

Série 3.

Exercice 1

On produit par coulée gravifique un objet de symétrie sphérique en aluminium. On admet que le profil de température est pratiquement constant dans le matériau en fusion et qu'ailleurs (moule+matériau solide), il ne dépend que de la distance au centre r (profil radial).

Pour estimer la vitesse d'avance du front de solidification en direction de l'extérieur, vous plongez un thermocouple dans le moule (cf. Fig. 1) :

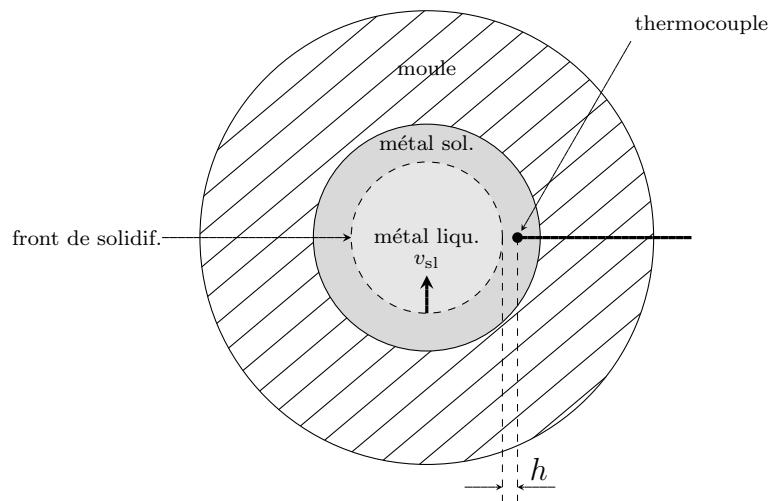


FIGURE 1 – Schéma du moule et du thermocouple

Il se positionne à une distance $h = 0.5$ mm du front et mesure une température $T_{\text{therm}} = 657^\circ\text{C}$. Vous connaissez les propriétés thermiques et mécaniques principales du matériau que vous coulez, elles sont données à la Tab. 1). Dans ces conditions, avez-vous assez d'informations pour calculer la vitesse d'avance ? Si oui évaluez sa valeur v_{sl} .

densité	conductivité thermique	chaleur latente de fusion	température de fusion
$\rho = 2.7 \text{ g/cc}$	$\lambda = 0.2 \text{ W/mm}^\circ\text{C}$	$L = 387 \text{ J/g}$	$T_f = 660^\circ\text{C}$

TABLE 1 – Propriétés essentielles de l'aluminium

Exercice 2

On produit par coulée continue des barreaux en Cuivre-Silicium de concentration nominale $c^* = 3\%$. Le rayon de ces barreaux est de $r = 10 \text{ mm}$ (cf. Fig. 1).

On équipe le dispositif de coulée d'un système de mesure pyrométrique. On observe que la température est pratiquement indépendante de la distance à l'axe du cylindre et de l'angle polaire¹ et que le front de solidification à l'équilibre est (presque) plan et qu'il se situe à la température $T_{\text{front}} = 970^\circ\text{C}$.

La Fig. 1 représente le profil de température sur un ébattement de 7 mm dans la direction de l'axe Oz du cylindre.

