

+0/1/60+



Ens. Eric Boillat - Procédés de production

Date 03.07.2021 - durée : 3h00

Table No.

Examen

Nom :

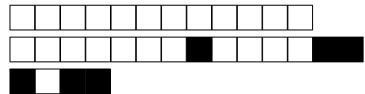
Attendez s'il vous plaît le début de l'examen avant de tourner cette page. Ce document est imprimé recto-verso, il contient 15 pages, les dernières pages sont peut-être vides. Vous êtes priés de n'enlever l'agrafe sous aucun prétexte.

– On vous demande de rédiger proprement vos réponses dans les cases prévues à cet effet.

Dans le cas de questions nécessitant un développement, il est recommandé de ne pas vous servir des cases officielles comme brouillon. Ne les utilisez que pour y écrire la version définitive de votre solution.

– Après l'examen, l'enseignant se réserve le droit d'annuler toute question qu'il considérera finalement comme mal posée.

Question	Nombre de points
1)	
2)	
3)	
Total	



Question 1 Procédé de fonderie: propriétés thermiques des matériaux

Vous aimeriez utiliser un nouvel alliage dans votre procédé de fonderie. Pour cela, vous avez besoin de renseignements sur ses propriétés thermiques. Vous placez une masse très faible de cet alliage en fusion dans un **calorimètre**. Cet appareil refroidit et fait se solidifier la matière qu'il contient en extrayant une puissance bien contrôlée. Tout en faisant cela, il mesure très précisément la température T qu'on suppose homogène¹ dans tout l'échantillon. En plus de cela, le calorimètre est équipé d'un dispositif permettant d'évaluer très exactement la fraction de liquide f_L à l'intérieur de l'alliage.

L'évolution de la température mesurée est représentée par la courbe hachurée sur la Fig. 1. L'évolution de la fraction de liquide est illustrée en trait plein sur la même Figure. Observez que l'échelle des températures est à la gauche du graphique et que l'échelle des fractions se trouve sur la droite.

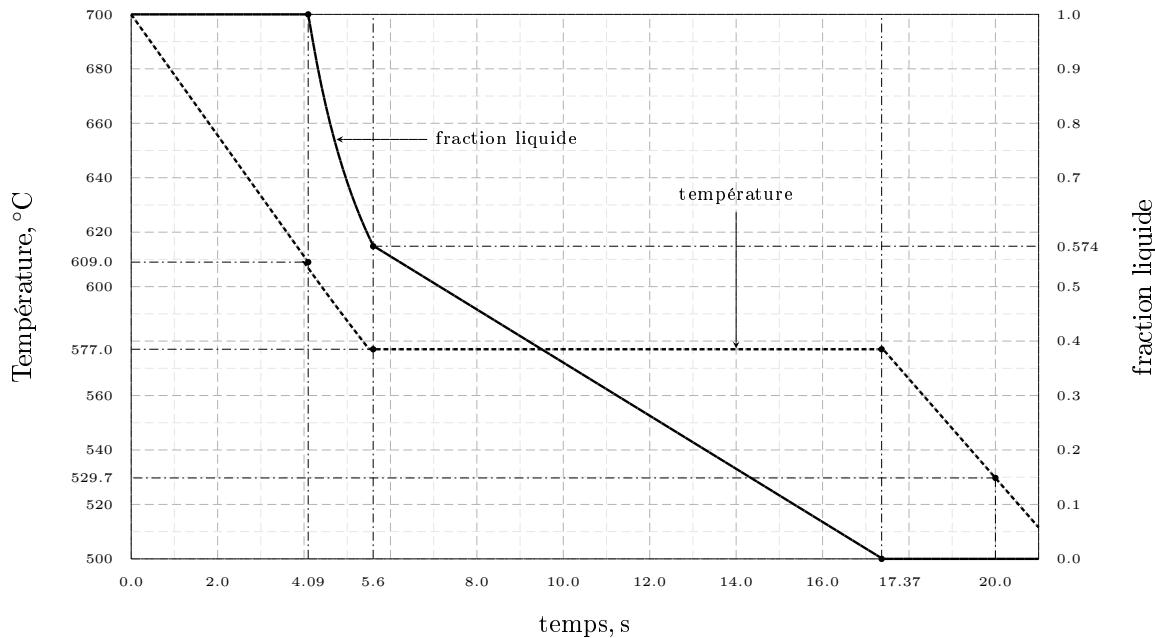


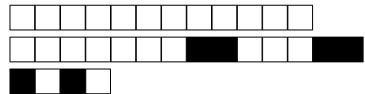
Figure 1: Résultat de l'expérience calorimétrique

