

Les métaux pour le GC  
Mercredi 7 Mai 2025

## **Alliages**

**Diagrammes de phase (ddp)**

**Loi des leviers**

**Un changement de phases: la solidification**

# Métal pur et alliages

Les métaux purs sont malléables (mous, doux, facilement déformables) et présentent des limites élastiques très faibles.

**Pour les durcir, on ajoute des éléments d'alliages:**

- atomes de tailles similaires: gamme complète de solution solide (miscibilité complète, eg Ag / Au pour joaillerie)
- atomes de tailles différentes: solution solide limitée ( $\alpha$  et  $\beta$ )
- atomes de faible affinité : apparition de nouvelles phases telles que des intermétalliques stœchiométriques ou non eg  $\text{Al}_2\text{Cu}$

La microstructure des alliages apparaît comme composée:

- de **solutions solides** (substitutionnelle, interstitielle ou mixte)
- de nouvelles **phases intermétalliques** ( $\text{Al}_2\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , WC) présentant de nouvelles structures cristallographiques
- et de **mélange organisé (comme un composite) de ces phases** (structure eutectique ou péritectique).

# Le diagramme de phases (ddp)

Le diagramme de phases (ou diagramme d'équilibre) est l'**outil thermodynamique** qui donne les phases stables dans un mélange AB et permet de comprendre les microstructures et leur impact sur les propriétés mécaniques.

## Quelques définitions:

**Constituants ou éléments d'alliage:** espèces chimiques ajoutées à un corps pur pour en faire un alliage binaire (AB), ternaire (ABC) etc ...

**Solvant:** élément majeur, par ex dans Al-Cu4.5% pds, Al est le solvant

**Soluté:** élément (s) mineur (s), Cu dans Al-Cu4.5% pds.

**Phase:** ensemble d'atomes dans le même état (vapeur, liquide ou solide) et la même structure cristalline (motif + réseau) pour les solides. Ex, Al liquide, austénite  $\gamma$ , (Al) solution solide (ss) d'un autre atome dans Al...

**Solution solide (ss):** phase solide qui peut accepter plus ou moins d'éléments d'alliage (**solubilité**) sans changer sa nature cristalline, laiton = (Cu) = ss de Zn dans Cu.

**Système multiphasé:** système comprenant plusieurs phases. Ex: ferrite et carbure de fer  $\text{Fe}_3\text{C}$  dans la perlite ou (Al) et  $\text{Al}_2\text{Cu}$  dans un eutectique.

**Composé stoechiométrique:** composé  $\text{A}_x\text{B}_y$  ou x et y sont fixes. Ex  $\text{Fe}_3\text{C}$  = cémentite

**Composé avec domaine d'existence:** Composé  $\text{A}_x\text{B}_y$  ou x et y varient autour d'une valeur. Ex  $\text{Mg}_x\text{Cu}_2$  ou x varie autour de 1.

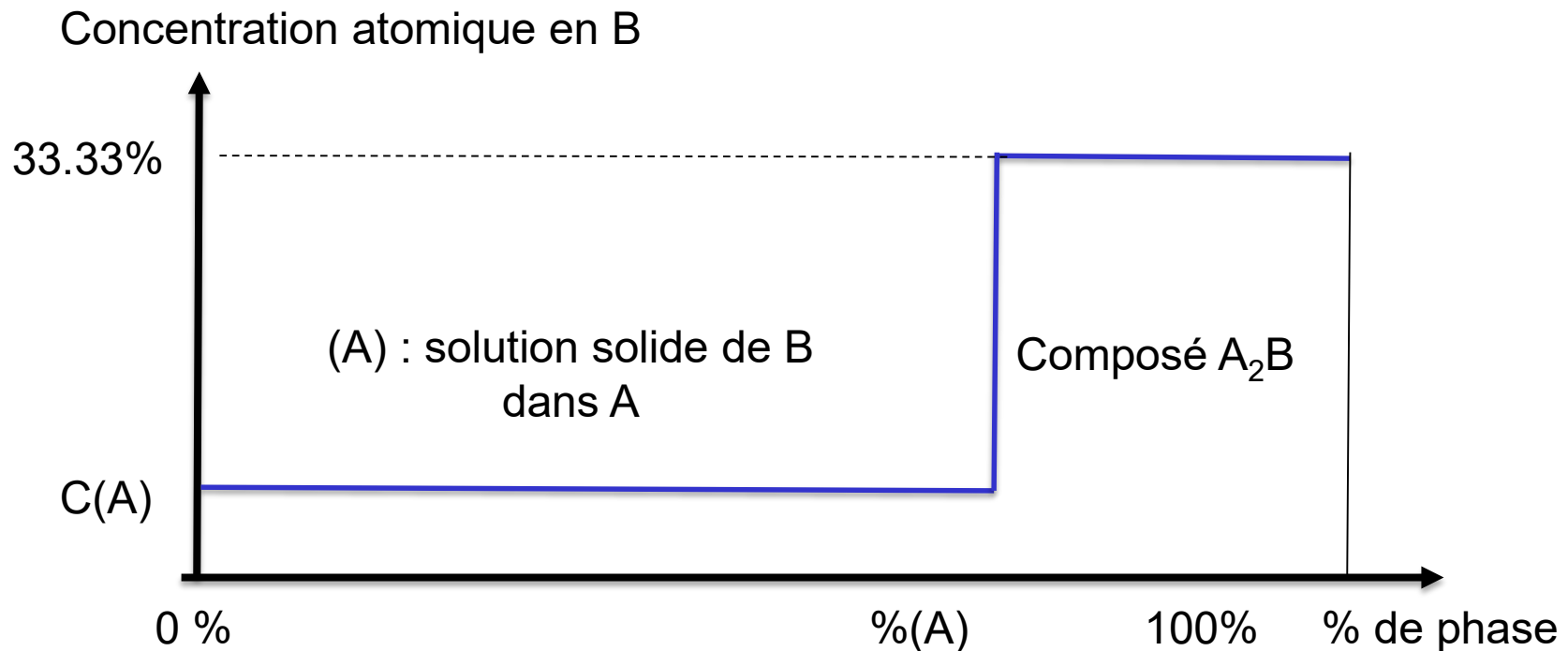
# Le diagramme d'équilibre des phases

Le diagramme de phases donne pour une composition moyenne  $C_0$  d'un alliage binaire :

- **la nature** de la ou des phases en présence à l'équilibre thermodynamique
- **la concentration** uniforme dans chaque phase
- et **la proportion** de chaque phase

**en fonction de la température  $T$  et de la pression  $P$  (souvent on fixe  $P = 1 \text{ atm}$ ).**

Exemple: Alliage AB à  $C_0$  en B à  $T$  et sous 1 atm, la phase (A) est en équilibre avec la phase  $A_2B$ . C'est l'état de plus basse énergie qui n'évolue donc pas à  $T$  et  $p$ .

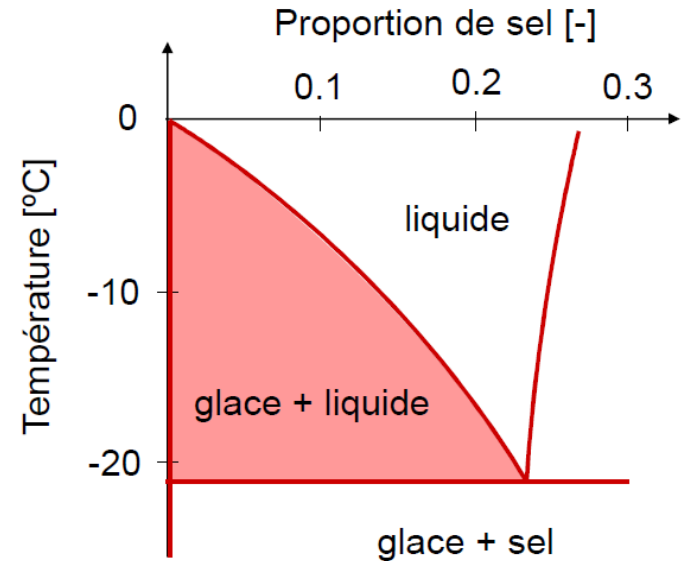


## Deux diagrammes de phases (ddp) binaires

Le ddp donne la ou les phases en présence à l'équilibre thermodynamique en fonction de la composition  $c$  et de la température  $T$ , ceci avec  $P = 1 \text{ atm.}$

