



POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

Questionnaire
examen final

MTR1035C

CORRIGÉ

Sigle du cours

<i>Identification de l'étudiant(e)</i>				Réservé
Nom :		Prénom :		Q1 /10
Signature :		Matricule :	Groupe :	Q2 /9
Sigle et titre du cours		Groupe		Q3 /12
MTR1035C Matériaux		01		Q4 /4
Professeurs		Local		Q5 /5
Richard Lacroix		A-476		Q6 /5
Trimestre		Téléphone		Q7 /5
Hiver 2012		4771		/50
Jour	Date	Durée	Heures	
Vendredi	27 avril 2012	2 h 30	13 h 30 - 16 h 00	
Documentation		Calculatrice		
<input checked="" type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toute <input type="checkbox"/> Voir directives particulières		<input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toutes <input checked="" type="checkbox"/> Non programmable		
Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits.				
Directives particulières				
1. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de 50 points. 2. 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. 3. Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs. 4. Vous avez, en annexe, le formulaire général et des graphiques de référence. Vous pouvez détacher ces pages du questionnaire.				
Important	Cet examen contient 7 questions sur un total de 18 pages. (excluant cette page)			
	La pondération de cet examen est de 50 %			
	Vous devez répondre sur : <input checked="" type="checkbox"/> le questionnaire <input type="checkbox"/> le cahier <input type="checkbox"/> les deux			
	Vous devez remettre le questionnaire : <input checked="" type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non			

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

Question N°1 Microstructures et traitements thermiques (10 points)

À la Figure 1 est présentée une photo typique d'un acier doux ayant subi une normalisation. En vous aidant de cette photo, du diagramme d'équilibre fer-carbone, de la courbe de transformation – temps – température (TTT) et de la courbe de revenu fournies en annexe, répondez aux questions suivantes.

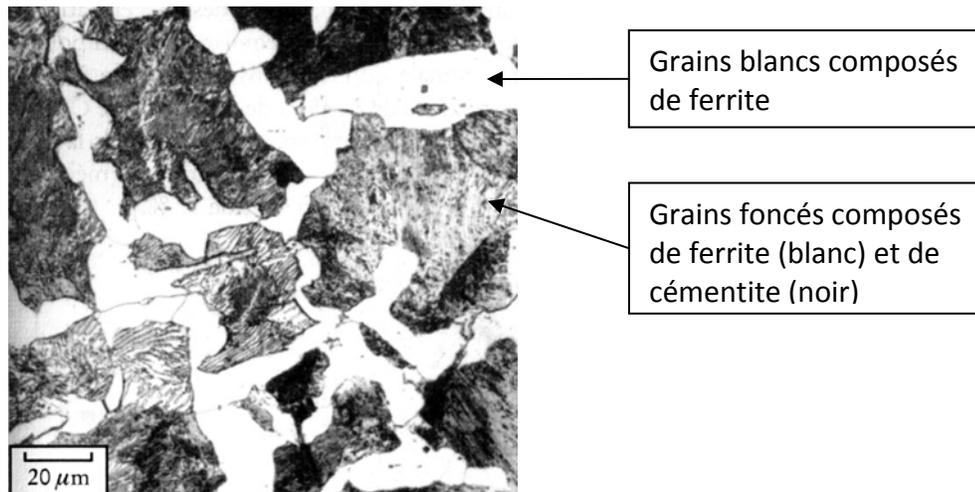


Figure 1 : Microstructure d'un acier doux. La fraction surfacique occupée par les grains de ferrite (grains blancs) est de 25 %.

- a) Comment se nomme le constituant eutectoïde d'équilibre représenté sur la Figure 1 par les grains foncés composés de cémentite et de ferrite ? (1 point)

Nom du constituant : perlite

- b) Sachant que cet acier a été refroidi à l'équilibre, calculez sa teneur en carbone. Un diagramme d'équilibre fer-carbone est fourni en annexe. (2 points)

% masse de carbone = **0,605** % C

Calculs :

Dans la légende de la figure 1, on nous précise que la proportion du constituant ferrite primaire est de 25 %. Cette ferrite primaire ($\alpha_{primaire}$) se forme avant la réaction eutectoïde ($\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$) à 723 °C. Alors : $f_{\alpha_{primaire}} = f_{phase \alpha_{724 C}}$

Il nous suffit donc de trouver la composition C_0 de notre acier contenant 25 % de phase α à 724 C. À l'aide de la règle des segments inverses ($f_{\alpha} = \frac{C_{\gamma} - C_0}{C_{\gamma} - C_{\alpha}}$) et du diagramme d'équilibre de la figure A1 en annexe (p.17), on a, pour un acier de composition C_0 à 724 C :

$$C_0 = C_{\gamma} - f_{\alpha}(C_{\gamma} - C_{\alpha}) = 0,8 \%C - (0,25)(0,8 \%C - 0,02 \%C) = 0,605 \%C$$

- c) La limite d'élasticité de cet acier normalisé n'est pas suffisante pour vos besoins. D'après quelques recherches bibliographiques, vous pourriez atteindre la limite d'élasticité désirée en obtenant une microstructure martensitique revenue. En vous aidant du diagramme Transformation –Temps – Température (TTT) et de la courbe de revenu fournis en annexe, décrivez dans le tableau 1 les trois étapes du traitement thermique qui permettent d'avoir une **martensite revenue** d'une **dureté de 45 HRC** (3 points)

