

Comportement Mécanique des Matériaux

EPFL - Cours MSE 234, Section Mécanique Ba3

Examen final du 29 janvier 2025

Instructions: écrivez votre nom ci-dessous et répondez sur ces feuilles. Si vous avez besoin de plus de place pour vos réponses, utilisez la dernière feuille blanche et indiquez clairement à la question posée qu'une partie de sa réponse se trouve à la fin de votre copie d'examen.

Aucun document autre que cet énoncé (ou un dictionnaire de langues non annoté) ne peut être consulté pendant l'examen. La réponse à l'examen est individuelle et composée sans consultation auprès d'autrui.

Votre carte Camipro ainsi que tout appareil électronique utilisé pendant l'examen doivent être contrôlés pendant l'examen ; nous vous prions donc de les laisser sur votre table pour contrôle.

Si vous avez une question levez votre bras sans déranger vos camarades. Si votre question est d'intérêt général elle sera écrite avec sa réponse au tableau des salles de l'examen.

Le nombre de points au total est de

48 pour la partie portant principalement sur les travaux pratiques

180 dont 60 de questions à choix multiple pour la partie portant principalement sur le cours enseigné

Durée totale de l'examen: 3 heures (15h15 à 18h15).

Note importante : une réponse donnant seulement un résultat numérique ou « oui » ou « non » sans explication est une réponse incomplète qui ne recevra pas tous les points (et de plus ne permettra pas de donner des points partiels). Ecrivez donc à chacune de vos réponses votre raisonnement.

Votre Nom de famille puis votre Prénom :

Votre Numéro identifiant Sciper (= numéro sur carte Camipro):

PARTIE PORTANT SUR LES TRAVAUX PRATIQUES

48 points au total

TP Traction

TP 1 - Lors du TP traction, vous avez testé des échantillons d'essai de traction plats des 5 métaux ou alliages métalliques suivants :

- Cuivre pur (99.5%) ayant été recuit pendant 1h à 815 °C
- Laiton (Cu-38%Zn-2%Pb) ayant été recuit pendant 1h à 500 °C
- Aluminium 6082-T6 (0.6-1.2 %Mg, 0.4-1.0%Mn, 0.7-1.3%Si, $\leq 0.5\%Fe$), état T6 (2h à 540 °C, puis trempe à 25 °C, puis 1.5h à 180 °C et trempe à l'air ambiant)
- Aluminium 6082-O (0.6-1.2%Mg, 0.4-1.0%Mn, 0.7-1.3%Si, $\leq 0.5\%Fe$), état O (1.5h à 415 °C)
- Acier S235 (0.35%C, 0.9%Mn, 0.04%P, 0.15-0.4%Si, 0.05%S) recuit pendant 1h à 700 °C

(Note: toutes les compositions d'alliages sont exprimées en pourcentage massique).

Des courbes de traction contrainte-déformation typiques de 4 parmi ces 5 métaux ou alliages métalliques, où contrainte et déformation sont calculées sur base des dimensions de la section réduite (gage section) initiale, sont données en Fig. 1 ci-dessous :

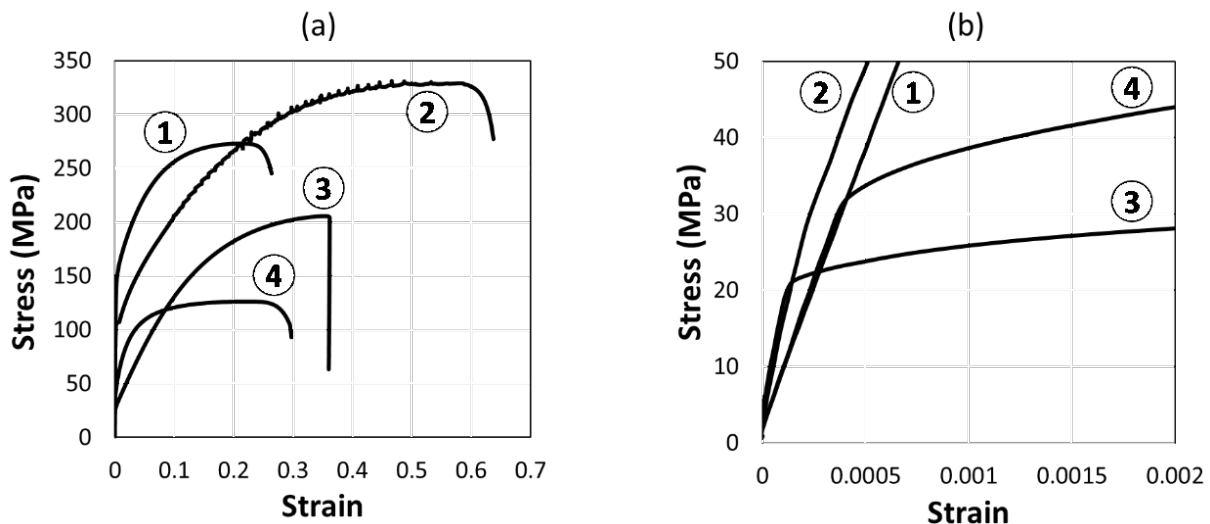


Fig.1 : (a) Courbes de traction de 4 échantillons métalliques testés lors du TP traction ; (b) vue détaillée des axes contrainte-déformation au tout début des courbes de traction en Fig. 1(a).

a) - Les courbes de traction de la Fig. 1 sont-elles des courbes contrainte-déformation nominales ou vraies (engineering or true stress strain curves) ?

(2 points; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

TP Weibull

TP 2 - Vous avez réalisé un essai de flexion trois points sur 6 échantillons de volume, géométrie, composition et microstructure identiques. Les valeurs de contraintes à la rupture (locale maximale) obtenues pour chaque échantillon sont rapportées dans le tableau ci-dessous.

Numéro de test	σ_f : contrainte de rupture (MPa)
1	178
2	276
3	262
4	296
5	210
6	248

Vous avez ensuite classé les échantillons par contrainte à la rupture croissante, puis vous avez calculé la probabilité cumulative de rupture P_f de chacun des échantillons à l'aide de la formule suivante (adaptée quand on a peu d'échantillons) :

$$P_f = \frac{n - 0.5}{N}$$

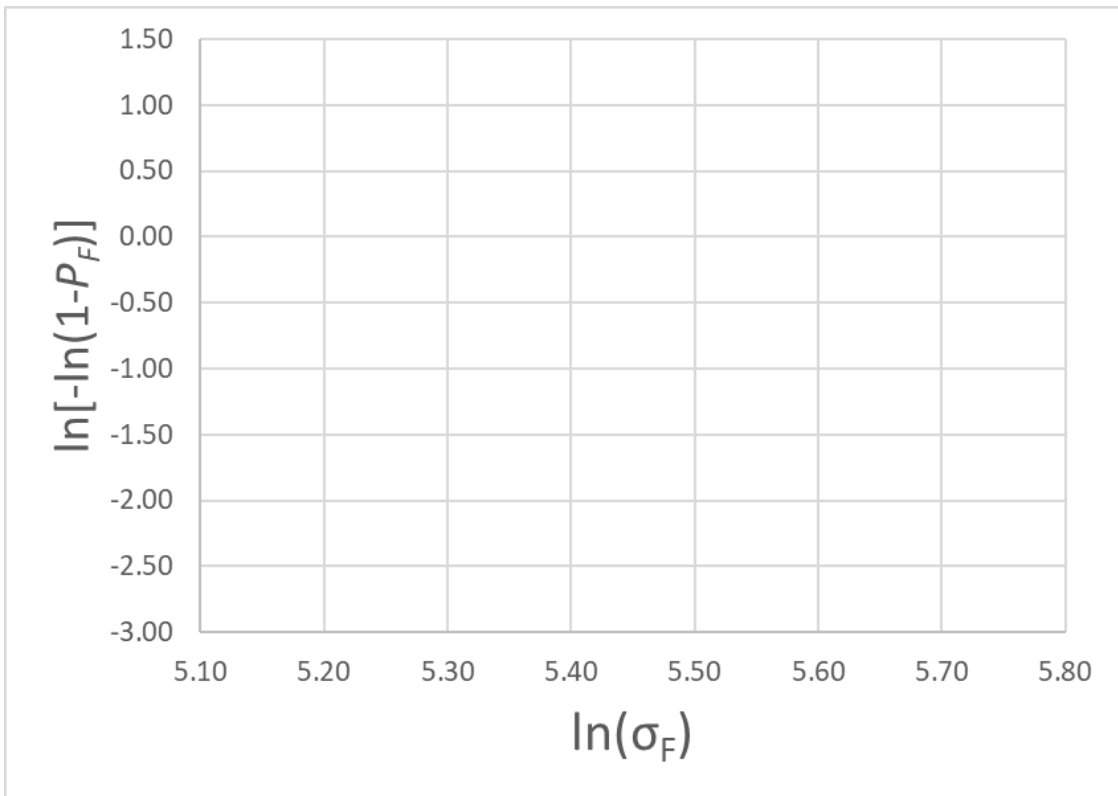
Vous avez ensuite calculé $\ln[-\ln(1-P_f)]$ ainsi que $\ln(\sigma_f)$ pour chacun de ces 6 échantillons : ces quantités sont dans les deux colonnes de droite du tableau ci-dessous (Test number = numéro d'essai ; failure strength = contrainte à la rupture ; ranked = ordonné par valeur ; failure probability = probabilité de rupture)

Test number	σ_f : failure strength (MPa)	σ_f ranked	Pf:failure probability	$\ln[-\ln(1-P_f)]$	$\ln(\sigma_f)$
1	178	178	0.08	-2.44	5.18
2	276	210	0.25	-1.25	5.35
3	262	248	0.42	-0.62	5.51
4	296	262	0.58	-0.13	5.57
5	210	276	0.75	0.33	5.62
6	248	296	0.92	0.91	5.69

a) Ecrivez la loi de Weibull, qui lie P_f et σ_f , pour une série d'échantillons de volume, de type d'essai et de géométrie identiques.

