

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC

SESSION DE MAI 2021

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

14-MT-A6 MATÉRIAUX D'INGÉNIERIE

Question N°1**Comportement en fatigue****(30 points)**

On vous demande de recommander l'emploi d'un acier ayant une bonne ténacité pour la fabrication d'une pièce où des fissures de fatigue peuvent s'amorcer en service. Vous devez choisir entre deux matériaux (A ou B) fait du même acier (même composition chimique) mais dans deux états différents. Les courbes de traction de ces matériaux A et B sont schématisées à la Figure 1.

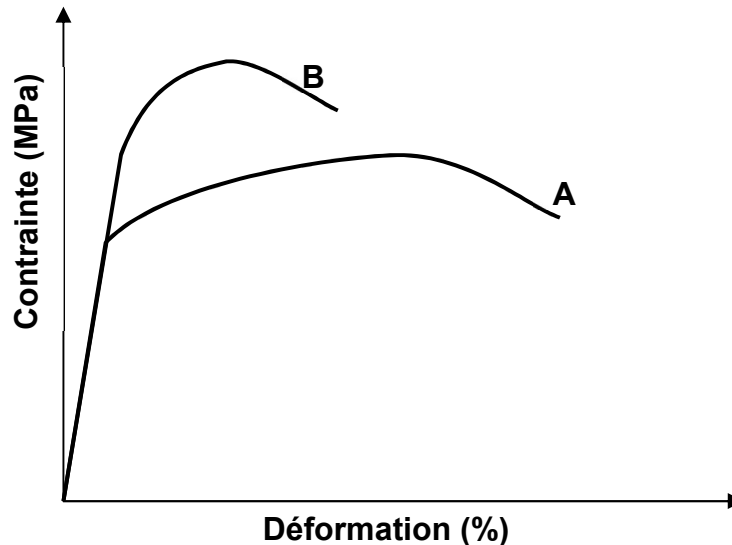


Figure 1 : Courbes de traction de l'acier à l'état A et B.

- a) Dans quel état (A ou B) l'acier présente-il la meilleure ténacité ? Expliquez votre réponse. **(2 points)**
- b) Quel traitement mécanique (sans chauffage) a-t-on pu appliquer pour faire passer l'acier de l'état A à l'état B ? Expliquez les effets de ce traitement sur le module d'Young, la limite d'élasticité, la résistance mécanique, la ductilité et la ténacité. **(6 points)**

L'acier que vous avez choisi a les propriétés mécaniques données dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques de l'acier choisi

Limite d'élasticité	400 MPa
Résistance à la traction	550 MPa
Allongement à la rupture	18 %

À présent, vous voulez connaître la résistance en fatigue de votre pièce. Cependant, vous n'avez pas accès à la courbe d'endurance du matériau. En vous aidant des propriétés mécaniques données dans le Tableau 1, du diagramme de Goodman de la Figure 2 et de la relation empirique présentée à la page suivante, répondez aux questions **c) d) et e)**.

Relation empirique pour une résistance en fatigue σ_D à 10^7 cycles et $R = -1$

$$\sigma_D \text{ à } R=-1 = 0,37R_m + 77 \text{ (MPa)}$$

- c) Déterminez la limite d'endurance, σ_D , de cet acier pour une sollicitation cyclique alternée ($R = -1$). Justifiez par un calcul. **(2 points)**
- d) Pour une sollicitation caractérisée par un rapport de contrainte, $R = 0$, la limite d'endurance du matériau est-elle plus grande ou plus petite que celle calculée pour $R = -1$? Justifiez par des explications sous forme de texte. **(3 points)**
- e) Estimez le rapport des limites d'endurance $\frac{\sigma_D \text{ à } R=-1}{\sigma_D \text{ à } R=0}$. Justifiez par des calculs ou des manipulations graphiques. Répondez sur le questionnaire au besoin. **(3 points)**

