

Master Science et Génie des Matériaux (SGM)
M1-S1

année 2018-2019

Structure et Comportements des Matériaux

TD

Laurent GAUTRON

Laboratoire Géomatériaux et Environnement (LGE, EA 4508)
Université Paris-Est Marne-la-Vallée
Laurent.Gautron@u-pem.fr

Exercice 1

L'alliage considéré est l'alliage Al-Cu 2017 (Al-4,5%Cu) qui présente des précipités dont la taille et le nombre dépendent du traitement thermique (trempe + revenu par exemple).

Selon le mécanisme d'Orowan, quelle augmentation de contrainte de cisaillement (cission) est nécessaire au déplacement des dislocations lorsque la distance moyenne entre les précipités passe de 0,5 μm à 20 nm, par trempe puis revenu contrôlés ?

Données : module de cisaillement de l'alliage 2017, $G = 25 \text{ GPa}$; vecteur de Burgers des dislocations présentes, $b = 0,2 \text{ nm}$.

Exercice 2

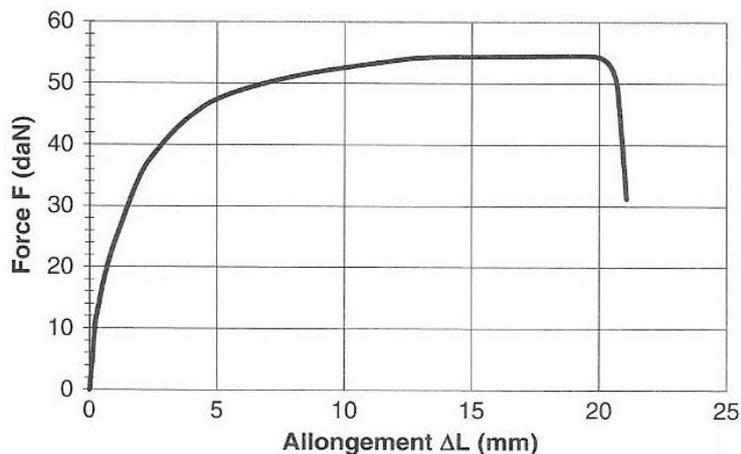
On considère un monocristal (mx) d'aluminium pur. Un essai de traction donne la limite d'élasticité de ce monocristal : $\sigma_e(\text{mx}) = 3 \text{ MPa}$.

1. On regarde l'accroissement de limite d'élasticité $\Delta\sigma_e(1)$ lorsque l'on passe d'un monocristal à un polycristal (px) d'aluminium dont la taille moyenne de grains est de 100 μm .

Calculer $\Delta\sigma_e(1)$ à l'aide de la relation de Hall-Petch :

$$\sigma_e(\text{px}) = \sigma_e(\text{mx}) + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad \text{avec } k \approx 7 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2} \text{ pour l'aluminium.}$$

2. On écrouit maintenant le polycristal d'aluminium. La courbe de traction ci-dessous représente l'évolution de la charge en fonction de l'élongation d'une éprouvette d'aluminium 1050 (état recuit) jusqu'à rupture (section initiale $S_0 = 7,5 \text{ mm}^2$, longueur initiale $L_0 = 50 \text{ mm}$).



- Comparer la limite d'élasticité estimée à partir du graphe à celle calculée dans la question précédente. Commentez les écarts.
- Estimer l'allongement relatif (en %) maximal raisonnablement admissible en plasticité avant endommagement (juste avant la striction et en considérant la rétraction élastique).
- Si on se place dans cette condition juste avant endommagement, déterminer la nouvelle limite d'élasticité à partir de la force appliquée. On donnera ensuite l'accroissement $\Delta\sigma_e(2)$ correspondant à cet état de déformation.

3. On incorpore maintenant à l'aluminium pur polycristallin des atomes de cuivre, en quantité suffisamment faible pour qu'ils restent en solution solide de substitution dans l'aluminium.

Calculer l'accroissement de limite d'élasticité $\Delta\sigma_e(3)$ lié à cet effet durcissant et qui peut être décrit par la formule approximative suivante :

$$\Delta\sigma_e(3) = G \cdot \frac{|R_{soluté} - R_{solvant}|}{R_{solvant}} \cdot \sqrt{x}$$

On donne :

G = module d'élasticité en cisaillement de l'aluminium $\approx 25,7$ GPa

$R_{solvant}$ = rayon atomique de l'aluminium $\approx 0,143$ nm

$R_{soluté}$ = rayon atomique du cuivre $\approx 0,128$ nm

x = concentration atomique de soluté (2 at%) $\approx 0,02$ (soit 4,5 m% Cu)

4. On effectue maintenant sur l'aluminium un traitement thermo-chimique qui provoque l'apparition de précipités d'une seconde phase dispersés dans les grains d'aluminium.

