



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL

Le génie
sans frontières

PROGRAMME DE GÉNIE DES MATÉRIAUX

COURS MTR1035C-1000C - MATÉRIAUX

EXAMEN FINAL

du 13 décembre 2006

de 9h30 à 12h00

QUESTIONNAIRE

- NOTES :**
- ◆ Aucune documentation permise.
 - ◆ Calculatrice non programmable autorisée.
 - ◆ Les nombres en marge indiquent le nombre de points accordés à la question. Le total est de **60** points.
 - ◆ La cote maximale de l'examen est de **50** points.
 - ◆ **Pour les questions nécessitant des calculs, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas justifié.**
 - ◆ **Utilisez les espaces prévus ou la page blanche opposée pour vos calculs.**
 - ◆ Le questionnaire comprend **11** pages, en incluant les annexes (si mentionnées) et le formulaire général.
 - ◆ Le formulaire de réponses comprend **12** pages.
 - ◆ Vérifiez le nombre de pages du questionnaire et du formulaire de réponses.

Remarque : Les 6 premiers exercices sont relatifs aux unités facultatives 8, 9, 10, 11 et 12.
Les exercices suivants couvrent les unités obligatoires (unités 1 à 7).

Exercice n° 1 Dégradation

Une tôle d'acier, pliée à froid (écrouie) et coupée, est immergée dans une mare d'eau stagnante.

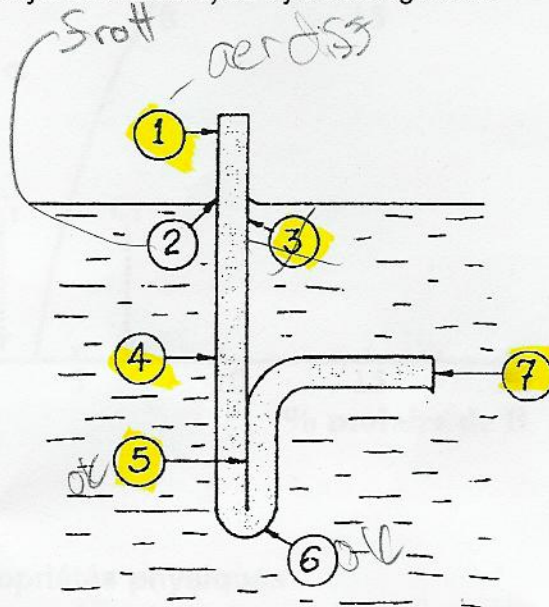
a) Quelles sont les zones, indiquées par des flèches, les plus susceptibles de se corroder ?

Pour chacune d'elles, indiquer :

- La cause ou le mode de corrosion (caverneuse, galvanique, par cavitation, par aération différentielle, par érosion, par frottement, par gradient de température, ...).
- L'endroit (électrolyte ou matériau) où il y a hétérogénéité.

(4 pts)

Justifiez vos réponses.



b) Pour lutter contre la corrosion, on vous propose de neutraliser l'eau : de lui donner un pH = 7. Qu'en pensez-vous ? (1 pt)

