

Comportement Mécanique des Matériaux

EPFL - Cours MSE 234, Section Mécanique Ba3

Examen final du 2 février 2023

Instructions: répondez au propre sur ces feuilles, après avoir écrit votre nom ci-dessous. Si vous avez besoin de davantage de place pour vos réponses, utilisez la dernière feuille, qui est blanche (sans oublier d'indiquer clairement sous la question posée qu'une partie de sa réponse se trouve à la fin de votre copie d'examen).

Aucun document autre que l'énoncé qui suit ne peut être consulté pendant l'examen. La réponse à l'examen est individuelle et composée sans consultation auprès d'autrui.

Si vous avez une question signalez-le en levant votre bras et sans déranger vos camarades. Si votre question est d'intérêt général elle sera écrite avec sa réponse au tableau de toutes les salles de l'examen.

Le nombre de points au total est de

60 pour la partie portant sur les travaux pratiques

200 dont 60 de QCM pour la partie portant sur le cours enseigné

Durée totale de l'examen: 2 heures et 10 minutes (15h15 à 17h25).

(soit 5 minutes pour 10 points)

Le nombre de points alloués à chaque question est indiqué en fin de son énoncé.

Votre Nom de famille puis votre Prénom :

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

PARTIE PORTANT SUR LES TRAVAUX PRATIQUES

60 crédits au total

(correspondant au prorata des points à 30 minutes sur les 130 minutes de l'examen)

Plusieurs questions de cette partie de l'examen sont des questions à choix multiples (QCM, marquées comme telles). Pour chacune de ces questions vous aurez +3 points pour une réponse correcte, -1 point pour une réponse incorrecte. Pour répondre aux QCMs marquez le petit cercle correspondant à votre réponse. Dans chacune des questions une seule option est correcte. Si vous faites des ratures ou marquez plus d'un cercle il faudra indiquer avec des mots laquelle des options constitue votre réponse.

TP 1 (TP traction) (QCM)

La machine d'essai uniaxiale Zwick 100kN utilisée lors du TP Traction produit une courbe force-déplacement pour chaque matériau testé, dont la forme est identique à celle de la :

- Courbe contrainte vraie - déformation vraie (true stress - true strain curve)
- Courbe charge unitaire - allongement relatif (engineering stress - engineering strain)
- Courbe charge unitaire - déformation vraie (engineering stress – true strain)
- Courbe contrainte vraie - allongement relatif (true stress - engineering strain)

TP 2 (TP traction) (QCM)

En comparant la courbe contrainte vraie - déformation vraie (true stress-true strain curve) à la courbe charge unitaire - allongement relatif (engineering stress- engineering strain curve), nous pouvons voir qu'après la limite d'élasticité :

- La contrainte vraie est inférieure à la charge unitaire et la déformation vraie est supérieure à la déformation relative
- La contrainte vraie est supérieure à la charge unitaire et la déformation vraie est supérieure à la déformation relative
- La contrainte vraie est inférieure à la charge unitaire et la déformation vraie est inférieure à la déformation relative
- La contrainte vraie est supérieure à la charge unitaire et la déformation vraie est inférieure à la déformation relative

TP 3 (TP résilience) (QCM)

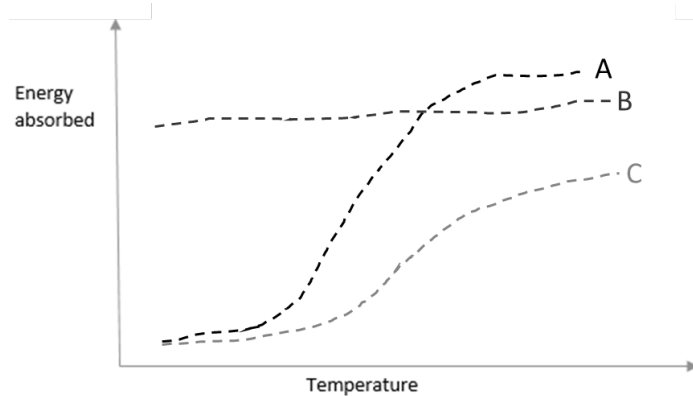
Dans les alliages métalliques, l'apparition d'une transition fragile/ductile avec l'augmentation de la température est une conséquence de:

- La structure cristalline cubique face centrées
- la structure cristalline cubique centrée
- la fonte des liaisons de van der Waals
- la présence de nickel dans l'alliage

TP 4 (TP résilience)

(6 points au total, sous forme de 2 points par association courbe-matériau correcte, -1 point par association incorrecte)

Voici trois courbes recueillies pour trois matériaux différents par l'essai d'impact Charpy. Pouvez-vous assigner chacune de ces courbes aux trois matériaux ci-dessous ?



- Acier au carbone contenant 0.15%C
- Acier inoxydable austénitique (<0.07%C, 18%Cr, 10%Ni)
- Acier contenant 0.15% de carbone et 3.5% de nickel

TP 5 (TP résilience)

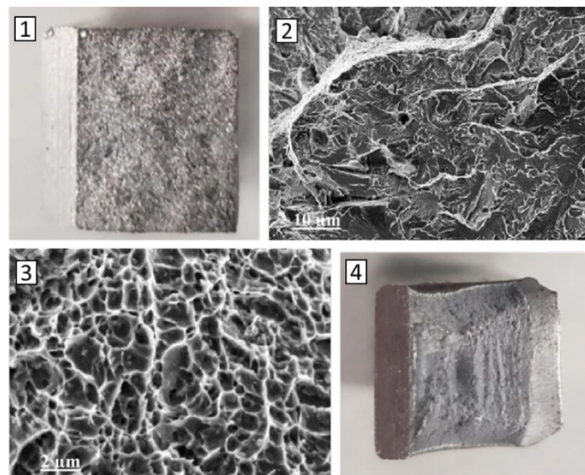
(4 points au total, sous forme de 1 point par association type de rupture-matériau correcte, -1 point par association incorrecte)

Les images ci-dessous illustrent la macrostructure et la microstructure transversales de deux éprouvettes à section rectangulaire pré-entaillées du même acier, qui ont été soumises au test d'impact Charpy après immersion pendant 1h, soit (i) dans de la neige carbonique (-78,5°C), soit (ii) dans un bain d'eau à 80°C.

