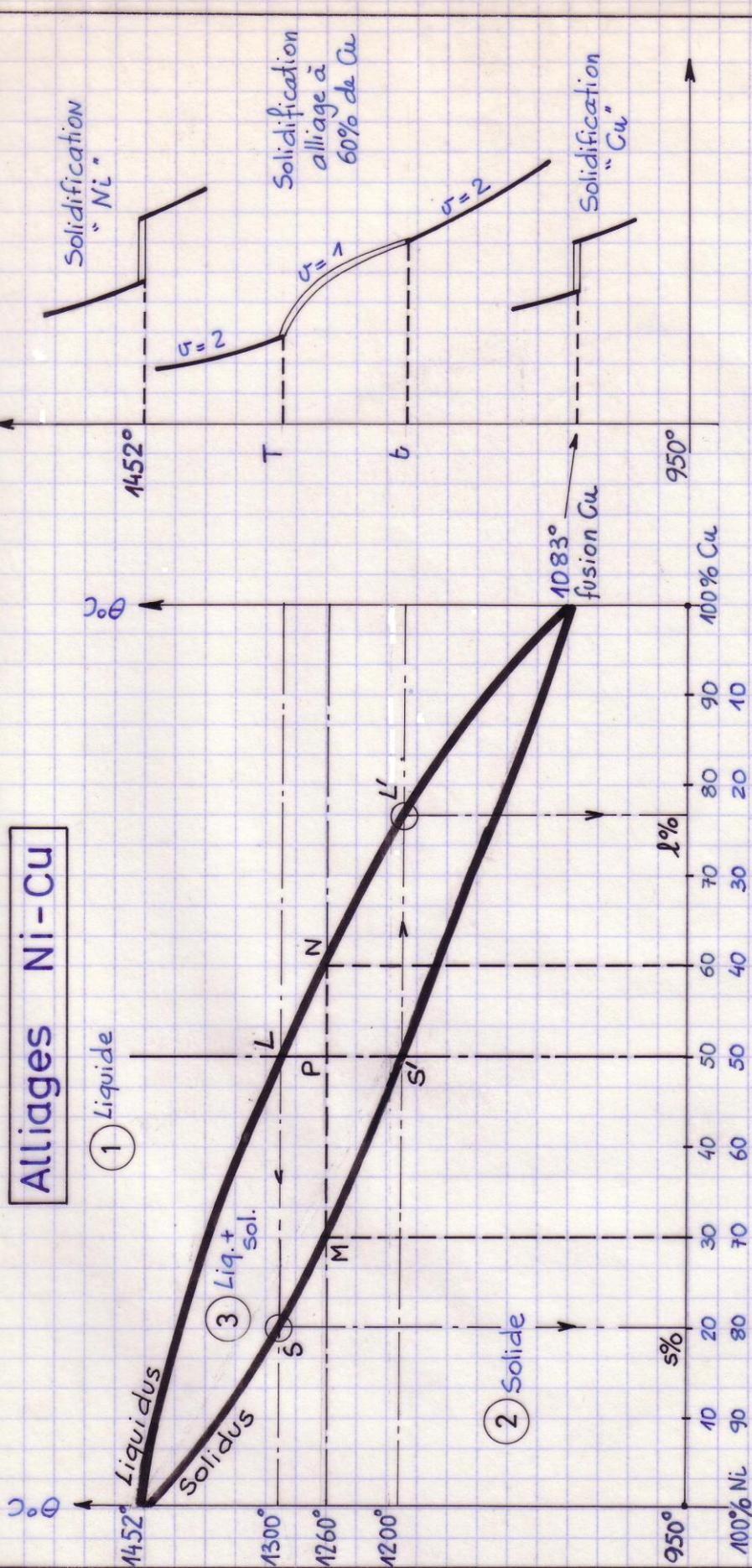
Diagramme de solidification (tracé)



→ A tout point "P" du diagramme correspond un alliage dont la composition est donnée par "P" (abscisse de P). Cet alliage est en équilibre à la température  $\theta$  (ordonnée de P)  
 A deux points "L" et "S" confondus, correspond une solidification à température constante : Ex:  $\theta_A$ , corps pur A.