Tableau 1 : Étapes du traitement thermique pour obtenir une martensite revenue de 45 HRC

Nom de l'étape	Température	Durée
austénitisation	$A_3 + 50\text{ °C} = 830\text{ °C}$	Selon la taille de la pièce mais au moins 30 minutes.
trempe	Sous M_{90} (125 °C) mais typiquement à l'eau (à environ 20 °C)	instantanée
revenu	485 °C	1 heure

- d) Quel impact aura le traitement thermique effectué en c) sur la rigidité et sur l'allongement à la rupture de l'acier ? Comparez les propriétés de l'acier traité thermiquement à celles de l'acier normalisé en répondant par : augmente, diminue ou n'est pas modifié. (2 points)

Effet sur la rigidité : n'est pas modifié

Effet sur l'allongement à la rupture: diminue

- e) Après plusieurs tentatives de traitement thermique, vous remarquez qu'il est difficile d'obtenir la dureté désirée. Une observation au microscope optique montre que la microstructure obtenue n'est pas 100 % martensitique. On peut y voir de la ferrite et de la bainite. Quelle étape du traitement thermique a été déficiente ? Justifiez votre réponse. (2 points)

Nom de l'étape déficiente : la trempe

Explications :

Pour éviter toute transformation autre que la transformation martensitique dans une pièce faite en acier 1055, il faut la refroidir en-dessous de la température M_{90} (125 °C) en moins d'une (1) seconde. Il est difficile de tremper aussi rapidement en pratique car l'intérieur de la pièce se refroidit plus lentement que sa surface et risque d'être le siège de la transformation perlitique qui nous donne, selon la vitesse de refroidissement, de la bainite ou de la perlite.

Question N°2 Architecture atomique et glissement (9 points)

Le titane a une structure cristalline dépendante de la température. Pour des températures inférieures à 882 °C il adopte une structure hexagonale compacte, HC, tandis que pour des températures supérieures à 882 °C il adopte une structure cubique centrée, CC.

a) Comment se nomme la transformation de phase qui a lieu au sein du titane à 882 °C ? (1 point)

Nom de la transformation de phase : Transformation allotropique

b) Calculez la compacité du titane lorsque celui-ci adopte une structure CC. (3 points)

Compacité du titane de structure CC = 0,68

Calculs :

La compacité est le rapport du volume occupé par les atomes (assimilés à des sphères dures de rayon r) sur le volume total de la maille. Pour une maille cubique centrée dont le paramètre de la maille est la longueur de son arête a, les atomes sont tangents selon la grande diagonale du cube (direction <111>) : $a\sqrt{3} = 4r$

De plus, il y a 2 atomes en propre dans une maille cubique centrée ($\frac{1}{8}$ en propre à chacun des 8 sommets de la maille cubique et 1 au centre de la maille), alors, la compacité du titane cubique centré C_{Ti-cc} est :

$$C_{Ti-cc} = \frac{\text{Volume des atomes}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{2 \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)}{a^3} = \frac{2 \left(\frac{4}{3} \pi \left(\frac{a\sqrt{3}}{4} \right)^3 \right)}{a^3} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} \approx 0,68$$

c) En théorie, est-ce que le titane de structure hexagonale compacte est plus compact, moins compact ou de compacité égale à celui de structure cubique centré ? Expliquez. (2 points)

Compacité de la structure hexagonale compacte (plus compacte, moins compacte ou égale) :

plus compacte

Explications (des calculs ne sont pas nécessaires) :

La structure hexagonale compacte est un empilement compact de plans denses tout comme la structure cubique à faces centrées. Dans chaque structure, un atome (sphère dure) est tangent à 12 autres atomes. Seule la séquence d'empilement de ces plans est différente (séquence A-B-A-B... pour la structure hexagonale compacte et A-B-C-A-B-C-A... pour la structure cubique à faces centrées). Ces deux structures ont la même compacité : $\frac{\pi\sqrt{2}}{6} \approx 0,74$

La structure cubique centrée est moins compacte car chaque atome (sphère dure) est tangent à 8 autres atomes seulement.

d) Proposez un système de glissement (plan et direction) favorisé pour le titane de structure CC.

(2 points)

Plan de glissement	Direction de glissement	D'autres combinaisons de plans {110} et de directions <111> sont possibles.
(110)	[1$\bar{1}$1]	

e) La limite d'élasticité du titane peut être augmentée en ajoutant des éléments d'alliage permettant de réaliser un traitement de durcissement structural. Pourquoi les précipités formés lors du durcissement structural permettent-ils d'augmenter la limite d'élasticité du titane ?
(1 point)

Explications :

Parce que ces précipités ont une taille et un espacement contrôlés de façon à ce qu'ils entravent efficacement le déplacement des dislocations en faisant augmenter leur cission critique de glissement.

Question N°3 Comportement mécanique en service (12 points)

Pour la fabrication d'essieux de planche à roulettes vous avez le choix entre un aluminium de fonderie A et un aluminium corroyé B. Les propriétés mécaniques de ces deux alliages d'aluminium sont détaillées dans le tableau 2. L'aluminium de fonderie coûte la moitié du prix, en poids (\$/kg), que l'aluminium corroyé. Les deux aluminiums ont la même masse volumique.