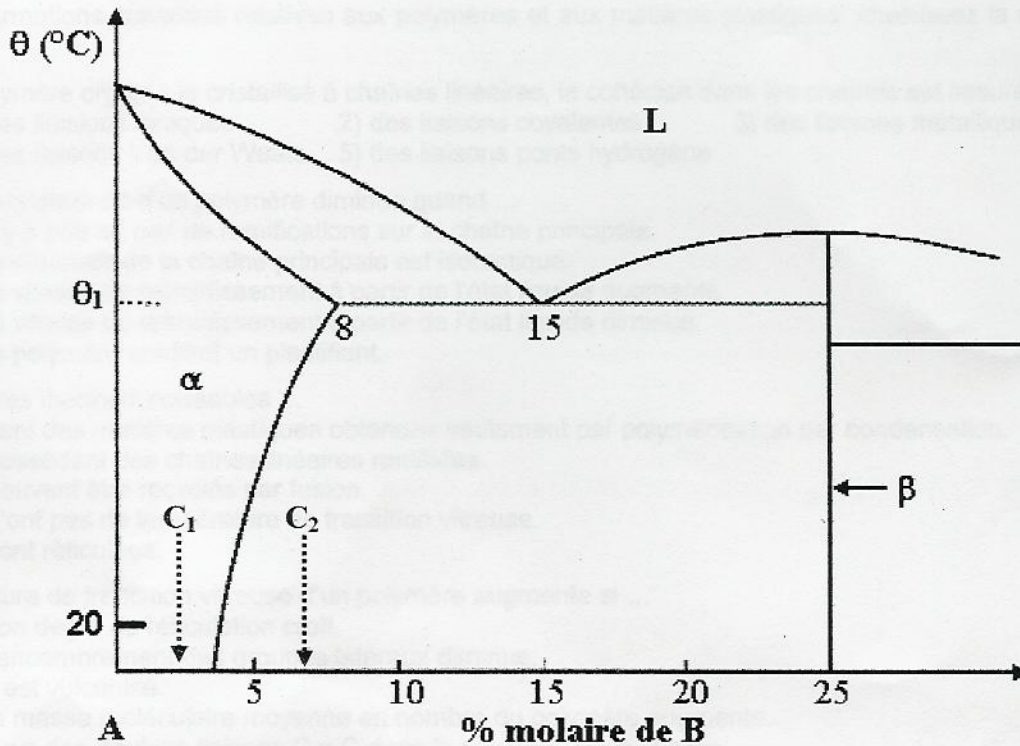
Exercice n° 2 Propriétés physiques

Vous désirez fabriquer un aimant fait d'un alliage A – B dont le diagramme d'équilibre partiel est donné à la page suivante. Cet alliage est disponible en deux compositions C₁ et C₂ notées sur ce diagramme. Les phases α et β sont toutes deux ferromagnétiques. Après un chauffage de deux heures à la température θ_1 repérée sur le diagramme, ces alliages peuvent être obtenus dans divers états :

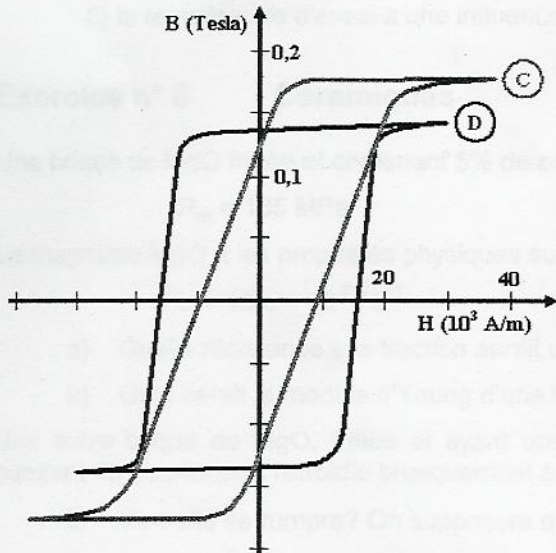
- État 1 : Refroidissement lent à l'équilibre.
- État 2 : État 1 suivi d'un écrouissage de 15 % obtenu par laminage à froid.
- État 3 : Trempe jusqu'à la température ambiante.
- État 4 : État 3 suivi d'un vieillissement conduisant à un durcissement structural.

- Si vous devez obtenir un aimant ayant un champ coercitif H_c faible, quelle combinaison « Composition + État » choisissez-vous ? Justifiez votre choix. (1,5 pt)
- Si vous devez obtenir un aimant ayant un champ coercitif H_c élevé, quelle combinaison « Composition + État » choisissez-vous ? Justifiez votre choix. (1,5 pt)

Sous-total : 8 pts



Exercice n° 3 Propriétés physiques



Vous désirez réaliser un aimant permanent après avoir magnétisé un matériau ferromagnétique jusqu'à saturation et vous avez le choix entre les matériaux **C** et **D** dont les courbes d'hystérésis sont schématisées à la figure ci-contre.

- c) Quel matériau a la plus forte induction à saturation? (0,5 pt)
- d) Quel matériau a l'induction rémanente la plus élevée? (0,5 pt)
- e) Quel matériau a le champ coercitif le plus élevé? (0,5 pt)
- f) Si, en cours d'utilisation, l'aimant permanent est soumis à des fluctuations du champ magnétique extérieur égales à $\pm 12\ 000$ A/m, quel matériau est le plus adéquat pour l'application recherchée? (0,5 pt)

Sous-total : 2 pts

Exercice n° 4 Matières plastiques

Pour les affirmations suivantes relatives aux polymères et aux matières plastiques, choisissez la ou les bonnes réponses.

