

COURS ING1035 - MATÉRIAUX

CONTRÔLE N° 2

du 23 mars 2004

de 8h45 à 10h20

Q U E S T I O N N A I R E

- NOTES :**
- ♦ Aucune documentation permise.
 - ♦ Calculatrices non programmables autorisées.
 - ♦ 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 ou une justification, 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 du questionnaire et du formulaire de réponses.

Exercice n° 1

L'oxyde de zirconium, appelé la **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 **$\text{ZrO}_2 - \text{CaO}$** .

- En quelle unité (% massique ou % molaire) est gradué l'axe horizontal de ce diagramme ? *Justifiez votre réponse.* (1 pt)
- 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)
- Quel composant de ce diagramme présente une ou des transformations de phases allotropiques et à quelle(s) température(s) se produisent ce(s) transformation(s) ? (1 pt)
- Combien de points eutectiques contient ce diagramme ? Quelles sont les caractéristiques de ces points eutectiques (température et composition) ? (2 pts)
- Combien de points eutectoïdes contient ce diagramme ? Quelles sont les caractéristiques de ces points eutectoïdes (température et composition) ? (2 pts)
- Quelle doit être la composition nominale C_0 d'un alliage $\text{ZrO}_2 - \text{CaO}$ pour qu'à 1700°C cet alliage contienne 66,7% de phase γ et 33,3 % de phase ε ? (1 pt)
- Si l'alliage de composition C_0 étudié à la question précédente est liquéfié puis refroidi à l'équilibre jusqu'à 2249°C , quels seront les constituants présents dans sa microstructure ? Précisez aussi la proportion (fraction) de chaque constituant de la microstructure. (1 pt)
- Quel type de traitement thermique (transformation martensitique ou durcissement structural) peut subir un alliage $\text{ZrO}_2 + 5,6\% \text{ CaO}$ s'il est préalablement porté à 1150°C ? *Justifiez votre réponse.* (1 pt)

Exercice n° 2

Les alliages d'aluminium de la série 2000 sont fréquemment utilisés en aéronautique car leurs propriétés mécaniques peuvent être modifiées par un traitement thermique de durcissement structural. Considérez l'alliage 2014 qui contient 4,4 %m de cuivre (Cu) et pour lequel vous trouverez en annexe des données utiles.

- Quelle est la première étape d'un traitement de durcissement structural et quel est son but ? À quelle température θ_1 ($^\circ\text{C}$) doit être réalisée cette première étape pour l'alliage 2014 ? (1 pt)
- Quelle est la deuxième étape du traitement de durcissement structural et quel est son but ? (1 pt)
- Quelle est la troisième étape du traitement de durcissement structural et quel est son but ? (1 pt)
- Donnez les caractéristiques (température, durée) de cette troisième étape dans le cas de l'alliage 2014 si l'on désire que cet alliage ait les propriétés mécaniques suivantes : (2 pts)

$$R_{e0,2} \geq 400 \text{ MPa}$$

$$R_m \geq 450 \text{ MPa}$$

$$A \geq 11 \%$$

Note : pour des raisons industrielles pratiques, la durée de la troisième étape ne peut excéder 100 heures.

Exercice n° 3

Un hauban servant à maintenir une grande tente est fait d'un câble de polypropylène ayant un diamètre de 3 cm. Pour les fins de l'exercice, on considérera le câble comme une pièce massive monolithique de polypropylène. La distance L_0 entre les points fixes d'attache de ce hauban est égale à 10 m. Pour assurer une tension suffisante au hauban au moment du montage de la tente, il faut l'allonger élastiquement afin que la contrainte initiale apparaissant dans le hauban soit égale à 70 % de la limite d'élasticité R_e du polypropylène, dont les propriétés mécaniques sont les suivantes :

$$E = 1,3 \text{ GPa} \quad R_e = 28 \text{ MPa} \quad R_m = 35 \text{ MPa} \quad A = 150 \%$$

- À l'instant t_0 où la tente est montée, quelle force F_0 (en kN) doit être appliquée au hauban pour satisfaire à la condition de contrainte initiale présentée ci-dessus ? (1 pt)
- Sous l'effet de cette force F_0 , de quel allongement ΔL (en cm) le hauban verra sa longueur initiale L_0 augmenter ? (1 pt)