Tableau 2 : Propriétés mécaniques de deux alliages d'aluminium

Alliage	aluminium de fonderie A	aluminium corroyé B
Limite d'élasticité (MPa)	210	276
Résistance à la traction (MPa)	280	310
Allongement à la rupture (%)	3	20
Ténacité (MPa·m ^½)	10	29

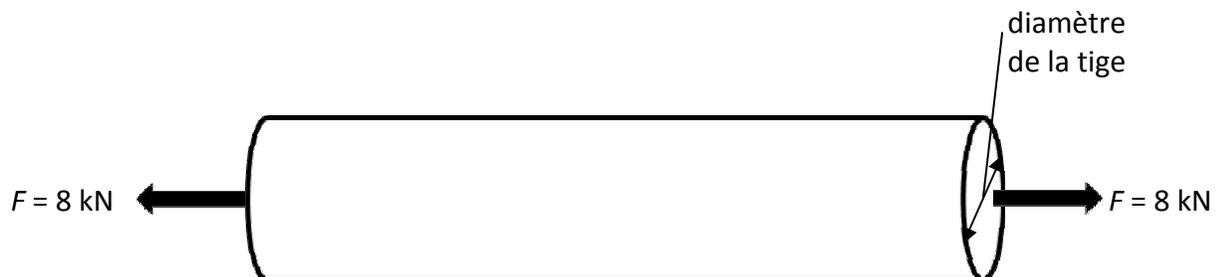


Figure 2 : Schéma simplifié des efforts que doit supporter l'essieu.

- a) Pour les planches à roulettes pour enfants, il faut choisir l'option la moins coûteuse entre l'alliage A et l'alliage B. Le critère mécanique à respecter est de n'avoir aucune déformation plastique. Pour vous aider à choisir, les sollicitations de l'essieu sont simplifiées par le dessin de la Figure 2. Le diamètre extérieur de la tige peut varier de 10 mm à 5 mm à condition bien évidemment de respecter le critère mécanique. Choisissez l'alliage qui permettra la fabrication la plus économique et donnez le diamètre minimum que devra avoir la tige pour cet alliage particulier. Justifiez vos réponses par des calculs. (3 points)

Alliage pour une planche à roulette pour enfant :	A
Diamètre minimum de la tige pour respecter le critère mécanique :	6,96 mm

Calculs :

Pour respecter le critère mécanique imposé, il ne faut pas que la contrainte maximale dépasse la limite d'élasticité de l'alliage. Alors, pour chaque alliage, on a :

$$(\sigma_{max})_{alliage} = (R_{e0,2})_{alliage} = \frac{F}{S} \quad (\text{équation 1})$$

où F est la force appliquée et S , la section de la tige d'alliage.

Pour respecter le critère économique, il faut calculer le coût $C_{\$}$ de la tige cylindrique de section S et de longueur L faite en alliage de masse volumique ρ et dont le prix au kilogramme est $P_{\$}$ (\$/kg) : $C_{\$} = \rho(SL)P_{\$}$ (équation 2)

En résolvant l'équation 1 pour S et en le reportant dans l'équation 2, on a, pour une tige d'alliage donnée : $C_{\$} = \rho \left(\frac{F}{R_{e0,2}} \right) LP_{\$}$ (équation 3)

Nous pouvons maintenant comparer les coûts de fabrication des tiges qui respecteront les 2 critères en n'oubliant pas :

1. que le prix par kilogramme de l'alliage B est le double de celui de l'alliage A : $P_{\$,B} = 2P_{\$,A}$
2. que les alliages ont la même masse volumique ρ
3. que les tiges ont la même longueur L et qu'elles sont soumises à la même force F

$$\frac{C_{\$,A}}{C_{\$,B}} = \frac{\rho \left(\frac{F}{(R_{e0,2})_A} \right) LP_{\$,A}}{\rho \left(\frac{F}{(R_{e0,2})_B} \right) LP_{\$,B}} = \frac{(R_{e0,2})_B}{2(R_{e0,2})_A} = \frac{276 \text{ MPa}}{2(210 \text{ MPa})} = 0,657$$

Le coût de fabrication de la tige est plus faible si elle est faite en alliage A.

Il reste à vérifier le critère de diamètre permis : $5 \text{ mm} < d < 10 \text{ mm}$. Comme notre tige est un cylindre plein de diamètre d , on a : $S = \frac{\pi d^2}{4}$ (équation 4). Les équations 1 et 4 nous donnent :

$$d = 2 \left(\sqrt{\frac{F}{\pi(R_{e0,2})}} \right) = 2 \left(\sqrt{\frac{8 \times 10^3 \text{ N}}{\pi(210 \times 10^6 \text{ N/m}^2)}} \right) = 6,96 \times 10^{-3} \text{ m}$$

