



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

Questionnaire examen final

MTR1035C

CORRIGÉ

Sigle du cours

Le génie
sans frontières

Identification de l'étudiant(e)				Réservé
Nom :		Prénom :		Q1 /5
Signature :		Matricule :	Groupe :	Q2 /4
Sigle et titre du cours		Groupe	Trimestre	Q3 /1
MTR1035C Matériaux		Tous	Automne 2010	Q4 /5
Professeur		Local	Téléphone	Q5 /5
Richard Lacroix		A-476	4771	Q6 /5
Jour	Date	Durée	Heures	Q7 /9
Vendredi	17 décembre 2010	2 h 30	13 h 30 - 16 h	Q8 /8
Documentation		Calculatrice		Q9 /6
☒ Aucune ☐ Toute ☐ Voir directives particulières		☐ Aucune ☐ Toutes ☒ Non programmable Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits.		Q10 /5
Directives particulières				Q11 /7
1. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de 60 points. 2. La cote maximale de l'examen est de 50 points. 3. Pour les questions nécessitant des calculs ou une justification, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit. 4. Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs. 5. Vous avez, en annexe, le formulaire général et un tableau périodique. Vous pouvez détacher ces deux pages du questionnaire.				/50
Important	Cet examen contient 11 questions sur un total de 23 pages (excluant cette page)			
	La pondération de cet examen est de 50 %			
	Vous devez répondre sur : ☒ le questionnaire ☐ le cahier ☐ les deux			
	Vous devez remettre le questionnaire : ☒ oui ☐ non			

L'étudiant doit honorer l'engagement pris lors de la signature du code de conduite.

Remarque : Les 6 premières questions portent sur les unités facultatives 8, 9, 10, 11 et 12. Les questions suivantes couvrent les unités obligatoires (unités 1 à 7).

Question N°1

Corrosion

(5 points)

Une tôle de zirconium de 10 cm^2 de surface exposée et de 1,00 mm d'épaisseur s'oxyde dans l'air à 825°C . L'oxyde qui se forme est le ZrO_2 et sa masse volumique est de 5700 kg/m^3 .

- a) Quel est le rapport de Pilling-Bedworth dans ce cas ? L'oxyde formé est-il couvrant ? Justifiez votre réponse. (3 points)

Calculs ou justifications :

Le rapport de Pilling-Bedworth est :

$$\Delta = \frac{(m_a)_{\text{ZrO}_2} \rho_{\text{Zr}}}{(m_a)_{\text{Zr}} \rho_{\text{ZrO}_2}} = \left[\frac{(91,224 + 2 \times 15,9994) \text{ g/mol}}{91,224 \text{ g/mol}} \right] \left[\frac{6510 \text{ kg/m}^3}{5700 \text{ kg/m}^3} \right] = 1,543$$

Ce rapport est entre 1 et 2,4. On peut conclure que l'oxyde est couvrant.

$\Delta =$ **1,543**

Oxyde couvrant (répondre par oui ou non) ?

Oui

- b) Quel(s) autre(s) paramètre(s) du matériau (Zr ou ZrO_2) inconnu(s) peut(peuvent) influencer la vitesse de formation de l'oxyde de zirconium à une température donnée ? (2 points)

On a trois critères d'aptitude à l'oxydation qui dépendent des matériaux (métal et oxyde). Deux sont déjà connus :

1. le rapport de Pilling-Bedworth qu'on a calculé en a);
2. la composition chimique de l'oxyde (ZrO_2).

Il ne reste que le troisième critère : **la stoechiométrie de l'oxyde.**

Question N°2

Propriétés magnétiques

(4 points)

Considérez le diagramme de phase du système A-B présenté à la figure 1; les phases α et β sont toutes deux ferromagnétiques. On dispose de deux alliages C_1 et C_2 dont les compositions molaires en élément A sont respectivement de 90 % et de 95 %.

Ces alliages peuvent être obtenus dans divers états après un chauffage de 2 heures à la température θ_1 :

- État 1 : Trempe jusqu'à la température ambiante.
- État 2 : État 1 suivi d'un vieillissement pouvant conduire à un durcissement structural et d'un écrouissage.
- État 3 : Refroidissement lent à l'équilibre.
- État 4 : État 3 suivi d'un écrouissage.

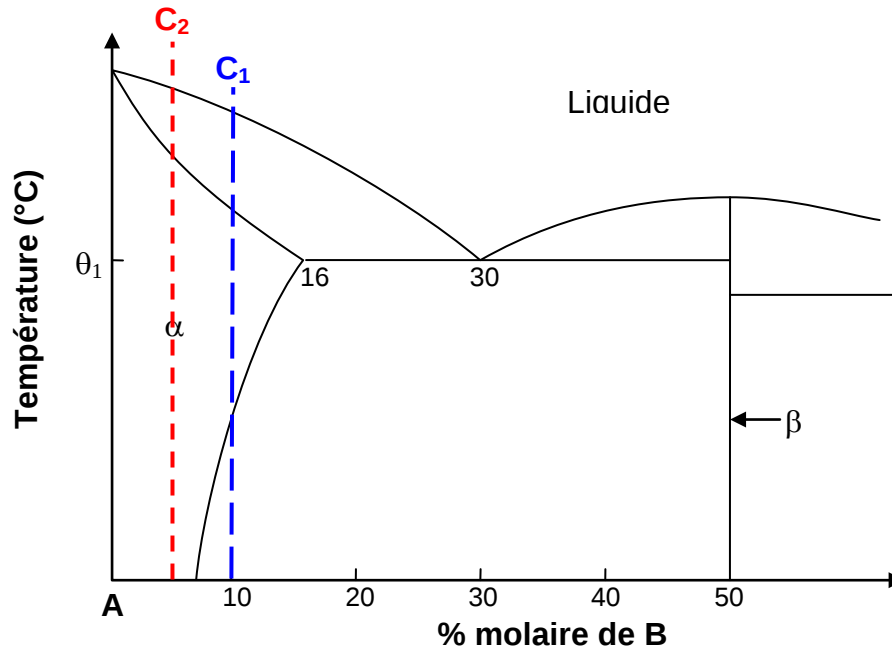


Figure 1 Diagramme d'équilibre A-B

Quel alliage (C_1 ou C_2) et dans quel état (1, 2, 3 ou 4) devrait permettre d'obtenir :

- a) le meilleur aimant doux ? Justifiez votre réponse. (2 points)

Dans un matériau ferromagnétique doux, on veut avoir un déplacement facile des parois de Bloch. Du point de vue microstructural, cela signifie qu'il y a peu d'obstacles au déplacement de ces parois. On recherchera un alliage monophasé (il ne contient pas de seconde phase ou de précipités) qui contiendra peu de dislocations (pas de trempe ni d'écrouissage).

