

Cours Matériaux pour l'Ingénieur : Examen du 27 mai 2005

Durée : 3 heures

Tous documents autorisés, calculatrices autorisées.

Il est vivement conseillé de rédiger avec soin les réponses et de vérifier les valeurs numériques et les unités.

Les deux exercices sont indépendants.

Exercice 1 : Matériaux pour bouteilles fermées par encliquetage

On cherche à réaliser une bouteille fermant par une capsule encliquetable, avec pour objectif la durée de vie la plus longue possible. On considère que la charnière peut contenir une fissure d'une longueur inférieure ou égale à la longueur décelable par contrôle non destructif. On notera cette longueur maximale « a ».

- 1.1. Rappeler la définition de la ténacité. Est-ce une propriété intrinsèque au matériau ?
- 1.2. Les performances de la charnière sont ici limitées par la déformation à rupture. En supposant que le matériau reste élastique, exprimer cette déformation en fonction de la contrainte « à l'infini », puis du facteur d'intensité des contraintes, K , et de la longueur de fissure, a .
- 1.3. En déduire l'indice de performance des matériaux pour cette propriété.
- 1.4. En vous aidant d'un des diagrammes fournis en fin d'énoncé, déterminer quels sont les meilleurs matériaux.
- 1.5. Etude critique des solutions retenues : comparer les solutions à ce que vous connaissez du marché. La performance considérée dans cet exercice est-elle la seule « bonne » raison de choisir ces familles de matériaux ?
- 1.6. En vous appuyant sur les valeurs typiques des modules d'Young relevés sur les diagrammes, donner l'origine thermodynamique et physique de l'élasticité dans les matériaux retenus. Ce sont généralement des matériaux biphasés. Indiquer la nature et (le cas échéant) l'état de chaque phase pouvant donner un module de cet ordre de grandeur.
- 1.7. Citer un moyen expérimental de caractérisation du module d'élasticité de tels matériaux.

Exercice 2 : Matériaux pour anodes légères de tubes à rayons X (d'après la thèse de G. Lemarchand, soutenue à l'ENSMP en 2003)

Les anodes tournantes pour tubes à rayons X utilisées en imagerie hospitalière (scannographie, angiographie...) sont constituées d'un disque de graphite sur lequel est déposée une couche de tungstène. Sous le bombardement d'un faisceau électronique, le tungstène émet les photons X nécessaires à l'imagerie. Dans de tels dispositifs, 99% de la puissance est dissipée en chaleur, ce qui fait que la température de fonctionnement de ces électrodes est très élevée. L'exercice propose d'étudier quelques-unes des propriétés des deux matériaux.

2.1. Première partie : le graphite

2.1.1. La structure du graphite est représentée sur la Figure 1. Quelles sont les liaisons mises en œuvre dans le graphite ? Quels comportements mécaniques peut-on principalement y associer ?

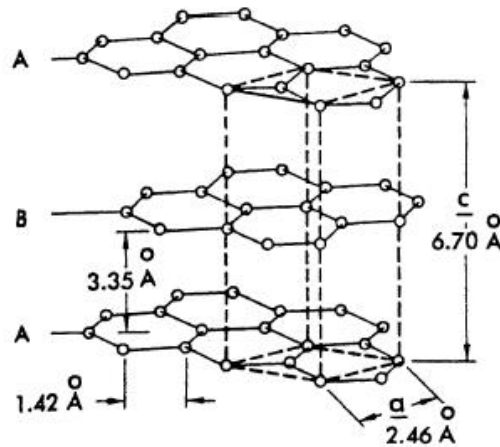


Figure 1 : Structure cristalline du graphite

2.1.2. La Figure 2 montre une courbe, constituée de charges-décharges successives, décrivant le comportement du graphite en compression. En sachant que les échelles sont linéaires et en vous appuyant sur le module élastique apparent (entre les pointes des boucles de charge-décharge), comment qualifieriez-vous le comportement à rupture de ce matériau ?