Indiquez les deux images (1,2,3,4) qui correspondent à l'essai à -78,5°C et les deux images (1,2,3,4) qui correspondent à l'essai à 80°C.

et Rupture à -78,5°C

et Rupture à 80°C



TP 6 (TP Weibull)

(7 points au total)

Ordonnez (par ordre chronologique) de 1 à 7 les étapes à suivre pour déterminer le module de Weibull d'une série de 40 éprouvettes rectangulaires de PMMA sollicitées par un essai de flexion en trois points :

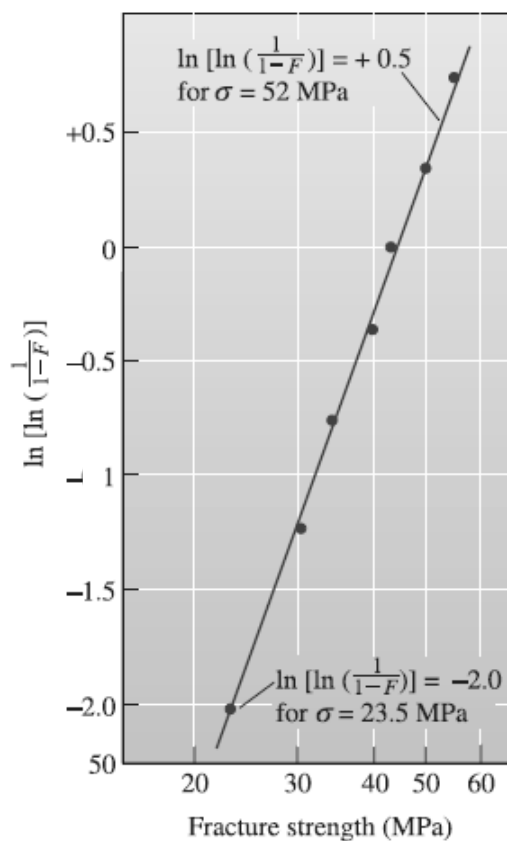
- Classer les contraintes à rupture par ordre croissant
- Calculer P_F et $\ln[-\ln(1-P_F)]$ pour chaque éprouvette
- Tester les échantillons jusqu'à leur rupture
- Calculer les différentes valeurs correspondantes de la contrainte à rupture en flexion de chaque échantillon (ou leur module de rupture)
- Attribuer à chaque contrainte à rupture une probabilité de rupture
- Consigner les différentes charges à rupture individuelles pour chaque échantillon
- Tracer sur un graphique $\ln[-\ln(1-P_F)]$ en fonction de $\ln(\sigma_F)$

TP 7 (TP Weibull)

(3 points ; explicitez votre calcul pour obtenir tous les points)

Sept échantillons de carbure de silicium (SiC) ont été testés et leurs résistances à la rupture suivantes ont été obtenues (23, 49, 34, 30, 55, 43 et 40 MPa). Estimez le module de Weibull du matériau à partir du graphique ci-dessous, tracé à partir des données de ces essais :

Réponse:



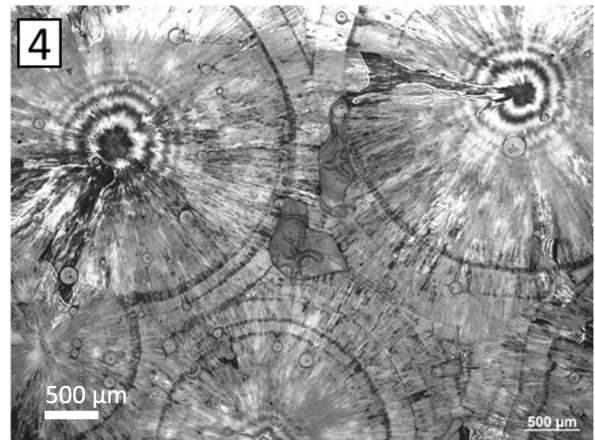
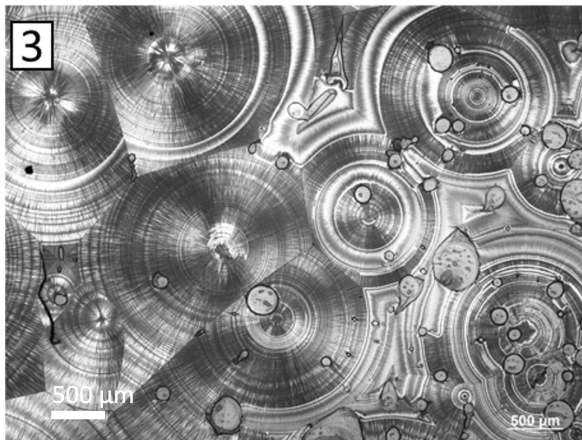
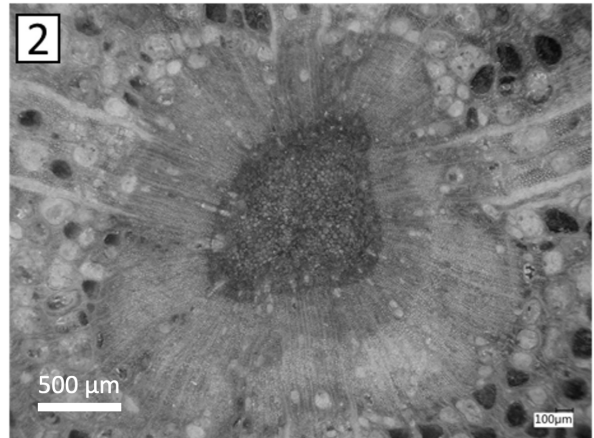
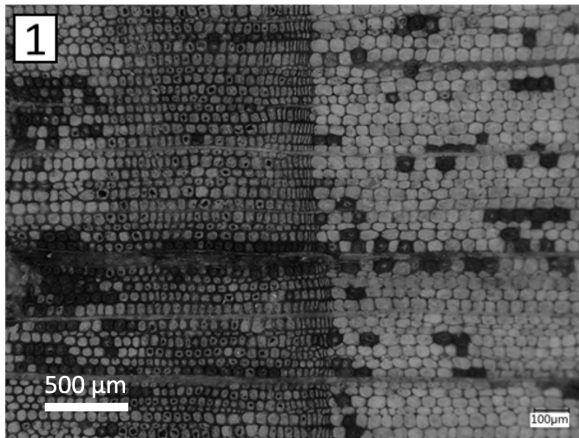
TP 8 (TP Microstructures)

