

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE NOVEMBRE 2021

Toute documentation permise
Calculatrices : modèles autorisés seulement
Durée de l'examen : 3 heures

14-MT-A6 – MATÉRIAUX D'INGÉNIEURIE

Question N°1 Propriétés mécaniques en traction (22 points)

La figure 1 montre un graphique de la force (F) en fonction de l'allongement de la section réduite (Δl) obtenu lors d'un essai de traction sur une éprouvette cylindrique dont la géométrie initiale (avant l'essai) est précisée par un schéma en bas à droite. Le coefficient de Poisson du matériau éprouvé est 0,3. En vous servant de ces informations, répondez aux questions a) à f).

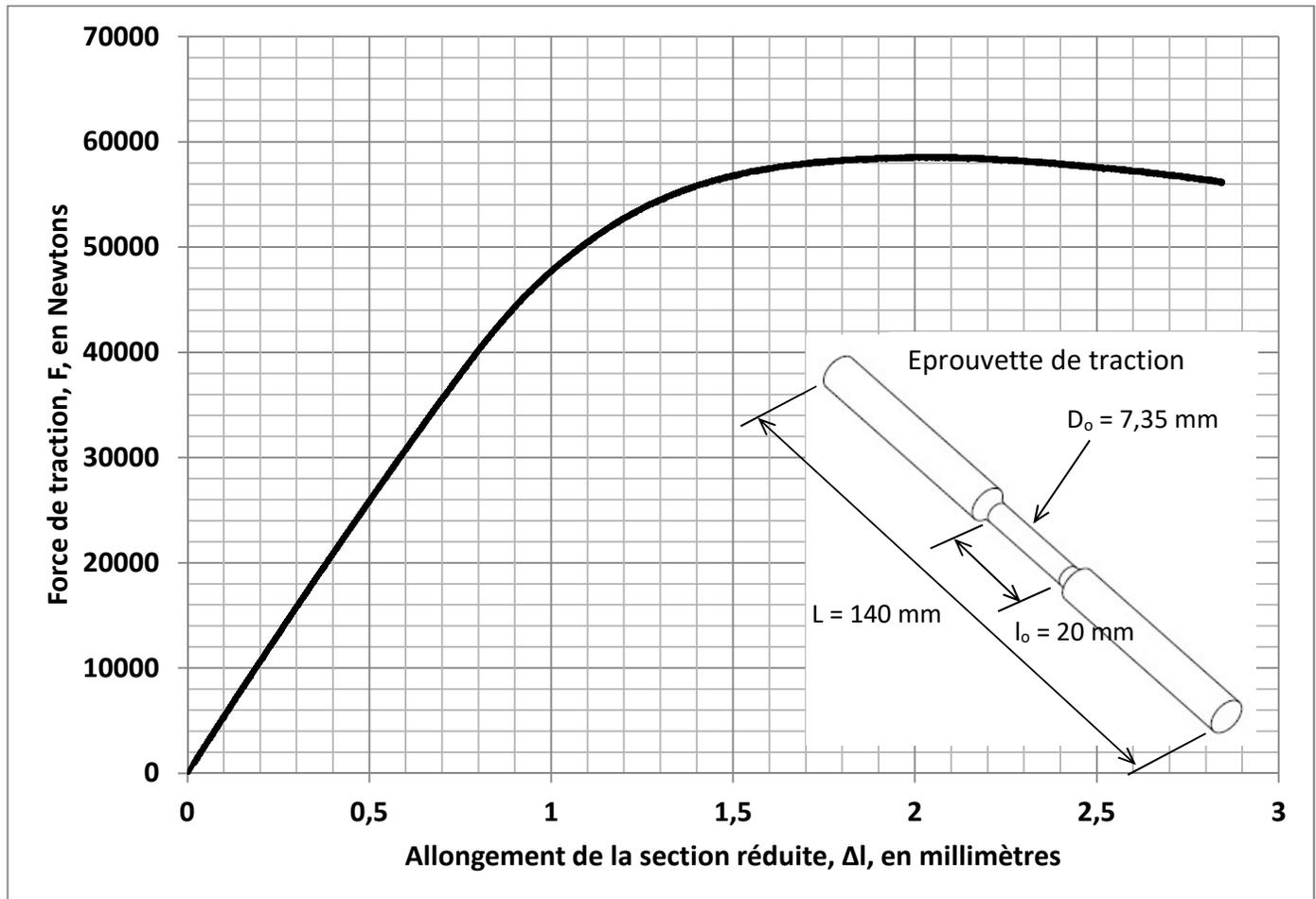


Figure 1 : Courbe force vs allongement lors d'un essai de traction

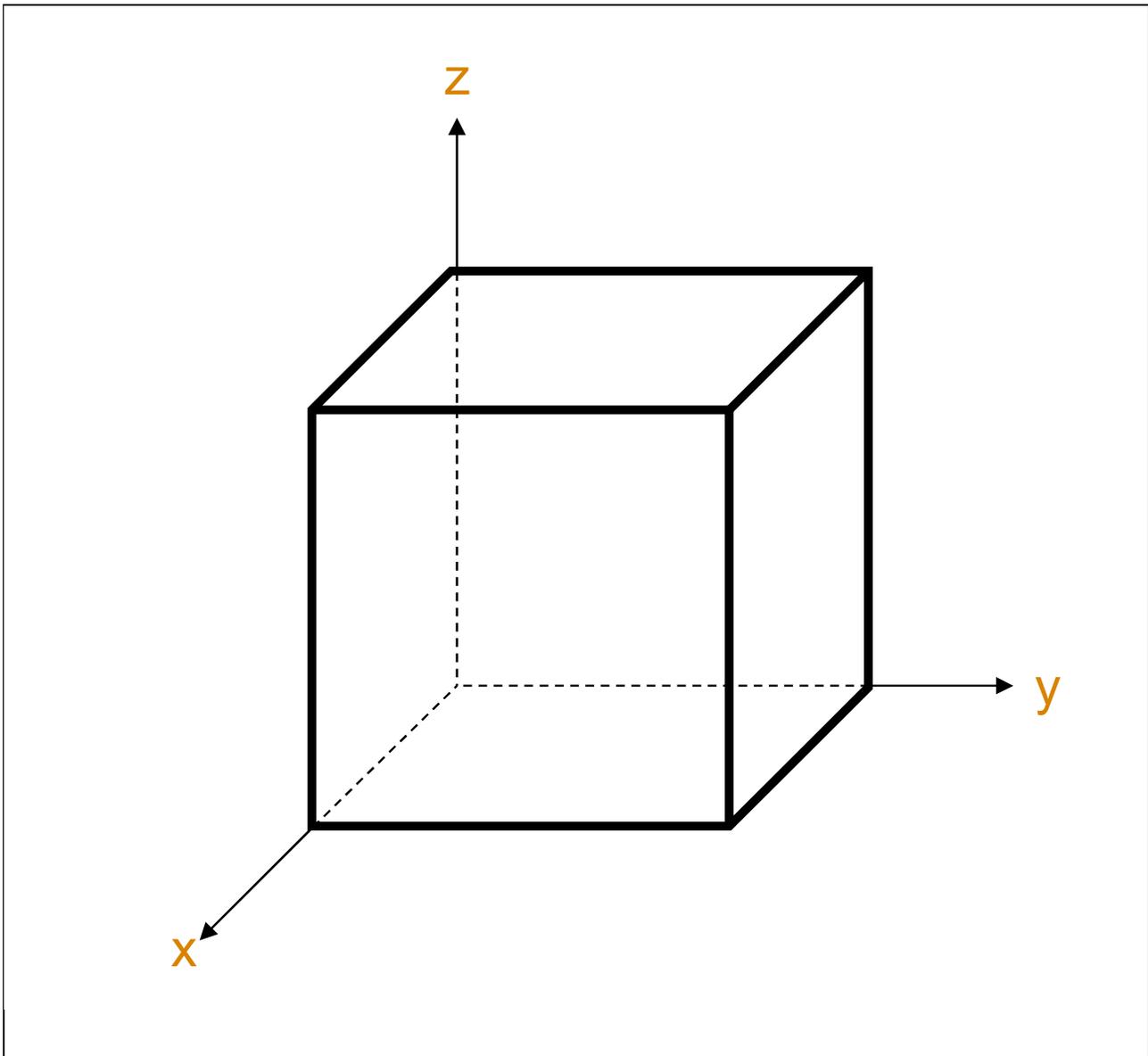
- Quel est le module de Coulomb, G , (en GPa) de ce matériau ? (4 points)
- Quel est le diamètre (en mm) de l'éprouvette lorsqu'une force de 30 kN est appliquée ? (4 points)
- Quelle est la limite conventionnelle d'élasticité $Re_{0,2}$ de ce matériau (en MPa) ? (4 points)
- Quelle est la résistance mécanique R_m de ce matériau (en MPa) ? (2 points)
- Quelle est l'énergie élastique relâchée (en joules) lorsque l'éprouvette se rompt ? Faites l'hypothèse que seule la section réduite se déforme. (4 points)
- Une fois l'essai de traction terminé, vous replacez les deux demi-éprouvettes brisées bout à bout (de façon parfaite) et vous mesurez la longueur totale (L) de cette éprouvette rompue. En faisant

l'hypothèse que seule la section réduite (l_0) s'est déformée durant l'essai, quelle est la longueur totale finale (L_f) mesurée (en mm) ? (4 points)