(1 point)

b) En utilisant le graphe ci-dessous et l'équation de la question précédente, calculez le module de Weibull m pour le matériau de cette série d'essais.



(4 points ; justifiez votre calcul pour obtenir tous les points)

c - Calculez à partir de ce même graphe la contrainte de rupture σ_f à laquelle la probabilité de rupture P_F est de 63 %.

(2 points ; justifiez votre calcul pour obtenir tous les points)

TP Résilience

TP 3 - En TP, vous avez mesuré la résilience d'un acier de cémentation pour décolletage C15Pb dont la composition est Fe - 0.15%C, 0.15-0.3%Pb et vous avez obtenu la courbe tracée sur la Fig. 2 ci-dessous.

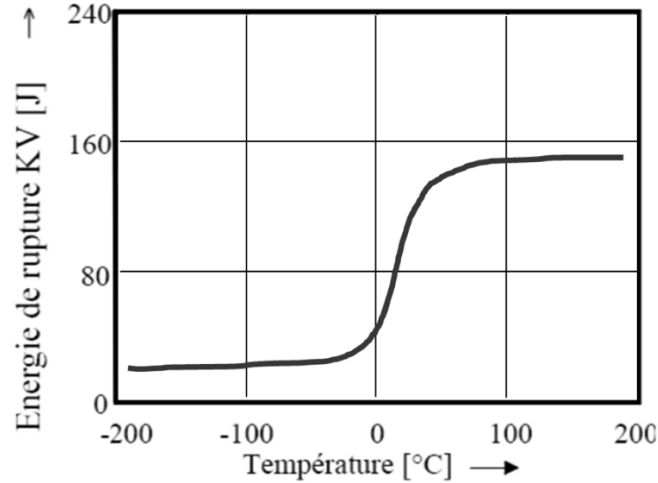


Fig. 2 : Courbe de l'énergie de rupture en fonction de la température pour le matériau C15Pb obtenue avec des éprouvettes ISO-V.

a) - Dessinez sur ce même graphe (Fig. 2), la courbe que vous vous attendez à obtenir après le même essai si vous ajoutez 3.5% de Ni à cet acier et justifiez votre réponse. Nommez et marquez cette courbe a).

(2 points, justifiez votre réponse pour obtenir tous les points)

b) - Dessinez sur ce même graphe (Fig. 2), la courbe que vous vous attendez à obtenir si vous avez un acier de la composition suivante : <0.07%C, 18%Cr, 10%Ni qui est non magnétique et justifiez votre réponse. Nommez et marquez cette courbe b).

(3 points ; justifiez votre réponse pour obtenir tous les points)

c) - Quel type d'entaille sur l'éprouvette d'essai de résilience utiliseriez-vous, et pourquoi, pour mesurer la résilience d'un matériau très fragile ?

(2 points ; justifiez votre réponse pour obtenir tous les points et donc écrivez pourquoi vous proposez ce type d'entaille)

TP Écrouissage

TP 4 - La microstructure initiale de trois échantillons ayant la forme de plaques à section rectangulaire de dimensions 15 x 15 x 5 mm, en aluminium pur à 99.5%, déformés puis recuits à 600 °C pendant 6h, est représentée en Fig. 3 ci-dessous.

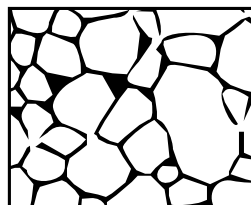


Fig. 3 : Microstructure des échantillons d'aluminium pur 99.5 % recuits à 600 °C pendant 6h. Grossissement 100X (1 cm correspond à 100 μm)

Ces trois échantillons subissent ensuite les traitements suivants :

- 1) L'échantillon 1 est déformé à froid à l'aide d'un laminoir pour réduire son épaisseur à 4.6 mm, ce qui correspond à un taux de déformation en compression de $e = 8.3 \%$. Cet échantillon 1 subit ensuite un recuit d'1h à 500 °C.
- 2) L'échantillon 2 est déformé à froid à l'aide d'un laminoir pour réduire son épaisseur à 4.4 mm, ce qui correspond à un taux de déformation en compression de $e = 12.8 \%$. Cet échantillon 2 subit ensuite un recuit d'1h à 500 °C.
- 3) L'échantillon 3 subit uniquement un recuit d'1h à 500 °C.

a) - À quel numéro d'échantillon correspondent chacune des trois microstructures ci-dessous, prises au même grossissement que la Fig. 3 ?

(4 points ; justifiez chaque réponse pour obtenir tous les points)

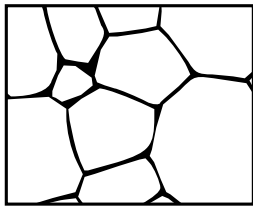


Fig. 4

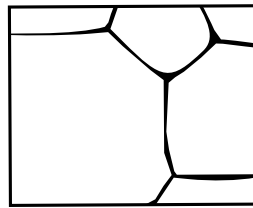


Fig. 5

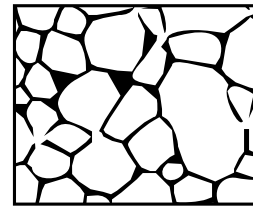


Fig. 6

Figure 4: Echantillon n° ____ car :

Figure 5: Echantillon n° ____ car :

Figure 6: Echantillon n° ____ car :

b) - Lequel de ces trois échantillons aura la dureté la plus élevée et pourquoi ?

L'échantillon n° ____

(2 points ; justifiez votre réponse pour obtenir tous les points)

TP Traitements thermiques

TP 5 - Vous avez réalisé un essai Jominy sur l'acier CK45 (0.45%C - 0.65%Mn et (Cr+Mo+Ni) < 0.63%) ainsi que sur l'acier X45 (0.45%C - 0.25%Si - 0.4%Mn - 1.3% Cr - 0.25 %Mo - 4%Ni). Les deux courbes Jominy obtenues sont représentées en Fig. 7.

(Note: toutes les compositions d'alliages sont exprimées en pourcentage massique).

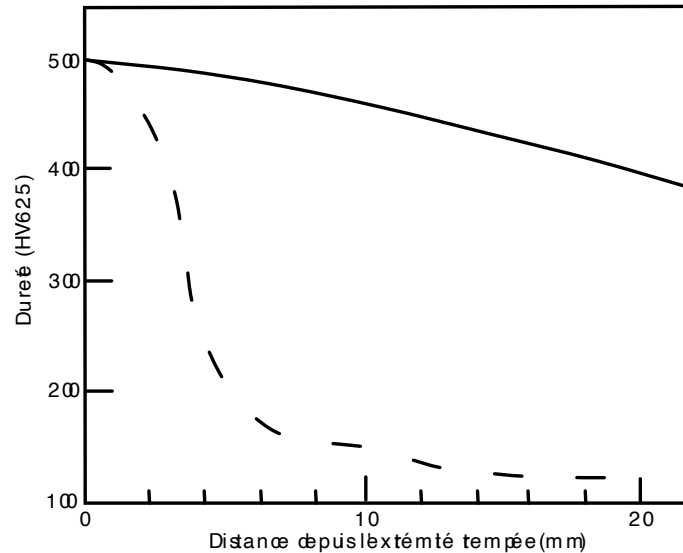


Fig. 7 : Courbes de la dureté en fonction de la distance depuis l'extrémité trempée lors d'un essai Jominy.

