

Examen Bachelor « Transformation de phases »

20 juin 2024

Enseignant : Dr Cyril Cayron

Durée : 3 heures 09h15 – 12h15 Salle : CM1106

Matériel autorisé : calculatrice, règle, rapporteur, équerre, et toutes notes écrites de votre main

Consignes : Répondre sur feuilles libres en marquant votre nom et n° Sciper en haut de toutes les pages et en les numérotant. Les réponses peuvent être données en français ou en anglais. Indiquer le nombre total de pages à la fin. Les feuilles d'énoncés doivent être rendues en même temps que les feuilles de réponses.

Barème : il est sur 7, c'est à dire avec 1 point supplémentaire pour tenir compte de la difficulté et de la longueur de l'examen. Le détail des points est indiqué pour chaque question en bleu.

Section I (connaissances générales): 3 points

Section II (exos de thermodynamique) : 1.5 points

Section II (exo de cristallographie) : 2.5 points

Quelques constantes et rappels d'unités :

1 atm = 101325 Pa, 1 Pa = 1 N/m², 1 J = 1 N.m, 0 K = -273°C

Constante de Boltzmann $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Nombre d'Avogadro $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Densité de l'eau liquide $\rho = 1 \text{ kg/l}$, densité de la glace $\rho = 0,9 \text{ kg/l}$

Quelques acronymes provenant de l'anglais:

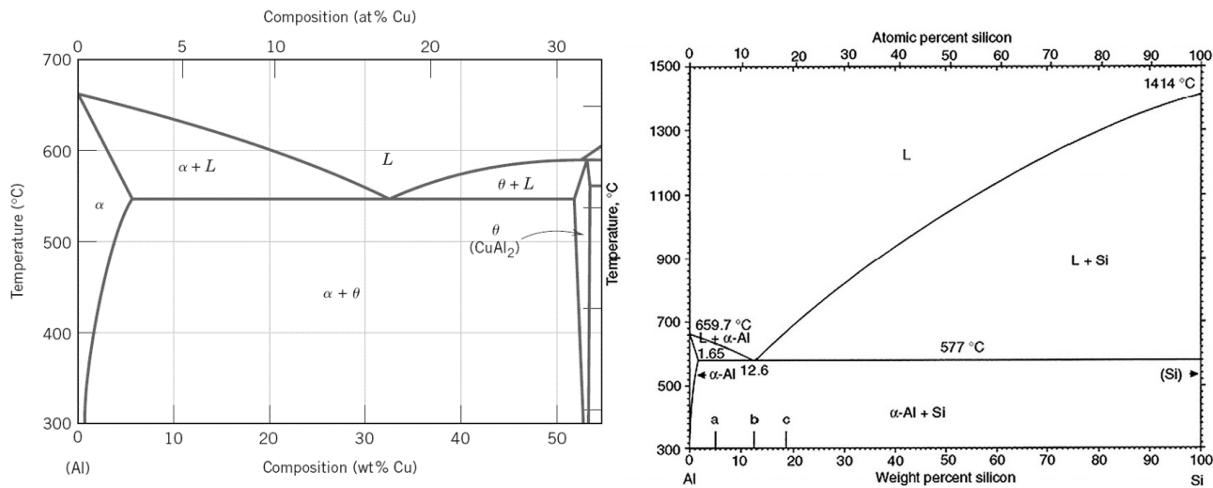
wt.% = pourcentage massique at.% = pourcentage atomique

SEM = Scanning Electron Microscope

EBSD = Electron Back Scatter Diffraction

TEM = Transmission Electron Microscopy

Quelques diagrammes de phases qui devraient vous être utiles :



Quelques formules et rappels de trigonométrie qui devraient vous être utiles :

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - a\right) = \sin(a) ; \quad \sin\left(\frac{\pi}{2} - a\right) = \cos(a) ; \quad \cos(2a) = 2 \cos^2(a) - 1$$

$$\cos(2a) = \frac{1 - \tan^2(a)}{1 + \tan^2(a)} ; \quad \sin(2a) = \frac{2 \tan(a)}{1 + \tan^2(a)}$$

Théorème de l'angle inscrit :

**Angle inscrit et angle au centre
interceptant le même arc**

Le diagramme montre un cercle avec son centre O. Un triangle ABC est inscrit dans le cercle de sorte que l'angle A est à l'angle droit. L'arc AC est intercepté par deux angles : l'angle inscrit ABC et l'angle au centre AOC.

