



UNIVERSITÉ  
**LAVAL**

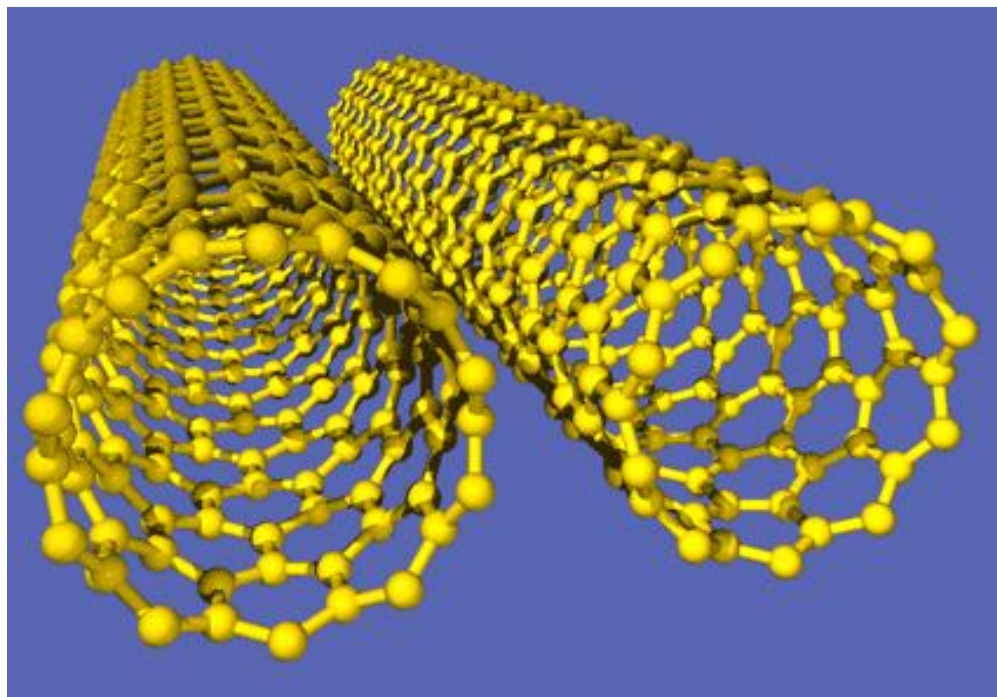
**Faculté des sciences et de génie**  
Département de génie des mines,  
de la métallurgie et des matériaux

Document pédagogique interactif d'aide à la résolution de  
l'examen du mardi 18 décembre 2007

**Matériau de l'ingénieur**  
**GML-10463**

Ce document a été rédigé par Frédéric Couët et Sébastien Meghezi à la session d'automne 2008 à partir des examens du cours Matériau de l'Ingénieur de la session d'automne 2007.

# 1. Examen du mardi 18 décembre 2007



Représentation tri-dimensionnelle de nanotubes de carbone.

*Instructions*

*Voici la démarche à suivre afin de bénéficier au mieux de tous les apports pédagogiques de ce document.*

*Dans une première partie, vous trouverez l'ensemble de l'énoncé de l'examen.*

*Pour chaque problème rencontré, il est recommandé d'essayer de le résoudre en ayant le livre comme seul outil. Pour certains problèmes, vous trouverez des jeux-questionnaires ou des questions ouvertes. Pour participer au jeux-questionnaires (et donc vous amuser en apprenant!) vous devez cliquer sur « Débuter le quiz ». Vous pouvez ensuite sélectionner vos réponses, puis cliquer sur « Terminer le quiz ». Votre note sera alors affichée et vous pourrez cliquer sur « Réponses » pour obtenir les corrections. De la même façon, inscrivez vos réponses dans les rectangles noirs tout au long du document et tapez « Entrer ». Le rectangle devient vert lorsque la réponse est exacte et rouge si elle est fausse.*

*Chaque problème présent dans ce document est construit selon le même principe. En cliquant sur le numéro du problème, vous serez redirigés vers la deuxième partie de ce document qui correspond à la correction complète du problème. Cette correction n'est pas exhaustive, mais comporte l'ensemble des éléments de réponse attendus. A la fin de chaque correction, une flèche vous ramènera à l'énoncé du problème en question.*

*Bonne pratique !*

**Problème 1.1.** On fabrique un composite à matrice métallique composé d'une matrice d'aluminium (commerciallement pur) renforcée par des fibres continues et alignées de carbure de silicium (SiC). La fraction volumique de fibres  $V_f$  est égale à 20 %. Les propriétés mécaniques de la matrice et celle du renfort sont données au tableau suivant.

Composant	E(GPa)	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_f$ (%)
Aluminium	70	60	250	25
SiC	400	-	4500	?

( $R_m = \sigma_R$ ;  $A_f = \text{déformation finale à la rupture}$ )

- Quelle est la valeur du module d'Young  $E_C$  de ce composite ? Illustrez votre démarche.
- Quelle est la valeur de la limite d'élasticité du composite  $Re_C$  ? Expliquez.
- À cette limite d'élasticité, quelle est la valeur du rapport  $r$  de la force supportée par les fibres à la force supportée par la matrice ? Commentez.
- Quelle est la valeur de la déformation finale à la rupture  $(A_f)_C$  du composite ? Illustrez.
- La fraction volumique de renfort  $V_f$  est-elle suffisante pour que la résistance à la traction  $(R_m)_C$  du composite soit au moins égale à celle  $(R_m)_{mat}$  de la matrice non renforcée ? Expliquez.