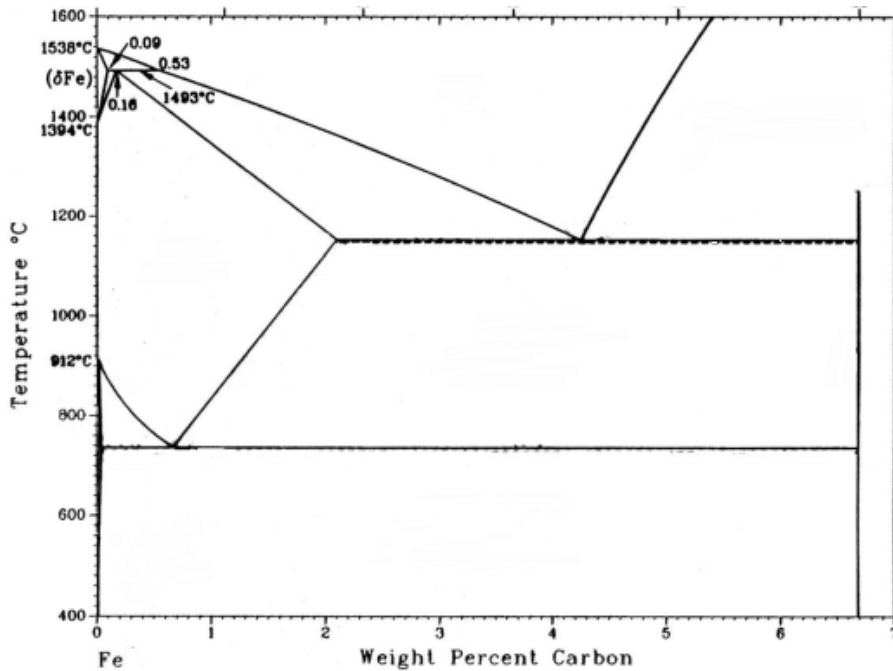


Fig. 8 : Diagramme de phase Fe-Fe₃C.

a) - À quel acier correspond chaque courbe ?
(2 points ; justifiez votre réponse pour obtenir tous les points)

Courbe en pointillés : _____

Courbe en trait continu : _____ car :

b) - Vous voulez austénitiser un acier au carbone, qui contient 0.6%C sans aucun autre élément d'alliage. Dans quelle gamme de températures allez-vous chauffer cet acier et pourquoi ? Vous pouvez vous aider du diagramme de phase Fe-Fe₃C donné en Fig. 8 ci-dessus.
(2 points ; justifiez votre réponse pour obtenir tous les points)

c) - Après son austénitisation, vous trempez rapidement cet alliage dans l'eau à température ambiante et vous observez la microstructure résultante à l'aide d'un microscope optique. Est-il possible que vous trouviez dans la microstructure obtenue une phase qui ne figure pas sur le diagramme de phase Fe-Fe₃C, et si oui laquelle et pourquoi est-il possible qu'on l'observe ?
(2 points ; justifiez votre réponse pour obtenir tous les points)

d) - Après ce traitement thermique de l'échantillon, on voit que sa surface est devenue noire ; pourquoi ?
(1 point)

TP Microstructure

TP 6 - Vous refroidissez rapidement un échantillon de polyéthylène glycol (PEG) en passant de 60°C à 0°C en 1 minute. Vous obtenez la microstructure schématisée en Fig. 9.

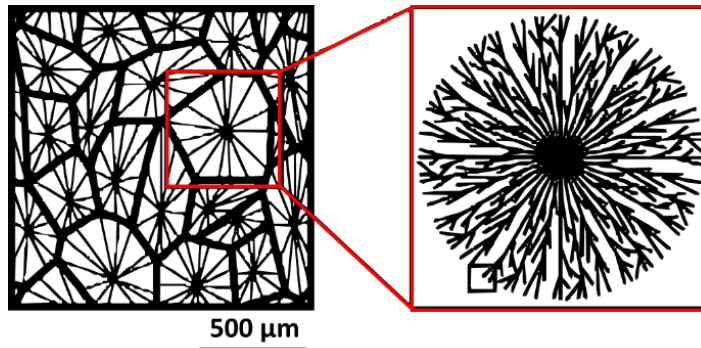
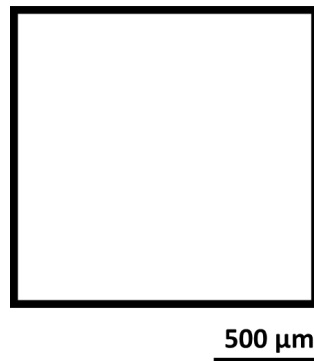


Fig. 9 : Schéma de la microstructure d'un échantillon PEG refroidi de 60°C à 0°C en 1 minute.

a) - Comment s'appellent les superstructures sphériques telles que celle schématisée en Fig. 9 à droite ?
(1 point)

b) - Vous prenez maintenant un échantillon de PEG identique à 60°C et vous le laissez refroidir de 60 à 0°C en 20 minutes. Dessinez la microstructure que vous vous attendez à obtenir, en considérant la barre d'échelle donnée.



(2 points)

c) – La micrographie en Fig. 10 ci-dessous est celle d'un acier au carbone Fe-x%C sans autre ajout significatif d'éléments d'alliage (donnée en cours en Diapo 25 du Chapitre 4). Quelles sont les phases présentes dans cette structure ?
(2 points)

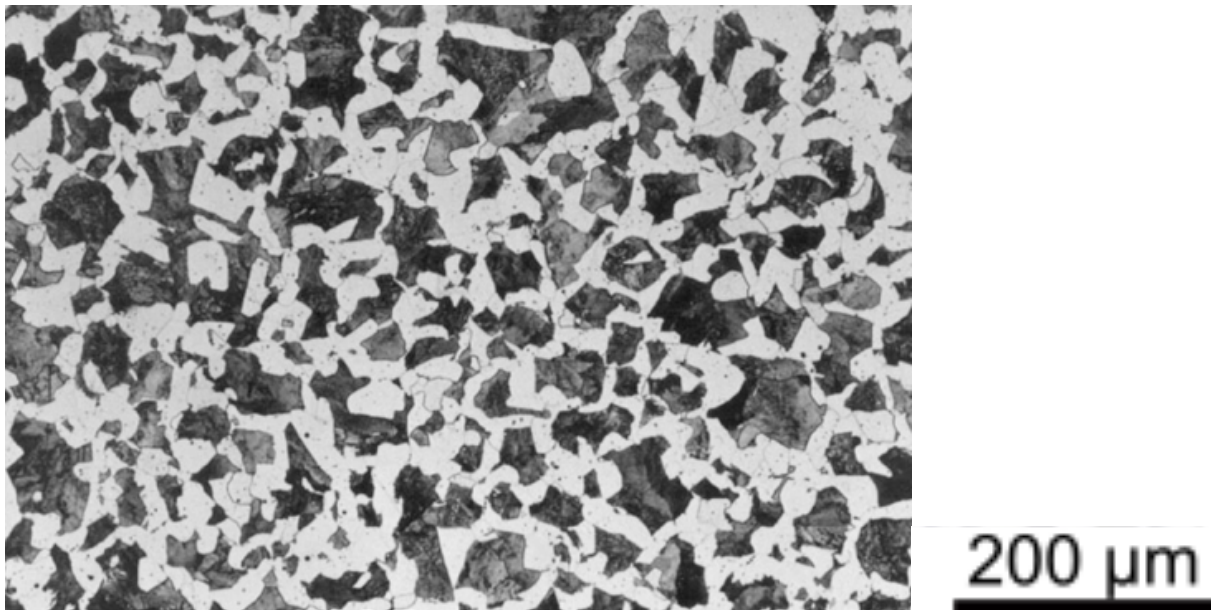


Fig. 10 : Micrographie optique d'un acier au carbone refroidi lentement (après attaque chimique de la surface)

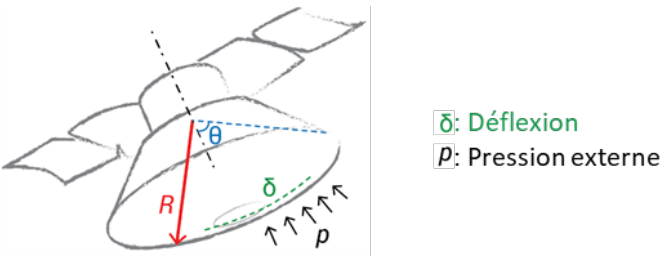
d) – Quelle est sa teneur x en carbone (exprimée en % massique) ?
(2 points ; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

TP Sélection des matériaux

TP 7 - L'exploration de Mars suscite actuellement un intérêt et une activité considérables, notamment par le Mars Science Laboratory (NASA) et l'ExoMars programme (ESA). Les atterrisseurs martiens sont lancés depuis la Terre et voyagent ensuite dans l'espace jusqu'à Mars. Lorsque l'atterrisseur s'approche de la surface de Mars, un des principaux défis est de traverser l'atmosphère de Mars à une vitesse initiale d'environ 21 000 km/h. La vitesse diminue progressivement grâce au frottement avec l'atmosphère, ce qui génère une augmentation de la température pouvant aller jusqu'à 1750 °C.

Pour résister à ces températures élevées, l'atterrisseur doit être équipé d'un système de protection thermique que l'on appelle bouclier thermique (heat shield). Il a la forme d'une calotte sphérique et a pour objectif de faire baisser la température de la surface frontale à environ 1600 °C pendant la descente. Le bouclier thermique est ensuite éjecté avant l'atterrissage, mais doit maintenir son intégrité physique jusqu'à ce moment-là.

L'objectif principal est de minimiser la masse m du bouclier thermique, donnée par l'Eq.1 ci-dessous avec une calotte sphérique de rayon R , d'épaisseur t , et de demi-angle au centre θ , produit en matériau de densité ρ .

$m = 2\pi R^2 (1 - \cos \theta) t \rho$	(Eq. 1)	
---	---------	---

L'épaisseur t est choisie comme variable de conception (design variable). L'objectif est de calculer différentes expressions pour t pour plusieurs contraintes mécaniques imposées à cette structure.

a) - La déflexion δ du bouclier thermique est donnée par :

$$\delta = \frac{pR^2}{2Et} \leq \delta_{\max}$$

où p est la pression externe (voir la figure ci-dessus), et E est le Module de Young du matériau.