À température ambiante, le polypropylène manifeste toutefois un comportement viscoélastique caractérisé par l'équation suivante :

$$\sigma_t = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

où : σ_0 = contrainte initiale au temps $t = 0$

σ_t = contrainte au temps $t > 0$

τ = constante de relaxation viscoélastique caractéristique du matériau

Vingt-quatre heures (24 h) après avoir installé la tente et tendu le hauban, on constate que la force F auquel il est soumis est alors égale à 90 % de la force initiale F_0 .

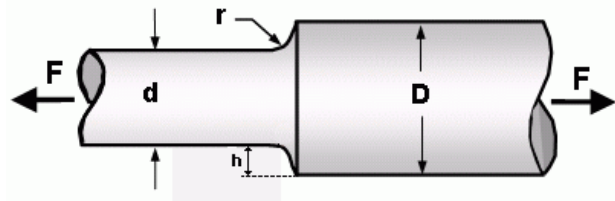
- Quelle est la valeur (en h) de la constante τ de relaxation viscoélastique du polypropylène ? (1 pt)
- Sachant que, pour des raisons de stabilité de la tente, la contrainte minimale appliquée au hauban doit toujours être au moins égale au tiers (1/3) de la limite d'élasticité du polypropylène, au bout de combien de temps (exprimé en jours) doit-on tendre de nouveau le hauban ? (2 pts)

Exercice n° 4

Schématisé à la figure ci-contre, un axe de section circulaire est fait d'un alliage d'aluminium 2014-T6. En service, cet axe est soumis à un chargement cyclique d'amplitude constante caractérisé par une force $F_{\max} > 0$ et une force $F_{\min} = 0$.

Les dimensions de l'axe sont les suivantes :

$$d = 40 \text{ mm}; \quad D = 60 \text{ mm}; \quad r = 5 \text{ mm}$$



Cet axe doit avoir une durée de vie minimale $N_f = 10^6$ cycles. Pour cet alliage 2014-T6, vous ne disposez que de ses propriétés mécaniques en traction ($R_{e0,2} = 420 \text{ MPa}$; $R_m = 480 \text{ MPa}$; $A = 9\%$) et de sa courbe de Wöhler obtenue sur des éprouvettes lisses sans congé et pour un rapport de contrainte $R = -1$. Cette courbe de Wöhler ainsi que l'abaque du facteur K_t de concentration de contraintes associé à un congé de raccordement sont donnés en annexe.

- Quelle est la valeur du rapport R des contraintes caractérisant le chargement cyclique auquel est soumis cet axe ? (½ pt)
- Quelle est la valeur du facteur K_t de concentration de contrainte associé au congé de raccordement de l'axe ? (½ pt)

- c) Quelle est l'amplitude maximale de contrainte σ_a à laquelle l'axe peut être soumis pour avoir une durée de vie de 10^6 cycles ? *Suggestion : pensez à Goodman!* (2 pts)
- d) Dans ces conditions, quelle est la force maximale $F_{\max}$ (en kN) que peut supporter l'axe ? (½ pt)