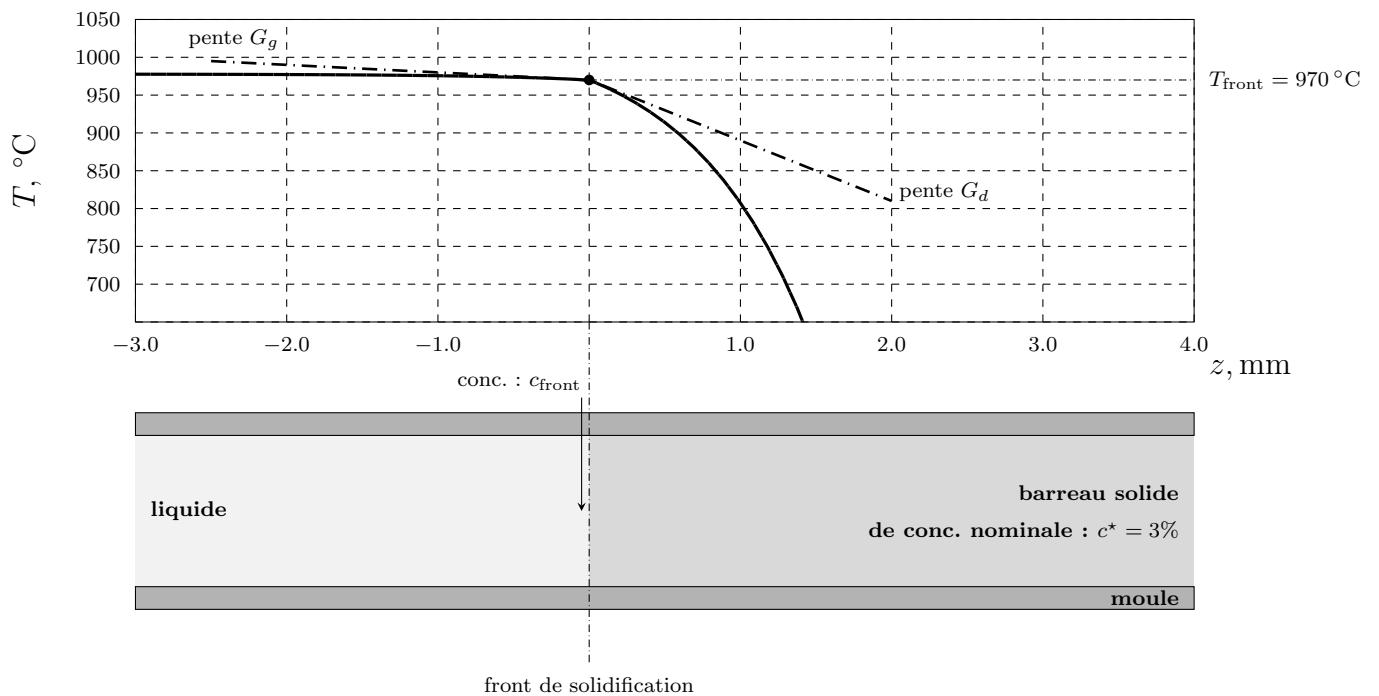


FIGURE 1 – Coulée du barreau et distribution de température

On appelle c_{front} la concentration massique de silicium dans le liquide à la gauche du front de solidification (cf. Fig. 1). On vous demande de montrer que la stabilité de front plan implique que le couple $(c_{\text{front}}, T_{\text{front}})$ se trouve sur la courbe de liquidus tandis que le couple (c^*, T_{front}) se trouve sur celle du solidus. En vous basant sur les informations de la table 1, calculez ensuite :

- la valeur de c_{front} ,
- la température à laquelle il faut amener une tonne d'alliage Cu(97% masse)-Si (3% masse) pour qu'il entre totalement en fusion et l'énergie que cette opération coûte,
- la vitesse de coulée v en m/min sachant que le gradient de température à gauche et à droite du front vaut respectivement $G_g = -10^\circ\text{C}/\text{mm}$ et $G_d = -80^\circ\text{C}/\text{mm}$. (cf. Fig. 1)

grandeur	Symbol	Valeur	Unité
temp. de fusion du Cuivre	T_f^{Cu}	1085	°C
coefficient de ségrégation	k	0.52	-
densité à $c = 3\%$	ρ	8.53	g/cm ³
chaleur spécifique à $c = 3\%$	C_p	0.377	J/g/°C
chaleur latente à $c = 3\%$	L	204.8	J/g
conductivité thermique ²	λ	0.38	W/mm/°C

TABLE 1 – Quelques propriétés thermiques de l'alliage Cu-Si

Exercice 3 (*Complément de cours*)

On considère un alliage binaire et (T, c) un point du diagramme de phase situé entre liquidus et solidus (cf. Fig. 1). Le but est de calculer la fraction liquide **hors équilibre** $f_L(T, c)$ correspondant au cas limite dans lequel :

- (i) le soluté ne peut pas diffuser dans la phase solide,
- (ii) la diffusion du soluté est instantanée dans la phase liquide.