C'est l'alliage de composition C_2 (il a une seule phase) à l'état 3 (état recuit avec un refroidissement lent jusqu'à la température ambiante) qui donnera la microstructure la plus favorable au déplacement des parois de Bloch.

Alliage :

C_2

État :

3

b) le meilleur aimant permanent ? *Justifiez votre réponse.*

(2 points)

Dans un matériau ferromagnétique dur, on veut entraver le plus possible le déplacement des parois de Bloch. Du point de vue microstructural, cela signifie qu'il y a beaucoup d'obstacles au déplacement de ces parois. On recherchera un alliage polyphasé (il a plusieurs phases ou des précipités) qui contiendra beaucoup de dislocations (ce qu'on peut obtenir à l'aide d'un écrouissage ou d'une trempe martensitique).

C'est l'alliage de composition C_1 (il est biphasé avec des précipités dus au durcissement structural) à l'état 2 (état écroui) qui donnera la microstructure qui possèdera le plus d'entraves au déplacement des parois de Bloch.

Alliage :	C_1	État :	2
-----------	-------	--------	---

Question N°3

Propriétés électriques

(1 point)

Deux phrases contenant des affirmations sur les propriétés électriques des matériaux vous sont proposées. Pour chaque phrase, on vous demande si :

1. cette phrase est totalement vraie;
2. les deux affirmations sont vraies, mais le «**parce que**» est faux;
3. la première affirmation est vraie, la deuxième est fausse;
4. la première affirmation est fausse, la deuxième est vraie;
5. les deux affirmations sont fausses.

Inscrivez le chiffre de votre réponse dans la case.

La résistance électrique d'un métal pur augmente quand la température croît parce que l'énergie cinétique, donc la vitesse instantanée des électrons, augmente.	1
La résistance électrique d'un cristal à liaisons covalentes diminue quand la température croît parce que l'énergie cinétique des électrons augmente avec la température.	1

Question N°4

Matières plastiques

(5 points)

Considérez les deux courbes, A et B, tracées à la figure 2 :

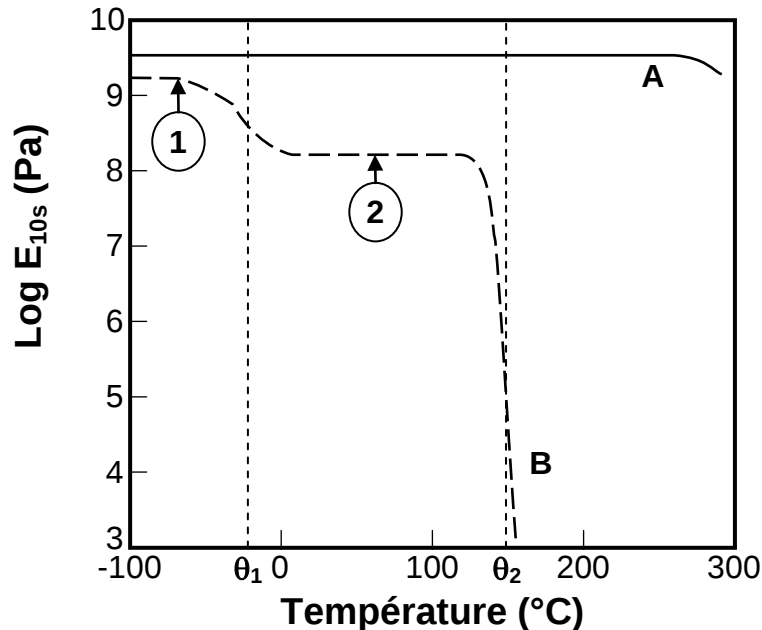


Figure 2 Variation du module d'élasticité en fonction de la température

- a) Quelle microstructure pouvez-vous associer au polymère représenté par la courbe A ?
Justifiez votre réponse. (1 point)

C'est un matériau thermodurcissable car le module de rigidité reste le même jusqu'à haute température (où il y a décomposition du polymère). Le polymère est constitué d'un réseau tridimensionnel de liaisons fortes.

- b) Quelle microstructure pouvez-vous associer au polymère représenté par la courbe B ?
Justifiez votre réponse. (1 point)

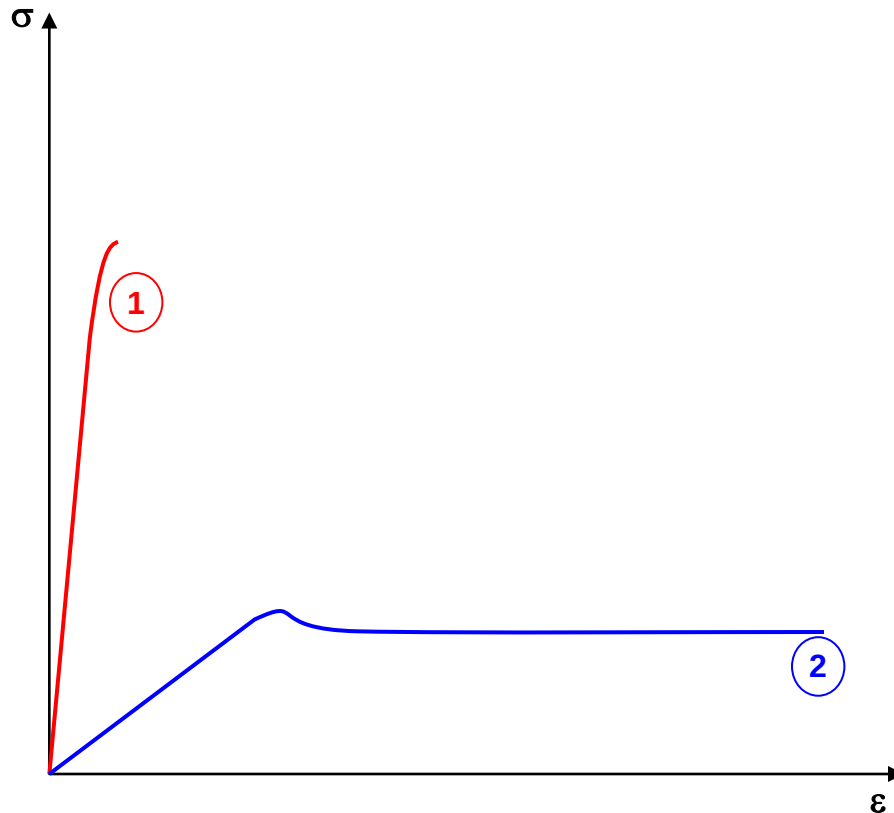
C'est un matériau thermoplastique car il a une température de fusion (θ_2) ainsi qu'une température de transition vitreuse (θ_1) qui sépare l'état vitreux, où la rigidité est élevée, de l'état caoutchoutique où le module de rigidité est d'un ordre de grandeur moins élevé que dans l'état vitreux. Le polymère est constitué de chaînes polymériques linéaires ou peu ramifiées.