**Problème 1.2.** Une contrainte de  $1000 \text{ N/m}^2$  est requise pour étirer un ruban de polyisoprène (caoutchouc) autour d'une pile de livres. Après six semaines, la contrainte agissant sur le ruban est de seulement  $980 \text{ N/m}$ . Quelle contrainte sera présente dans le ruban après une année ?

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda} \quad (1)$$

Débuter le quiz

1. (a)  $839 \text{ N/m}^2$       (b)  $297 \text{ N/m}^2$       (c)  $1000 \text{ N/m}^2$       (d)  $741 \text{ N/m}^2$

Terminer le quiz

- ii) Donnez ici la démarche suivie pour obtenir ce dernier résultat.

**Problème 1.3.** Il est possible de modifier les propriétés mécaniques du polyisoprène par un procédé de réticulation qui s'appelle vulcanisation. Il s'agit de relier les chaînes entre elles par des atomes de soufre, et l'addition de quantités croissantes de soufre rigidifie progressivement le polymère. Expliquez comment l'addition de soufre pourrait influencer la cristallinité du polyisoprène.

**Problème 1.4.** Définissez le module élastique d'un polymère thermoplastique. Comment est-il possible de modifier la rigidité de ces polymères ? Expliquez brièvement.

**Problème 1.5.** Le fluage est une propriété des matériaux. À partir de vos connaissances sur le fluage des métaux et sur la structure des polymères, prédisez le comportement au fluage des polymères. Le comportement des polymères sera plus, moins ou également influencé par le phénomène de fluage ?



**Problème 1.6.** Vrai ou faux ?

Débuter le quiz

1. La polymérisation par addition se produit nécessairement entre polymères de même nature.  
(a) Vrai (b) Faux (c) Je ne sais pas
2. La possibilité de faire varier la rigidité d'une chaîne de polymère est particulièrement importante dans le cas des copolymères, pour lesquels les unités de base peuvent se répéter de diverses manières le long de la chaîne.  
(a) Vrai (b) Faux (c) Je ne sais pas
3. La symétrie des chaînes par rapport à leur axe est une parmi les conditions qui favorisent la cristallisation des polymères.  
(a) Vrai (b) Faux (c) Je ne sais pas
4. Les plastifiants permettent d'améliorer la rigidité d'un polymère dont la rigidité initiale est inadéquate.  
(a) Vrai (b) Faux (c) Je ne sais pas
5. Dans le cas de la mise en forme des polymères thermodurcissables le polymère chaud est injecté dans un moule froid, tandis que pour les polymères thermoplastiques le polymère froid est injecté dans un moule chaud.  
(a) Vrai (b) Faux (c) Je ne sais pas
6. Le module d'élasticité des polymères est généralement fonction de la vitesse de mise en charge et de la durée du maintien de la contrainte.  
(a) Vrai (b) Faux (c) Je ne sais pas

Terminer le quiz

**Problème 1.7.** Le mois dernier, votre ami a eu des problèmes de plomberie et a dû réparer d'urgence un tuyau de cuivre. Au moment de sa réparation, il avait en sa possession seulement un tuyau d'aluminium. Il a donc utilisé son tuyau d'aluminium pour remplacer la section défectueuse. Lorsque vous allez chez lui, il vous demande de regarder ses connexions entre son tuyau d'aluminium et de cuivre car un des tuyaux a commencé à corroder. Vous avez tout de suite compris lequel, et vous ne lui demandez pas de vous expliquer. En effet, vous vous souvenez d'avoir vu dans votre cours de Matériaux quelques notions en corrosion ainsi que ces deux équations :

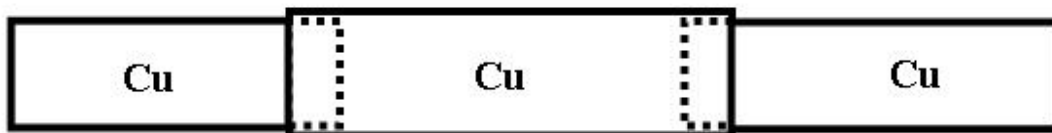


a) Quel matériau s'est corrodé davantage ? Détaillez l'équation globale du système et justifiez.

b) Comment se nomme ce type de corrosion ? Expliquez.

c) Votre ami tient à garder son tuyau d'aluminium en place avec ses tuyaux de cuivre. Nommez 2 moyens pour empêcher ou diminuer l'effet de la corrosion. Expliquez.

d) Votre ami décide finalement de remplacer son tuyau d'aluminium par un tuyau de cuivre en les emboîtant l'un dans l'autre tel qu'illustré à la figure suivante :



Après quelques mois, les tuyaux corrodent à l'interconnexion. Quelle est l'origine de cette corrosion et que lui conseillez-vous pour empêcher la corrosion ? Commentez.

**Problème 1.8.** Comment expliquez-vous la faiblesse de la ductilité et de la ténacité dans les matériaux céramiques ? Discutez et illustrez cela en faisant référence aux relations entre la structure (microstructure et arrangement atomique) et les propriétés de ce type de matériaux. Soyez précis.

**Problème 1.9.**

Vous participez au développement d'un nouveau matériau composite. Il s'agit d'un fil avec une partie centrale en métal (3mm de diamètre) recouverte de polymère (épaisseur de la couche de polymère 0.5mm). Après une analyse critique, quatre polymères et trois métaux ont été retenus pour le projet (voir Tableau I et II).