Calculer l'accroissement de limite d'élasticité $\Delta\sigma_e(4)$ produit par ces précipités, en utilisant la formule :

$$\Delta\sigma_e(4) = \frac{G \cdot b}{d}$$

On donne :

G = module d'élasticité en cisaillement de l'aluminium $\approx 25,7$ GPa

b = longueur du vecteur de Burgers des dislocations dans l'aluminium = 0,286 nm

d = distance moyenne entre les précipités = 22 nm

5. Calculer l'ordre de grandeur de la limite d'élasticité que l'on pourrait espérer atteindre pour de l'aluminium dans lequel on réussirait à cumuler les 4 effets durcissants précédents de manière additive. Commenter le résultat obtenu, en sachant que les alliages d'aluminium les plus résistants atteignent des limites d'élasticité de l'ordre de 600 MPa.

Exercice 3

Vous disposez de l'alliage d'aluminium 2014, qui contient 4,5% de cuivre et qui est un alliage à durcissement structural. Un client vous demande de lui fournir des pièces faites de cet alliage et qui ont les propriétés mécaniques minimales suivantes :

$$\sigma_{e0,2} \geq 400 \text{ MPa} \quad \sigma_m \geq 475 \text{ MPa} \quad A \geq 10\%$$

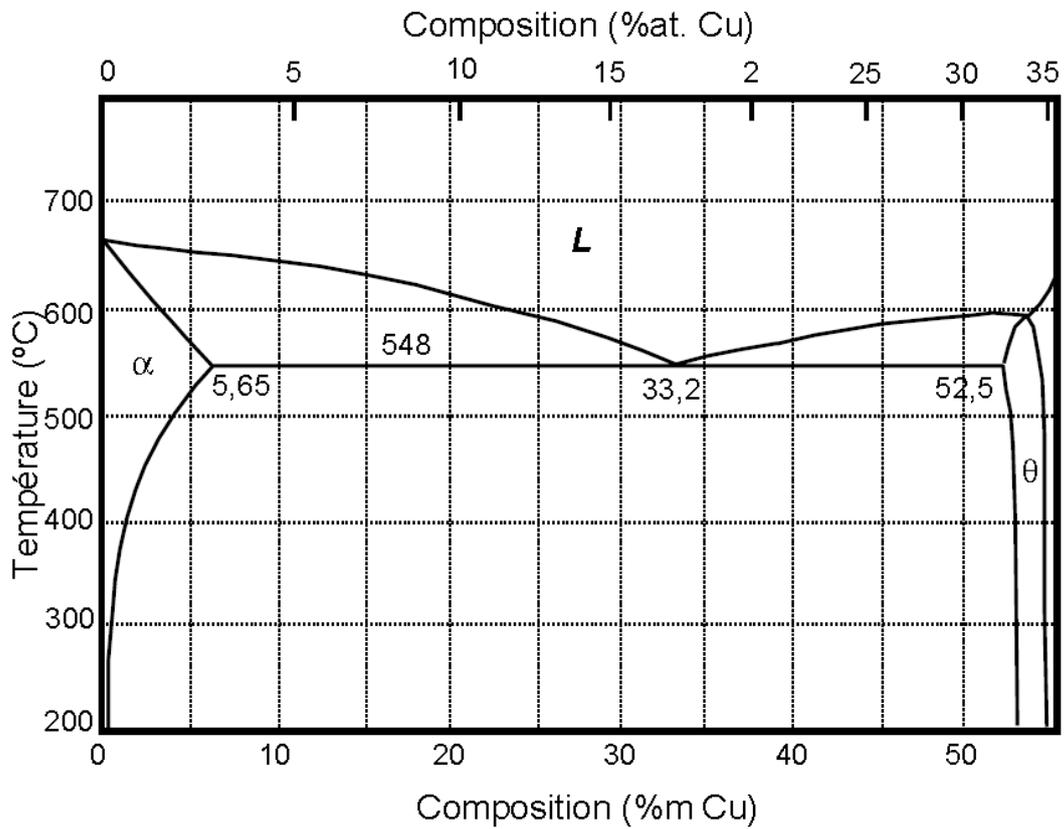
a) Quelles sont les valeurs de x et y dans le composé Al_xCu_y qui correspond à la phase θ du diagramme **Al-Cu** ?

b) Pour quel écart en température peut-on effectuer la mise en solution de l'alliage? Donner la température minimale et la température maximale pour réaliser cette opération.

c) Quelle température et quels temps (minimal et maximal) de vieillissement peut-on choisir pour obtenir les propriétés mécaniques recherchées?