- c) À quoi correspondent les températures θ_1 et θ_2 pour le polymère associé à la courbe B ?
(1 point)

θ_1 : température de transition vitreuse

θ_2 : température de fusion

- d) Tracez, sur le graphique suivant, l'allure des courbes de traction du polymère représenté par la courbe B que l'on obtiendrait à la suite d'essais réalisés en 1 et en 2. Identifiez clairement les courbes.
(2 points)



Question N°5

Céramiques

(5 points)

Trois tiges rectangulaires faites de zircon (ZrO₂) contenant 3 % molaire d'oxyde d'yttrium (Y₂O₃) sont frittées à haute température. Ces tiges possèdent les propriétés mécaniques suivantes :

tige	E (GPa)	R_{mt} [R_m en traction] (MPa)	K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	α (°C ⁻¹)	ν	γ (J/m ²)	Porosité P (%)
1	205	1500	12	$9,6 \times 10^{-6}$	0,31	350	0
2	nd*	1135	nd	$9,6 \times 10^{-6}$	0,31	nd	nd
3	nd	745	7	$9,6 \times 10^{-6}$	0,31	146	10

* nd : non disponible

- a) Quelle est la taille critique, a_c , des défauts contenus dans la tige 1 ? Indiquez l'(les) hypothèse(s) que vous faites pour le facteur géométrique. (1,5 point)

Calculs ou justifications :

À l'aide de la relation : $K_{IC} = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$ et, étant donné qu'on n'a pas de valeur pour le facteur géométrique α , on posera que $\alpha = 1$. On obtient comme valeur de taille critique des défauts:

$$a^* = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\alpha R_{mt}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{1(1500 \text{ MPa})} \right)^2 = 20,37 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$a_c =$	20,37 μm
---------	---------------------------------------

- b) Quelle est la porosité P de la tige 2 ? (1,5 point)

Calculs ou justifications :

À l'aide de la relation : $R_m = (R_m)_0 e^{-nP}$ où $(R_m)_0 = 1500 \text{ MPa}$ et, en sachant que pour la tige 3 dont la porosité $P = 0,1$ et $R_m = 745 \text{ MPa}$, on obtient comme valeur de n :

$$n = \frac{1}{P} \ln \left[\frac{(R_m)_0}{R_m} \right] = \frac{1}{(0,1)} \ln \left[\frac{1500 \text{ MPa}}{745 \text{ MPa}} \right] = 6,998$$

Avec la valeur de R_m pour la tige 2, on a :

$$P = \frac{1}{n} \ln \left[\frac{(R_m)_0}{R_m} \right] = \frac{1}{(6,998)} \ln \left[\frac{1500 \text{ MPa}}{1135 \text{ MPa}} \right] = 3,98 \times 10^{-2} \cong 4 \%$$

$P =$	4 %
-------	------------

- c) Quelle est la valeur et les unités du critère de résistance à la propagation des fissures R_4 pour la tige 3 ? (On suppose que: $f(\nu) = 1 - \nu$) (2 points)

Calculs ou justifications :

Le critère R_4 est donné par la relation :

$$R_4 = \frac{E\gamma_s}{R_m^2 f(\nu)} = \frac{[E_0(0,9P^2 - 1,9P + 1)]\gamma_s}{R_m^2 (1 - \nu)}$$

$$= \frac{[(205 \times 10^9 \text{ Pa})(0,9(0,1)^2 - 1,9(0,1) + 1)] \left(146 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}\right)}{(745 \times 10^6 \text{ Pa})^2 (1 - 0,31)} = 6,4 \times 10^{-5} \text{ m}$$

R_4 (avec les unités) =

64 μm

Question N°6

Composites

(5 points)

Pour une application donnée, vous avez le choix de réaliser une pièce en composite ayant une matrice d'époxy pouvant être renforcée par des fibres continues alignées soit de verre S, soit de carbone à haut module (h.m.). Le tableau suivant résume les propriétés mécaniques de ces composants.

Composant	E (GPa)	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
Époxy	4	65	90	4
Verre S	84	---	2800	nd*
Carbone (h.m.)	420	---	2300	nd

*nd = non disponible

Pour l'application considérée, vous avez déterminé que le composite « Carbone – Époxy » ayant une fraction volumique V_f de renfort égale à 10 % pouvait satisfaire le critère de rigidité imposé. Toutefois, une analyse de coûts révèle que le prix de la pièce sera trop élevé puisque le coût d'un renfort de carbone h.m. est 20 fois plus élevé que celui d'un renfort de verre S. Vous décidez alors de réaliser le composite en « Verre S – Époxy » en ajustant, comme il se doit, la fraction volumique de renfort pour obtenir la même rigidité recherchée.