TABLE 1 – Propriétés des polymères

Polymères	Limite ultime	Allongement à la rupture	Module élastique	Coefficient de dilatation thermique
	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	E (MPa)	$\alpha(10^{-6}K^{-1})$
Polyéthylène, UHMWPE	30	225	800	200
Polypropylène, PP	32	700	1300	90
Polyméthacrylate, PMMA	70	10	3000	70
Caoutchouc, R	7	350	10	25

TABLE 2 – Propriétés des métaux

Métaux	Limite ultime	Allongement à la rupture	Module élastique	Limite d'endur- ance	Coefficient de dilatation thermique
	$\sigma_R$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	E (GPa)	$\sigma_E$ (MPa)	$\alpha(10^{-6}K^{-1})$
Acier Inox. Cr-Ni	600	60	200	230	10.6
Acier Inox. 316L	700	10	300	300	17.3
Co-Cr-Mo	655	8	250	310	8

1) En supposant que le composite est initialement homogène et en considérant les caractéristiques des matériaux présentés dans ces tableaux, choisissez le couple métal-polymère le plus approprié pour les applications suivantes :

- Fabrication d'une tige chargée en traction.
- Fabrication de ressorts soumis à un nombre élevé de cycles.
- Fabrication de rayons de roue de bicyclette.

2) Que pensez vous du choix suivant : un couple Cr-Co-Mo/UHMWPE pour une application de pointe à haute température ?

3) Considérons la limite d'endurance des trois métaux proposés dans le tableau II. Quel lien existe-t-il entre la limite d'endurance et le module élastique ? Quels sont les éléments qui influencent la limite d'endurance ?

**Problème 1.10.** Définissez la conductivité électrique. Tous les matériaux qui sont bons conducteurs électriques sont-ils aussi bons conducteurs thermiques ? Pourquoi ? Expliquez brièvement.

**Problème 1.11.** Qu'est ce que la soudabilité d'un acier ? Comment pouvez-vous l'estimer ? Expliquez.

**Problème 1.12.** Qu'est ce que la trempabilité d'un acier ? Comment pouvez-vous la mesurer ? Illustrez.

## Solutions aux Exercices

### Problème 1.1.

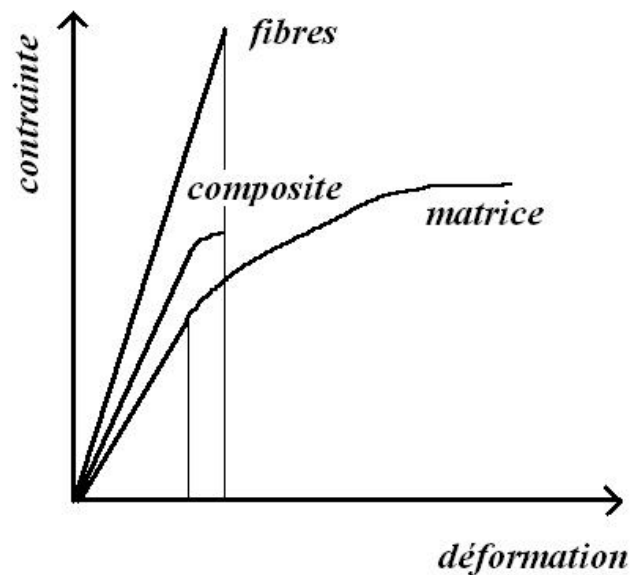
a)

Le module de Young se détermine en utilisant la règle des mélanges.

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad (2)$$

$$= (70)(0.8) + (400)(0.2) \quad (3)$$

$$= 136 \text{ GPa}. \quad (4)$$



b)

La limite élastique du composite correspond à la contrainte maximale qu'il subit dans le domaine élastique. La fin du domaine élastique correspond au moment où l'une des composantes du matériau (fibre ou matrice) commence à se déformer plastiquement. La déformation élastique du composite est donc égale à la plus petite des déformations élastiques de la matrice et de la fibre.

Nous devons calculer les déformations élastiques de l'aluminium et du SiC.



Pour la matrice d'aluminium :

$$\epsilon_{el}^m = \frac{R_{e,m}}{E_m} \quad (5)$$

$$= \frac{60 \times 10^6}{70 \times 10^9} \quad (6)$$

$$= 0.00086 \quad (7)$$

La matrice se déforme donc de 0.086% avant de se déformer plastiquement.

Pour les fibres de SiC : comme les fibres sont un matériau fragile, leur déformation élastique correspond à leur déformation à la rupture, qui est aussi la résistance à la traction des fibres.

$$\epsilon_{el}^f = \frac{R_m^f}{E_f} \quad (8)$$

$$= \frac{4500 \times 10^6}{400 \times 10^9} \quad (9)$$

$$= 0.01125 \quad (10)$$

Les fibres se déforment de manière élastique de 1.125% avant de se rompre.

On en déduit que la déformation élastique du composite sera égale à celle de la matrice, soit 0.086%. La limite élastique du matériau est donc égale à la contrainte qu'il faut fournir au composite pour le déformer de 0,086%. Cette valeur est donnée par la relation suivante :

$$R_{e,c} = \epsilon_{el}^c E_c = \epsilon_{el}^m E_c \quad (11)$$

$$= (0.00086)(136 \times 10^9) \quad (12)$$

$$= 117 \text{ MPa} \quad (13)$$

La limite élastique du composite  $R_{e,c}$  est donc de 117 MPa.