Dans un polymère organique cristallisé à chaînes linéaires, la cohésion dans les chaînes est assurée par : (1 pt)

- 1) des liaisons ioniques 2) des liaisons covalentes 3) des liaisons métalliques
4) des liaisons Van der Waals 5) des liaisons ponts hydrogène

Le degré de cristallinité d'un polymère diminue quand ... (1 pt)

- 1) il y a peu ou pas de ramifications sur la chaîne principale.
2) la structure de la chaîne principale est isotactique.
3) la vitesse de refroidissement à partir de l'état liquide augmente.
4) la vitesse de refroidissement à partir de l'état liquide diminue.
5) le polymère contient un plastifiant.

Les polymères thermodurcissables ... (1 pt)

- 1) sont des matières plastiques obtenues seulement par polymérisation par condensation.
2) possèdent des chaînes linéaires ramifiées.
3) peuvent être recyclés par fusion.
4) n'ont pas de température de transition vitreuse.
5) sont réticulées.

La température de transition vitreuse d'un polymère augmente si ... (1 pt)

- 1) son degré de réticulation croît.
2) l'encombrement des groupes latéraux diminue.
3) il est vulcanisé.
4) la masse moléculaire moyenne en nombre du polymère augmente.
5) il y a des doubles liaisons C = C dans le squelette de la chaîne.

Quand on mesure le module d'Young d'un polymère, on doit préciser le temps d'application de la charge parce que ...

- 1) le polymère se dégrade pendant l'application de la charge.
2) le polymère manifeste un comportement élastique linéaire.
3) ce module dépend de la masse moléculaire moyenne en poids.
4) le polymère manifeste un comportement viscoélastique.
5) la température d'essai a une influence sur la valeur du module. (1 pt)

Exercice n° 5 Céramiques

Une brique de MgO frittée et contenant 5% de porosité a les propriétés mécaniques suivantes :

$$R_m = 105 \text{ MPa}$$

$$n = 3,75$$

$$E = 204 \text{ GPa}$$

La magnésie MgO a les propriétés physiques suivantes:

$$\alpha = 13,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\nu = 0,35$$

- a) Quelle résistance à la traction aurait une brique de MgO ne contenant aucune porosité ? (1 pt)
b) Quel serait le module d'Young d'une brique de MgO sans porosité ? (1 pt)

Une autre brique de MgO, frittée et ayant une porosité de 2%, est chauffée à une température de 1000°C pendant 48 heures puis refroidie brusquement à la température ambiante (25°C). (3 pts)

- c) Va-t-elle se rompre? On supposera que $f(\nu) = (1 - \nu)$.

Exercice n° 6 Composites

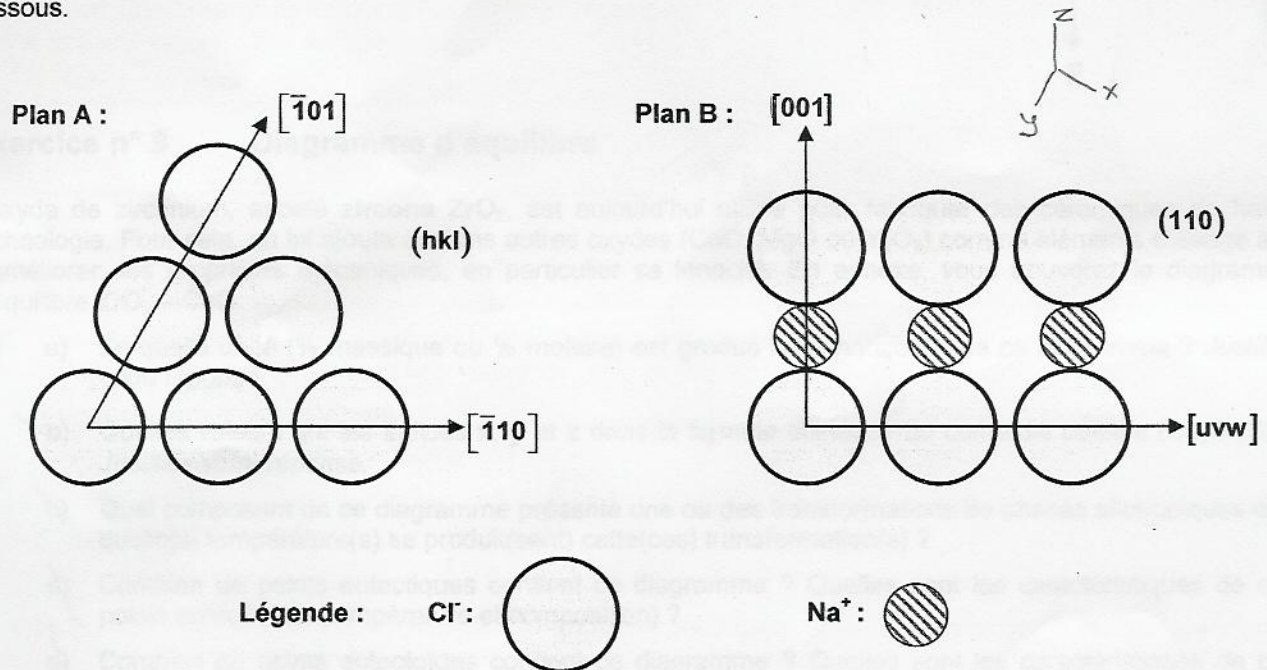
Ayant une section transversale est de 1130 mm^2 , un composite à fibres continues et alignées longitudinalement subit une force de traction longitudinale F_c . Les fibres supportent une contrainte de 156 MPa , et la matrice, une contrainte de $2,75 \text{ MPa}$. La charge supportée par les fibres est de 74 kN et la déformation longitudinale totale du composite est de $1,25 \times 10^{-3}$.