Vous savez que le diagramme de phase de l'alliage est de type eutectique. Le premier élément (le solvant) est l'aluminium et l'autre élément (le soluté) est présent au titre de $c^* = 7.5\%$, mais n'est pas déterminé. Dans ces conditions et si cela est possible, on vous demande d'utiliser les informations de la Fig. 1 pour répondre aux questions suivantes:

- 1) Quel est le temps t_{on} en lequel le premier solide apparaît dans le calorimètre?

- 2) Quel est le temps t_{off} en lequel l'échantillon entre entièrement en phase solide?

¹Cette hypothèse est justifiée car l'échantillon est à la fois **petit** et **bon conducteur** thermique.



- 3) Quelle est la température eutectique T_E de l'alliage?

- 4) Quelle est la température de liquidus T_L^* de l'alliage?

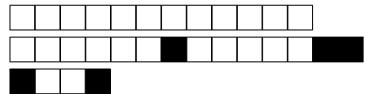
- 5) Quelle opération mathématique faut-il effectuer pour calculer la fraction solide f_S à partir des données T et f_L de la Fig. 1?

- 6) Quelle fraction f_L^E de liquide eutectique forme-t-on dans le calorimètre?

- 7) Sachant que la température de fusion de l'aluminium pur est d'environ $T_f^{\text{Al}} = 660^\circ\text{C}$, quelle est la pente de liquidus m et quelle est l'unité de cette pente?

- 8) Quelle est la concentration eutectique c_E de l'alliage?

- 9) Utilisez les informations obtenues jusqu'ici pour calculer le coefficient de ségrégation k de l'alliage. Pour cela vous ferez l'hypothèse que le processus de solidification est si rapide que la loi de Scheil s'applique pour lier la fraction liquide à la température.



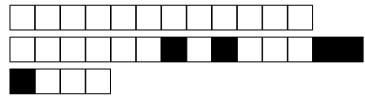
- 10) Quelle fraction de liquide eutectique formerait-on si l'alliage se solidifiait plutôt en suivant la loi des leviers?

- 11) Quelle est la solubilité maximale c_{max} du soluté dans le solvant?

- 12) Vous savez que la masse de matière qui a été placée dans le calorimètre est exactement $M = 0.5\text{ g}$. A la fin de la solidification, l'alliage obtenu dans le calorimètre est constitué d'une masse $m_{\alpha'}$ de phase α avec une concentration inhomogène de soluté, d'une masse m_{α} de phase α où le soluté en concentration maximale c_{\max} et d'une masse m_{β} de soluté pur. On vous demande:

- i) de calculer la masse $m_{\alpha'}$ de la phase α'

- ii) de calculer les masses m_α et m_β des phases α et β ,

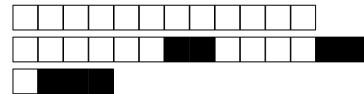


- iii) de faire un commentaire sur les propriétés de solubilité maximale c'_{\max} de l'aluminium dans le second élément d'alliage.

- 13) Sachant encore que le calorimètre a été réglé de façon à extraire très exactement une puissance $P = 10 \text{ W}$ de l'alliage, vous devez:

- i) calculer la chaleur latente L de l'alliage:

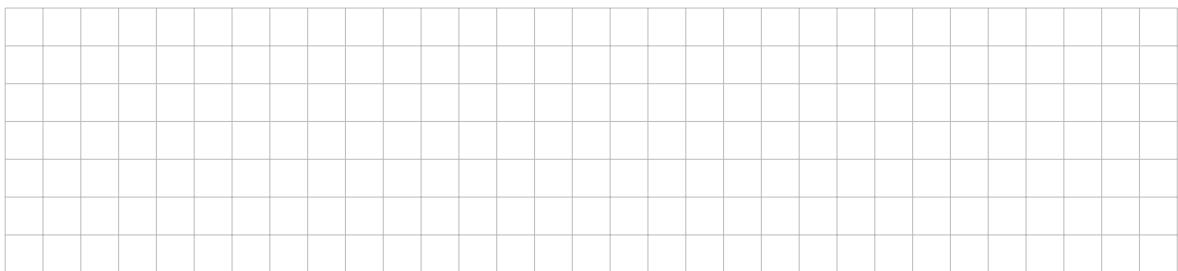
- ii) calculer les chaleurs spécifiques C_p^L et C_p^S de l'alliage à l'état liquide et, respectivement, solide (on admet que ces quantités sont indépendantes de la température, mais qu'elles ne sont pas forcément égales entre elles):