- b) Pour les planches à roulettes vouées aux sports extrêmes l'essieu doit absolument avoir 10 mm de diamètre. Il ne doit pas se rompre ni se déformer plastiquement lorsqu'il est soumis à une force de 8 kN (Figure 2). De plus, des égratignures d'une profondeur de 3 millimètres ne doivent pas compromettre son intégrité mécanique. Quel alliage d'aluminium (A ou B) recommandez-vous d'utiliser pour fabriquer les essieux de haute résistance ? Faites l'hypothèse que les égratignures sont comparables à des fissures caractérisées par un facteur géométrique, α , de 1,15. Justifiez votre choix par des calculs. (3 points)

Alliage pour une planche à roulette de haute résistance :

B

Calculs :

Il faut vérifier si des tiges de 10 mm de diamètre soumise à une force de 8 kN peuvent tolérer la présence de fissures de 3 mm de long, caractérisée par un facteur géométrique α de 1,15. Le facteur d'intensité de contrainte est :

$$K = \alpha \sigma \sqrt{\pi a} = (1,15) \left(\frac{4(8 \times 10^3 \text{ N})}{\pi(10 \times 10^{-3} \text{ m})^2} \right) \sqrt{\pi(3 \times 10^{-3} \text{ m})} = 11,37 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Ce facteur d'intensité de contrainte est plus grand que le facteur critique d'intensité de contrainte qui est la mesure de la ténacité de l'alliage A mais plus petit que celui de l'alliage B.

Il reste donc à vérifier si la contrainte dans la tige est inférieure à la limite d'élasticité car on ne veut pas de déformation plastique. Ici :

$$\sigma_{\text{appliquée}} = \frac{4F}{\pi d^2} = \frac{4(8 \times 10^3 \text{ N})}{\pi(10 \times 10^{-3} \text{ m})^2} = 101,9 \text{ MPa}$$

On remarque que la contrainte appliquée est inférieure à la limite d'élasticité de l'alliage B (276 MPa).

On choisit donc l'alliage B pour fabriquer la planche à roulette de haute résistance.

- c) Les sollicitations mécaniques que subissent les essieux sont plus complexes que celles schématisées à la Figure 2. De la flexion fait en sorte que la sollicitation est plutôt caractérisée par une contrainte cyclique qui oscille entre 100 MPa et 250 MPa. En utilisant ces nouvelles données mécaniques ainsi que la courbe d'endurance de la Figure 3, combien d'heures d'utilisation pourrait supporter un essieu fabriqué en **alliage B** avant qu'il y ait rupture par fatigue ? Faites l'hypothèse qu'il n'y a pas d'égratignures de surface. Considérez que l'essieu est soumis à 1 cycle de chargement par minute. Justifiez votre réponse par des calculs. (4 points)

Nombre d'heures d'utilisation avant la rupture par fatigue d'un essieu de 10 mm de diamètre en alliage B :	9 372	heures
---	--------------	---------------

Calculs :

Il faut d'abord calculer le rapport de contrainte qui caractérise ce chargement :

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{100 \text{ MPa}}{250 \text{ MPa}} = 0,4$$

Ensuite, il faut calculer l'amplitude de contrainte du chargement :

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2} = 75 \text{ MPa}$$

Sur le graphique de la figure 3, on fait une lecture de l'abscisse sur la courbe $R = 0,4$ avec pour ordonnée 75 MPa. On obtient :

$$N = 10^{5,75} \text{ cycles}$$

Sachant que la fréquence de chargement, f , est de 1 cycle à toutes les 60 secondes ($\approx 0,0167 \text{ Hz}$), on calcule le nombre d'heures d'utilisation à la rupture :

$$\text{Nombre d'heures} = \frac{N}{f} = \frac{(10^{5,75} \text{ cycles})(60 \text{ sec/cycle})}{3600 \text{ sec/heure}} = 9\,372 \text{ heures}$$