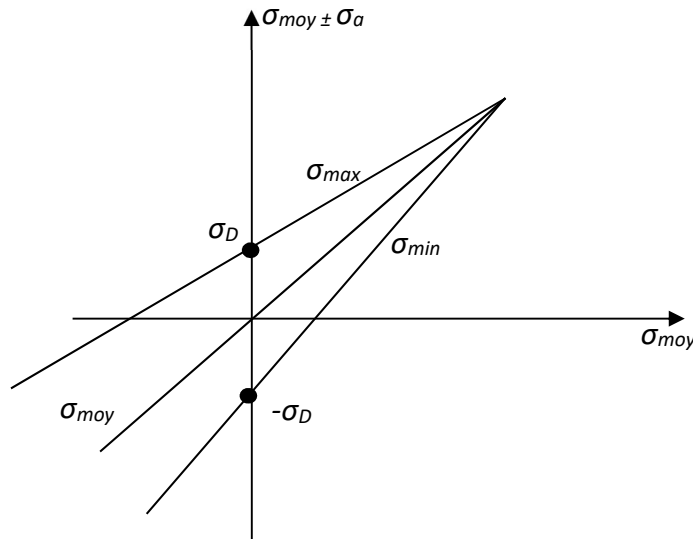


Figure 2 : Diagramme de Goodman pour une durée de vie de 10^7 cycles

Pour l'acier choisi, vous possédez une courbe donnant la vitesse de propagation de la fissure (da/dN) en fonction de la variation du facteur d'intensité de contrainte (ΔK). Cette courbe (Figure 3) a été obtenue lors d'un essai de fatigue réalisé à un rapport de contrainte $R = 0,25$. Utilisez cette courbe pour répondre aux questions **f)**, **g)** et **h)**.

- f)** Quel est le facteur critique d'intensité de contrainte, K_C , de cet acier ? Justifiez votre réponse par des calculs et montrez votre démarche sur le graphique au besoin. **(5 points)**

Vous fabriquez une pièce cylindrique d'un diamètre de 100 mm dans cet acier. Vous observez, lors de l'inspection de la pièce, la présence d'une fissure de 15 mm de profond caractérisée par un facteur géométrique de 1,12. En faisant l'hypothèse que la mécanique de la rupture linéaire élastique s'applique à ce problème

- g) Quelle contrainte maximale peut supporter la pièce sans qu'il y ait rupture ? Montrez votre démarche sur le graphique au besoin. **(3 points)**
- h) En service, une force de traction parallèle à l'axe longitudinal du cylindre sera appliquée. Elle oscillera entre 25 kN et 100 kN. Sous l'action répétée de cette force, est-ce que la pièce fissurée de 15 mm peut se rompre ? Expliquez pourquoi et montrez votre démarche sur le graphique au besoin. **(6 points)**

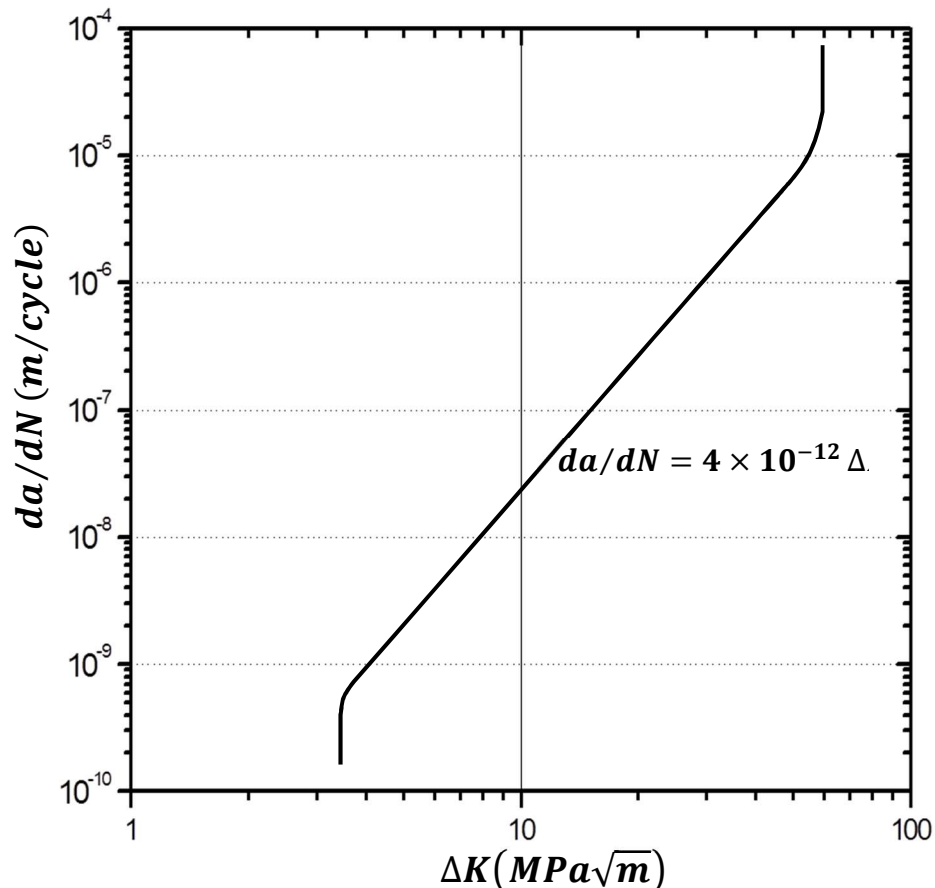


Figure 3 : Vitesse de propagation d'une fissure de fatigue (da/dN) dans l'acier en fonction de la variation du facteur d'intensité de contrainte (ΔK) pour $R = 0,25$.