Remarque :

En sachant dès le départ que la matrice est la composante limitant la déformation élastique du composite, il est possible d'accéder à la même valeur en utilisant la règle des mélanges sur la limite élastique du composite :

$$R_{e,c} = V_m R_{e,m} + V_f \sigma_f' \quad (14)$$

$$(15)$$

Où  $\sigma'_f$  correspond à la contrainte qu'il faut fournir aux fibres pour les déformer d'une valeur égale à la déformation élastique de la matrice. Ainsi, on écrira :

$$R_{e,c} = V_m R_{e,m} + V_f E_f \epsilon_{el}^m \quad (16)$$

$$= (0.8)(60) + 0.2(400 \times 10^3)(0.86 \times 10^{-3}) = 117 MPa \quad (17)$$

Par cette autre méthode, on retrouve bien la valeur de 117 MPa pour la limite élastique du composite.

**c)**

$$r = \frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (18)$$

$$= \frac{(400)(0.2)}{(70)(0.8)} \quad (19)$$

$$\approx 1.43. \quad (20)$$

Le rapport (r) indique que lorsque la contrainte correspond à la limite élastique du matériau, la force supportée par les fibres est 1.43 fois plus grande que la force supportée par la matrice.

**d)**

Le composite ne peut être déformé plus que sa composante la moins déformable (ici, les fibres).

$$A_{F,C} = A_{F,f} \quad (21)$$

$$= \frac{4500 \times 10^6}{400 \times 10^9} \quad (22)$$

$$= 1.125\% \quad (23)$$

**e)**

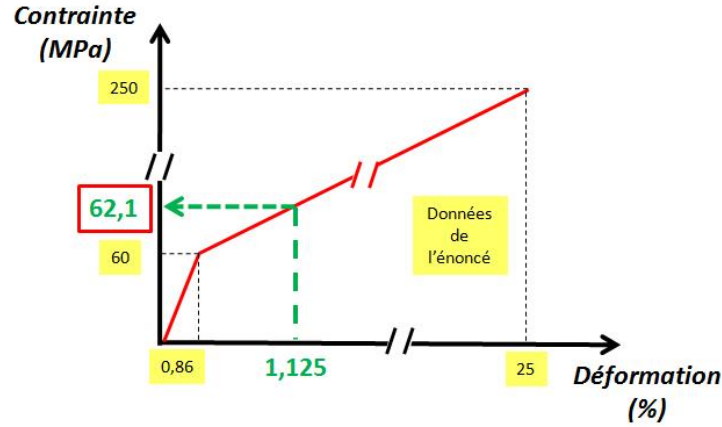
La résistance à la traction du composite  $R_{m,c}$

$$R_{m,c} = \sigma'_m V_m + R_{m,f} V_f \quad (24)$$

où  $\sigma'_m$  correspond à la contrainte dans la matrice au moment où les fibres se rompent, soit pour une déformation de 0.01125 (1.125%). Malheureusement, considérant les données

du problème, à cette déformation, la matrice est déformée dans le domaine plastique. Il nous faut trouver un moyen d'estimer la contrainte subie par la matrice à cette déformation.

*Hypothèse : la matrice se déforme linéairement de sa limite élastique à son point de rupture.*



Courbe contrainte-déformation de la matrice d'aluminium en assumant l'hypothèse précédemment mentionnée.

La droite qui correspond à notre hypothèse a la pente suivante :

$$m = \frac{250-60}{25-0.86} \quad (25)$$

$$= 7.87 \text{ MPa}/\% \quad (26)$$

Selon notre hypothèse, la contrainte dans la matrice au moment de la rupture est de :

$$\sigma'_m = 60 + 7.87(1.125 - 0.86) \quad (27)$$

$$= 62.1 \text{ MPa} \quad (28)$$

$$R_{m,c} = \sigma'_m V_m + R_{m,f} V_f \quad (29)$$

$$= 62.1(0.8) + 4500(0.2) \quad (30)$$

$$= 950 \text{ MPa} \quad (31)$$

La résistance à la traction du composite  $R_{m,c} = 950$  MPa est supérieure à celle de la matrice non-renforcée (250 MPa). La fraction volumique de renfort est donc suffisante.



### Problème 1.2.

La contrainte initiale appliquée sur le caoutchouc est de :

$$\sigma_0 = 1000 \text{ N/m}^2 \quad (32)$$

Considérons l'équation 1, soit

$$\sigma = \sigma_0 e^{-t/\lambda}$$

$\sigma_0$  représentant la contrainte initiale appliquée au ruban de polyisoprène et  $\lambda$  représentant le temps de relaxation (temps caractéristique d'un système pour qu'il retourne à son état d'équilibre). Il est alors possible de déterminer la valeur de  $\lambda$  à partir d'un temps et d'une contrainte, soit le couple donné dans le problème (6 semaines, 980 N/m<sup>2</sup>).

$$980 = 1000 e^{-6/\lambda}$$

$$\lambda = -6 / \ln \left( \frac{980}{1000} \right) \quad (33)$$

$$\lambda = 297 \text{ semaines.} \quad (34)$$

Maintenant, puisqu'une année comporte environ 52 semaines, on peut déterminer la valeur de  $\sigma$  telle que :

$$\sigma = 1000 e^{-52/297} \quad (35)$$

$$= 839 \text{ N/m}^2 \quad (36)$$

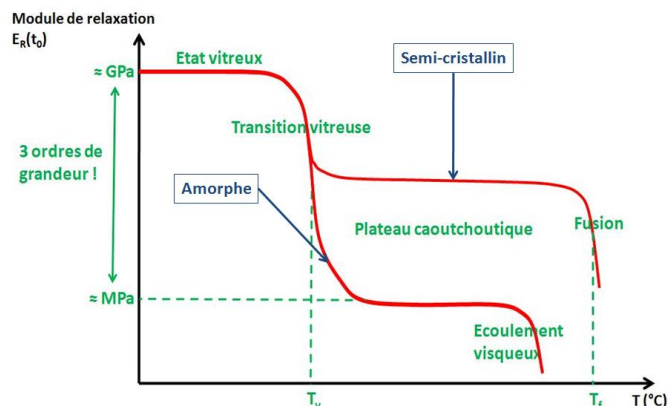
La réponse est donc a), la contrainte présente dans le ruban après une année est de 839 N/m<sup>2</sup>.