### Le diagramme binaire eau-sel

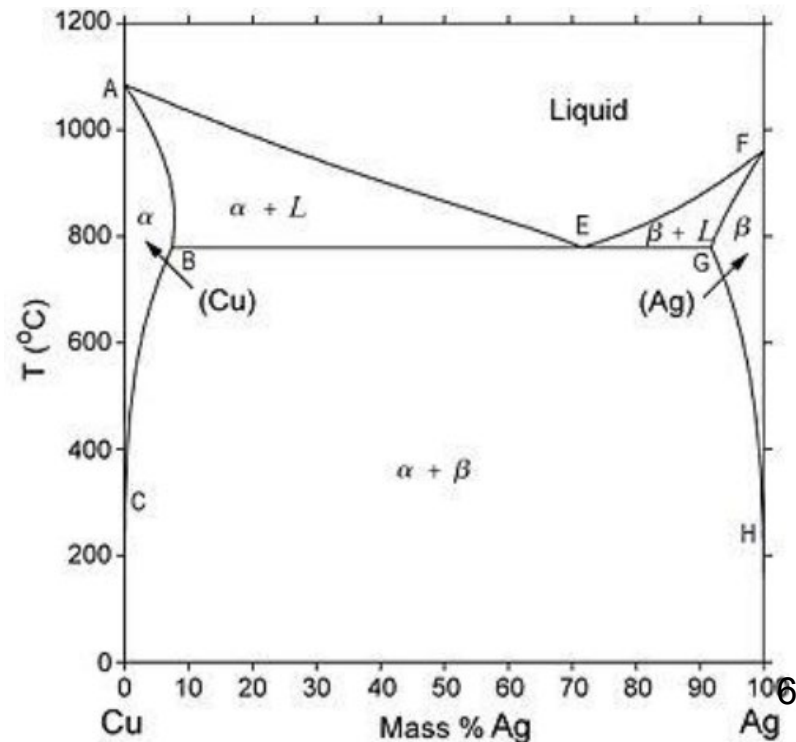
A  $-10^\circ\text{C}$ , la glace sans sel (solubilité nulle du sel dans la glace) devient un mélange glace + liquide ou même du liquide seul si on ajoute du sel (névasse).



### Le diagramme binaire Cu-Ag présente :

- 3 domaines monophasés: liquide, (Cu) ou  $\alpha$  et (Ag) ou  $\beta$ .
- 3 domaines biphasés:  $\alpha + L$ ,  $\beta + L$  et  $\alpha + \beta$ .

NB: (Cu) =  $\alpha$ -Cu =  $\alpha$  = solution solide de Ag dans le cuivre.



## Diagrammes de phase binaire (2 éléments)

**Variables:** T, p, C **uniformes** dans chaque phase et natures des phases (solution solide, liquide, intermétallique, ...)

**Variance:** nombre de variables indépendantes et nécessaires pour décrire un système thermodynamique (degré de liberté).

**Règle de Gibbs:**  $v = 3 - \phi$  pour un binaire sous 1 atm,  $\phi$  = nbre de phases.

La variance est tjrs positive donc 3 possibilités pour  $\phi$  :

$\phi = 1$ ,  $v = 2$ , T et C varient indépendamment, **domaine monophasé**, sans que la nature de la phase ne change.

$\phi = 2$ ,  $v = 1$ , T et C sont liés, **lignes uni-variantes** ( $T = T(C)$ ) dans le diagramme telles que liquidus, solidus, solvus.

Entre ces lignes, **domaines « interdits » qui sont biphasés** (2 phases coexistent). Les compositions de ces 2 phases sont données par les lignes isothermes appelées **conodes**.

## Diagrammes de phase binaire (2 éléments)

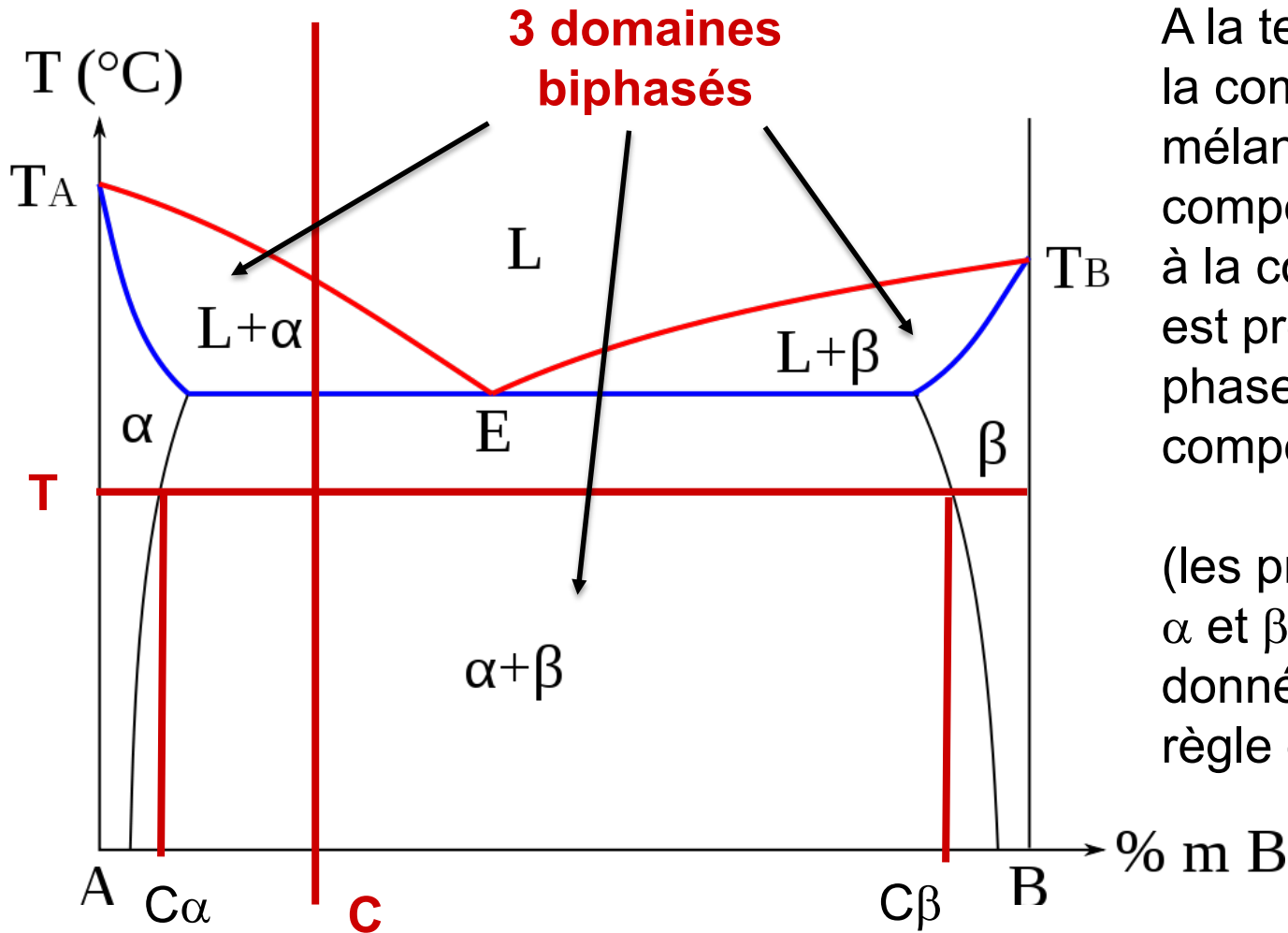
$\phi = 3$ ,  $v = 0$ , point triple (ex. point eutectique), T et C sont fixés (invariant).

Autour d'un point triple, une phase doit disparaître qd T diminue, d'où 4 transformations (réactions) pour un binaire:

TABLE II-2 – Typologie et terminologie des points triples.

| Nom du point triple   | Réaction lors du refroidissement        | Apparence <i>schématique</i> sur un diagramme de phase |
|-----------------------|---|--|
| <b>Eutectique :</b>   | $L \longrightarrow \alpha + \beta$      |  |
| <b>Eutectoïde :</b>   | $\alpha \longrightarrow \beta + \gamma$ |  |
| <b>Péritectique :</b> | $L + \alpha \longrightarrow \beta$      |  |
| <b>Péritectoïde :</b> | $\alpha + \beta \longrightarrow \gamma$ |  |

Dans un **domaine biphasé**, le ddp donne la nature et la composition des deux phases en présence.