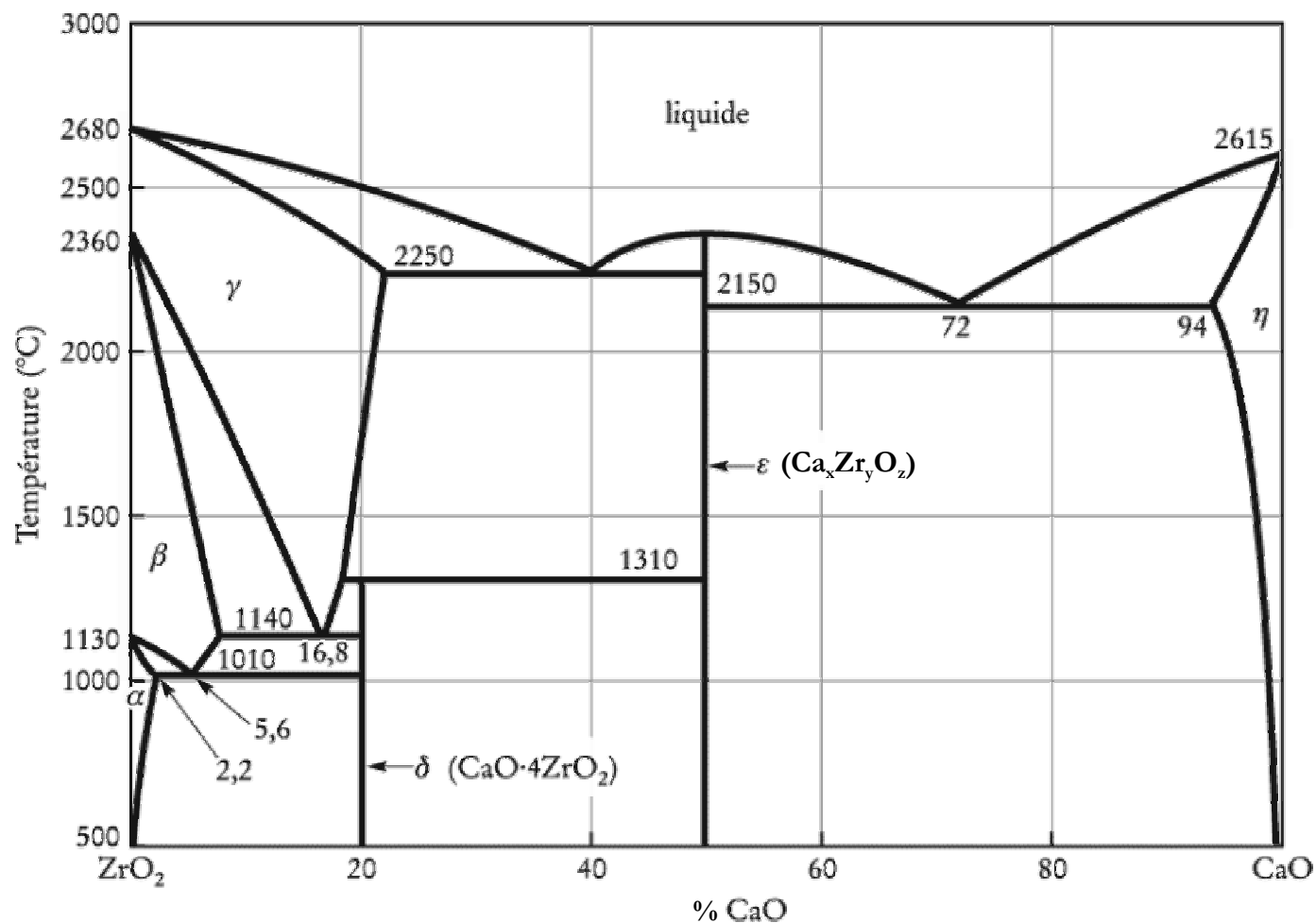
Sachant que les dimensions **d** et **D** de l'axe ne peuvent être modifiées et que la force $F_{\max}$ calculée ci-dessus ne peut pas être réduite, vous désirez maintenant que l'axe ait une durée de vie trois (3) fois plus grande.

- e) Quelle valeur du rayon de courbure **r** du congé choisissez-vous ? (1½ pts)