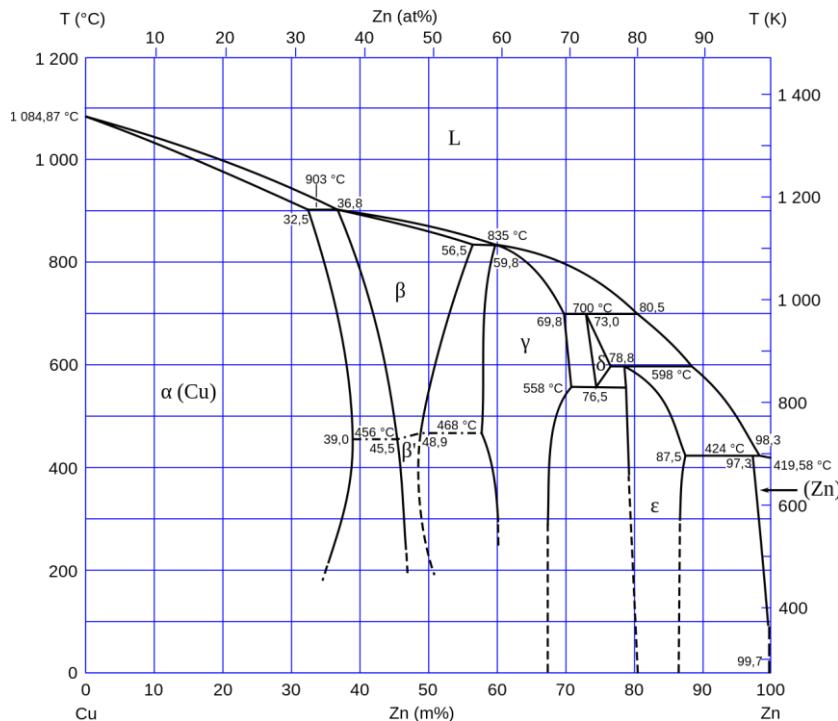
- Le triangle ABC rectangle en A est inscrit dans un demi-cercle de diamètre l'hypoténuse [BC].
- L'angle inscrit \widehat{ABC} et l'angle au centre \widehat{AOC} interceptent le même arc \widehat{AC} .

$$\widehat{ABC} = \frac{\widehat{AOC}}{2}$$

Section I Connaissances générales

Partie A: Questions de cours (répondez en quelques phrases)

- a. Pourquoi peut-on parfois le matin en hiver voir des parebrises couverts d'une fine couche de glace formant une structure dendritique ? Pourquoi n'observe-t-on pas cette structure dans les flaques d'eau gelées sur la route ? → 0.2
- b. Le diagramme de phase du laiton est représenté ci-dessous