Question N°2 Effet de la température sur les propriétés mécaniques (19 points)

Les essais de résilience sont simples et rapides à réaliser. Néanmoins, plusieurs précautions doivent être prises afin de produire des résultats valables. Répondez aux questions suivantes concernant les méthodes d'essai et l'interprétation des résultats.

- a) À l'aide de quelle variable mesurée calcule-t-on l'énergie absorbée par un échantillon lors de sa rupture ? Expliquez mathématiquement la relation entre cette variable et le calcul de l'énergie. **(4 points)**
- b) L'essai d'impact Izod est comparable à l'essai Charpy. Néanmoins, l'échantillon de type Izod est encastré à une seule extrémité contrairement au spécimen de type Charpy qui est appuyé à ses deux extrémités. La Figure 4 schématise l'échantillon Izod encastré juste avant l'essai d'impact. Sur quelle face l'impact avec le mouton pendule aura-t-il lieu ? Expliquez pourquoi **(3 points)**

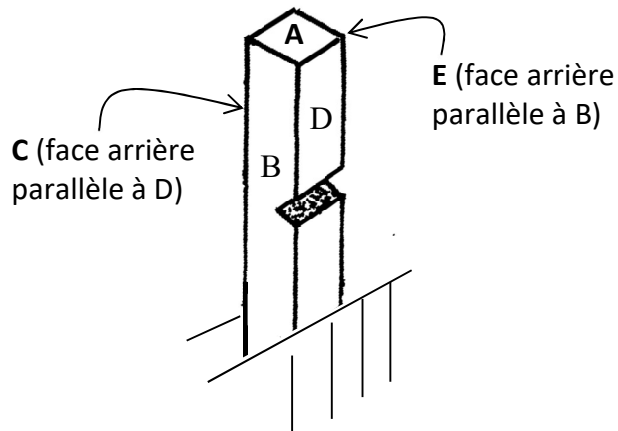


Figure 4 : Schéma de l'encastrement pour l'essai d'impact Izod

Le graphique de la Figure 5 schématise l'évolution de l'énergie absorbée en fonction de la température d'impact lors d'essais Charpy réalisés sur trois matériaux différents. En vous référant à ce graphique, répondez aux questions c), d), e), f) et g).