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

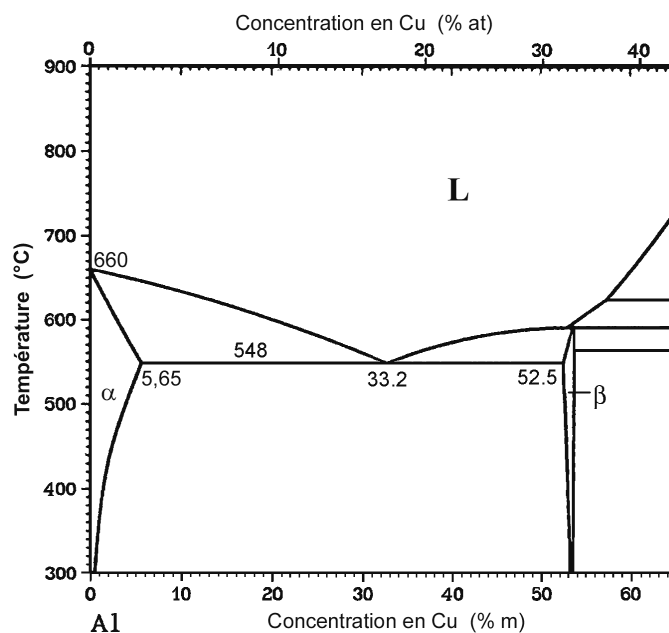
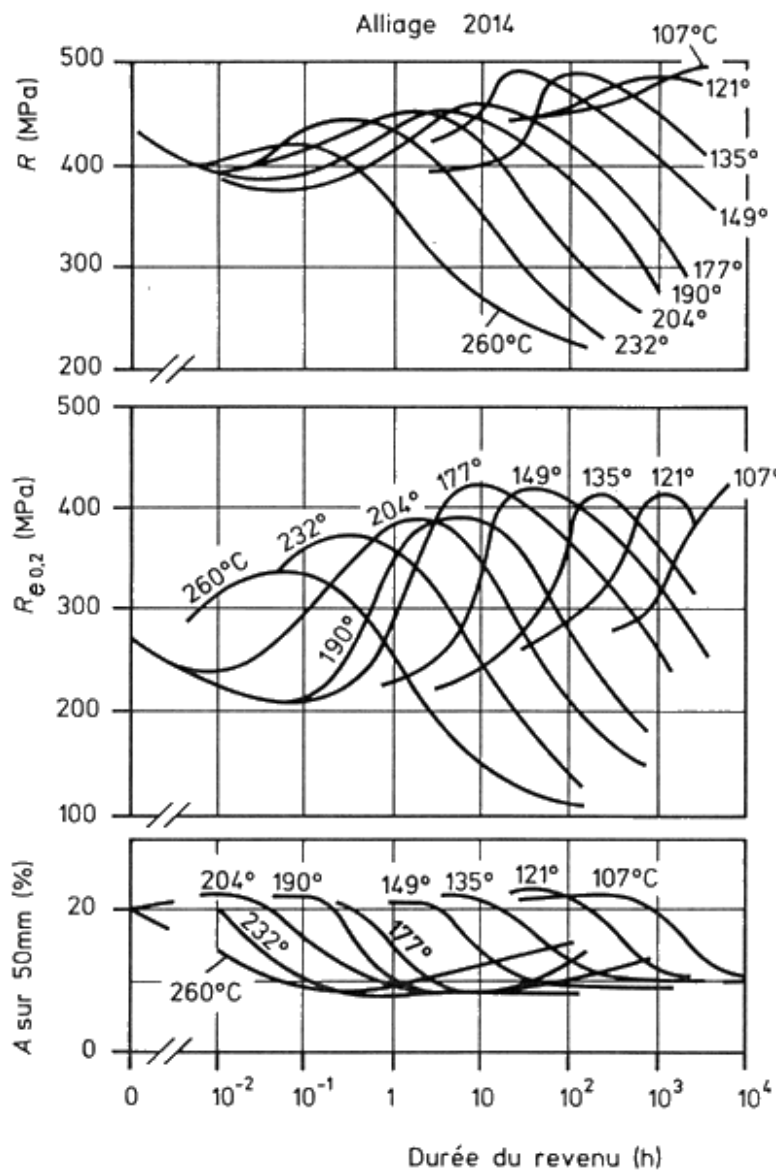
ANNEXES