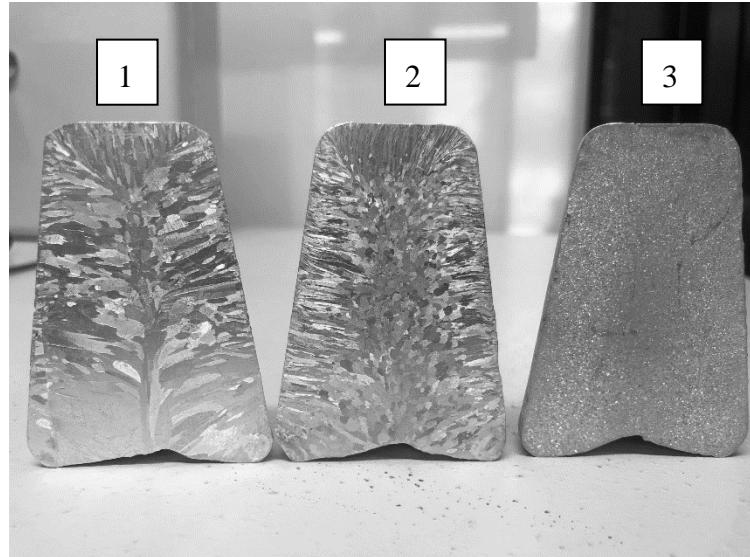


Donnez les points invariants en indiquant leur type et température. Donnez les formules stœchiométriques « idéalisées » des phases β , γ , δ et ϵ . Tracez « à la main » les courbes d'énergie de Gibbs des différents phases stables à 800°C. → 0.5

- c. Un ami artisan dans l'horlogerie de luxe vous fait part d'un problème. Les montures en or qu'il fabrique lui-même à la cire perdue présentent des « défauts ». En regardant de plus près vous vous rendez compte qu'il s'agit en fait de gros grains. Quel conseil lui donneriez-vous pour résoudre son problème ? → 0.2
- d. Pourquoi les nanoparticules d'or sont-elles généralement multimacées ? → 0.1
- e. Un alliage est solidifié dans une four Bridgman. La vitesse de déplacement de l'échantillon est augmentée au-delà de la vitesse critique. Comment varient le rayon de courbure en pointe de dendrite et l'espacement entre dendrites avec la vitesse? → 0.3

- f. Un alliage Al-3%Cu a été coulé dans un moule dans 3 conditions différentes (température du moule par exemple). Les coupes des 3 lingots sont montrées ci-dessous. Selon vous, où est le haut et le bas des lingots ? Quelles hypothèses pourraient-on faire sur les différentes conditions de solidification ?

→ 0.3



- g. Imaginons que nous connaissons pour une transformation displacive les paramètres de maille de la phase parente γ et de la phase fille α , ainsi que la matrice de correspondance $C^{\gamma \rightarrow \alpha}$. Expliquez comment calculer l'angle entre les directions \mathbf{u}' et \mathbf{v}' images par la distorsion de réseau de deux directions \mathbf{u} et \mathbf{v} de la phase parente dont les coordonnées sont connues. Même question pour l'angle entre deux plans \mathbf{p}' et \mathbf{g}' images par la distorsion de réseau de deux plans \mathbf{p} et \mathbf{g} de la phase parente dont les coordonnées sont connues.

