

# ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE NOVEMBRE 2018

Toute documentation permise Calculatrices : modèles autorisés seulement Durée de l'examen : 3 heures
--

14-MT-A6 Matériaux d'ingénierie

**Question 1** (15 points)

Dans la conception des réservoirs sous pression, on cherche à éviter la rupture brutale qui mènerait à leur éclatement. Pour ce faire, on choisit des matériaux qui ont des propriétés telles qu'une fissure à partir de la surface externe du réservoir puisse avoir une profondeur égale à l'épaisseur de la paroi de telle sorte qu'il y ait une fuite de gaz plutôt qu'un éclatement du réservoir. Considérons un tel réservoir (Figure 1) fait d'un alliage d'aluminium ayant les propriétés suivantes :

$$R_e = 120 \text{ MPa} \quad R_m = 300 \text{ MPa} \quad E = 70 \text{ GPa} \quad A = 15\% \quad K_{Ic} = 35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

- Pour un réservoir avec une épaisseur de paroi  $e$  de 2 cm, on note la présence d'une fissure de profondeur  $a$  de 2,5 mm. Pour cette géométrie de fissure, on considérera un facteur géométrique  $\alpha$  de 1,1. Quelle est la contrainte nominale  $\sigma_{nom}$  maximale qui puisse être appliquée sur ce réservoir ? Pour une telle contrainte, observera-t-on une rupture brutale du réservoir ? Expliquez. Le facteur d'intensité de contrainte  $K$  est donné par  $K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$ . (6 points)
- Au-dessus de quelle profondeur de fissure maximale  $a_c$  y aurait-il risque de rupture brutale ? Qu'en déduisez-vous sur le risque de rupture brutale du réservoir illustré à la Figure 1 ? Observera-t-on une fuite de gaz avant éclatement ? (6 points)
- En tenant compte de la réponse donnée en b) et en supposant que les propriétés du matériau ne sont pas modifiées, est-ce qu'une augmentation de l'épaisseur de la paroi du réservoir jusqu'à une valeur de  $e = 3$  cm augmente ou diminue le risque de rupture brutale (éclatement) ? Expliquez. (3 points)

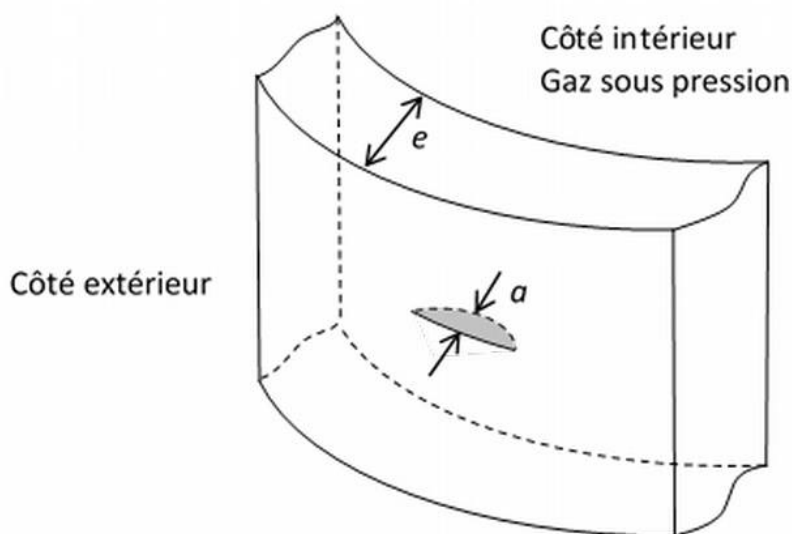


FIGURE 1 : Fissure sur la face externe d'un réservoir sous pression.