# Alliages Ni-Cu

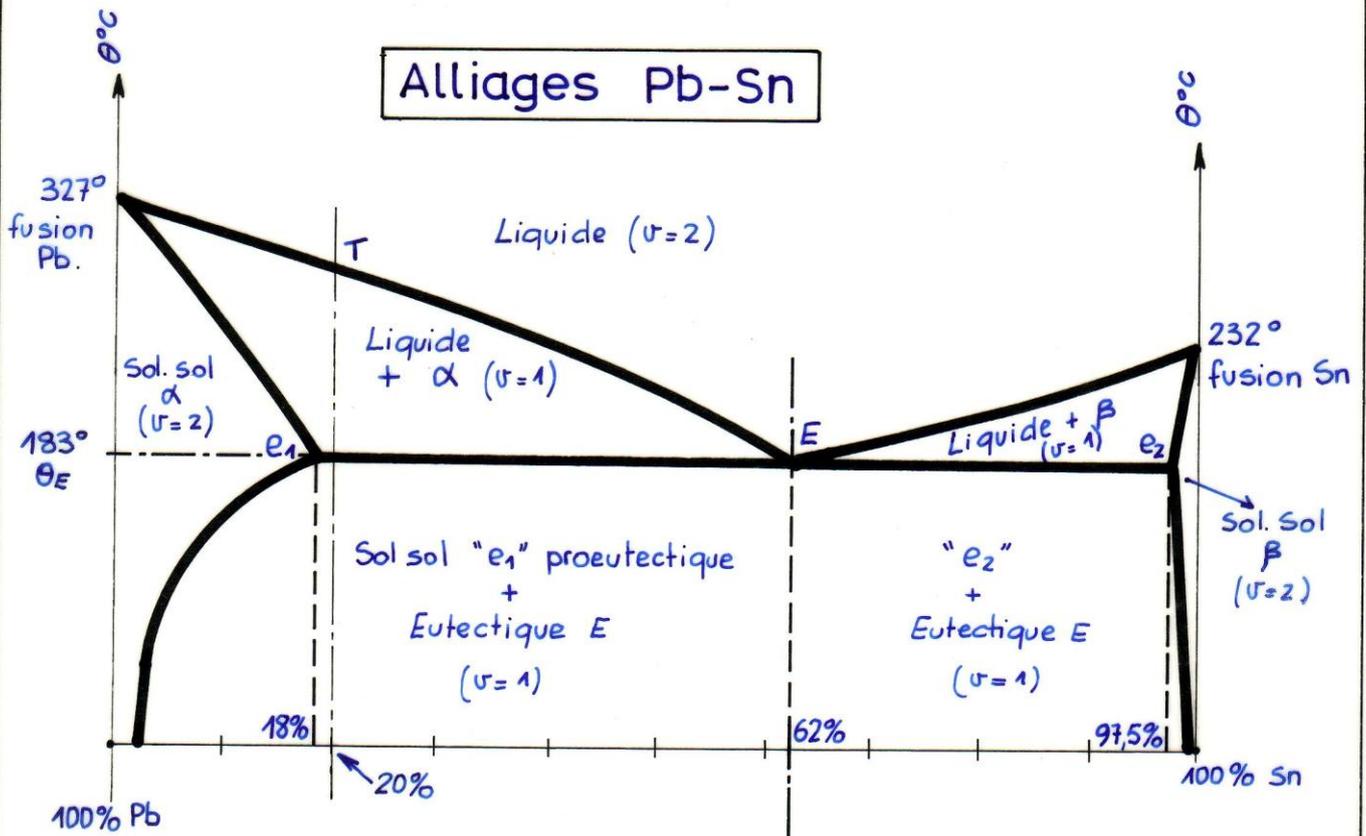


Analyse de l'alliage à 50% de Cu : En "T-E", début de solidification, la phase solide titre 5% de Cu (20%) et la phase liquide pratiquement 50%. La règle de l'horizontale isotherme montre que les points figuratifs des titres respectifs des 2 phases en présence sont sur les portions LL' du Liquidus et SS' du solidus  
 → le titre du solide variant de 5% à 50% (20% à 50%)  
 le titre du liquide variant de 50% à 1% (50% à 76%)

→ A noter qu'on admet qu'à tout instant les masses liquides et solides sont parfaitement homogènes (refroidissement TRÈS lent)

Diagramme de solidification (exemple)

# Alliages Pb-Sn



## SOLIDIFICATION DES DIVERS ALLIAGES

$0 < p\% < e_1$   
et  
 $e_2 < p\% < 100$

La solidification se fait comme dans le cas d'une solution solide unique. Elle donne un seul constituant.  
(sol. sol.  $\alpha$  ou sol. sol.  $\beta$ )

Tous ces alliages sont HOMOGENES

$e_1 < p\% < E$

Lors du refroidissement l'alliage se comporte comme dans le cas d'une sol. solide unique entre les températures  $T$  et  $\theta_E$   
 $\Rightarrow$  De la solution solide  $\alpha$  se dépose de titre maxi  $e_1\%$   
 Cette sol. solide est dite "proeutectique".