### Problème 1.3.

La rigidité d'un polymère semi-cristallin est essentiellement conférée par ses domaines cristallins. Les parties amorphes quant à elles sont beaucoup plus mobiles et peuvent glisser plus facilement les unes par rapport aux autres. Ainsi, plus il y aura des parties amorphes dans un polymère plus il sera facile de le déformer résultant en une rigidité réduite. La vulcanisation est un procédé qui va introduire des **liaisons fortes supplémentaires** entre les chaînes par une réaction chimique irréversible diminuant leurs **degrés de liberté**. Ceci favorisera une **conformation donnée** et aboutira à une meilleure organisation dans l'agencement des chaînes se rapprochant plus d'un état cristallin. C'est pourquoi le procédé de vulcanisation augmente le module élastique et la résistance mécanique du caoutchouc.

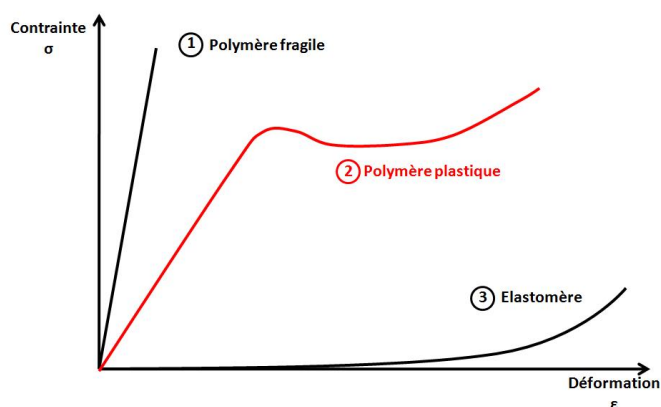
### Problème 1.4.

Les matières thermoplastiques sont des composés macromoléculaires linéaires synthétisés par polymérisation, co-polymérisation ou polycondensation. Leurs propriétés distinctives des autres types de polymère provient de leur comportement particulier en fonction de la température. Une matière thermoplastique soumise à une augmentation de température va voir sa rigidité diminuer lors de la transition vitreuse. Ce phénomène est visualisé par le suivi du module de relaxation en fonction de la température (voir définition p.431 du livre et figure suivante).



Variation du module de relaxation  $E_R(t_0)$  au temps  $t_0$  d'un polymère amorphe et d'un polymère semi-cristallin en fonction de la température.

La thermoplasticité d'un polymère se manifeste lorsque celui-ci est porté à une température supérieure à la température de transition vitreuse ( $T_v$ ). Le matériau passe alors d'un état de solide vitreux plutôt fragile (dont le comportement mécanique est donné par la courbe 1 de la figure suivante) à un état caoutchoutique dans lequel le matériau peut être déformé plastiquement (courbe 2 de la figure suivante).



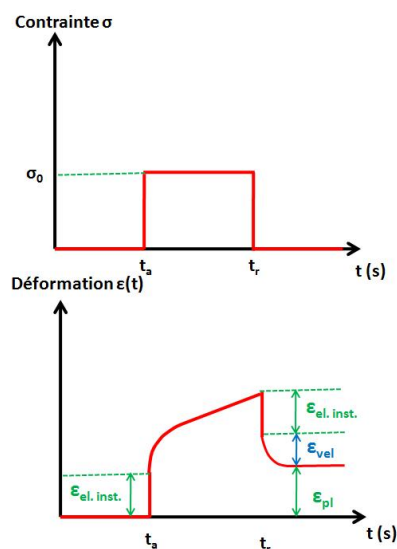
Variation de la contrainte imposée  $\sigma$  en fonction de la déformation  $\epsilon$  pour des polymères fragiles (courbe 1), plastiques (courbe 2) et élastomériques (courbe 3).

On peut donc modifier la rigidité d'un polymère thermoplastique en contrôlant sa température de transition vitreuse. Pour cela on peut jouer sur la chimie du polymère c'est-à-dire en modifiant le taux de cristallinité (jouer sur la tacticité des chaînes), la nature chimique du monomère (certains groupements chimiques favoriseront la flexibilité des chaînes et  $T_v$  diminue), la masse molaire moyenne des chaînes ( $T_v$  augmente avec  $M$ ), la présence de ramifications (espaceurs de chaînes, liberté des chaînes augmente,  $T_v$  diminue), l'introduction de groupements polaires ou de liaisons faibles ( $T_v$  augmente), ajout de plastifiants ( $T_v$  diminue). Enfin, on peut également jouer sur la vitesse d'application de la contrainte (plus elle sera faible, plus la réponse plastique du matériau sera importante).



### Problème 1.5.

Un test de fluage consiste à suivre en fonction du temps la déformation continue d'un matériau soumis à une contrainte constante à une température donnée. La figure suivante illustre le comportement typique des polymères au fluage.



Variation de la déformation en fluage d'un polymère permettant d'apprécier son caractère visco-élasto-plastique.