- a) Quelle est la valeur recherchée du module d'Young du composite ? (1 point)

Calculs ou justifications :

En appliquant la règle des mélanges pour le module d'Young, on a :

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m = V_f E_f + (1 - V_f) E_m = (0,10)(420 \text{ GPa}) + (1 - 0,10)(4 \text{ GPa}) = 45,6 \text{ GPa}$$

Module d'Young =

45,6

GPa

- b) Quelle est la fraction volumique V_f de fibres de verre S que vous devrez utiliser pour obtenir cette rigidité ? (1 point)

Calculs ou justifications :

En réarrangeant la règle des mélanges pour le module d'Young et avec des fibres de verre où $E_f = 84 \text{ GPa}$, on obtient :

$$V_f = \frac{E_C - E_m}{E_f - E_m} = \frac{45,6 \text{ GPa} - 4 \text{ GPa}}{84 \text{ GPa} - 4 \text{ GPa}} = 52,0 \%$$

$V_f =$

52 %

- c) Lequel de ces composites (« Verre S – Époxy » ou « Carbone h.m. – Époxy ») se comportera de façon purement élastique jusqu'à sa rupture ? Justifiez **quantitativement** votre réponse. (2 points)

Calculs ou justifications :

Les fibres, de verre ou de carbone, ont un comportement purement élastique. Leur déformation élastique maximale A_f est respectivement :

pour le verre : $(A_f)_{\text{verre}} = \left(\frac{R_m}{E}\right)_{\text{verre}} = \left(\frac{2800 \text{ MPa}}{84 \text{ GPa}}\right) = 3,3 \times 10^{-2} = 3,3 \%$

et pour le carbone : $(A_f)_{\text{carbone}} = \left(\frac{R_m}{E}\right)_{\text{carbone}} = \left(\frac{2300 \text{ MPa}}{420 \text{ GPa}}\right) = 5,48 \times 10^{-3} = 0,548 \%$

La matrice en époxy a une limite d'élasticité $R_e = 65 \text{ MPa}$, alors :

$(A_e)_{\text{époxy}} = \left(\frac{R_e}{E}\right)_{\text{époxy}} = \left(\frac{65 \text{ MPa}}{4 \text{ GPa}}\right) = 1,625 \times 10^{-2} = 1,625 \%$

où $(A_e)_{\text{époxy}}$ est la déformation de la matrice d'époxy à la fin de son domaine de déformation élastique.

(espace disponible à la page suivante)

Le critère de défaillance d'un matériau composite est qu'il y a rupture du composite lorsqu'un de ses composants (fibre ou matrice) se rompt. Ici, seulement le composite « Carbone h.m. – Époxy » aura un comportement purement élastique jusqu'à la rupture: $(A_f)_{\text{carbone}} < (A_e)_{\text{époxy}}$.
Le composite « Verre S – Époxy » se déformera plastiquement avant sa rupture $((A_f)_{\text{verre}} > (A_e)_{\text{époxy}})$.

Composite :

« Carbone h.m.- Époxy »

d) Quelle est la résistance à la traction du composite « Carbone h.m. – Époxy » ? (1 point)

Calculs ou justifications :

On sait (voir la réponse à 6.c) que le composite « Carbone h.r. – Époxy » a un comportement purement élastique jusqu'à la rupture. De plus, sa déformation maximale est de $(A_f)_{\text{carbone}} = 0,548 \%$ (calculée en 6.c) et le module d'Young du composite est de $E_c = 45,6 \text{ GPa}$ (calculée en 6.a). En appliquant la loi de Hooke, on a:

$$(R_m)_c = E_c(A_f)_{\text{carbone}} = (45,6 \text{ GPa})(0,548 \%) = 249,9 \text{ MPa} \cong 250 \text{ MPa}$$

Résistance à la traction =

250 MPa

Remarque : Les questions suivantes couvrent les unités obligatoires (unités 1 à 7).

Question N°7 Propriétés mécaniques, durcissement et ténacité (9 points)

La figure 3 montre les courbes de traction de sept matériaux. Les essais ont eu lieu à la température ambiante et les pentes des segments droits des courbes ont été exagérées afin d'en faciliter l'interprétation.

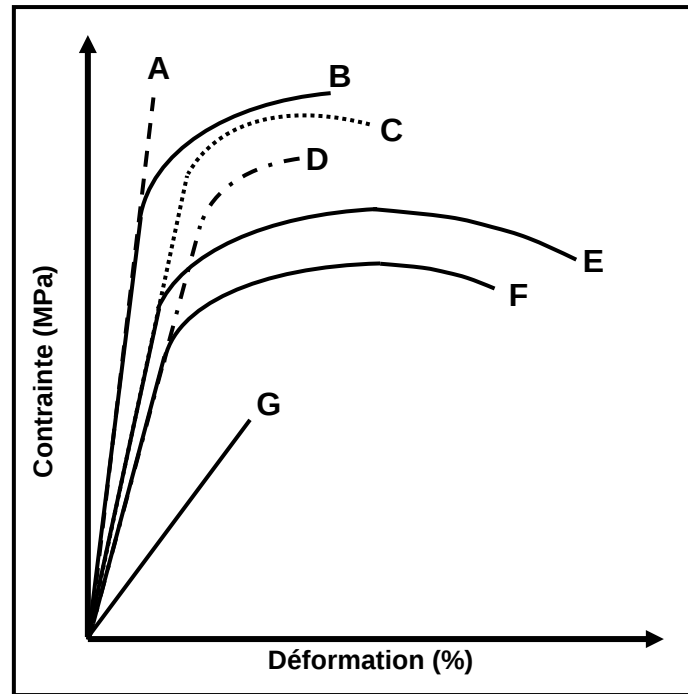


Figure 3 Courbes de traction de sept matériaux

- a) À l'aide des indices fournis, associez chacun des matériaux de la liste suivante à l'une des courbes de traction (A, B, ..., G) de la figure précédente. N'utilisez qu'une seule fois la même courbe. *Justifiez chacun de vos choix.* (5 points)

Liste des matériaux :

- Alumine
- Superaliage de nickel 718 recuit (à l'équilibre)
- Superaliage de nickel 718 durci par précipitation (durcissement structural)
- Acier 4340 recuit, de microstructure perlitique
- Acier 4340 trempé et revenu, de microstructure martensitique

Indices :

- I. L'alumine est le matériau le plus rigide.
- II. L'alumine n'emmagasine aucune énergie de déformation plastique.
- III. Le superalliage de nickel 718 recuit (à l'équilibre) est le plus ductile des matériaux.
- IV. Les deux aciers 4340 sont moins rigides que les superalliages de nickel.

Matériau : **Alumine**

Courbe de traction :

A

Justifications :

L'alumine est le matériau le plus rigide (indice I), c'est-à-dire que sa pente dans le domaine de déformation élastique est la plus élevée. De plus, cette courbe n'a pas de domaine de déformation plastique, donc ce matériau n'emmagasine pas d'énergie de déformation plastique comme l'indique l'indice II.

Matériau : **Superalliage de nickel 718 recuit (à l'équilibre)**

Courbe de traction :

E

Justifications :

Le superalliage de nickel 718 recuit (à l'équilibre) est le plus ductile des matériaux (indice III), c'est-à-dire que c'est le matériau qui a le plus grand allongement à la rupture. C'est le cas du matériau caractérisé par la courbe E. On remarque que la pente dans le domaine de déformation élastique (module d'Young E qui mesure la rigidité du matériau) est plus grande pour le super alliage de nickel 718 que pour les matériaux représentés par les courbes D, F et G.