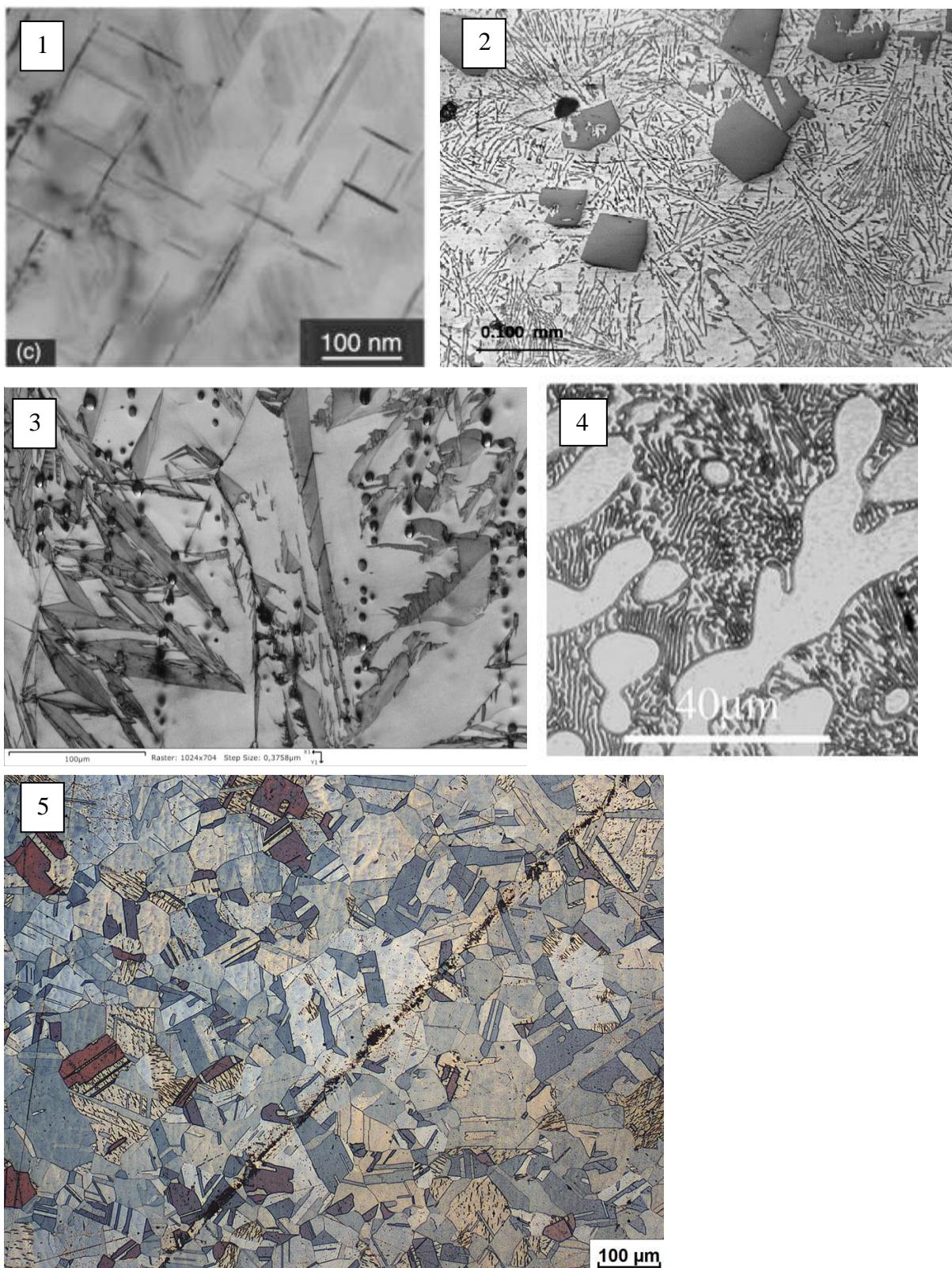
→ 0.4

Partie B: Interprétation d'images.

Des images numérotées de 1 à 5 sont montrées en Figure 2. Trouvez pour chacune d'entre elle l'intitulé correct dans la liste suivante de a) à e). Justifiez votre choix en discutant le matériau, sa microstructure, et sa formation.

0.2 par question → 1

- Image optique d'un acier austénitique recristallisé à haute température*
- Image en « Band Contrast » générée à partir d'une carte EBSD d'un acier FeNiC trempé. Les zones qui diffractent bien sont plus claires que les zones qui diffractent mal.*
- Image TEM d'un alliage d'aluminium Al-4%wtCu homogénéisé à 550°C, trempé puis revenu à 170°C/1h.*
- Image optique d'un alliage Al – 25 % wt Cu après solidification.*
- Image optique d'un alliage Al- 20 % wt Si après solidification*



Section II Exos de thermodynamique

Exo 1 :

Un seau (à vin) contient 0.5 litre d'eau à 20°C. On sort du congélateur à -15°C de la glace et on la met dans le seau. Les parois du seau sont très épaisses et ne laissent pas passer la chaleur.