Calculez l'expression qui donne la limite inférieure permmissible pour la masse (m) ainsi que l'indice de matériau M_I par lequel on minimise m selon ce critère.

(3 points)

b) - Le bouclier thermique est soumis à une contrainte de compression due à la résistance atmosphérique et doit résister au flambage. Ceci impose que la pression p ne doit pas excéder une valeur critique donnée par :

$$p \leq kE \frac{t^2}{R^2}$$

où k est une constante géométrique.

Calculez l'expression qui donne pour ce critère la limite inférieure permmissible pour la masse (m) ainsi que l'indice de matériau M_2 par lequel on minimise m pour ce critère.

(2 points)

c) – Prenant en compte ces deux critères d'allègement, les masses minimales dictées par chacune des deux contraintes doivent optimalement être les mêmes. Montrez que pour cela, il faut que :

$$M_2 = \frac{\sqrt{p} \sqrt{k} R}{2 \cdot \delta_{\max}} M_1$$

(2 points)

PARTIE PORTANT SUR LE COURS ENSEIGNÉ EN CLASSE

QUESTIONS A CHOIX MULTIPLE (60 POINTS AU TOTAL):

Pour chacune de ces questions vous aurez +3 points pour une réponse correcte, -1 point pour une réponse incorrecte. Dans chacune des questions une seule option est correcte. Pour répondre marquez d'une croix le petit cercle correspondant à votre réponse. Si vous faites des ratures ou marquez plus d'un cercle il faudra indiquer avec des mots votre choix pour la réponse finale.

1 – Durant un essai de traction (tensile test), pendant la déformation plastique et avant la striction, la relation entre la contrainte vraie σ (true stress) et la charge unitaire R (engineering stress) est :

- $R \approx \sigma \ln(1+e)$ où e est l'allongement relatif (engineering strain)
- $R \approx \sigma (1+e)$ où e est l'allongement relatif (engineering strain)
- $\sigma \approx R \ln(1+e)$ où e est l'allongement relatif (engineering strain)
- $\sigma \approx R (1+e)$ où e est l'allongement relatif (engineering strain)

2 – Durant un essai de traction, la striction (necking) commence quand :

- $R = dR/de$, où R est la charge unitaire (engineering stress) et e l'allongement relatif (engineering strain)
- $\varepsilon = \ln(1+e)$, où e est l'allongement relatif (engineering strain) et ε la déformation vraie (true strain)
- $\sigma = d\sigma/d\varepsilon$, où σ est la contrainte vraie (true stress) et ε la déformation vraie (true strain)
- $\sigma = d\sigma/de$, où σ est la contrainte vraie (true stress) et e l'allongement relatif (engineering strain)

3 – Un essai de mesure de la ténacité (fracture toughness) d'un matériau :

- Est mené sur une éprouvette de traction (a tensile test sample) pour mesurer la contrainte σ à laquelle une fissure de longueur a apparaît
- Est mené sur une éprouvette contenant une fissure (crack) de longueur connue a pour mesurer la contrainte σ à laquelle la fissure se propage rapidement dans l'échantillon
- Est mené sur une grande série d'éprouvettes de traction (tensile test samples) pour mesurer et analyser la distribution statistique de leur contrainte à rupture
- Est mené sur une éprouvette contenant une fissure (crack) de longueur connue a sous contrainte σ constante pour mesurer l'évolution dans le temps de la longueur de la fissure, $a(t)$

4 – La résistance à la fatigue (fatigue resistance) des matériaux peut être caractérisée :

- sur des éprouvettes de traction (tensile test specimens) soumises à une contrainte σ constante et à un milieu corrosif pour mesurer le temps t au bout duquel elles cassent
- sur des éprouvettes de traction (tensile test specimens) soumises à une contrainte sinusoïdale $\sigma = \sigma_1 \sin(\omega t)$ pour mesurer en fonction de σ_1 le nombre de cycles N_f au bout duquel elles cassent
- sur plusieurs éprouvettes de traction pour mesurer leur statistique de contrainte à rupture en fonction du temps d'exposition t à un milieu corrosif
- sur une éprouvette contenant une fissure (crack) de longueur connue a sous contrainte σ constante pour mesurer l'évolution dans le temps de la longueur de la fissure, $a(t)$

5 – La loi de fluage (creep law) caractéristique des métaux et alliages donnant la vitesse de déformation en régime permanent $\dot{\epsilon}$ exprimée en termes de la contrainte vraie (true stress) σ , de la déformation vraie (true strain) ϵ et de la température T (en K), est :

- $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A \sigma^N e^{\frac{Q}{RT}}$
- $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A \ln(\sigma) e^{\frac{Q}{RT}}$
- $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A e^{\frac{T}{T_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m}$
- $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A \sigma^N e^{\frac{-Q}{RT}}$

où Q est une énergie d'activation, R la constante des gaz parfaits, σ_0 et T_0 une contrainte et une température de référence, respectivement, m , N et A des constantes.

6 - Si une pièce en céramique fragile qui contient une fissure de longueur a (nettement plus petite que la largeur de la pièce) casse sous la contrainte de traction σ_1 , alors la même pièce contenant une fissure similaire mais dix fois plus courte (donc de longueur $a/10$) va casser à la contrainte :

- $\sigma_1/10$
- $3.16 \sigma_1$
- $10 \sigma_1$
- $\sigma_1/3.16$

7 – Un verre résistant au choc thermique est un verre qui :

- a été trempé rapidement depuis une température à laquelle le verre est solide
- a un faible coefficient d'expansion thermique α ($10^{-6}K^{-1}$)
- a un faible coefficient de Poisson ν
- a une grande contrainte à rupture en traction σ_{UTS} (MPa)

8 – La contrainte à rupture des matériaux fragiles est une grandeur statistique car :

- la longueur et l'orientation des pores et des microfissures que contiennent ces matériaux est une grandeur statistique
- leur ténacité (toughness) est une grandeur statistique
- leur contrainte interne (internal stress) en surface est une grandeur statistique
- leur module de Young est une grandeur statistique

9 – La ségrégation mineure (microsegregation) est causée par :

- la trempe après austénitisation des aciers
- une faible vitesse de diffusion (low diffusion rate) des éléments d'alliage dans la phase solide pendant la solidification d'un alliage
- la grande vitesse de la transformation martensitique
- la précipitation de secondes phases à partir d'une solution solide sursaturée.

10 – L'extraction de l'aluminium se fait :

- par fusion et oxydation d'une matte dans un convertisseur
- dans un haut fourneau (blast furnace)
- par électrolyse
- par réduction chimique basée sur l'emploi du titane

11 – Les alliages de fonderie ne peuvent pas être durcis par :

- raffinement de la taille des grains
- écrouissage
- solution solide
- durcissement structural

12 – Les alliages de corroyage d'aluminium que l'on ne durcit pas par durcissement structural (non-age-hardening aluminium alloys) sont :

- Les alliages des séries 1xxx, 2xxx et 3xxx
- Les alliages des séries 2xxx, 6xxx et 7xxx
- Les alliages des séries 1xxx, 3xxx et 5xxx
- Les alliages des séries 3xxx, 5xxx et 7xxx

13 – Lorsque l'alliage X est solidifié en un temps de solidification $t = 27$ minutes, les bras secondaires des dendrites sont séparés d'une distance $\lambda = 30 \mu\text{m}$. Quel sera la distance séparant les bras secondaires des dendrites, si ce même alliage est solidifié en $t = 1$ minute ?

- $\lambda = 30/27 \approx 1 \mu\text{m}$
- $\lambda = 5 \mu\text{m}$
- $\lambda = 10 \mu\text{m}$
- $\lambda = 50 \mu\text{m}$

14 – La microstructure d'un acier au carbone contenant 0.2% (% massique) de carbone refroidi lentement comprendra :

- Environ 15% de ferrite et 85% de perlite
- Environ 25% de ferrite et 75% de perlite
- Environ 50% de ferrite et 50% de perlite
- Environ 75% de ferrite et 25% de perlite

15 – La température de début de formation de la martensite (M_s , martensite start) :

- Diminue avec la teneur en carbone et en manganèse
- Augmente avec la teneur en carbone et en manganèse
- Augmente avec la teneur en carbone et diminue avec la teneur en manganèse
- Diminue avec la teneur en carbone et augmente avec la teneur en manganèse

16 – Un acier inoxydable est protégé par :

- une fine couche d'oxyde de chrome en surface qui se forme quand l'acier contient au moins 12% de chrome et peu de carbone
- une fine couche d'oxyde de chrome en surface qui se forme quand l'acier contient au moins 12% de chrome et au moins 1% de carbone
- une fine couche d'oxyde de nickel en surface qui se forme quand l'acier contient au moins 18% de nickel
- une fine couche d'oxyde de nickel en surface qui se forme quand l'acier contient au moins 18% de chrome et 8% de nickel

17 – Les alliages binaires du fer avec plus de 2.1% de carbone ($\text{Fe} + X \% \text{C}$ avec $X > 2.1$; % indique le pourcentage massique) sont appelés :