Question N°2 Structure cristalline des métaux (25 points)

Le chrome a un réseau de Bravais cubique centré et son rayon atomique mesure 0,14 nm. Dans cette structure, les atomes sont tangents selon les directions $\langle 111 \rangle$.

- a) Donnez deux exemples de système de glissement favorisés dans cette structure. Justifiez vos choix. (7 points)
- b) Sur le canevas ci-dessous, tracez un plan de la famille $\{110\}$ en indiquant clairement les indices du plan tracé **par rapport à l'origine imposée sur le dessin**. Ajoutez à votre dessin toutes les directions indépendantes de la famille $\langle 100 \rangle$ contenues dans ce plan et donnez leurs indices en les pointant spécifiquement. Pour l'indexation des directions, il est permis de faire une translation de l'origine. (4 points)



- c) Quelle est la densité linéique des atomes de chrome selon les directions $\langle 111 \rangle$? (4 points)
- d) Quelle est la longueur du paramètre de maille « a » du chrome. (2 points)
- e) Quelle est la compacité du chrome ? Justifiez votre réponse par des calculs. (4 points)
- f) Quel est le nom du défaut cristallin qui lorsque mis en mouvement crée la déformation plastique ? (2 points)
- g) Est-ce que tous les matériaux cristallins (déformés ou non) contiennent ce type de défaut ? Justifiez votre réponse. (2 points)

Question N°3 Traitement thermique des aciers (16 points)

À la figure 2 sont présentées deux courbes de trempabilité obtenues à la suite d'essais Jominy réalisés sur deux aciers dont les compositions chimiques sont différentes. En utilisant ces résultats, répondez aux questions a), b), c), d) et e).

- a) Quelle est la variable représentée sur l'abscisse du graphique de la Figure 2 ? Nommez la variable et donnez ses unités. (2 points)
- b) Quel est l'acier le plus trempant I ou II ? Justifiez votre réponse. (2 points)
- c) L'acier II a une dureté initiale plus élevée que l'acier I. Qu'est-ce qui pourrait expliquer cette différence (considérez que les deux essais Jominy sont réussis) ? (2 points)
- d) Décrivez la microstructure de l'acier II lorsqu'il a une dureté de 25 HRC. (2 points)
- e) Décrivez la microstructure de l'acier I lorsqu'il a une dureté de 45 HRC. (2 points)
- f) Pourquoi faut-il tremper la pièce en moins de 5 secondes lors de l'essai Jominy ? (2 points)
- g) Lorsque l'on utilise les résultats de l'essai Jominy pour choisir un acier, pourquoi est-ce nécessaire de faire l'hypothèse que les aciers ont tous la même conductivité thermique ? (2 points)
- h) Juste avant la trempe Jominy, une mise en solution à haute température est effectuée sur l'éprouvette. Quel est l'objectif de cette mise en solution ? (2 points)