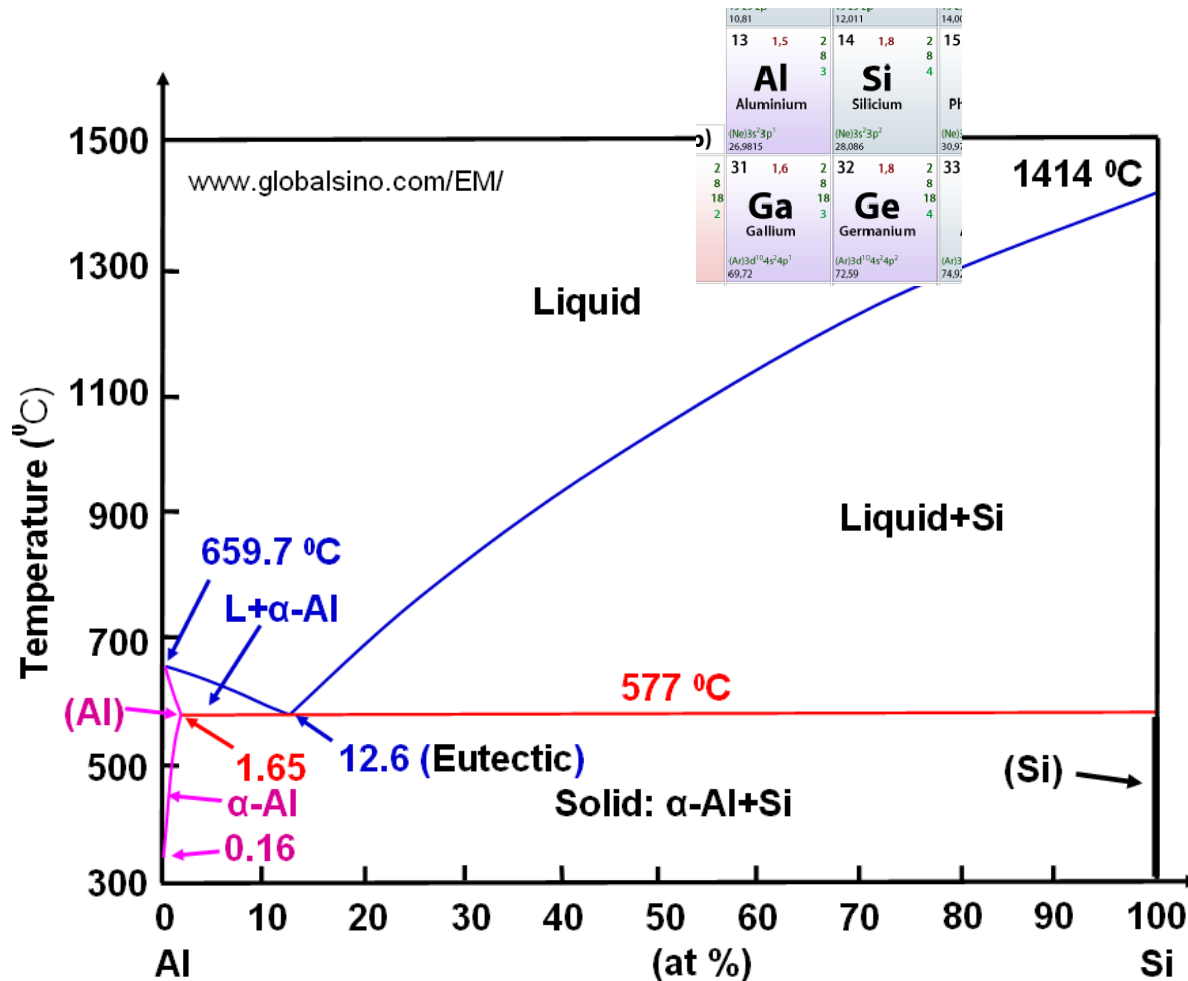
A la temp.  $T$  et pour la composition  $C$ , un mélange de  $\alpha$  à la composition  $C_{\alpha}$  et  $\beta$  à la composition  $C_{\beta}$  est présent. Aucune phase n'est à la composition  $C$  !

(les proportions de  $\alpha$  et  $\beta$  seront données par la règle des leviers).

NB: la solubilité de B dans A croît puis décroît avec la température



# Diagramme de phase eutectique : exemple Al-Si sous 1 atm.



La ligne bleue en dessous du domaine liquide s'appelle **le liquidus**.

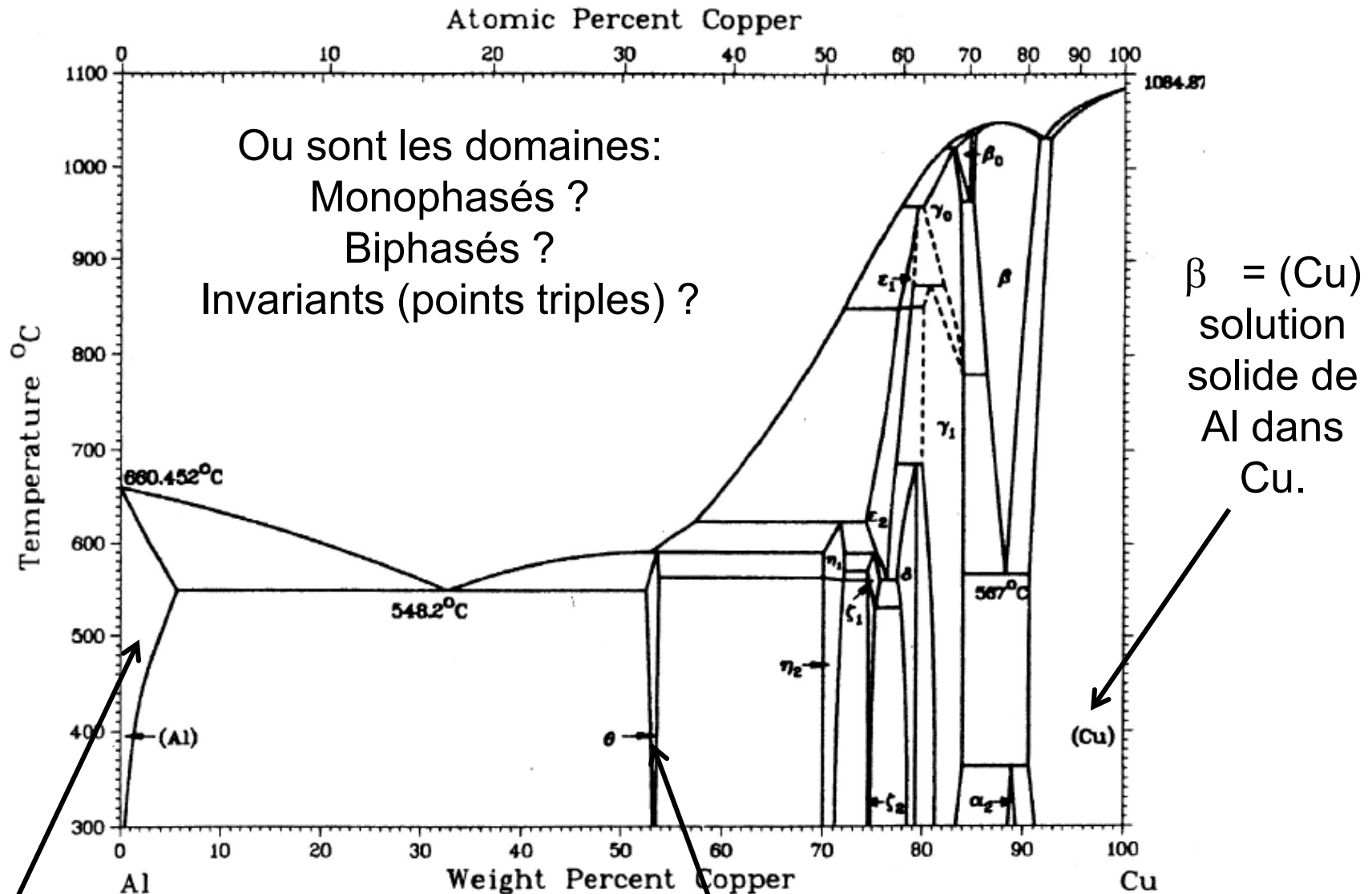
La ligne qui sépare un domaine solide avec un domaine biphasé où le liquide est présent s'appelle **le solidus**.

La ligne entre des domaines solides mono- et biphasés s'appelle **le solvus**.

La ligne rouge eutectique est un invariant.

NB: La solubilité de Al dans Si est nulle. La solubilité de Si dans Al vaut 1.65 %at.