(4 points au total, sous forme de 1 point par numérotation correcte, -1 point par numérotation incorrecte)

Sélectionnez le numéro d'image correspondant à chaque microstructure ci-dessous :

- Sphérulites PEG* à refroidissement rapide
- Sphérulites PEG* à refroidissement lent
- Bois résineux (softwood)
- Bois feuillu (hardwood)

*PEG : polyéthylène glycol



TP 9 (QCM) (TP Microstructures)

(3 points ; explicitez votre calcul pour obtenir tous les points)

Comme vous l'avez vu dans le TP Microstructure, le module d'Young (\tilde{E}) d'une mousse d'aluminium peut être calculé à partir de la densité de cette mousse $\tilde{\rho}$ et des propriétés de l'aluminium dense en utilisant la formule suivante :

$$\frac{\tilde{E}}{E_{Al}} = \left(\frac{\tilde{\rho}}{\rho_{Al}} \right)^2$$

avec $E_{Al} = 70 \text{ GPa}$; $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g/cm}^3$.

Vous effectuez une analyse d'image d'une section transverse et polie de la mousse d'aluminium et vous déduisez que l'image comporte 70% de pores, 30% de métal. Dans quelle gamme de valeurs le module d'Young de la mousse se situe-t-il ?

- a. 1 – 3 GPa
- b. 3 – 10 GPa
- c. 10 – 20 GPa
- d. 20 – 30 GPa

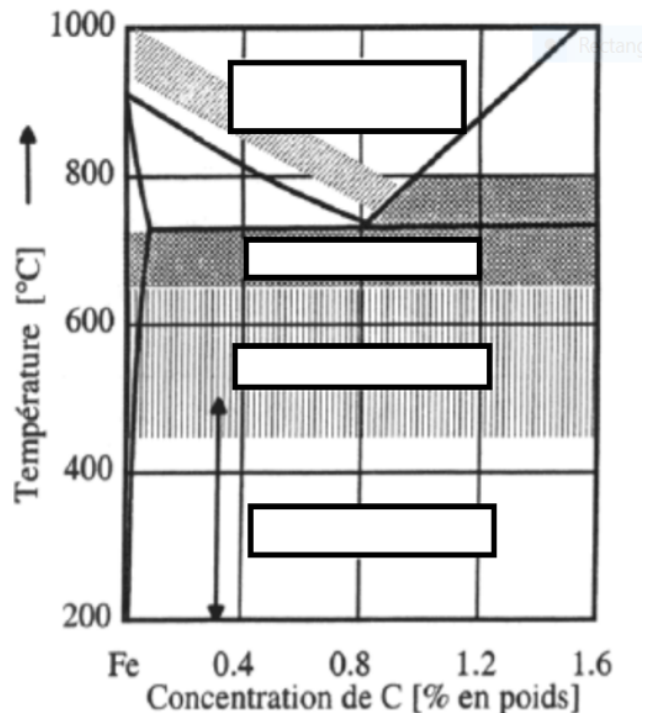
Réponse :

TP 10 (TP Traitements thermiques)

(4 points au total, sous forme de 1 point par case bien remplie, -1 point par case mal remplie)

Inscrivez dans chacune des cases superposées au diagramme de phase fer-carbone ci-contre le traitement thermique ayant lieu dans la plage de températures où la case se situe, parmi les quatre options suivantes :

- (i) Revenu,
 - (ii) Recristallisation,
 - (iii) Détente
- et
- (iv) Normalisation.



TP 11 (TP écrouissage et recristallisation)

(5 points au total, 1 point pour une réponse correcte, -1 pour une réponse fausse)

Vrai ou faux ? Mettez V dans la case carrée si l'affirmation suivante est vraie, F si elle est fausse.

La restauration reconstruit l'état d'équilibre par germination et croissance de nouveaux grains ;

Après la restauration la limite d'élasticité diminue et la ductilité augmente ;

Après la recristallisation la limite d'élasticité diminue et la ductilité augmente ;

La force motrice de la recristallisation primaire est, comme pour la restauration, l'énergie des dislocations situées au sein du matériau déformé ;

La force motrice de la recristallisation secondaire est l'énergie des joints de grain.

TP 12 (TP écrouissage et recristallisation)

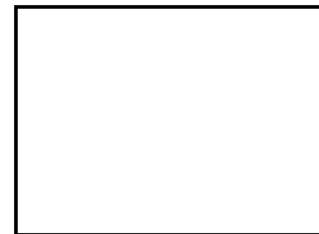
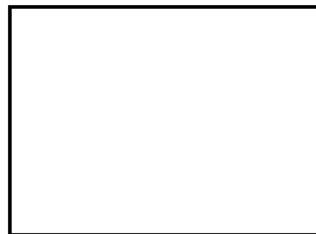
(3 points)

Trois échantillons d'aluminium pur d'une épaisseur initiale de 5 mm (préalablement recuits à 600°C pendant 6h) ont été laminés pour atteindre chacun une épaisseur différente (t1, t2 et t3). Ils ont ensuite été soumis à un recuit à 500°C pendant 1h et trempés dans l'eau. Représentez schématiquement, à la même échelle (mais sans spécifier celle-ci) la microstructure finale de chaque échantillon que vous vous attendez à voir au microscope optique (ou à l'œil nu après attaque). Indiquez également la direction de laminage dans vos croquis.

t1 = 4.9 mm

t2 = 3.8 mm

t3 = 3.1 mm



TP 13 (QCM) (TP écrouissage et recristallisation)

Que signifie la notation HV0.5 donnée si on rapporte par exemple une dureté de 320 HV0.5 ?

- Que l'on a utilisé un test de dureté Hockwell V avec un déplacement de 0.5 mm
- Que l'on a utilisé un test de dureté Vickers avec un déplacement de 0.5 mm
- Que l'on a utilisé un test de dureté Hockwell V avec un poids de 500g
- Que l'on a utilisé un test de dureté Vickers avec un poids de 500g

PARTIE PORTANT SUR LE COURS ENSEIGNÉ

QUESTIONS A CHOIX MULTIPLES (QCMs ; 60 POINTS AU TOTAL):

Pour chacune de ces 20 questions, vous aurez +3 points pour une réponse correcte, -1 point pour une réponse incorrecte.