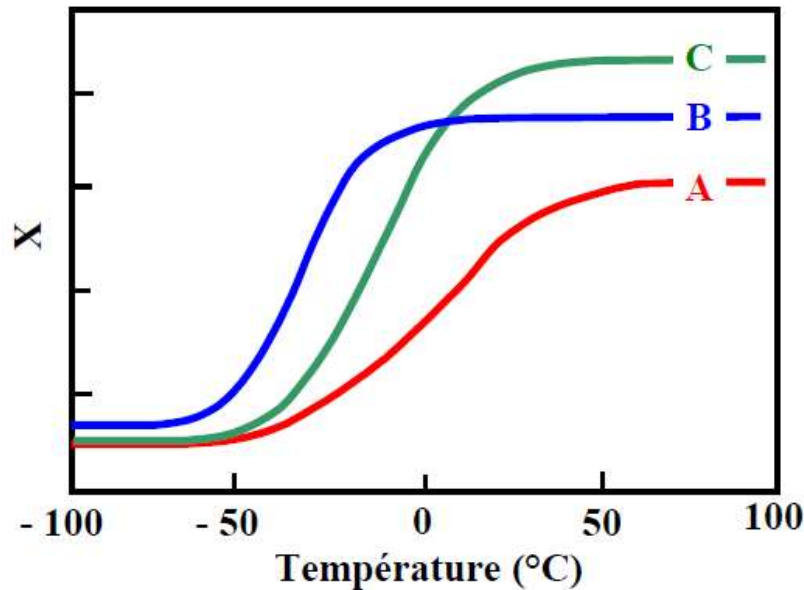


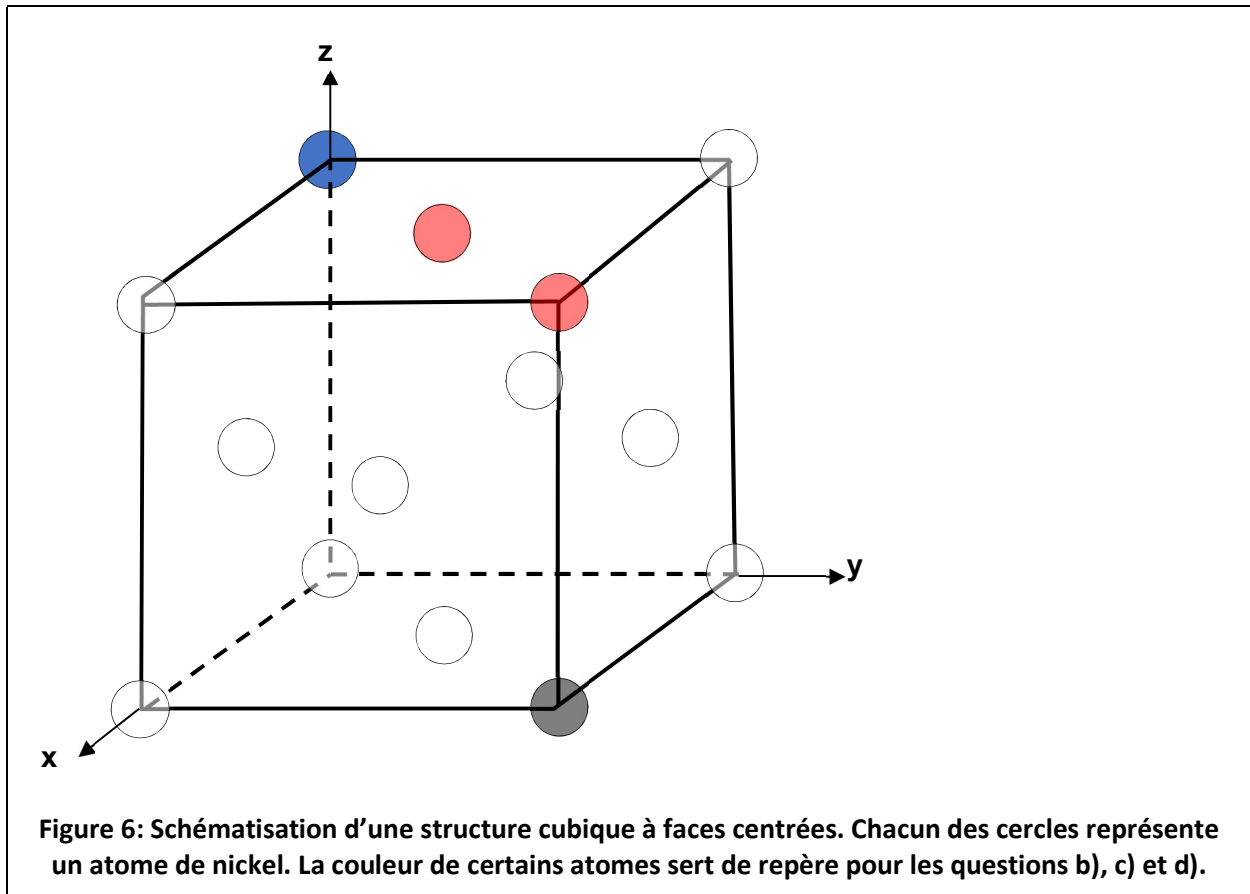
Figure 5 : Courbes de tendance représentant l'énergie absorbée en fonction de la température pour les matériaux A, B et C

- c) Quelle est la grandeur X portée en ordonnée et quelles sont ses unités ? **(2 points)**
- d) Lequel des matériaux A, B ou C a la température de transition la plus élevée ? Justifiez votre réponse par des calculs et/ou des explications graphiques. **(3 points)**
- e) Quel est le matériau le plus tenace à une température supérieure à 50°C ? Expliquez. **(2 points)**
- f) Quel matériau préférera-t-on pour une utilisation entre -25 °C et +25 °C ? Expliquez. **(2 points)**
- g) Le verre est un matériau fragile. L'énergie qu'il absorbe à l'impact est inférieure, à toutes les températures, à l'énergie du matériau A. De plus, l'énergie qu'il absorbe à l'impact est indépendante de la température. Sur la Figure 5, schématisez l'évolution de la variable X en fonction de la température pour le verre. Répondez sur le questionnaire. **(3 points)**

Question N°3 Structures cristallines des métaux et glissement

(28 points)

Les alliages de nickel sont communément utilisés pour fabriquer des aubes de turbine résistantes aux températures élevées. Considérez un cristal de nickel dont la structure est cubique à faces centrées (CFC) tel que schématisé dans la Figure 6.



