

Série N° 11 — Semaine du 25 novembre 2024

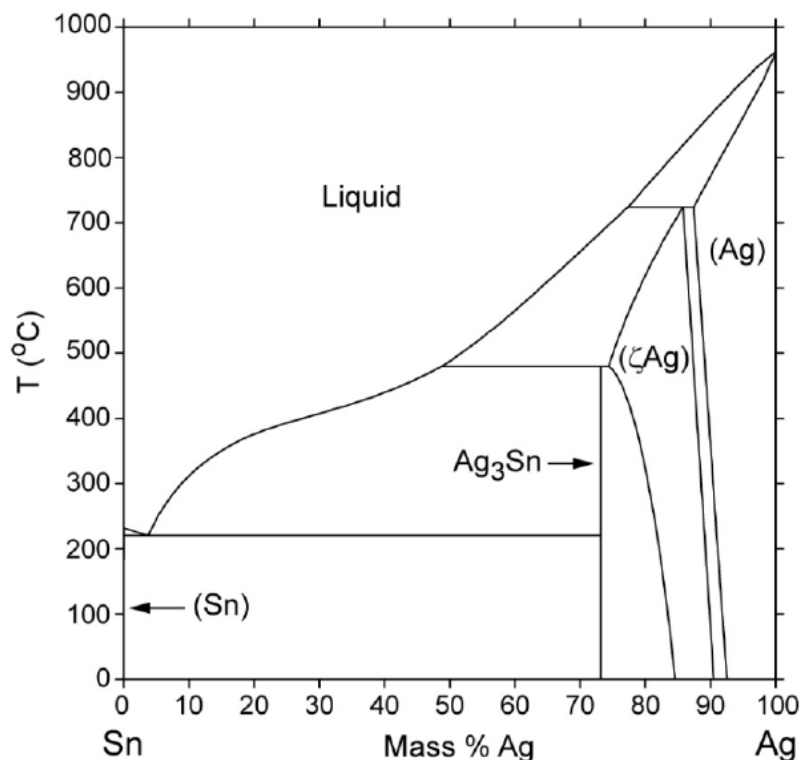
Diagrammes de phases/Diffusion

1. Vrai ou faux ?

	Vrai	Faux
a. L'invariant pour un alliage eutectique dans un système binaire est une droite à température constante (température de l'invariant) représentant un domaine où coexistent trois phases.	☐	☐
b. Pour un système binaire, la règle des leviers permet de calculer la fraction des phases à l'équilibre dans les domaines biphasés.	☐	☐
c. On reconnaît un invariant eutectoïde au fait que si on baisse la température, on passe de 2 phases solides à une phase solide.	☐	☐
d. En général, dans un cas de germination homogène, la température doit descendre suffisamment au-dessous de la température d'équilibre thermodynamique pour vaincre l'énergie de surface pour former un germe solide.	☐	☐
e. Les atomes substitutionnels diffusent en général plus rapidement que les atomes interstitiels, quand ils sont dans un gradient de composition.	☐	☐
f. Pour un temps t donné, et une profondeur x donnée dans le matériau, soumis à la diffusion d'une espèce chimique depuis la surface dans le matériau, si on calcule le nombre de Fourier et qu'il est très inférieur à 1, cela signifie que l'espèce diffusante n'est pas encore arrivée à ce point dans le matériau, à ce temps donné.	☐	☐

2. Diagramme binaire Argent-Etain

L'alliage AgSn est utilisé de plus en plus comme un substitut pour remplacer les alliages de soudure Sn-Pb qui contiennent du plomb, par exemple pour la connection des cellules solaires. Son diagramme de phase est donné ci-dessous :