- Quelle est la charge (en **N**) que supporte la matrice ? (2 pts)
- Quel est le module de rigidité longitudinal (en **GPa**) du composite ? (2 pts)
- Quels sont les modules d'Young (en **GPa**) des fibres et de la matrice ? (1 pt)

Remarque : Les exercices suivants couvrent les unités obligatoires (unités 1 à 7)

Exercice n° 7 Architecture atomique (6 points)

La disposition des ions dans deux plans, A et B, de la maille élémentaire cubique de NaCl est dessinée ci-dessous.



- Quels sont les indices de Miller (**hkl**) du plan A ? (1 pt)
- Quels sont les indices **[uvw]** de la direction tracée dans le plan B ? (1 pt)

La densité linéique des ions Cl^- dans la direction $[111]$ est de 1.035 ion/nm .

- Quel est le paramètre **a** (en nm) de la maille cubique de NaCl ? (2 pts)
- Tracez et identifiez clairement les plans A et B dans la maille élémentaire fournie dans le formulaire de réponse. (2 pts)
- Quels sont les indices de la direction **commune** à ces deux plans ? (1 pt)

Sous-total : 12 pts

Exercice n° 8 Fragilité et ductilité

Une tôle faite d'un alliage d'aluminium 6061-T4 et mesurant 50 mm de largeur par 5 mm d'épaisseur est percée d'un trou de 15 mm de diamètre. Dans ces conditions, le facteur de concentration de contrainte K_t au niveau du trou est égal à 2,5.

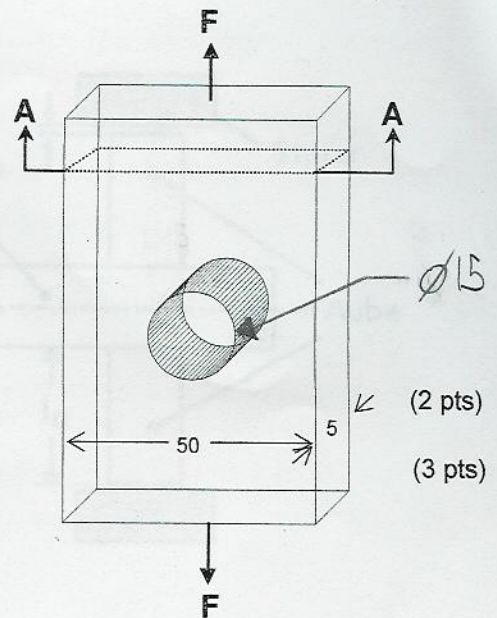
Les propriétés mécaniques du 6061-T4 sont les suivantes :

$$R_{e0,2} = 150 \text{ MPa} \quad R_m = 245 \text{ MPa} \quad A = 22 \%$$

Quelle est la contrainte maximale au bord du trou quand la contrainte nominale dans la section A-A ($\sigma_{\text{nomA-A}}$) est égale à :

- a) 25 MPa ?
- b) 50 MPa ?

Justifiez votre réponse.