Matériau : **Superalliage de nickel 718 durci par précipitation (durcissement structural)**

Courbe de traction :

C

Justifications :

Un matériau, indépendamment du traitement thermique qu'il a subi, possède le même module de rigidité. Comme le superalliage de nickel 718 recuit (à l'équilibre) est caractérisé par la courbe E, alors le même superalliage à la même pente dans son domaine de déformation élastique. Il ne peut s'agir que de la courbe C. On remarque d'ailleurs que le matériau caractérisé par cette courbe a une limite d'élasticité plus élevée que le même matériau à l'état recuit : ce qui montre bien qu'il a été durci.

Matériau : Acier 4340 recuit, de microstructure perlitique

Courbe de traction :

F

Justifications :

On sait :

1. que les deux aciers 4340 sont moins rigides que les superalliages de nickel (indice IV)
2. qu'un matériau, indépendamment du traitement thermique qu'il a subi, possède le même module de rigidité, c'est-à-dire la même pente dans son domaine de déformation élastique.

Les seules courbes pouvant satisfaire simultanément ces 2 conditions sont les courbes D et F. Comme l'acier à l'état recuit (perlitique) a une limite d'élasticité plus faible que le même acier à l'état trempé et revenu (martensitique) mais qu'il est le plus ductile des deux, alors la courbe F est celle de l'acier 4340 à l'état recuit.

Matériau : Acier 4340 trempé et revenu, de microstructure martensitique

Courbe de traction :

D

Justifications :

L'acier 4340 à l'état trempé et revenu a le même module d'Young que l'acier 4340 à l'état recuit. Comme l'acier à l'état trempé et revenu (martensitique) a une limite d'élasticité plus grande que le même acier à l'état recuit (perlitique), c'est la courbe D qui est celle de l'acier 4340 à l'état trempé et revenu. De plus, dans cet état, l'acier est moins ductile.

- b) Des essais de résilience Charpy sont effectués sur les matériaux A, C, F et G dont la courbe de traction est donnée à la figure 3. Associez l'une des courbes de la figure 4 à chacun de ces matériaux. Vous pouvez utiliser la même courbe plus d'une fois. Il peut y avoir plus d'une bonne réponse donc justifiez votre réponse. (4 points)

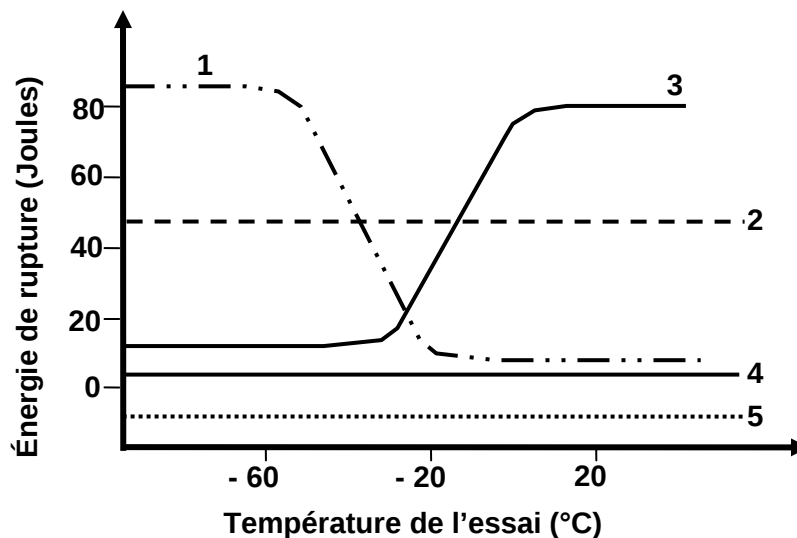


Figure 4 Courbes de résilience Charpy

Matériau : A

Courbe de résilience :	4
-------------------------------	----------

Justifications :

On remarque que les matériaux A et G sont fragiles à la température ambiante donc leur énergie de rupture doit être presque nulle lors d'un essai Charpy à 20°C. La courbe 1 et la courbe 4 possèdent cette caractéristique. La courbe 1 est cependant impossible puisque les matériaux ne gagnent pas en ténacité à basse température. C'est donc la courbe 4 qu'on peut associer au matériau A.

Matériau : C

Courbe de résilience :	2 (3 acceptable)
-------------------------------	-------------------------

Justifications :

On remarque que les matériaux C et F sont ductiles à la température ambiante. On peut donc faire l'hypothèse qu'ils auront une ténacité plus élevée que les matériaux A et G. Un tel comportement est représenté par les courbes 2 et 3.

Étant donné que l'aire sous la courbe de traction, une mesure semi-quantitative de la ténacité, est plus grande pour le matériau F que pour le matériau C, on pourrait choisir une énergie de rupture plus grande pour le matériau F que pour le matériau C.

D'où l'appariement de la courbe de traction C avec la courbe de résilience Charpy 2.

Matériau : E

Courbe de résilience :	3 (2 acceptable)
-------------------------------	-------------------------

Justifications :

On remarque que les matériaux C et F sont ductiles à la température ambiante. On peut donc faire l'hypothèse qu'ils auront une ténacité plus élevée que les matériaux A et G. Un tel comportement est représenté par les courbes 2 et 3.

Étant donné que l'aire sous la courbe de traction, une mesure semi-quantitative de la ténacité, est plus grande pour le matériau F que pour le matériau C, on pourrait choisir une énergie de rupture plus grande pour le matériau F que pour le matériau C.

D'où l'appariement de la courbe de traction F avec la courbe de résilience Charpy 3.

Matériau : G

Courbe de résilience :	4
-------------------------------	----------

Justifications :

On remarque que les matériaux A et G sont fragiles à la température ambiante donc leur énergie de rupture doit être presque nulle lors d'un essai Charpy à 20°C. La courbe 1 et la courbe 4 possèdent cette caractéristique. La courbe 1 est cependant impossible puisque les matériaux ne gagnent pas en ténacité à basse température. C'est donc la courbe 4 qu'on peut associer au matériau G.