REPLISSEZ D'UNE COCHE, D'UNE CROIX OU D'ENCRE LE PETIT CERCLE CORRESPONDANT A VOTRE REPONSE

1 – Un essai de traction uniaxiale est mesure:

- L'évolution dans le temps de la contrainte requise pour déformer un matériau à allongement total constant
- L'évolution dans le temps de la déformation d'un matériau sous charge ou contrainte constante
- L'évolution de la contrainte requise pour déformer un matériau en fonction de son allongement relatif
- La ténacité des matériaux ductiles

2 – Un essai de relaxation uniaxial est utilisé pour mesurer:

- L'évolution dans le temps de la contrainte appliquée à un matériau pour le déformer jusqu'à une certaine déformation laquelle est ensuite maintenue constante
- L'évolution dans le temps de la déformation d'un matériau sous charge ou contrainte appliquée constante
- L'évolution de la contrainte requise pour déformer un matériau, mesurée en fonction de son allongement relatif à vitesse de déformation décroissante
- La ténacité des matériaux ductiles sujets au fluage

3 – L'amorçage de l'instabilité de Considère a lieu quand

- La contrainte d'écoulement vraie σ devient égale à la dérivée dans le temps de la déformation vraie ϵ
- La contrainte d'écoulement vraie σ devient égale à sa dérivée par rapport à l'allongement relatif e
- La contrainte d'écoulement vraie σ devient égale à sa dérivée par rapport à la déformation vraie ϵ
- La contrainte d'écoulement vraie σ atteint sa valeur maximale.

4 – La fissuration lente ou « sous-critique » du verre de silice se traduit par :

- Une déformation plastique graduelle suite à une sollicitation mécanique lente
- La croissance graduelle dans le temps d'une fissure sous l'action de l'eau ou l'humidité
- L'apparition graduelle d'un nombre croissant de microfissures stables sous sollicitation cyclique
- Une augmentation de la ténacité du verre quand on le sollicite lentement.

5 - En étirant du verre fondu on peut produire des fibres longues car :

- Le verre fondu est un fluide visqueux Newtonien, qui se déforme toujours en traction sans subir la striction
- Le verre fondu a une contrainte d'écoulement faible et constante
- Le verre fondu se déforme à une contrainte indépendante de la vitesse de déformation
- Le verre fondu est un fluide dont la tension de surface est élevée.

6 – L'étape de « mise en solution » (solution treatment) d'un alliage subissant un traitement thermique de durcissement structural a pour but de :

- Former des précipités qui durcissent l'alliage
- Dissoudre une seconde phase
- Adoucir l'alliage par annihilation des dislocations et/ou recristallisation
- Eliminer les dislocations par annihilations mutuelles.

7 – L'étape de « revenu » (artificial ageing) d'un alliage subissant un traitement thermique de durcissement structural a pour but de :

- Former des précipités qui durcissent l'alliage
- Dissoudre une seconde phase
- Adoucir l'alliage par annihilation des dislocations et/ou recristallisation
- Eliminer les dislocations par annihilations mutuelles

8 – Un alliage d'aluminium de la série 3xxx peut être durci par :

- Durcissement structural
- Recristallisation
- Ecouissage
- Recuit

9 – Le cuivre est connu depuis l'antiquité car :

- Le cuivre est un métal dont le minerai est abondant
- Le cuivre est toujours dur même s'il n'est pas allié
- L'oxyde du cuivre peut être réduit et le cuivre fondu dans un four à charbon de bois
- Le cuivre est un alliage malléable et à faible taux d'écrouissage de sorte qu'il est facilement forgé

10 – La pièce en aluminium dans l'image à droite de ce texte a été produite par :

- Laminage
- Extrusion
- Coulée à haute pression
- Forgeage



11 – L'alliage 2024 est :

- Un alliage d'aluminium de corroyage contenant du manganèse
- Un alliage d'aluminium de corroyage contenant du cuivre
- Un alliage d'aluminium de fonderie contenant du manganèse
- Un alliage d'aluminium de fonderie contenant du cuivre

12 – La microstructure d'un acier au carbone contenant 0.4% 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

13 - Le revenu des aciers est :

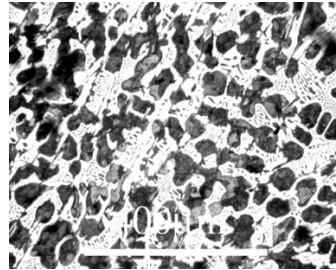
- La formation de l'acier à partir de la fonte
- Un réchauffement des aciers pour y créer de nouveaux grains non déformés
- Le recyclage des aciers
- Un réchauffement de l'acier après trempe martensitique visant à augmenter sa ductilité

14 - La fragilisation de revenu des aciers est :

- Causée par la fissuration lors de la trempe
- Une réduction nette de la ductilité de certains aciers due à la ségrégation d'éléments ou d'impuretés lors du revenu
- Une sensibilité trop grande du revenu de précipitation au temps de revenu des aciers à durcissement structural secondaire
- Une perte subite du durcissement des aciers lors de leur revenu dans un milieu riche en carbone

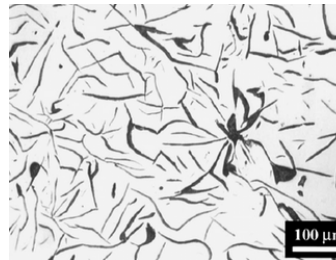
15 – La microstructure dans l'image à droite de ce texte est celle d'une fonte blanche hypoeutectique ; elle contient :

- Du graphite et de la ferrite
- De la cémentite et de la ferrite
- Du graphite et de l'austénite
- Du graphite et de la cémentite



16 – La microstructure dans l'image à droite de ce texte est celle d'une fonte grise hypereutectique ; elle contient :

- Du graphite et de la ferrite
- De la cémentite et de la ferrite
- Du graphite et de l'austénite
- Du graphite et de la cémentite



17 – Un acier inoxydable contient:

- Au moins 18%massique de chrome et 8%massique de nickel
- Au moins 18%massique de nickel et 8%massique de chrome
- Au moins 12%massique de chrome
- Toujours de la martensite.