- 14) Vous effectuez une nouvelle expérience calorimétrique en changeant la valeur du titre c^* de l'alliage. Vous modifiez aussi vers le bas la consigne de puissance P à extraire. Dans ces conditions vous obtenez les évolutions de température et de fraction liquide représentées à la Fig. 2. Sur la base de cette information,

i) que pouvez vous dire de la position du titre c^* par rapport à la solubilité maximale c_{\max} ?

Justifiez votre réponse.



- ii) que pouvez vous dire du temps caractéristique de diffusion du soluté dans l'échantillon si on le compare à l'échelle de temps de cette nouvelle expérience calorimétrique? Justifiez votre réponse.

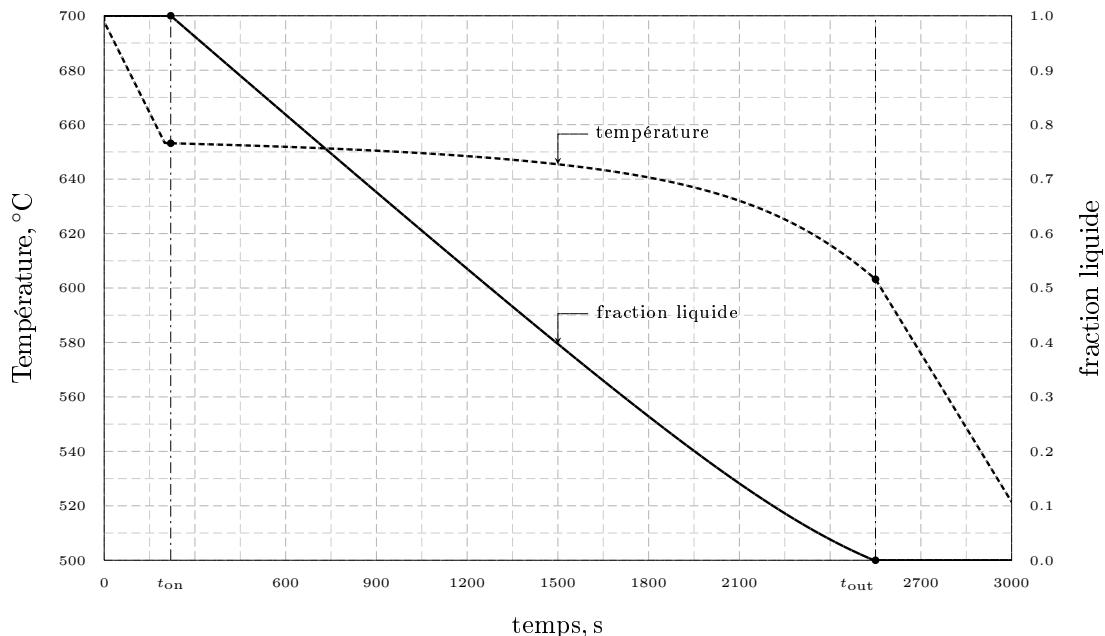
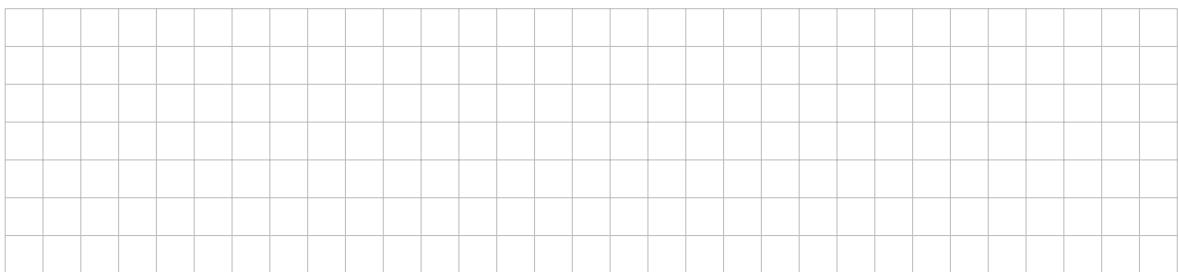
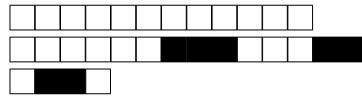