**Question 2** (15 points)

Le diagramme TTT montré à la Figure 2 décrit les transformations d'un acier 1035 en maintien isotherme après trempe depuis le domaine austénitique. La Figure 3 montre l'évolution de la dureté d'un acier contenant 0,35% de carbone lors du traitement de revenu après trempe pendant une durée de 1 heure. On montre aussi les courbes de revenu pour des aciers contenant en plus du carbone diverses teneurs en molybdène (Mo).

- a) Donnez les différentes étapes de deux traitements thermiques complets qui mèneraient à une dureté finale de 35 HRC (Rockwell C). Pour chaque étape, donnez les températures, les vitesses de refroidissement, les temps de maintien et les microstructures de l'acier qui en résultent. (7 points)
- b) Comment expliquer que la dureté de la martensite obtenue après trempe à la température ambiante ne soit pas de l'ordre de 60 à 65 HRC comme pour les aciers alliés typiques ? (4 points)
- c) Sur les courbes de revenu de la Figure 3, qu'est-ce qui explique la présence de pics de dureté pour des revenus à une température autour de 600°C pour les alliages contenant du molybdène ? (4 points)

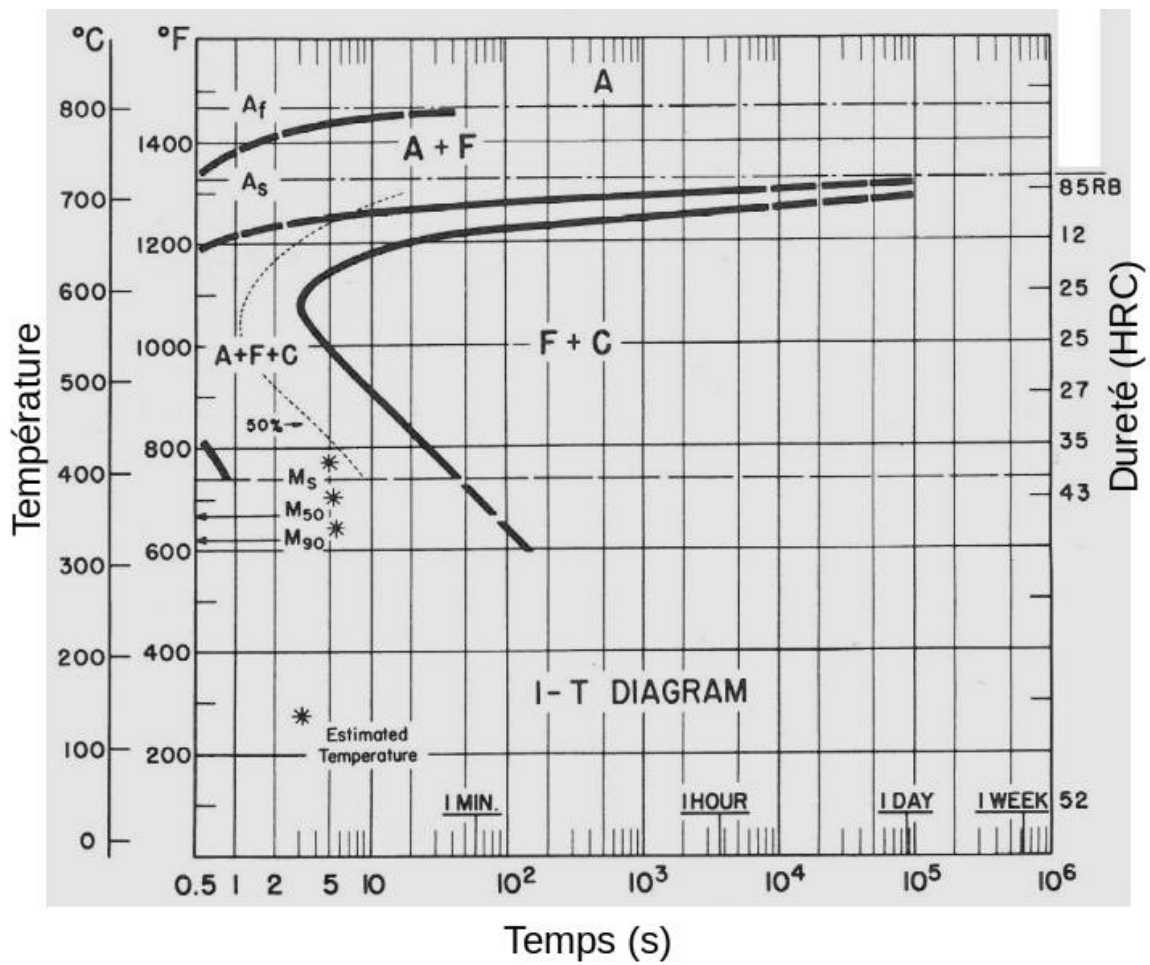


FIGURE 2 : Diagramme TTT de l'acier 1055.