- Quelle sera la température finale dans le seau si la masse de la glace est de 50 g? → 0.4
- Quelle masse de glace devrait-on mettre pour que celle-ci ne fonde pas entièrement ? → 0.2
- Imaginons que le seau contienne un mélange d'eau et de glace à l'équilibre. Que pourriez-vous proposer pour faire continuer à faire baisser la température dans le seau ? → 0.2

Données numériques:

Capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_p^l = 4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Capacité thermique massique de la glace : $c_p^g = 2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Chaleur latente de fusion de la glace $L = 334 \text{ kJ kg}^{-1}$

Exo 2 :

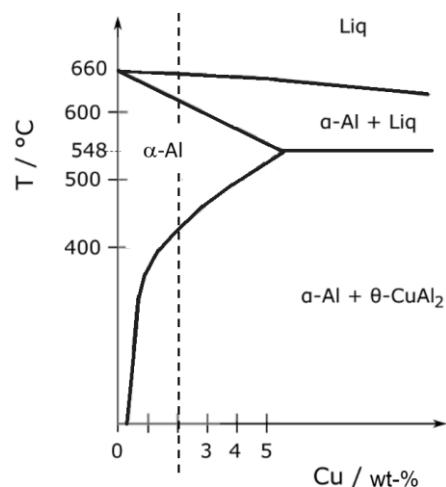
Je dispose d'un four Bridgman et je veux solidifier un alliage Al-2wtCu. J'ai réglé les zones chaudes et froides du four pour obtenir un gradient thermique de 500 K cm^{-1} .

- Quelle vitesse dois-je choisir pour éviter la formation de dendrites ? → 0.3
- Quelle sera la composition dans la partie qui a solidifié en régime stationnaire (donc loin des extrémités) ? A quelle température a eu lieu sa solidification ? → 0.2
- Que va-t-il se former en fin de solidification ? Quelle longueur cela représente-t-il ? → 0.2

Données :

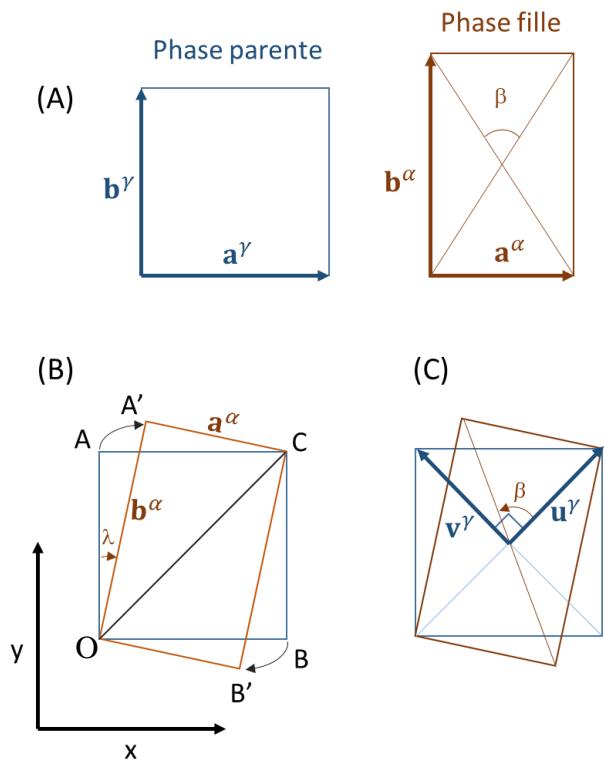
Coefficient de diffusion du cuivre dans l'aluminium liquide $D_l = 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$.

Diagramme de phase Al-Cu agrandi autour des faibles teneurs en Cu.