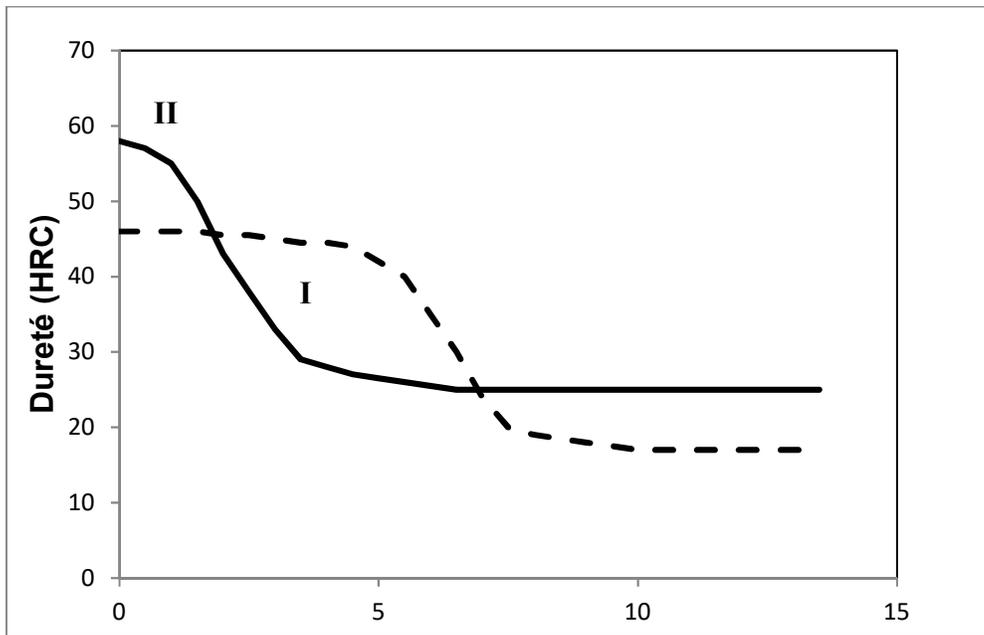


Figure 2 : Courbe de trempabilité Jominy de deux aciers

Question N°4 Transformations de phases (18 points)

Trois alliages binaires d'aluminium et de cuivre : A, B et C dont les teneurs en cuivre sont respectivement de 4 %, 33,3 % et 45% massique, sont refroidis très lentement à partir de l'état liquide jusqu'à la température ambiante. Vous disposez d'une portion du diagramme d'équilibre Al-Cu (figure 3) ainsi que les schémas de différentes microstructures à la figure 4.

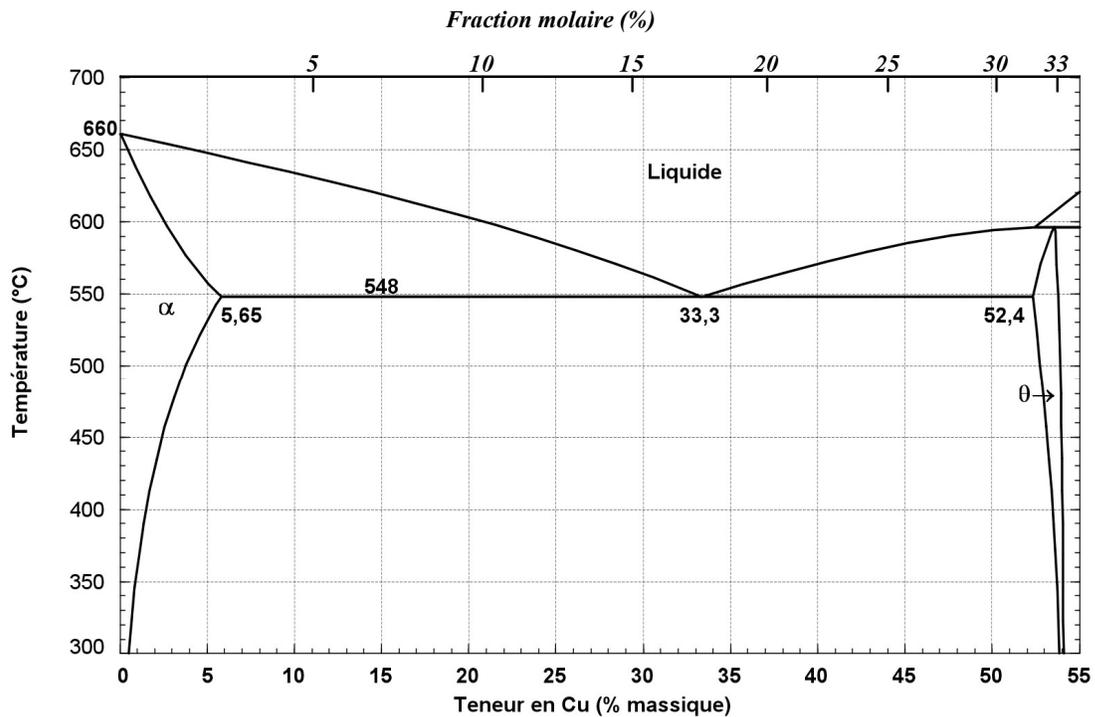


Figure 3 : Portion du diagramme d'équilibre Al-Cu

Microstructures :