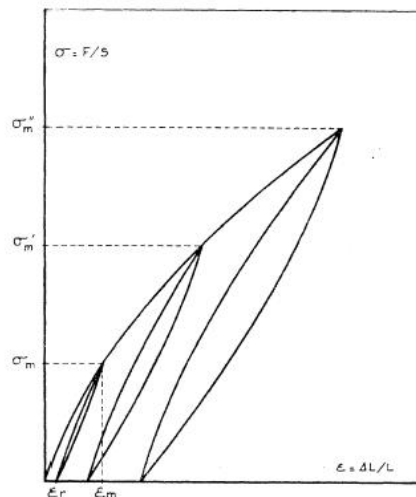


Figure 2 : Comportement du graphite en compression (J. Rappeneau et coll., *Carbon* vol. 3 (1966) pp. 407-420).

2.1.3. Le graphite de l'anode, sous le bombardement électronique, peut voir sa température s'élever jusqu'aux environs de 1500°C. En considérant la structure du graphite, quel mode de déformation vous paraît possible et à quelles liaisons fait-il appel ?

2.1.4. La vitesse de déformation du graphite en fluage stationnaire est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{\epsilon}_s = B\sigma \quad \text{où} \quad B = B_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad \text{avec } B_0 = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ MPa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ et } Q = 167 \text{ kJ/mol.}$$

Rappeler ce qu'est le phénomène de fluage. A quel phénomène physique l'énergie d'activation Q se rapporte-t-elle ?

Calculer la vitesse de fluage du graphite dans les conditions suivantes, représentatives des conditions en service : $T = 1500^\circ\text{C}$, $\sigma = 40 \text{ MPa}$.

Seconde partie : Le tungstène

Le tungstène est le métal le plus réfractaire (température de fusion 3410°C) ; sa tension de vapeur extrêmement basse autorise son utilisation sous vide à haute température. Il cristallise dans la structure cubique centrée, avec un paramètre de maille de 0.316 nm . Sa masse molaire est de $184 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

2.2.1. Calculer la densité du tungstène.

2.2.2. Le module d'Young du tungstène évolue selon la température comme indiqué sur la Figure 3. Rappeler l'origine de l'élasticité du tungstène et interpréter la diminution du module lorsque la température augmente. Du point de vue du module, comment le tungstène se classe-t-il parmi les matériaux ? et parmi les métaux ?

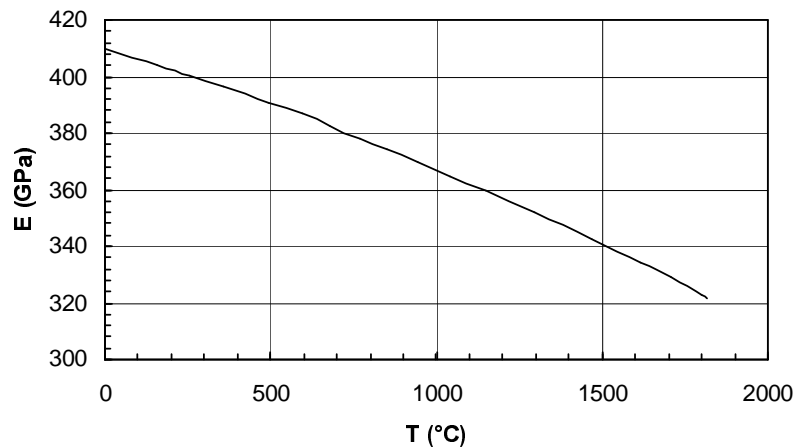


Figure 3 : Module d'Young du tungstène en fonction de la température (*Metals Handbook vol. 2 - Properties and Selection : Non-Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, 10^e édition, 1990)

2.2.3. La microstructure du tungstène est constituée de grains (Figure 4) et de porosités liées au procédé de dépôt par projection thermique (plasma) sur l'anode en graphite. Donner une estimation de la taille de grains du tungstène et de la fraction volumique de porosité, sachant que la densité du dépôt est de $17,7 \text{ g/cm}^3$.