Section III Exo de cristallographie

Considérons le cas d'une transformation displacive entre une phase parente carrée γ avec $\|\mathbf{a}^\gamma\| = \|\mathbf{b}^\gamma\| = 1$, et une phase fille rectangle α avec $\|\mathbf{a}^\alpha\| < 1$ et $\|\mathbf{b}^\alpha\| > 1$. On note $k = \frac{\|\mathbf{a}^\alpha\|}{\|\mathbf{b}^\alpha\|} < 1$. La structure des deux phases est montrée en Fig.(A). On supposera de plus que les paramètres $\|\mathbf{a}^\alpha\|$ et $\|\mathbf{b}^\alpha\|$ sont tels qu'ils permettent une relation d'orientation parfaite entre les deux phases dans laquelle celles-ci partagent une de leurs diagonales OC comme montré en Fig.(B). Ainsi par la transformation, le point A devient A' , B devient B' , tandis que O et C sont invariants.



1. Déterminez la matrice de correspondance (elle est vraiment très simple). → 0.2
2. Nous allons calculer la matrice de distorsion par deux méthodes différentes. On vérifiera dans la question 3 qu'elles donnent le même résultat.
 - 2a. Méthode 1: On remarque que la distorsion modifie l'angle entre les demi-diagonales ($\mathbf{u}^\gamma, \mathbf{v}^\gamma$) qui passe de 90° à un angle β comme montré en Fig.(C). Calculer la matrice de distorsion angulaire dans la base ($\mathbf{u}^\gamma, \mathbf{v}^\gamma$). Calculer la matrice de passage de la base ($\mathbf{a}^\gamma, \mathbf{b}^\gamma$) vers la base ($\mathbf{u}^\gamma, \mathbf{v}^\gamma$). En déduire la matrice dans la base ($\mathbf{a}^\gamma, \mathbf{b}^\gamma$) en fonction de l'angle β . → 0.4
 - 2b. Méthode 2: On appelle λ l'angle (OA, OA'). Sur la Fig.(B) nous avons $\lambda < 0$. Décomposer la distorsion en une première matrice qui va tourner la base ($\mathbf{a}^\gamma, \mathbf{b}^\gamma$) par l'angle λ , puis en une seconde matrice qui va faire un «stretch» (un axe est rétréci et l'autre allongé) de la base qui vient d'être tournée. Cette seconde matrice s'exprimera en fonction de k . Enchaîner les deux séquences (et donc multiplier les deux matrices) pour obtenir la matrice de distorsion en fonction de k et de λ . Cette méthode s'appelle décomposition polaire. → 0.4

Aide : Si vous avez un doute dans vos calculs, vous pouvez utiliser votre règle et équerre pour déterminer approximativement la matrice de distorsion correspondant à la figure et la comparer à vos calculs en prenant les angles de la figures à savoir $\lambda \approx 12^\circ$, $\beta \approx 66^\circ$, $k \approx 0.65$.

3. Vérification des calculs faits à la question précédente :

3a. Exprimez les \cos et \sin de β en fonction de k , et écrivez la matrice de distorsion trouvée en question 2a en fonction de k uniquement. → 0.3

3b. Exprimez les \cos et \sin de λ en fonction de ceux de β , puis en fonction de k , et écrivez finalement la matrice de distorsion trouvée en question 2b en fonction de k uniquement.

→ 0.3

Si vous ne vous êtes pas trompé, les deux matrices (questions 3a et 3b) doivent être égales.

4. Déterminez géométriquement (sans calcul) le nombre de variants. → 0.3

5. On suppose que la transformation est $\gamma \rightarrow \alpha$ est induite par la contrainte. Quel type de contrainte favorise le variant montré dans la figure (Fig. B ou C): traction le long de x , compression le long de x , traction le long de y , compression le long de y , cisaillement le long de x vers la droite, cisaillement le long de x vers la gauche, cisaillement le long de y vers le haut, cisaillement le long de y vers le bas ? → 0.6

Aide : Si vous n'avez pas pu déterminer la forme générale de la matrice de distorsion en fonction de k comme demandée en question 3, utilisez la matrice « mesurée » sur la figure (voir aide de la question 2).