Dans un premier temps, dès l'application de la contrainte (à  $t_a$ ), le matériau se déforme instantanément de manière élastique ( $\epsilon_{el. inst.}$ , le caractère élastique est employé car, lors de la décharge (à  $t_r$ ), le matériau recouvre cette partie de la déformation). Dans un second temps, le matériau adopte un comportement viscoélastique se traduisant par une déformation dans le domaine élastique mais différée par rapport au moment de l'application de la contrainte. On parle également de déformation élastique retardée. Lorsque la charge appliquée est supérieure à la limite élastique du matériau, des phénomènes de viscoplasticité ont lieu. Ce fluage visqueux se manifeste alors en une déformation plastique du matériau.

Le fluage des polymères ressemble à celui des métaux à l'exception que, dans le cas des polymères, il se produit à des températures beaucoup plus basses. Cependant, on s'attend tout de même que le comportement des polymères soit plus influencé par le phénomène de fluage. En effet, le fluage des métaux s'accompagne de modifications microstructurales telles que la séparation des joints de grains, la formation de fissures, de vides et de cavités internes. Dans un polymère, la capacité des chaînes de polymère à se mouvoir et glisser les unes par rapport aux autres confère à ce genre de matériau un caractère viscoélastique très prononcé. Par conséquent, leurs propriétés mécaniques sont étroitement liées au facteur temps. Lorsque la contrainte est maintenue sur un laps de temps plus important, la réponse visqueuse du matériau est prépondérante, ses propriétés mécaniques (et notamment le module élastique) évoluent au cours du fluage. Pour de plus amples informations, se reporter à la section 16.7

du livre.



### Problème 1.6.

1. La polymérisation par addition est un procédé amenant des monomères bifonctionnels (possédant deux groupements chimiques pouvant réagir ensemble) à se lier les uns aux autres sous forme de chaînes. Ce type de polymérisation est traité en détail à la section 16.11 du livre de cours. La polymérisation par addition permet de synthétiser de nombreux copolymères et donc à partir de monomères de natures différentes.

Un peu plus de détails...



La polymérisation par addition est un procédé de synthèse de polymères par une réaction de croissance de chaîne entre monomères insaturés (possédant une double liaison  $C=C$ ). Un initiateur de la polymérisation permet d'ouvrir cette double liaison faisant apparaître un site actif qui va par la suite réagir avec un deuxième monomère, et ainsi de suite. Le centre actif peut être soit de type radicalaire, cationique, anionique ou encore de type organo-métallique. La fin de la croissance de chaîne se produit lors de la rencontre de deux chaînes en croissance.

L'affirmation est donc fausse. La réaction de polymérisation par addition se produit entre une chaîne en croissance et un monomère. La réaction peut se faire entre des monomères de natures chimiques différentes à partir du moment où ils sont insaturés.

2. L'un des intérêts de la copolymérisation est, en effet, de pouvoir jouer sur la structure chimique des monomères de sorte à contrôler les propriétés mécaniques du copolymère résultant. Ainsi, l'introduction de groupements phényles, de groupements aromatiques fortement conjugués (encombrement stérique important), de groupements polaires dans la chaîne de monomères provoque une réduction de la mobilité des chaînes. Ceci a pour effet d'augmenter la température de transition vitreuse et ainsi, à une même température, le polymère est plus rigide. L'introduction de chaînes latérales (espaceurs de chaîne) aura un effet contraire.

3. Certains facteurs pouvant influencer la cristallinité d'un polymère sont discutés à la section 15.10 du livre. Nous pouvons citer la stéréochimie (configuration moléculaire), l'isométrie géométrique (cis, trans), la structure chimique (présence ou non de groupements très volumineux, présence de ramifications ou de réticulations) du ou des monomères réagissant. L'énoncé est donc vrai puisqu'un polymère atactique cristallisera difficilement, contrairement



à un polymère isotactique ou syndiotactique.

4. L'ajout d'un plastifiant à un polymère va introduire des irrégularités dans l'organisation des chaînes, et notamment détruire des liaisons faibles (telles que des liaisons de Van Der Waals ou des liaisons hydrogène) qui maintenaient initialement les chaînes entre elles. Ceci a pour effet d'augmenter la flexibilité et la mobilité des chaînes contribuant à la diminution de la température de transition vitreuse du polymère. Il s'en suit une modification de ses propriétés mécaniques : diminution de la rigidité et de la dureté du matériau, augmentation de sa ténacité (pour de plus amples informations, se reporter à la section 16.12 du livre). Dans la mesure où améliorer la rigidité signifie «modifier pour obtenir des propriétés plus adaptées», cet énoncé est vrai.

5. La section 16.6 du livre nous apprend que les polymères thermoplastiques ramollissent jusqu'à l'écoulement lorsqu'ils sont chauffés. On injecte donc le polymère chaud dans un moule froid. Le polymère redevient solide en refroidissant et conserve la forme du moule. Il est important de noter que la mise en forme d'un thermoplastique est un processus réversible. À l'inverse, lors du traitement thermique à haute température du thermodurcissable, il se forme des liaisons covalentes entre les motifs de répétition des chaînes adjacentes du polymère conférant à ce matériau une dureté permanente. Ce processus est irréversible. Ainsi, la mise en forme d'un thermoplastique s'effectue en injectant le polymère froid dans un moule chaud. L'énoncé est donc faux.