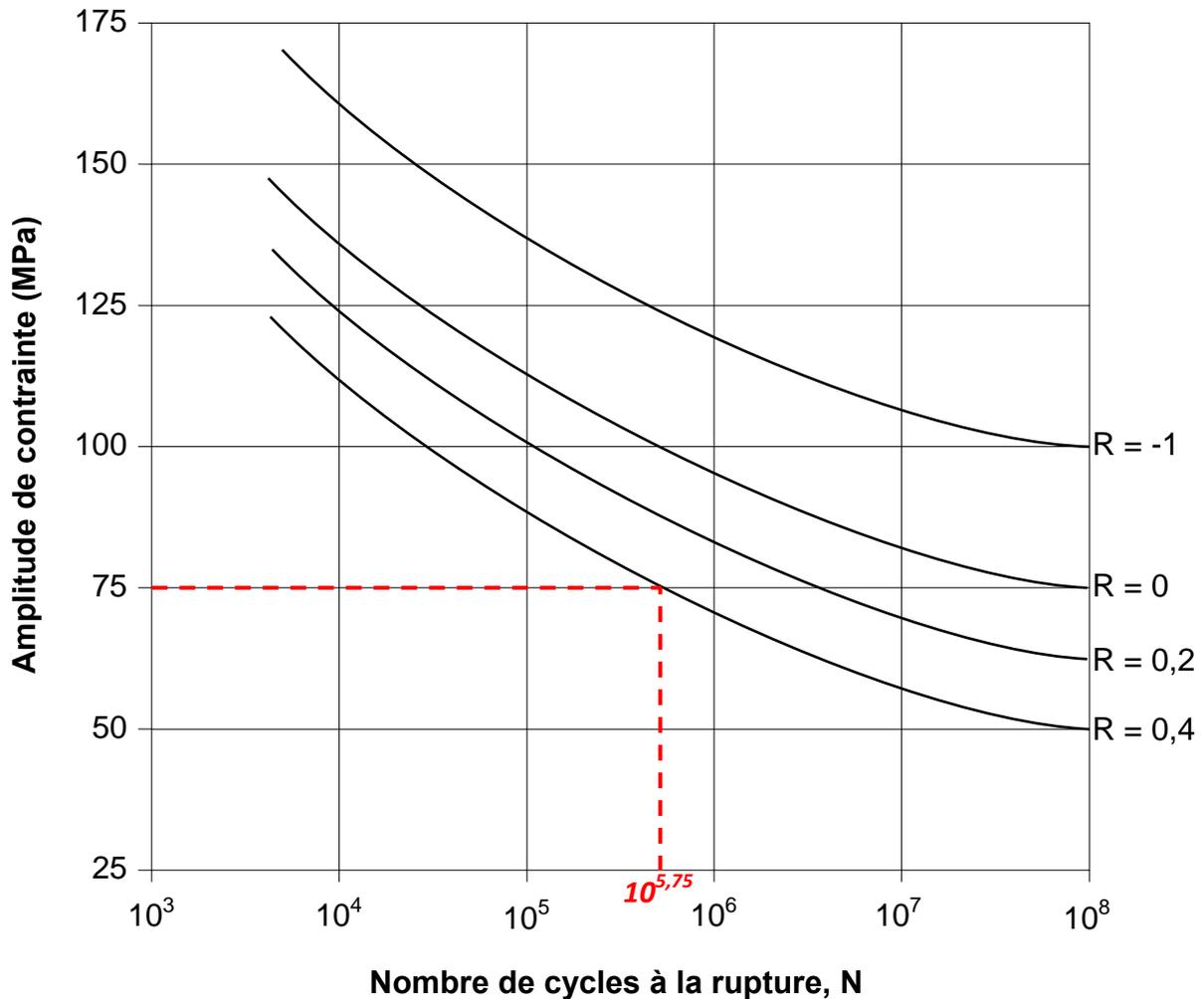


Figure 3 : Courbes d'endurance qui caractérisent l'alliage B.

- d) Un collègue s'inquiète de la tenue mécanique de vos essieux dans des conditions hivernales. Advenant que certains utilisateurs osent rouler l'hiver, a-t-on raison de s'inquiéter d'une perte de ténacité des alliages A et B pour des températures de l'ordre de -20 °C ? Expliquez votre réponse. (1 point)

Risque de perte de ténacité à -20 °C (oui ou non) :	non
Explications (des calculs ne sont pas nécessaires) :	
Les alliages d'aluminium sont de structure cubique à faces centrées et ne montrent pas de transition ductile-fragile lorsque l'on abaisse la température d'utilisation. La baisse de ténacité sera donc négligeable.	

- e) À l'autre extrême, devrait-on s'inquiéter d'une potentielle déformation par fluage des alliages A et B pour des températures estivales de 40 °C ? Justifiez votre réponse en considérant que la température de fusion la plus faible est 577 °C. (1 point)

Risque de fluage à 40 °C (oui ou non) :	non
<p>Explications (des calculs ne sont pas nécessaires) :</p> <p>Pour les métaux, les déformations par fluage sont significatives pour des températures supérieures à 0,5 de leur point de fusion (exprimé en kelvins). Pour un alliage dont le point de fusion est 577 °C (850 K), il faut s'en inquiéter lorsque la température est de l'ordre de 425 K, soit 152 °C.</p>	

Question N°4 Notions théoriques diverses (4 points)

Les énoncés sont-ils VRAI ou FAUX ? Cochez la bonne réponse.

Une mauvaise réponse annule une bonne réponse, au sein de cette question.

	Énoncés	VRAI	FAUX
a)	Lors d'un essai de traction sur un matériau métallique ductile, la contrainte d'écoulement (limite d'élasticité) augmente graduellement car la déformation plastique a pour conséquence de faire diminuer la densité des dislocations.		X
b)	Lors d'un essai de résilience de type Charpy, une rupture de type fragile consomme généralement plus d'énergie qu'une rupture de type ductile.		X
c)	Sur un graphique de fatigue-propagation, la variation d'intensité de contrainte au seuil, ΔK_{seuil} , caractérise la variation d'intensité de contrainte sous laquelle il n'y a pas d'amorçage de fissure.		X
d)	Dans une pile de concentration, la réaction anodique a lieu dans le milieu le plus riche en oxygène.		X

Question N°5

Corrosion

(5 points)

Le tableau 3 donne les potentiels de dissolution ($M \rightarrow M^{n+} + ne^-$) de quelques métaux ou alliages dans l'eau de mer.

Tableau 3 : Potentiels de dissolution dans l'eau de mer

Métal ou alliage	Potentiel E_0 (V)
Ni	-0,07
Acier inoxydable passivé	-0,09
Cu	-0,20
Sn	-0,49
Pb	-0,55
Fe	-0,58
Al	-0,80
Zn	-1,10
Mg	-1,73

Considérez les couples suivants A et B de plaques en contact électrique et plongées dans l'eau de mer :

Couple A :	Nickel et fer
Couple B :	Magnésium et fer

a) Pour chacun des couples A et B, quel métal ou alliage sera l'anode du couple ? Justifiez votre réponse.