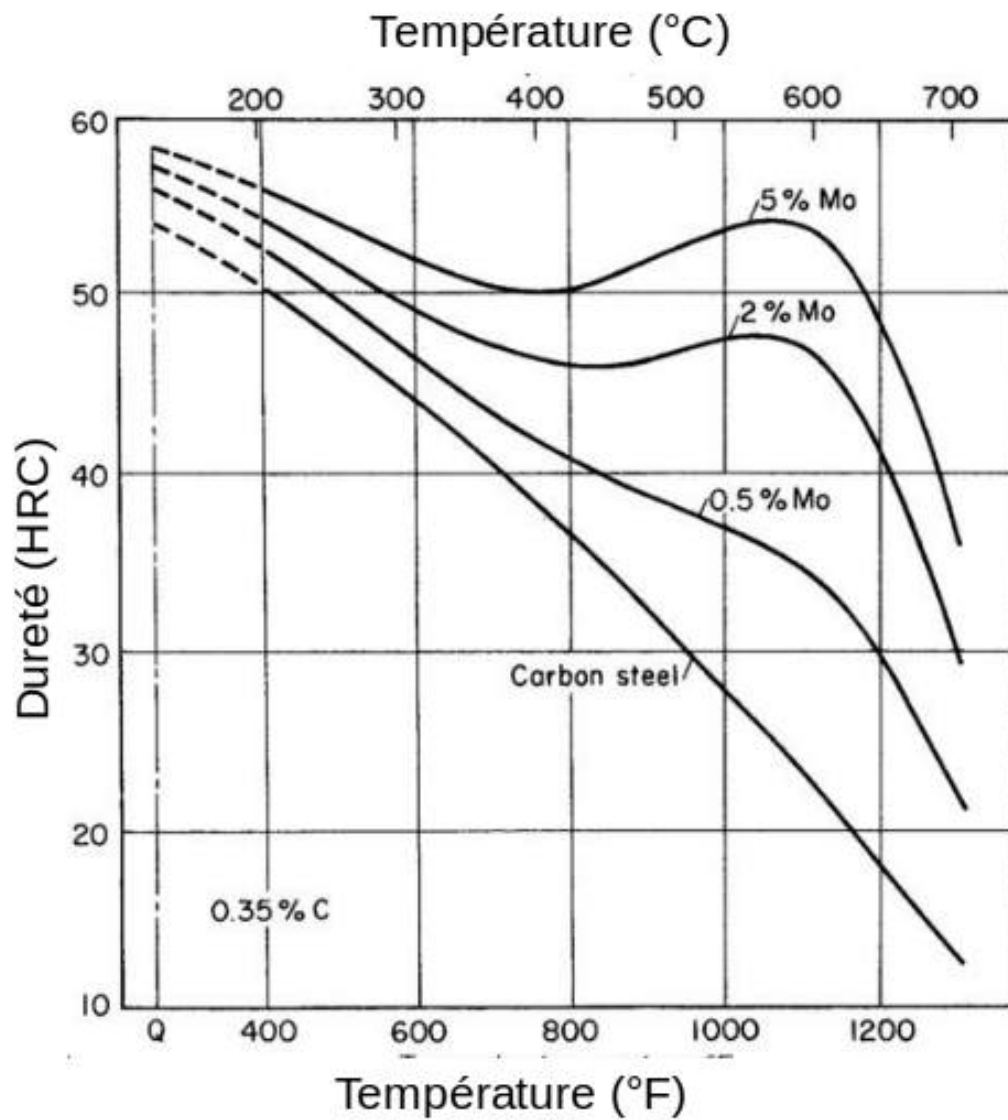


FIGURE 3 : Traitement de revenu de l'acier 1035, 1 heure.

**Question 3** (13 points)

Deux tôles d'acier au carbone A et B subissent un laminage (Figure 4), l'une à chaud, l'autre à froid. Suite au laminage, on mesure les propriétés suivantes :

	Tôle A		Tôle B	
	L	T	L	T
Module d'Young $E$ (GPa)	140	225	210	210
Limite d'élasticité $R_e$ (MPa)	320	330	115	115
Résistance à la traction $R_m$ (MPa)	410	410	240	240
Allongement à la rupture $A$ (%)	15	14	25	18

- Quelle est la tôle laminée à chaud ? À froid ? Justifiez votre réponse. (4 points)
- Quelles sont les origines des différences de propriétés selon les directions L et T ? Expliquez. (5 points)