18 – La contrainte requise pour déformer un élastomère à une déformation fixe donnée :

- Est au moins égale à 1 GPa
- Est indépendante de la température
- Augmente si la température augmente
- Diminue si la température augmente

19 – La contrainte requise pour déformer un polymère thermoplastique à une déformation fixe donnée :

- Est au moins égale à 1 GPa
- Est indépendante de la température
- Augmente si la température augmente
- Diminue si la température augmente

- 20 – La température de transition vitreuse T_g d'un polymère est la température
- au-dessus de laquelle les liaisons secondaires perdent leur rigidité
 - au-dessus de laquelle toutes les liaisons interatomiques perdent leur rigidité
 - au-dessus de laquelle le polymère devient transparent
 - au-dessous de laquelle le polymère devient transparent

QUESTIONS COMPTANT POUR 140 POINTS AU TOTAL:

21 – La contrainte vraie (true stress) σ à laquelle se déforme le *GéniAl*, nouvel alliage composé de 99% d'aluminium lancé par la startup innovante *GéniMetAl* est donnée en fonction de la déformation vraie (true strain) ϵ par :

$$\sigma = K \epsilon^n, \text{ où } \epsilon \text{ est l'allongement vrai (true strain) avec } K = 900 \text{ MPa et } n = 0.2$$

a – Quelle est la valeur de l'allongement ϵ à laquelle va apparaître la striction lors de la déformation en traction uniaxiale du *GéniAl* ?

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

b – Quelle est la valeur de σ à ce moment ?

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

c – Quelle est la relation dans un essai de traction entre l'allongement relatif (engineering strain) e et la déformation vraie (true strain) ϵ ?

(3 points; une réponse correcte à chacune des questions reçoit 3 points, une réponse incorrecte -1 point)

- $\epsilon = (1+e)$
- $e = (1+\epsilon)$
- $e = \ln(1+\epsilon)$
- $\epsilon = \ln(1+e)$

d – Quelle est la relation dans un essai de traction entre la charge unitaire (engineering stress) R et contrainte vraie (true stress) σ ?

(3 points; une réponse correcte à chacune des questions reçoit 3 points, une réponse incorrecte -1 point)

- $\sigma = R(1+e)$
- $R = \sigma(1+e)$
- $\sigma = \ln(1+R)$
- $R = \ln(1+\sigma)$

e – Quelle est la valeur maximale de R atteinte par le *GéniAl* lors de la déformation en traction, ou en d'autres mots quelle est sa résistance mécanique (ultimate tensile stress) ?

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

f – Sur la base de ces données seules, est-ce que vous achèteriez des actions de *GéniMetal* ?
(2 points, expliquez pourquoi pour avoir tous les points)

22 – Vous travaillez dans une entreprise qui fabrique des plaques d’une épaisseur $W = 1$ cm d’un verre sodocalcique ayant les propriétés suivantes, que nous supposons être indépendantes de la température :

- Module d’Young $E = 74$ 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) $K_c = 0.7 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Le procédé de fabrication actuel au sein de votre entreprise garantit que les plaques ne contiennent pas de fissure interne ; toutes les fissures sont en surface.

a – Une telle plaque de verre contient une fissure de $10 \mu\text{m}$ de profondeur. Quelle est la contrainte à rupture en traction uniaxiale de cette plaque dans son plan, la contrainte appliquée étant orientée selon la normale au plan de la fissure et cette fissure étant la plus profonde se trouvant le long de la surface de cette plaque ?

(5 points ; si vous faites une approximation, énoncez-la pour avoir le total des points).

b – Au sortir de leur procédé de fabrication, ces plaques de verre contiennent des fissures, toutes réparties le long de la surface, dont la profondeur est distribuée statistiquement et l’orientation est aléatoire. Après caractérisation de ces plaques, il est établi que leur contrainte à rupture en traction uniaxiale selon une direction quelconque orientée dans le plan de la plaque obéit à la statistique de Weibull à deux paramètres de la forme gouvernée par des défauts surfaciques, avec $A_0 =$ aire de référence = 1 cm^2 , $\sigma_0 =$ contrainte de référence = 100 MPa et $m =$ exposant de Weibull = 8 .

Pouvez-vous écrire l’équation donnant la probabilité de rupture d’une plaque mesurant $A \text{ cm}^2$ de surface et soumise à une contrainte uniaxiale σ ?

(4 points).

c – On veut qu’une plaque carrée d’aire 1 m^2 ait une probabilité de rupture inférieure à 10^{-6} si elle est soumise à une contrainte en traction uniaxiale. Quelle est la valeur maximale de la contrainte à rupture en traction uniaxiale à laquelle cette plaque peut être soumise ?
(8 points, justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

d – Cette plaque est exposée à une température de 500°C , à laquelle le verre reste solide mais relaxe toute contrainte qu’il contient. La plaque est ensuite trempée brutalement dans de l’eau à 0°C , le refroidissement s’effectuant à vitesse suffisamment rapide pour que la surface se contracte avant le cœur de la plaque, le cœur de la plaque restant à ce moment-là à 500°C et ne se déformant pas.
Quelle est la contrainte maximale que voit la surface de la plaque de verre pendant la trempe ?
(5 points, justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

e – A votre avis, avec cette population de défauts, quelle est la probabilité qu'une plaque de verre d'aire de surface 10 cm^2 survive cette trempe sans se rompre ?
(4 points, justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

f – Quelle est la probabilité d'avoir une plaque mesurant 1 cm^2 d'aire qui ne contienne aucune fissure plus profonde que $a = 10 \text{ }\mu\text{m}$?
(4 points, justifiez votre réponse pour avoir tous les points)

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

Pour rappel : ce graphe donne le changement d'énergie libre ΔG accompagnant la formation de l'oxyde du métal M à partir de métal M et d'oxygène O_2 , la réaction étant écrite à chaque fois pour une mole d'oxygène O_2 . Les courbes sont tracées en supposant que tout gaz, y compris O_2 , intervenant dans la réaction est à une pression d'une atmosphère.