(2 pts)

(3 pts)

Exercice n° 9 Diagramme d'équilibre

L'oxyde de zirconium, appelé **zircone** ZrO_2 , est aujourd'hui utilisé pour fabriquer des céramiques de haute technologie. Pour cela, on lui ajoute certains autres oxydes (CaO , MgO ou Y_2O_3) comme éléments d'alliage afin d'améliorer ses propriétés mécaniques, en particulier sa ténacité. En annexe, vous trouverez le diagramme d'équilibre $\text{ZrO}_2 - \text{CaO}$.

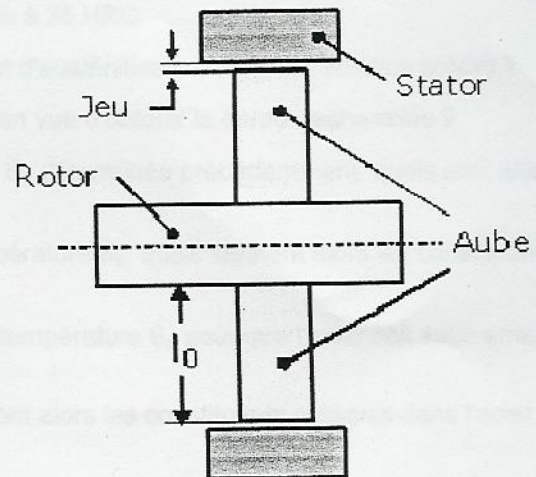
- a) En quelle unité (% massique ou % molaire) est gradué l'axe horizontal de ce diagramme ? Justifiez votre réponse. (1 pt)
- b) Quelles valeurs ont les indices x, y et z dans la formule chimique du composé défini ϵ ($\text{Ca}_x\text{Zr}_y\text{O}_z$) ? Justifiez votre réponse. (1 pt)
- c) Quel composant de ce diagramme présente une ou des transformations de phases allotropiques et à quelle(s) température(s) se produit(sent) cette(ces) transformation(s) ? (1 pt)
- d) Combien de points eutectiques contient ce diagramme ? Quelles sont les caractéristiques de ces points eutectiques (température et composition) ? (1 pt)
- e) Combien de points eutectoïdes contient ce diagramme ? Quelles sont les caractéristiques de ces points eutectoïdes (température et composition) ? (1 pt)
- f) Quelle doit être la composition nominale C_0 d'un alliage $\text{ZrO}_2 - \text{CaO}$ pour qu'à 1700°C cet alliage contienne 33,3% de phase γ proeutectoïde et 66,7 % de composé défini ϵ ? (1 pt)
- g) Si l'alliage de composition C_0 étudié à la question précédente est porté à 2249°C , quelles seront les phases présentes dans sa microstructure ? Précisez aussi la proportion (fraction) de chaque phase de la microstructure. (1 pt)
- h) Quel type de traitement thermique (transformation martensitique ou durcissement structural) peut subir un alliage $\text{ZrO}_2 + 5,6 \%$ CaO s'il est préalablement porté à 1150°C ? Justifiez votre réponse. (1 pt)

Sous-total : 13 pts

Exercice n° 10 Comportement mécanique en service

Une turbine à gaz fonctionne à 800 °C. Les aubes du rotor de cette turbine ont une longueur initiale $l_0 = 12$ cm et sont faites d'un superalliage de nickel, qui, à cette température, a un module d'Young E égal à 175 GPa. En service et sous l'effet de la force centrifuge, les aubes sont soumises à une contrainte de traction de 460 MPa. Le bureau d'étude a prévu un jeu initial de 3 mm entre le stator et l'extrémité des aubes (voir schéma ci-contre).

Conscient que les aubes vont fluer en service, vous décidez de recommander une inspection préventive de la dimension des aubes après un certain temps t de fonctionnement de la turbine. Pour déterminer ce temps t , vous ne disposez que des quelques données suivantes concernant le fluage de ce superalliage lorsqu'il est soumis à une contrainte de 460 MPa. Ce tableau donne la valeur (en %) de la déformation plastique ϵ_p de fluage enregistrée à un temps donné et à une température donnée :



Temps (en jours)	Déformation plastique ϵ_p (en %) à la température indiquée		
	700°C	800°C	900°C
40	0,1000	0,3000	0,6000
460	0,1966	non disponible	19,3547

NB: Ces données sont toutes relatives à des points expérimentaux situés dans le stade II de fluage (fluage secondaire) des courbes de fluage de ce superalliage.