- Bien que les valeurs de résistance à la traction  $R_m$  soient différentes pour les deux tôles, on note que cette valeur ne dépend pas de l'orientation L ou T. Comment peut-on expliquer ceci ? (4 points)

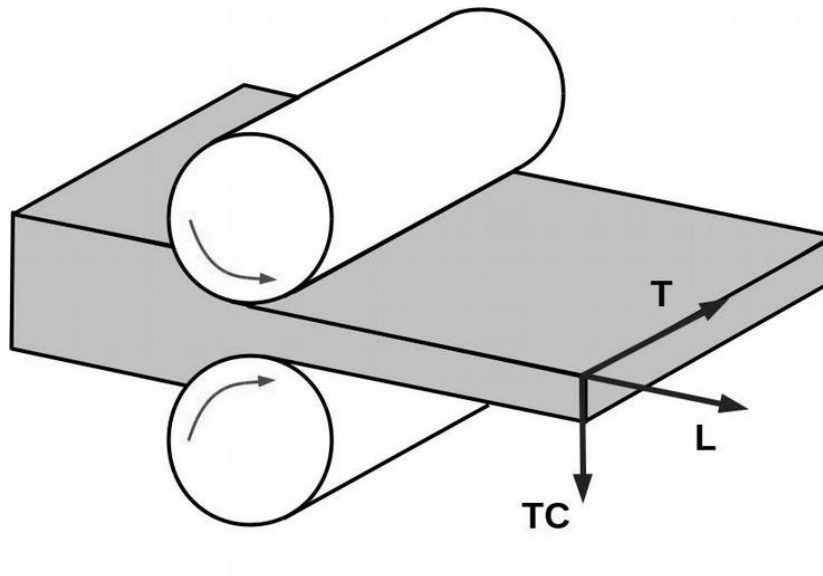


FIGURE 4 : Orientations de laminage et transverses.

**Question 4** (15 points)

Un composite à matrice d'époxy est renforcé de fibres continues de Kevlar 49. La fraction volumique de fibres  $V_f$  est égale à 50% et les propriétés des composants sont données dans le Tableau 1. On supposera que la matrice d'époxy se comporte de façon élastique jusqu'à sa rupture.

