



ÉCOLE  
POLYTECHNIQUE  
M O N T R É A L

*Le*  
**génie**  
*sans frontières*

GÉNIE DES MATÉRIAUX

# COURS ING1035 - MATÉRIAUX

CONTRÔLE N° 2

du 7 novembre 2003

de 8h45 à 10h20

## QUESTIONNAIRE

- NOTES :**
- ◆ Aucune documentation permise.
  - ◆ Calculatrice non programmable autorisée.
  - ◆ Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de **25** points.
  - ◆ **Pour les questions nécessitant des calculs, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit.**
  - ◆ Utilisez les espaces prévus et, si nécessaire, la page opposée pour vos calculs intermédiaires.
  - ◆ Le questionnaire comprend **6** pages, incluant les annexes (si mentionnés) et le formulaire général.
  - ◆ Le formulaire de réponses comprend **4** pages.
  - ◆ **Vérifiez le nombre de pages du questionnaire et du formulaire de réponses.**

## Exercice n° 1

En annexe, vous trouverez le diagramme de phase « titane – cobalt » (Ti – Co), tel que publié dans la littérature scientifique. La structure cristalline des phases présentes sur ce diagramme est aussi donnée au tableau A-1.

- Quelle est la température de fusion  $\theta_{fCo}$  (en °C) du cobalt (Co) ? (1 pt)
- Quelles sont les phases en équilibre au cours d'une réaction eutectique E présente sur ce diagramme ? Donnez les coordonnées (composition  $C_E$  en %m de Co et température  $\theta_E$  en °C) de ce point eutectique ? (2 pts)
- Comment nomme-t-on la réaction caractérisant le point noté Y sur le diagramme ? Écrivez cette réaction d'équilibre. (2 pts)
- Combien de composés définis non stœchiométriques sont présents sur ce diagramme ? (1 pt)
- Quelle doit être la composition nominale  $C_0$  (en %m Co) d'un alliage Ti – Co qui, à 683 °C, contient 50 %m de  $Ti_2Co$  primaire et 50 %m de constituant « Ti –  $Ti_2Co$  » ? (2 pts)
- Quel type de traitement thermique (trempe martensitique **TM** ou durcissement structural **DS**) peut potentiellement être appliqué à un alliage Ti – Co contenant 7 %m de Co ? Justifiez votre réponse. (1 pt)

## Exercice n° 2

En annexe, vous disposez du diagramme TTT de l'acier AISI 4047 ( 0,47 % C, 0,94 % Mn, 0,25 % Mo) qui se prête bien à des traitements thermiques.

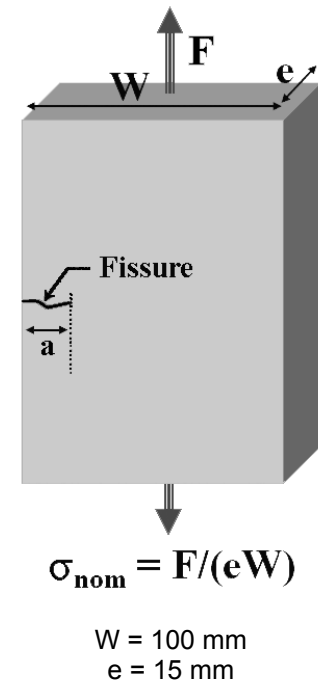
- À quelle température minimale  $\theta_A$  (en °C) doit-on faire l'austénitisation débutant un traitement thermique ? (1 pt)
- Après austénitisation de l'acier à la température trouvée à la question précédente, on trempe l'acier à la température de 650 °C. Complétez le tableau donné au formulaire de réponses en décomposant la transformation isotherme de l'acier à cette température en étapes successives. Pour chaque étape, donnez ses temps de début et de fin (en s). Précisez quels sont les constituants présents dans l'acier durant l'étape considérée. (4 pts)
- À la fin de la transformation isotherme à 650 °C, quelle est la dureté HRC de l'acier après retour à la température ambiante ? (1 pt)
- Après une austénitisation de l'acier à la température trouvée à la question a) ci-dessus, on trempe l'acier à 400 °C où on le maintient pendant 30 s. On trempe alors l'acier à l'eau à 25 °C. Quels sont les constituants présents dans l'acier après la trempe à l'eau ? Quelle est la dureté finale (HRC) de l'acier après la trempe à l'eau ? Justifiez vos réponses. (2 pts)

### Exercice n° 3

À titre d'expert de la rupture des matériaux, vous êtes appelé à identifier les causes de la rupture imprévue d'une pièce d'acier qui, soumise en service à une force cyclique variant de 52,5 à 525 kN, s'est rompue de façon brutale apparemment fragile. La forme et les dimensions de la pièce sont données à la figure ci-contre. Grâce à un examen fractographique de la surface de rupture réalisé par microscopie électronique à balayage, vous en concluez que la pièce s'est rompue quand la fissure avait atteint une longueur critique  $a_f$  égale à 32 mm et que son facteur géométrique  $\alpha_f$  était égal alors à 1,72. De plus, ces observations vous révèlent clairement que la fissure de fatigue a pris naissance à la racine d'une rayure superficielle sévère faite accidentellement au moment de la mise en service de la pièce. Le facteur géométrique  $\alpha_i$  de la fissure initiale était alors égal à 1,12.