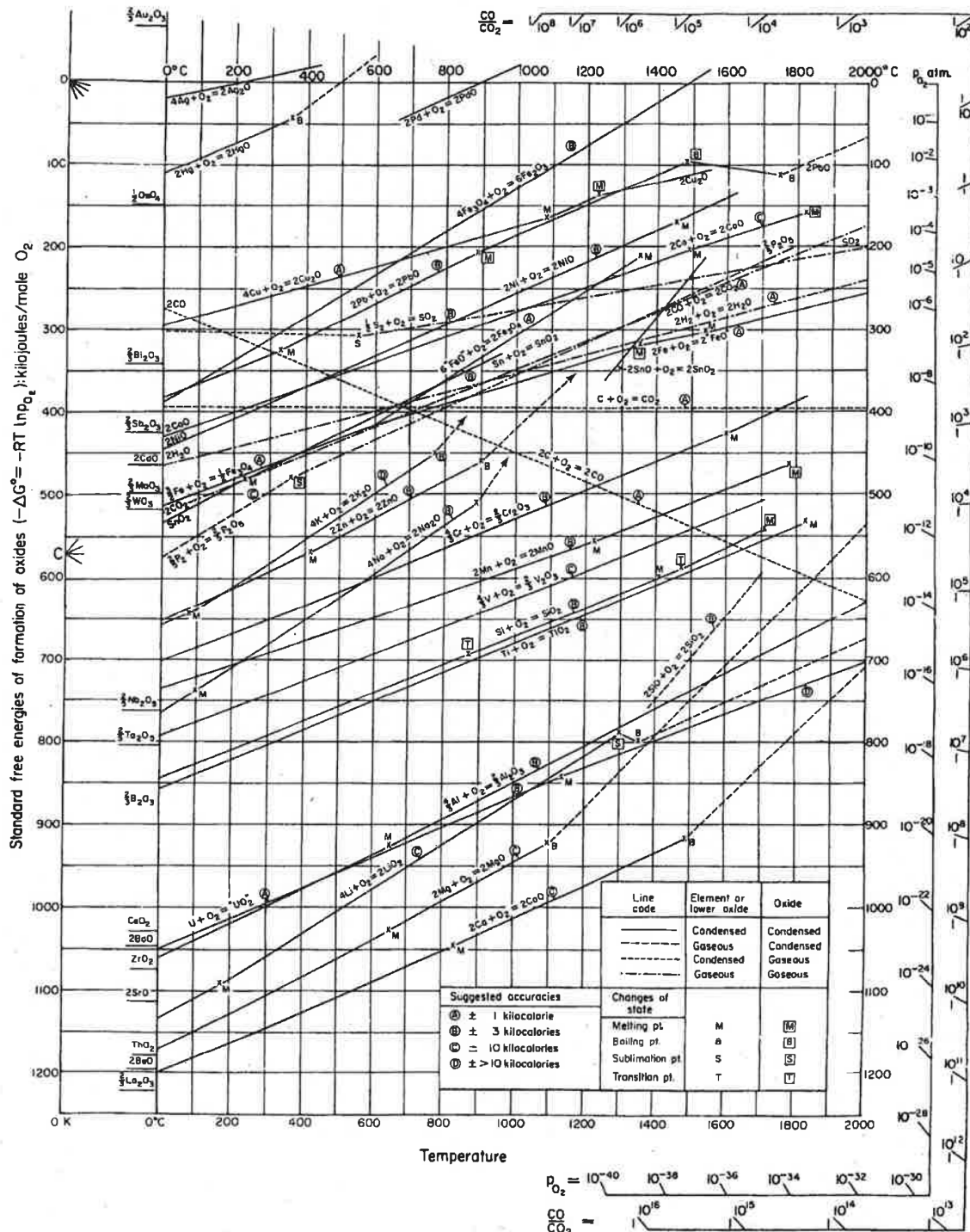


FIGURE IV-7 – Diagramme d'Ellingham.

Comme vous l'avez aussi vu, le changement d'énergie libre ΔG correspondant à chacune de ces réactions est la somme du changement d'enthalpie ΔH (qui est la chaleur absorbée ou dégagée par la réaction, un dégagement de chaleur correspondant à $\Delta H < 0$), moins la température T (en degrés K) fois le changement d'entropie ΔS , lequel mesure le changement dans le degré de « désordre », ou en d'autres mots du nombre de configurations possibles, des atomes entre leur état au sein des réactifs et au sein des produits de la réaction:

$$\Delta G_{\text{réaction}} = G_{\text{produits de réaction}} - G_{\text{réactifs}} = \Delta H_{\text{réaction}} - T \Delta S_{\text{réaction}}$$

avec

$$G_{\text{produits de réaction}} = H_{\text{produits de réaction}} - T S_{\text{produits de réaction}}$$

$$G_{\text{réactifs}} = H_{\text{réactifs}} - T S_{\text{réactifs}}$$

Comme vous le voyez ces courbes sont des segments de droite, avec pour implication que, le long de chacun de ces segments, $\Delta H_{\text{réaction}}$ et $\Delta S_{\text{réaction}}$ sont relativement constants.

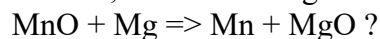
a – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à l'oxydation du magnésium à 1000°C, en kJ/mole O_2 ?

(3 points)

b – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à l'oxydation du magnésium à 1000°C, en kJ/mole **Mg** ?

(2 points)

c – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à la réaction suivante à 1000°C, en kJ/mole Mg ?



(3 points)

24 – Ci-dessous vous trouverez des données extraites du *Metals Handbook*, décrivant un alliage de cuivre allié avec du chrome et du zirconium, plus 400 ppm de magnésium.

Table 38 Nominal mechanical properties of C18100 strip and wire

Temper	Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm (2 in.), %
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Strip					
Cold worked (40% reduction)	460	67	430	62	6
Cold worked (40% reduction), aged	495	72	455	66	10
Wire					
Cold worked (60% reduction)	480	70	435	63	6
Cold worked (60% reduction), aged	515	75	470	68	11
Cold worked (75% reduction)	495	72	455	66	5
Cold worked (75% reduction), aged	550	80	475	69	12
Cold worked (90% reduction)	500	73	455	66	4
Cold worked (90% reduction), aged	585	85	515	75	13

C18100

99Cu-0.8Cr-0.16Zr-0.04Mg

Chemical Composition

Composition limits. 0.4 to 1.2 Cr, 0.05 to 0.3 Zr, 0.03 to 0.06 Mg

Applications

Typical uses. Resistance welding electrodes and wheels, switches, circuit breakers, high-temperature wire, semiconductor bases, heat sinks, and continuous casting molds

Mechanical Properties

Tensile properties. See Table 38.

Hardness. See Table 38.