- a) Calculez la densité surfacique des atomes de nickel dans le plan (110) sachant que le paramètre de maille du nickel est $a = 0,352 \text{ nm}$. Justifiez par des calculs. **(5 points)**
- b) Indexez la direction réticulaire qui contient les deux atomes rouges. Montrez votre démarche sur la Figure 6 du questionnaire au besoin. **(2 points)**
- c) Proposez les indices de Miller de 2 plans (non parallèles) qui contiennent les deux atomes rouges. Montrez votre démarche sur la Figure 6 du questionnaire au besoin. **(4 points)**
- d) Est-ce que les deux plans identifiés en c) contiennent aussi l'atome bleu ? Justifiez **(1 point)**
- e) Est-ce que les deux plans proposés en c) contiennent aussi l'atome en noir ? Expliquez votre réponse pour chacun des plans identifié en c). **(4 points)**

- f) Les alliages de nickel sont souvent utilisés sous forme monocristalline pour augmenter leur résistance au fluage. Expliquez pourquoi les monocristaux ont une meilleure résistance au fluage que les polycristaux. **(4 points)**

Une pièce monocristalline de nickel est soumise à un chargement uniaxial monotone de 9000 N. Le plan normal au vecteur de la force a une aire de 50 mm². Cette pièce a été fabriquée pour que la charge soit appliquée selon la direction [112] afin de minimiser le fluage. Sachant que la cission critique réelle de glissement de ce monocristal, τ^* , est de 75 MPa à la température de service, répondez aux questions g) et h).

- g) Est-ce que la pièce monocristalline se déformera plastiquement lorsque le chargement est appliqué ? Justifiez par des calculs. Pour simplifier les calculs, nous vous informons que l'un des systèmes de glissement sur lequel la cission est maximale est $(1\bar{1}1)[011]$. **(5 points)**
- h) Si cette pièce était polycristalline, se déformera-t-elle sous l'effet de cette charge ? Justifiez par des calculs. **(3 points)**

Question N°4 Traitement thermique par durcissement structural (15 points)

Les alliages cuprobéryllium sont utilisés dans plusieurs applications de l'industrie aéronautique pour leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance à l'oxydation.

Soit l'alliage Cu – 1,9% massique Be. Lorsque refroidi à l'équilibre, les résistances mécaniques de cet alliage sont faibles. Le durcissement par précipitation (ou durcissement structural) permet d'obtenir les propriétés mécaniques nécessaires pour une application visée, soit :

- Limite conventionnelle d'élasticité minimale de 850 MPa,
- Allongement à la rupture minimale de 20 %.

Afin de choisir les conditions du traitement thermique, vous disposez du diagramme d'équilibre et des courbes de vieillissement présentés aux Figures 7 et 8 respectivement.

- a) En observant le diagramme d'équilibre de la Figure 7, expliquez quelle caractéristique du diagramme vous permet de conclure que cet alliage peut être durci par précipitation. **(2 points)**
- b) Déterminez l'intervalle de température dans lequel il est possible de faire la mise en solution solide pour cet alliage. Expliquez votre réponse. **(3 points)**
- c) Quel élément sera mis en solution et dans quelle phase ? **(2 points)**
- d) À quoi sert la trempe (refroidissement rapide) effectuée à la suite de la mise en solution. Quelles sont la(les) phase(s) en présence après la trempe. **(4 points)**
- e) Identifier les paramètres optimaux du vieillissement qui permettront d'atteindre les propriétés nécessaires à cette application ? Expliquez votre réponse. **(4 points)**