- des aciers hypereutectoïdes
- des aciers inoxydables
- des fontes
- des carbures

18 – La température de transition vitreuse T_g d'un polymère est la température :

- au-dessus de laquelle le polymère devient liquide
- au-dessus de laquelle seules les liaisons interatomiques secondaires (de van der Waals ou hydrogène) voient une nette diminution de leur rigidité
- au-dessus de laquelle toutes les liaisons interatomiques voient une nette diminution de leur rigidité
- au-dessous de laquelle le polymère devient transparent

19 – Pour un matériau viscoélastique linéaire, lors d'un essai de fluage et à temps fixe :

- la rigidité du matériau est une fonction linéaire de la température
- la déformation du matériau est une fonction linéaire de la contrainte appliquée
- la complaisance du matériau est une fonction linéaire de la contrainte appliquée
- la rigidité du matériau est une fonction linéaire de la contrainte appliquée

20 – La loi des mélanges isodéformation (isostrain rule of mixtures) est utilisée pour calculer :

- le module de Young d'un composite à fibres longues et parallèles déformé dans la direction perpendiculaire aux fibres
- le module de Young d'un composite à fibres longues et parallèles déformé dans la direction parallèle aux fibres
- le module de Young des composites à fibres longues laminées (cross-ply composites) dans le plan de lamination
- le module de Young des composites à fibres longues laminées (cross-ply composites) dans la direction perpendiculaire au plan de lamination

QUESTIONS COMPTANT POUR 120 POINTS AU TOTAL :

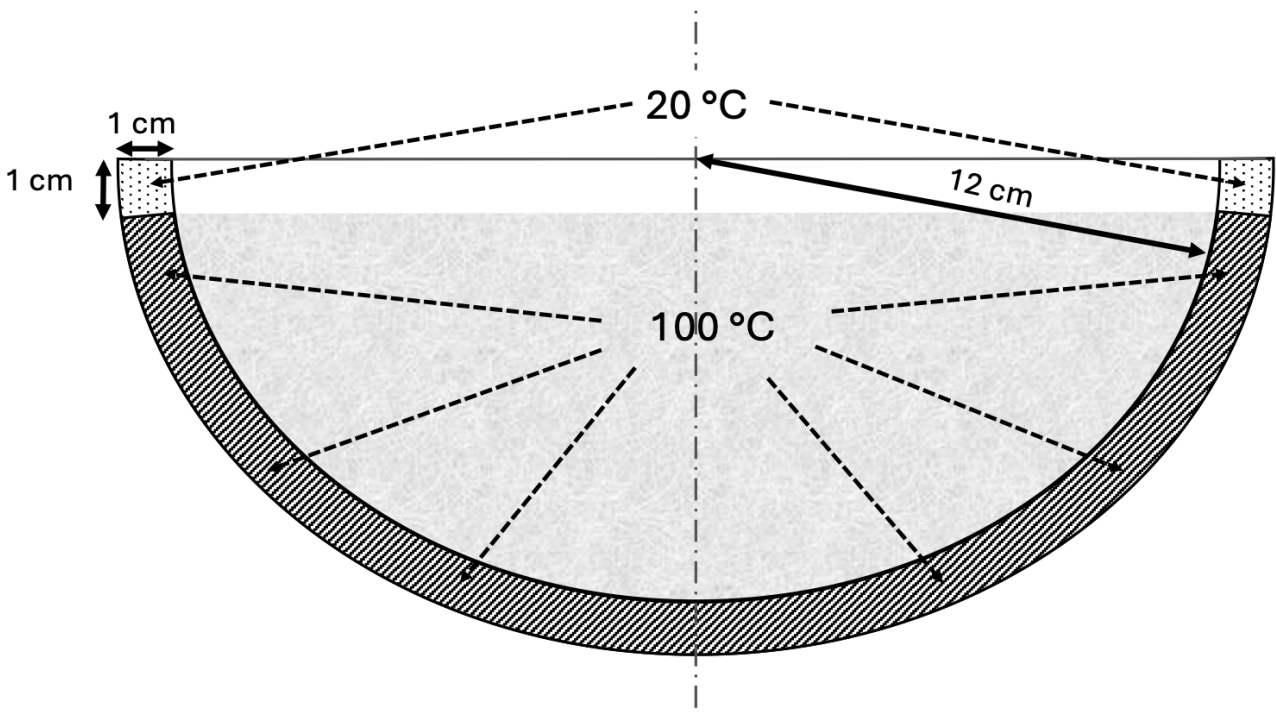
21 – Vous travaillez dans une entreprise qui fabrique des bols en verre sodocalcique ayant les propriétés suivantes, que nous supposons être indépendantes de la température :

- module de Young $E = 74 \text{ GPa}$;
- coefficient de Poisson $\nu = 0.25$;
- coefficient de dilatation thermique $\alpha = 8.5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- valeur critique du facteur d'intensité des contraintes (ténacité) $K_c = 0.7 \text{ MPa m}^{1/2}$.

La contrainte à rupture du verre formant ces bols obéit à la statistique de Weibull à deux paramètres avec $V_0 =$ volume de référence = 1 cm^3 , $\sigma_0 =$ contrainte de référence = 100 MPa et $m =$ exposant de Weibull = 6.

Ce verre est fondu, puis pressé dans un moule en acier pour lui donner la forme de grands bols hémisphériques, d'une épaisseur de 1 cm et d'un rayon de 12 cm . Ces bols sont fabriqués pour ne pas contenir de contraintes internes (par un recuit de détensionnement = stress relieving anneal).

Jacques Grobétaz verse de l'eau bouillante dans un tel bol initialement à 20°C , pour le remplir à 11 cm de hauteur. Cela a pour effet de chauffer tout le bol à 100°C , à l'exception d'un anneau mesurant 1 cm de hauteur. Pour simplifier nous allons supposer que cet anneau est resté uniformément à 20°C immédiatement après versement de l'eau bouillante dans le bol; le schéma ci-dessous illustre la situation.



c – Supposez que Jacques Grobétaz ait cassé le bol en y versant l'eau à 100 °C. Quelle est donc la longueur minimale de la fissure qui était présente dans le bol ? Supposez que cette fissure est perpendiculaire à la contrainte.

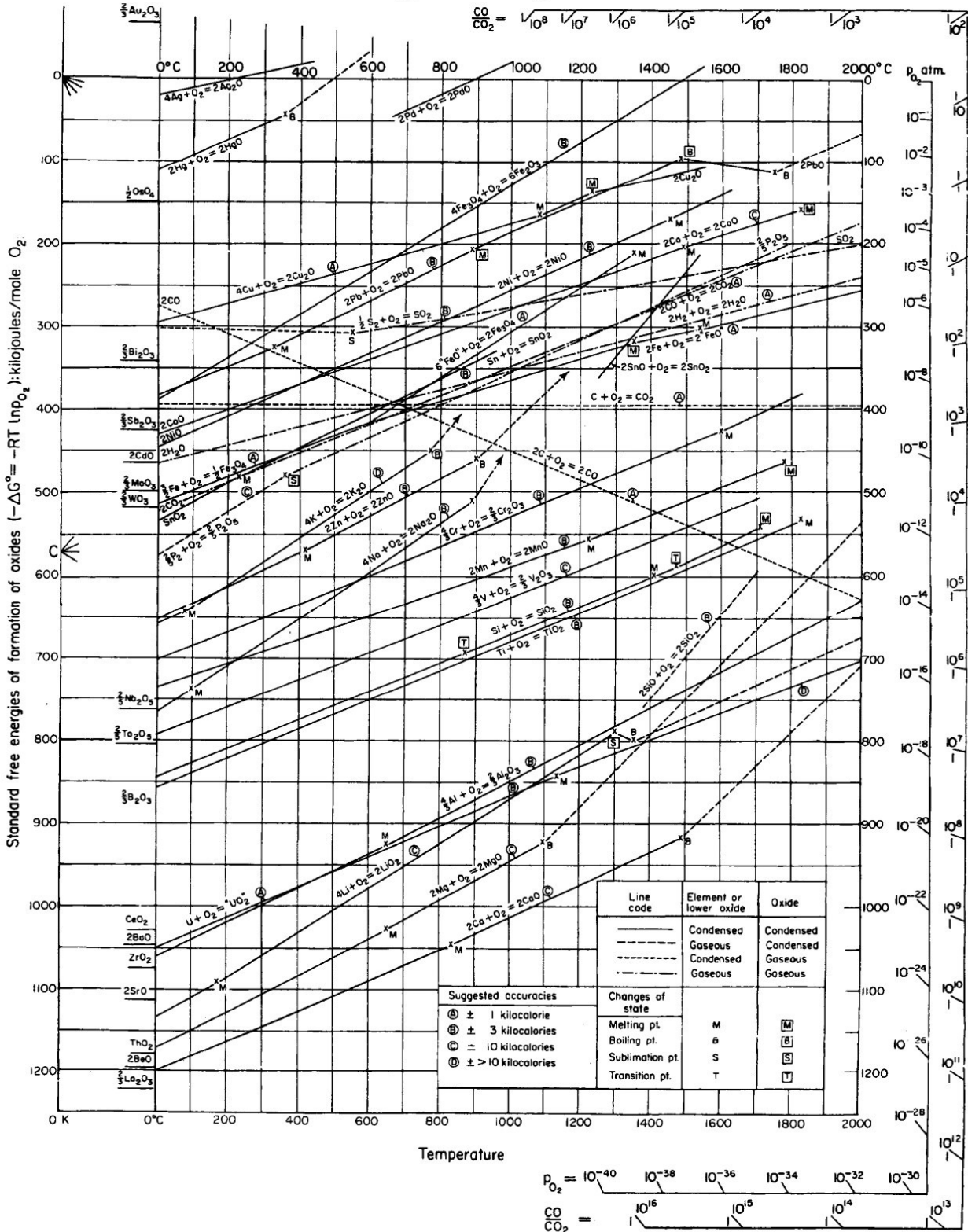
(4 points ; expliquez votre réponse pour avoir le total des points).

d – Le fabricant envisage deux options pour augmenter la résistance au choc thermique du bol : soit réduire les plus gros défauts existants au sein du verre, soit utiliser un verre contenant la même population de défauts mais un peu plus cher car il a une plus faible dilatation thermique $\alpha = 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Laquelle des deux solutions est-ce que vous lui recommandez et pourquoi ?