# Un exemple: le diagramme de phase binaire Al-Cu



## Un exemple: le diagramme de phase binaire Al-Cu

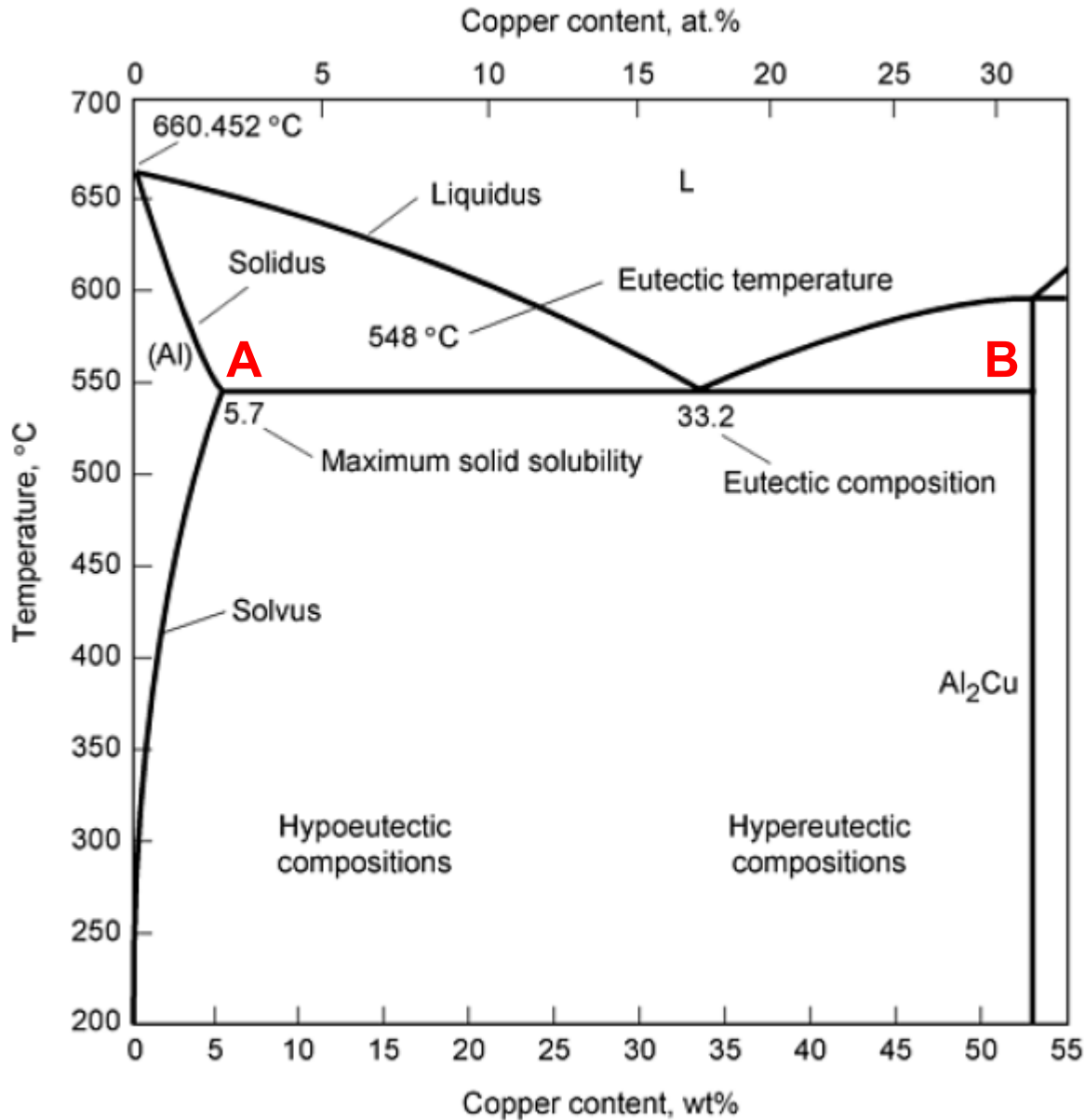
13 phases intermétalliques non stœchiométriques  
En général, ces phases sont évitées car elles sont fragiles.

| Phase           | Composition<br>[%pds Cu] |
|-----------------|--------------------------|
| (Al)            | 0 à 5.65                 |
| $\theta$        | 52.5 à 53.7              |
| $\eta_1$        | 70.0 à 72.2              |
| $\eta_2$        | 70.0 à 72.1              |
| $\zeta_1$       | 74.4 à 77.8              |
| $\zeta_2$       | 74.4 à 75.2              |
| $\varepsilon_1$ | 77.5 à 79.4              |
| $\varepsilon_2$ | 72.2 à 78.7              |

| Phase      | Composition<br>[%pds Cu] |
|------------|--------------------------|
| (suite)    |                          |
| $\delta$   | 77.4 à 78.3              |
| $\gamma_0$ | 77.8 à 84                |
| $\gamma_1$ | 79.7 à 84                |
| $\beta_0$  | 83.1 à 84.7              |
| $\beta$    | 85.0 à 91.5              |
| $\alpha_2$ | 88.5 à 89                |
| (Cu)       | 90.6 à 100               |

## Diagramme de phase eutectique entre (Al) et Al<sub>2</sub>Cu

Al et Cu ont peu d'affinité et se séparent en deux phases (Al) et  $\theta = \text{Al}_2\text{Cu}$

[illegible]

Eutectique: 548°C  
33.2 % pds Cu

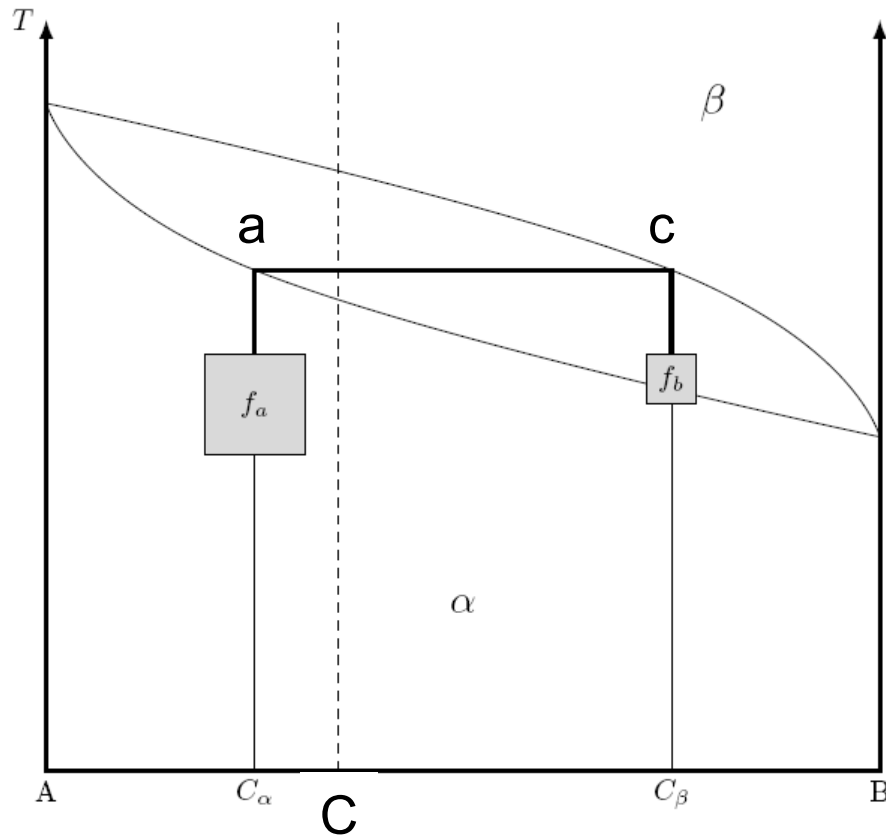
Entre A et B, la réaction  
 $L \rightarrow \alpha + \beta$  a lieu quand  
 T diminue.

NB:  $\theta$  est supposé stoechiométrique ici et correspond à  $\text{Al}_2\text{Cu}_{14}$

## Diagramme de phase : règle des leviers

Dans un domaine biphasé, la proportion de phase est donnée par la **règle des leviers** ou **règle des segments inverses**.

La composition des 2 phases  $\alpha$  et  $\beta$  présentes à la température  $T$  est donnée par la **conode ac à T** et découle de la conservation globale du soluté.



$$f_\alpha + f_\beta = 1$$

$$C = f_\alpha C_\alpha + f_\beta C_\beta$$

$$f_\alpha = \frac{C_\beta - C}{C_\beta - C_\alpha}$$

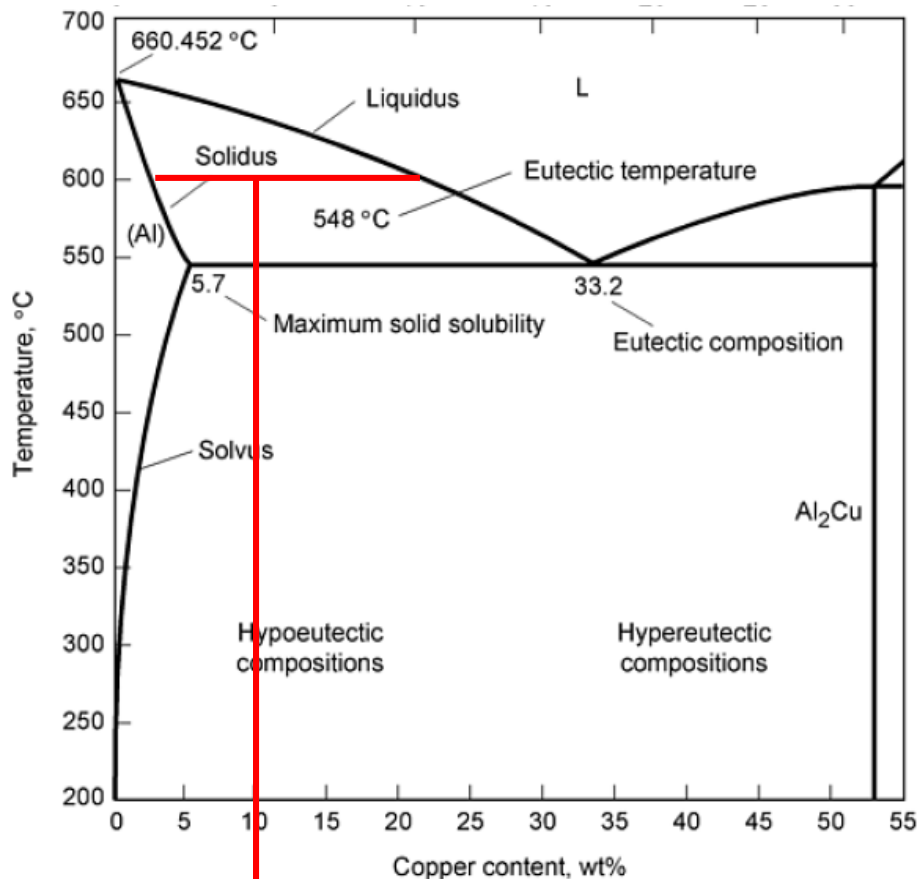
$$f_\beta = \frac{C - C_\alpha}{C_\beta - C_\alpha}$$

**La règle des leviers** (lever rule) est valable à l'équilibre thermodynamique (temps suffisant). Les fractions sont en % pds ou en % molaire/atomique selon l'unité des concentrations  $C$ .