TABLEAU 1 : Propriétés mécaniques des composants

	Époxy	Fibre Kevlar 49
Module d'Young $E$ (GPa)	2,4	130
Résistance à la rupture $R_m$ (MPa)	50	3600
Allongement à la rupture $A$ (%)	10	2

- Calculez le module d'Young  $E_c$  du composite mesuré dans le sens de l'alignement des fibres. (5 points)
- Calculez la résistance à la traction  $R_{mc}$  du composite. (5 points)
- Au moment de la rupture du composite, quelle est la proportion de la force qui est supportée par les fibres? Justifiez par un calcul. (5 points)

**Question 5** (15 points)

La Figure 5 montre les courbes de fatigue obtenues pour des éprouvettes faites d'un alliage d'aluminium 2014-T6 et d'un acier 1045. Ces courbes donnent le nombre de cycles à la rupture pour différentes amplitudes de chargement cyclique ( $\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}$ ) à un rapport de contrainte  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -1$ .

- Quelle est la limite d'endurance de l'acier 1045. (3 points)
- Dans les conditions de chargement cyclique données plus haut, et pour une même charge appliquée sur chaque éprouvette, quel devrait être le ratio du diamètre de l'éprouvette de fatigue en aluminium sur celui de l'éprouvette en acier si on désire avoir une même durée de vie de  $10^5$  cycles pour les deux alliages? (6 points)
- Si on soumettait les éprouvettes en acier à un rapport de charge  $R = 0$  (pour une même contrainte maximale  $\sigma_{max}$  que celle correspondant aux essais à  $R = -1$ ), observerait-on une augmentation ou une diminution de la résistance en fatigue? Expliquez. (6 points)

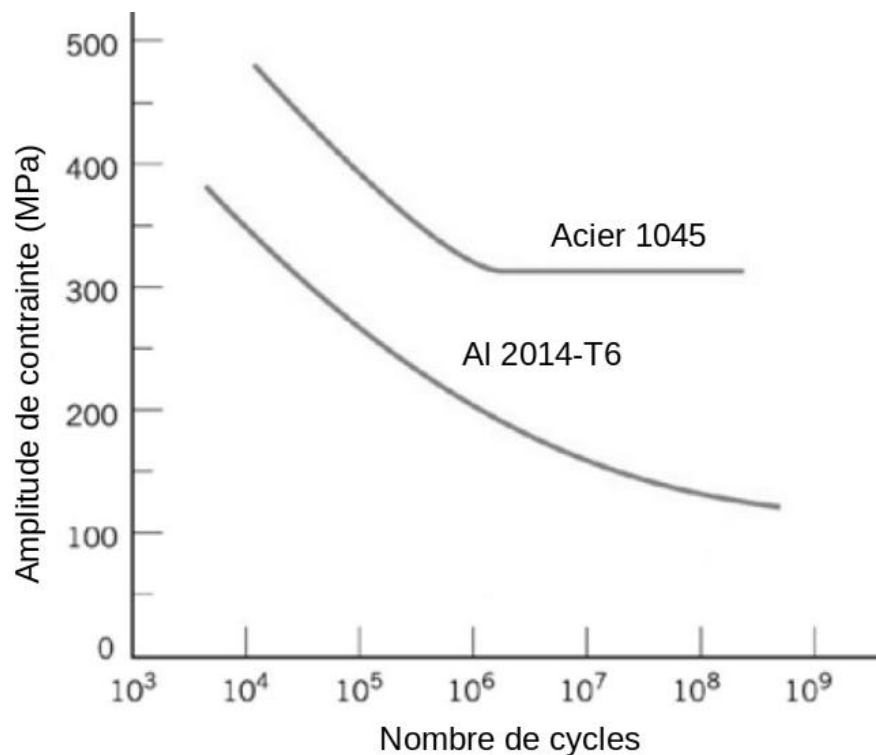


FIGURE 5 : Courbes de fatigue pour l'acier 1045 et l'aluminium 2014-T6.