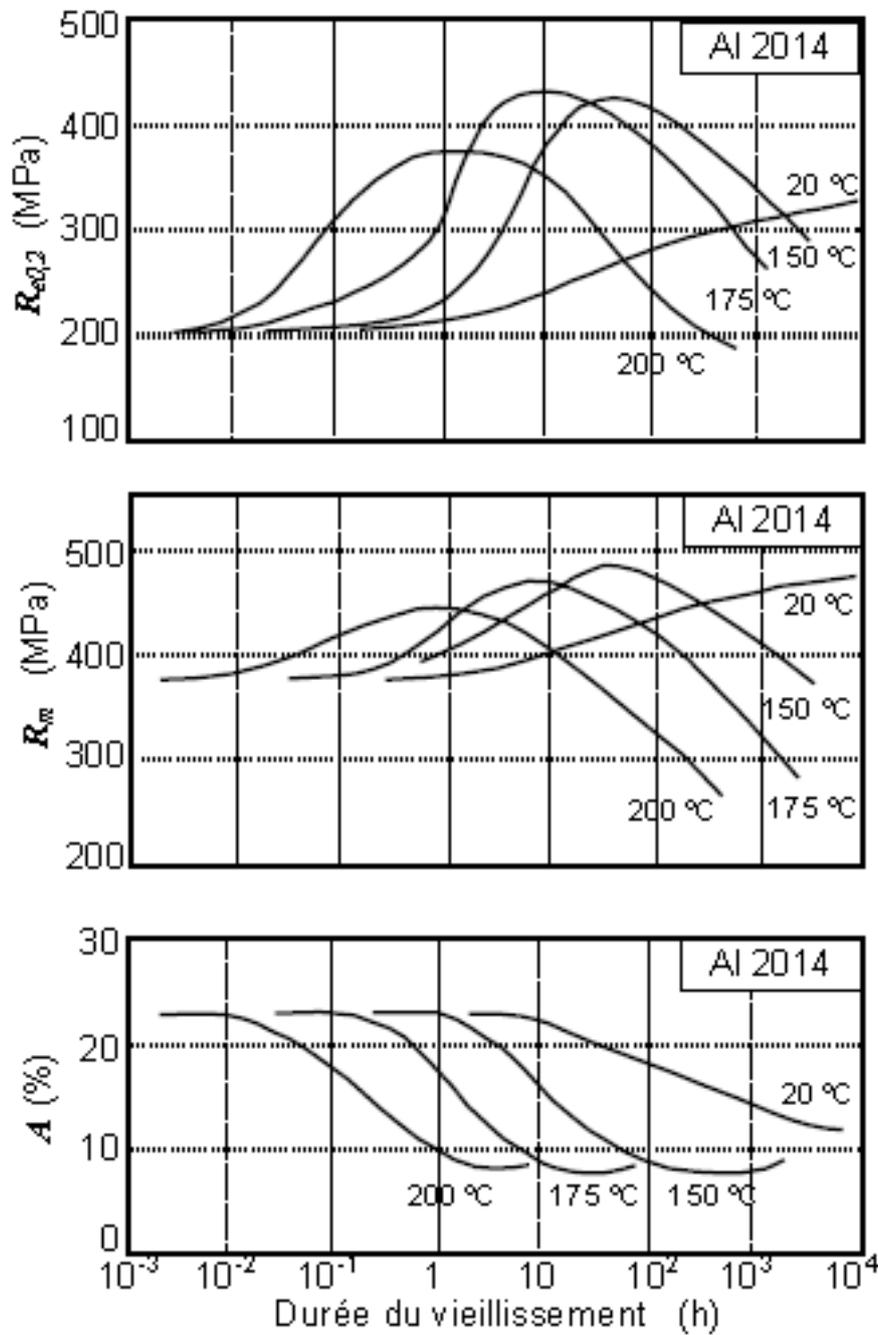
Données :

1. Diagramme de phase Al-Cu



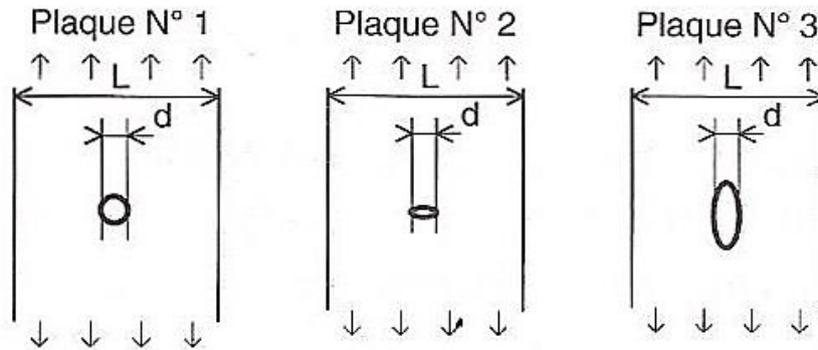
2. Evolution des propriétés mécaniques de l'alliage d'aluminium 2014 en fonction de la durée de vieillissement