Question N°8 Diagramme d'équilibre et durcissement (8 points)

Un superalliage de nickel peut être durci à l'aide d'un traitement de durcissement structural. Le principal élément d'alliage ajouté au nickel (Ni) pour obtenir un durcissement structural efficace est le niobium (Nb). Le diagramme d'équilibre Ni-Nb est donné à la figure 5.

- a) Ce superalliage de nickel contient 10 % de niobium. Quelle est la température minimale de mise en solution solide θ_{sv} de cet alliage ? (1 point)

$\theta_{sv} =$ **585°C ± 15°C**
(Il faut obtenir la température du solvus pour un alliage contenant 10% de Ni tel que montré sur le graphique)

- b) Après la mise en solution solide, nommez les autres étapes du traitement thermique nécessaires pour obtenir un durcissement structural efficace ? (2 points)

II. La trempe

III. Le vieillissement

- c) De façon générale, est-ce que le durcissement par solution solide est plus efficace que le durcissement structural ? Justifiez votre réponse. (1 point)

Le durcissement par solution solide est **moins efficace** car les **solutés** entravent moins le mouvement des **dislocations** que les **précipités**.

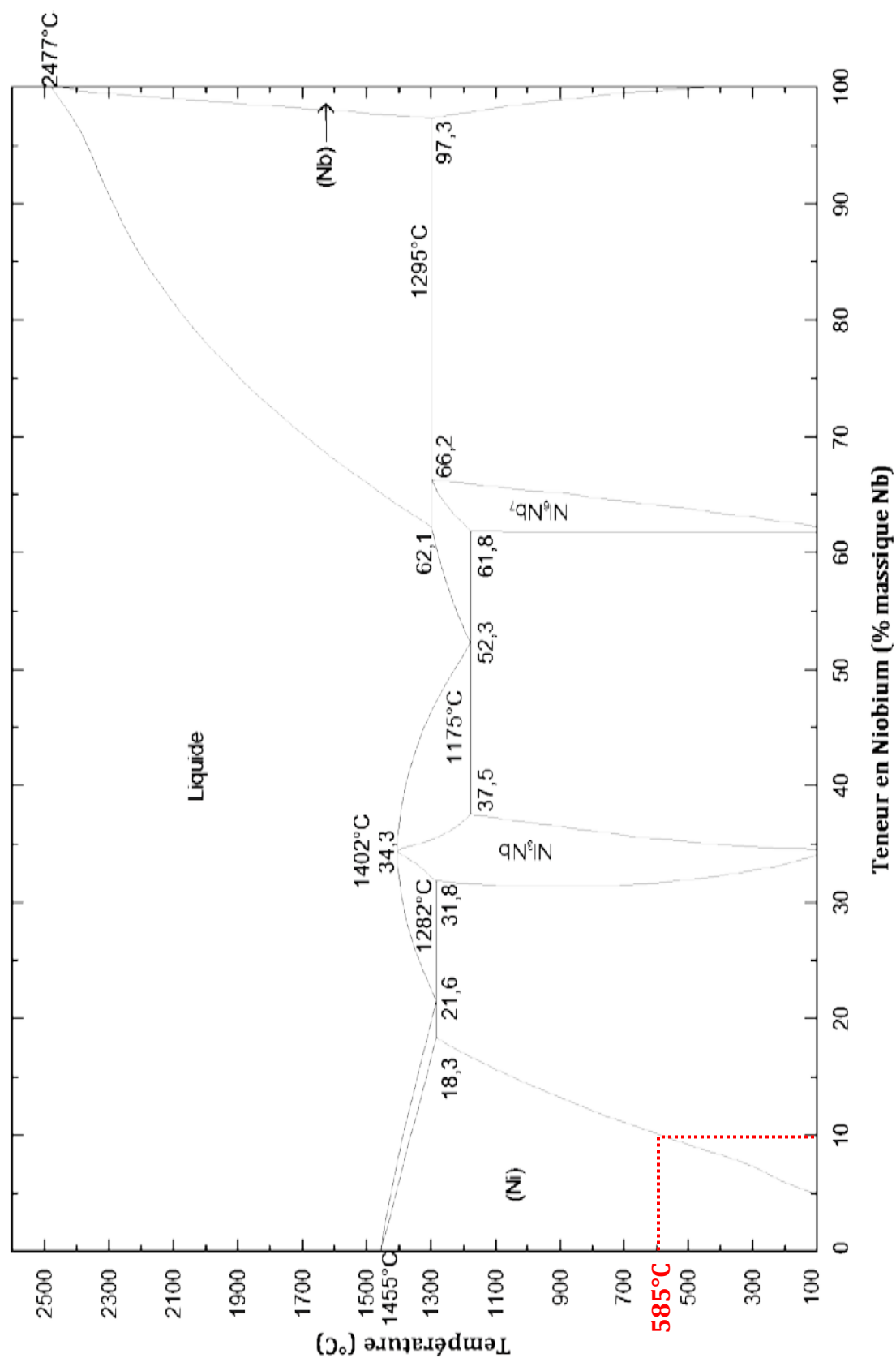


Figure 5 Diagramme d'équilibre nickel - niobium

- d) Identifiez une réaction eutectique en écrivant la réaction (sous la forme phase A + phase B + ... → phase C + phase D + ...) et la température de la réaction. Spécifiez aussi pour chaque phase à l'équilibre, sa composition chimique. (3 points)

Réaction :	Liquide → (Ni) + Ni₃Nb	
Température :	1282	°C

phase	composition de la phase (% massique Nb)
Liquide	21,6
(Ni)	18,3
Ni₃Nb	31,8

Ou

Réaction :	Liquide → Ni₃Nb + Ni₆Nb₇	
Température :	1175	°C

phase	composition de la phase (% massique Nb)
Liquide	52,3
Ni₃Nb	37,5
Ni₆Nb₇	61,8

- e) Quelle est la solubilité maximale du nickel dans la phase la plus riche en niobium ? (1 point)

On peut dissoudre au plus 2,7 % massique de Ni dans la phase (Nb).
Calculs ou justifications :
Le diagramme d'équilibre montre que l'on peut dissoudre au maximum 2,7 % de Ni (100 % Nb - 97,3 % Nb = 2,7 % Ni) dans la phase riche en niobium, (Nb) .

Question N°9 Matériaux sous contrainte (6 points)

Les propriétés mécaniques d'un alliage de titane sont données dans le tableau suivant.