Figure 2: Résultat de l'expérience calorimétrique sur le nouvel alliage



Vous recevez des barres cylindriques en acier que votre fournisseur a écroûties depuis un état recuit. Ces barres ont toutes les mêmes dimensions. Elles ont un volume $1'000'000 \text{ mm}^3$ et une longueur $l = 1'000 \text{ mm}$. Pour caractériser ce lot, vous sacrifiez une barre et le laboratoire mesure les données suivantes:

limite élastique réelle $\sigma'_e = 750 \text{ MPa}$	module d'élasticité $E = 100 \text{ GPa}$	coefficient de Poisson $\nu = 0.4$
coefficient d'écrouissage $n = 0.35$	taux de déf. réel en rupture $\varepsilon'_{\text{ult}} = 0.42$	

Table 1: Caractéristiques mécaniques du matériau considéré

Vous aimeriez être dorénavant capable d'écrouir les barres vous-même sans passer par votre sous-traitant qui vous facture pour cela un prix rédhibitoire. Vous vous proposez donc de déterminer le taux de déformation permanent ε_p auquel votre fournisseur a amené les barres recuites avant de vous les livrer. Vous souhaitez aussi estimer les coûts que l'opération risquent d'engendrer. Pour cela vous avez besoin d'avoir une idée des forces de traction qui sont nécessaires afin de commander les bons outils de production. Vous aurez aussi besoin de vous rendre compte des dépenses énergétiques que l'opération va entraîner. Pour obtenir ces informations, vous effectuez un recuit sur une des barres et vous en confiez un échantillon au laboratoire pour qu'il mesure sa limite élastique réelle. La réponse est

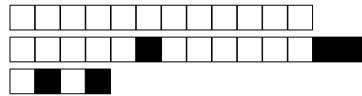
$$\sigma_e = 500 \text{ MPa}$$

- 1) Armand, votre bras droit, est hors de lui. Il se propose de redescendre immédiatement au labo demander des compléments d'information sur le module d'élasticité et les coefficients d'écrouissage et de Poisson de l'échantillon recuit. Vous le retenez in extremis en lui disant que vous connaissez déjà les réponses. Donnez ci-dessous les valeurs que vous lui indiquez:

i) Module d'élasticité:

ii) coefficient d'écrouissage:

iii) coefficient de Poisson:



- 2) Armand est stupéfait par votre savoir. Pour continuer à l'impressionner vous calculez, devant lui, le taux de déformation réel en limite élastique ε_e du matériau reçut ainsi que sa limite élastique R_e et son module d'écrouissage. Quels sont vos résultats:

i) taux de déformation réel en limite élastique (matériau recuit):

ii) limite élastique (matériau recuit):

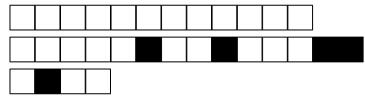
iii) module d'écrouissage (matériau recuit):

- 3) Comment se compare le taux de déformation réel en limite élastique ε_e du matériau recuit par rapport à celui du matériau écroui qu'on notera ε'_e . Est-il plus grand ou plus petit et expliquez pourquoi?

- 4) Utilisez les données qui vous sont fournies pour calculer la valeur exacte de ε'_e :

- 5) Armand vous met maintenant au défi de prédire **très exactement** la valeur R_m de la résistance du matériau recuit ainsi que le taux de déformation en écrouissage maximum ε_m . Vous répondez qu'une réponse **très exacte** est effectivement délicate à donner mais que vous pouvez en donner une approximation raisonnable sous une certaine hypothèse.

i) quel est le nom de cette hypothèse?



ii) y a-t-il un rapport entre l'auteur de cette hypothèse et votre assistant (question bonus)?