Selon les informations dont vous disposez, les propriétés mécaniques de l'acier dont est faite cette pièce sont les suivantes :

- Propriétés en traction :  
 $R_{e0,2} = 700 \text{ MPa}$  ;  $R_m = 900 \text{ MPa}$  ;  $A = 13 \%$
- Propriétés en fatigue – propagation :  
Seuil de propagation :  $\Delta K_S = 5 \text{ MPa.m}^{1/2}$   
Relation de Paris-Erdogan :  $da/dN \text{ (m/cycle)} = C\Delta K^n$   
avec  $C = 5 \times 10^{-12}$  et  $n = 4$ , si  $\Delta K$  est en  $\text{MPa.m}^{1/2}$



- Quelle était la valeur  $\sigma_{\text{max}}$  (en MPa) de la contrainte maximale qui s'exerçait sur la pièce en service ? (1 pt)
- Quel était la valeur du rapport  $R$  caractérisant le chargement cyclique de cette pièce ? (1 pt)
- Quelle est la valeur du facteur critique d'intensité de contrainte  $K_{IC}$  (en  $\text{MPa.m}^{1/2}$ ) de l'acier de cette pièce ? (1 pt)
- Quelle devait être la valeur minimale  $a_i$  (en  $\mu\text{m}$ ) de la profondeur de la rayure superficielle pour que la fissure de fatigue ait pu se propager dès le premier cycle de chargement de la pièce ? (2 pts)
- Quel est le nombre  $N_f$  de cycles de sollicitations que la pièce a supportés avant de se rompre brutalement ? (3 pts)  
On supposera que la valeur du facteur géométrique  $\alpha$  associé à la fissure reste constante durant la propagation et égale à 1,45.