E (GPa)	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	K_{IC} (MPa·m^½)
115	827	865	15	46

On fabrique un assemblage soudé, montré à la figure 6, à partir de 2 tubes d'épaisseur e de 4 mm faits de cet alliage. Les propriétés mécaniques de la soudure sont les mêmes que celles de l'alliage.

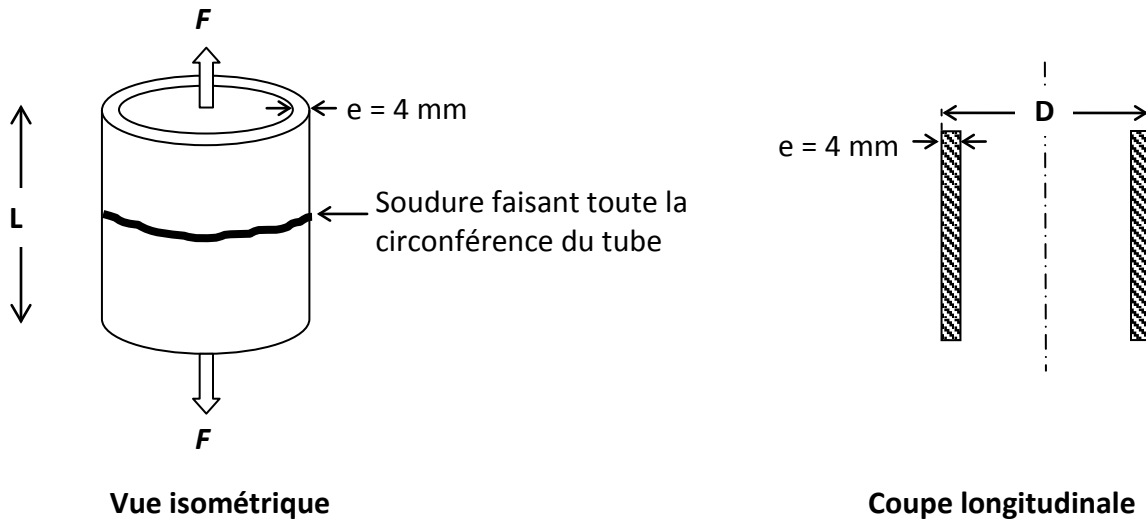


Figure 6 Schéma de l'assemblage soudé

En faisant les calculs nécessaires, répondez aux questions suivantes :

- a) Une force longitudinale F de 2 000 kN est répartie sur toute la section du tuyau. Quel est le diamètre extérieur minimum, $D_{\min}$, que doit avoir l'assemblage pour que la déformation demeure réversible ? (2 points)

Calculs ou justifications :

Pour que la déformation soit réversible, il faut que $\sigma \leq R_e$ et comme, par définition, $\sigma = \frac{F}{S_0}$, on a :

$$\frac{F}{R_e} \leq S_0 \quad [\text{eq. 1}]$$

Pour le tuyau, la section S_0 est :

$$S_0 = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d_i^2}{4} = \frac{\pi}{4} (D^2 - d_i^2) \text{ avec } d_i = D - 2e$$

où d_i est le diamètre intérieur et e , l'épaisseur du tuyau.

On a donc :

$$S_0 = \pi e (D - e) \quad [\text{eq. 2}]$$

En reportant ce résultat dans l'équation 1, on a :

$$D \geq \frac{F}{\pi e R_e} + e$$

alors :

$$D_{\min} = \frac{(2 \times 10^6 \text{ N})}{\pi (4 \times 10^{-3} \text{ m}) \left(827 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)} + (4 \times 10^{-3} \text{ m}) = 196,45 \text{ mm}$$

$D_{\min} =$ **196,45 mm**

- b) Cet assemblage est inséré dans une enceinte fermée de 1 m de long. Un jeu minimal de 0,05 mm doit exister entre l'assemblage et l'enceinte lorsque la force de 2 000 kN est appliquée. Quelle longueur maximale initiale, L_0 (mesurée avant d'appliquer la force de 2 000 kN), doit avoir l'assemblage soudé pour respecter ce critère ? (2 points)

Calculs ou justifications :

La déformation élastique maximale qu'on peut tolérer est :

$$\varepsilon_{max} = \frac{R_e}{E} \quad [\text{éq. 1}]$$

Comme, par définition, la déformation est :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{L_f}{L_0} - 1 \quad [\text{éq. 2}]$$

En combinant les équations [1] et [2], on a :

$$L_0 = \frac{L_f}{\left(\frac{R_e}{E} + 1\right)}$$

Comme la longueur finale, L_f , sous une force de 2 000 kN, doit être de :

$$L_f = 1\,000\text{ mm} - 0,05\text{ mm} = 999,95\text{ mm}$$

on a donc :

$$L_0 = \frac{999,95\text{ mm}}{\left(\frac{827 \times 10^6\text{ Pa}}{115 \times 10^9\text{ Pa}} + 1\right)} = 992,81\text{ mm}$$

$L_0 =$

992,81 mm

- c) Au sein de la soudure, on retrouve des défauts débouchant assimilables à des fissures tel que schématisé à la figure suivante. Pour des fins de sécurité, vous décidez donc d'augmenter l'épaisseur de la paroi de façon à ce que la contrainte maximale n'atteigne que 700 MPa. Dans ces conditions de chargement, quelle est la profondeur maximale, a_{max} , des défauts pour éviter tout risque de rupture brutale de l'assemblage soudé ? (2 points)

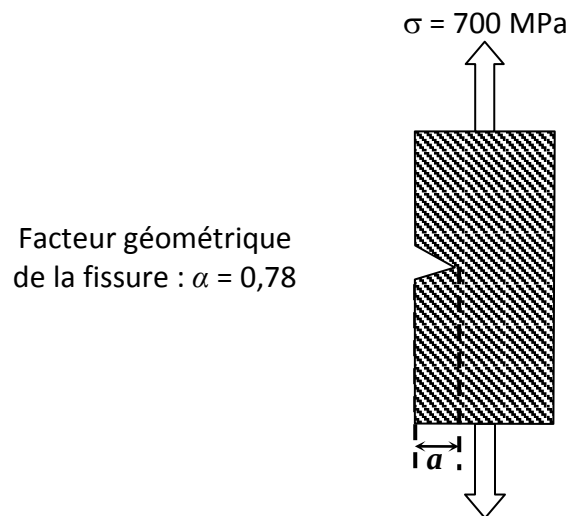


Figure 7 Vue agrandie d'une section de paroi fissurée

Calculs ou justifications :

