

# **Examen Bachelor « Transformation de phases »**

**21 juin 2021**

Enseignant : Dr Cyril Cayron

Assistant : Nicolò Della Ventura

Durée : 3 heures 08h15 – 11h15      Salle : CM1106

Matériel autorisé : calculatrice, règle, équerre, et toutes vos notes, copies ou photocopies

Consignes : Répondre sur feuilles libres en marquant votre nom et n° Sciper en haut de toutes les pages et en les numérotant. Les réponses peuvent être données en français ou en anglais. Indiquer le nombre de pages totales à la fin. Les feuilles d'énoncées doivent être rendues en même temps que les feuilles de réponses.

Barème : il est sur 7, c'est à dire avec 1 point supplémentaire pour tenir compte de la longueur et de la difficulté de l'examen.

Partie 1 (cours): 2 points (0.5 par question)

Partie 2 (thermodynamique): 3 points (0.75, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.25)

Partie 3 (cristallographie) : 2 points (0.1, 0.2, 0.5, 0.5, 0.5, 0.2)

---

Quelques rappels qui pourront (ou non) être utiles :

1 atm = 101325 Pa,   1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>,   1 J = 1 N.m, 0K = -273°C

Constante de Boltzmann k<sub>B</sub> = 1,381 × 10<sup>-23</sup> m<sup>2</sup> kg s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>

Constante des gaz parfaits R = 8,314 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Nombre d'Avogadro N<sub>A</sub> = 6,022 10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup>

wt.% = pourcentage massique

---

## ***Partie 1: Questions sur le cours***

Les questions sont indépendantes les unes des autres.

1. Comment varie la température de fusion de particules d'or en fonction de leur taille ?  
Donner des raisons physiques à l'origine de cette variation. Est-ce que cette variation est générale pour tous les solides ?
2. Quel est le rôle d'un agent inoculant pour la solidification ? Sur quel principe physique repose-t-il ?
3. Expliquer la surfusion constitutionnelle et discuter les paramètres qui l'influencent.
4. Expliquer comment faire un bilan de soluté en régime permanent pour une solidification en croissance en front plan d'un alliage binaire avec un coefficient de partage  $k < 1$  dans l'hypothèse qu'il n'y a pas de diffusion dans le solide. Retrouver l'équation donnant la concentration du soluté dans le liquide à l'interface du front de solidification. Séparer deux cas de diffusion dans le liquide a) infinie et b) finie.

## ***Partie 2: Thermodynamique***

Note: toutes la valeurs données (sur les figures ou dans les énoncés) ne sont pas nécessairement utiles pour trouver la solution.

### Exercice 2.1

- a) Tracer à la règle le diagramme de phases composition-température du système étain-plomb (Sn-Pb) en utilisant les courbes d'énergie de libre de Gibbs données en figure 1 (page suivante).
- b) Les structures des deux phases solides sont : cubique face centrée (FCC) et tétragonale centrée (BCT). Les éléments Sn et Pb ne peuvent se démixer que dans la phase BCT. A quelle structure correspond la phase riche en Sn, et celle riche en Pb ?
- c) Quelle est la limite de solubilité du Pb dans Sn ? Quelle est la limite de solubilité de Sn dans Pb ?
- d) Comment nomme-t-on la température de 456K ?
- e) Déterminer les pentes des solidus et liquidus pour les deux phases.