- a) Quelles sont les valeurs de la vitesse de fluage $d\epsilon/dt$ (exprimée en %/jour) pour le stade II de fluage de ce superalliage à 700°C et à 900°C? (1 pt)

Le fluage étant un phénomène activé thermiquement, la vitesse de fluage secondaire (stade II) varie en fonction de la température selon la relation suivante :

$$(d\epsilon/dt)_T = C \exp(-Q/RT)$$

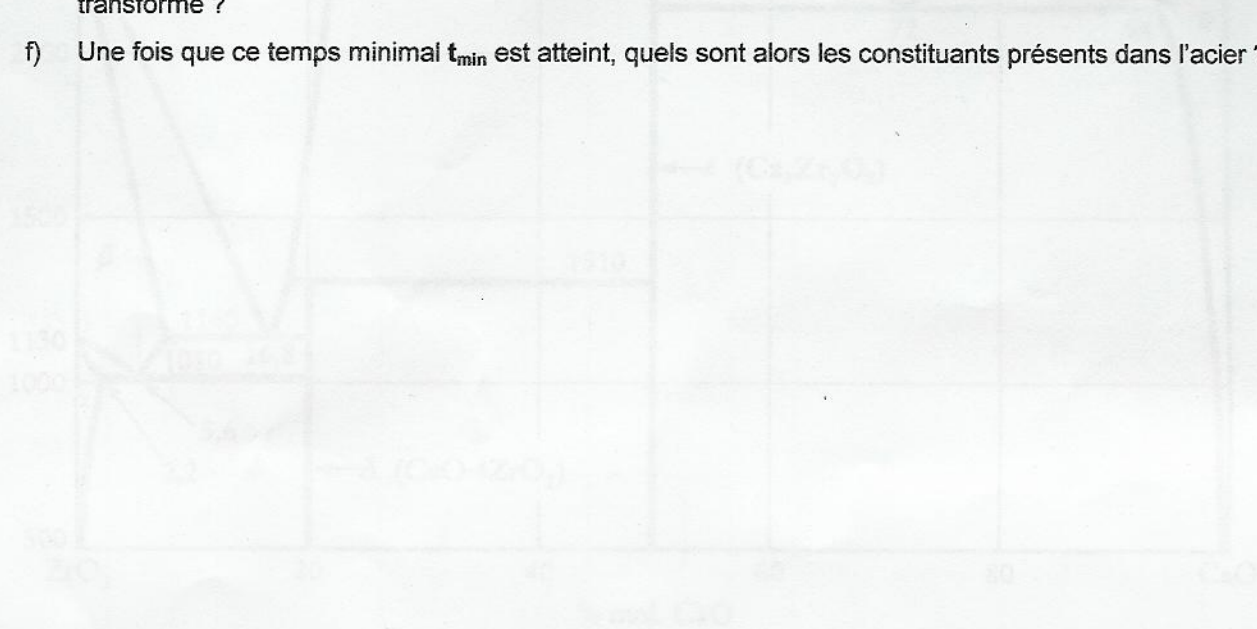
où \exp est l'exponentielle, T est la température exprimée en degrés absolus (degrés K), C est une constante caractéristique du matériau, R est la constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et Q est l'énergie d'activation du fluage (exprimée généralement en kJ). Rappel: 0 °C = 273 K.

- b) Quelle est la valeur (en kJ/mole) de l'énergie d'activation Q de la vitesse de fluage pour ce superalliage? (2 pts)
- c) Quelle est la valeur de la vitesse de fluage $d\epsilon/dt$ (exprimée en %/jour) à 800°C? (1 pt)
- d) À quelle déformation élastique instantanée e_{el} sont soumises les aubes quand la turbine est mise en service? (1 pt)
- e) Après combien de jours de service continu de la turbine à 800°C recommanderez-vous de procéder à l'inspection dimensionnelle de la turbine afin de vérifier si le jeu entre le stator et l'extrémité des aubes est réduit à la moitié (50%) de sa valeur initiale? (3 pts)

Exercice n° 11 Traitements thermiques (7 points)

Vous disposez de l'acier 6150 et de son diagramme TTT donné en annexe. Par un traitement thermique approprié, vous désirez obtenir une dureté finale de cet acier égale à 35 HRC.