6. Comme mentionné à la question précédente, la capacité des chaînes de polymère à se mouvoir et glisser les unes par rapport aux autres favorise un caractère viscoélastique. Leurs propriétés mécaniques sont donc dépendantes de la vitesse d'application de la contrainte. Pour une même charge, si celle-ci est appliquée plus rapidement, les chaînes n'ont pas le temps de s'aligner dans la direction de la contrainte et elles imposent donc une résistance à la traction plus importante. Lorsque la contrainte est maintenue sur un laps de temps plus important, le phénomène de fluage s'accompagne d'une réponse visqueuse prépondérante de la part du matériau. Comme on peut le voir sur la courbe de fluage de la question précédente, le module de relaxation (donné par le rapport entre la contrainte constante et la déformation résultante à l'instant  $t$ ) évolue avec la durée du maintien de la contrainte son état d'équilibre. L'affirmation est donc vraie (pour de plus amples informations, se reporter à la section 16.7 du livre).

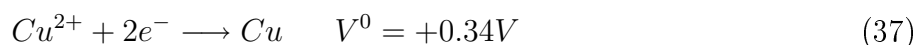


**Problème 1.7.**

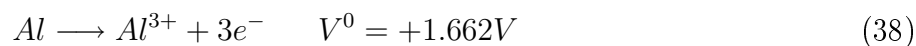
a)

La corrosion telle que décrite à la section 18.2 du livre consiste en une réaction chimique marquée par un transfert d'électrons. On distingue deux réactions.

La réaction de réduction se caractérise par l'acceptation d'électrons par une espèce chimique, par exemple :

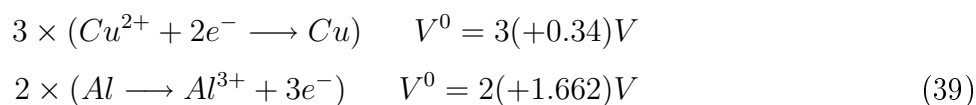


Habituellement, dans la réaction d'oxydation, les atomes métalliques libèrent des électrons, soit :



Notez qu'en inversant le sens de la réaction, le signe du potentiel a changé.

Les électrons libérés par oxydation et acceptés lors de la réduction doivent être du même nombre. Balançons le nombre d'électrons libres dans les deux équations.



L'addition de ces deux demi-réactions donne l'équation globale du système :



en additionnant les potentiels de l'équation 39 on trouve le potentiel de la réaction, soit :

$$\Delta V = 3(0.34) + 2(+1.662) \quad (41)$$

$$= 4.344V \quad (42)$$

ou à partir de l'équation 18.18 du livre :

$$\Delta V = 3V_{Cu}^0 - 2V_{Al}^0 \quad (43)$$

$$= 3(0.34) - 2(-1.662) \quad (44)$$

$$= 4.344V \quad (45)$$

Le potentiel de la réaction est positif, la réaction est spontanée.

Dans cette réaction, l'aluminium est oxydé. C'est l'aluminium qui est corrodé alors que le matériau est attaqué et que les ions passent en solution.

b)

Ce type de corrosion est appelé corrosion galvanique et se produit lorsque deux métaux de composition différente sont couplés électriquement pendant leur exposition à un électrolyte.

c)

On peut protéger le tuyau d'aluminium en appliquant une anode sacrificielle qui est plus oxydable que l'aluminium. Par exemple, on pourrait utiliser le magnésium.

Une seconde solution consisterait à appliquer un revêtement afin de créer une barrière physique entre la surface du matériau et la solution électrolytique.

d)

L'espace clos entre les deux tuyau favorise la présence d'un milieu humide. L'oxygène dissout qui peut circuler est susceptible d'accentuer le caractère corrosif de ce milieu. Afin d'empêcher la corrosion, il serait utile d'éliminer la circulation de l'air dans ce milieu, peut-être en appliquant une soudure pour fermer le milieu à l'oxygène.



### Problème 1.8.

La ténacité d'un matériau fait référence à l'énergie qu'il emmagasine lors de sa déformation élastique et plastique. Les propriétés mécaniques propres aux matériaux céramiques ont pour origine leur arrangement atomique et les types de liaison que l'on peut retrouver dans ces composés. Les liaisons atomiques présentes dans les céramiques sont hybrides c'est-à-dire soit ioniques soit covalentes, soit partiellement ioniques et partiellement covalentes. Dans ce type de liaison, les électrons sont localisés, chaque électron est associé à un ou deux atomes particuliers de sorte que lorsqu'une liaison est rompue, la probabilité pour qu'elle se reforme entre d'autres atomes est plus faible que pour une liaison métallique dans laquelle les électrons sont délocalisés.

La présence de ces liaisons iono-covalentes et la microstructure non compacte des céramiques ne favorisent pas la présence de dislocations (environ 10000 fois moins que dans les métaux) ni leur mouvement. Mais, l'arrangement atomique particulier des céramiques est aussi à l'origine de la faiblesse de leur ténacité. En effet, les dislocations de ce genre de matériaux présentent une configuration particulière en 2 demi-plans, ce qui permet aux charges de même signe de ne pas se retrouver face à face. De plus, contrairement aux métaux, les plans de glissement ne sont pas ceux possédant la plus grande densité atomique mais ceux qui séparent les ions de même signe des ions de signe opposé. Il existe donc très peu de systèmes de glissement indépendants dans lesquels ces dislocations peuvent se déplacer. Par conséquent, la ductilité du matériau s'en trouve réduite. ◀

### Problème 1.9.

Ce genre de questions n'admet pas de réponse type. L'étudiant est alors jugé sur sa capacité à respecter un cahier des charges et sur les justifications de ses choix de matériaux.