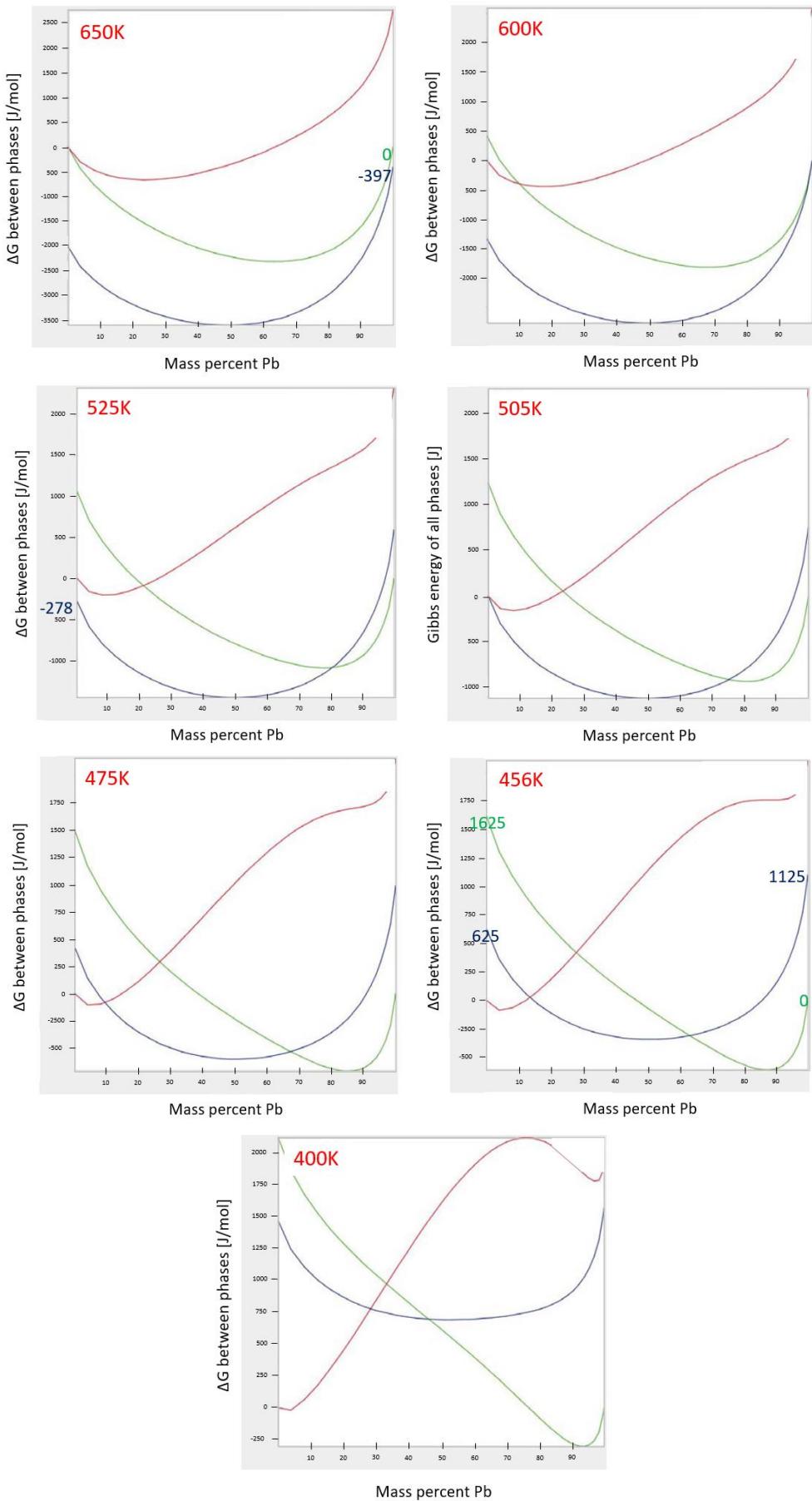


Fig. 1

### Exercice 2.2

Déterminer pour l'étain et pour le plomb la variation d'entropie molaire de fusion,  $\Delta S_{m,Sn}^{s \rightarrow liq}$  et  $\Delta S_{m,Pb}^{s \rightarrow liq}$ , ainsi que les chaleurs latentes de fusion,  $L_{m,Sn}$  et  $L_{m,Pb}$ , en utilisant la Figure 1.

Aide: Pour un système pur à une température  $T \approx T_{fusion}$ , exprimer la variation d'énergie libre de Gibbs entre l'état solide et liquide en fonction de  $\Delta T$  l'écart entre température de fusion et la température  $T$ .