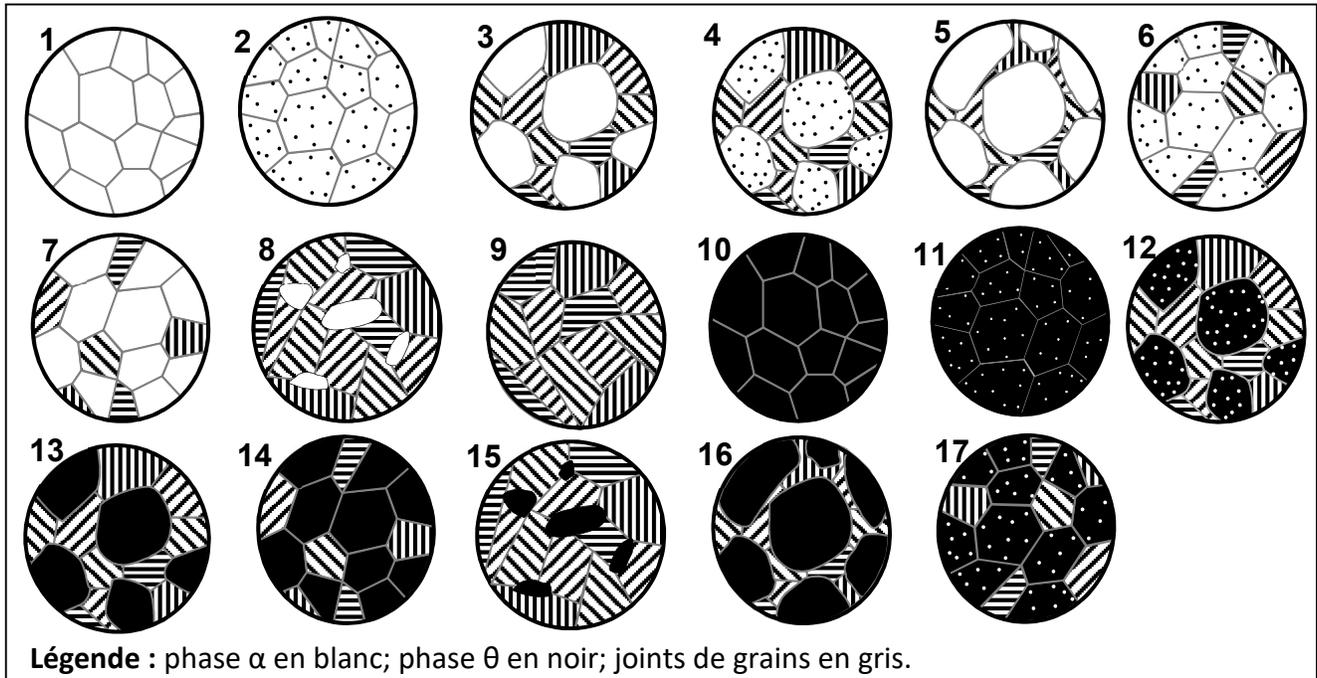


Figure 4 : Schémas de microstructures à l'équilibre à 300 °C

- a) Pour chaque alliage, expliquez la séquence de formation des phases et des constituants à partir de l'état liquide jusqu'à 300 °C. Associez votre état final (à 300 °C) à l'une des microstructures schématisées à la figure 4. (9 points)
- b) La phase intermédiaire θ est-elle stœchiométrique ? Justifiez votre réponse. (2 points)

L'alliage d'aluminium ayant une teneur de 4 % massique en cuivre, se prête bien aux traitements thermiques. Vous disposez du diagramme d'équilibre Al-Cu à la figure 3 et des courbes donnant la variation des propriétés mécaniques en fonction du temps à différentes températures de vieillissement à la figure 5.

- c) Comment appelle-t-on le traitement thermique qui s'exécute selon les 3 étapes suivantes ? (1 point)

étape 1	Chauffage pendant 1 heure à une température de 550 °C
étape 2	Trempe à l'eau (20 °C)
étape 3	Vieillissement à une température 190 °C pendant 10 heures

- d) Quelles sont les propriétés mécaniques ($R_{e0,2}$, R_m et A) de l'alliage contenant 4 % massique de cuivre (alliage 2014) à la fin de ce traitement ? (6 points)

