

## Série 6.

### Exercice 1

On considère la fabrication par fonderie de pièces en alliage Cu (solvant)-Ag (soluté). On estime que la vitesse d'avance du front de solidification est telle qu'il existe une zone pâteuse, en revanche le phénomène de macro-ségrégation peut être négligé.

- 1) Dans le cas où la concentration nominale d'argent est  $c^* = 5.0\%$ ,
  - (i) déterminer la température de l'interface entre le liquide et la zone pâteuse,
  - (ii) déterminer la température de l'interface entre la zone pâteuse et le solide :
    - a) sous l'hypothèse que la diffusion du soluté est infinie dans le solide,
    - b) sous l'hypothèse que le soluté ne peut pas diffuser dans le solide.
  - (iii) Si le soluté ne peut pas diffuser dans le solide, apparaît-il un pallier de fusion ? Si c'est le cas, déterminer la température et la fraction de liquide eutectique à l'interface entre le pallier et le solide ainsi qu'à l'autre extrémité du pallier.
- 2) On considère cette fois un alliage avec une concentration nominale d'argent de  $c^* = 52.9\%$ .
  - (i) déterminer la température de l'interface entre le liquide et la zone pâteuse.
  - (ii) justifier qu'il y aura nécessairement formation de liquide eutectique et donner des bornes (inférieures et supérieures) à la fraction de liquide eutectique au début du pallier de solidification.
  - (iii) Quelle microstructure obtient-on au final :
    - a) sous l'hypothèse que la diffusion du soluté est infinie dans le solide,
    - b) sous l'hypothèse que le soluté ne peut pas diffuser dans le solide.
  - (iv) Pour assurer des propriétés mécaniques convenables, il convient de limiter le phénomène de micro-ségrégation : la pièce coulée ne devra pas contenir une fraction massique supérieure à 10% d'un alliage qui contiendrait moins de 6.5% d'argent. Estimez les risques qu'une telle situation se présente.

Les propriétés thermiques principales de l'alliage Cu (solvant)-Ag (soluté) sont résumées dans la Tab. 1 :

grandeur	valeur	unité
Température fusion Cu, $T_f^{\text{Cu}}$	1080.0	°C
Température fusion Ag, $T_f^{\text{Ag}}$	961.9	°C
Température eutectique, $T_E$	779.0	°C
solubilité max. de Ag, $c_{\text{max}}$	7.5	%
solubilité max. de Cu, $c'_{\text{max}}$	8.8	%
concentration eutectique, $c_E$	71.9	%

TABLE 1 – Quelques propriétés thermiques de l'alliage Cu(solvant)-Ag (soluté)

## Exercice 2

On produit par fonderie des disques de diamètre  $w$  et d'épaisseur  $e$  dans un alliage d'aluminium de capacité thermique  $C_p$  et de chaleur latente inconnues.

- (a) Vous savez que le matériau en question subit une transition de phase solide-liquide à  $T_f = 650^\circ\text{C}$  et que sa densité à température ambiante ( $T_{\text{amb}} = 20^\circ\text{C}$ ) vaut  $\rho = 2.7\text{ g/cc}$ . Pour mesurer la capacité thermique et la chaleur latente du matériau vous prenez un volume  $V = 100\text{ cc}$  de matériau (à température ambiante) et vous l'élevez à haute température. En cours d'expérience vous relevez, à trois reprises différentes, la valeur de l'énergie déjà dépensée. Les résultats sont donnés à la Tab. 1

<b>température atteinte :</b>	620°C	720°C	820°C
<b>énergie dépensée jusque là :</b>	145'800 J	275'400 J	299'700 J

TABLE 1 – Mesures d'énergie

En supposant que la capacité thermique de chaque phase dépend peu de la température avez-vous assez d'informations pour calculer :

- (i) la capacité thermique du matériau solide,
- (ii) la capacité thermique du matériau liquide,
- (iii) la chaleur latente associée à la transition solide-liquide.

si oui, calculez ces quantités.

- (b) Calculez le coût de l'énergie nécessaire à faire fondre la matière pour produire 10'000 pièces, On considérera que le diamètre d'une pièce est  $w = 100\text{ mm}$ , que son épaisseur est  $e = 10\text{ mm}$ , que le kWh coûte 36 cts et que la température de coulée recommandée est  $T_c = 850^\circ\text{C}$ .