Il y aura rupture brutale si le facteur d'intensité de contrainte, K , atteint le facteur critique d'intensité de contrainte K_{IC} du matériau, soit $46 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Comme $K = \alpha\sigma\sqrt{\pi a}$, alors : $a = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K}{\alpha\sigma} \right)^2$

Pour $K = K_{IC}$, on $a = a_{max}$

On obtient alors :

$$a_{max} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\alpha\sigma} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{46 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{(0,78)(700 \text{ MPa})} \right)^2 = 2,259 \text{ mm} \cong 2,26 \text{ mm}$$

$a_{max} =$

2,26

mm

Question N°10 **Propriétés en service** **(5 points)**

Une aube de turbine hydroélectrique est sujette à une contrainte monotone en traction de 500 MPa. À cette sollicitation s'ajoute une contrainte cyclique de 25 MPa qui atteint son maximum à toutes les 0,01 secondes. Cette aube possède des défauts, assimilables à des fissures bandes ($\alpha = 1,12$), dont la profondeur initiale peut atteindre 3 millimètres. Les paramètres qui caractérisent la propagation des fissures dans l'aube sont les suivants :

- $\Delta K_{seuil} = 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
- $K_C = 39 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,
- Paramètres de la loi de Paris (pour une vitesse d'avancée des fissures da/dN exprimée en mm/cycles) : $C = 3,7 \times 10^{-14}$ et $n = 3$.

En utilisant les informations pertinentes, répondez aux questions suivantes et justifiez vos réponses avec des calculs.

- a) Quel est le rapport de contrainte qui caractérise ce chargement ? (1 point)

Calculs ou justifications :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{500 \text{ MPa}}{500 \text{ MPa} + 25 \text{ MPa}} = 0,9524$$

rapport de contrainte =

0,9524

- b) Quelle est l'amplitude de contrainte de ce chargement ? (1 point)

Calculs ou justifications :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \frac{525 \text{ MPa} - 500 \text{ MPa}}{2} = 12,5 \text{ MPa}$$

amplitude de contrainte =

12,5 MPa

- c) Quelle est la fréquence de ce chargement cyclique ? (1 point)

Calculs ou justifications :

Par définition, la fréquence f est le nombre de cycles par seconde :

$$f = \frac{1 \text{ cycle}}{0,01 \text{ seconde}} = 100 \text{ Hz}$$

fréquence =

100 Hz

d) Y a-t-il une propagation des fissures sous ce chargement cyclique ? (2 points)

Calculs ou justifications :

Deux réponses ont été acceptées :

1. Il y aura une propagation de la fissure à chaque cycle de chargement si la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK est supérieure au seuil de propagation ΔK_{seuil} .

$$\text{Ici, } \Delta K = \alpha(\Delta\sigma)\sqrt{\pi a} = (1,12)(25 \text{ MPa})\sqrt{\pi(3 \times 10^{-3} \text{ m})} = 2,72 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$\text{et } \Delta K_{seuil} = 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Il n'y aura pas de propagation de fissure puisque $\Delta K < \Delta K_{seuil}$.

Propagation des fissures : **NON**

2. Il y a une rupture brutale de la pièce au premier chargement. En effet, on constate que $K_{max} > K_c$.

$$K_{max} = \alpha\sigma_{max}\sqrt{\pi a} = (1,12)(525 \text{ MPa})\sqrt{\pi(3 \times 10^{-3} \text{ m})} = 57,1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} > K_c$$

$$\text{car } K_c = 39 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Propagation des fissures : **OUI**, dans le sens d'une rupture brutale.

propagation des fissures (répondre par oui ou non) :

Question N°11 **Notions théoriques diverses** **(7 points)**

Dites si les affirmations suivantes sont vraies (V) ou fausses (F).

Attention : Une mauvaise réponse annule une bonne réponse.

Pour diminuer la concentration de contrainte dans un congé de raccordement, il faut diminuer le rayon du congé.	F
La direction [111] fait partie de la famille des directions denses des structures cubiques à faces centrées (C.F.C.).	F
Les premières dislocations se mettent en mouvement lorsque la résistance à la traction, R_m , d'un métal est atteinte.	F
Une augmentation de la taille des grains permet de diminuer la vitesse de fluage des matériaux métalliques.	V
Une augmentation de la taille des grains permet de durcir un matériau sans compromettre sa ténacité.	F
La température de transition ductile-fragile des métaux est indépendante de la vitesse de l'essai de résilience Charpy.	F
Le revenu permet d'augmenter la ténacité de la martensite.	V

Bonne chance! Bonnes vacances!

Myriam Brochu, responsable du cours
Richard Lacroix, chargé de cours

Formulaire général

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)]$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

$$R_{th} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{a_0}}$$

$$1 = \frac{hx}{na} + \frac{ky}{nb} + \frac{lz}{nc}$$

$$\mathbf{r} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c}$$

$$\sigma_y = \sigma_{nom} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cos \chi$$

$$\tau_{th} = \frac{G}{2\pi} \frac{b}{a}$$

$$R_{e_{0,2}} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

$$\ell_c = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$$

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{Q_0}{kT} \right)$$

$$\varepsilon_{vel} = \frac{\sigma_t}{K_2} \left[1 - \exp \left(-\frac{K_2 t}{\eta_2} \right) \right]$$

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n$$

$$m = \frac{Ai_{corr} t}{nF}$$

$$\Delta = \frac{(m_a)_{ox} \rho_M}{(m_a)_M \rho_{ox}}$$

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

$$\sigma = (n_e e \mu_e + n_t e \mu_t)$$

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left(\frac{-E_g}{2kT} \right)$$

$$E = E_0 (0,9 P^2 - 1,9 P + 1)$$

$$R_m = (R_m)_0 e^{-nP}$$

$$\Delta\theta^* = R_1 = \frac{R_m \cdot f(v)}{E\alpha}$$

$$R_3 = \frac{E}{R_m^2 \cdot f(v)}$$

$$R_4 = \frac{E\gamma_s}{R_m^2 \cdot f(v)} = \gamma_s R_3$$

$$(R_m)_c = V_f (R_m)_f + (1 - V_f) \sigma_m$$

$$(R_m)_C = V_f \sigma_f + (1 - V_f) (R_m)_m$$

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m$$

$$E_C \cong \frac{3}{8} V_f E_f + V_m E_m$$

$$(R_m)_C = kV_f (R_m)_f + V_m \sigma_m$$

Page 23 de 23