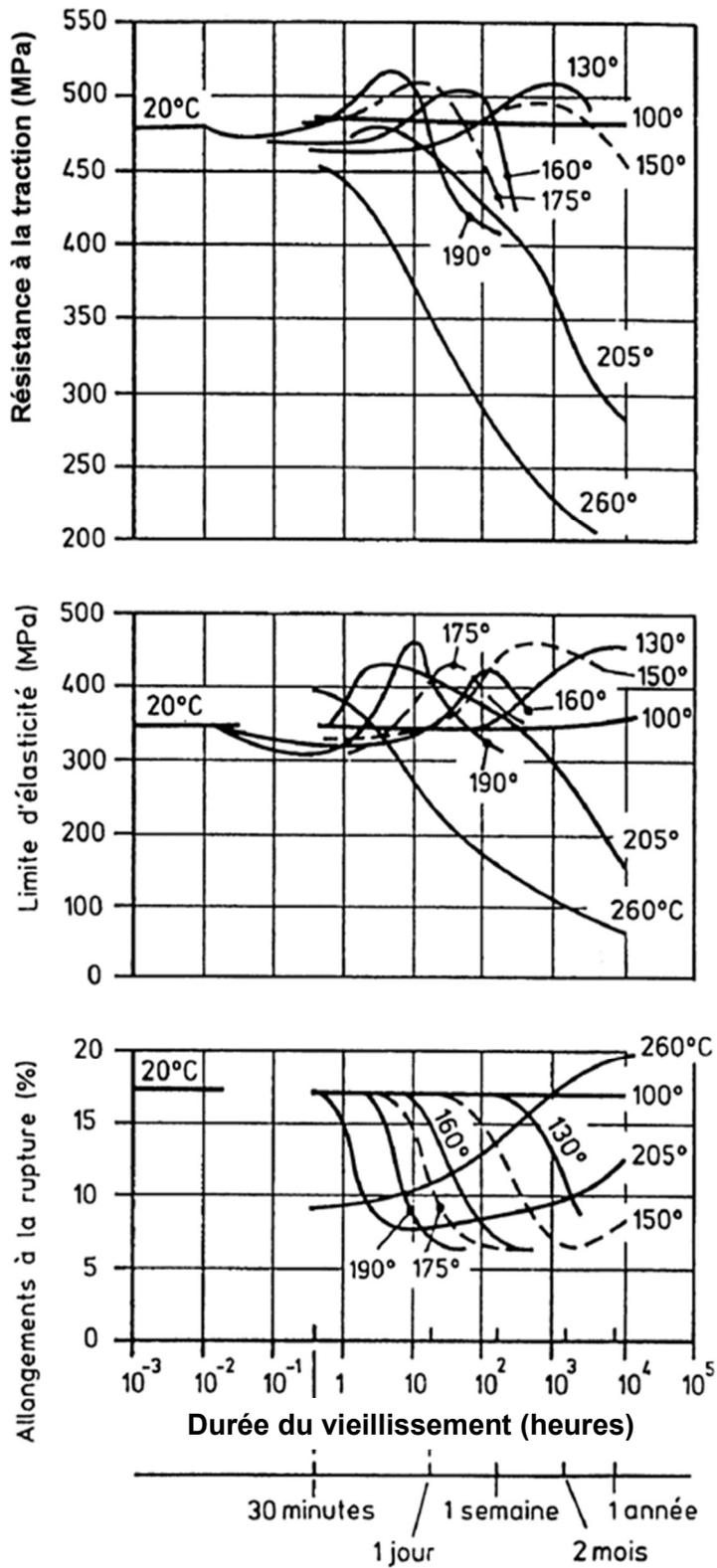


Figure 5 : Variation des propriétés mécaniques en fonction du temps à différentes températures de vieillissement pour un alliage d'aluminium 2014.

Question N°5

Polymères

(19 points)

Le nylon 6-6 est désigné ainsi parce que l'un de ses monomères (la hexaméthylène diamine) contient 6 groupes CH₂ dans sa molécule; l'autre monomère est l'acide adipique. Ces deux monomères sont représentés à la figure 6.