1. a) Pour une application en traction, on veut privilégier un matériau avec une limite ultime et une rigidité élevées. Un composite formé d'acier Inox 316L et de PMMA répondrait adéquatement à ces conditions.

b) Pour la fabrication d'un ressort soumis à un nombre élevé de cycles, nous devons choisir un matériau qui possède une bonne résistance à la fatigue. Nous allons donc choisir celui dont la limite d'endurance  $\sigma_E$  est la plus élevée.  $\sigma_E$  correspond à la valeur la plus élevée d'une contrainte variable qui n'entraîne pas de rupture après un nombre infini de cycles. Il s'agit donc du composé Co-Cr-Mo. Le polymère doit être choisi de sorte que, dans le domaine de contraintes dans lequel le ressort va être utilisé, il ne subisse qu'une déformation élastique. N'ayant pas accès à la déformation élastique des polymères, nous choisirons celui ayant le module élastique et l'allongement à la rupture les plus élevés. De plus, le polymère ne doit se dilater sous l'effet du réchauffement du ressort soumis aux cycles de contraintes sous peine de délamination. Il doit donc avoir un coefficient de dilatation thermique comparable à celui du métal choisi. Toutes ces considérations prises en compte, nous choisirons donc le PP comme recouvrement du métal.

c) Les roues de bicyclette doivent pouvoir agir en compression et en flexion. Idéalement, on choisira aussi un matériau résistant à la corrosion. On pourrait choisir par exemple l'acier Inox Cr-Ni avec le UHMWPE.

**2.**

Le seul paramètre donné concernant le comportement thermique des matériaux suggérés est le coefficient de dilatation thermique. Il est important que le polymère et le métal subissent sensiblement la même dilatation par augmentation de la température pour éviter tout problème de délamination ou de déchirure. Le choix effectué ne semble pas très pertinent, nous préférons le couple acier inox-316L-Caoutchouc R, dont la différence de coefficient de dilatation est la plus faible.

**3.**

Le lien fondamental qui existe entre la limite d'endurance et le module élastique est la loi de Hooke. Pour un matériau déformé jusqu'à sa limite dans le domaine élastique, on peut écrire :

$$\sigma_E = E\epsilon_{el} \quad (46)$$

Le nombre de dislocations et l'énergie nécessaire pour les déplacer (influencée par exemple par la taille des grains dans un métal) influenceront la limite élastique du matériau. Dans un polymère, le module élastique reflète la liberté des chaînes à se déplacer les unes par rapport aux autres. De manière générale, le module élastique est relié principalement aux types de liaisons atomiques et plus précisément à la forme du puit d'énergie potentielle en fonction de la distance interatomique.

**Problème 1.10.**

La conductivité (ou conductibilité) électrique  $\sigma$  est la propriété d'une substance qui conduit le courant électrique. Elle correspond à l'inverse de la résistivité  $\rho$ , soit :

$$\sigma = \frac{1}{\rho} (\Omega \times m)^{-1} = \frac{S}{m} \quad (47)$$

qui indique dans quelle mesure un matériau est conducteur ou non d'un courant électrique. La conductibilité thermique correspond quant à elle à la propriété qui caractérise l'aptitude d'un matériau à transmettre la chaleur. Cette transmission de chaleur peut s'effectuer selon deux mécanismes. Le premier implique un transfert d'énergie thermique par des ondes de vibration (ou phonons), le second correspond au transfert d'énergie cinétique des électrons car, lors de leurs déplacements, de nombreuses collisions se produisent au cours desquelles ont

lieu des transferts d'énergie de vibration. Il existe donc bel et bien un lien entre la conductivité électrique  $\sigma$  et la conductivité thermique  $k$  dans la mesure où plus un matériau aura des électrons libres de se déplacer (cas d'un bon conducteur électrique), plus sa conductivité thermique sera importante. Cette relation est mise en équation par la *loi de Wiedemann-Franz* :

$$L = \frac{k}{\sigma \times T} \quad (48)$$

$$k = k_p + k_e \quad (49)$$

T représentant la température absolue, L une constante,  $k_p$  représentant la conductibilité due aux phonons et  $k_e$  celle des électrons.

En vertu de ce qui vient d'être dit, les matériaux qui sont bon conducteurs électriques sont, à priori, également de bons conducteurs thermiques.

Pour de plus amples informations sur les conductivités électriques et thermiques, se rapporter respectivement aux chapitres 19 et 20 du livre.



### Problème 1.11.

La soudabilité d'un acier désigne la capacité de réunir deux éléments de ce matériau tout en assurant la continuité métallique. Ces zones de jointure ne doivent pas affecter les propriétés locales ou globales du matériau. La soudabilité est déterminée par le pourcentage massique en carbone équivalent calculée grâce à l'expression suivante :

$$C_{eq} = C + \frac{C_{Mn}}{6} + \frac{C_{Cr} + C_{Mo} + C_V}{5} + \frac{C_{Ni} + C_{Cu}}{15} \%m \quad (50)$$

Plus le pourcentage de carbone équivalent  $C_{eq}$  d'un acier est élevé, plus la soudabilité de ce matériau est faible. Les éléments métalliques (Mn, Cr, Mo,...) sont autant d'impuretés qui jouent le rôle de désoxydant. Un acier soudable est qualifié d'"acier calmé".



### Problème 1.12.

La trempabilité d'un acier est sa capacité à se transformer en martensite dans des conditions de refroidissement données. Cette caractéristique est évaluée par un essai Jominy, technique

consistant à exposer l'extrémité d'une éprouvette austénisée à un jet d'eau et à mesurer la variation de la dureté de ce matériau en fonction de la distance à l'extrémité. Ce changement d'indice de dureté est due au gradient thermique apparaissant dans la pièce. ◀