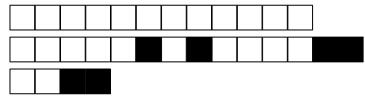
iii) sous cette hypothèse que vaut la résistance R_m du matériau reçut et que vaut le taux de déformation en écrouissage maximum ε_m ?

6) Vous en revenez maintenant à votre préoccupation initiale, à savoir la détermination du taux d'écrouissage ε_p auquel votre fournisseur a amené, par étirage, les barres livrées. On vous demande donc de calculer:

i) le taux de déformation ε_r auquel le fournisseur a relâché l'écrouissage:

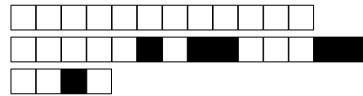
ii) le taux de déformation permanent ε_p atteint après relaxation (=taux d'écrouissage):

iii) la longueur et la section initiales l_0 et S_0 des barres telles qu'elles étaient avant que votre fournisseur ne les étire:



- 7) Armand cherche une dernière fois à vous mettre au défi et vous demande d'estimer le taux de déformation ultime ε_{ult} du matériau recuit. Que lui répondez-vous?

- 8) Donnez maintenant une estimation inférieure et une estimation supérieure du prix que coûtera l'écrouissage d'un lot de 1'250 barres recuites. Vous tiendrez compte qu'un kWh coûte 20 cts.



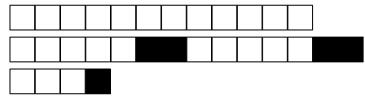
9) Calculez encore

- i) la force F_e que développe la machine de traction de votre fournisseur au moment où la barre passe en plasticité:

- ii) la force F_r que développe la machine de traction de votre fournisseur au moment où la barre atteint le point de relaxation:

- iii) la force maximale F_{\max} que développe la machine de traction de votre fournisseur durant l'opération d'écrouissage:

- iv) la force F_{rup} que la machine de traction de votre fournisseur devrait développer s'il souhaitait casser une des barres à un moment donné:



Question 2 Phénomènes de coupe

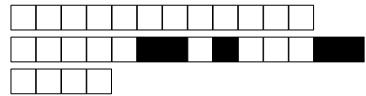
- 1) Dans un procédé de coupe, on aimerait déterminer l'angle de frottement entre la lame et le copeau. Pour ce faire on diminue progressivement l'angle de coupe α . On observe que la force de coupe nécessaire augmente progressivement et que la coupe devient absolument impossible dès que α atteint la valeur limite $\alpha_{\text{lim}} = -78^\circ$. On vous demande de calculer

i) l'angle de frottement β :

ii) le coefficient de frottement μ entre la lame et le copeau.

- 2) Par tournage, on fait passer le rayon r d'une barre de la valeur de départ $r_{\text{dep}} = 21 \text{ mm}$ à la valeur finale $r_{\text{fin}} = 20.5 \text{ mm}$ en utilisant un angle de coupe de $\alpha = 15^\circ$ (cf. Fig. 3). Le matériau coupé est caractérisé par une résistance au cisaillement $\tau_S = 325 \text{ MPa}$ et il est raisonnablement isotrope de sorte que, dans le cadre du modèle de coupe orthogonale, la loi de Merchant peut être appliquée.

ii) Calculez le taux de cisaillement de la matière entrant dans le copeau ainsi que la contrainte de cisaillement qu'on mesure sur le plan de cisaillement, dans le cas où le coefficient de frottement a la valeur trouvée sous 2i).



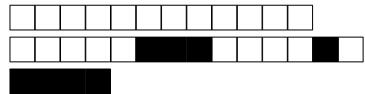
iii) Quel est la profondeur de coupe d ?

iv) Toujours avec le choix de coefficient de frottement fait sous 2i), déterminez l'avance au tour maximale t_1 que vous pouvez vous permettre si la force de coupe que le tour applique est limitée à la valeur $F_{c,\max} = 100 \text{ N}$.

v) Complétez la Fig. 3 en dessinant les éléments suivants:

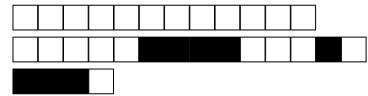
- a) *en vert*: l'angle de coupe α
 - b) *en rouge*: l'angle de cisaillement ϕ
 - c) *en vert*: l'avance au tour t_1
 - d) *en rouge*: la profondeur de coupe d
 - e) *en vert*: la surface de coupe
 - f) *en rouge*: l'arête de coupe
 - g) *en rouge et par la point L*: la force exercée par la lame sur le copeau (direction correcte, échelle arbitraire)

vi) Dans le cas où la force de coupe prend sa valeur maximale, quelle sera l'amplitude de la force que la lame applique sur le copeau dans la direction axiale?