(5 points ; donnez une réponse raisonnée sur la base de données quantitative et d'hypothèses clairement formulées pour avoir tous les points)

22 – Vous trouverez ci-dessous le diagramme d'Ellingham.

Ellingham Diagrams



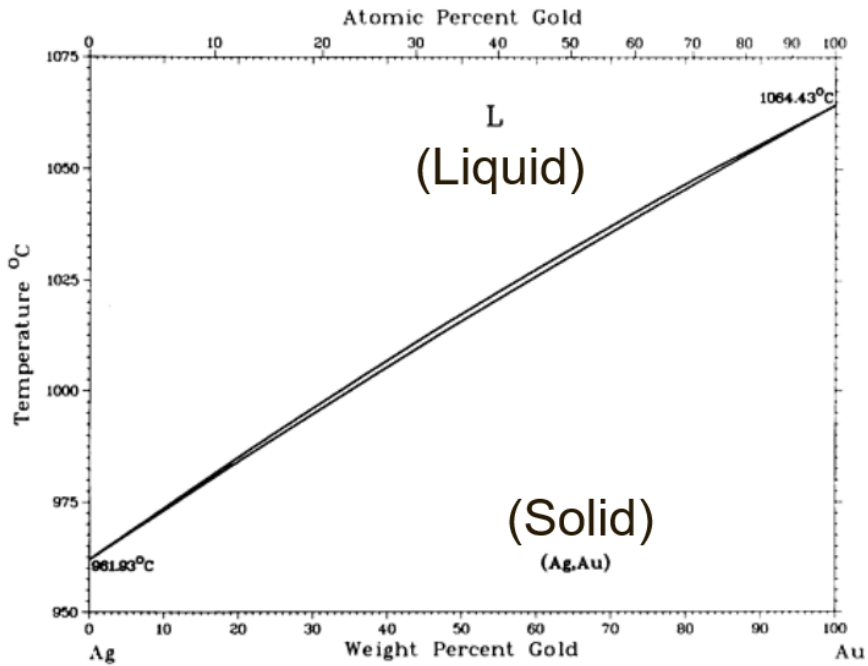
a – Quel est le changement d'énergie libre standard $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à l'oxydation du manganèse (Mn) pour produire l'oxyde MnO à 1600°C, en kJ/(mole O₂) ? Cette réaction peut-elle avoir lieu spontanément ?
(3 points ; indiquez le signe)

b – Quel est le changement d'énergie libre standard $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à la réduction (inverse de l'oxydation) de l'oxyde MnO pour produire de l'oxygène (O₂) et du manganèse (Mn) à 1600°C, en kJ/mole Mn ?
(2 points ; indiquez le signe)

c – Le point de fusion du silicium est de 1414°C. Que se passera-t-il en principe si on verse du silicium (Si) liquide sur un lit de particules d'oxyde de manganèse (MnO) et pourquoi ?
(3 points; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

d – Le point de fusion du nickel est de 1455°C. Que se passera-t-il en principe si on verse du nickel (Ni) liquide sur un lit de particules d'oxyde de manganèse (MnO) et pourquoi ?
(3 points; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

23 – Le diagramme de phase Au-Ag est donné ci-dessous. En dessous de 950 °C il ne montre rien : la solubilité mutuelle reste totale entre ces deux métaux de structure cristalline cubique à faces centrées et aucune autre phase n’apparaît.



a – Quelle est à 20°C la structure d’équilibre de ces alliages ?
(2 points)

b – Si on les déforme après solidification, ces alliages peuvent être durcis par trois mécanismes de durcissement. Nommez ces trois mécanismes et détaillez comment vous feriez pour les appliquer tous dans une même pièce de ce métal fortement déformée en phase solide.
(5 points)

c – Pouvez-vous nommer un alliage du cuivre et un alliage du fer, tous deux vus dans ce cours et qui ont une structure d'équilibre similaire à celle des alliages Au-Ag ?
(2 points)

24 – Considérons l'alliage d'aluminium 2014.
Son module d'Young est de $E = 72$ GPa et son coefficient de Poisson est $\nu = 0.33$.
Sa limite d'élasticité σ_y à l'état T4 (= homogénéisé et trempé) est $\sigma_y = 300$ MPa à 20°C.
Quand la température augmente, σ_y diminue jusqu'à environ $\sigma_y = 40$ MPa à 300°C et jusqu'à $\sigma_y = 20$ MPa à 400°C. Le coefficient de dilatation thermique α moyen de l'alliage entre 500 et 20 °C est $\alpha = 25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

a – Quel est l'élément d'alliage principal de cet alliage d'aluminium ?
(1 point)

b – Cet alliage est « durcissable », voulant dire apte au durcissement structural. L'homogénéisation de cet alliage se fait à $T_{\text{hom}} = 502^\circ\text{C}$.
Pourquoi l'alliage est-il refroidi rapidement (ou en d'autres mots trempé = quenched en anglais) après son homogénéisation ?
(2 points)

c – Si les pièces trempées de cet alliage sont relativement épaisses, suite à leur trempe après homogénéisation, elles peuvent contenir des contraintes internes conséquentes. Pour illustration, la figure ci-dessous donne le profil et les valeurs des contraintes internes longitudinales, tangentielles et radiales dans un barreau cylindrique, de rayon environ égal à 13 cm et de longueur nettement supérieure à son rayon, en alliage 2014 trempé à partir de sa température d'homogénéisation à 502 °C dans l'eau à 20°C. Par analogie avec la trempe du verre (que vous avez vue en cours), pouvez-vous expliquer pourquoi et comment ces contraintes thermiques résiduelles se sont formées pendant la trempe ? (4 points)

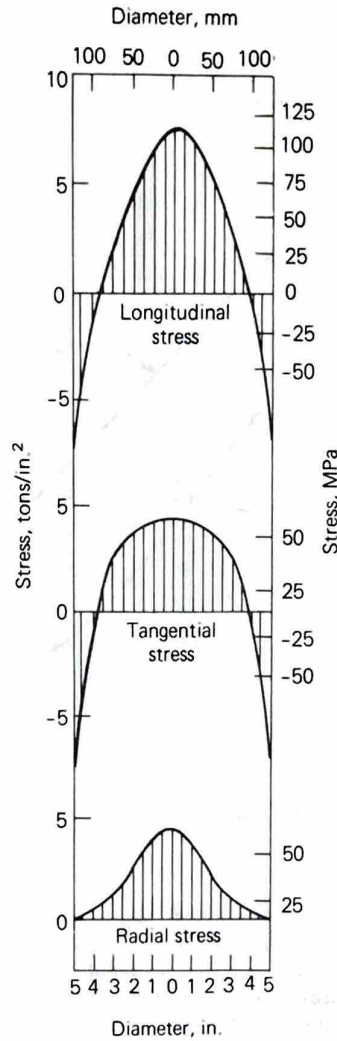


Fig. 31. Residual stress diagram for 2014 alloy quenched in cold water from 500 °C (935 °F).

d – Dans la figure ci-dessus, les contraintes de compression sont-elles comptées comme négatives ou positives ?

(2 points, justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

e – Montrez que, si la contraction thermique (en raison de la trempe décrit en c) est entièrement compensée par une déformation purement élastique, alors on prévoit des contraintes internes qui dépassent la limite d'élasticité de l'alliage.

(3 points)

f – Quelle est la conséquence du résultat en (e) pour le métal trempé ?

(1 point)

g - Pouvez-vous donner un exemple de situation où ces contraintes internes d'origine thermique créent des problèmes pendant l'élaboration de pièces à partir de ce cylindre ?

(2 points)

h – Après homogénéisation et trempe, on procède habituellement à un revenu de l'alliage, afin de former les précipités qui vont durcir l'alliage. La figure à la page suivante donne l'évolution des trois propriétés mécaniques principales en traction (résistance mécanique en traction = tensile strength, limite d'élasticité = yield strength = σ_y et élongation à rupture = elongation-to-failure) de l'alliage 2014 en fonction du temps de revenu, pour plusieurs températures de revenu.