### Exercice 2.3

Donner en % pour l'étain et pour le plomb le changement de volume molaire entre la phase solide et liquide,  $\frac{\Delta V_{m,Sn}^{s \rightarrow liq}}{V_{m,Sn}^s}$  et  $\frac{\Delta V_{m,Pb}^{s \rightarrow liq}}{V_{m,Pb}^s}$  en négligeant la dilatation thermique des phases solides et en sachant que:

- La masse molaire de Sn est de 118.71 g/mol et celle de Pb est 207.2 g/mol.
- Le paramètre de maille du plomb est  $a_{Pb} = 0.495$  nm.
- Le volume molaire de l'étain est  $V_{m,Sn} = 16.55 \frac{cm^3}{mol}$ .
- La température de fusion du plomb Pb varie avec la pression selon  $\left(\frac{dT}{dp}\right)_{eq} = 1.42 * 10^{-7} \frac{m^3 K}{J}$ .
- Le volume massique de l'étain liquide suit la loi donnée en Fig. 2.

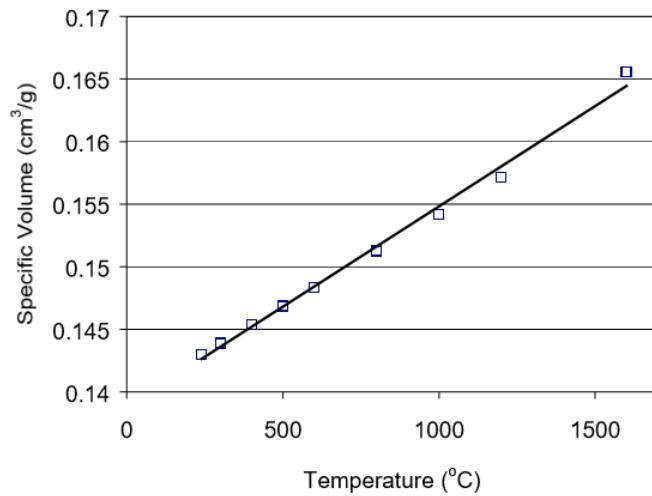


Fig. 2 (Note: l'axe des abscisses est en °Celsius !)

### Exercice 2.4

- a) Supposons que les précipités de Pb cristallisent depuis la phase liquide par formation de germes (*nuclei*) et ont une forme de cube de taille L avec une tension de surface de  $\gamma_{Pb} = 4499.39 \left[ \frac{\mu N}{m} \right]$ . Quelle est l'énergie de Gibbs totale de ces précipités en fonction de la taille L ?
- b) Sachant que la taille critique de formation spontanée des germes est  $L^* = 2 \text{ nm}$ , calculer la surfusion  $\Delta T_n$  associée au début de la précipitation du plomb.
- c) Considérons maintenant un alliage Sn-60 wt.% Pb et supposons que la surfusion est la même que celle trouvée en b). Quelle(s) phase(s) constituent le système at 500 K et à 470 K?

### Exercice 2.5

Considérons encore un alliage Sn-60 wt.% Pb. Celui-ci est placé dans un four Bridgman et solidifie à une vitesse de  $0.5 \mu\text{m}/\text{s}$ . Nous supposons qu'il n'y a pas de diffusion dans la phase solide et que la diffusion du Pb dans la phase liquide est donnée par le coefficient de diffusion  $D_{\text{Pb}} = 2.74 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

- a) Est-il possible d'atteindre le régime stationnaire en ne formant que la phase solide riche en Pb ?
- b) Quelle est l'épaisseur de la couche de diffusion juste avant d'atteindre  $T = 456\text{K}$ ?

### Exercice 2.6

Considérons maintenant un alliage Sn-38.1 wt.% Pb entièrement solidifié. Comme nomme-t-on la microstructure? Quelle est sa morphologie: régulière ou irrégulière, en lamelles ou fibrée ?

### Partie 3: Cristallographie

Considérons le problème 2D de maclage par déformation dans lequel un réseau carré bleu (noté  $\gamma$ ) est transformé par cisaillement simple en un réseau carré de même taille rouge (noté  $\alpha$ ) comme indiqué par les flèches vertes sur la figure 3. Les deux réseaux  $\gamma$  et  $\alpha$  sont tels qu'il existe un réseau commun marqué par les points en vert.

