

NOM (en majuscules):

CORRIGÉ

PRÉNOM :

SIGNATURE :

MATRICULE :

SECTION :

COURS ING1035 - MATÉRIAUX

Contrôle N° 2

du 23 mars 2004

de 8h45 à 10h20

FORMULAIRE DE RÉPONSES

- NOTES :
- ◆ Aucune documentation permise.
 - ◆ Calculatrices non programmables autorisées.
 - ◆ Les nombres en marge de droite 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 ou la page opposée pour vos calculs**
 - ◆ Le questionnaire comprend **9** pages, incluant les annexes (si mentionnés) et le formulaire général.
 - ◆ Le formulaire de réponses comprend **5** pages.
 - ◆ Vérifiez le nombre de pages de votre questionnaire et de votre formulaire de réponse.

1. EXERCICE n° 1

1.a) Unité de l'axe X du diagramme $ZrO_2 - CaO$.

Justification :

Sur le diagramme, on remarque que la formule chimique du composé défini δ est $CaO.4ZrO_2$, ce qui correspond à un pourcentage molaire de 20% de CaO. Or, ce composé se situe sur la graduation 20 de l'axe X. Par conséquent, les unités de cet axe sont des % molaires.

Unité = % molaire	(1 pt)
--------------------------	--------

1.b) Formule chimique du composé ϵ

Justification :

Ayant une composition égale à 50 % molaire de CaO, le composé défini ϵ admet pour formule chimique **$CaO.ZrO_2$** , qui peut s'écrire aussi **$CaZrO_3$** .

Les valeurs de x, y et z sont donc respectivement égales à **1, 1 et 3**.

x = 1	(1 pt)
y = 1	
z = 3	

1.c) Transformation(s) allotropique(s).

Composant	Transformation(s) allotropique(s)	
	Température (°C)	Phases en présence
ZrO_2	1130	$\alpha \rightleftharpoons \beta$
	2360	$\beta \rightleftharpoons \gamma$
	----	----

1.d) Point(s) eutectique(s).

Nombre	Caractéristiques	
	Température (°C)	Composition (% CaO)
2	2250	40
	2150	72
	----	----

(2 pts)

1.e) Point(s) eutectoïde(s).

Nombre	Caractéristiques	
	Température (°C)	Composition (% CaO)
2	1140	16,8
	1010	5,6
	----	----

(2 pts)

1.f) Composition C_0

Justification :

Le point représentatif de cet alliage est situé dans le domaine biphasé ($\gamma + \epsilon$) et à 1700 °C. (Voir figure en annexe)

En appliquant la règle des bras de leviers à cette température, on obtient: $f_\gamma = \frac{50 - C_0}{50 - 20} = 66,7\% = 0,667$

On en déduit ainsi la valeur de $C_0 = 50 - 0,667(50-20) = 30 \%$

$C_0 =$	30	%	(1 pt)
---------	-----------	---	--------

1.g) Constituants de l'alliage de composition C_0

Justification :

À 2249 °C, l'alliage de composition $C_0 = 30 \%$ mol. est formé de phase γ proeutectique et du constituant eutectique ($\gamma + \epsilon$). Il suffit d'appliquer la règle des bras de levier pour trouver les proportions molaires de ces deux constituants :

$$f_\gamma = (40 - 30)/(40 - 22) = 10/18 = 55,5\% \text{mol}$$

$$f_{\text{eut}} = (30 - 22)/(40 - 22) = 8/18 = 44,5\% \text{mol}$$

Constituant	Proportion (%)
Phase γ proeutectique	55,5 % mol
Eutectique ($\gamma + \epsilon$)	44,5 % mol
-----	-----

(1 pt)

1.h) Traitement thermique possible de l'alliage $ZrO_2 + 5,6 \%$ CaO

Cochez la case appropriée et justifiez votre choix :

À 1150 °C, l'alliage contenant 5,6 %mol. de CaO est en phase γ et tout le CaO est dissout à l'équilibre dans cette phase γ . Si on lui fait subir une trempe à 20 °C, il y aura **transformation allotropique de la phase γ pour donner de la phase α** ; c'est donc une **trempe martensitique** que subit l'alliage.