A une température ( $\theta_E + \epsilon$ ) l'alliage est donc formé d'une phase Liquide de titre  $E$  et d'une sol. solide de titre  $e_1$   
 $\Rightarrow$  A la temp.  $\theta_E$  le liquide restant se solidifie comme l'Eutectique (à  $\theta = C^e$ ) en donnant un agrégat à fine structure de " $e_1$ " et de " $e_2$ "  
 La solution solide " $e_1$ " précédemment solidifiée ne subit pas de modifications.

Tous ces alliages sont HETEROGENES

$E < p\% < e_2$

Processus identique : Sol. sol. proeutectique  $\beta$  de titre maxi  $e_2\%$  et eutectique.

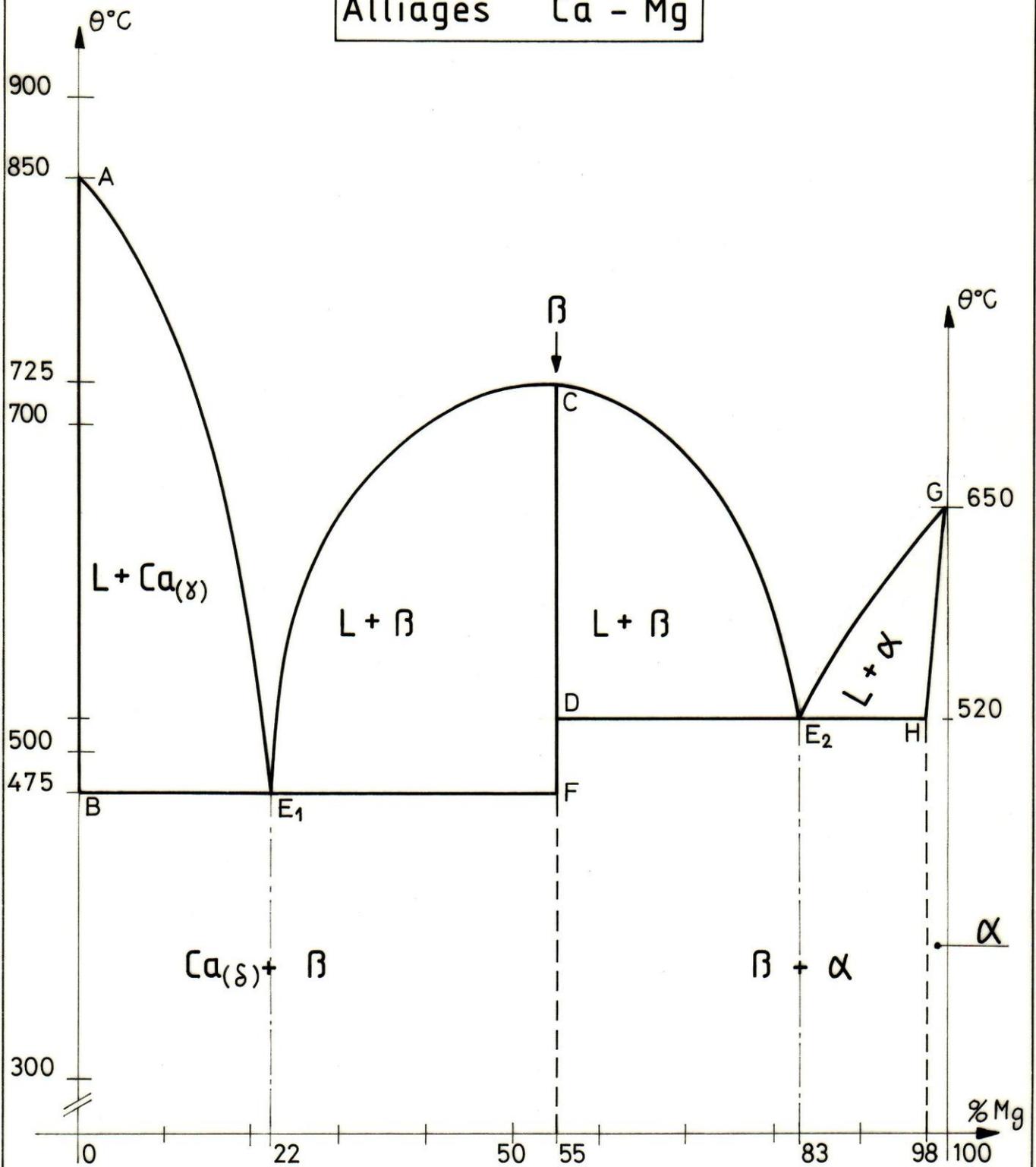
Diagramme de solidification  
(exemple)

Doc 04

1/2



# Alliages Ca - Mg



Echelles: 1,6 mm 1%  
3 mm 10°C

Diagramme de solidification  
(exemple)

Doc 05