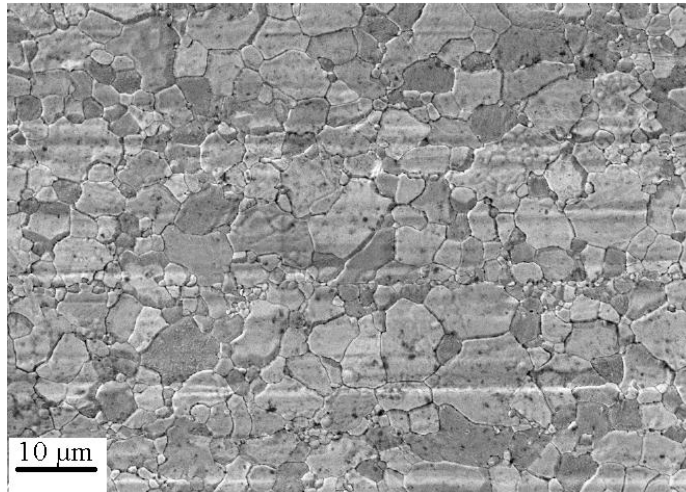


Figure 4 : Microstructure du dépôt de tungstène (microscopie électronique à balayage) (G. Lemarchand, 2003)

2.2.4. Le comportement en traction du tungstène est estimé à partir d'essais de flexion trois points à différentes températures. La Figure 5 représente la contrainte de traction (sur la face en tension de l'éprouvette de flexion) en fonction de la déformation en traction de cette même face.

- La pente à l'origine est-elle le module d'Young ? Quelles difficultés expérimentales imaginez-vous pour de telles mesures ?
- Est-il raisonnable de dépouiller de tels essais en contrainte et déformation nominale ?
- A partir de quelle température le comportement mécanique du tungstène est-il significativement sensible à la vitesse ? Quel est alors le mécanisme de déformation ? Quel est le principal mécanisme de déformation au-dessous de cette température ?

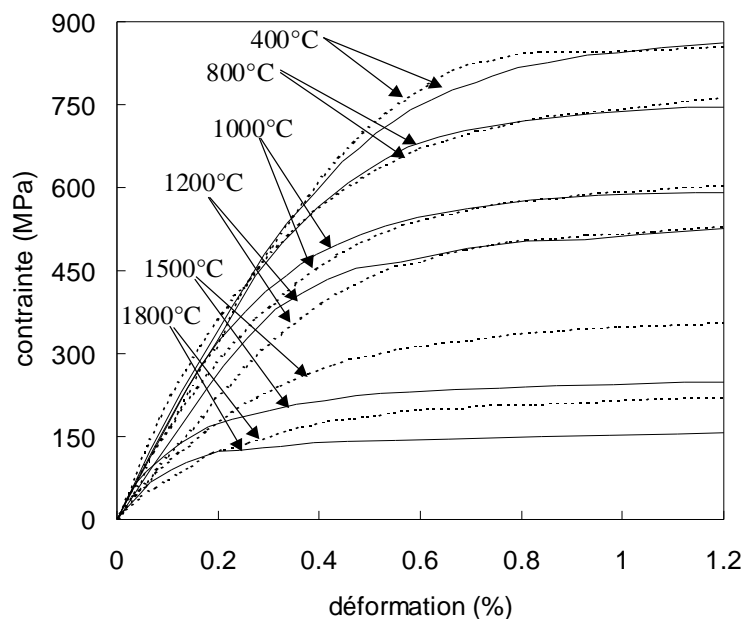


Figure 5 : Courbes de traction du tungstène à différentes températures pour une vitesse de déformation initiale de $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ (lignes pointillées) et $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (lignes continues) (G. Lemarchand, 2003)

2.2.5. La Figure 6 représente la carte des mécanismes de déformation du tungstène prise dans la bibliographie, avec une taille de grains légèrement inférieure. On prendra comme module de cisaillement μ le module d'Young multiplié par $3/8$, ce qui est une bonne estimation pour la plupart des matériaux métalliques. La contrainte de cisaillement σ_s est calculée en multipliant la contrainte de traction par $\sqrt{3}$.