Remarque : cette méthode est appliquée à la zircone ZrO_2 dopée avec du CaO pour améliorer sa ténacité (voir livre « Des Matériaux », p. 606 et 607)

Transformation martensitique	X
Durcissement structural	

(1 pt)

2. Exercice n° 2

2.a) Première étape d'un traitement de durcissement structural.

La première étape d'un traitement de durcissement structural a pour but de **mettre en solution solide d'équilibre** l'élément d'alliage qui est ici le cuivre. Le cuivre se trouve alors totalement dissout dans la matrice α d'aluminium. Pour réaliser cette mise en solution, il faut porter et maintenir l'alliage 2014 a une température voisine de **550 °C**, selon de diagramme d'équilibre Al - Cu donné.

$\theta_1 =$	550	°C	(1 pt)
--------------	------------	----	--------

2.b) Deuxième étape d'un traitement de durcissement structural.

Une fois que le cuivre est totalement dissout dans la matrice α d'aluminium, on **trempe l'alliage à la température ambiante**. On évite ainsi la précipitation du composé défini θ (Al_2Cu) prévu par le diagramme d'équilibre et on obtient une **solution solide métastable d'aluminium α sursaturée en atomes de cuivre** qui s'y retrouvent piégés par la trempe rapide. (1 pt)

2.c) Troisième étape d'un traitement de durcissement structural.

La solution solide métastable sursaturée en Cu obtenue après la trempe est maintenant portée à une température supérieure à la température ambiante afin d'accélérer sa décomposition et son **retour partiel vers l'équilibre** prévu par le diagramme. Avant que cet équilibre soit atteint, on a apparition de **précipités intermédiaires durcissants (zones GP, précipités θ'' et θ')**. En contrôlant la température et le temps de vieillissement, on peut ainsi obtenir des propriétés mécaniques optimales. (1 pt)

2.d) Caractéristiques de la 3^{ème} étape appliquée à l'alliage 2014.

Voir la figure donnée en annexe pour la délimitation de la fenêtre de traitement conduisant aux propriétés recherchées .

Température		149 °C	(2 pts)
Durée	Temps min.	15 h	
	Temps max	20 h	

3. Exercice n° 3

3.a) Force initiale F_0 de tension du hauban.

Justification :

La contrainte initiale σ_0 dans le hauban doit être égale à : $\sigma_0 = 0.7 \cdot R_e = (0,7) \cdot (28 \text{ MPa}) = 19,6 \text{ MPa}$

La force F_0 à appliquer au hauban pour obtenir une telle contrainte est donc égale à :

$$F_0 = \sigma_0 S_0 = \sigma_0 (\pi d^2 / 4) = (19,6 \times 10^6) ((\pi \times 0,03^2) / 4) = 1,3854 \times 10^4 \text{ N} = 13,85 \text{ kN}$$

$F_0 = 13,85 \text{ kN}$ (1 pt)

3.b) Allongement initial ΔL du hauban

Justification :

Selon la loi de Hooke, la déformation ϵ dans le hauban est égale à :

$$\epsilon = \sigma / E = (19,6 \text{ MPa}) / (1,3 \text{ GPa}) = 1,508 \times 10^{-2} = 1,508 \%$$

L'allongement initial ΔL à imposer au hauban est égal à :

$$\Delta L = \epsilon L_0 = (1,508 \times 10^{-2}) \times 10 \text{ m} = 15,08 \text{ cm}$$

$\Delta L = 15,08 \text{ cm}$ (1 pt)

3.c) Constante de relaxation viscoélastique du polypropylène

Justification :

Après 24 h, la force ayant diminuée de 10 %, la contrainte dans le hauban a diminué aussi de 10 %..

D'après la loi de comportement viscoélastique du polypropylène, on peut écrire :

À l'instant initial $t_0 = 0$, $\sigma = \sigma_0 = 19,6 \text{ MPa}$ (1)

Pour $t = 24 \text{ h}$, $\sigma_t = 0,9 \sigma_0 = \sigma_0 \exp(t/\tau) = 17,84 \text{ MPa}$ (2)

En prenant le logarithme du rapport (2)/(1), on obtient ainsi : $\ln(\sigma_{24h} / \sigma_0) = \ln(0,9) = (-24/\tau)$