Exercice n° 1 : Diagramme $\text{ZrO}_2 - \text{CaO}$



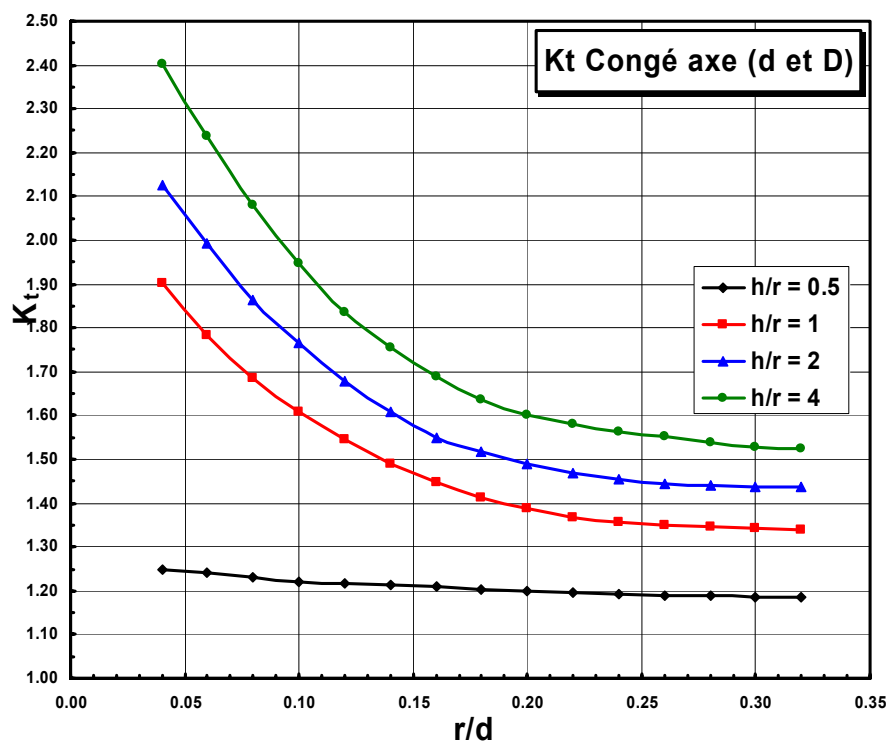
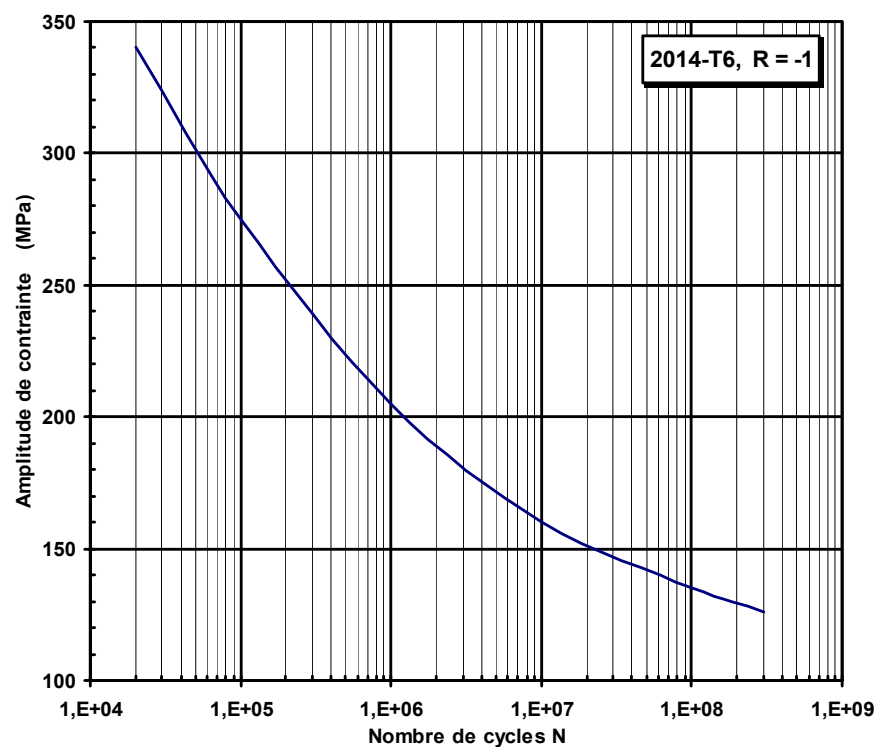
ANNEXES