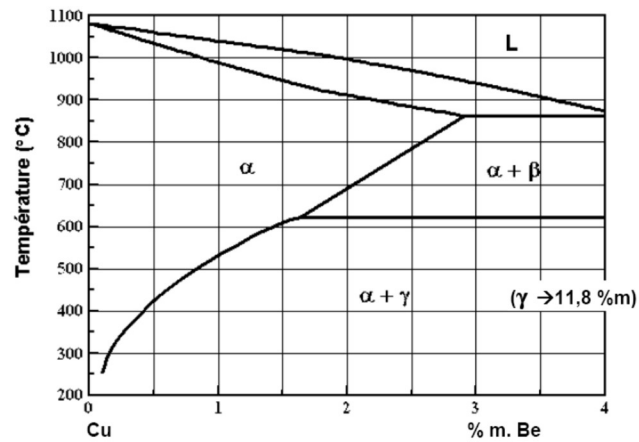


Figure 7 : Portion du diagramme d'équilibre Cu-Be en % massique de Be

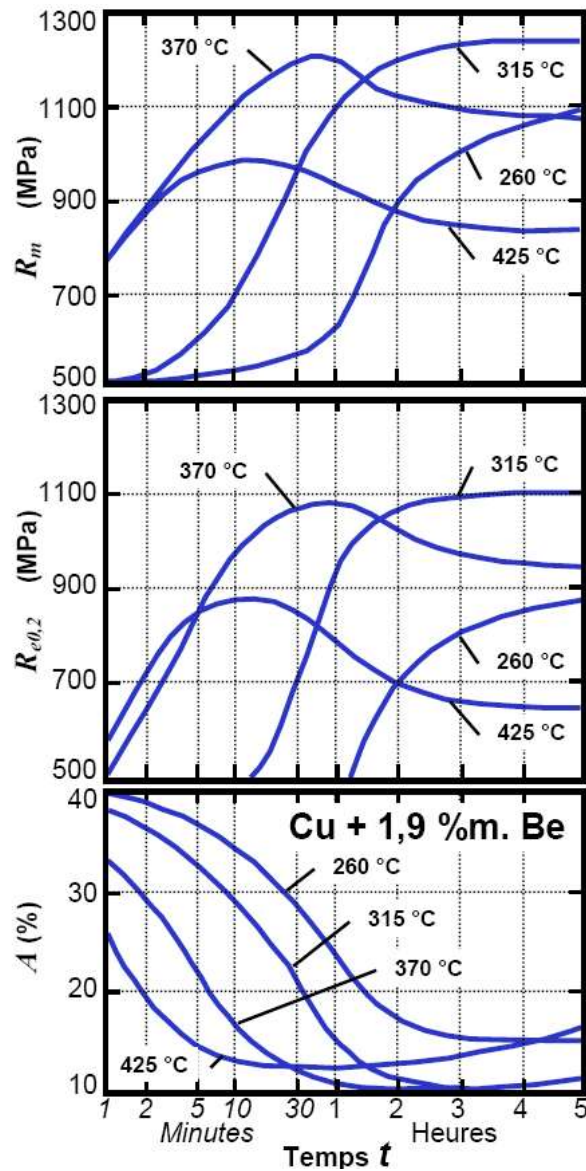


Figure 8 : Courbes de vieillissement de l'alliage Cu – 1,9% Be

Question N°5**Polymères****(8 points)**

À la Figure 9 sont schématisées trois réactions de polymérisation qui donnent lieu aux polymères A) polyéthylène, B) polychlorure de vinyle et C) bakélite. Répondez aux questions suivantes :

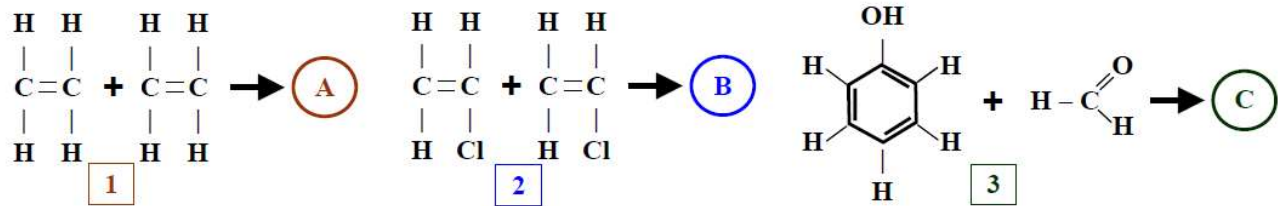


Figure 9 : Schémas de trois réactions de polymérisation

- a) Quelle(s) réaction(s) est (sont) une polymérisation par addition ? Justifiez. **(2 points)**
- b) Quel polymère A, B ou C est le plus facilement cristallisable ? Justifiez. **(2 points)**
- c) Lequel(Lesquels) de ces polymères ne présente(nt) pas d'état caoutchoutique lorsqu'on élève la température ? Justifiez. **(2 points)**
- d) Lequel(Lesquels) de ces polymères est (sont) recyclable(s) par fusion ? Justifiez. **(2 points)**