(2 point)

Couple	Anode
A	Fe (fer)
B	Mg (magnésium)

Justification :

L'anode est le métal qui a le potentiel de dissolution le plus faible.

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

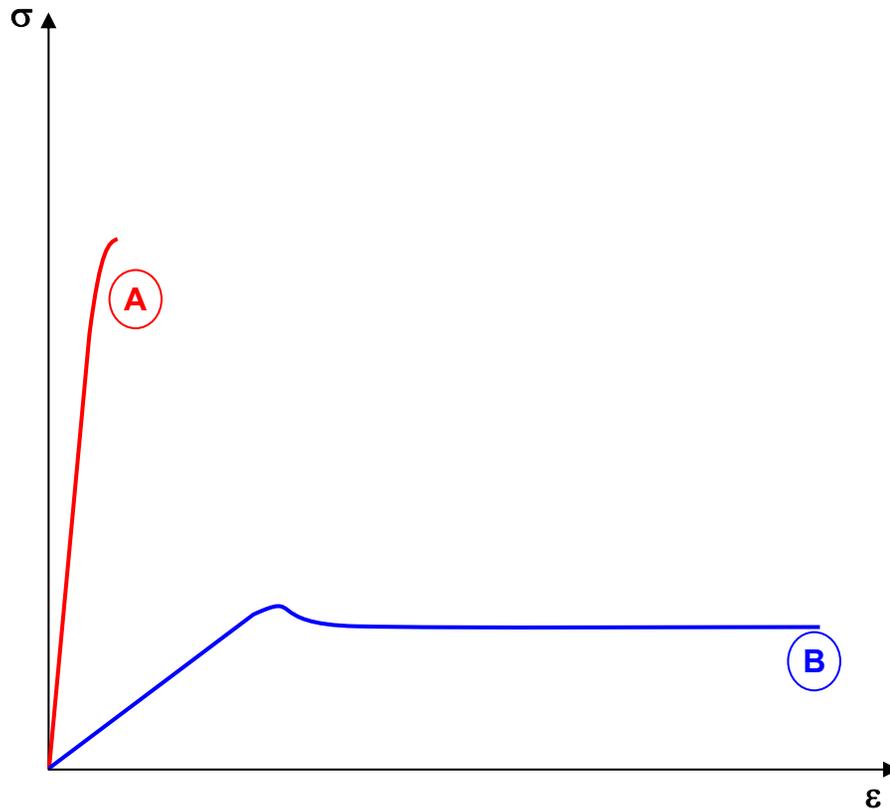
C'est un matériau thermoplastique car il a une température de fusion (θ_2) ainsi qu'une température de transition vitreuse (θ_1) qui sépare l'état vitreux, où la rigidité est élevée, de l'état caoutchoutique où le module de rigidité est d'un ordre de grandeur moins élevé que dans l'état vitreux. Le polymère 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 (et, par conséquent, à la même échelle), l'allure des courbes de traction des polymères A et B que l'on obtiendrait à la suite d'essais réalisés à la température ambiante (20 °C). Identifiez clairement les courbes. (2 points)



Question N° 7

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 présentées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Propriétés mécaniques de tiges de zircon

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	4
3	nd	745	7	$9,6 \times 10^{-6}$	0,31	146	nd

* nd : non disponible

- a) Quelle est la taille critique, a_c , des défauts contenus dans la tige 1 ? On supposera que le facteur géométrique associé aux défauts est de 1,15. (1 point)

Calculs ou justifications :

À l'aide de la relation $K_{IC} = \alpha\sigma\sqrt{\pi a}$, on obtient comme valeur de taille critique des défauts:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\alpha R_{mt}} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}}{(1,15)(1500 \text{ MPa})} \right)^2 = 15,4 \times 10^{-6} \text{ m}$$

$a_c =$

15,4 μm

- b) Quelle est la porosité P de la tige 3 ?

(2 points)

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 2 dont la porosité $P = 0,04$ et $R_m = 1135 \text{ MPa}$, on obtient comme valeur de n :

$$n = \frac{1}{P} \ln \left[\frac{(R_m)_0}{R_m} \right] = \frac{1}{(0,04)} \ln \left[\frac{1500 \text{ MPa}}{1135 \text{ MPa}} \right] = 6,971$$

Avec la valeur de R_m pour la tige 3, on a :

$$P = \frac{1}{n} \ln \left[\frac{(R_m)_0}{R_m} \right] = \frac{1}{(6,971)} \ln \left[\frac{1500 \text{ MPa}}{745 \text{ MPa}} \right] = 0,1004 \cong 10 \%$$

$P =$

10 %

- c) Quelle variation maximale de température peut subir la tige 2 lors d'un refroidissement rapide sans se rompre ? (On suppose que: $f(\nu) = 1 - \nu$) (2 points)

Calculs ou justifications :