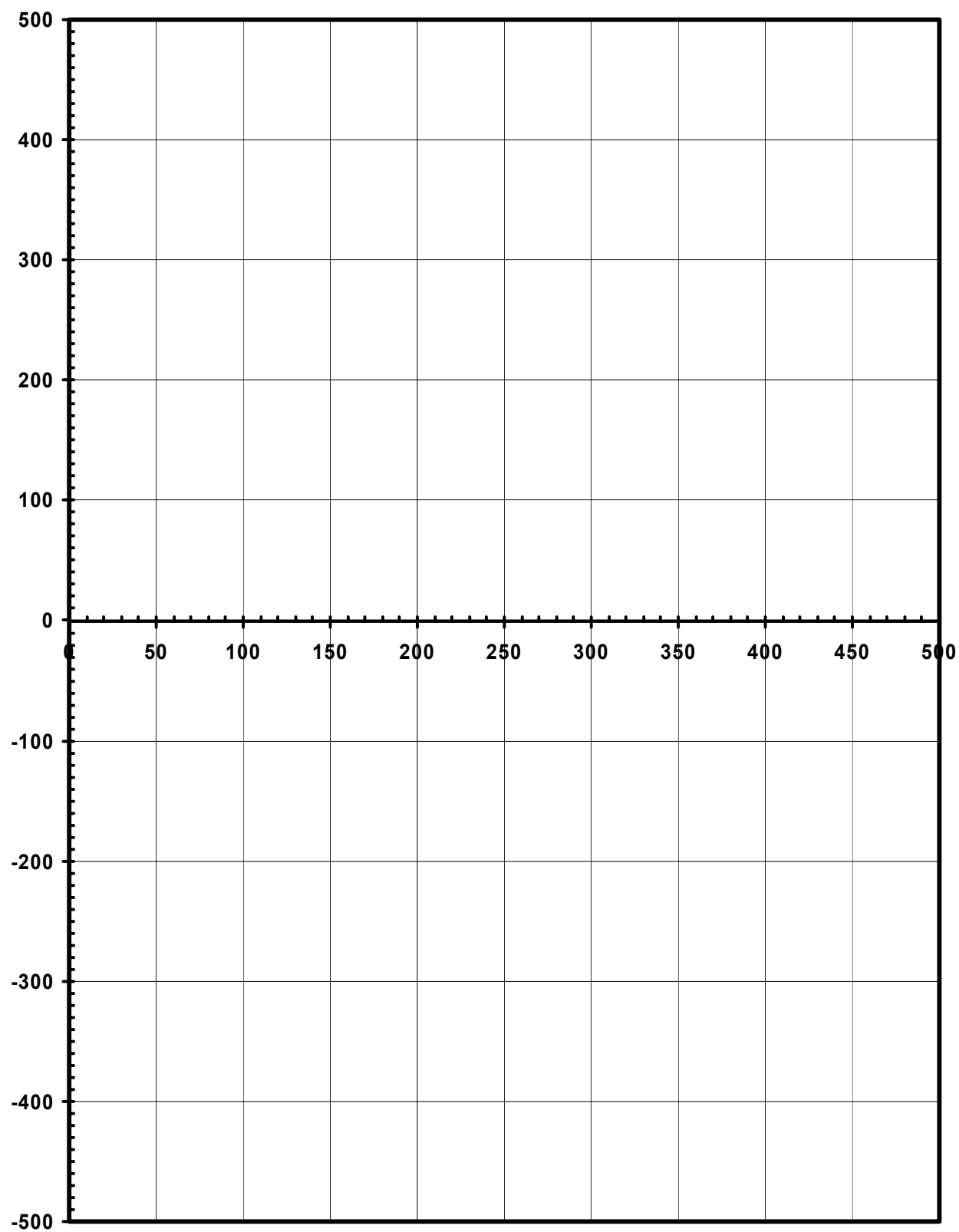
Exercice n° 2 : Alliage 2014 (Al + 4,4 %m Cu)



ANNEXES

Exercice n° 4 : Alliage 2024-T6





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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$l_c = a^* = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$$

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

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

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

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

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

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

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

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

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

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

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

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

$$R_m = (R_m)_0 \exp^{-nP}$$

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

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

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

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

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

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m$$

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

$$(R_m)_C = k V_f (R_m)_f + V_m \sigma_m$$