- Dans quel domaine se trouve-t-on à 1500°C sous 40 MPa ?

- Comparer la vitesse de déformation du tungstène dans ces conditions à celle du graphite.

2.2.6. Au vu des résultats des deux parties, que peut-on dire du comportement mécanique de l'ensemble graphite + tungstène ?

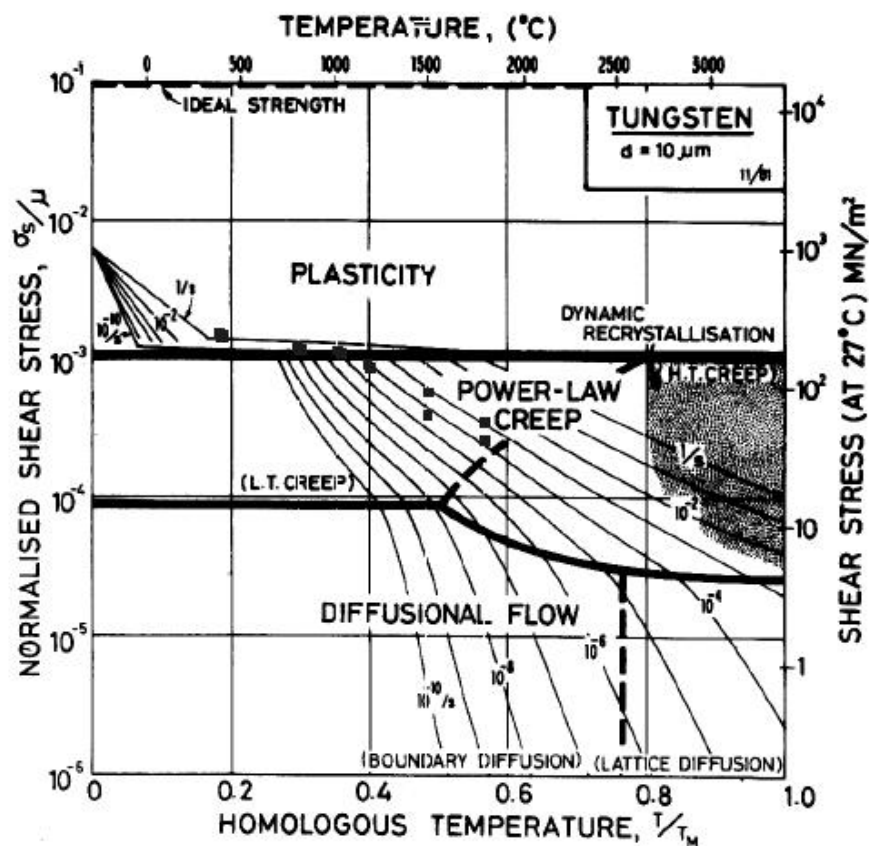


Figure 6 : Carte des mécanismes de déformation du tungstène : lignes d'iso-vitesse de déformation dans un diagramme contrainte de cisaillement (normalisée par le module de cisaillement) en fonction de la température (T_M = température de fusion). D'après Frost et Ashby, 1982. Les carrés noirs représentent quelques points expérimentaux.