La variation maximale de température, $\Delta\theta^*$, que peut subir la tige 2 est donné par la relation :

$$\Delta\theta^* = R_1 = \frac{R_m f(\nu)}{E\alpha} = \frac{R_m(1 - \nu)}{[E_0(0,9P^2 - 1,9P + 1)]\alpha}$$
$$\Delta\theta^* = \frac{(1135 \times 10^6 \text{ Pa})(1 - 0,31)}{[(205 \times 10^9 \text{ Pa})(0,9(0,04)^2 - 1,9(0,04) + 1)] (9,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})} = 430 \text{ }^\circ\text{C}$$

$\Delta\theta^* =$

430 °C

Formulaire général

$$E = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} \text{ en traction simple}$$

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

$$\varepsilon_z = -\frac{\varepsilon_x}{\nu} = -\frac{\varepsilon_y}{\nu} \text{ en traction simple}$$

$$R_{e0,2} = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

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

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

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

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

$$R_{th} \cong \frac{E}{10}$$

$$m = \frac{A i_{corr} t}{nF}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_4 = \frac{E\gamma_S}{R_m^2 f(\nu)} = \gamma_S R_3$$

$$a_c = \frac{2E\gamma_S}{\pi\sigma_{nom}^2}$$

$$V_{sphère} = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$K = \alpha\sigma_{nom}\sqrt{\pi a}$$

Annexe

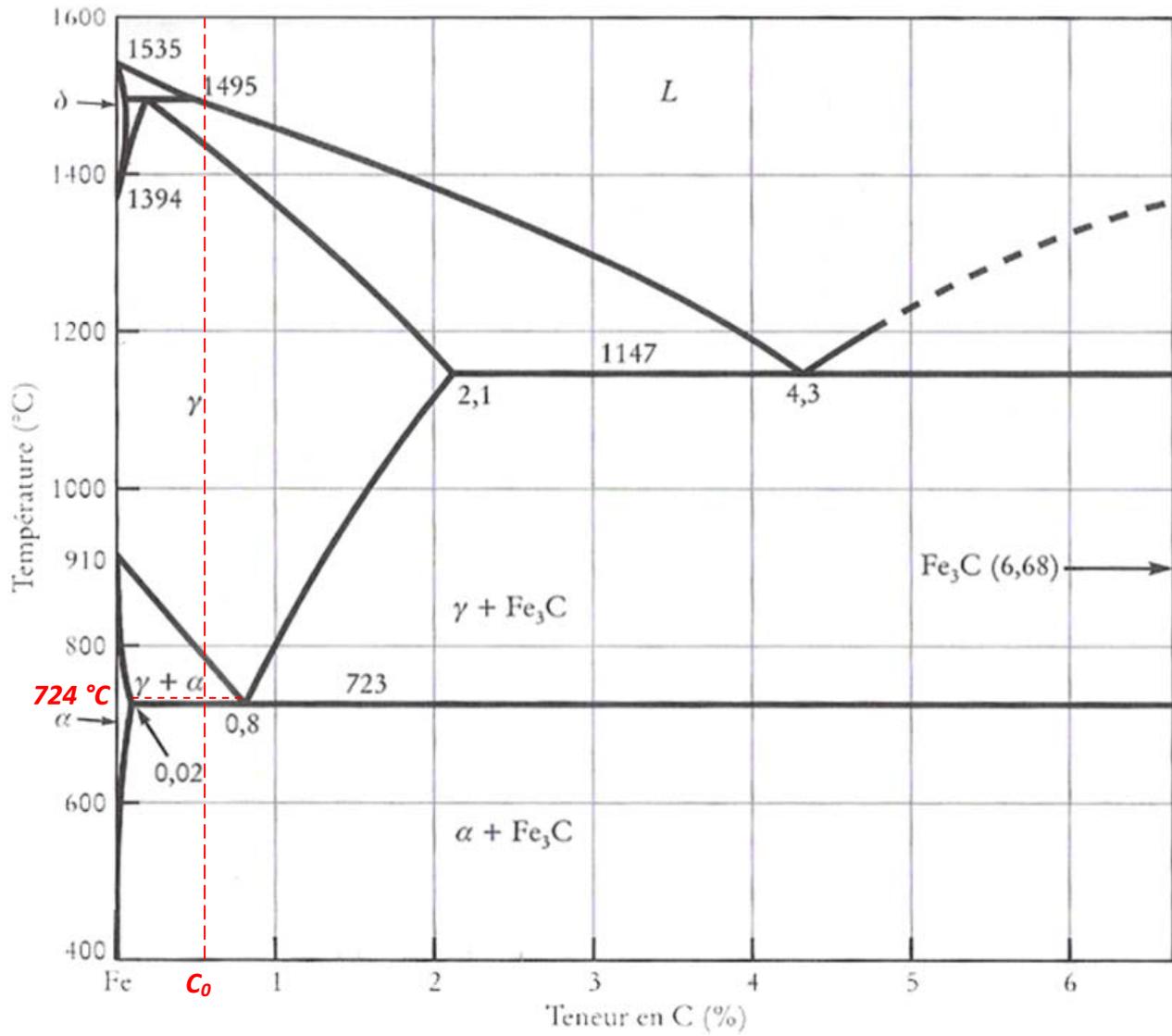


Figure A1 : Diagramme d'équilibre Fe-C.