Alliage 2014



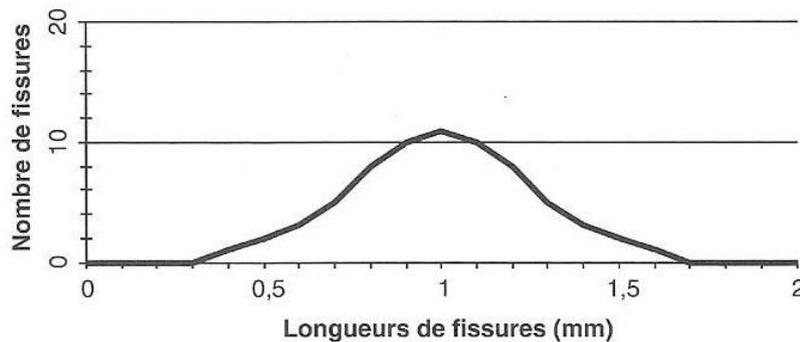
Exercice 4

1. Trois plaques identiques de largeur L sont soumises à une même contrainte de traction. Chacune présente un défaut de même largeur d ($d \ll L$), mais de forme différente comme indiqué dans la figure ci-dessous :



Laquelle de ces trois plaques présente la plus faible résistance à la rupture par propagation brutale de fissure lorsque la contrainte appliquée augmentera ? Pourquoi ?

2. La figure ci-dessous donne l'histogramme des longueurs de fissures décelées au cours du contrôle d'une pièce de structure :



Quelle longueur de fissure notée a peut-on prendre pour calculer la contrainte critique de rupture brutale de cette pièce à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \geq K_c$$

Expliquer pourquoi.

3. On souhaite doubler la taille de la pièce en conservant le même matériau et la même contrainte appliquée. A votre avis, la pièce deux fois plus grande est-elle plus sensible ou moins sensible à la rupture brutale ? Pourquoi ?

Exercice 5

Le facteur critique d'intensité de contrainte KIC est un paramètre qui caractérise la ténacité d'un matériau. Dans le cas d'un acier à haute résistance, utilisé pour la fabrication de pièces forgées, le procédé de forgeage peut introduire des défauts (facteur géométrique $\alpha = 1$), mais les méthodes

d'inspection disponibles ne permettent pas de détecter des défauts dont les dimensions sont inférieures à 5 mm.

En considérant les caractéristiques mécaniques suivantes de l'acier, calculez la contrainte maximale de traction (en MPa) à laquelle pourra être soumise une pièce forgée.

Données: $\sigma_{e0,2} = 1720$ MPa ; $\sigma_m = 2040$ MPa ; A : 12% ; $K_{IC} = 95$ MPa.m^{1/2} (95 MN.m^{-3/2})

Exercice 6

Les propriétés mécaniques des aciers (excepté leur rigidité) peuvent être modifiées par des traitements thermiques. À titre d'exemple, un acier de type 6140 (0,4% C - 1,3% Cr - 0,12% V) présente trois états A, B et C obtenus à la suite de trois traitements thermiques différents. Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques mécaniques de chacun de ces états :

ÉTAT	R _e (MPa)	R _m (MPa)	A %	Dureté HRC
A	410	820	20	27
B	1950	2150	12	52
C	2100	2200	5	53

- Classez ces trois états par ordre décroissant de ténacité.
- Calculez en première approximation le rapport « Ténacité de B / Ténacité de A »

Données :

Pour un matériau fragile, l'aire sous la courbe de traction permet d'évaluer l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette (voir figure ci-dessous, (a)). Pour un matériau ductile, on peut évaluer approximativement l'énergie nécessaire pour rompre une éprouvette en calculant l'aire S du polygone OR_eR_mA (voir figure ci-dessous, (b)) donnée par la relation :

$$S \simeq \frac{1}{2} A (R_{e0,2} + R_m)$$

A noter aussi que le retour élastique BA (voir figure ci-dessous, (b)) se produit lors de la rupture, engendrant une restitution de l'énergie élastique correspondante qui peut être calculée avec l'aire du triangle BR_mA : on considère cette aire négligeable par rapport à l'aire du polygone mentionné ci-dessus.