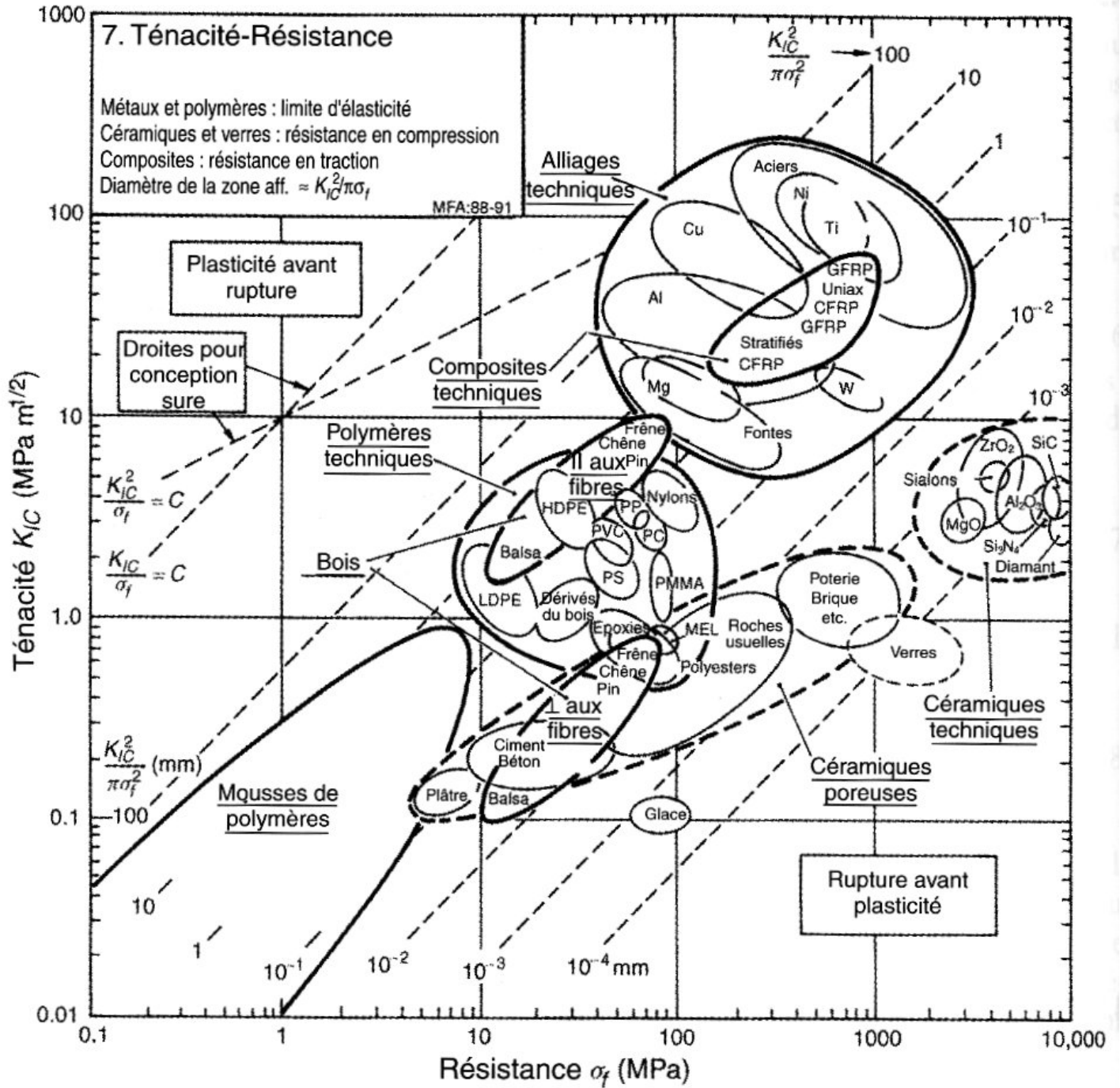


Diagramme ténacité-résistance mécanique (MFA: 88-91), *Choix des matériaux en conception mécanique*, Dunod, Paris, 2000, p. 56).