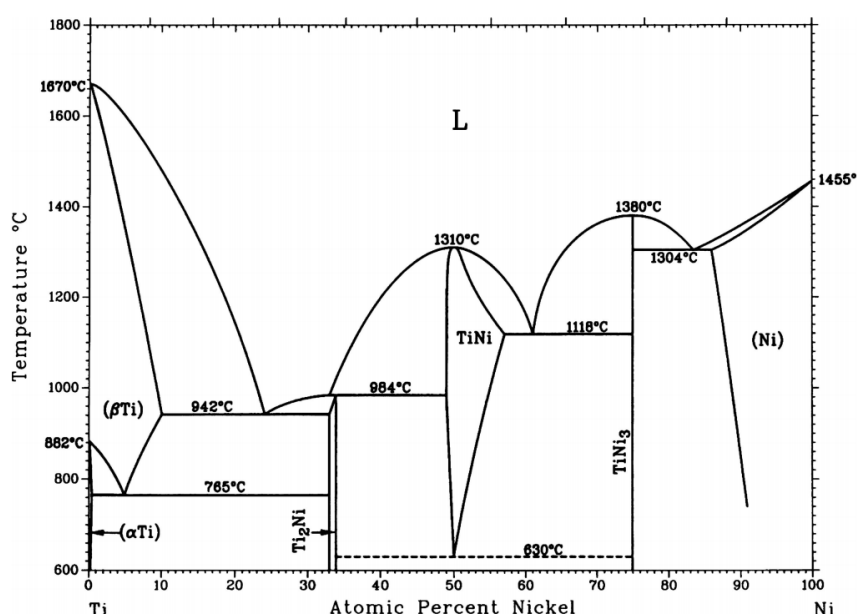


Avant de commencer de répondre aux questions, observez le diagramme. On voit qu'il y a formation de différentes phases dont une phase intermétallique de Ag_3Sn , et une phase de ζAg , repérez les sur le diagramme. Aussi, la solubilité de Ag dans Sn est très faible, et cela se voit sur le côté gauche du diagramme, alors que la solubilité de Sn dans Ag est d'environ 8% à température ambiante, comme vu sur le côté droit du diagramme. Repérez aussi les température de fusion de Sn pur et Ag pur.

- Hachurez sur le diagramme les zones biphasées $\text{Ag}-(\zeta\text{Ag})$ et Ag_3Sn -liquide.
- Indiquez la nature des trois invariants observés aux températures : $T_1 = 724^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 480^{\circ}\text{C}$, $T_3 = 221^{\circ}\text{C}$.
- Sachant que pour faire une soudure, on recherche un alliage qui solidifie à basse température (et qui contienne quand même de l'argent, pour améliorer la résistance mécanique), quelle composition d'alliage pourriez-vous recommander ?

3. Diagramme Nickel-Titane

L'alliage Nitinol (Ni-Ti pour environ 50%at. chacun) est un alliage dit à "mémoire de forme" : il a un comportement superélastique qui lui permet de se déformer très facilement et de revenir à sa forme initiale, qui lui donne des applications pour les appareils d'orthodontie, des montures de lunettes et des outils très flexibles, et il présente aussi un effet mémoire, c'est à dire qu'il reprend sa forme si on le chauffe, ce qui lui donne des applications dans les matériaux intelligents, les stents cardiovasculaires, et aussi des valves thermiques. Le diagramme de phase binaire du système Ni-Ti est le suivant, il n'est pas très simple car plusieurs phases intermétalliques se forment entre le Nickel et le Titane :



- Tout d'abord, trouvez sur ce diagramme les 7 phases présentes, et listez les.
- Quelle est la limite de solubilité du titane dans la phase (Ni) à 1200 °C ?
- Le diagramme est donné en fraction atomique. Quelle est la composition massique de la phase TiNi₃ ($M_{\text{Ti}}=47.9 \text{ g mol}^{-1}$, $M_{\text{Ni}}=58.7 \text{ g mol}^{-1}$) ?
- Identifiez les domaines biphasés du diagramme et indiquez pour chacun les phases présentes (vous pouvez les colorier directement sur le diagramme).
- Listez les 6 invariants, en indiquant la température de chaque, les phases présentes et le type d'invariant (eutectique, peritectique, eutectoïde, peritectoïde).
- On considère un alliage contenant 40%at. de nickel porté à l'état liquide puis refroidi jusqu'à 600 °C. A quelle température la première phase

solide est-elle formée et de quelle phase s'agit-il ? Quelles phases sont ensuite formées tout au long du refroidissement ?