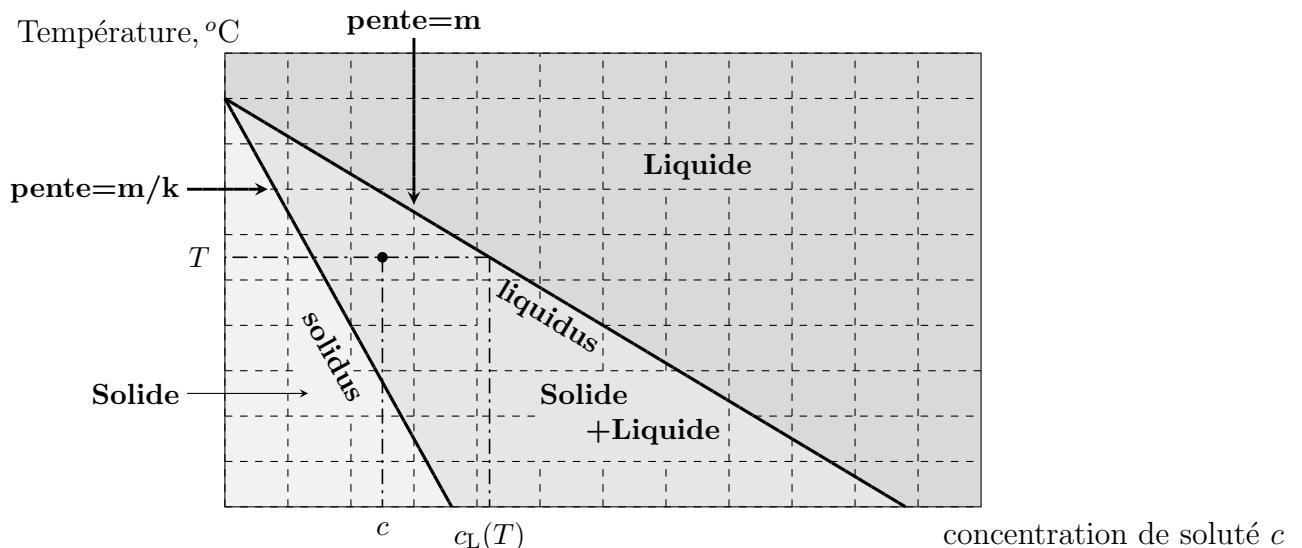


FIGURE 1 – Le liquidus, le solidus et le point (T, c)

On vous demande de

- a) établir le bilan de conservation du soluté au point (T, c) en terme des fractions liquide et solide $f_L(T, c), f_S(T, c)$.

1. Cette hypothèse simplifie l'analyse mais n'est pas réaliste. Généralement, on refroidit abondamment les faces latérales d'un moule de coulée continue de sorte que la dépendance radiale de la température peut rarement être négligée.

2. On admet que la conductivité thermique dépend peu de la concentration de silicium et de l'état liquide ou solide du matériau.

b) résoudre l'équation de bilan obtenue pour montrer que, sous les hypothèses faites ci-dessus, la fraction de liquide $f_L(T, c)$ est donnée par la loi de Scheil :

$$f_L(T, c) = \sqrt[1-k]{\frac{c}{c_L(T)}} \quad (1)$$

avec k le coefficient de ségrégation et $c_L(T)$ la concentration d'équilibre de soluté dans le liquide à la température T (cf. Fig. 1).