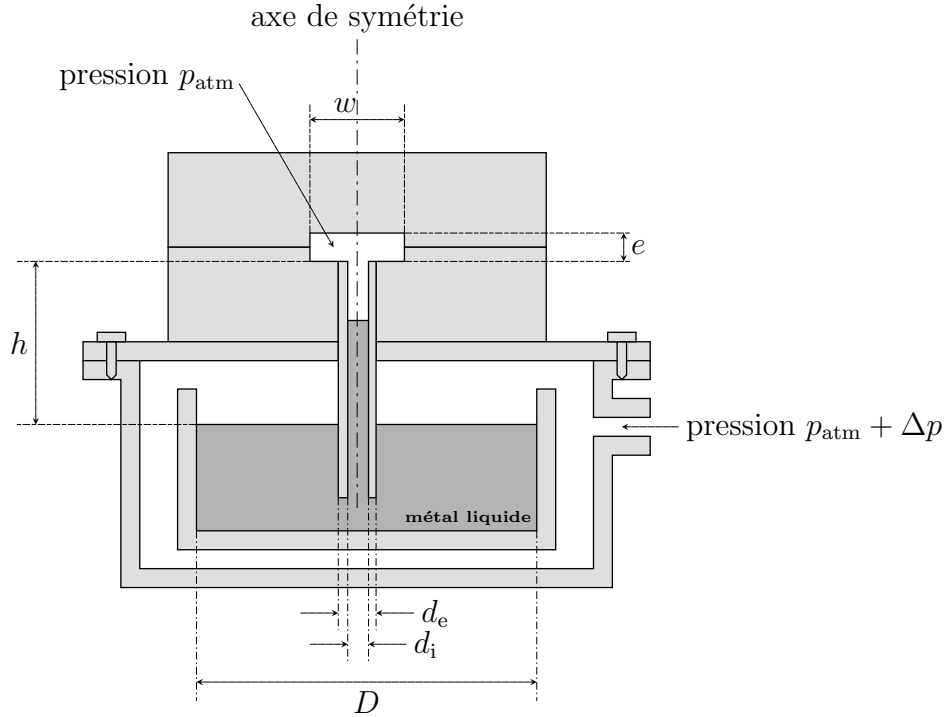


FIGURE 1 – Schéma de la pièce et du procédé de moulage basse pression

- (c) Vous décidez de produire les pièces en question par moulage basse pression (cf. Fig. 1). La distance entre le bas de l’empreinte et la surface du métal liquide dans la cuve est de  $h = 500 \text{ mm}$ , le diamètre interne de la cheminée d’alimentation est de  $d_i = 10 \text{ mm}$  et le diamètre de cuve est de  $D = 700 \text{ mm}$ . En supposant que la densité du métal liquide est sensiblement égale à la densité du métal à température ambiante, calculez la surpression nécessaire pour assurer le remplissage de la cavité en  $t \simeq 30 \text{ s}$ <sup>1</sup> à partir du moment où la cheminée est pleine.
- (d) Dans le passé, vous avez déjà produit des pièces d’épaisseur et de diamètre deux fois plus petits et le dispositif de production que vous utilisiez à l’époque était exactement une homothétie de facteur  $1/2$  du système actuel (Fig. 1). Vous aviez mesuré précisément le temps de refroidissement nécessaire pour atteindre la solidification totale de la pièce dans le moule (à partir de la fin du remplissage). Ce temps était environ d’un quart d’heure :  $t'_{\text{refr}} \simeq 900 \text{ s}$ . Pouvez-vous utiliser cette information afin d’estimer le temps  $t_{\text{refr}}$  qui sera nécessaire pour atteindre le refroidissement des nouvelles pièces de dimension double ? Si c’est le cas, proposez une estimation convenable et justifiez-la.

### Exercice 3

On considère la production par fonderie de pièces en alliage de Cu (solvant) - Ag (soluté). On suppose que la diffusion de soluté à l’état solide est finie (voir même totalement impossible).

1. Pour effectuer les calculs on considérera que le débit est constant à sa valeur initiale au cours du remplissage. On considérera aussi que le rapport  $\frac{d_i^2}{D^2 - d_e^2}$  est environ égal à zéro. On fera aussi l’hypothèse que l’écoulement de fluide est raisonnablement laminaire, incompressible et non visqueux.

- (1) Proposez un choix de la concentration nominale du liquide coulé qui évite l'apparition d'une phase  $\alpha$  avec une distribution inhomogène de concentration d'argent (micro-ségrégation).
- (2) Décrivez le type de microstructures à laquelle on peut s'attendre dans le solide.
- (3) Si la pièce totale pèse 2.5 kg, quelle sera la masse de la phase  $\alpha$  que nous avons produite ?