- a) À quelle température minimale θ_A sera fait le traitement d'austénitisation (mise en solution solide) ? (1 pt)
- b) À quelle température θ_{ii} sera faite la tempe isotherme en vue d'obtenir la dureté recherchée ? (1 pt)
- c) Au bout de 12 secondes de maintien à la température θ_{ii} déterminée précédemment, quels sont alors les constituants présents dans l'acier ? (1 pt)
- d) Si l'acier était trempé après 30 s de maintien à la température θ_{ii} , quels seraient alors les constituants présents dans l'acier ? *Justifiez votre réponse.* (2 pts)
- e) Quel est le temps minimal t_{min} (en s) de maintien à la température θ_{ii} pour que l'acier soit entièrement transformé ? (1 pt)
- f) Une fois que ce temps minimal t_{min} est atteint, quels sont alors les constituants présents dans l'acier ? (1 pt)

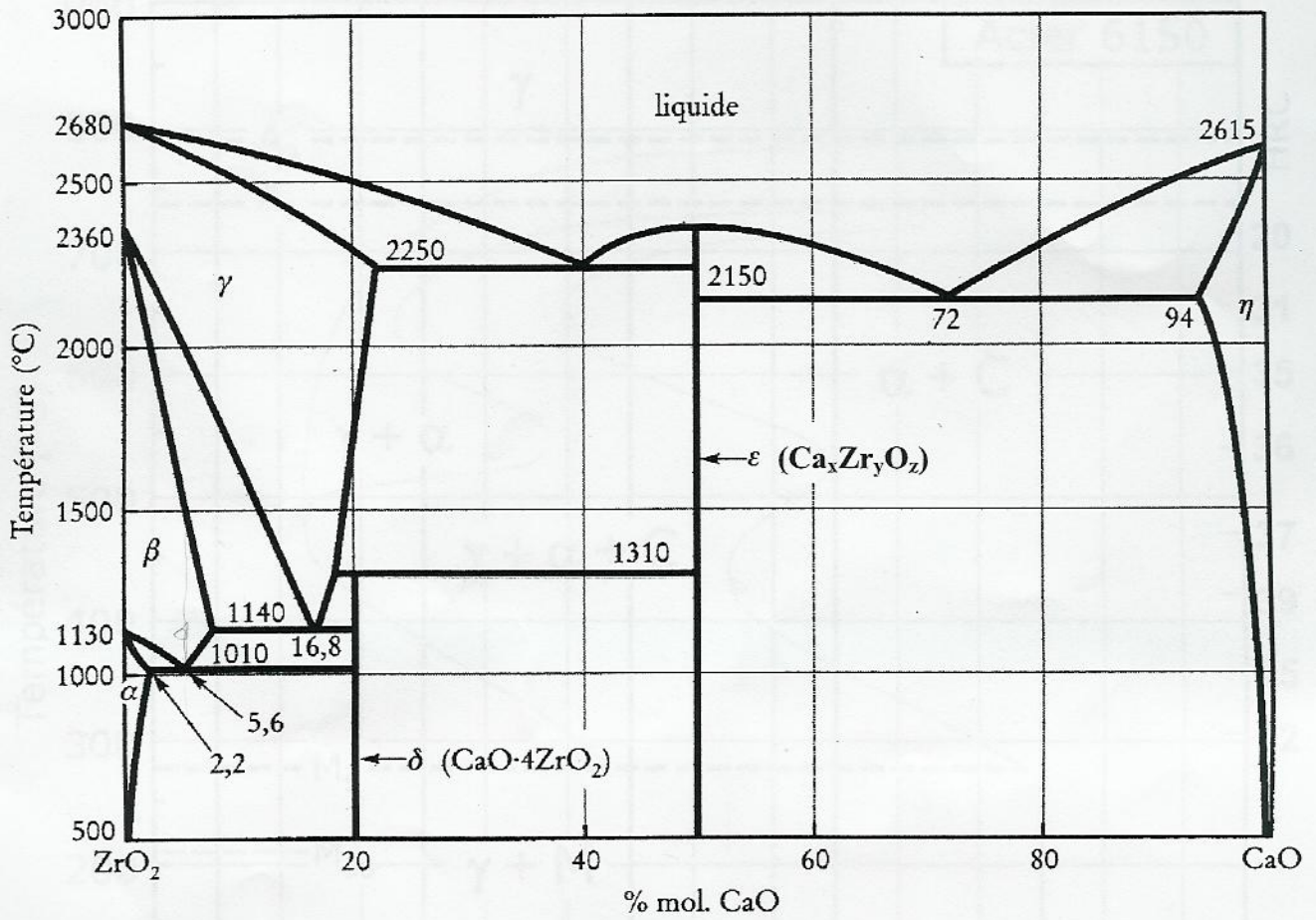


Sous-total: 7 pts

Total : 60 pts

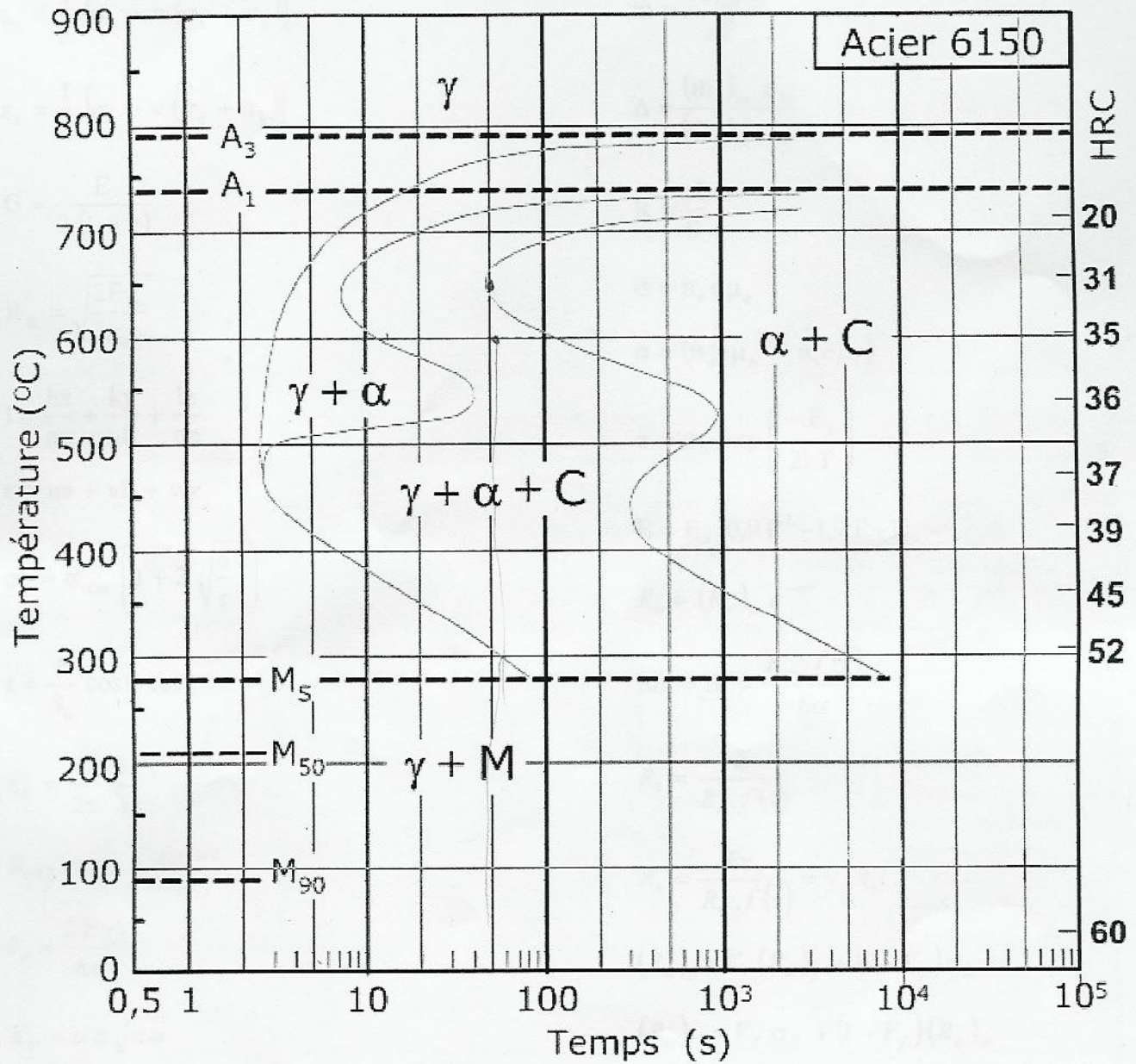
ANNEXES

Exercice 9 : Diagramme d'équilibre $ZrO_2 - CaO$



ANNEXES

Exercice 11 : Diagramme TTT de l'acier 6150



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_{e0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

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

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

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

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

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

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

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

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

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

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

$$\sigma = (n_e e \mu_e + n_i e \mu_i)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m$$

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

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