## Diagramme de phase : règle des leviers

Exemples sur le ddp Al-Cu

À **C = 10%pds Cu et 600°C**, une phase solide  $\alpha$  = (Al) à 2.5%pds Cu coexiste avec une phase liquide à 22%pds Cu.



**C = 10 %**

$$f_{\alpha} = (22-10)/(22-2.5)$$
$$f_{\alpha} = 61.5 \text{ \%pds}$$

$$f_{\text{liq}} = (10-2.5)/(22-2.5)$$
$$= 38.5 \text{ \%pds}$$

(NB  $f_{\text{liq}} = 1 - f_{\alpha}$ )

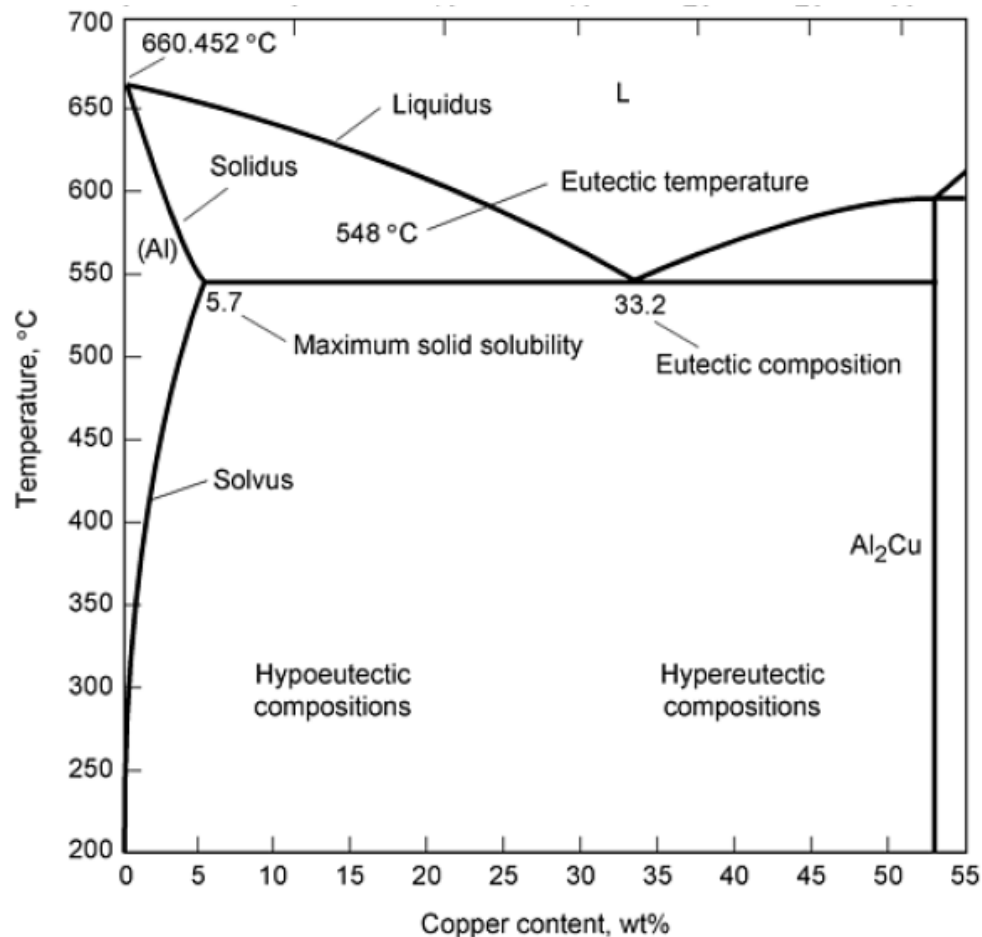
Le ddp ne dit rien sur la taille des cristaux et l'arrangement géométrique de ces 2 phases, i.e. sur la microstructure.

## Diagramme de phase : règle des leviers

**Exo 5a :** donner les natures et proportions des phases ainsi que leurs compositions à l'équilibre thermodynamique aux 2 points:

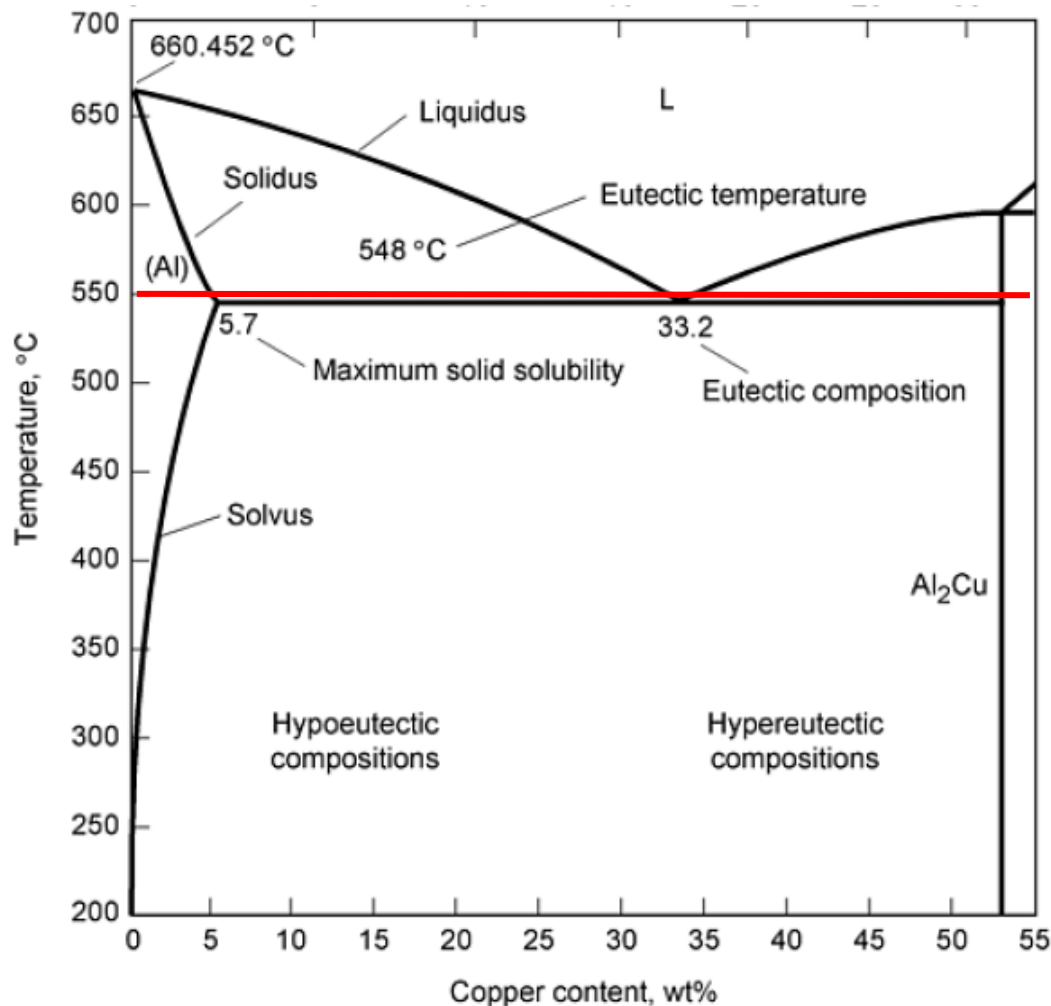
C = 20%pds Cu et 550°C

et C = 45%pds Cu et 300°C.