Elastic modulus. 125 GPa (18.2 × 10⁶ psi)

Mass Characteristics

Density. 8.88 g/cm³ (0.319 lb/in.³) at 20 °C (68 °F)

Thermal Properties

Liquidus temperature. 1075 °C (1967 °F)

Thermal conductivity. 324 W/m · K (187 Btu/ft · h · °F) at 20 °C (68 °F)

Coefficient of linear thermal expansion. 16.7 μm/m · K (9.3 μin./in. · °F) at 20 to 100 °C (68 to 212 °F); 18.4 μm/m · K (10.2 μin./in. · °F) at 20 to 200 °C (68 to 392 °F); 19.3 μm/m · K (10.7 μin./in. · °F) at 20 to 300 °C (68 to 572 °F)

Electrical Properties

Electrical conductivity. Volumetric, 80% IACS at 20 °C (68 °F), annealed

Electrical resistivity. 21.7 nΩ · m at 20 °C (68 °F), annealed

Fabrication Characteristics

Formability. Excellent capacity for both cold and hot forming

Weldability. Solderability, excellent; brazing and gas-shielded arc welding, good; butt resistance welding, fair. Oxyacetylene, spot, and seam resistance welding are not recommended.

Annealing temperature. 600 to 700 °C (1110 to 1300 °F)

Heat-treating temperatures. Solution treatment: 900 to 975 °C (1650 to 1790 °F) for 1 h. Aging treatment: 400 to 500 °C (750 to 930 °F) for 1 h

Hot-working temperature. 790 to 925 °C (1450 to 1700 °F)

a – Pouvez-vous définir ce à quoi correspond le terme « reduction » utilisé dans la première colonne de ce tableau de données ?

(2 points, définissez précisément ce terme pour avoir tous les points)

b – Quel est l’allongement relatif (engineering strain) e total du métal après une « reduction » de $X\%$?

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

c – L’étape de précipitation (aging) du traitement thermique de durcissement structural a lieu après écrouissage (cold work). A quoi voit-on dans ces données que l’augmentation de la limite d’élasticité obtenue dans cet alliage après durcissement structural dépend de l’état d’écrouissage du métal ? Pouvez-vous donner une explication (sous forme d’un mécanisme physique) à cela ?

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

d – Cet alliage est un bon conducteur, aux propriétés mécaniques élevées, faisant qu’il est utilisé pour des applications telles que des électrodes de soudure, des composants de circuits électriques, ou des éléments devant conduire la chaleur.

Qu’est-ce qui indique, parmi les caractéristiques données ici (autres que ses applications), qu’il est bon conducteur ?

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

e – A votre avis cet alliage est-il susceptible de subir la maladie de l’hydrogène ?

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

f – A votre avis la mise en solution de l’alliage est-elle faite avant ou après écrouissage ?

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

25 – a – Décrivez ou dessinez un échantillon d'essai de traction uniaxiale, sans oublier de décrire la section réduite ou les zones d'amarrage.
(5 points).

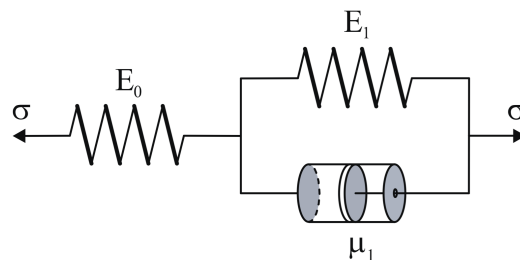
b – Donnez une définition de l'essai de fluage en traction uniaxiale.
(4 points)

c – Sur le système de coordonnées ci-dessous, identifiez les axes (quantité rapportée et ses unités) et dessinez les courbes que l'on attend d'un essai de fluage en traction uniaxiale pour (i) un polymère thermodurcissable (thermoset polymer), et (ii) un polymère thermoplastique (thermoplastic polymer).

(5 points; le dessin correct avec les axes identifiés et une courbe clairement marquée pour chacun des deux types de polymère suffit pour votre réponse) .



d – On peut simuler le comportement uniaxial des polymères viscoélastiques linéaires avec des assemblages de pistons et ressorts linéaires. Vous avez vu en cours et en exercice l'assemblage d'éléments dit de Voigt-Kelvin, composé d'un ressort connecté en parallèle à un piston, le tout étant connecté en série à un second ressort et dessiné ci-dessous :



Pourquoi cet assemblage d'éléments de Voigt-Kelvin ne peut-il pas représenter la réponse en fluage d'un polymère thermoplastique ? Que faudrait-il y ajouter pour répliquer un polymère thermoplastique ?

(4 points)

e – Pouvez-vous indiquer et marquer, sur la courbe que vous avez dessinée ci-dessus pour un thermodurcissable en réponse à la question c), trois quantités caractéristiques du matériau et discernables sur sa courbe de fluage qui permettent de déduire, connaissant la contrainte appliquée σ lors de l'essai, les trois quantités E_1 , E_2 et μ_1 de l'assemblage de Voigt-Kelvin correspondant à ce polymère thermodurcissable ?