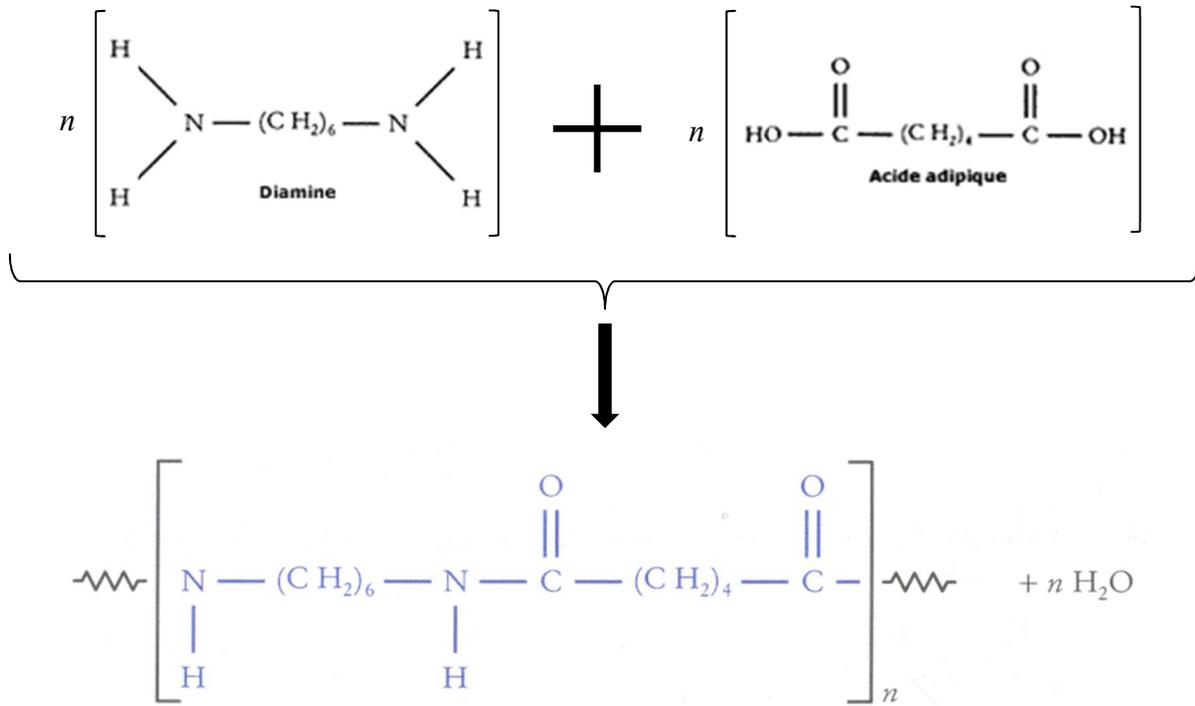


Figure 6 : Polymérisation du nylon 6-6.

- a) De quel type est la réaction de polymérisation de ces deux monomères ? Expliquez brièvement votre réponse. (2 points)
- b) Quelle est l'architecture atomique du nylon ainsi formé ? Cochez **la** case appropriée et expliquez brièvement votre choix dans votre cahier. (2 points)

Polymère ramifié	<input type="checkbox"/>	Polymère réticulé	<input type="checkbox"/>
Polymère en échelons	<input type="checkbox"/>	Polymère vulcanisé	<input type="checkbox"/>
Polymère à chaînes linéaires	<input type="checkbox"/>		

Deux échantillons, 1 et 2, de nylon 6-6 ont des masses volumiques et des pourcentages de cristallinité différents, donnés au tableau 1.

Tableau 1 : Masse volumique et cristallinité de 2 échantillons de nylon 6-6.

Échantillon	Masse volumique (g/cm ³)	Cristallinité (%)
1	1,166	52
2	1,112	18

- c) Si on suppose que la masse volumique du polymère varie linéairement en fonction du pourcentage de cristallinité, calculez la masse volumique ρ_0 du nylon 6-6 entièrement amorphe et celle, ρ_{100} , du nylon 6-6 entièrement cristallisé. (4 points)

La figure 7 représente schématiquement la variation du logarithme du module d'Young E_{10s} du nylon en fonction de la température pour 3 échantillons de nylon 6-6.