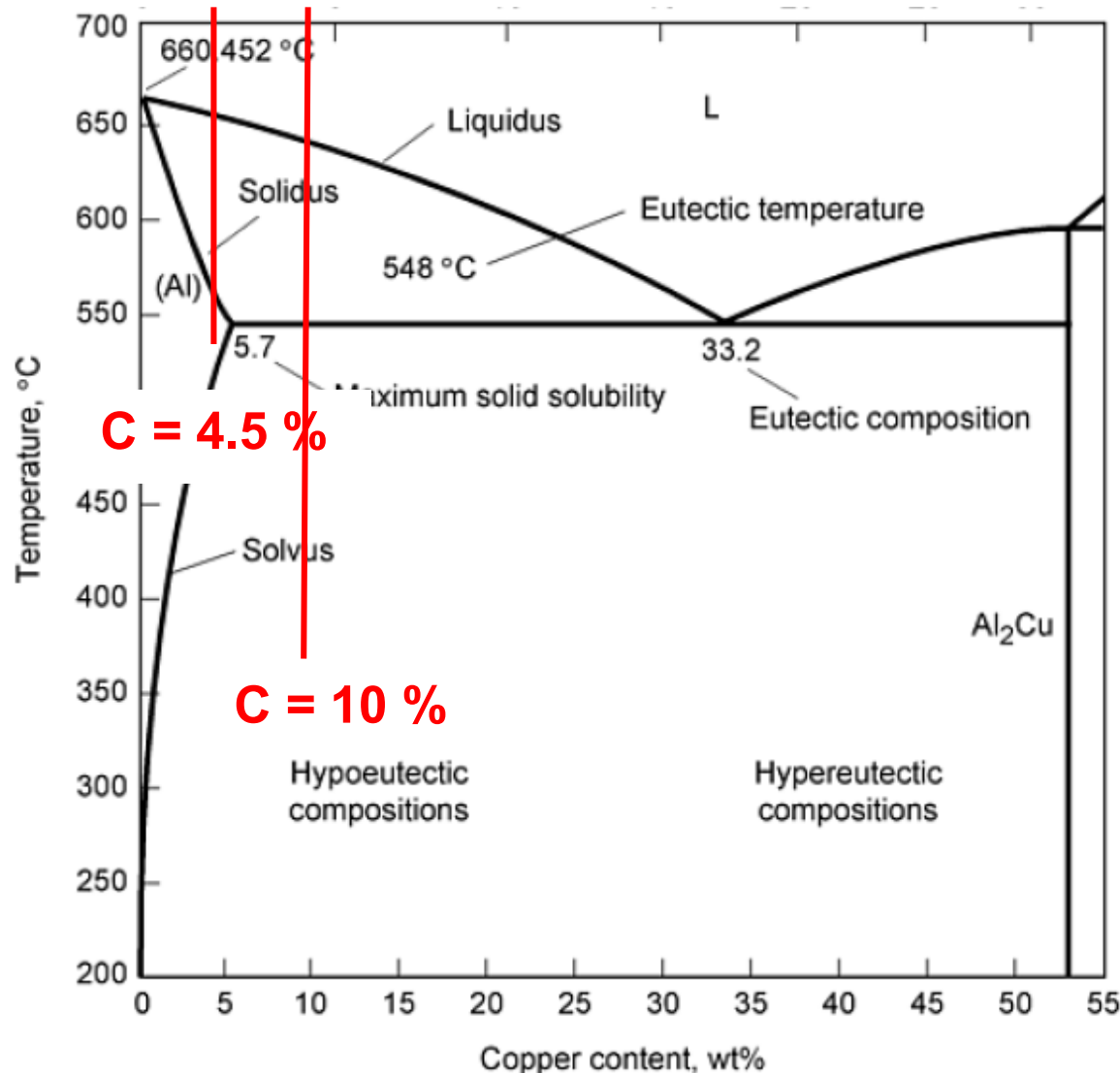
## Exo: alliage Al-Cu de composition(s) inconnue(s)

**Exo 5b:** à  $T = 548^{\circ}\text{C} + \varepsilon$  (juste au dessus de la température eutectique), un alliage Al-Cu est biphasé avec 25% de solide et 75% de liquide. Quelles sont les concentrations possibles en Cu de cet alliage et la nature de la phase solide ?





**Solidification d'un alliage Al-Cu de composition hypoeutectique i.e.  
 $C < C_{eut} = 33.2 \text{ wt pct.}$**



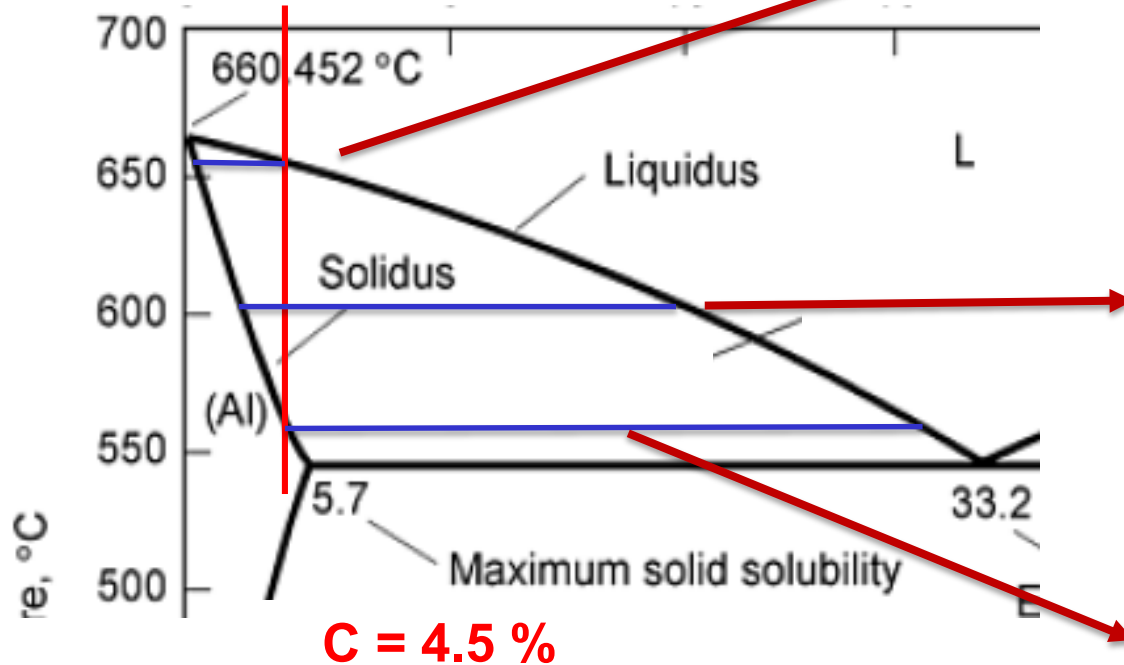
On doit distinguer :  
 $C < 5.7 \text{ \%pds}$   
et  $C > 5.7 \text{ \%pds}$  qui mènera  
à la formation d'eutectique,  
i.e. de structure  $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ .

Prenons les deux cas  
 $C = 4.5 \text{ \%}$  et  $C = 10 \text{ \% pds}$   
Cu.

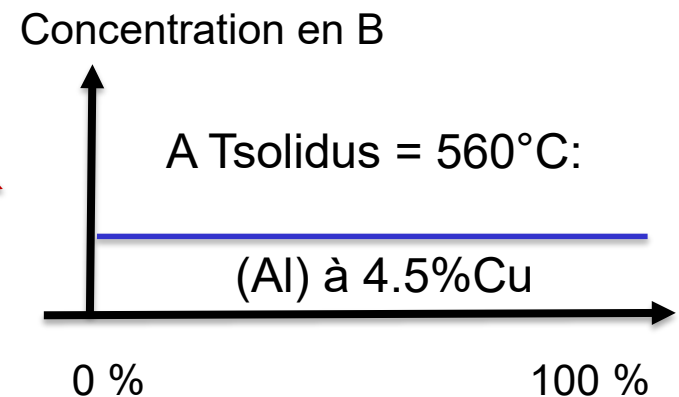
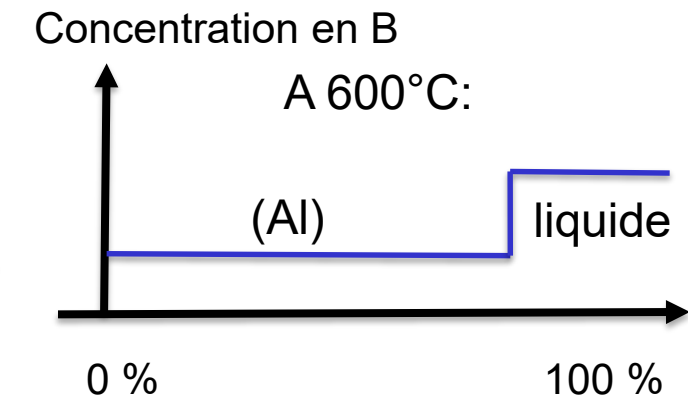
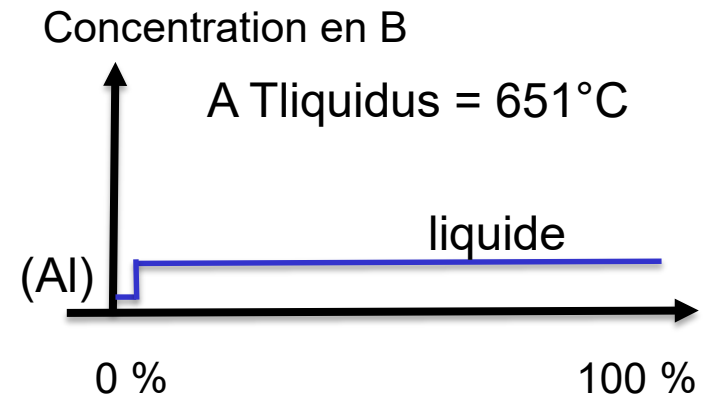
# Solidification d'un alliage Al-Cu de composition 4.5 % Cu

A 4.5% pds Cu, la solidification commence à  $T_{liq} = 651^\circ\text{C}$  avec l'entrée dans le domaine biphasé  $L + \alpha$

Elle se poursuit avec la croissance de la fraction de  $(Al) = \alpha$  et la disparition progressive du liquide.