**Question 6** (15 points)

La Figure 6 montre le principe de fonctionnement de la coulée sous basse pression d'alliages d'aluminium ou de magnésium en moule permanent en acier. La pression sur l'alliage liquide est appliquée au moyen d'un gaz inerte pressurisé.

- a) Donnez deux avantages importants reliés à cette approche de fonderie comparée à la coulée par gravité en moule permanent. (5 points)
- b) Pourquoi n'est-il pas nécessaire d'inclure des masselottes dans la conception de la cavité des moules de coulée sous basse pression ? Expliquez en décrivant le rôle joué par les masselottes en fonderie. (5 points)
- c) Dans certains cas, il est possible d'ajouter des blocs refroidisseurs dans des portions du moule pour obtenir un refroidissement local plus rapide. Quel est le but visé par une telle pratique ? Expliquez en décrivant les effets sur la microstructure. (5 points)

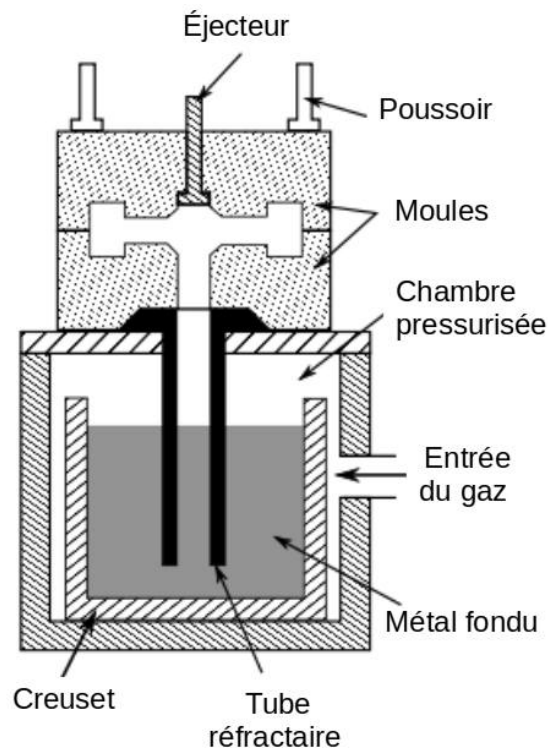


FIGURE 6 : Composants d'un système de fonderie à basse pression.

**Question 7** (12 points)

Dans l'industrie des polymères, on travaille activement à développer le procédé d'extrusion des polymères à l'état solide. Ce procédé permet, par l'alignement des chaînes linéaires d'un polymère (Figure 7), une amélioration des propriétés mécaniques.

- a) Suite à l'extrusion d'une tige de polyéthylène, les propriétés suivantes seront-elles augmentées, réduites ou inchangées ? Expliquez. (6 points)

Module de Young

Température de fusion

Température de transition vitreuse

- b) Comment nomme-t-on le phénomène associé à l'alignement des chaînes polymères ? (3 points)
- c) Que se produira-t-il si on extrude un polymère à chaînes réticulées ? Expliquez. (3 points)

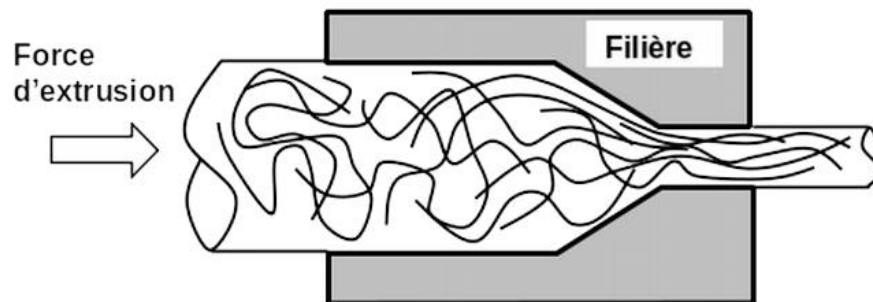


FIGURE 7 : Extrusion de polymère.