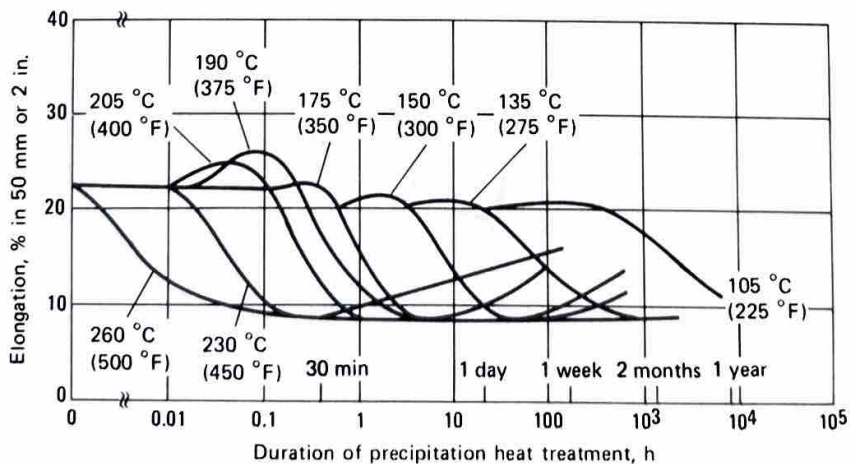
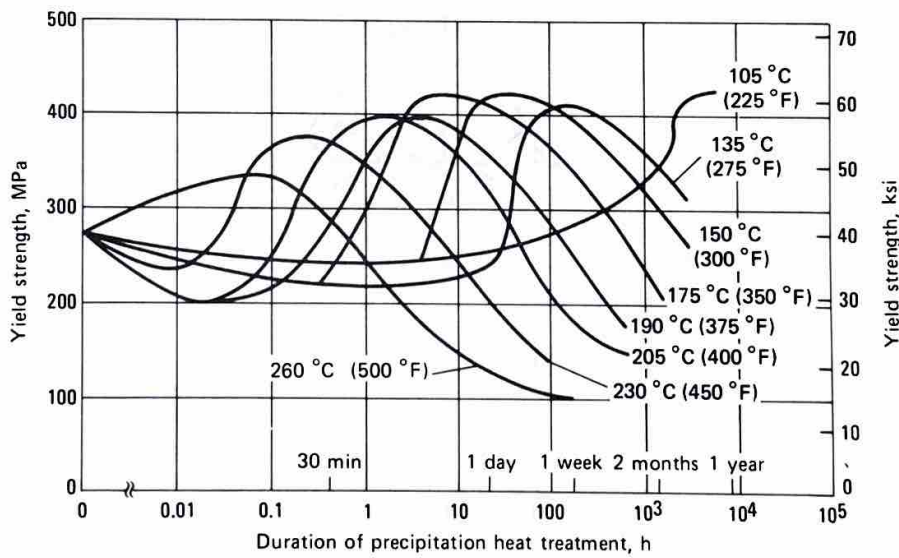
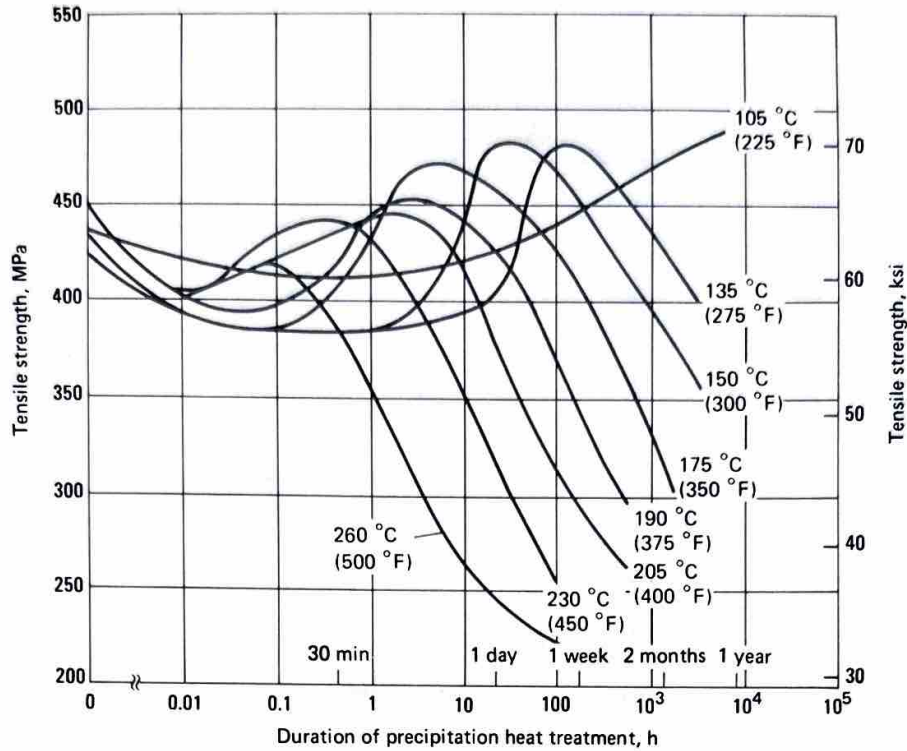
Pour quelle température de revenu obtient-on la meilleure élongation à rupture avec une limite d'élasticité $\sigma_y = 400$ MPa et quelle est cette élongation ?

(2 points)

i – Dans l'industrie, un revenu de 8 à 16 heures à 190°C est généralement pratiqué. Pourquoi ?

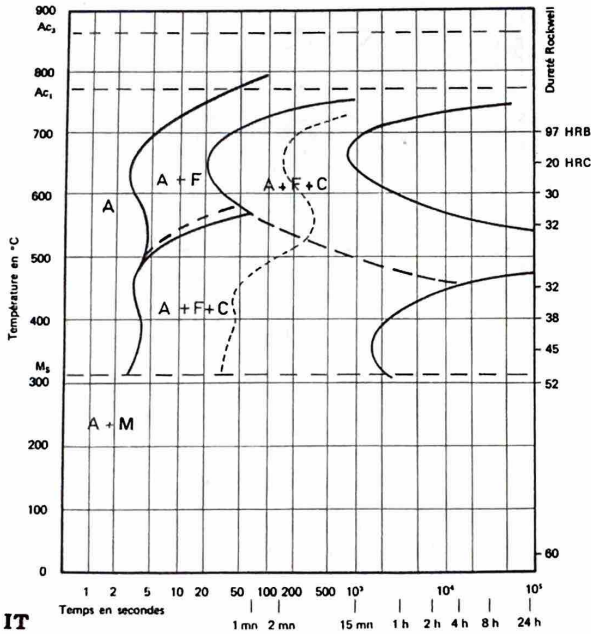
(2 points)

Fig. 20a Aging characteristics of alloy 2014 sheet



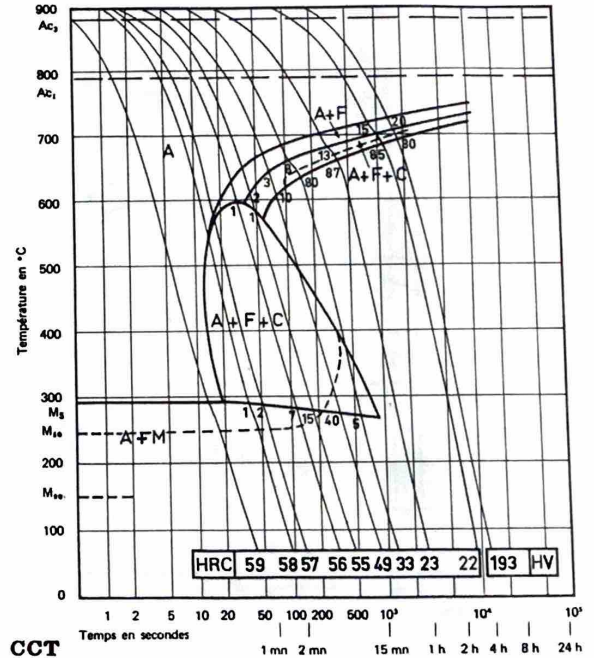
25 – Ci-dessous vous trouverez les diagrammes TTT et TRC de deux aciers faiblement alliés et de compositions proches, que nous allons supposer être identiques.

Composition: 0.45% C - 0.55% Mn - 1.31% Si - 0.005% S - 0.013% P - 0.21% Ni - 0.60% Cr - 0.22% Mo - 0.27% Cu - <0.05% V - trace Ti Grain size: 11 Austenitized at 900°C (1652°F) for 30 min

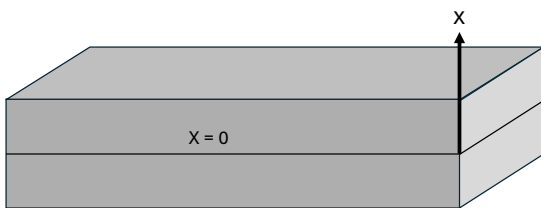


$Ac_1 = 770^\circ C$ $Ac_3 = 860^\circ C$ $M_s = 310^\circ C$

Composition: 0.42% C - 0.70% Mn - 1.40% Si - 0.005% S - 0.015% P - 0.24% Ni - 0.68% Cr - 0.19% Mo - 0.03% Cu Grain size: 9 Austenitized at 880°C (1616°F) for 30 min



Une plaque de cet acier mesurant 4 cm d'épaisseur est trempée après austénitisation à 900°C de façon telle que, lors de la trempe, la température $T = 200^\circ C$ soit atteinte en $t = 2000 - 99x$ secondes où x est la distance en mm dans le sens de l'épaisseur, comptée à partir du centre de la plaque.



a – Marquez directement sur le diagramme TTT (seulement) les domaines de formation de la perlite et de la bainite

(2 points)

b - Quelle sera la microstructure de l'acier au centre de la plaque (donnez les phases et leur proportion) ?