On en déduit ainsi la valeur de $\tau = -24 / \ln(0,9) = 227,8 \text{ h}$

$\tau = 227,8 \text{ h}$ (1 pt)

3.d) Remise sous tension du hauban

Justification :

En appliquant la méthodologie présentée à la question précédente, on obtient ainsi :

$$\text{Au temps } t \text{ recherché : } \sigma_t = R_e/3 = \sigma_0 \exp(-t/\tau) = 0,9R_e \exp(-t/\tau) \quad (3)$$

Après simplification de l'équation (3), on obtient :

$$t = -\tau \cdot \ln(0,333/0,9) = 226,5 \text{ h} = 9,43 \text{ j}$$

t = 9,43 j	(2 pts)
-------------------	---------

4. Exercice n° 4

4.a) Rapport R des contraintes

Justification :

Par définition, le rapport de contraintes du chargement cyclique est égal à :

$$R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max} = F_{\min}/F_{\max} = 0/F_{\max} = 0$$

R = 0	(½ pt)
--------------	--------

4.b) Facteur de concentration de contrainte K_t associé au congé

Justification :

Hauteur de l'épaulement : $h = (D - d)/2 = (60 \text{ n} - 40)/2 = 10 \text{ mm} \rightarrow h/r = 10/5 = 2$

Rapport r/d : $r/d = 5/40 = 0,125$

Sur la figure donnée et pour ces valeurs de r/d et de h/r, on en déduit de la valeur du facteur K_t de concentration de contrainte du congé (voir figure en annexe).

$K_t = 1,65$	(½ pt)
--------------------------------	--------

4.c) Amplitude maximale de la sollicitation cyclique

Justification :

D'après la courbe de Wöhler obtenue à $R = -1$, la limite de fatigue $\sigma_{N=10^6}$ est égale à 205 MPa

Puisqu'on ne dispose que de la courbe de Wöhler à $R = -1$, il faut utiliser la méthode de Goodman pour en déduire la variation de contrainte $\Delta\sigma$ et l'amplitude de contrainte $\sigma_a = \Delta\sigma/2$. Voir la construction de Goodman sur la figure en annexe, ce qui permet de déduire $\Delta\sigma_{loc} = 287 \text{ MPa}$ et $\sigma_{a,loc} = \Delta\sigma_{loc}/2 = 143,5 \text{ MPa}$ pour $R = 0$.

Cette contrainte est la contrainte locale dans le congé, par conséquent

la contrainte nominale est égale à : $\sigma_{a,nom} = \sigma_{a,loc}/K_t = 143,5/1,65 = 87 \text{ MPa}$

$\sigma_a = 87 \text{ MPa}$	(2 pts)
---	---------

4.d) Force maximale de la sollicitation cyclique

Justification :

La force maximale à ne pas dépasser est égale à $F_{\max} = 2\sigma_{a,nom} (\pi d^2/4)$

où $\sigma_{a,nom}$ est la valeur trouvée à la question précédente.

$F_{\max} = 218,6 \text{ kN}$	(½ pt)
---	--------

4.e) Rayon de courbure du congé pour obtenir une durée de vie trois fois plus grande

Justification :

D'après la courbe de Wöhler obtenue à $R = -1$, la limite de fatigue $\sigma_{N=3 \times 10^6}$ est égale à 180 MPa.

En utilisant la construction de Goodman (voir fig. en annexe), on en déduit $\Delta\sigma_{loc} = 260 \text{ MPa}$ pour $R = 0$.

Cette contrainte est la contrainte locale dans le congé. Puisque la force, donc la contrainte nominale, ne peuvent être modifiées, il faut par conséquent que le facteur de concentration de contrainte K_t soit égal à :