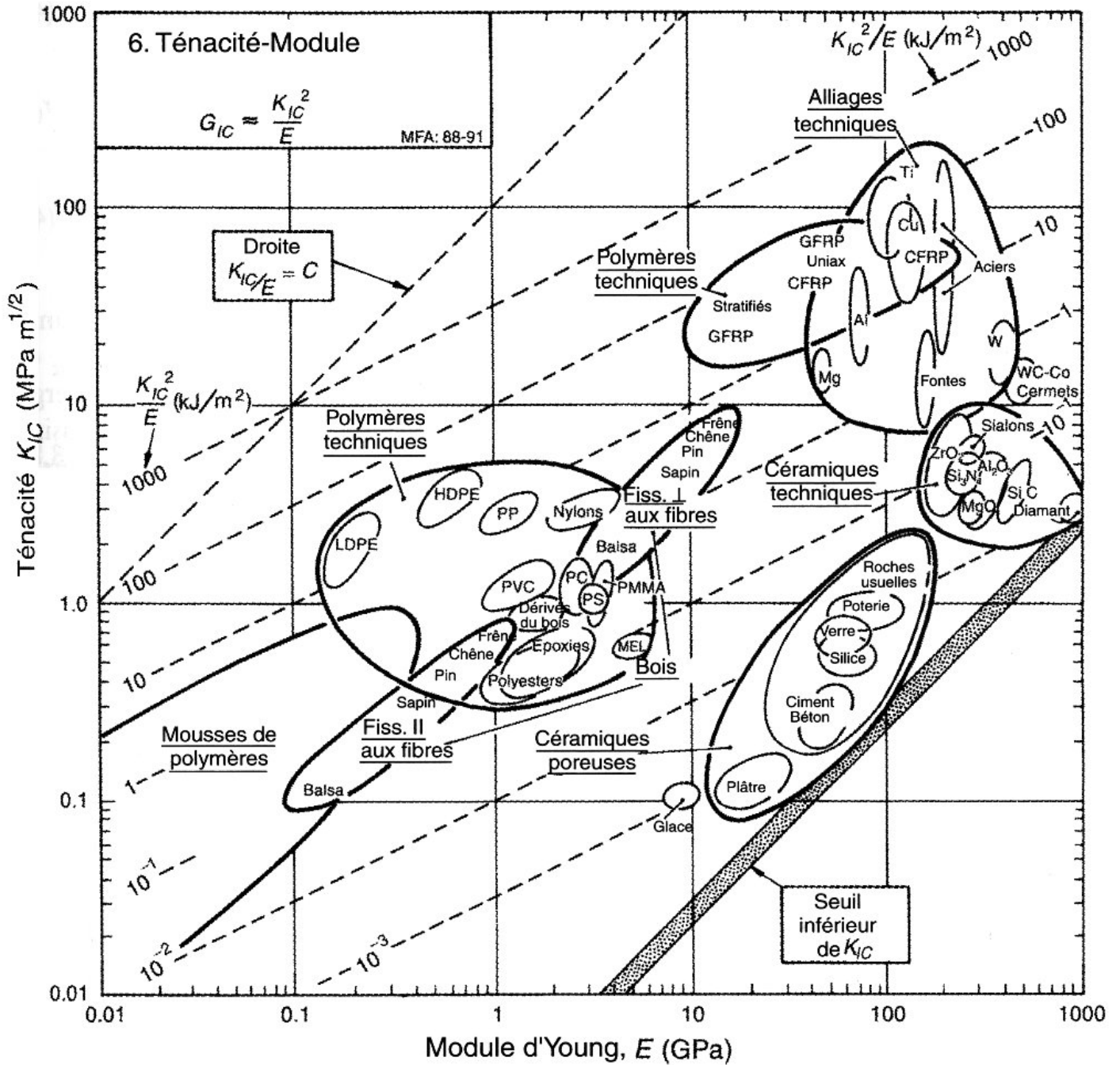


Diagramme ténacité-module d'Young (M.F. Ashby, *Choix des matériaux en conception mécanique*, Dunod, Paris, 2000, p. 53).