Les propriétés thermiques essentielles de l'alliage Cu(solvant)-Ag (soluté) sont données à la Tab. ci-dessous :

grandeur	valeur	unité
Température fusion Cu, $T_f^{\text{Cu}}$	1084.0	°C
Température fusion Ag, $T_f^{\text{Ag}}$	961.9	°C
Température eutectique, $T_E$	779.0	°C
solubilité max. de Ag, $c_{\text{max}}$	7.5	%
solubilité max. de Cu, $c'_{\text{max}}$	8.8	%
concentration eutectique, $c_E$	71.9	%

TABLE 1 – Quelques propriétés thermiques de l'alliage Cu(solvant)-Ag (soluté)

#### Exercice 4

Soit un processus de coulée continue d'un alliage binaire dont le coefficient de ségrégation vaut  $k$  et la concentration nominale  $c^*$ .

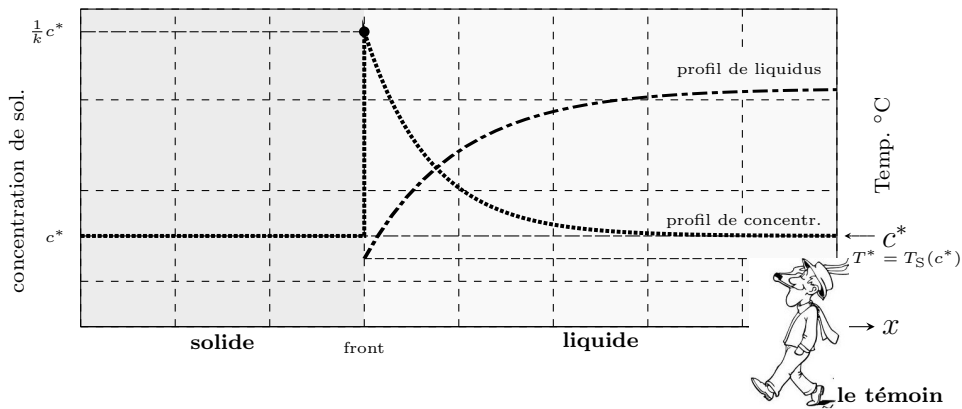


FIGURE 1 – Schéma du dispositif de coulée continue avec les profils de concentration et de liquidus

On suppose que la valeur  $c^*$  est inférieure à la solubilité maximale  $c_{\text{max}}$  et on considère que le système de production est invariant par translation dans les directions  $y$  et  $z$ . Il peut donc être schématisé comme à la Fig. 1. On appelle  $T_c$  la température de coulée et on fait l'hypothèse que la solidification en front plan représentée sur la Fig. 1 est **stable**.

Un témoin venant de l'infini se déplace vers le front de solidification en suivant l'axe du système. Il relève l'état  $(c, T)$  et le reporte en continu dans le diagramme de phase (cf. Fig. 2) :

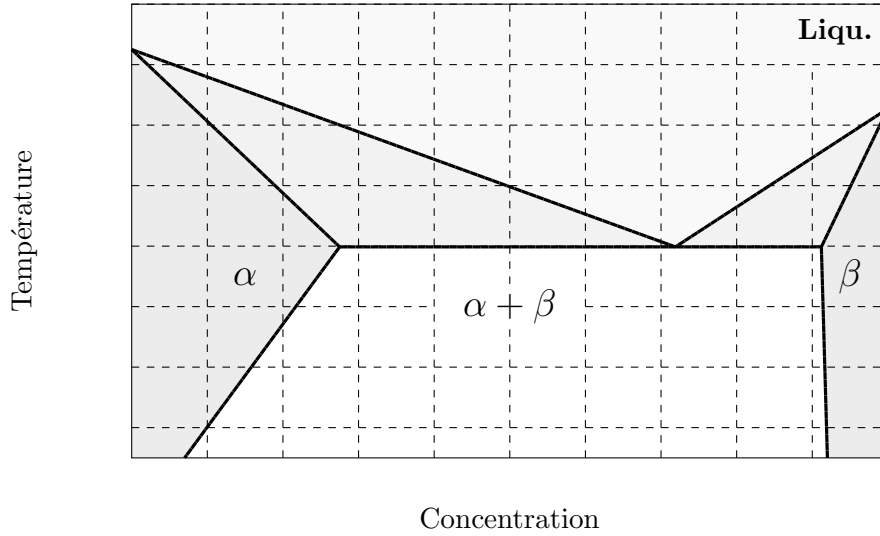


FIGURE 2 – Diagramme de phase de l'alliage utilisé

On vous demande de dessiner (directement sur la Fig. 2) la courbe que ce point parcourt.