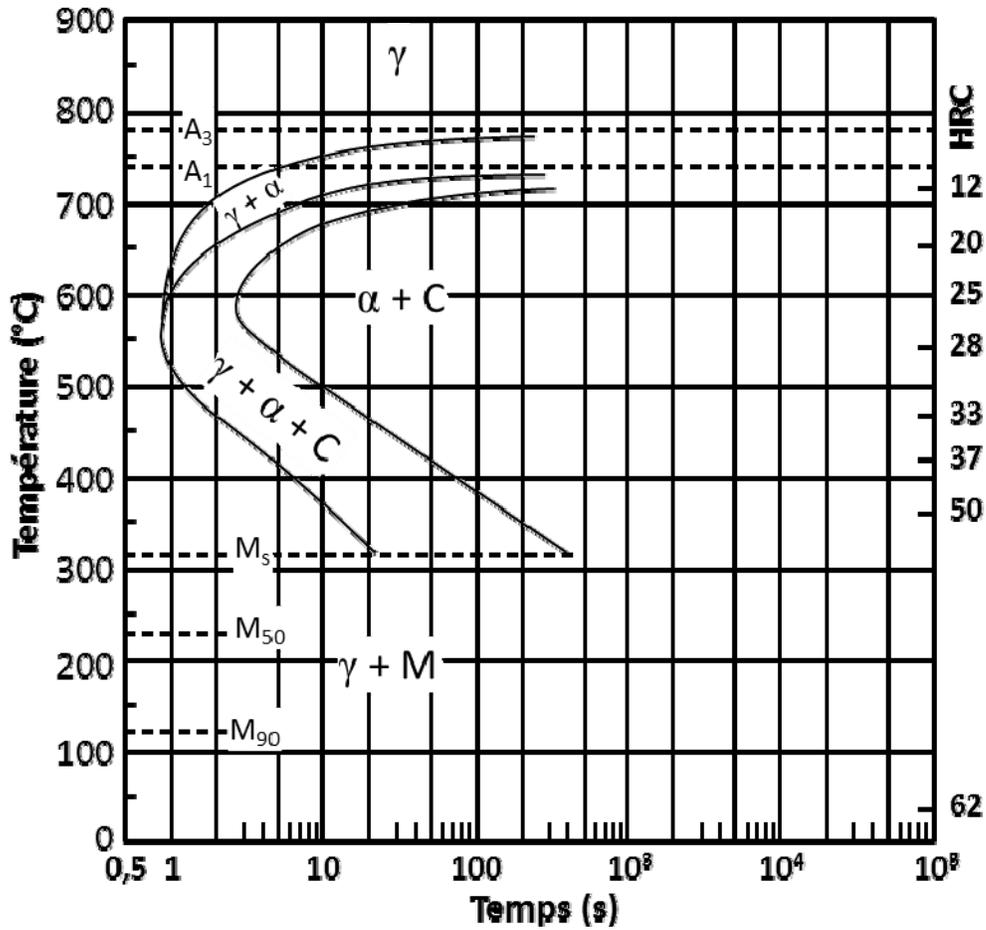


Figure A2 : Courbes TTT de l'acier doux de la question 1.

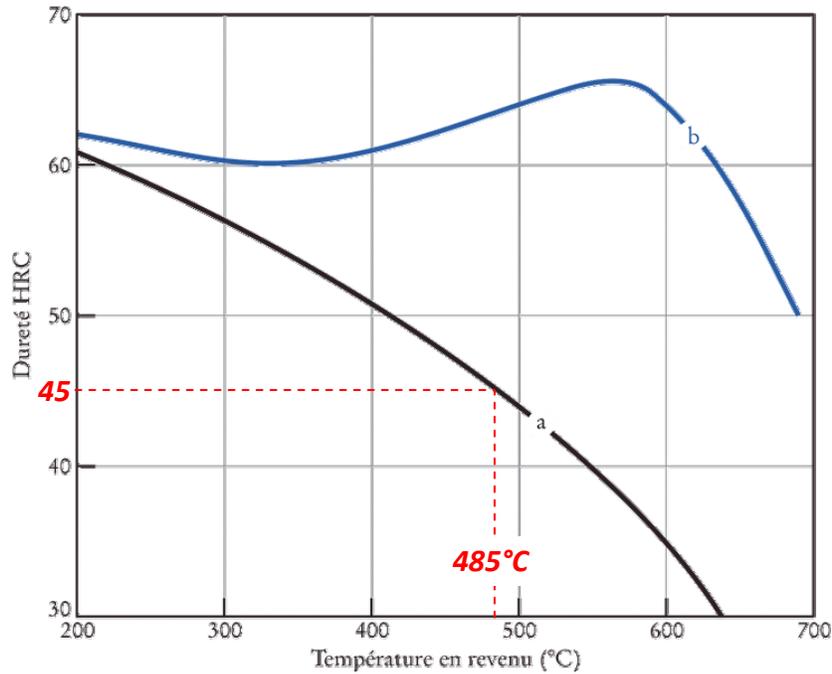


Figure A3 : a) Courbe de revenu, durée de 1 heure, de l'acier doux de la question 1;
b) courbe de revenu, durée de 1 heure, d'un acier à outils.