4. **Cémentation**

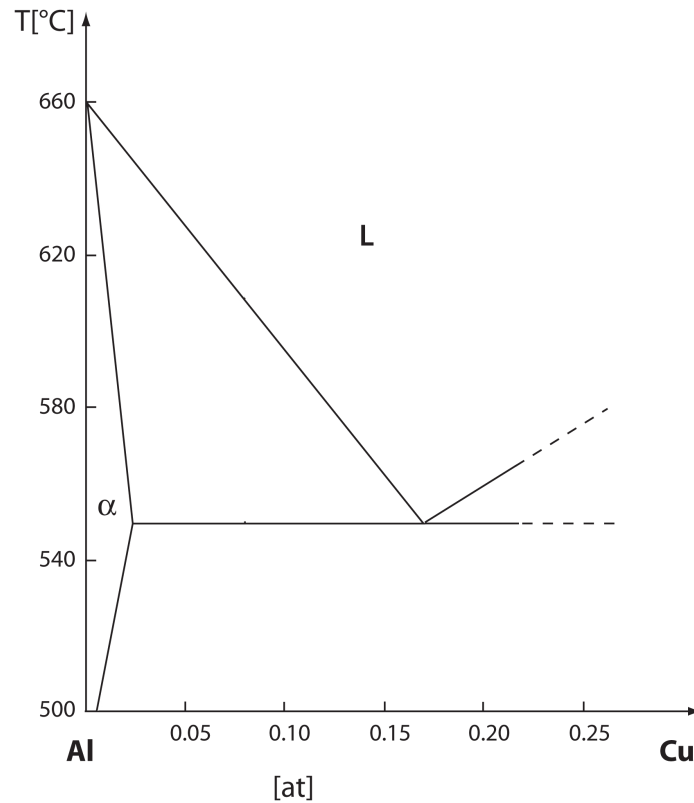
La surface d'un acier faiblement allié est durcie par la diffusion d'atomes de carbone dans les sites interstitiels du fer. Pour cela, l'acier est placé dans une atmosphère de carbone à une température de 1000 °C. La constante de diffusion du carbone dans l'acier vaut $D_0 = 8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et l'énergie d'activation vaut $Q_d = 131 \text{ kJ mol}^{-1}$.

- a. Calculez le coefficient de diffusion à 1000 °C.
- b. Combien de temps faut-il maintenir l'acier à cette température pour que le carbone diffuse jusqu'à une profondeur de 0.2 mm (pour cela, estimez le temps caractéristique de diffusion à cette profondeur là) ?

5. **Loi des leviers**

Dans le système Al-Cu, dont on montre ci-dessous un extrait du diagramme de phase, l'eutectique entre la phase α et θ se situe à $X_E = 17\%$ et $T_E = 548^\circ\text{C}$. La limite de solubilité du cuivre dans l'aluminium est à $X_\alpha = 2.5\%$ et la température de fusion de l'aluminium pur est $T_f = 660^\circ\text{C}$.

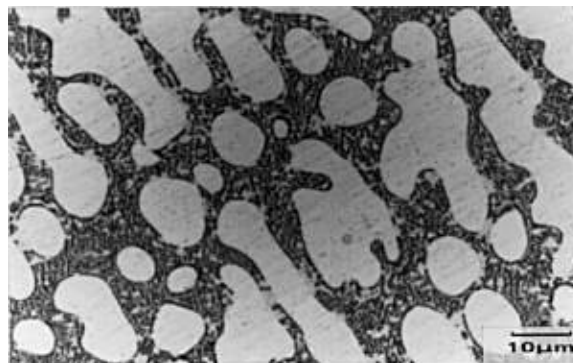
- a. Calculez la fraction de **solide** à la température de 580°C pour un alliage de composition initiale atomique de $X_0 = 10\%$
- b. Calculez la fraction de **liquide** à la température eutectique pour une composition initiale massique de l'alliage $C_0 = 8\%$.



6. **Exercice facultatif : Microstructure**

On considère le système Al-Cu, donné à l'exercice précédent.

- La micrographie ci-dessous représente une coupe d'une pièce faite en alliage Al-10at.%Cu. Identifier les phases claires et sombre à partir du diagramme de phase. Pourquoi a-t-on cette structure ?



- b. Le Duralumin, qui subit un traitement thermique pour améliorer sa résistance à rupture (comme vu en cours sur la plasticité), a une composition en cuivre comprise entre $X_{Cu} = 1\%$ et $X_{Cu} = 2.5\%$. Après solidification de la pièce coulée, on la réchauffe pendant un moment à 550°C . Que se passe-t-il alors, et pourquoi doit-on limiter la composition en cuivre à 2.5% maximum? Puis, on refroidit très rapidement la pièce en la trempant dans l'eau. Que se passe-t-il alors? Ensuite, on réchauffe la pièce à une température modérée, environ 150°C . A votre avis, à quoi ressemble la microstructure finale?

7. Solution des exercices

- a. exercice 2 *Solution : Péritectique, péritectique, eutectique; entre 3.5 et 4.5%*
- b. exercice 3 *Solution : (b) : 13 at%, (c) : 78.6% en poids,*
- c. exercice 4 *Solution : (a) : $D = 3.35 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (b) environ 20 minutes*
- d. exercice 5 *Solution : (a) : 22% atomique, (b) : 7.32% en poids*