### Questions subsidiaires

- (i) Comment se présenterait la courbe parcourue par le point témoin si le front plan était instable ?
- (ii) La condition d'instabilité du front plan :

$$-m\partial_x c|_{\text{av. front}} > \partial_x T|_{\text{av. front}}$$

possède une interprétation géométrique en rapport avec la courbe parcourue par le point témoin. Voyez-vous laquelle ?

### Exercice 5

On considère le procédé de moulage par gravité avec le moule représenté à la Fig. 1. On demande de calculer le temps de remplissage  $t_{\text{rempl}}$  (cavité + masselotte) en négligeant la viscosité et la compressibilité du métal liquide (masse spécifique  $\rho = 8.2 \text{ g/cc}$ ) et en supposant un écoulement laminaire.

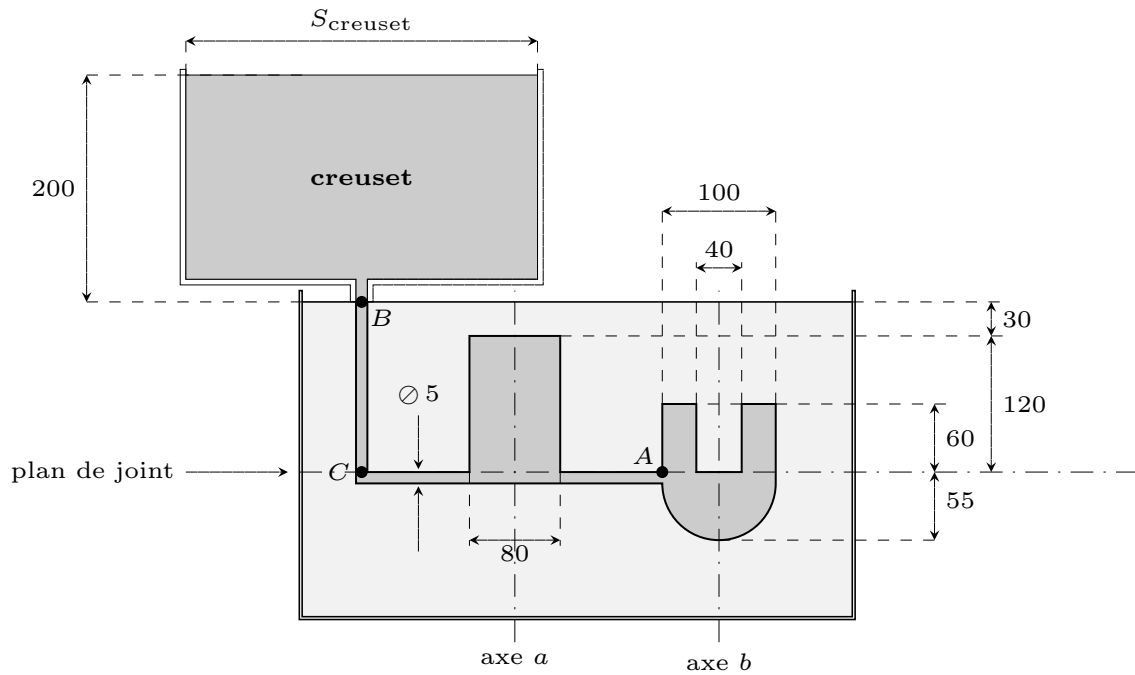


FIGURE 1 – le moule et le creuset (dimensions en mm)

La masselotte et la cavité sont des volumes à symétrie de révolution d'axe  $a$  et, respectivement, d'axe  $b$ . Le canal de coulée est un tube cylindrique de diamètre constant (5 mm) et, pour simplifier, on admettra aussi que

- (i) la surface du creuset  $S_{\text{creuset}}$  est très grande ( $S_{\text{creuset}} \rightarrow \infty$ ),
- (ii) jusqu'à ce que le liquide remplisse la cavité au niveau du plan de joint, le point  $A$  est sur une surface libre ( $p_A = p_{\text{atm}}$ ),
- (iii) les vitesses de montée du liquide dans la masselotte et dans la partie supérieure de la cavité sont identiques, et cela tant que la cavité n'est pas complètement remplie.

On demande aussi de calculer

- (1) la distribution de pression hydrostatique dans le trou de coulée (du point  $B$  au point  $C$ ) durant le remplissage de la partie inférieure de la cavité,
- (2) l'évolution temporelle de la pression en haut du trou de coulée lors du remplissage de la partie supérieure de la cavité.