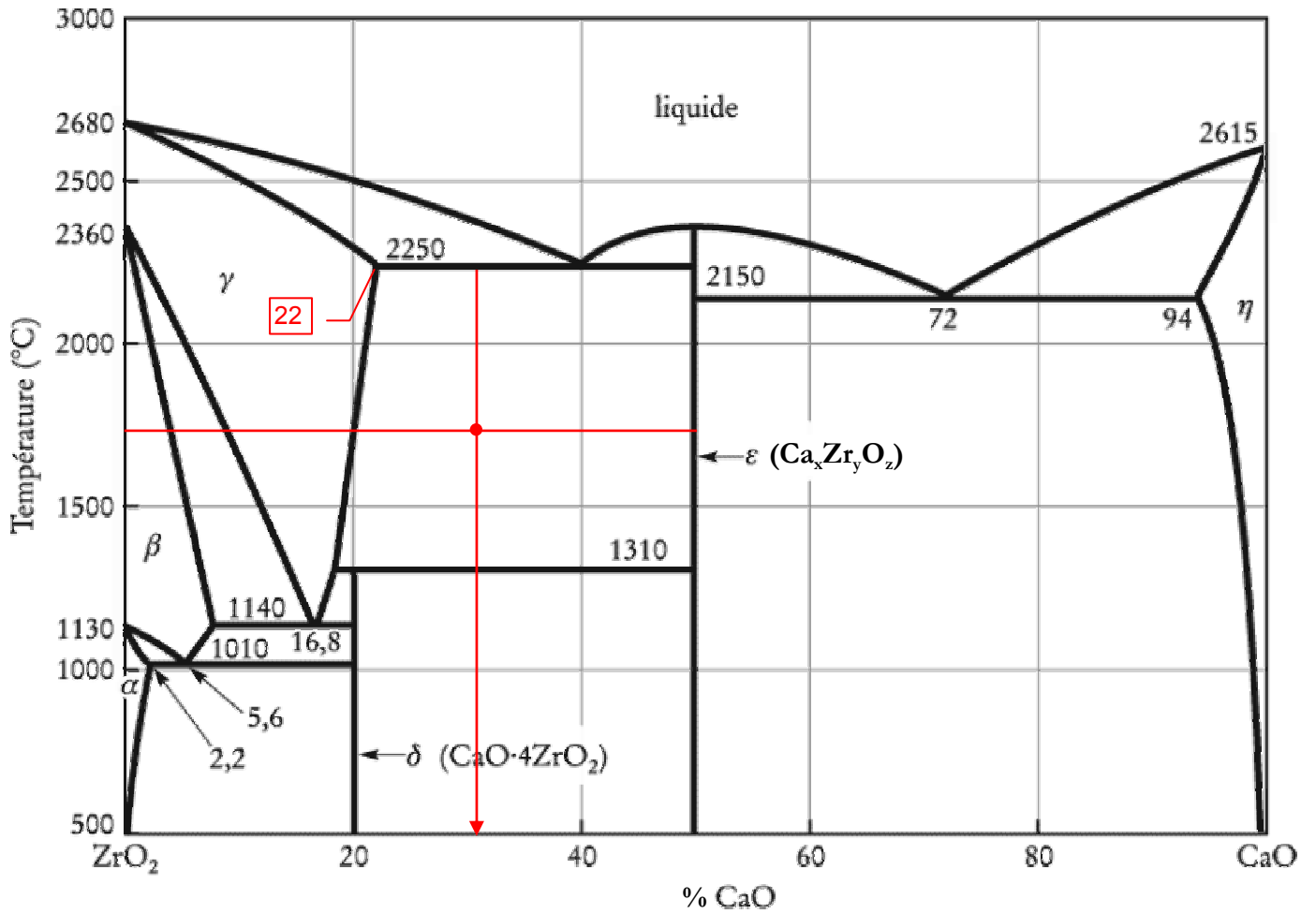
$$K_t = \Delta\sigma_{loc}/\Delta\sigma_{nom} = 260/174 = 1,494$$

Il faut donc augmenter le rayon de courbure r du congé ($r/d \uparrow$ et $h/r \downarrow$).