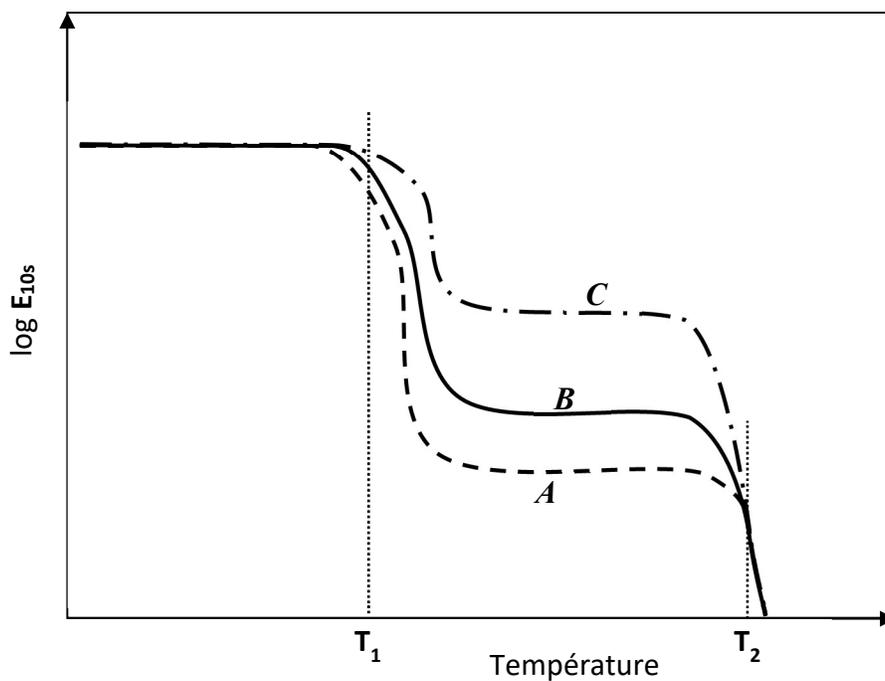


Figure 7 : Variation du module E_{10s} en fonction de la température pour 3 échantillons de nylon 6-6

- d) À quel phénomène correspondent les températures T_1 et T_2 associées à la courbe **A** de ce diagramme ? Justifiez vos réponses. (4 points)

- e) Sachant que, sur la figure 7, la courbe **B** (en trait plein) est celle qui est associée à un échantillon ayant 18 % de cristallinité, associez respectivement les courbes **A** et **C** à un échantillon ayant 52 % de cristallinité et à un échantillon entièrement amorphe. Répondez dans la boîte de réponse ci-dessous et justifiez sur votre cahier. (3 points)

Description	Courbe
Nylon 6-6 ayant 52 % de cristallinité	
Nylon 6-6 amorphe	

La disposition schématique des chaînes d'un nylon 6-6 entièrement cristallisé est représentée à la figure 8.

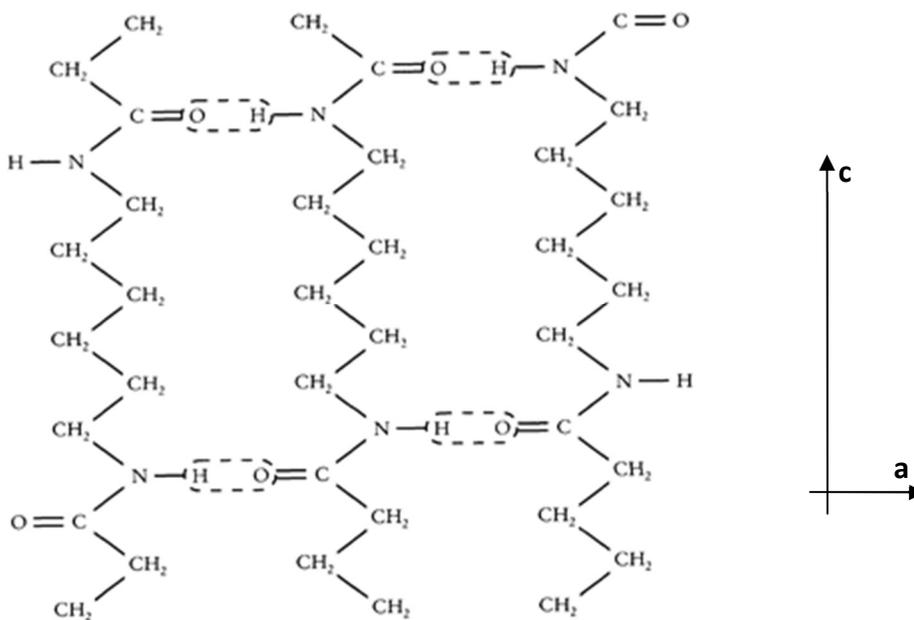


Figure 8 : Vue schématique du nylon 6-6 entièrement cristallisé

- f) Selon quelle direction (**a** ou **c**) les propriétés suivantes sont elles les plus élevées : le module d'Young **E**, le coefficient linéique de dilatation thermique α ? Répondez dans la boîte de réponse et justifiez sur votre cahier. (4 points)

Propriété	Direction selon laquelle la propriété est la plus élevée
Module d'Young E	
Coefficient linéique de dilatation thermique α	