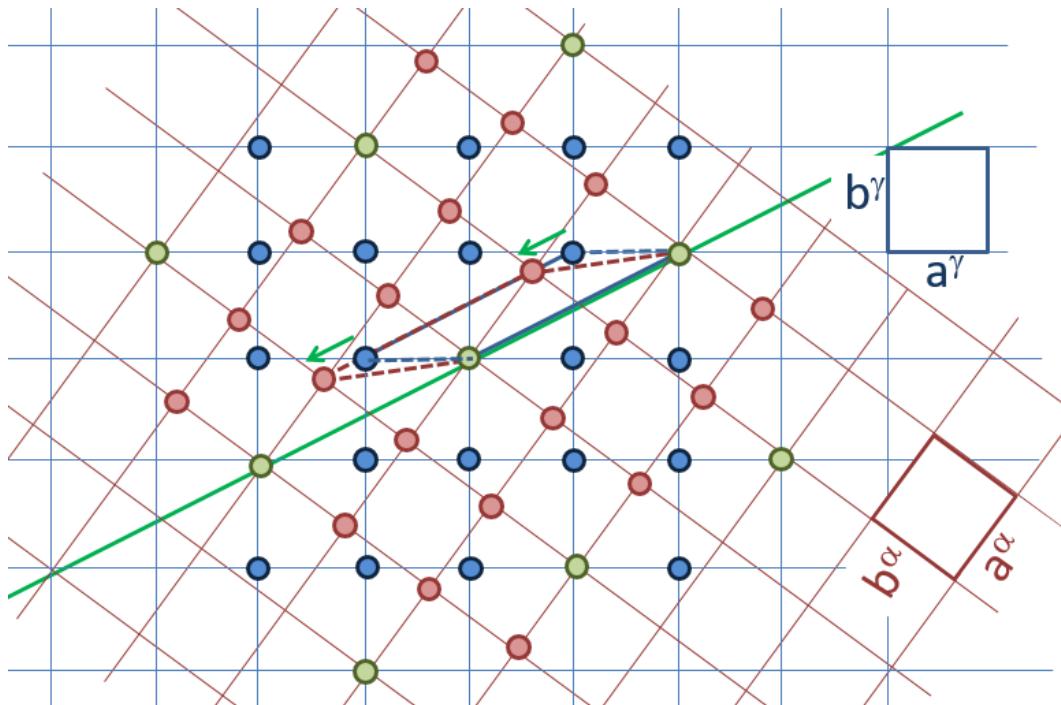


Figure 3.

1. Quel est le nombre  $\Sigma$  associé au réseau commun ?
2. Quels sont les indices de Miller  $(h,k)$  du plan de maclage marqué par le trait vert sur la figure ? Quelle est la direction du cisaillement (la norme du vecteur n'est pas importante pour cette question).
3. Exprimez la désorientation entre les réseaux  $\gamma$  et  $\alpha$ 
  - a) par la matrice de symétrie miroir par rapport au plan de maclage
  - b) par les matrices de rotation  $\gamma \rightarrow \alpha$  et  $\alpha \rightarrow \gamma$
4. Indiquer sur la figure 3 la trajectoire des atomes du réseau  $\gamma$  vers le réseau  $\alpha$  sur les deux plans  $(h,k)$  parallèles au plan de cisaillement en vert au-dessus et en dessous de ce plan. La trajectoire des atomes sur le 1er plan au-dessus sont celles déjà marquées par les flèches vertes. Quelle est la matrice de correspondance  $C^{\alpha \rightarrow \gamma}$ ?
5. Utiliser la théorie de Bevis & Crockers pour déterminer
  - a) l'amplitude de cisaillement
  - b) la matrice de cisaillement
6. Retrouvez une des deux matrices de rotation de la question 3b en utilisant uniquement les résultats obtenus aux questions 4 et 5.