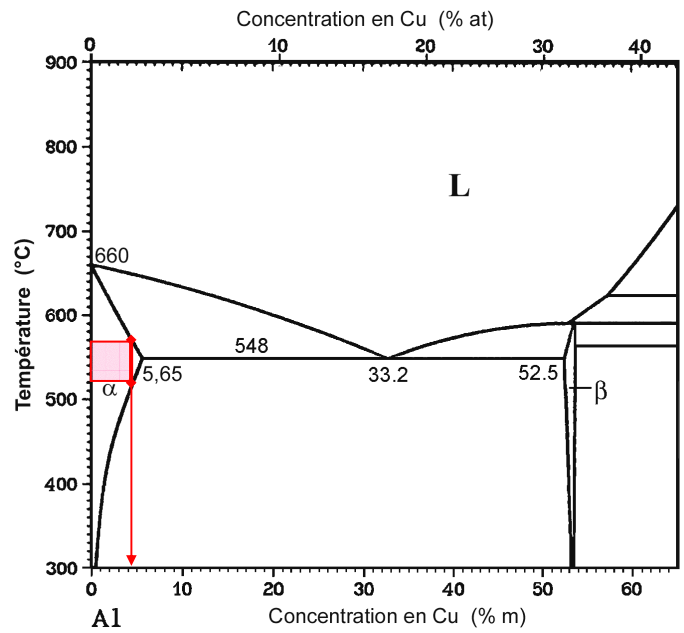
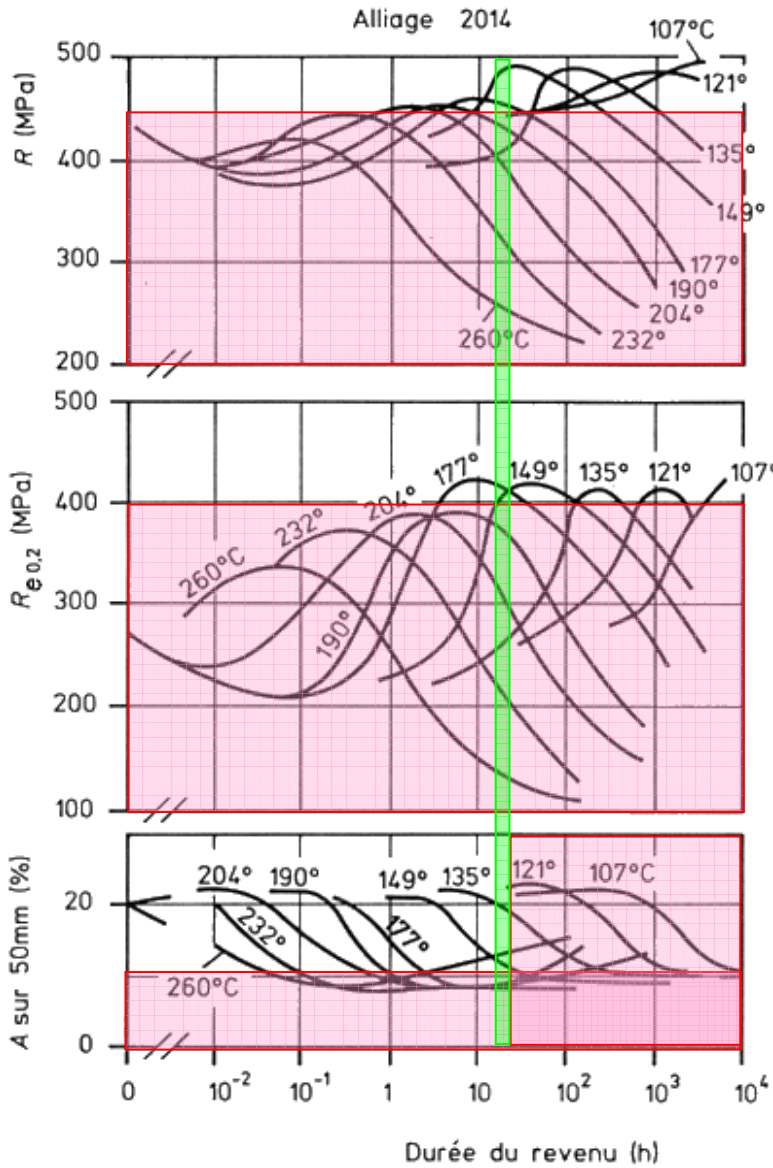
Par interpolation linéaire entre les courbes $h/r = 2$ et $h/r = 1$ (voir fig. en annexe), on obtient ainsi $r/d = 0,165$ et $h/r = 1,515$ Donc $r = 0,165 \times 40 \text{ mm} = 6,6 \text{ mm}$

r = 6,6 mm	(1,5 pts)
-------------------	-----------

Exercice n° 1 : Diagramme $ZrO_2 - CaO$



Exercice n° 2 : Alliage 2014 (Al + 4,4 %m Cu)



Exercice n° 4 : Alliage 2024-T6