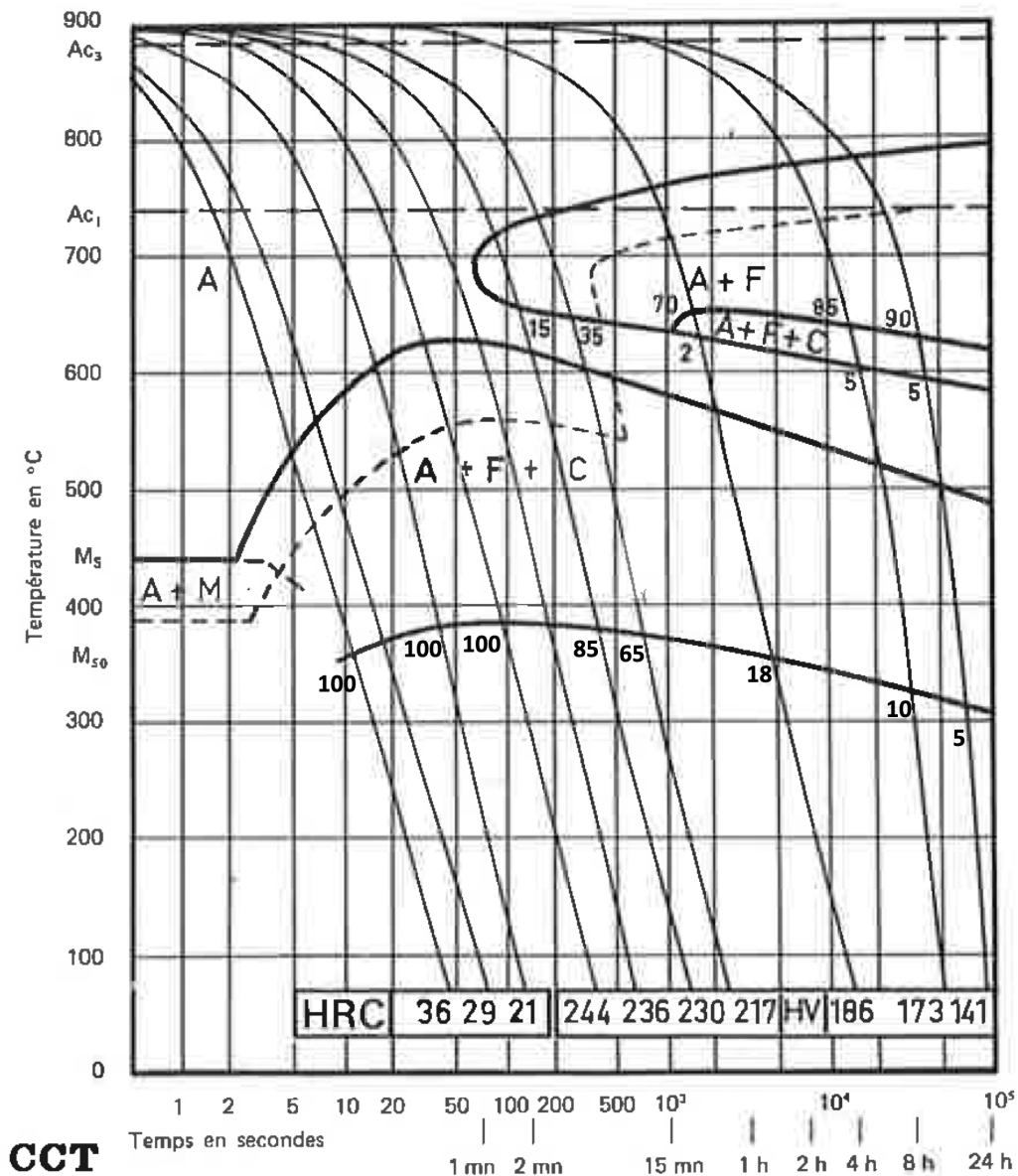
(6 points)

26 – a - Pourquoi la production d'aluminium est-elle souvent située à proximité de barrages hydroélectriques ?
(3 points)

b – Peut-on actuellement transformer la bauxite en aluminium sans émission de dioxyde de carbone ?
(2 points; il faudra justifier votre réponse pour avoir tous les points)

28 – Ci-dessous vous trouverez le diagramme TRC (CCT diagram) d'un acier faiblement allié. Note importante : la température M_f est inférieure à 0°C pour cet alliage.

Composition: 0.14% C - 1.20% Mn - 0.23% Si - 0.017% S - 0.016% P - 0.15% Ni - 0.10% Cr - 0.48% Mo - 0.15% Cu - 0.065% V Grain size: 8 Austenitized at 900°C (1652°F) for 30 min



a – Que veulent dire les lettres A, C, F, M dans ce graphe ?
(2 points au total).

b – Cochez la réponse correcte dans les options ci-dessous

(10 points au total; une réponse correcte à chacune de ces questions reçoit 2 points, une réponse incorrecte -1 point).

Pour produire une structure 100% bainitique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% perlitique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% ferritique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

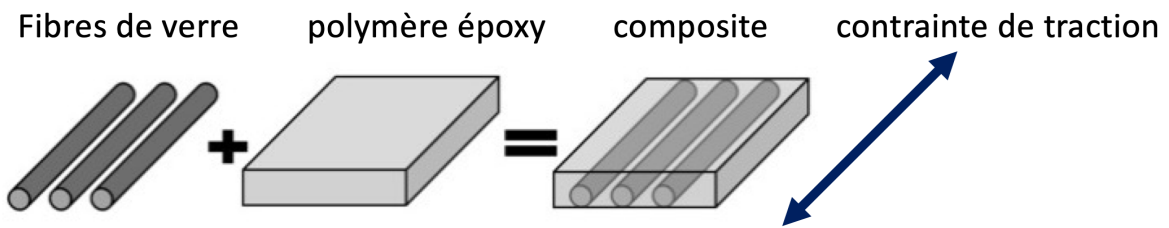
Pour produire une structure 100% martensitique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure contenant au moins 90% de ferrite il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en 24 heures ou davantage
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en 5'000 secondes.
- ce n'est pas possible.

29 – Considérons un composite à fibres longues sollicité en traction uniaxiale selon l’axe des fibres (voir figure ci-dessous), toutes parallèles et orientées selon l’axe de traction :



Ce composite est composé de :

- 50% par volume de fibres de verre longues et parallèles, de module d’Young $E = 70$ GPa et d’allongement à rupture de $\epsilon = 1.5\%$ (elles cassent toutes à cette elongation). Leur déformation est entièrement linéaire élastique.
- 50% par volume d’une matrice polymérique de module d’Young $E = 5$ GPa et ayant une contrainte d’écoulement $\sigma = 50$ MPa lorsque son allongement ϵ est de 1.5%.

a – Quel est le module d’Young du composite selon la direction parallèle aux fibres ?
(3 points)

b – Quelle est la contrainte d’écoulement du composite selon la direction parallèle aux fibres à $\epsilon = 1.5\%$, c’est-à-dire au moment où cassent les fibres ?
(3 points)

PAGE SUPPLEMENTAIRE POUR LE CAS OÙ VOUS AVEZ BESOIN DE DAVANTAGE DE PLACE POUR REpondre. INDIQUEZ CLAIREMENT SOUS LE TEXTE DE LA QUESTION QU'IL FAUT SE RENDRE ICI POUR EN LA CORRIGEANT, ET ICI A QUELLE(S) QUESTION(S) VOUS REpondez.

**PAGE SUPPLEMENTAIRE POUR LE CAS OÙ VOUS AVEZ BESOIN DE DAVANTAGE DE PLACE
POUR REpondre. INDIQUEZ CLAIREMENT SOUS LE TEXTE DE LA QUESTION QU'IL FAUT SE
RENDRE ICI POUR EN LA CORRIGEA**