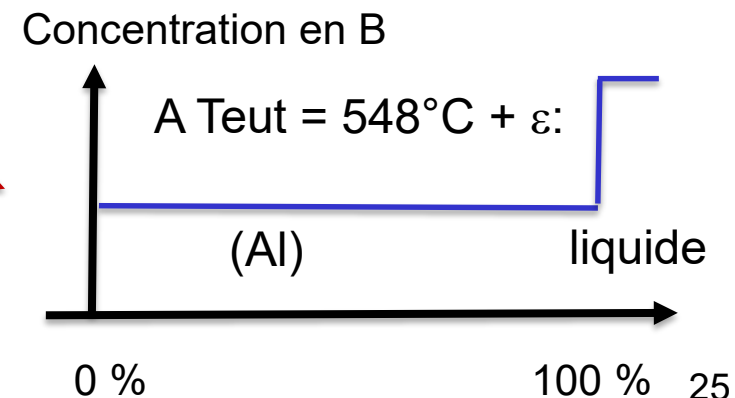
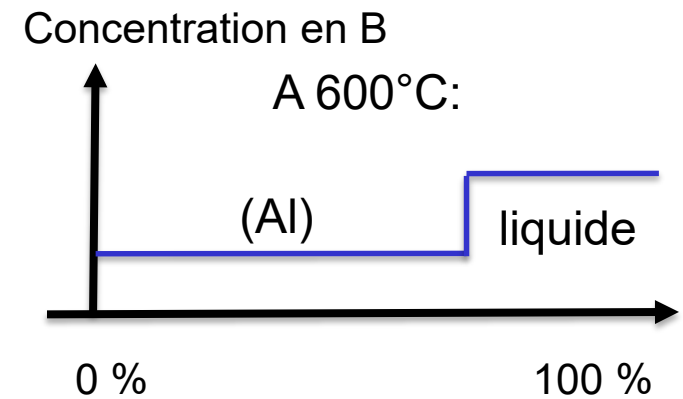
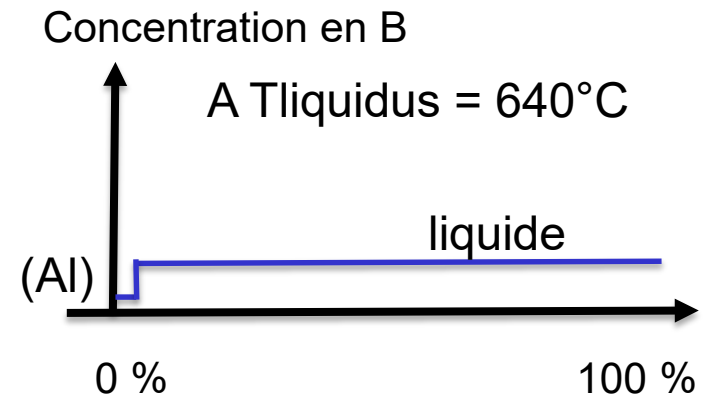
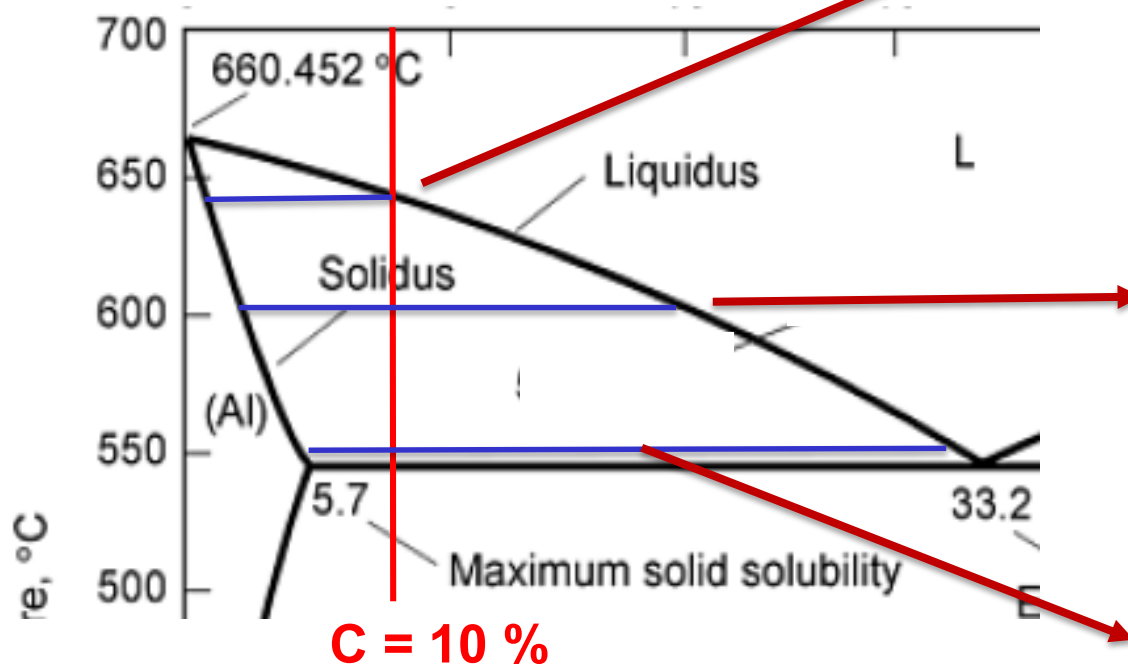
Elle se termine à  $T_{sol} = 560^\circ\text{C}$  puisque tout le liquide s'est transformé en solide  $\alpha$ .



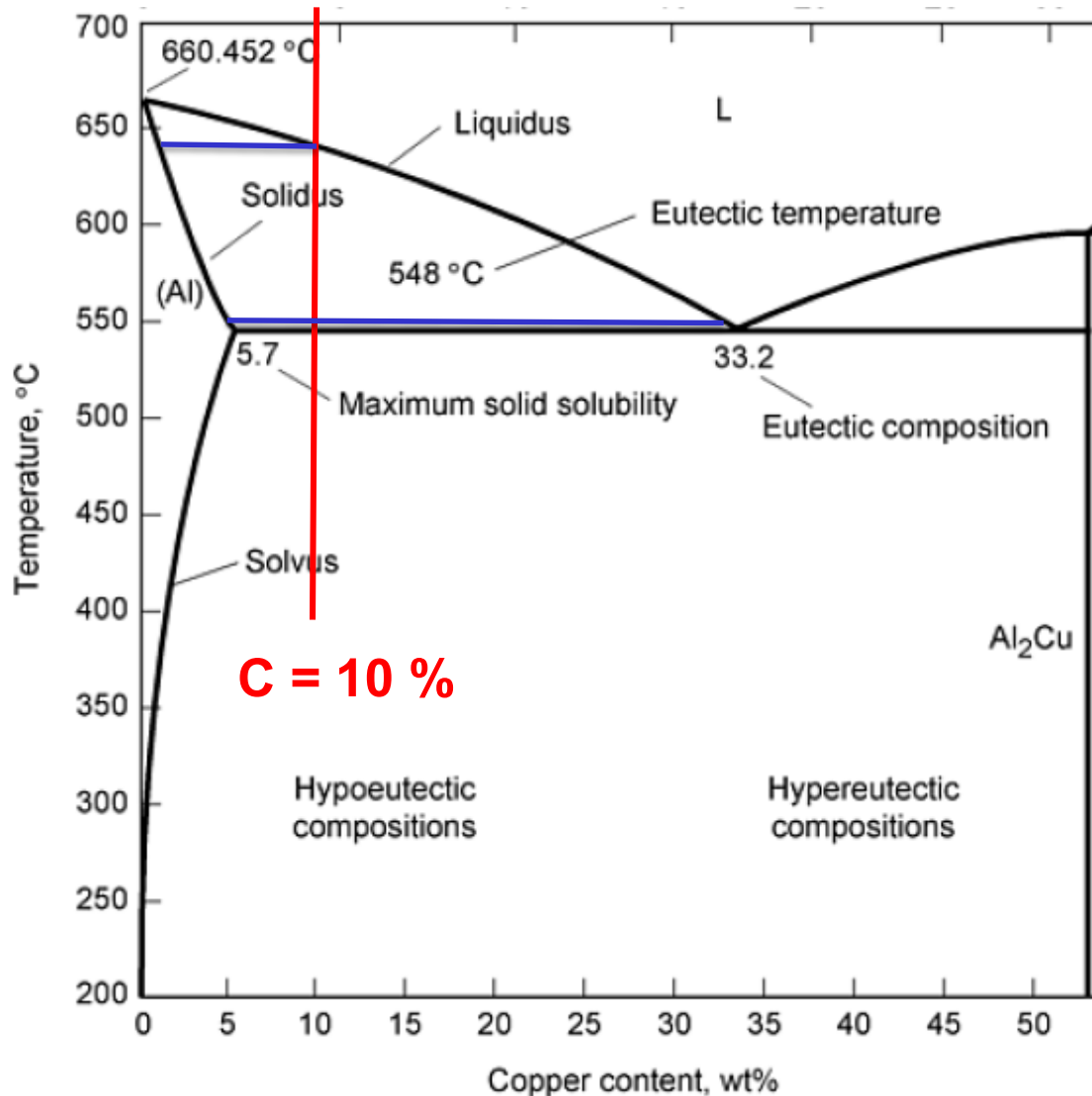
# Solidification d'un alliage Al-Cu de composition 10 % Cu

A 10% pds Cu, la solidification commence à  $T_{liq} = 640^\circ\text{C}$  avec l'entrée dans le domaine biphasé  $L + \alpha$

Elle se poursuit avec la croissance de la fraction de  $(Al) = \alpha$  et la disparition progressive du liquide.