Éléments de réponse à l'examen de Matériaux pour l'ingénieur du 27 mai 2005

Exercice 1 : Matériaux pour bouteilles fermées par encliquetage

1.1. La ténacité est la résistance à la propagation de fissure brutale.

Ce n'est pas une grandeur intrinsèque car elle dépend de l'état de sollicitation (par exemple, une formule du poly donne deux valeurs différentes selon qu'on est en contraintes planes ou en déformations planes).

La ténacité dépend notamment de la géométrie de l'échantillon testé, en particulier pour les matériaux fragiles (la probabilité de trouver un défaut d'une taille donnée augmente avec la taille des échantillons testés). (mais on n'en demande pas tant, ici)

1.2. On se place dans le cadre de la mécanique linéaire de la rupture, ici avec les notations du chapitre 22.

Déformation et contrainte sont reliées, en élasticité, par la loi de Hooke : $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$

On peut ensuite calculer le facteur d'intensité des contraintes, K, par la formule suivante (toujours avec les notations du chapitre 22) : $K = Y \sigma \sqrt{\pi a}$, avec a la longueur de fissure.

Il vient alors, en écrivant qu'à rupture, le facteur d'intensité des contraintes atteint la ténacité du matériau :

$\varepsilon = \frac{1}{Y\sqrt{\pi a}} \frac{K_{Ic}}{E}$ avec E le module d'Young, Y un facteur géométrique et K_{Ic} la ténacité du matériau.

1.3. Indice de performance : on ne retient que ce qui vient du matériau, tous les autres termes étant connus : $IP = \frac{K_{Ic}}{E}$

1.4. On utilise le diagramme ténacité-module d'Young et on en déduit que les meilleurs matériaux sont les polymères de type polyéthylène (moyenne et basse densité), polypropylène...

1.5. Ce sont des matériaux légers, peu onéreux, faciles à mettre en œuvre... cf. le flaconnage (shampooings, etc.). C'est bien ce qu'on trouve sur le marché.

N.B. Noter que les polymères sont les grands vainqueurs malgré leur faible ténacité car ici, c'est la déformation à rupture qui est importante, et non la contrainte à rupture. Les polymères possédant une grande déformation élastique sont donc les meilleurs matériaux, pourvu que leur ténacité soit raisonnable.

1.6. Le module d'Young de ces matériaux est de l'ordre de 1 GPa. Le polyéthylène et le polypropylène sont des polymères semi-cristallins dont la phase amorphe est caoutchoutique à la température ambiante (l'élasticité de cette phase amorphe est donc entropique).

On est donc en présence d'un « caoutchouc », renforcé par des charges (= les cristaux). Contribuent également à la résistance mécanique de l'ensemble les liaisons entre phases cristalline et amorphe.

Le résultat global est un module d'Young de l'ordre de 1 GPa. Cet ordre de grandeur est également celui du module d'un matériau amorphe vitreux.

1.7. D'après le TD 14 on pense au pendule de torsion, qui indique en plus le caractère plus ou moins dissipatif des mécanismes de déformation en jeu.

Le module d'Young peut également être déterminé en traction (pente à l'origine de la courbe contrainte - déformation). Toutefois il faut se rappeler que l'élasticité n'est purement enthalpique que dans les conditions suivantes :

- polymères purement vitreux (élastiques fragiles)
- dans les autres cas : aux très faibles déformations seulement ($< 1\%$), d'où nécessité d'une extensométrie très délicate.

Exercice 2 : Matériaux pour anodes légères de tubes à rayons X

2.1. Première partie : le graphite

2.1.1. La structure du graphite est évoquée dans les chapitres 1, (surtout) 8 et 19. Elle comporte des liaisons covalentes (dans les plans des feuillets) et des liaisons de Van der Waals (entre les feuillets). Pas de liaison métallique, on n'attend donc pas de plasticité marquée. On attend donc un comportement élastique, associé à une certaine fragilité car les liaisons de Van der Waals sont faibles (clivage entre les feuillets).