- vii) Vous utilisez une puissance moteur de $P = 55 \text{ W}$ et l'avance au tour est réglée à la valeur déterminée au point 2iv). Déduisez de ces informations la vitesse de coupe en unité de mm/s , la vitesse de rotation du tour Ω en unité de tour par minute ainsi que la vitesse d'avance v_{av} en mm/min .

- viii) Le réglage de la puissance moteur est fixée à la valeur donnée au point 2vii). Calculez le temps d'usinage nécessaire pour traiter une barre de $L = 1$ m de long comme une fonction du réglage t_1 de l'avance au tour. Qu'observez-vous?



+0/15/46+

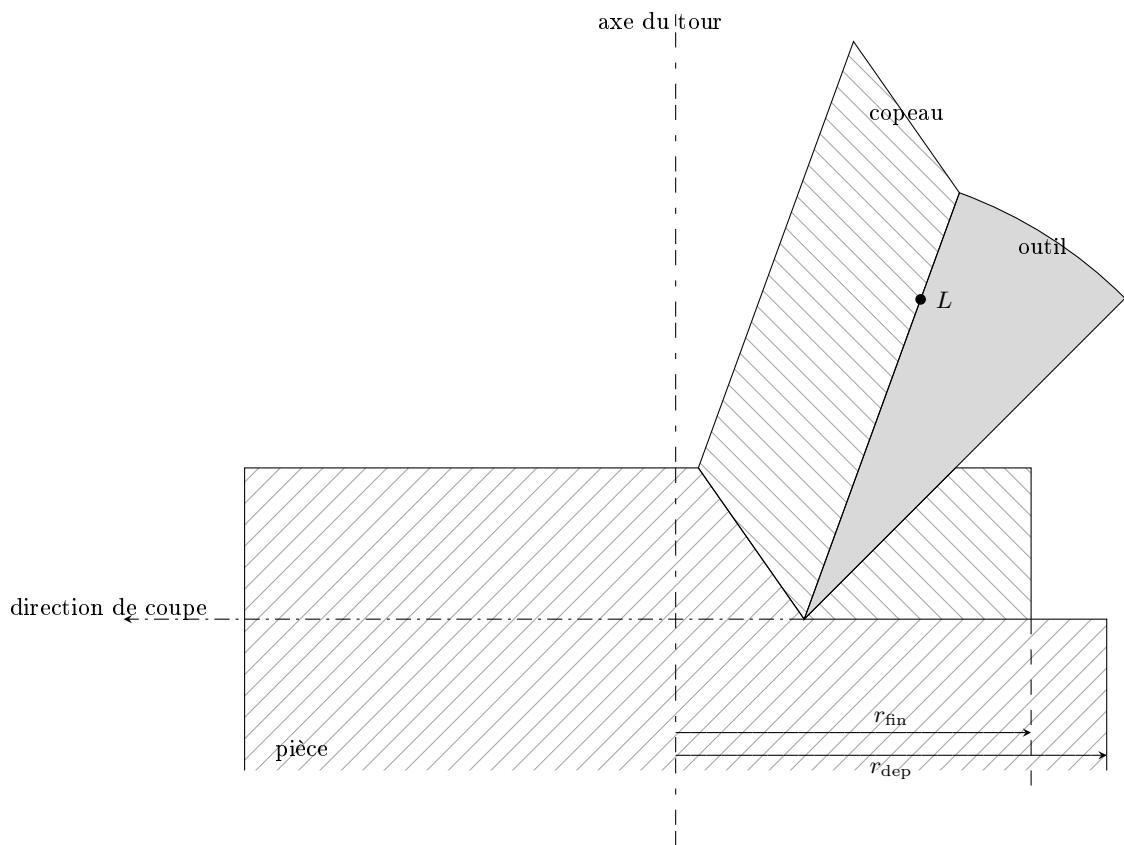


Figure 3: Modèle de coupe orthogonale