# Solidification d'un alliage Al-Cu de composition 10 % Cu: Formation d'eutectique



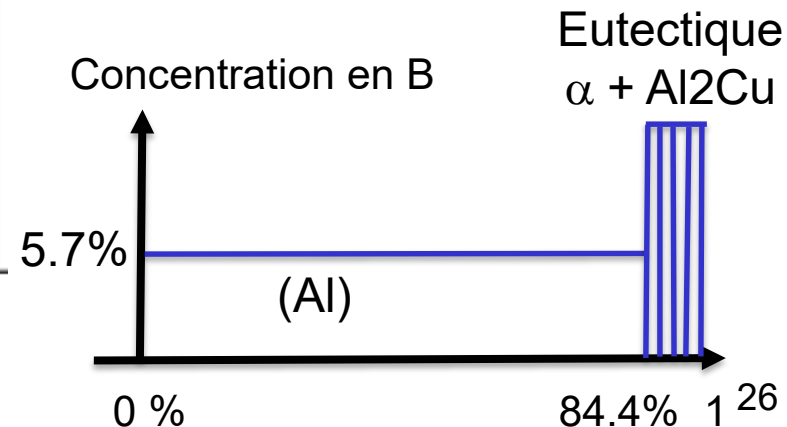
A Teut (548°C) +  $\varepsilon$ , le solide (Al) coexiste avec du liq. à Ceut = 33.2 % et à fraction

$$f_{\text{liq}} = \frac{(10 - 5.7)}{(33.2 - 5.7)}$$

**fliq = 15.6 % (= 1 - f $\alpha$ ) = feut**

La solidification se termine à Teut par la **transformation de ce liquide eutectique en eutectique  $\alpha + \beta$** .  
La réaction donne 15.6% d'eutectique.

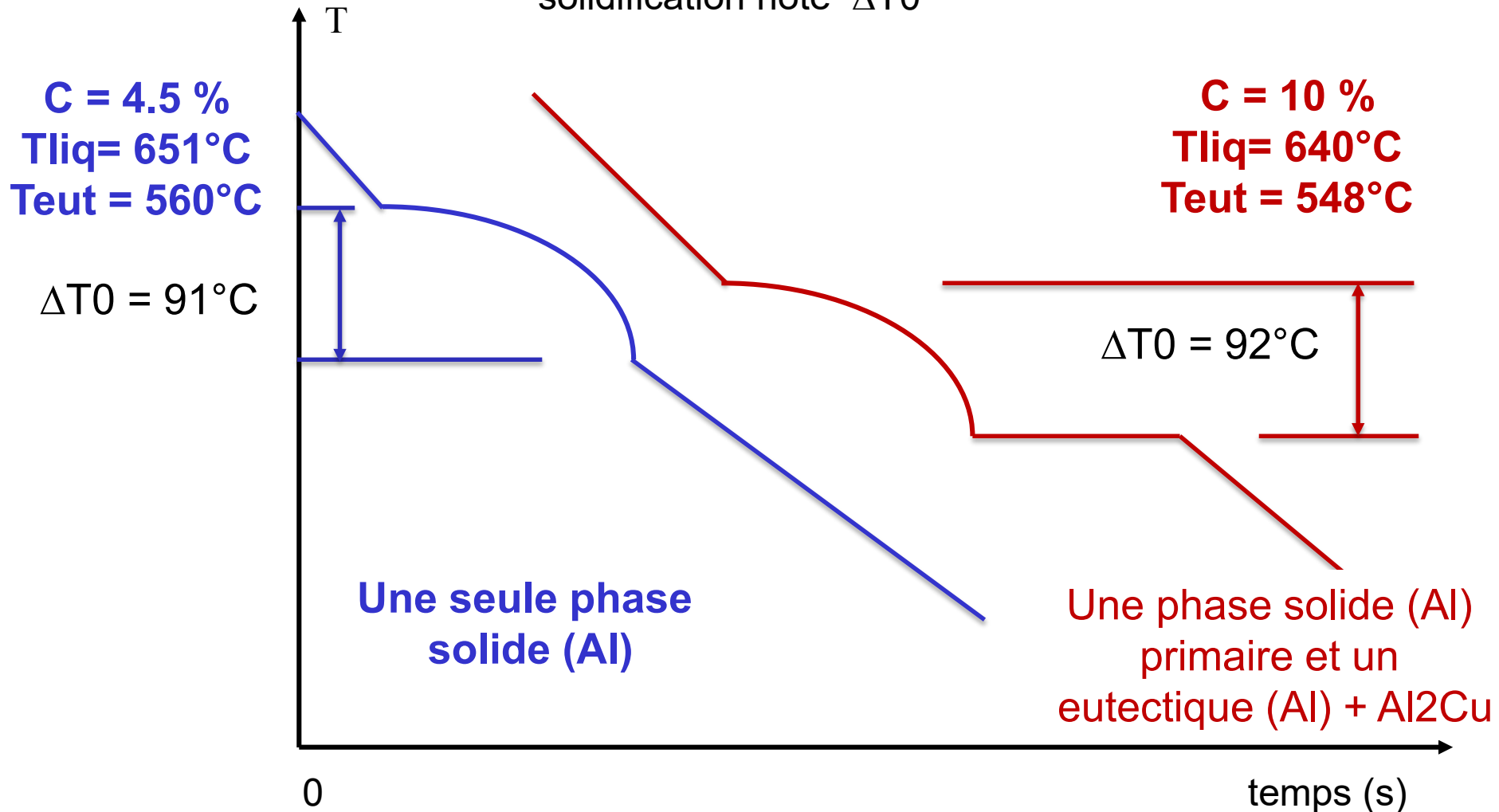
Intervalle de solidification:  
 $\Delta T_0 = 640 - 548 = 92^\circ\text{C}$



# Solidification de deux alliages Al-Cu : analyse thermique

**la solidification est exothermique: rejet de chaleur latente**

Un thermocouple est positionné dans un creuset dans lequel est fondu l'alliage puis on coupe le four. Chaque alliage se solidifie sur un intervalle de solidification noté  $\Delta T_0$

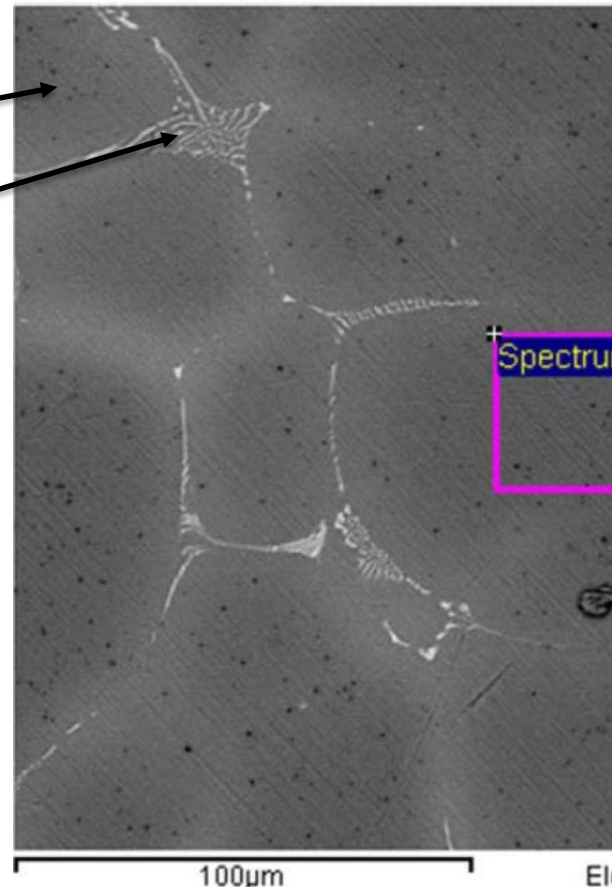


## Solidification de deux alliages Al-Cu : microstructure de AlCu10%

Enrobage, polissage, attaque chimique puis observation au microscope.

In fine, la structure de AlCu10% est faite:

- de grains primaires  $\alpha$
- entourés d'eutectique lamellaire  $\alpha + \theta$ .



**C = 10 %**  
**T<sub>liq</sub> = 640°C**  
**T<sub>eut</sub> = 548°C**

NB: aucune lamelle d'eutectique n'apparaît dans l'alliage à 4.5% Cu.....

# Les métaux pour le GC

Lundi 12 Mai 2025

## **Le diagramme Fe-C et les aciers**

**La solidification des aciers**

**La transformation perlitique**

**Le durcissement composite**