2.1.2. Le module apparent décroît tout au long de l'essai. D'après le chapitre 22 on classe ce comportement comme quasi-fragile (p. 3 du ch. 22) : l'écart à la linéarité de la courbe vient d'un endommagement progressif du matériau.

2.1.3. Etant donnée la structure du graphite, on n'attend pas de mouvement intense de dislocations. La déformation ne peut donc se produire que grâce aux liaisons les plus faibles, ce qui conduit à un cisaillement entre les feuillets de graphite, faisant appel aux liaisons de Van der Waals.

2.1.4. Le fluage est la manifestation du comportement viscoplastique du matériau : écoulement irréversible et dépendant du temps, sous une contrainte donnée. Il fait généralement appel à des phénomènes de diffusion, ce qui se traduit dans l'énergie d'activation de la déformation. En utilisant l'équation on trouve une vitesse de déformation de $1,05 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

Seconde partie : Le tungstène

2.2.1. La structure cubique centrée du tungstène comporte 2 atomes par maille conventionnelle. On calcule d'une part le volume d'une maille, puis la masse d'une maille (2 atomes, soit deux fois la masse molaire divisée par le nombre d'Avogadro) et on calcule la masse volumique : 19300 kg.m^{-3} , d'où une densité de 19,3.

2.2.2. L'élasticité du tungstène est d'origine enthalpique, elle est donc liée à un minimum de potentiel par rapport à la distance entre atomes. L'agitation thermique fournit un peu d'énergie pour d'une part écarter (en moyenne) les atomes (dilatation thermique) et aussi pour quitter plus facilement le minimum de potentiel, ce qui abaisse le module d'Young. Si on regarde le diagramme ténacité-module d'Young, on voit que le tungstène est un métal très rigide, cf. sa température de fusion très élevée (le puits de potentiel est profond !). Il est cependant moins rigide que de nombreuses céramiques iono-covalentes.

2.2.3. On estime la taille de grains de l'ordre de 5 μm en moyenne sur la photo jointe (mettons, entre quelques microns et 10 microns). La fraction volumique de porosités est donnée par la conservation de la masse, en calculant la densité du matériau, en faisant une loi des mélanges entre le tungstène (densité 19,3 comme calculé dans la question 2.2.1) et les porosités (densité zéro). On trouve alors une fraction volumique de porosités de 8,6%.

2.2.4.

La pente à l'origine n'est pas le module d'Young car on trouve typiquement 180 GPa au lieu du double. Problème d'extensométrie à ces hautes températures ? Mesure de la température ? Effet des porosités, dont la répartition n'est sans doute pas aléatoire ?

N.B. Comme ce n'est sans doute pas un problème de mesure de charge on peut continuer à raisonner sur la sensibilité à la vitesse, au moins en tendance globale.

On peut dépouiller l'essai en contrainte nominale : les déformations sont faibles (erreur relative de l'ordre du %, bien inférieure à l'incertitude de mesure au vu de la question précédente).

La sensibilité à la vitesse de déformation est surtout importante à partir de 1200°C : il s'agit du fluage. Pour des températures inférieures, la déformation procède par plasticité : glissement des dislocations, grâce à la liaison métallique.

2.2.5. 40 MPa en traction, pour un module d'Young de 340 GPa (figure donnée dans l'exercice, plus haut), on trouve $\sigma_s/\mu = 5 \cdot 10^{-4}$. On est dans le domaine du fluage : fort couplage entre contrainte et vitesse de déformation. La vitesse de déformation vaut environ 10^{-4} s^{-1} , très supérieure à celle du graphite.

2.2.6. Le graphite se déforme 1000 fois moins vite que le tungstène pour les conditions de service. On négligera donc la déformation du graphite devant celle du tungstène.

N.B. Il ne faut cependant pas oublier que les coefficients de dilatation thermique ne sont pas les mêmes et que de fortes contraintes peuvent apparaître lors des cycles d'utilisation (allumage/extinction de l'appareil).