Pour l'équipe de professeurs, le coordonnateur: Jean-Paul Bailon

ANNEXES

Exercice n° 1

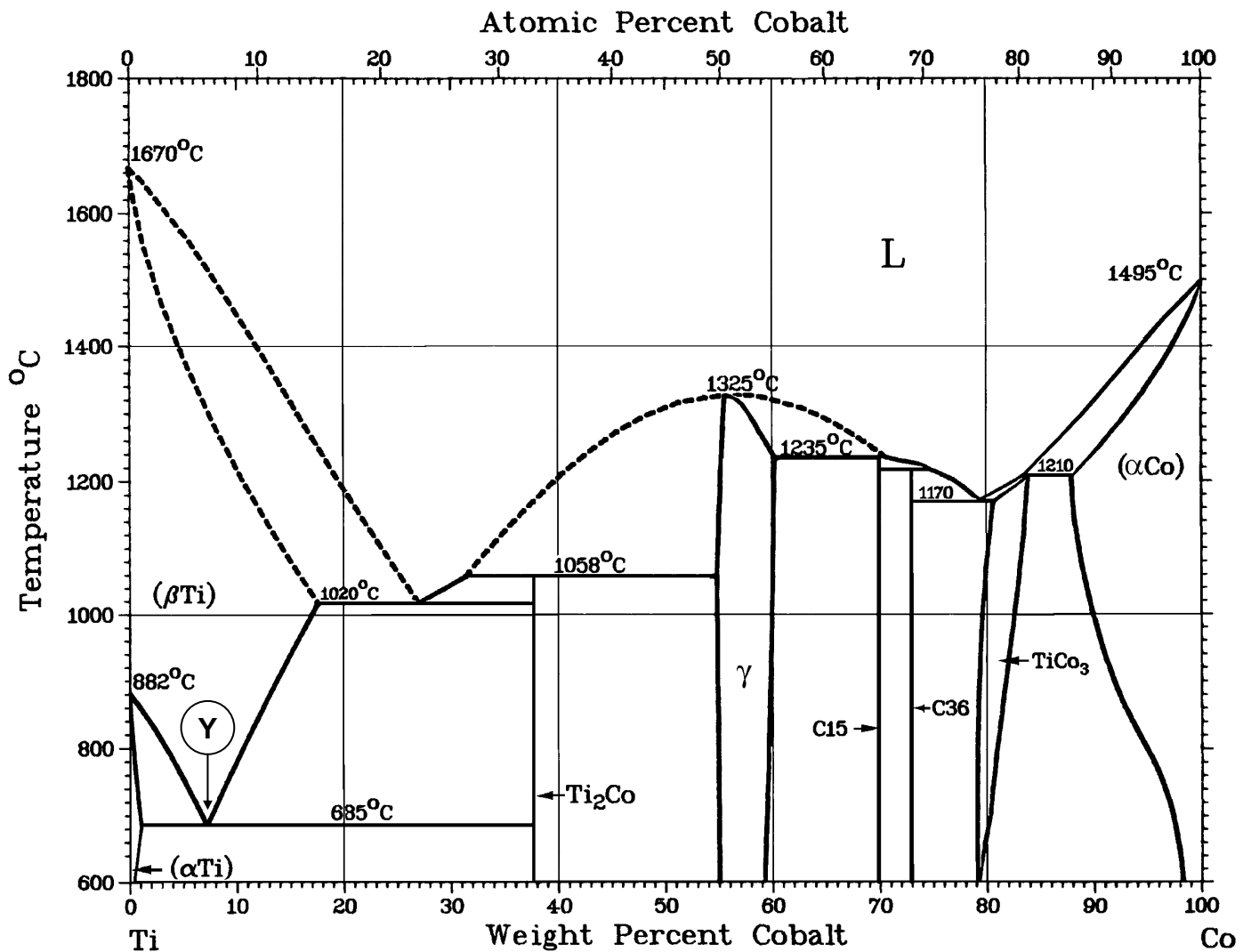


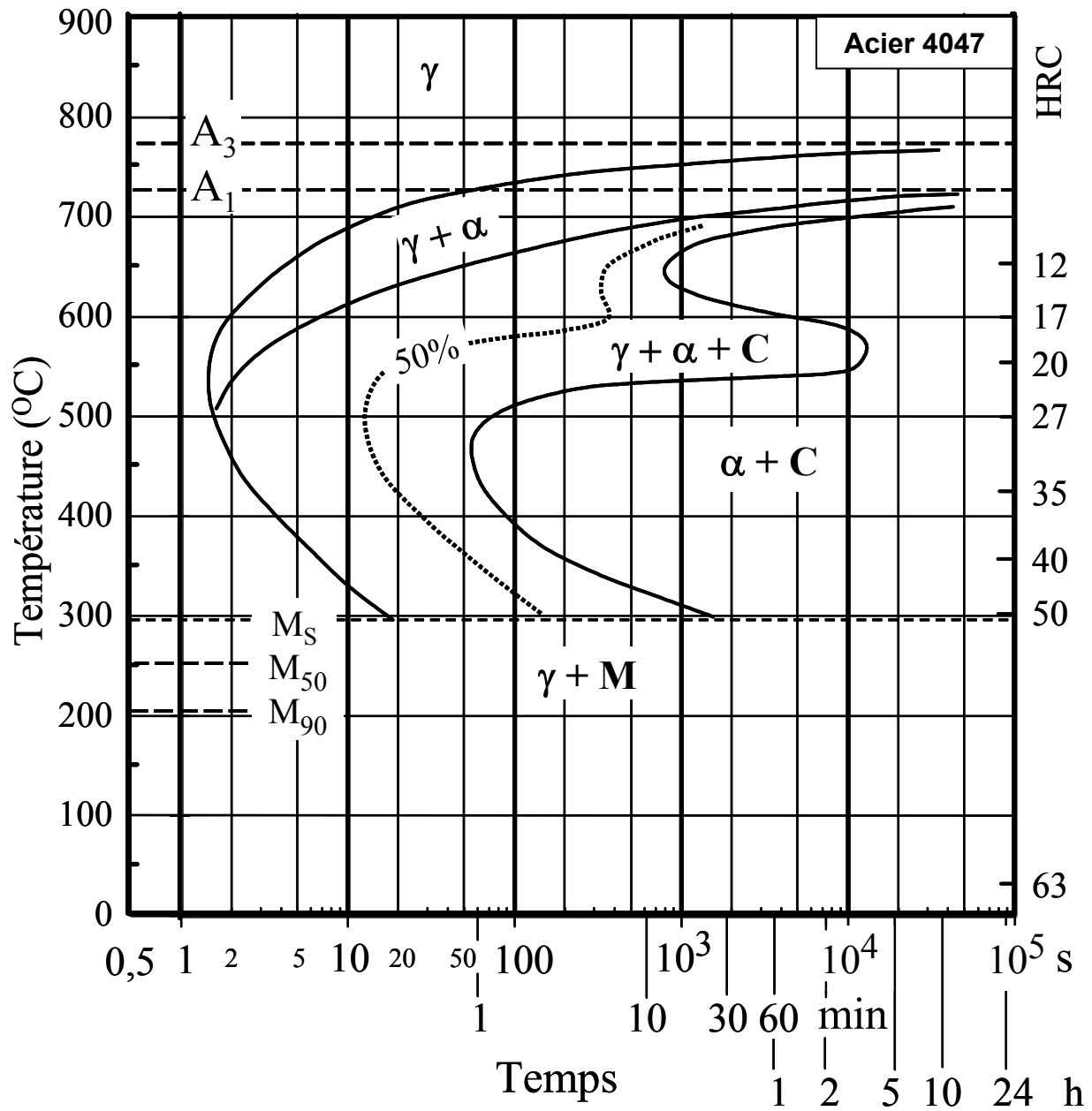
Diagramme de phases titane – cobalt (Ti – Co)

Tableau A-1 : Structure cristalline des phases du diagramme Ti – Co

(αTi)	(βTi)	Ti <sub>2</sub> Co	γ	C15	C36	TiCo <sub>3</sub>	(αCo)
HC	CC	CFC	CC	CFC	HC	CFC	HC

ANNEXES

Exercice n° 2



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

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

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

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

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

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

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

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

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

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_{e.0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

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

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

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

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

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

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m$$

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

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

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

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