(2 points)

c - Quelle sera la microstructure de l'acier à la surface de la plaque (donnez les phases et leur proportion) ?
(2 points)

d - Quelle sera l'épaisseur de cette plaque d'acier trempé contenant au moins 50% de martensite ?
(4 points)

e – Cet acier est-il inoxydable ?
(2 points ; expliquez votre réponse pour avoir tous les points)

f - Nommez un rôle du molybdène dans cet alliage.
(2 points)

g – Est-ce que, avec cette répartition de la microstructure, cette plaque d'acier trempé sera performante si elle doit résister sans se déformer à une contrainte élevée (i) en traction ou (ii) en flexion ?
(3 points ; expliquez votre réponse pour avoir tous les points)

26 – Le Superplastikum est un polymère thermodurcissable (thermoset) qui se déforme sous une contrainte uniaxiale σ exactement comme le fait le modèle de ressorts et pistons linéaire standard dessiné ci-dessous.

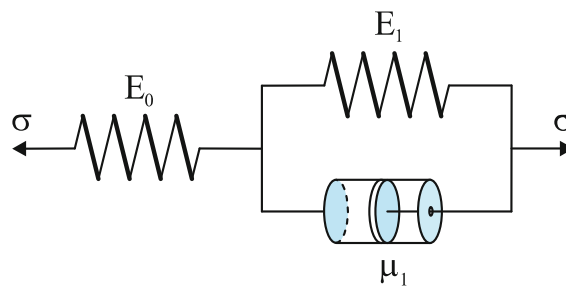


Fig. 5.1 Three-parameter (or Voigt-Kelvin) solid

avec $E_0 = 250$ MPa, $E_1 = 110$ MPa et $\mu_1 = 3 \cdot 10^{10}$ Pa.s.

f - À $t = 100$ s la déformation du matériau est subitement ramenée à 0. Calculez $\sigma(t)$ en fonction du temps t et de ϵ_{fixe} , E_0 , E_1 et μ_1 pour $t > 100$ s.
(5 points)

g – L’hypothèse dite du *Time Temperature Superposition Principle* (TTSP), dit que (cochez la seule réponse valable) :

- la courbe donnant la rigidité E tracée en fonction du temps t à deux températures différentes est décrite par la même courbe $E(t)$ translatée horizontalement par une constante fonction de la température
- la courbe donnant la rigidité E tracée en fonction du logarithme du temps t à deux températures différentes est décrite par la même courbe $E[\log(t)]$ translatée horizontalement par une constante fonction de la température
- la courbe donnant la rigidité E tracée en fonction du temps t à deux températures différentes est décrite par la même courbe $E(t)$ translatée verticalement pour se superposer sur une seule courbe dite « Master curve ».

(+2 points pour la réponse correcte, -1 point pour une réponse incorrecte)

h - Si seul μ_1 est influencé par la température, l’influence de la température sur la rigidité $E(t)$ de ce polymère mesurée par cet essai de relaxation peut-elle être traitée selon le Time Temperature Superposition Principle ?

(2 points ; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

27 – Considérons un composite à fibres courtes composé de :

- une fraction volumique V_f de fibres courtes, élastiques linéaires et bien plus rigides que la matrice, toutes parallèles, toutes de même longueur l et de diamètre d , entourées par :
- une fraction volumique $(1-V_f)$ de matrice élastomère dont la contrainte d'écoulement uniaxiale (uniaxial flow stress) σ_m à température ambiante $T = 293K$ est donnée par $\sigma_m = 5 (\epsilon_m)^{0.1}$ MPa où ϵ_m est l'élongation uniaxiale (true tensile strain) de la matrice.

Ce composite est soumis à une contrainte de traction σ parallèle aux fibres.

La matrice étant bien plus complaisante que les fibres, elle va se déformer nettement plus que les fibres. On fait les simplifications (fortes) suivantes :

- Les fibres ne se déforment pratiquement pas, faisant que l'élongation ϵ_c du composite est $(1-V_f)$ fois celle de sa matrice : $\epsilon_c = (1-V_f) \epsilon_m$
- La matrice applique à chaque fibre, le long de l'interface fibre/matrice, une contrainte de cisaillement constante $\sigma_{m,s}$ égale à la moitié de la contrainte moyenne dans la matrice : $\sigma_{m,s} = \sigma_m / 2$
 $\sigma_{m,s}$ est orientée vers le bout de fibre le plus proche, comme illustré ci-dessous. Chaque segment de fibre de longueur δx va donc voir une augmentation graduelle, depuis son extrémité vers son centre, de la charge F qu'elle porte selon l'axe de la fibre, par la quantité $\delta F = \sigma_{m,s} \pi d \delta x$;
- à chacun des bouts de la fibre la contrainte portée par la fibre, σ_f est nulle : $\sigma_f = 0$ pour $x = 0$ et $x = l$ avec $x = 0$ placé à un bout de la fibre.

La charge axiale portée par la fibre, $F(x)$ a donc le profil en triangle dessiné ci-dessous.

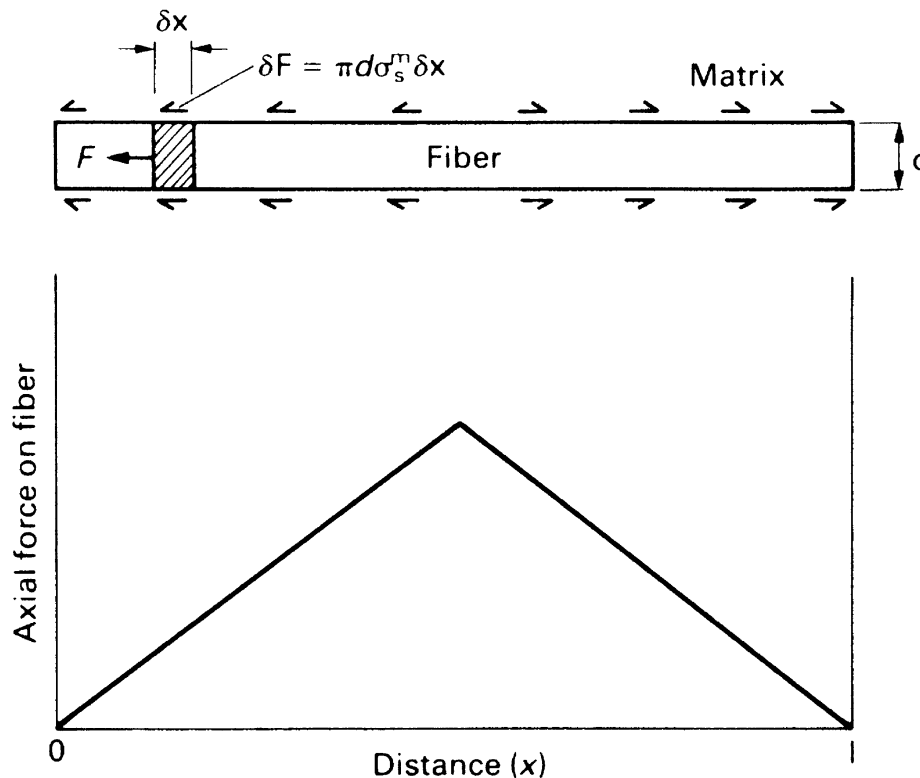


FIGURE 28.4

Load transfer from matrix to fiber causes the tensile stress in the fiber to rise to a peak in the middle.

a – Déduisez la force moyenne \bar{F} portée, quand le composite est allongé parallèlement aux fibres, par chaque fibre selon son axe en fonction de la contrainte moyenne portée par la matrice, σ_m .
(3 points)

b – Déduisez la contrainte moyenne $\bar{\sigma}_f$ portée par chaque fibre selon son axe quand le composite subit une élongation de e .
(2 points)

c – Sachant que si V_f est la fraction volumique des fibres la contrainte moyenne portée par le composite est :

$$\sigma_{\text{composite}} = V_f \bar{\sigma}_f + (1-V_f) \bar{\sigma}_m$$

déduisez la loi de déformation $\sigma_{\text{composite}} = F(\epsilon_c)$ du composite si $V_f = 20\%$ et $l = 20 d$

(5 points)

d – La loi de déformation de ce composite est-elle élastique (non linéaire) ?
(2 points ; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

e – Si l'élastomère reste intact sans altération de son comportement d'élastomère, quelle sera sa loi de déformation à une température T de 500 K ?
(3 points ; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

f – Quelle sera alors la loi de déformation du composite de la question (c) à 500 K ?
(2 points ; justifiez votre réponse pour avoir tous les points)
